

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



FACULTAD DE INGENIERÍA

TESIS

**DISEÑO DE CELDA ELECTROQUÍMICA AUTOMATIZADA,
PARA INDUCIR EL CRECIMIENTO
DE MEMBRANAS NANOPOROSAS EN ALUMINIO**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
“INGENIERO ELÉCTRICO Y ELECTRÓNICO”**

PRESENTA:

FIDEL RUBIO ALCARAZ

DIRECTORA DE TESIS: DRA. PATRICIA SANTIAGO JACINTO



CIUDAD UNIVERSITARIA

MÉXICO D.F. ENERO, 2015

CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS	v
INTRODUCCIÓN	ix
OBJETIVO FUNDAMENTAL	xi
JUSTIFICACIÓN	xii

CAPÍTULO I

Formación de membranas nanoporosas	1
I.1 Aluminio.....	2
I.1.1 Anodizado del aluminio y la alúmina porosa anódica.....	2
I.2 Estructura general de alúmina porosa anódica.....	3
I.2.1 Diámetro del poro.....	3
I.2.2 Distancia entre los poros.....	5
I.2.3 Espesor de la pared.....	6
I.2.4 Espesor de la capa barrera.....	6
I.2.5 Porosidad.....	7
I.2.6 La eliminación de la base de aluminio.....	8
I.2.7 La eliminación de la capa barrera.....	8
I.2.8 Membranas nanoporosas obtenidas en el laboratorio.....	9
I.3 Fabricación de nanoestructuras utilizando AAO como plantilla.....	10
I.4 Algunas aplicaciones de membranas y nanotubos.....	10

CAPÍTULO II

GENERALIDADES: Sistema original y sistema mejorado de la celda electroquímica	12
II.1 Sistema original de la celda electroquímica.....	13
II.1.1 Modo de operación del sistema original.....	14
II.2 Diseño del sistema mejorado de la celda electroquímica.....	15
II.2.1 Diagrama de bloques del sistema mejorado.....	16
II.2.2 Modo de operación del sistema mejorado.....	18

CAPÍTULO III

SEÑALES:

Formas de ondas, señal DC y tensión de offset	21
III.1 Primera etapa de electrónica analógica.....	22
III.1.1 Generador de forma de onda de precisión (ICL8038).....	22
III.1.2 Características del generador de ondas.....	22
III.1.2.1 Características específicas dadas por el fabricante del ICL8038.....	22
III.1.2.2 Características específicas esperadas en éste diseño con el ICL8038...	23
III.1.2.2.1 Ecuaciones principales para el diseño con el ICL8038.....	23
III.1.2.2.2 Resultados finales de nuestro generador.....	23
III.1.2.2.3 Amplitud de las formas de ondas en la etapa de baja potencia.....	27
III.1.3 Referencia de tensión para la señal DC y la tensión de offset.....	28
III.1.3.1 Diodo de referencia zener para obtener la señal DC.....	28
III.1.3.2 Rangos de la tensión de offset para la señal DC y las formas de ondas.	29
III.2 Segunda etapa de electrónica analógica.....	30
III.2.1 Acondicionamiento de la señal a media potencia.....	30
III.2.2 Características de la señal entregada a la carga.....	32

CAPÍTULO IV

AUTOMATIZACIÓN:

Dispositivos I/O y microcontrolador	34
IV.1 Selección de señal.....	35
IV.1.1 Multiplexor-demultiplexor.....	35
IV.1.1.1 Demultiplexor, LED's indicadores y buzzer.....	36
IV.2 Teclas denominadas ENTER, PAUSA Y RESET.....	36
IV.2.1 Teclado numérico.....	37
IV.2.2 Descripción de la rutina del teclado dentro del programa en BASIC....	38
IV.3 Dispositivo de salida.....	38
IV.3.1 LCD y su interfaz con microcontrolador PICAXE.....	38
IV.3.2 Reloj.....	39
IV.4 Microcontrolador y Programación PICAXE (40X2).....	40

CAPÍTULO V

COMPLEMENTOS:

Detalles para la construcción de la celda electroquímica 42

V.1 Motor y controlador L293B..... 43

V.2 Diseño mecánico de la columna..... 45

V.3 Sensores para interrumpir desplazamiento vertical..... 46

V.4 Gabinete, diseño final..... 47

CONCLUSIONES 52

APÉNDICE A

Electroquímica en membranas 54

A.1 Comportamiento electroquímico: Dentro de la celda electrolítica..... 54

A.2 El alcance de la electroquímica..... 55

A.2.1 Un sistema típico: La interfaz de metal-solución..... 55

A.3 La incorporación de aniones..... 57

A.4 Transporte de iones en las disoluciones: Como respuesta a diferentes
señales eléctricas..... 58

APÉNDICE B

Generador de forma de onda 60

B.1 Generador de forma de onda de precisión (ICL8038)..... 60

B.1.1 Información sobre la aplicación..... 60

B.2 Cálculos para el generador de formas de ondas..... 61

B.2.1 Determinación de ecuaciones principales..... 61

B.2.2 Determinación de tiempo en forma de onda..... 63

B.2.3 Cálculos para determinar R_1 , R_2 y el voltaje de barrido..... 65

B.2.4 Cálculos para fijar intervalo de corriente y obtener R_4 69

B.2.5 Determinando intervalos de frecuencia..... 73

B.3 Datos finales de nuestro generador..... 73

	APÉNDICE C	
	Capacitores	75
C.1 Principios de funcionamiento.....		75
C.2 Variables que afectan al funcionamiento de los capacitores.....		75
	APÉNDICE D	
	Configuraciones de AOP utilizados	77
	APÉNDICE E	
	Señales	78
E.1 Onda triangular.....		79
E.2 Onda cuadrada.....		81
E.3 Onda sinusoidal.....		83
	APÉNDICE F	
	Programa del editor para PICAXE	86
	APÉNDICE G	
	Diagramas electrónicos	99
	APÉNDICE H	
	Multiplexor	102
H.1 Multiplexor-demultiplexor.....		102
	GLOSARIO	103
	BIBLIOGRAFÍA	104
	MESOGRAFÍA	106
	MI SINCERO AGRADECIMIENTO A	108
	DEDICADO A	110

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

CAPÍTULO I

Formación de membranas nanoporosas

Figura 1.1 Ecuación balanceada de la reacción química de Al_2O_3	2
Figura 1.2 (A) Estructura idealizada de alúmina porosa anódica y (B) una vista en sección transversal de la capa de anodizado.....	3
Figura 1.3 Estructura de poros formados en ácido sulfúrico.....	3
Figura 1.4 Efecto de la agitación en el diámetro del poro por anodización de aluminio.	4
Figura 1.5 Parámetros de la influencia sobre el diámetro del poro de la nanoestructura formada por la anodización del aluminio en régimen potencioestático.....	5
Figura 1.6 Esquema de la cinética del crecimiento del óxido poroso registrado durante la anodización del aluminio en 20% de H_2SO_4 a $1^\circ C$ En: (A) régimen galvanostático y (B) régimen potencioestático (C) etapas de desarrollo de óxido poroso anódico.....	6
Tabla 1.a Tendencia del espesor de la capa barrera.....	7
Figura 1.7 Nanoporos de óxido de aluminio. Imágenes por microscopía electrónica de Barrido.....	9
Figura 1.8 Nanoporos de óxido de aluminio. Imágenes obtenidas por microscopía electrónica de transmisión. a) Diámetro de poro Promedio 25.88nm b) Promedio 11.22nm.....	9
Figura 1.9 COAXIAL NT OF MoS ₂ +C (HAADF) Nanotubos MoS ₂ + C.....	10
Figura 1.10 Nanosensores de hidrógeno basados en Paladio depositado A) AAO B) Deposición de capa atómica.....	11
Figura 1.11 Circuito equivalente de los sensores.....	11

CAPÍTULO II

GENERALIDADES:

Sistema original y Sistema mejorado de la celda electroquímica

Figura 2.1 Soporte para la celda electrolítica actual.....	13
Figura 2.2 Fuente variable DC. a) Vista frontal y b) Vista posterior.....	13
Figura 2.3 Celda electrolítica actual.....	14
Figura 2.4 Parte externa del sistema.....	15
Figura 2.5 Diagrama de bloques de nueva celda electroquímica.....	16
Figura 2.6 Leyenda que indica nombre del laboratorio.....	18
Figura 2.7 Leyenda que indica el ingreso en menú.....	18

Figura 2.8 Solicitud para elegir el tipo de señal.....	18
Figura 2.9 Solicitudes para ingresar los valores desde los respectivos potenciómetros en el panel de control.....	19
Figura 2.10 Leyenda para ingresar el tiempo y solicitud para introducir Tiempo TOTAL requerido para el experimento con el teclado.....	19
Figura 2.11 Con el teclado se elige entre las dos opciones: a) RESET con la Tecla etiquetada como: RESET b) INICIAR PROCESO con la Tecla etiquetada como: ENTER.....	20
Figura 2.12 Leyenda que aparece acompañada de una alarma.....	20

CAPÍTULO III

SEÑALES:

Formas de ondas, señal DC y tensión de offset

Figura 3.1 Pines de salida de ondas para ICL8038.....	22
Figura 3.2 Posible interconexión de los pines 7 y 8 para ICL8038 Propuesto por el fabricante INTERSIL.....	24
Figura 3.3 Switch rotatorio S1.....	25
Figura 3.4 Diseño de generador de ondas con ICL8038.....	26
Figura 3.5 Acondicionamiento de la amplitud de las ondas dadas en ICL8038 con AOP.....	27
Figura 3.6 Diagrama electrónico para obtener la señal DC.....	28
Figura 3.7 Tensión de offset a la entrada y salida del AOP LM675.....	29
Figura 3.8 Diagrama de la segunda etapa de electrónica analógica.....	33

CAPÍTULO IV

Automatización:

Dispositivos I/O y microcontrolador

Tabla 4.a Tabla de verdad particular con CD4052BC.....	35
Figura 4.1 Diagrama electrónico con CD4052BC.....	35
Figura 4.2 LED's conectados con CD4052BC en panel de control.....	36
Figura 4.3 Aplicación simple de una tecla.....	37
Figura 4.4 Diagrama electrónico y esquema de teclado matricial.....	37
Figura 4.5 Imagen representativa del LCD.....	39
Figura 4.6 El módulo serial LCDSERA.....	39
Figura 4.7 Diagrama electrónico del circuito DS1307.....	40
Figura 4.8 Patigrama de PICAXE-40X2.....	40
Figura 4.9 Diagrama para descargar programa en modo serial desde la computadora.	41
Figura 4.10 Pines asignados en el microcontrolador.....	41

CAPÍTULO V

COMPLEMENTOS: Detalles para la construcción de la celda electroquímica

Figura 5.1 Motorreductor DC.....	43
Figura 5.2 Opciones para disipar la temperatura en el L293B	
A) Superficie de cobre sobre la PCB B) con montaje externo.....	43
Tabla 5.a Tabla de verdad particular con L293B.....	44
Figura 5.3 Diagrama electrónico con L293B.....	44
Figura 5.4 Partes que conforman la columna para desplazamiento lineal.....	45
Figura 5.5 Representación en 3-D de las piezas alineadas y su posición en el gabinete.	46
Figura 5.6 Diagrama electrónico de emisor-receptor infrarrojo conectados al LM339.....	47
Figura 5.7 Sección inferior del gabinete y partes que lo conforman.....	48
Figura 5.8 Diseño de la columna mecánica.....	49
Figura 5.9 Vista de nodos del sistema.....	49
Figura 5.10 Vista de la malla del sistema.....	50
Figura 5.11 Gabinete.....	50
Figura 5.12 Modelado final del gabinete.....	51

APÉNDICE A

Electroquímica en membranas

Tabla A.a Tipos de celda electroquímica.....	54
Figura A.1 Celda electrolítica.....	54
Figura A.2 Estructura y procesos en la interfaz metal-disolución.....	56
Figura A.3 Distribución de la carga y el potencial en la interfaz metal-solución.....	57
Tabla A.b Relación de anodización (B_U) para varios electrolitos.....	59

APÉNDICE B

Generador de forma de onda

Figura B.1 Diagrama de bloques ICL8038.....	60
Figura B.2 Voltaje de salida de onda triangular vs frecuencia.....	64
Figura B.3 Voltaje de salida de onda sinusoidal vs frecuencia.....	64
Figura B.4 Frecuencia vs temperatura para polarización de ICL8038.....	65

APÉNDICE C

Capacitores

Figura C.1 Diagrama de capacitores en división por construcción.....	76
--	----

APÉNDICE E

Señales

Figura E.1 Linealidad de onda triangular vs frecuencia.....	79
Figura E.2 Señal triangular para ICL8038.....	79
Figura E.3 Señal cuadrada para ICL8038.....	81
Figura E.4 Distorsión de onda sinusoidal vs frecuencia.....	83
Figura E.5 Señal sinusoidal para ICL8038.....	83

APÉNDICE G

Diagramas electrónicos

99

APÉNDICE H

Multiplexor

Figura H.1 Diagrama lógico de CD4052BC.....	102
Tabla H.a Tabla de verdad CD4052BC.....	102

INTRODUCCIÓN

El aluminio es utilizado como sustrato para obtener membranas de óxido de aluminio (alúmina) por medio de una celda electroquímica en el Laboratorio de Materiales Nanoestructurados perteneciente al Departamento de Materia Condensada del Instituto de Física de la UNAM. Tanto en las investigaciones como en la industria, se consideran de gran importancia la síntesis y la caracterización de las también llamadas membranas nanoporosas en aluminio.

La celda electroquímica utilizada actualmente en el laboratorio se va a considerar como el sistema original de referencia para el nuevo diseño de la celda electroquímica automatizada que propongo en esta tesis.

El sistema original usa una fuente DC, se sensa con un multímetro, con un reloj y si se requiere se usa un termómetro analógico. Las variables que se pueden controlar o sensar son la concentración del electrolito, el voltaje, el tiempo y la temperatura. El investigador supervisa constantemente todo lo requerido durante el proceso del experimento, además cada vez que éste se realiza, debe conectar y desconectar todo el sistema.

El nuevo diseño de la celda no está basado en ningún equipo comercial, los planteamientos son propios y las ideas están desarrolladas para obtener una mayor calidad en las membranas nanoporosas. Además de la fuente con señal DC, se contará con un generador que proporciona tres señales más: sinusoidal, triangular y cuadrada; aquí las variables que se pueden controlar o sensar son la concentración del electrolito, el voltaje, la tensión de offset, la amplitud, la frecuencia y el tiempo en horas/minutos. El diseño puede crecer añadiendo un módulo para medir la corriente y un módulo que controle la temperatura para también medirla. El sistema será automatizado, de modo que el investigador no necesitará supervisar el experimento, solo introduce los datos seleccionados de las variables desde un panel; se da inicio de proceso y una alarma nos indicará el final del proceso. Es importante aclarar que el diseño de los circuitos para proporcionar la tensión de offset, la lectura de voltaje, la lectura de corriente y el módulo para control de temperatura no están desarrollados en la presente tesis; solo se dejan planteados los nodos en donde se conectarán y los pines asignados a un microcontrolador (Ver el APÉNDICE G).

El principal propósito del desarrollo de una celda electroquímica automatizada es lograr la reproducción de los experimentos para obtener membranas nanoporosas en aluminio. Por eso es importante entender cuál es el proceso de formación de estas membranas y éste se describe en el capítulo I ⁽¹⁾. Una vez que se conoce el proceso de formación, se entienden cuales son las variables que se requieren controlar en el sistema, así que se describe el sistema original y el sistema mejorado propuesto para la celda electroquímica en el capítulo II.

Posteriormente, los siguientes capítulos se dedican al diseño del sistema mejorado automatizado de la celda electroquímica. En el Capítulo III se trata la electrónica analógica utilizada y en el capítulo IV se expresa como se busca la automatización del sistema.

Finalmente en el capítulo V se plantean otros detalles en el diseño; como el de algunos circuitos, el diseño mecánico de una columna y el gabinete contenedor de todo el sistema.

Los capítulos se apoyan en los apéndices anexados, en ellos se describen con detalle los cálculos y la teoría que ayuda a reforzar lo que se desarrolla.

A lo largo de la redacción de ésta tesis, se resaltan en **letras negritas** las palabras que consideré importantes para dar un seguimiento en el desarrollo de los conceptos. La bibliografía se denota con números arábigos entre corchetes y la mesografía con letras minúsculas entre corchetes.

Para ilustrar las figuras utilicé fotografías, micrografías por microscopía electrónica, para etiquetar algunas imágenes use Microsoft Office PowerPoint 2007, los modelados 3D los diseñé en el software Anim8or Versión 0.95 Steven Glanville, (2007) y para el desarrollo de los diagramas electrónicos utilicé PCAD Versión (2001), ACCEL Technologies.

El programa para el microcontrolador lo realicé en lenguaje BASIC usando como plataforma la Version 5.2.6 of the Programming Editor software, PICAXE.

⁽¹⁾ *Para el desarrollo de éste capítulo I, me involucré en la realización de los experimentos. Sobre la síntesis y la caracterización de las membranas nanoporosas en aluminio conté con el gran apoyo de la Dra. Patricia Santiago y la Dra. Carmen Reza; así como con el excelente trabajo en la manipulación del microscopio electrónico de transmisión por Luis Rendón Vázquez*

OBJETIVO FUNDAMENTAL:

Realizar el diseño electrónico de una celda electroquímica prototipo, para la síntesis de membranas nanoporosas de Al_2O_3 , usando como electrodos aluminio de alta pureza y diferentes electrolitos. El diseño incluirá una señal DC, que es la que comúnmente se utiliza en las celdas electroquímicas. Además el presente diseño incluirá un generador de funciones para controlar cambios en la morfología y tamaño de los poros.

JUSTIFICACIÓN

Necesitamos una celda electrolítica para controlar las variables involucradas en el crecimiento de las membranas; porque las usamos como plantillas, introduciendo en sus nanoporos diferentes materiales para obtener nanoalambres o nanotubos (Con métodos térmicos o electroquímicos).

Debido a la simplicidad del sistema original con el que se experimenta en el laboratorio, se requiere diseñar una celda que además de utilizar una señal DC, contenga como fuente adicional de suministro un generador de ondas. Como razón motivacional al implementar diferentes formas de onda con cierta amplitud y frecuencia, se busca modificar la morfología en la estructura porosa del óxido de aluminio; al unir los poros con tensiones fluctuantes en ciclos simétricos, se pueden generar posibles interconexiones y construir estructuras en forma de Y.

Es importante destacar que este sistema se enfoca a la fase de desarrollo correspondiente a la nanociencia. Para poder tener las aplicaciones de la nanotecnología, necesitamos como paso anterior desarrollar la nanociencia. De modo que encontramos una razón fundamental para desarrollar instrumentos o sistemas que sean capaces de realizar físicamente los planteamientos teóricos, a través de la experimentación y la reproducción de los resultados obtenidos.

El desarrollo de nuestro instrumento expone un planteamiento en este sentido:

Producto → nanotecnología → nanociencia → instrumento.

Una vez realizada la construcción se espera partir de forma inversa; con el instrumento obtendremos resultados, a los cuales se les buscará una aplicación, para desarrollarse en un producto final:

Instrumento → nanociencia → nanotecnología → producto.

La celda electroquímica automatizada permitirá a los usuarios obtener mejores resultados en los experimentos y también realizar alguna actividad alterna durante el tiempo de proceso.

CAPÍTULO I

FORMACIÓN DE MEMBRANAS NANOPOROSAS

La nanotecnología se refiere a la manipulación y creación de nuevos materiales, utilizando las propiedades de sustancias a nivel nanométrico. Cuando el tamaño de la materia está en dimensiones de varias moléculas o átomos, se pueden tener propiedades específicas diferentes que en una misma sustancia con masa a nivel macrométrico [a].

Actualmente, se busca desarrollar un método eficaz y sencillo, para la síntesis de nanoestructuras sobre un área superficial macroscópica. La investigación se centra en materiales nanoestructurados con un arreglo periódico de nanoporos, debido a las altas expectativas en sus aplicaciones. Una matriz densa de estructura nanoporosa con empaquetado hexagonal se puede conseguir por anodización del aluminio, proceso relativamente fácil para la fabricación del material nanoestructurado. El interés científico y tecnológico por el anodizado es debido a sus diversas aplicaciones que incluyen la producción de películas dieléctricas para uso en condensadores electrolíticos, el aumento de la resistencia a la oxidación de ciertos materiales, capas decorativas y el aumento de la resistencia a la abrasión [1], entre otras.

El sistema propuesto se enfocará a utilizar la técnica electroquímica (Ver APÉNDICE A), para obtener membranas nanoporosas de óxido de aluminio por medio de una celda electrolítica. Para realizar el nuevo diseño se necesita entender qué es lo que sucede en el crecimiento de las membranas, así que se explica su proceso de formación. Una placa de aluminio puro se utiliza como electrodo y por medio del anodizado se logra sobre el aluminio, el crecimiento de una membrana nanoporosa de óxido también llamada alúmina porosa anódica.

1.1 ALUMINIO

El aluminio es el metal más abundante de la corteza terrestre. Es muy reactivo y se le forma rápidamente el óxido de aluminio cuando se expone al aire [2], en la figura 1.1 se muestra la ecuación que describe ésta reacción.

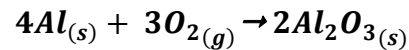


Figura 1.1 Ecuación balanceada de la reacción química de Al_2O_3 .

El óxido de aluminio es un anfótero, es decir que actúa como ácido o como base, dependiendo de las propiedades ácido-base del compuesto con el que se enfrente [2]. Para nuestro sistema el óxido de aluminio actúa como base.

También podemos inducir el crecimiento del óxido de aluminio de forma controlada mediante la técnica de anodizado con una celda electrolítica y así obtener las membranas nanoporosas de óxido de aluminio (Al_2O_3 , también llamado antiguamente alúmina). Al hacer circular una corriente eléctrica dentro de la celda electrolítica se libera el oxígeno que se dirige al ánodo, que al reaccionar con el aluminio genera una capa de óxido cuyo espesor varía con respecto al tiempo [b].

1.1.1 Anodizado del aluminio y la alúmina porosa anódica

Se denomina anodizado al proceso de pasivación electrolítico utilizado para formar capas de óxido o incrementar el espesor de la capa natural de óxido en la superficie. El anodizado se realiza en el electrodo de aluminio que funge como ánodo (electrodo positivo) y en él se obtiene la estructura conocida como alúmina porosa anódica.

Al obtener alúmina porosa anódica con el anodizado del aluminio, en general se puede dar lugar a dos tipos diferentes de película de óxido: una película anódica de tipo barrera y una película porosa de óxido.

Se acepta generalmente que la naturaleza del electrolito utilizado para el anodizado de aluminio es un factor clave que determina el tipo de óxido crecido en la superficie [1].

La transición de una película de tipo barrera al óxido poroso se produce fácilmente. El tiempo de anodización también es factor clave para el desarrollo de la estructura de óxido poroso sobre la película tipo barrera previamente formada [1].

I.2 ESTRUCTURA GENERAL DE ALÚMINA POROSA ANÓDICA

La alúmina porosa anódica crecida puede ser representada esquemáticamente como una matriz de celdas o células que contienen poros hexagonales [1], se caracterizan a menudo por parámetros tales como el diámetro del poro, la distancia entre los poros (diámetro de la celda), el espesor de la pared y el espesor de la capa barrera; como se ilustra en la figura 1.2

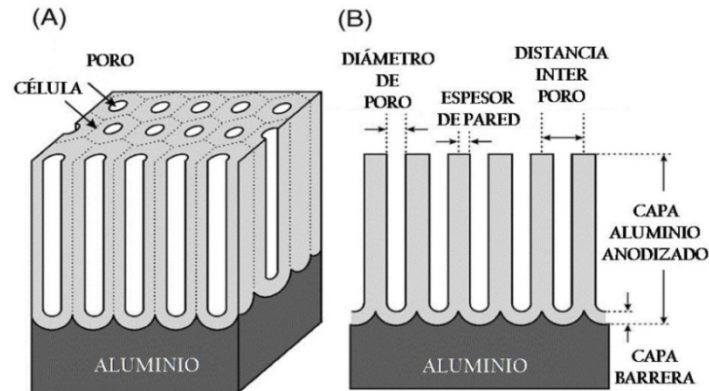


Figura 1.2 (A) Estructura idealizada de alúmina porosa anódica y (B) una vista en sección transversal de la capa de anodizado. [1]

I.2.1 Diámetro del poro

El diámetro del poro uniforme es controlado mediante la alteración de las condiciones de anodización; puede variar desde unos pocos nanómetros a cientos de nanómetros [1].

Los investigadores suelen denominar a la **capa exterior** del óxido cerca de la superficie del poro y a la **capa interior** del óxido cerca de las fronteras entre los poros, como se indica en la figura 1.3

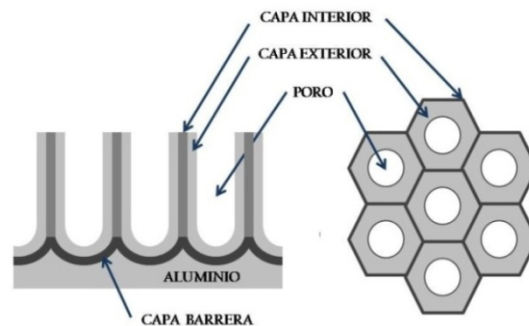


Figura 1.3 Estructura de poros formados en ácido sulfúrico. [1]

El diámetro de la capa interior del óxido no cambia significativamente con el tiempo de anodizado. La acción química disolvente a lo largo de las paredes celulares, especialmente en la capa exterior del óxido, aumenta el diámetro de los poros medidos en la superficie de la película anódica.

Ciertos estudios han reportado el diámetro de poro como un parámetro que depende del potencial de anodización o de la densidad de corriente.

Obviamente la temperatura del electrolito y la hidrodinámica de las condiciones en la celda electrolítica afectan el diámetro del poro. A temperaturas más altas de anodización hay una aceleración significativa de la disolución química de la capa exterior del óxido, especialmente en una fuerte solución ácida.

Por otro lado, la **agitación** del electrolito bajo potencial constante de anodización provoca un aumento significativo en la **temperatura local** de la capa interior del óxido, y la **densidad de corriente** aumenta. Como resultado del crecimiento de la temperatura local, la **disolución química del óxido** en la capa interna, así como la **formación de la capa de óxido anódico** se aceleran. En la figura 1.4 se representa con un diagrama lo que le sucede al diámetro del poro bajo el efecto de la agitación del electrolito.

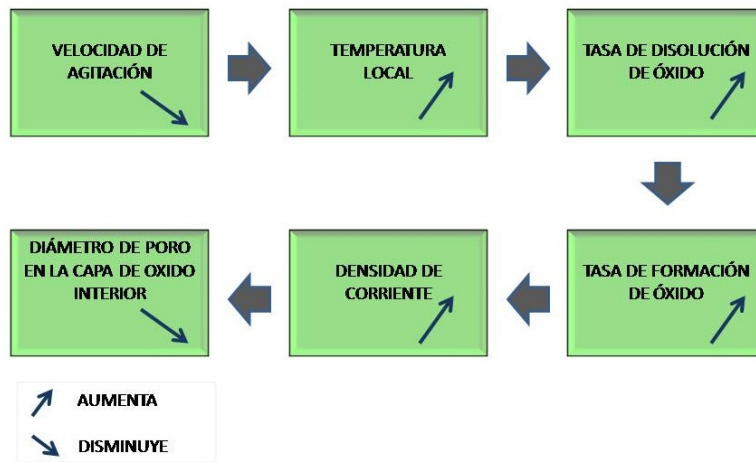


Figura 1.4 Efecto de la agitación en el diámetro del poro por anodización de aluminio. [1]

En nuestra celda electrolítica no induciremos la agitación en el electrolito; pero es importante mencionar que efecto tiene, ya que en la celda electrolítica utilizada actualmente en el laboratorio eventualmente se alteran las variables implicadas porque se agita el electrolito de manera accidental al realizar algunas mediciones de temperatura o al acomodar los electrodos durante el proceso.

Un resumen de la influencia en el diámetro del poro bajo condiciones potencioestáticas se presenta esquemáticamente en la figura 1.5

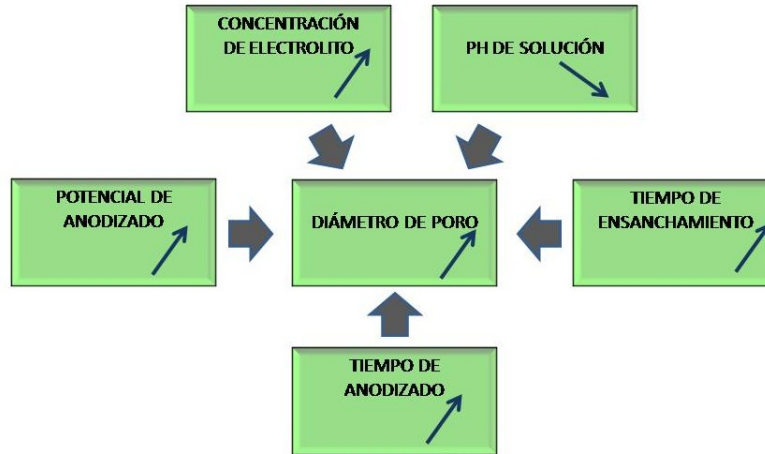


Figura 1.5 Parámetros de la influencia sobre el diámetro del poro de la nanoestructura formada por la anodización del aluminio en régimen potencioestático. [1]

El **tiempo de ensanchamiento** se refiere al cambio del diámetro que tienen los poros, basado en el ataque químico de las paredes de alúmina en disoluciones ácidas.

El diámetro del poro final de la nanoestructura formada por la anodización de aluminio, es una superposición de los parámetros que influyen. Nuestra celda automatizada trabajará bajo régimen potencioestático.

1.2.2 Distancia entre los poros

Se acepta generalmente que la distancia entre los poros de alúmina porosa anódica es linealmente proporcional al potencial de formación del crecimiento de estado estacionario de la alúmina [3].

Se ha encontrado que la distancia entre los poros es ligeramente dependiente o independiente de la temperatura de anodización para un valor constante aplicado bajo el régimen del potencial de anodización [4]. Para anodización en ácido oxálico el diámetro es casi independiente de la temperatura del electrolito [5]. Contrariamente, para el anodizado en ácido sulfúrico se ha observado una influencia de la temperatura sobre la distancia entre poros [6].

I.2.3 Espesor de la pared

Hay planteamientos de que el espesor de la pared construida durante la anodización está relacionado con el espesor de la capa barrera. Con diferentes constantes de proporcionalidad; bajo ciertos rangos de potencial de anodización [1].

I.2.4 Espesor de la capa barrera

Durante la anodización del aluminio, el crecimiento que tiene lugar en la interfaz metal-óxido en la base del poro, implica la conversión de la película de origen natural formada por contacto atmosférico que ya existía (figura 1.6 inciso C-a); ésta es continuamente disuelta y se reconstruye una nueva capa barrera (figura 1.6 inciso C-b) [1]. La nueva capa barrera dieléctrica permite el paso de corriente sólo debido a fallas existentes en su estructura.

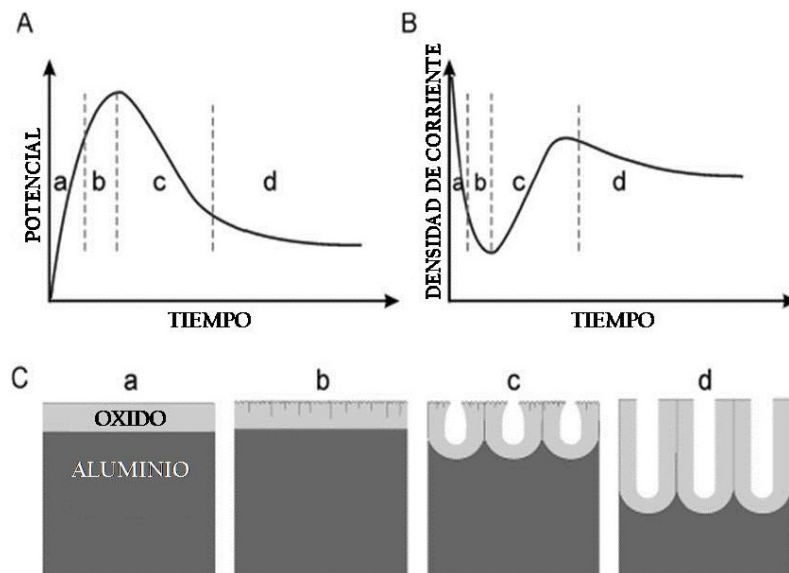


Figura 1.6 Esquema de la cinética del crecimiento del óxido poroso registrado durante la anodización del aluminio en 20% de H_2SO_4 a 1°C [1]

En: (A) régimen galvanostático y (B) régimen potencioestático.

(C) etapas de desarrollo de óxido poroso anódico

Para la capa barrera dada por un crecimiento conocido como estado estacionario, existe una dinámica de equilibrio. Durante el estado estacionario del crecimiento del óxido, se mantienen casi sin cambios: la densidad de la corriente bajo anodizado potencioestático o el potencial de anodización bajo anodizado galvanostático. Los poros aparecen como resultado de tal crecimiento de estado estacionario (figura 1.6 inciso C-c) [1]. Ver tabla A.b en APÉNDICE A

El incremento en el espesor, aumentando la concentración, sugiere que la conducción iónica se hace más fácil en virtud de la densidad de corriente ajustada y que la mayor parte de la corriente pasa a través de la capa barrera (figura 1.6 inciso C-d).

Por otra parte, la disminución en el espesor de la capa barrera con el aumento de la concentración del electrolito y la temperatura de anodización es un resultado directo de una asistencia mejorada por campo disolución de óxido en la interfaz óxido / electrolito [1]. El espesor de la capa barrera es extremadamente importante y puede determinar las aplicaciones adicionales de las nanoestructuras formadas por anodización [1]. En la Tabla 1.a se muestra la tendencia del espesor de la capa barrera, con respecto a la temperatura del electrolito y a la concentración del electrolito.

Temperatura	Potenciostato		Galvanostato	Concentración del electrolito
	<i>Potencial en aumento</i>	<i>Potencial constante</i>	<i>Densidad de corriente constante</i>	
Variando en aumento	<i>Disminuye espesor</i>	<i>Disminuye espesor</i>	<i>Aumenta espesor</i>	Valor constante
Valor constante		<i>Disminuye espesor</i>	<i>Aumenta espesor</i>	Variando en aumento
Valor constante	<i>Disminuye espesor</i>			Valor constante

Tabla 1.a Tendencia del espesor de la capa barrera. Ver APÉNDICE A (tabla A.b)

En algunos electrolitos el espesor permanece constante, al aumentar el potencial con la concentración y la temperatura constantes.

1.2.5 Porosidad

La porosidad de las nanoestructuras formadas por anodización del aluminio depende en gran medida de la tasa de crecimiento del óxido, de la velocidad de disolución química del óxido en un electrolito ácido y de las condiciones de anodización tales como: el tipo del electrolito, la concentración del electrolito, el tiempo de anodización, el potencial de anodización y la temperatura. El factor más importante que regula la porosidad de la estructura es el potencial de anodización y el pH de la disolución.

El aumento de la temperatura de anodización disminuye la porosidad de la nanoestructura formada en ácido oxálico [3]; el efecto opuesto se ha observado en ácido sulfúrico [6].

El nanomaterial con un arreglo de empaquetamiento compacto de nanoporos o de nanotubos es atractivo para la industria de la microelectrónica, debido a la simetría hexagonal de las células; la alúmina porosa anódica es una nanoestructura con alta densidad de empaquetamiento y en consecuencia el número de poros creados durante la anodización representa una de las características más importantes. Para la porosidad con una distribución hexagonal de las células en la nanoestructura, se dice que la densidad de los poros se define como un número total de poros que ocupan el área de la superficie de 1 cm^2 .

I.2.6 La eliminación de la base de aluminio

Para separar el óxido de aluminio del sustrato de aluminio, se emplea una inversión de tensión en el método electroquímico [7.8]

También se puede separar utilizando ataque electroquímico al 20% de HCl, con un potencial entre 1 y 5 V [9].

Sin embargo, el método más común se basa en la eliminación química del aluminio. Aquí el sustrato de aluminio no oxidado es generalmente disuelto mediante la inmersión por un par de horas en una disolución saturada de HgCl_2 . (por ejemplo, Refs. [10.11.12]).

El sistema mejorado aquí propuesto de la celda electrolítica utilizará la inversión de tensión, ya que se puede reutilizar el sustrato de aluminio para un nuevo experimento.

I.2.7 La eliminación de la capa barrera

Después de desprender el templete del sustrato de aluminio y antes de la deposición de metales o semiconductores en los poros, se elimina la capa barrera.

Las membranas nanoporosas de óxido de aluminio, son conocidas como membranas de alúmina porosa anódica y también se les llama membranas AAO. La preparación de la membrana AAO consta de la apertura de poros eliminando la capa barrera, generalmente mediante ataque químico del óxido; por medio de la inmersión en una solución en donde el tiempo depende directamente del espesor de la capa barrera y de las condiciones de anodización, o utilizando un haz iónico reactivo (principalmente Ar^+) [13.14.15].

Si el tiempo de apertura se prolonga, el ensanchamiento de los poros puede ocurrir simultáneamente [16]. En el laboratorio de materiales nanoestructurados también se observó que exponiendo durante bastante tiempo al ataque químico se puede destruir la membrana nanoporosa.

I.2.8 Membranas nanoporosas obtenidas en el laboratorio.

Como parte del desarrollo de la nanociencia en el laboratorio de materiales nanoestructurados se han realizado muchos experimentos para obtener las membranas nanoporosas, así que se han preparado las respectivas muestras para microscopía. Aquí se exponen a continuación resultados obtenidos de nanoporos de óxido de aluminio por método electroquímico. Los templates no son flexibles, son rígidos. En La figura 1.7 se ven los nanoporos observados por SEM y en la figura 1.8 por TEM

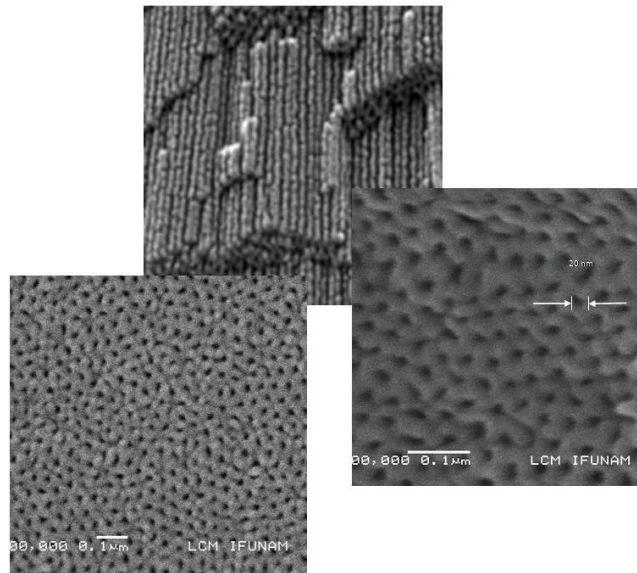


Figura 1.7 Nanoporos de óxido de aluminio. Imágenes por microscopía electrónica de barrido [17]

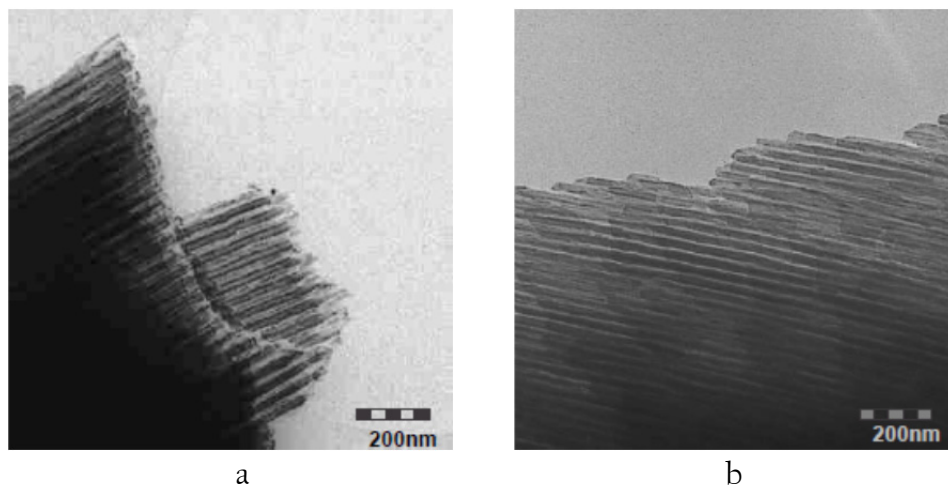


Figura 1.8 Nanoporos de óxido de aluminio. Imágenes obtenidas por microscopía electrónica de transmisión. a) Diámetro de poro Promedio 25.88nm [17]. b) Promedio 11.22nm [17].

I.3 FABRICACIÓN DE NANOESTRUCTURAS UTILIZANDO AAO COMO PLANTILLA.

En general, el uso de la alúmina porosa anódica para fabricación de los nanomateriales puede llevarse a cabo de dos maneras:

- (i) la película anódica sin desprender del sustrato de aluminio se puede utilizar directamente para la electrodeposición de metales.
- (ii) la película anódica separada del sustrato de aluminio se procesa adicionalmente en una membrana independiente con poros abiertos en la parte superior e inferior de la membrana.

La mayoría de los nanomateriales sintetizados con la ayuda de alúmina porosa anódica se pueden clasificar en los siguientes grupos: [1]

- Nanopuntos, nanoalambres, nanotubos y nanobarras de Metal.
- Nanopuntos, nanoalambres y nanotubos de óxidos metálicos.
- Nanopuntos, nanoalambres, nanopilares y arreglos de nanoporos de semiconductores.
- Polymeros, nanoalambres y nanotubos orgánicos e inorgánicos.
- Nanotubos de carbono.
- Los cristales fotónicos.
- Otros nanomateriales (membranas metálicas y de diamante, biomaterial, etc).

I.4 ALGUNAS APLICACIONES DE MEMBRANAS Y NANOTUBOS

A continuación sólo se mencionan posibles aplicaciones de las membranas nanoporosas de óxido de aluminio y no se explican los detalles sobre su síntesis y caracterización:

Nanotubo Coaxial

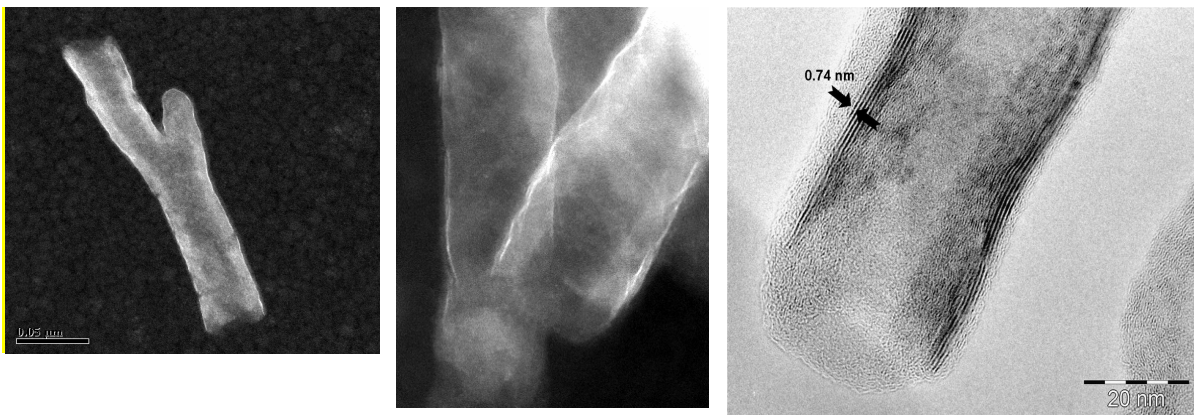


Figura I.9 COAXIAL NT OF MoS₂+C (HAADF).
Nanotubos MoS₂ + C

Nanosensores de hidrógeno basados en Paladio depositado.

Aquí la membrana nanoporosa de óxido de aluminio

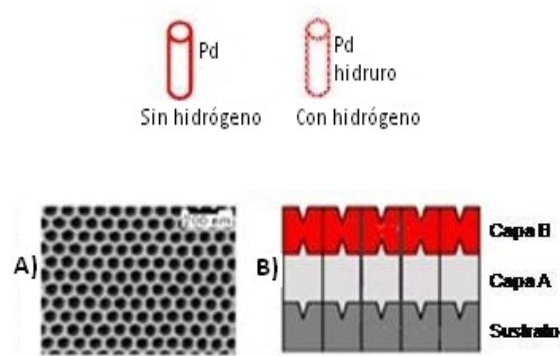


Figura 1.10 Nanosensores de hidrógeno basados en Paladio depositado
A) AAO B) Deposición de capa atómica

Mecanismo de operación: La Resistencia cambia debido a la formación de hidruro de Pd, en la presencia de hidrógeno.

Fabricación: Es una deposición de una capa atómica; se deposita paladio sobre las paredes de los nanoporos de óxido de aluminio (AAO) en la membrana.

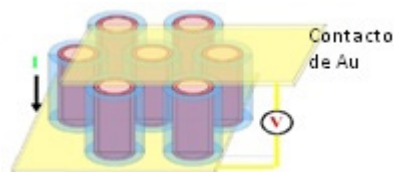


Figura 1.11 Circuito equivalente de los sensores

CAPÍTULO II

GENERALIDADES: Sistema original y sistema mejorado de la celda electroquímica

Durante un periodo de tiempo en el Laboratorio de Materiales Nanoestructurados tuve la oportunidad de hacer diversos experimentos para obtener membranas nanoporosas. Así que construí parte de la celda considerada en ésta tesis como sistema original de referencia para la reproducción de éstos experimentos; para cada experimento un sustrato de aluminio puro se sometía al pulido mecánico y al electropulido, después se ejecutaba en el sustrato el proceso de formación por anodización y de la membrana nanoporosa obtenida se preparaban las respectivas muestras para SEM o TEM.

De los tipos de celdas electroquímicas, se deriva particularmente la celda electrolítica. En este capítulo (inciso II.1) se indica de forma general cómo es el denominado sistema original, que es la celda electrolítica que se utiliza actualmente en el laboratorio. Se hace notar que mientras se trabajaba con los experimentos y se iba entendiendo progresivamente el proceso de formación de las membranas nanoporosas como se describe en el capítulo I, se fueron complementando las ideas para el desarrollo de una celda electroquímica automatizada, también descrita de forma general y denominada como el sistema mejorado en éste capítulo (inciso II.2).

Para el sistema mejorado se propone el diseño electrónico y el diseño mecánico de una columna para desplazamiento de una pieza que porta los dos electrodos, el diseño del contenedor para la celda electrolítica y el diseño del gabinete para todo el sistema.

II.1 SISTEMA ORIGINAL DE LA CELDA ELECTROQUÍMICA.

Todo el sistema trabaja con dispositivos aislados.

Para poder reproducir los experimentos con los que se obtuvieron las membranas nanoporosas en el Laboratorio de Materiales Nanoestructurados, primero diseñe y construí un soporte como el que se observa en la figura 2.1

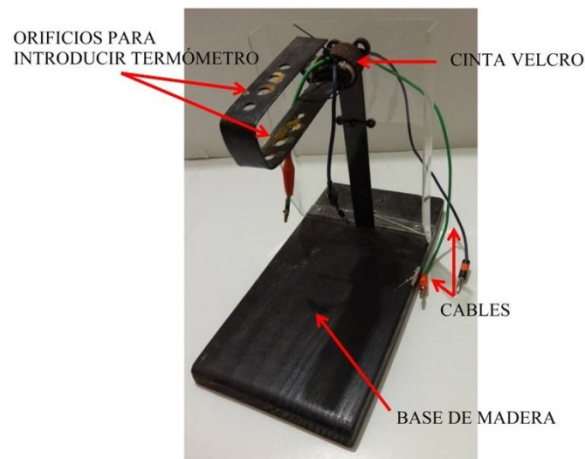


Figura 2.1 Soporte para la celda electrolítica actual.

El soporte está conformado por una solera doblada y atornillada a una base de madera. Con un taladro de banco, en la parte superior de la solera le hice cinco orificios para poder colocar verticalmente un termómetro analógico; también tiene una abrazadera de cinta nylon con cinta velcro para fijar los cables que se conectan a los electrodos.

Además diseñe y construí una fuente variable de DC con rango de 1.2 – 30 [V] a 1 [A], mostrada en la figura 2.2. Como características físicas externas de la fuente variable, se tiene en la parte posterior un switch ON-OFF y un fusible; en la parte frontal un voltímetro analógico, un potenciómetro para variar la tensión y dos terminales de salida para la señal DC (borne rojo y borne negro). El gabinete metálico de la fuente está conectado a la terminal de tierra física que lleva el cable de alimentación para la tensión de línea.

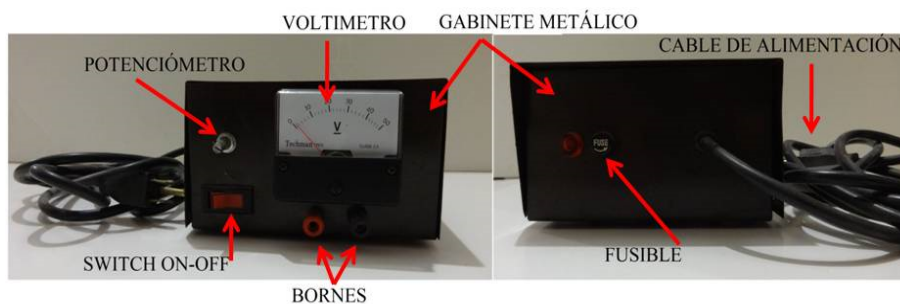


Figura 2.2 Fuente variable DC. a) Vista frontal y b) Vista posterior.

Como elementos adicionales se requieren dos cables banana- caimán (uno de color rojo y otro de color negro), un recipiente de unicel, un vaso de precipitados (de vidrio pyrex), un reloj o un cronómetro, un termómetro analógico y un multímetro.

Como reactivos se necesitan dos electrodos (en nuestro caso particular se utilizaron de aluminio con alta pureza, 99.99%) y también se requiere de un electrolito (Ver los electrolitos de tabla A.b en el APÉNDICE A)

II.1.1 Modo de operación del sistema original

Se trabaja particularmente en el laboratorio bajo la técnica descrita a continuación:

Se pone el recipiente de unicel sobre la base del soporte, después se coloca el vaso de precipitados que contiene el electrolito*. Luego se introducen al electrolito, el termómetro y los dos electrodos conectados respectivamente por medio de los cables denominados banana-caimán a las dos terminales de salida de la fuente variable de señal DC.

Por último se coloca en conexión paralela a los bornes de la fuente el multímetro para sensar el voltaje y se dispone de un reloj externo o cronómetro para medir el tiempo que tarda la realización del experimento. En la figura 2.3 se observa conectado el sistema original.

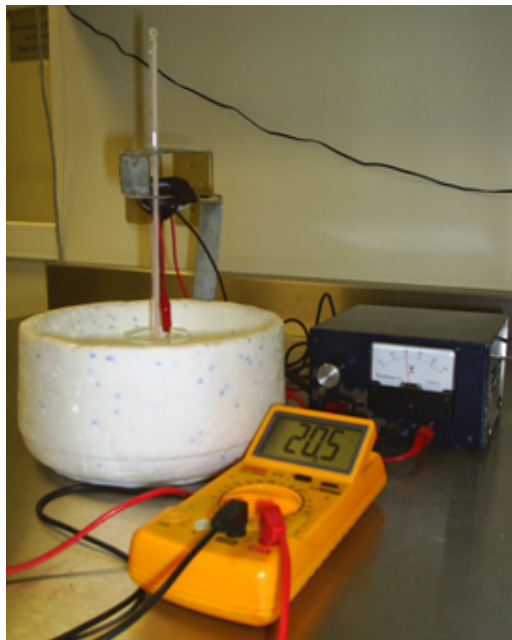


Figura 2.3 Celda electrolítica actual. [17]

*Nota: En algunos experimentos se busca controlar la temperatura, por lo que se agregan hielos alrededor del vaso de precipitados y se introduce un termómetro analógico en el electrolito.

Ya conectado el sistema se proporciona desde la fuente la señal DC, ésta cierra el circuito a través del electrolito. Es muy importante cuidar la separación entre los dos electrodos, no introducir accidentalmente las terminales de los cables (caimanes) en el electrolito y evitar la caída del termómetro analógico fuera del recipiente. El experimento se debe supervisar constantemente para procurar obtener resultados y al terminar el proceso se deben de retirar inmediatamente los dos electrodos, ya que la membrana nanoporosa lograda se comienza a desintegrar por el ataque químico del electrolito conforme transcurre el tiempo.

Como variables importantes para obtener las membranas de óxido de aluminio, nos interesan la concentración del electrolito, la tensión aplicada a los electrodos, el tiempo en que se mantiene el circuito cerrado dentro de la celda y en ocasiones la temperatura.

II.2 DISEÑO DEL SISTEMA MEJORADO DE LA CELDA ELECTROQUÍMICA.

Para conocer la estructura del nuevo diseño, en el gabinete se necesitan ubicar los componentes en la parte externa y en la parte interna.

En la parte externa del sistema se ubica:

La sección frontal superior con un panel de control físico conformado por un teclado, cuatro potenciómetros, una pantalla LCD y cuatro LED's; en la sección inferior se tiene el contenedor para colocar un recipiente de vidrio pyrex (para el electrolito), un recipiente aislante del contenedor y una pieza mecánica con las dos terminales (caimán) para colocar los dos electrodos. Ver figura 2.4

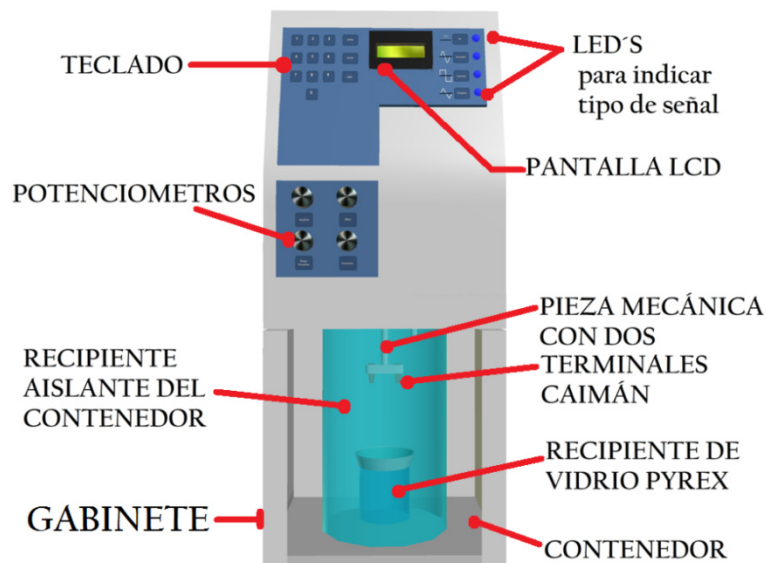


Figura 2.4 Parte externa del sistema

En la parte interna del sistema se ubica (Dentro del gabinete):

El diseño electrónico conformado por la interfaz para conectar la pantalla LCD, un microcontrolador, un circuito integrado para tener un reloj en tiempo real, un multiplexor-demultiplexor, los arreglos electrónicos para generar los diferentes tipos de señales, amplificadores operacionales y un controlador de motor de corriente directa; así como el diseño mecánico de una columna para desplazar los dos electrodos y los sensores conectados al circuito comparador de tensión para interrumpir el desplazamiento en ascenso o descenso de los dos electrodos.

II.2.1 Diagrama de bloques del sistema mejorado.

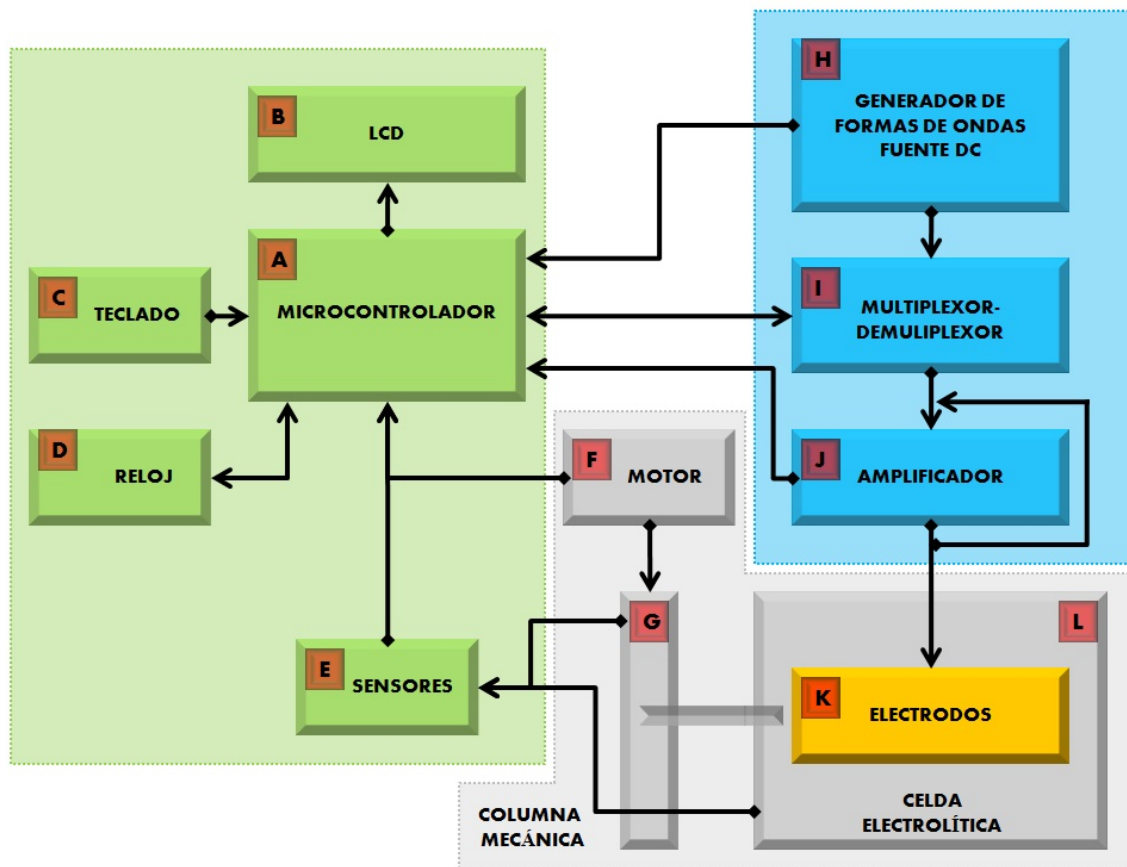


Figura 2.5 Diagrama de bloques de nueva celda electroquímica.

En la figura 2.5 el bloque **H** representa un generador de onda sinusoidal, onda triangular y onda cuadrada, se utiliza el circuito integrado ICL8038 [c.d]; aquí se pueden seleccionar los intervalos de frecuencia con un potenciómetro rotatorio conectado a 4 capacitores con distintos valores y la frecuencia en cada intervalo se ajusta por medio de otro potenciómetro. La fuente DC es planteada con el diodo zener LM385 [e] y un amplificador operacional TL084 [f].

El bloque **I** se refiere al multiplexor - demultiplexor que selecciona las señales con el circuito integrado CD4052 [g]. El bloque **J** denotado como AMPLIFICADOR incluye un circuito en configuración de malla cerrada con 4 amplificadores operacionales TL084 y un amplificador de potencia LM675 [h]; dentro de éste bloque se manipula la amplitud y la tensión de offset. La señal obtenida en la salida del amplificador se entrega a los electrodos en el bloque **K** dentro de la celda electrolítica denominada como bloque **L**.

En el bloque **A** se representa un microcontrolador con el que se envían los datos requeridos para visualizarlos en la pantalla LCD del bloque **B**. El microcontrolador recibe los pulsos del teclado del bloque **C** y las señales de los sensores conectados al comparador de tensión LM339 [i] del bloque **E**; los sensores sirven para interrumpir el ascenso o descenso de los electrodos.

Un reloj de alta precisión es configurado con el circuito integrado DS1307 [j], ilustrado en el bloque **D**. En el bloque **F** un driver, el circuito integrado L293B [k] es utilizado para controlar el torque de un motor DC que mueve un tornillo sin-fin dentro de la columna mecánica del bloque **G** para ejecutar el ascenso o descenso de los electrodos.

La parte central de la automatización de la celda electroquímica es ejecutada por el microcontrolador que programé en lenguaje BASIC bajo el sistema PICAXE, éste recibe los pulsos ingresados en el teclado y las señales que entran en sus pines designados como convertidores analógicos a digitales (ADC), por la manipulación de los diferentes potenciómetros.

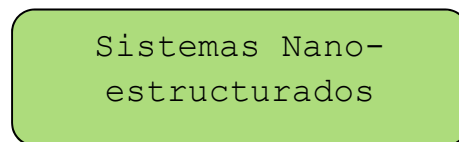
De ésta manera se selecciona a través de un menú visualizado en la pantalla LCD: uno de los cuatro tipos de señales para la celda electrolítica, la frecuencia, el voltaje, la tensión de offset, el tiempo de ejecución del experimento, y las opciones para volver acceder los datos pedidos en el menú o iniciar el proceso de la celda electroquímica. Al final, también se visualiza en la pantalla LCD la frase “FIN DE PROCESO” que es reforzada con un sonido de alarma producido por un BUZZER cada 2 segundos.

II.2.2 Modo de operación del sistema mejorado

Para realizar un experimento primero se vierte en el vaso de precipitados el electrolito que se va a utilizar, luego el vaso es colocado en el interior del contenedor y se colocan los electrodos en las terminales que están dispuestas en el contenedor.

Posteriormente el sistema de la nueva celda electroquímica automatizada se conecta a la tensión de línea $110V_{AC} / 60 \text{ Hz}$ y se inicia el sistema con el switch de encendido; entonces una pantalla LCD nos muestra de forma secuencial el siguiente menú:

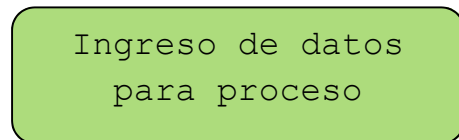
Primero durante 4 segundos, como saludo aparece la leyenda “Sistemas Nano-estructurados” que es el nombre del laboratorio en el que se pretende trabajar con este sistema. Ver la figura 2.6



Sistemas Nano-
estructurados

Figura 2.6 Leyenda que indica nombre del laboratorio

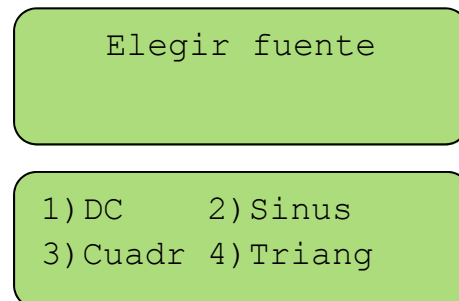
Después durante 4 segundos, aparece la leyenda “Ingreso de datos para Proceso”, como en la figura 2.7



Ingreso de datos
para proceso

Figura 2.7 Leyenda que indica el ingreso en menú.

En la figura 2.8 se ilustra la leyenda “Elegir fuente”, ésta dura 4 segundos y luego se pide teclear sólo un número del 1 al 4; así el microcontrolador envía los datos al multiplexor para seleccionar la señal requerida del generador de formas de ondas o del circuito que genera la señal DC. Al mismo tiempo en el panel frontal enciende el LED correspondiente a la señal elegida. (1) Señal DC, (2) Onda Sinusoidal, (3) Onda Cuadrada o (4) Onda Triangular.



Elegir fuente

1) DC 2) Sinus
3) Cuadr 4) Triang

Figura 2.8 Solicitud para elegir el tipo de señal.

Posteriormente con los potenciómetros se introducen los valores de la frecuencia, el voltaje y la tensión de offset, como se muestra en la figura 2.9. Cada vez que se introduce un valor se presiona la tecla de ENTER para ingresar el siguiente valor.

Es importante mencionar que cuando se elige la señal DC, referida a la opción 1) DC del menú mostrado en la figura 2.8, no se pide el valor de la frecuencia.

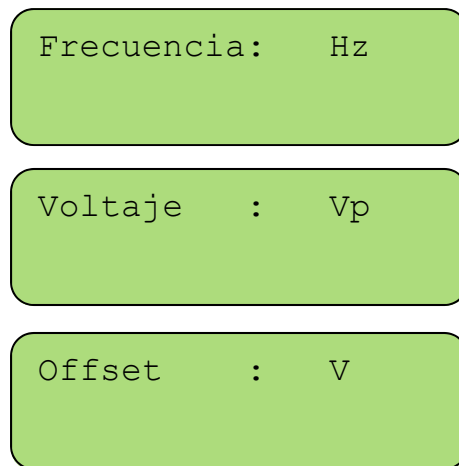


Figura 2.9 Solicitudes para ingresar los valores desde los respectivos potenciómetros en el panel de control.

Después durante 4 segundos aparece la leyenda “Ingresa Tiempo en Hrs:Min xx:xx” y con el teclado se escoge el tiempo del proceso para el experimento, solo acepta horas y minutos. Si el tiempo no es coherente, en el menú se vuelve a pedir el dato para tiempo de proceso. Ver figura 2.10

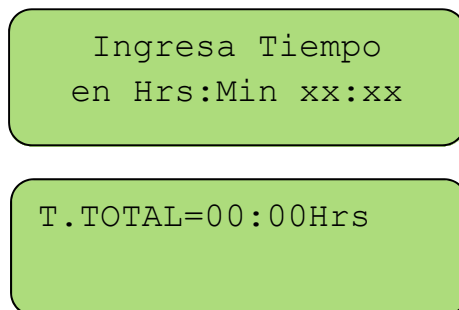


Figura 2.10 Leyenda para ingresar el tiempo y solicitud para introducir Tiempo TOTAL requerido para el experimento con el teclado.

Ya introducido el tiempo total esperado, se despliegan dos opciones en la pantalla LCD. Ver figura 2.11

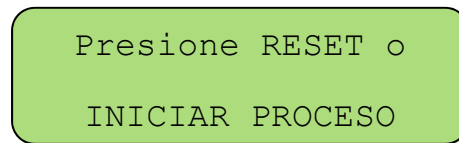


Figura 2.11 Con el teclado se elige entre las dos opciones:
a) RESET con la Tecla etiquetada como: RESET
b) INICIAR PROCESO con la Tecla etiquetada como: ENTER

Si se elige RESET el menú se reiniciará y se deberán introducir los datos de nuevo.

Si se elige INICIAR PROCESO, en ese momento el microcontrolador envía los datos al circuito integrado controlador del motor DC, entonces el motor DC va a hacer descender por la columna mecánica la pieza que porta los dos electrodos introduciéndolos en el electrolito, luego un sensor enviará un pulso al microcontrolador para detener el motor antes de que las terminales de los cables (caimanos) hagan contacto en el electrolito.

Cuando el motor se detiene, comienza el reloj a contabilizar en tiempo real, entonces con la señal elegida se cierra el circuito dentro del vaso de precipitados con el electrolito y los dos electrodos; comenzando así el proceso de formación de la membrana nanoporosa.

El proceso se detendrá hasta llegar al dato del tiempo que se había fijado en el menú y en seguida se muestra en la pantalla LCD la leyenda “Fin de proceso” (ver figura 2.12) acompañada del sonido de una alarma producida por un BUZZER. Cuando esto sucede el microcontrolador activa por segunda vez el motor DC para que ascienda por la columna mecánica la pieza que extrae los dos electrodos del electrolito y entonces se abre el circuito; el motor se detendrá hasta que un sensor en la parte superior de la columna sea activado, enviando un pulso al microcontrolador.

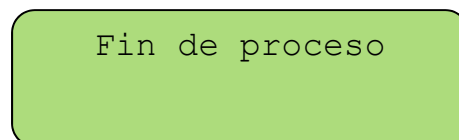


Figura 2.12 Leyenda que aparece acompañada de una alarma.

CAPÍTULO III

SEÑALES: Formas de ondas, señal DC y tensión de offset

Este capítulo dedicado a la electrónica analógica, se divide en dos etapas.

En la primera etapa (inciso III.1) se trata la generación de tres formas de onda, la obtención de la señal DC y de la tensión de offset; utilizando un circuito generador de formas de ondas, tensiones de referencias con diodos zener y amplificadores operacionales. Dentro de las características que podemos encontrar en este generador están el control de la frecuencia, la amplitud, la simetría y el ciclo de trabajo. La modulación de frecuencia y el barrido pueden ser completados con un voltaje externo. El rango de frecuencias está limitado en nuestra aplicación (en frecuencias muy elevadas, se debe tener cuidado hasta en el diseño del PCB para evitar efectos indeseados)

La señal DC es generada con una tensión de referencia dada por un diodo zener y acondicionada con un amplificador operacional inversor. En ésta tesis, solo se plantean los rangos de la tensión de offset que se aplican a las ondas y a la señal DC.

La segunda etapa (inciso III.2) trata la amplificación de las señales a media potencia. Se considera a partir del acondicionamiento de las cuatro señales disponibles por medio de una configuración en malla cerrada con amplificadores operacionales TL084 y el amplificador operacional de potencia LM675.

Las configuraciones de los circuitos integrados con amplificadores operacionales (AOP) utilizados son el amplificador inversor, el amplificador sumador inversor y el amplificador diferencial o sustractor. Ver APÉNDICE D

Se debe garantizar una amplitud estable de la señal, ya sea dentro de una misma escala y variando la frecuencia; así como al pasar de una escala a otra. Por su parte, la frecuencia debe también mantenerse lo más estable posible durante el trabajo con el equipo y en un cierto rango de condiciones ambientales (calor, humedad, etc.).

III.1 PRIMERA ETAPA DE ELECTRÓNICA ANALÓGICA

III.1.1 GENERADOR DE FORMA DE ONDA DE PRECISIÓN (ICL8038)

Al generador de formas de ondas también se le llama generador de funciones o generador de señales; éste es un equipo electrónico con señales de parámetros variables, construido con base al circuito integrado ICL8038 (Intersil).

En el diseño del circuito, las formas de ondas generadas están disponibles al mismo tiempo en el pin2, el pin3 y el pin9 respectivamente a la onda sinusoidal, la onda triangular y la onda cuadrada, ver figura 3.1. Las ondas a las salidas del integrado son estables a las variaciones de la fuente de alimentación y a un amplio rango de temperatura.

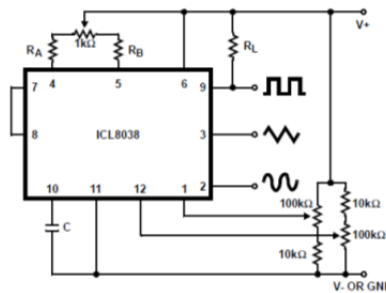


Figura 3.1 Pines de salida de ondas para ICL8038

III.1.2 Características del generador de ondas

El fabricante INTERSIL del circuito integrado ICL8038 muestra en sus hojas de especificaciones los datos, los rangos y valores en los que puede trabajar. Sus características específicas mostradas en el inciso III.1.2.1, son acotadas para nuestro diseño como se exponen en el inciso III.1.2.2 y para ello hay que manipular las ecuaciones convenientes encontrando así los resultados que satisfacen las características esperadas.

III.1.2.1 Características específicas dadas por el fabricante del ICL8038

- Desviación de la frecuencia $< 250 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$
(Bajo drift de frecuencia con temperatura) desviación con la temperatura
- Formas de onda simultaneas a la salida: sinusoidal, cuadrada o pulsos, y triangular o diente de sierra.
- Baja distorsión en la salida de onda sinusoidal: 1%
- Alta linealidad en la salida de onda triangular: 0.1%
- Ancho rango de frecuencia: 0.001 Hz a 300KHz
- Ciclo de trabajo variable 2% a 98%
- Nivel de salidas.....TTL a 28V
- Componentes externos requeridos.

III.1.2.2 Características específicas esperadas en éste diseño con el ICL8038

- Desviación de la frecuencia < 100 ppm/°C
- Formas de ondas simultaneas a la salida: sinusoidal, cuadrada y triangular
- Distorsión de la senoide: 0.5% < Distorsión < 1%
- Linealidad de la onda triangular: < 0.1%
- Rango de frecuencia: 1Hz – 10kHz
- Ciclo de trabajo constante: 50% / 50% (Se fijó respectivamente para el semiciclo positivo y semiciclo negativo de cada tipo de señal)
- Nivel de salida fija: 2Vpico a pico (Antes del amplificador de media potencia)

III.1.2.2.1 Ecuaciones principales para el diseño con el ICL8038

Para poder obtener las características específicas escritas en el inciso III.1.2.2, manipulé algebraicamente las ecuaciones propuestas por el fabricante del ICL8038, de modo que se obtienen las nuevas ecuaciones utilizadas para el diseño del generador de ondas; éstas se muestran continuación (Para los cálculos detallados ver APÉNDICE B):

$$I = \left(\frac{R_1[|(V_{cc+})| + |(V_{cc-})|]}{R_1 + R_2} \right) \left(\frac{1}{R} \right) \quad (\text{ec A})$$

$$t_1 = \frac{RC}{3 \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right)} \quad (\text{ec B})$$

$$t_2 = \frac{RC}{3 \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right)} \quad (\text{ec C})$$

$$f = \frac{3}{2} \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) \left(\frac{1}{RC} \right) \quad (\text{ec D})$$

$$T = \frac{1}{f} \quad (\text{ec E})$$

III.1.2.2.2 Resultados finales de nuestro generador (Ver cálculos en APÉNDICE B)

A continuación se escriben los valores de los resultados obtenidos partiendo de las ecuaciones del inciso III.1.2.2.1, éstos resultados satisfacen las características esperadas del diseño mejorado.

El voltaje de alimentación V_{CC} utilizado para el integrado ICL8038 es proporcionado desde una fuente simétrica con salida de $\pm 10V$

$$\text{Para } V_{CC} = \pm 10[V_{DC}]; V_{CC+} = + 10[V_{DC}] ; V_{CC-} = - 10[V_{DC}]$$

El intervalo de tensión de barrido V_{Sweep} con respecto a la tensión real de la fuente simétrica bipolar, es ejecutado en el pin 8 y es necesario para barrer la frecuencia entre 1Hz - 10kHz.

$$15.6[V] \leq V_{Sweep} \leq 19.6[V]$$

$$5.6[V] \leq (V'_{Sweep}) \leq 9.6[V]$$

El rango de corriente óptima de trabajo I para el buen funcionamiento del integrado, circula a través del resistor R_A conectado en el pin 5.

$$66[\mu A] \leq I \leq 0.733[mA]$$

En lugar de tomar los resistores internos fijos del circuito integrado interconectando el pin 7 y el pin 8 como sugiere el fabricante (ver figura 3.2), obtengo con resistores externos los intervalos de las resistencias R_1 y R_2 , se conectan al pin 8 para obtener la tensión de barrido V_{Sweep} .

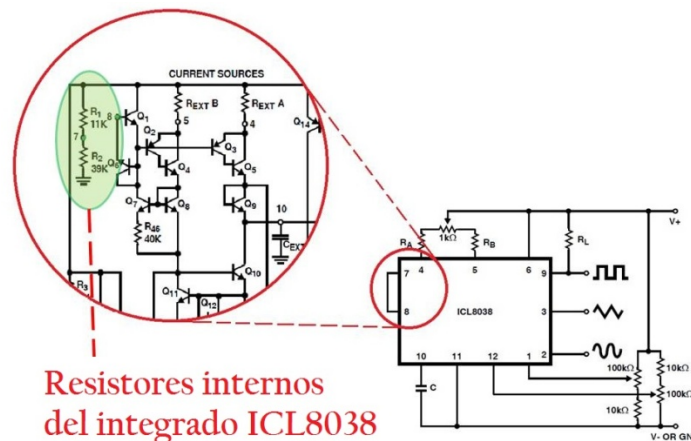


Figura 3.2 Posible interconexión de los pines 7 y 8 para ICL8038.
Propuesto por el fabricante INTERSIL [c]

$$R_1 = R'_1 + R''_1 ; R'_1 = 1[K\Omega] ; R''_1 = 10[K\Omega] \text{ (potenciómetro)}$$

$$R_2 = R''_1 + R'_2 ; R''_1 = 10[K\Omega] \text{ (potenciómetro)} ; R'_2 = 39[K\Omega]$$

$$1[K\Omega] \leq R_1 \leq 11[K\Omega]$$

$$39[K\Omega] \leq R_2 \leq 49[K\Omega]$$

Los resistores R_A y R_B para lograr un ciclo de trabajo constante de 50%/50% son conectados en el pin 4 y el pin 5, los valores de sus resistencias son idénticos.

$$R_A = R_B = R = 6[K\Omega]$$

Los intervalos de frecuencia son cuatro y se pueden seleccionar a través de capacitores conectados al pin 10 por medio de un switch rotatorio como el de la figura 3.3

$$C_1 = 5[\mu F] \quad ; \quad 1[Hz] \leq f \leq 11[Hz]$$

$$C_2 = 0.5[\mu F] \quad ; \quad 10[Hz] \leq f \leq 110[Hz]$$

$$C_3 = 0.05[\mu F] \quad ; \quad 100[Hz] \leq f \leq 1100[Hz]$$

$$C_4 = 0.005[\mu F] \quad ; \quad 1000[Hz] \leq f \leq 11000[Hz]$$

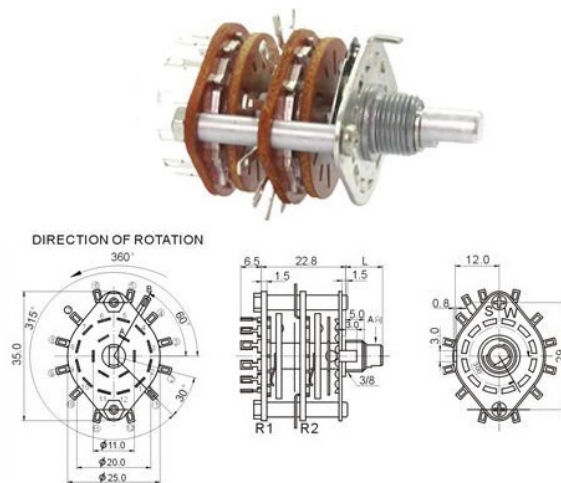


Figura 3.3 Switch rotatorio S1

Se deben analizar los capacitores que se adecuan mejor a nuestras necesidades, ya que afectan directamente la estabilidad en la frecuencia y la calidad de la señal. En lo posible han de utilizarse capacitores con un buen dieléctrico y con bajas pérdidas. Es conveniente evitar usar electrolíticos ya que estos poseen una gran deriva de su valor nominal de 25% típicamente y a altas temperaturas su funcionamiento es aún peor, en su lugar se podrían usar capacitores de poliéster. Ver APÉNDICE C.

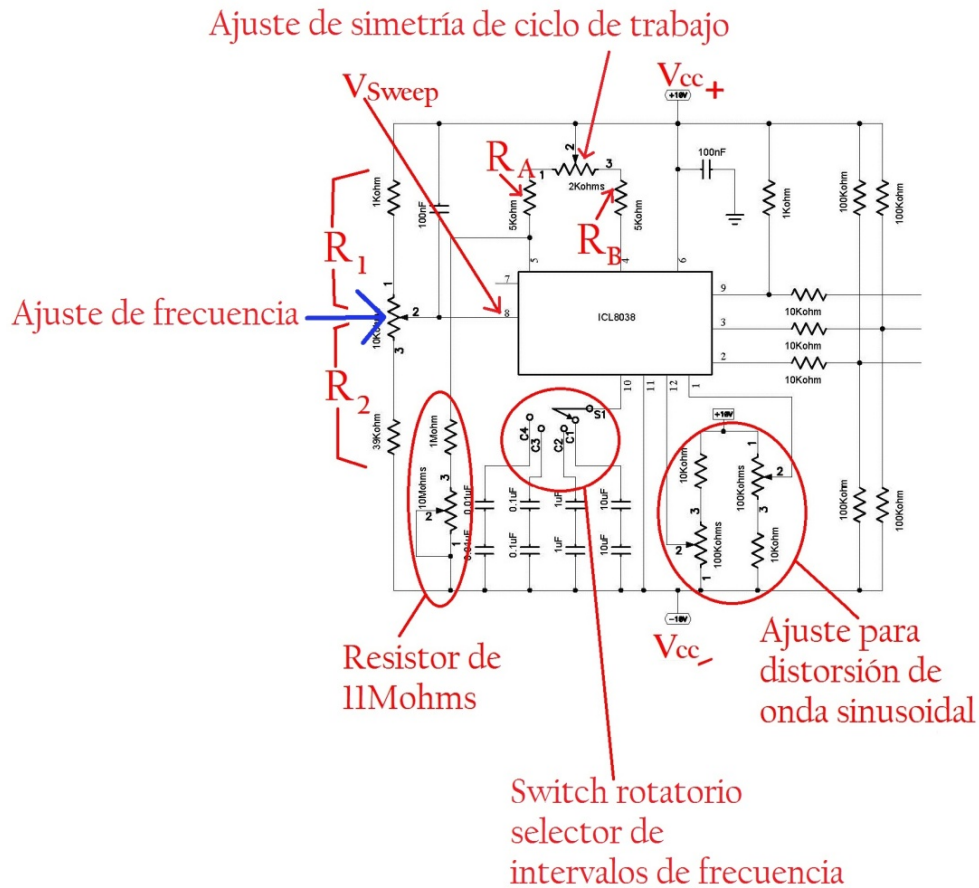


Figura 3.4 Diseño de generador de ondas con ICL8038

La figura 3.4 ayuda a visualizar lo que se describe en este inciso III.1.2.2.2

En éste diseño se debe colocar un resistor entre el pin 5 y V_{cc-} con un valor que puede oscilar entre $3.3M\Omega$ hasta unos $10M\Omega$, la finalidad es minimizar la variación de simetría con la frecuencia. De este modo un gran valor de resistor de $11[M\Omega]$ es conectado en el pin 5 para que ayude a reducir las variaciones del ciclo de trabajo con el barrido.

El ajuste de frecuencia se ejecuta en el pin 8 mediante el potenciómetro que pertenece al divisor de tensión construido con R_1 y R_2 , la selección de escala de frecuencia se establece mediante el switch rotatorio. El ajuste de simetría (ciclo de trabajo con 50%/50%) se realiza por medio de un trimpot multivoltas de $2[K\Omega]$ compartido por los resistores R_A y R_B . La distorsión de la onda sinusoidal se ajusta con resistencias variables en el pin 12 y el pin 1, estos se conectan con potenciómetros de $100k\Omega$ y ayudan a corregir la simetría de la onda sinusoidal, uno para cada semiciclo; para mayor corrección se usan potenciómetros tipo “trimpots” (multivoltas).

III.1.2.2.3 Amplitud de las formas de ondas en la etapa de baja potencia.

Cada onda adquirida en el circuito integrado ICL8038 entra respectivamente a un amplificador inversor para obtener una ganancia en la amplitud con un voltaje de salida de 2V pico a pico; los cálculos se pueden ver el APÉNDICE E.

En la figura 3.5 se observa como el pin2, pin3 y pin9 del circuito integrado ICL8038 se conectan a su respectivo amplificador operacional inversor, el valor de la amplitud de cada onda se expone en voltaje pico [V_p].

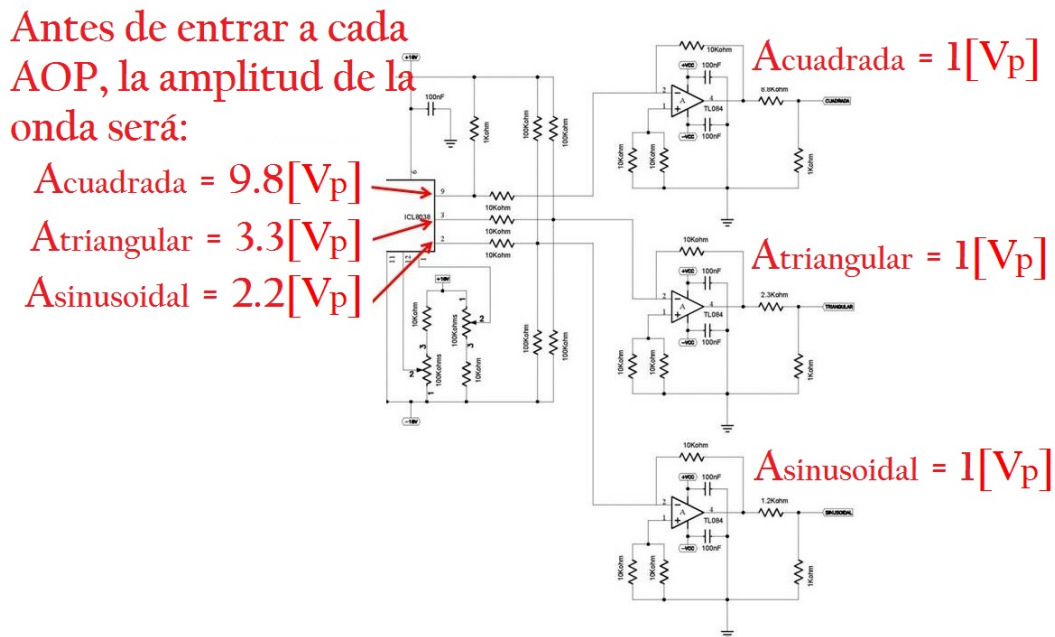


Figura 3.5 Acondicionamiento de la amplitud de las ondas dadas en ICL8038 con AOP

Una vez que las ondas tienen amplitud de $1[V_p]$ se canalizan a un multiplexor-demultiplexor y después se elige una de ellas para manipularla en la segunda etapa de amplificadores operacionales.

III.1.3 REFERENCIA DE TENSIÓN PARA LA SEÑAL DC Y LA TENSIÓN DE OFFSET

Naturalmente el mayor requerimiento para la referencia de tensión, es que sea estable a las variaciones de la fuente de alimentación y/o a la temperatura de juntura que deberá tener un valor pequeño; si es posible ningún efecto debería existir sobre el valor del voltaje de referencia (V_{REF})

III.1.3.1 Diodo de referencia zener para obtener la señal DC

La forma más simple para obtener un voltaje de referencia estable, es conseguida con un resistor y un diodo zener.

El voltaje zener (V_Z) se acondiciona con un amplificador operacional inversor para obtener una referencia de voltaje de 2 volts, utilizando el diodo zener LM385 de voltaje ajustable, como se muestra en la figura 3.6.

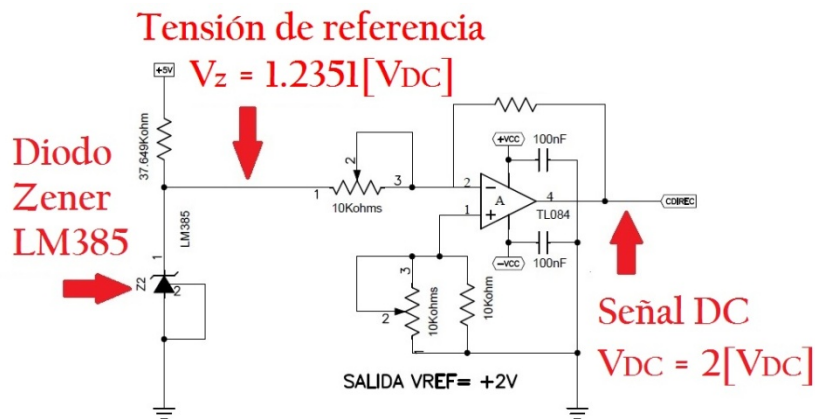


Figura 3.6 Diagrama electrónico para obtener la señal DC

Una vez que la señal DC tiene un voltaje de $2[V_{DC}]$ se canaliza a un multiplexor de multiplexor (Ver inciso IV.1.1 del Capítulo IV) y cuando es seleccionada, se manipula en la segunda etapa de amplificadores operacionales.

III.1.3.2 Rangos de la tensión de offset para la señal DC y las formas de ondas.

Si es que se requiere utilizar la tensión de offset en algún experimento, ésta puede ser aplicada a cualquiera de las tres formas de ondas o a la señal DC.

La referencia de la tensión de offset antes de entrar al amplificador operacional de potencia LM675 estará comprendida en los siguientes rangos de valores:

Para señal DC: Tensión de offset: $\pm 0.5[V_{DC}]$

Para formas de ondas: Tensión de offset: $\pm 1.5[V_{DC}]$

A la salida del AOP, la tensión de offset amplificada con el circuito integrado LM675 en configuración de amplificador sumador inversor y con relación 1:10 en ganancia, tendrá los siguientes rangos:

Para señal DC: Tensión de offset: $\pm 5[V_{DC}]$

Para formas de ondas: Tensión de offset: $\pm 15[V_{DC}]$

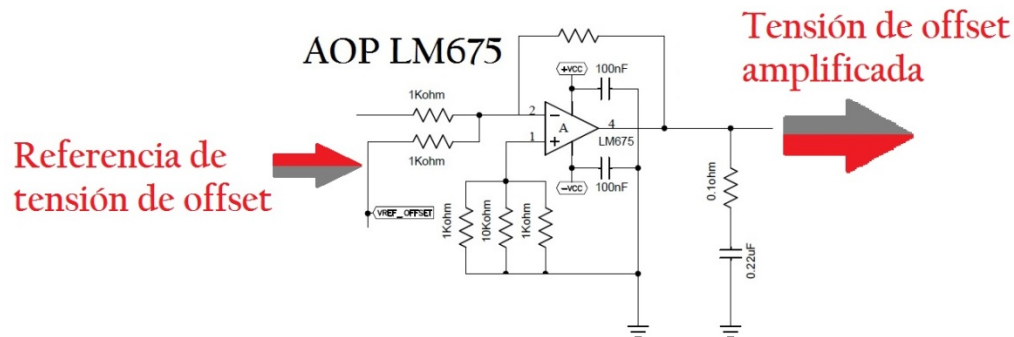


Figura 3.7 Tensión de offset a la entrada y salida del AOP LM675

Es importante hacer notar que la referencia de la tensión de offset es una señal DC que será invertida y magnificada a la salida del amplificador operacional de potencia LM675, por estar en la configuración de amplificador sumador inversor. La inversión y amplificación de la señal se representa en la figura 3.7 con flechas en color rojo y gris.

III.2 SEGUNDA ETAPA DE ELECTRÓNICA ANALÓGICA

III.2.1 ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL A MEDIA POTENCIA

Para ésta etapa se utilizó el amplificador operacional de potencia LM675 que posee una baja tensión de offset en la entrada y que puede conducir corrientes de 3 Amperes. Este amplificador esta internamente compensado para ganancias de 10 o más grandes [19]. La fuente de alimentación de este amplificador es simétrica bipolar de $\pm 30[V_{DC}]$. Las señales más la tensión de offset podrán ser desplazados entre $\pm 25[V_{DC}]$ para ser entregados a la carga. También se utilizaron amplificadores operacionales TL084 en sus diversas configuraciones. Ver APÉNDICE D.

Las formas de ondas con una amplitud de $1[V_P]$ (de modo que su tensión es de $2[V_{PP}]$) y la señal DC con $2[V_{DC}]$, entran a un multiplexor-demultiplexor analógico que sirve para canalizar solo una de éstas señales; a la salida del mismo se conecta un divisor de tensión para modificar la amplitud o tensión de la señal seleccionada, denominada **señal original**.

La **señal original** es sumada a una **señal de error** con un amplificador operacional inversor, la señal obtenida a la salida estará invertida.

$$(\text{señal original} + \text{señal de error} = \text{señal acondicionada})$$

La denominada **señal acondicionada** es sumada a la **tensión de offset** si se requiere, así que la señal resultante es invertida a la salida del amplificador operacional de potencia y amplificada con una ganancia de 10; esta señal es denominada **señal entregada a la carga**.

$$(\text{señal acondicionada} + \text{tensión de offset} = \text{señal entregada a la carga})$$

Es importante hacer notar que aquí se le denomina **carga**: a los dos electrodos dentro del electrolito.

La **señal entregada a la carga** es de gran relevancia, ya que es la que realmente tendrá las características que se proporcionen en nuestra celda electrolítica.

A la **carga** se le añade una resistencia en serie con un valor de $0.1 [\Omega]$ para que podamos obtener el valor proporcional a la corriente que cruza ella y leer el valor de la corriente con el **Módulo convertidor de corriente RMS***

* Nota: El *Módulo convertidor de corriente RMS* no se desarrolla en ésta tesis, sólo se plantea el nodo del circuito en donde se conectará. Ver APÉNDICE G.

El valor de la resistencia en serie es muy pequeño ($0.1 [\Omega]$), para no alterar significativamente el valor de origen de la carga.

$$(\text{carga} + \text{resistencia en serie} = \text{carga esperada})$$

La **carga esperada** se conecta en paralelo a dos resistores en serie con valor de resistencia alta comparada con la resistencia de la misma **carga esperada**. Entonces de estos resistores con una relación de 10:1, la **señal entregada a la carga** se convierte en una denominada **señal reducida**.

La **señal reducida** entra a un amplificador operacional configurado como diferenciador para restarle la **tensión de offset**, con el fin de obtener a la salida una **señal similar** a la **señal original** (antes de ser amplificada). Posteriormente esta **señal similar** entra a otro amplificador operacional inversor y la obtenida a la salida la denominamos **señal de lectura**.

$$(\text{señal reducida} - \text{tensión de offset} = \text{señal similar})$$

La **señal de lectura** entra a un amplificador en configuración diferenciador y es restada a la **señal original** proveniente del multiplexor analógico, de éste modo se obtiene la **señal de error**. Ésta **señal de error** es la que se sumará a la **señal original** proveniente del multiplexor-demultiplexor analógico, cerrando así la retroalimentación (configuración en malla cerrada) para asegurar el mejor control de la **señal entregada a la carga**.

$$(\text{señal de original} - \text{señal de lectura} = \text{señal de error})$$

La **señal de lectura** es la que se acondicionará para poder leer el voltaje de la señal con el **Módulo convertidor de voltaje RMS*** y leer la frecuencia de la señal con el **Módulo para leer frecuencia***.

En la figura 3.8 se muestra el diagrama electrónico de la segunda etapa de electrónica analógica diseñada con amplificadores operacionales, así se visualiza lo explicado en éste inciso III.2.1

** Nota: El **Módulo convertidor de voltaje RMS** y el **Módulo para leer frecuencia**, no se desarrollan en ésta tesis, sólo se plantean los nodos del circuito en donde se conectarán. Ver **APÉNDICE G***

III.2.2 Características de la señal entregada a la carga

Finalmente las características de la señal entregada a la celda electrolítica son las que se manipulan desde el panel de control físico en el gabinete del sistema mejorado y se enlistan a continuación:

Para señal DC.

- Nivel de salida variable: $0[V_{DC}] - 20[V_{DC}]$
- Tensión de offset: $\pm 5[V_{DC}]$

Para formas de ondas.

- Formas de ondas disponibles a la salida: sinusoidal, cuadrada y triangular
- Rango de frecuencia: 1Hz - 10kHz
- Nivel de salida variable: Valor máximo $10[V_{pp}]$
- Tensión de offset: $\pm 15[V_{DC}]$
- Ciclo de trabajo constante: 50% / 50%

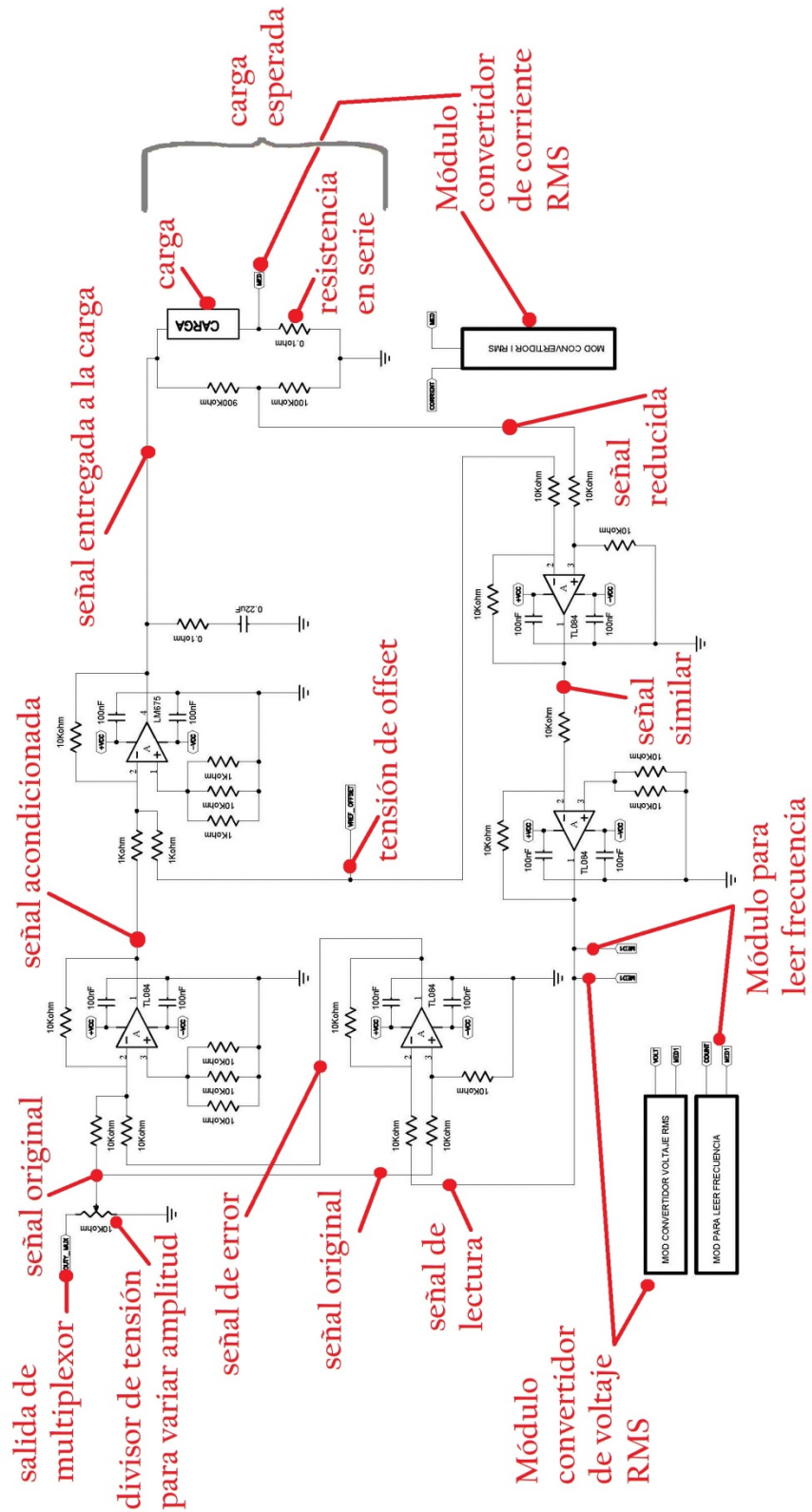


Figura 3.8 Diagrama de la segunda etapa de electrónica analógica.

CAPÍTULO IV

Automatización: Dispositivos I/O y microcontrolador

En éste capítulo se describe el **multiplexor-demultiplexor** que necesitamos para elegir una de las cuatro señales. Se dan detalles del **teclado** (dispositivo de entrada) para introducir los datos y como dispositivos de salida se tratan los **LED's**, un **buzzer**, la pantalla **LCD** y su interfaz. Posteriormente para el **reloj** se da una explicación sobre el circuito integrado que proporciona el tiempo real y finalmente nos enfocamos al **microcontrolador**.

La automatización del sistema se resuelve en gran proporción con el microcontrolador programado ya que con él se puede interconectar el teclado, el módulo serial para la pantalla LCD, el circuito generador de tiempo real, el controlador de motor DC, el multiplexor-demultiplexor y el comparador de tensión para los sensores (situados en la columna mecánica). Para interpretar los valores de las variables involucradas y mostrarlos en la pantalla LCD, en los circuitos electrónicos analógicos diseñados se obtienen de algunos nodos las señales que entran en los pines designados como convertidor analógico a digital; de éste modo se conoce la amplitud o la tensión DC, la frecuencia, la corriente y la temperatura.

IV.1 SELECCIÓN DE SEÑAL

IV.1.1 Multiplexor-demultiplexor

Conectamos las diferentes señales del generador de formas de ondas y la señal DC, a un multiplexor-demultiplexor analógico dual que cuenta con cuatro canales.

(Ver APÉNDICE H)

Se utiliza el circuito integrado CD4052BC con dos **entradas de selección** denominadas A y B, asignadas al pin10 y al pin9 respectivamente; con ellas se elige una de las **entradas para las señales**. (Ver Tabla 4.a)

Estados de entrada			Canal encendido
Inhibir	B	A	Canal
0	0	0	DC
0	0	1	Sinusoidal
0	1	0	Cuadrada
0	1	1	Triangular
1	*	*	Ninguna

*No importa la condición

Tabla 4.a Tabla de verdad particular con CD4052BC.

La señal seleccionada se conectará a la **salida** del multiplexor en el pin3; en el inciso III.2.1 del capítulo III, ésta señal en la salida es la denominada **señal original**. La figura 4.1 nos ayuda a ubicar las entradas y salidas.

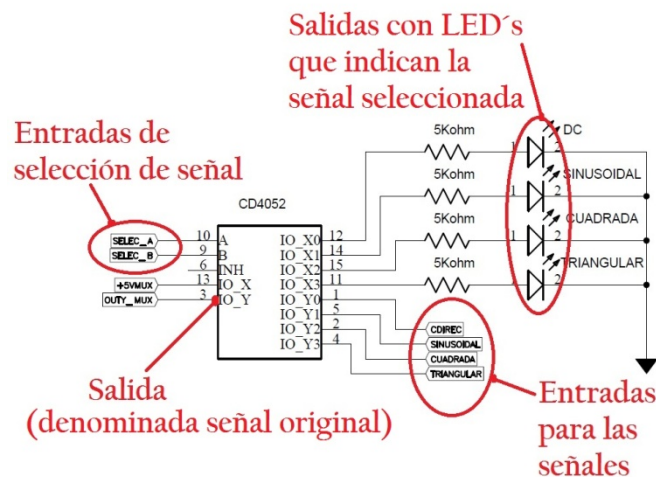


Figura 4.1 Diagrama electrónico con CD4052BC [g]

IV.1.1.1 Demultiplexor, LED's indicadores y buzzer.

Un demultiplexor (contenido en CD4052BC) ejecuta de forma inversa la función de un multiplexor. El demultiplexor también es un dispositivo de switcheo como el multiplexor.

Para indicar durante el tiempo de proceso cual es la señal elegida, se utiliza un diodo emisor de luz (LED, por sus siglas en inglés: Light Emitting Diode) para cada tipo de señal.

A través de los cuatro canales del CD4052BC usado como demultiplexor, se colocan resistencias limitadoras de corriente hacia los LED indicadores. En la figura 4.2 se representan los LED's sobre el panel de control al lado las etiquetas con la forma y el nombre de cada señal disponible.

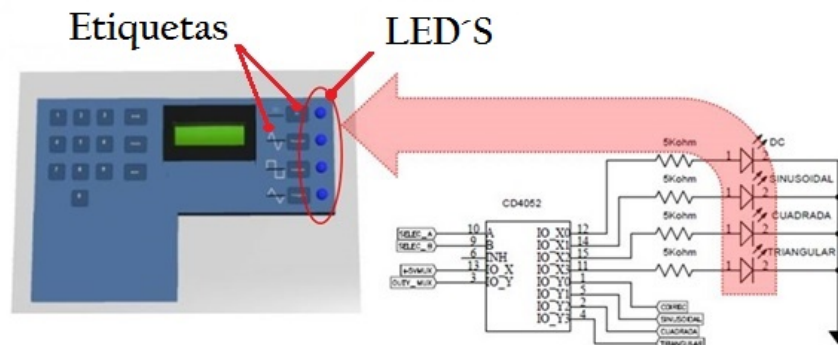


Figura 4.2 LED's conectados con CD4052BC en panel de control [g]

Otro indicador que se incorpora en el acceso de datos por medio del teclado, es un BUZZER, el cual de forma sonora alertará todo lo que sea considerado necesario en el proceso para la experimentación. Por ejemplo: cada vez que se pulsa una tecla, cuando cambia el dato pedido en el menú en la pantalla LCD y la alarma que indica el **Fin de Proceso**.

IV.2 Teclas denominadas ENTER, PAUSA Y RESET.

Utilizamos la aplicación simple de una tecla por pin con el switch PUSH BUTTON normalmente abierto para los botones de ENTER, RESET y PAUSA, respectivamente en el pin27, el pin28 y pin29 del microcontrolador. Se observa en la figura 4.3 la sección ampliada del microcontrolador en donde se conectan a sus respectivos pines cada tecla simple y su ubicación en el panel de control.

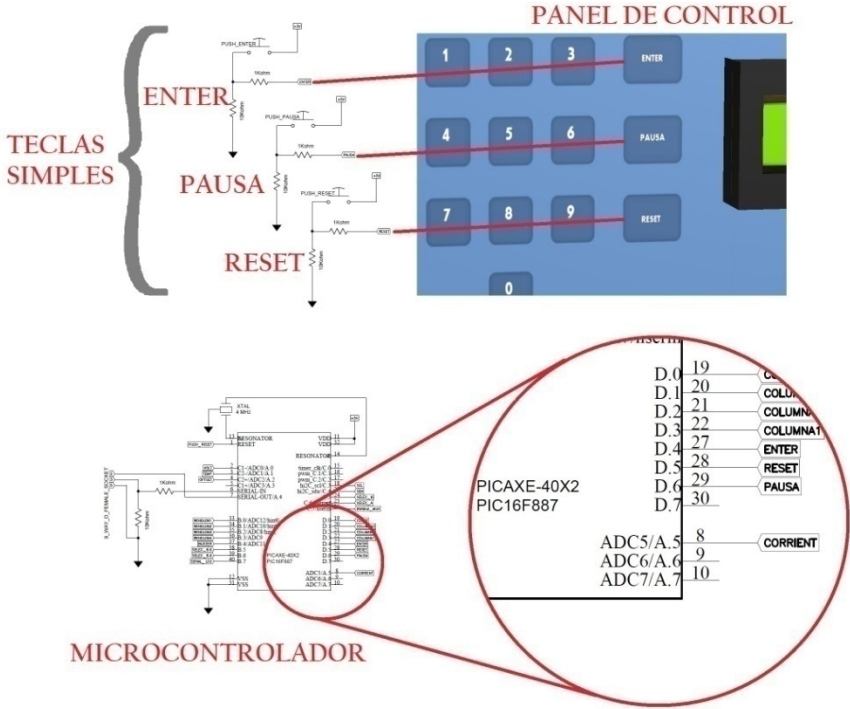


Figura 4.3 Aplicación simple de una tecla.

IV.2.1 Teclado numérico

También con el switch PUSH BUTTON normalmente abierto, se diseña el teclado tipo keypad. Para saber que tecla fue activada, se implementa una rutina dentro del programa en el microcontrolador para determinar la pulsación.

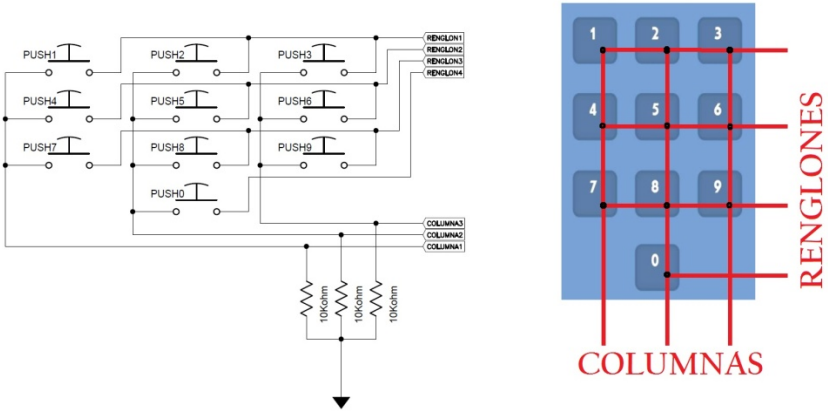


Figura 4.4 Diagrama electrónico y esquema de teclado matricial.

Se diseña entonces un teclado matricial de 4X3 (renglón-columna) con resistencias en disposición pull-down, como el de figura 4.4. Así que se disponen de 7 pines requeridos en el microcontrolador, 4 pines para los renglones y 3 pines para las columnas. A un conector SIL (Single In Line) macho que corresponde a los 4 renglones y a las 3 columnas, se le conecta un cable plano para conectar el teclado desde el panel de control al microcontrolador.

Para eliminar los rebotes del fenómeno conocido como Debounce PB [1] se implementa una rutina dentro de un programa realizado en BASIC para el microcontrolador.

IV.2.2 Descripción de la rutina del teclado dentro del programa en BASIC.

Al presionar una tecla, una vez que se registra el primer pulso en el microcontrolador, se necesita introducir una pausa para que los pulsos transitorios no sean detectados (Fenómeno Debounce PB). La rutina implementa el sistema de eliminación de rebotes por software aplicando un retardo de 10ms cada vez que se detecta la tecla presionada, entonces se hace un escaneo para el teclado y se adiciona el antirrebote en la rutina.

El teclado es habilitado o deshabilitado desde el microcontrolador, dependiendo de lo que se considere necesario durante el acceso de datos y el proceso.

Para controlar el teclado, los puertos del microcontrolador conectados a los renglones se programan como salidas y las columnas conectadas se programan como entradas.

Para saber que tecla está siendo presionada escaneamos el teclado por medio de una rutina que consiste en ir poniendo uno a uno de los renglones conectados al microcontrolador a nivel lógico alto, ya que las salidas tienen conectada una resistencia de polarización a tierra están siempre a nivel lógico bajo; cada vez que un renglón se pone a nivel lógico alto, se hacen 3 comprobaciones para ver si una de las tres columnas se ha puesto a nivel lógico alto y así detectar el pulso de la tecla presionada. Al ser pulsada la tecla (se pone en contacto un renglón con una columna) retorna el valor asignado de un solo número del 0 al 9 en forma hexadecimal para ser mostrada en LCD. Ver APÉNDICE F (barrido página 95)

IV.3 DISPOSITIVO DE SALIDA

IV.3.1 LCD y su interfaz con microcontrolador PICAXE

Una LCD es un dispositivo de salida. En nuestro sistema se utiliza un LCD monocromático modelo: JHD-162ASTNLED que es un display alfanumérico de 16x2 como el de la figura 4.5

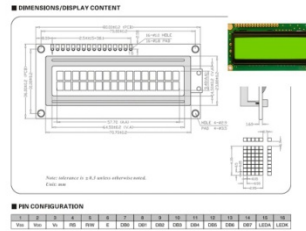


Figura 4.5 Imagen representativa del LCD.

Para conectar la LCD al microcontrolador PICAXE se utiliza un módulo denominado por su fabricante como LCDSERA [m]; contiene un PIC16F628A con firmware que ejecuta el control del LCD alfanumérico, esto permite al microcontrolador (basado en sistemas como el PICAXE o Basic Stamp) enviar los datos para visualizarlos.

Todos los comandos del programa son transmitidos de forma serial (por un solo pin) al microcontrolador PICAXE a través del módulo serial LCDSERA y los datos son visualizados en la LCD. En la figura 4.6 se muestra la imagen del módulo.



Figura 4.6 El módulo serial LCDSERA [m].

IV.3.2 Reloj

El circuito integrado que nos proporciona el tiempo real es el DS1307 (figura 4.7). Para ello utiliza Las líneas de datos SCL y SDA del pin6 y el pin5 respectivamente

La transferencia a través del I²C bus, que aquí se emplea es la que se realiza con el circuito integrado DS1307 para poder gobernar el tiempo de proceso con mucha exactitud. Desde aquí se proveerá el conteo del tiempo requerido por el usuario, desde el inicio de proceso hasta el final del proceso, tomando en cuenta las interrupciones como pausa durante el experimento. (Tecla simple de PAUSA)

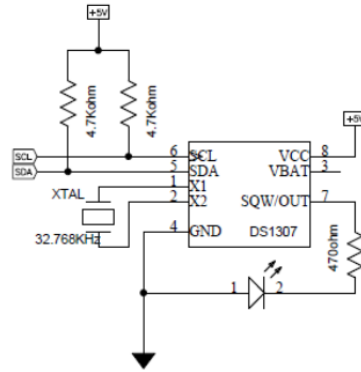


Figura 4.7 Diagrama electrónico del circuito DS1307.

IV.4 Microcontrolador y Programación PICAXE (40X2)

El microcontrolador utilizado es el PICAXE 40X2 de la firma Revolution Education Ltd. Este es un microcontrolador estándar Microchip PICmicro™ que ha sido pre-programado con el código bootstrap de PICAXE. Este código habilita al microcontrolador a ser re-programado con una conexión simple de forma serial a la computadora [n].

El editor de programación soporta programar en BASIC y con diagramas de flujo, el lenguaje utilizado es de alto nivel.

En la figura 4.8 se muestra el patigrama del microcontrolador que se utiliza en el diseño del sistema de la celda electroquímica automatizada. Y en la figura 4.9 el diagrama que hace posible transferir el programa desde la computadora al microcontrolador en el pin6 y el pin7. Como se puede observar es muy simple, se puede conectar al puerto serie de una computadora si es que lo tiene o a un puerto USB.

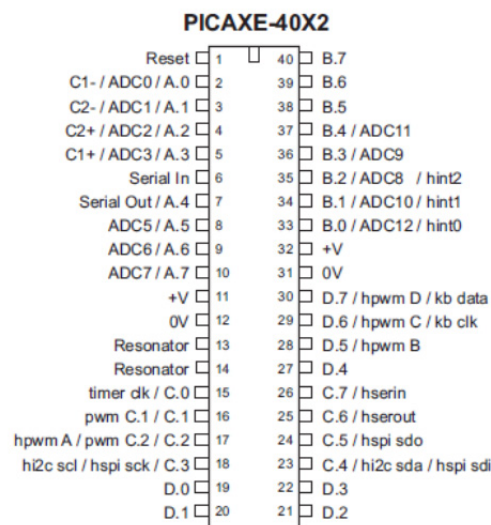


Figura 4.8 Patigrama de PICAXE-40X2 [n].

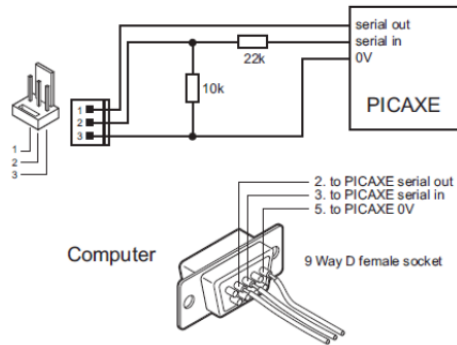


Figura 4.9 Diagrama para descargar programa en modo serial desde la computadora.

Ahora la siguiente figura 4.10 nos ayuda a ubicar los pines asignados a la parte que conforma el sistema con respecto a la circuitería electrónica. Los Módulos para lectura no se desarrollaron es ésta tesis, se dejan planteados los pines en donde irán conectados; pero sí se declaran los instrucciones en el programa BASIC para adquirir los datos de los módulos con el microcontrolador a excepción de la toma de datos para la Temperatura y la Corriente.

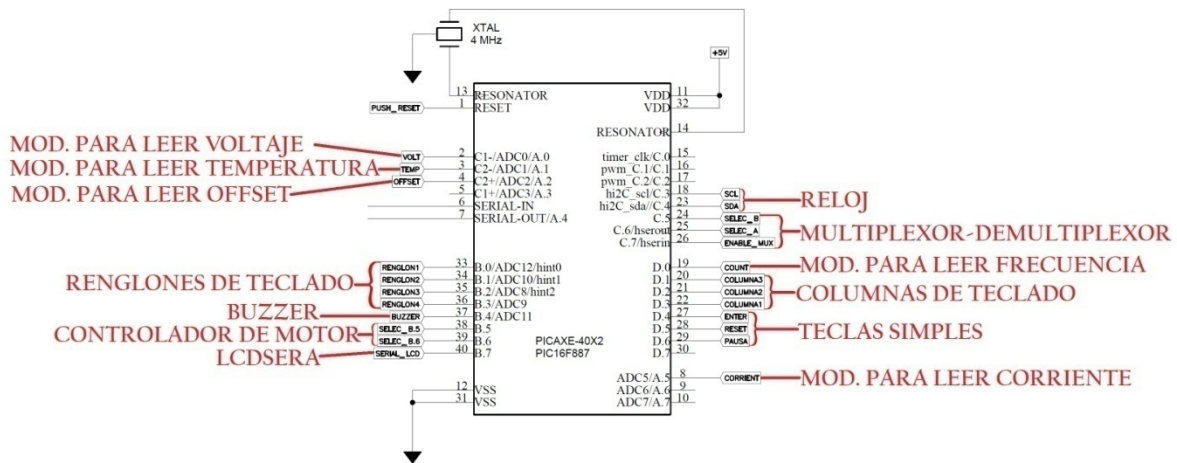


Figura 4.10 Pines asignados en el microcontrolador.

En lo que respecta al programa en BASIC ver APÉNDICE F.

CAPÍTULO V

COMPLEMENTOS: Detalles para la construcción de la celda electroquímica

Obviamente toda la electrónica requiere de la elaboración de las fuentes de alimentación con los disipadores adecuados y en el caso del amplificador operacional de potencia LM675 también se le debe conectar un disipador.

Se requiere la construcción de un recipiente para contener un electrolito. La construcción de la parte mecánica para el desplazamiento de las terminales con los electrodos y la construcción del gabinete que contiene todo.

V.1 MOTOR Y CONTROLADOR L293B

Se necesita controlar un motor DC para activar la columna mecánica. Para nuestro diseño se optó por usar un motorreductor DC que tiene una caja con engranes conectada al eje del mismo; esto nos permite obtener un mayor par en el motor para poder mover las piezas mecánicas.

En la figura 5.1 observamos una imagen representativa del motorreductor y su caja segmentada para observar los engranes.

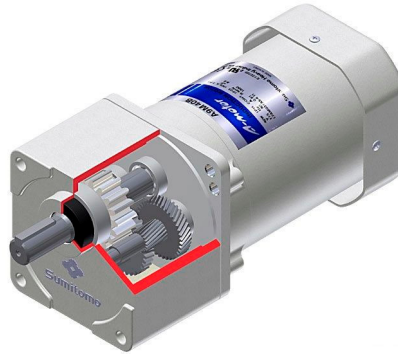


Figura 5.1 Motorreductor DC.

Para controlar el motor se utiliza la configuración en puente H del circuito integrado L293B [k]. El circuito integrado dispone de cuatro pines centrales para posibilitar el contacto superficial de un disipador de temperatura como se muestra en la figura 5.2

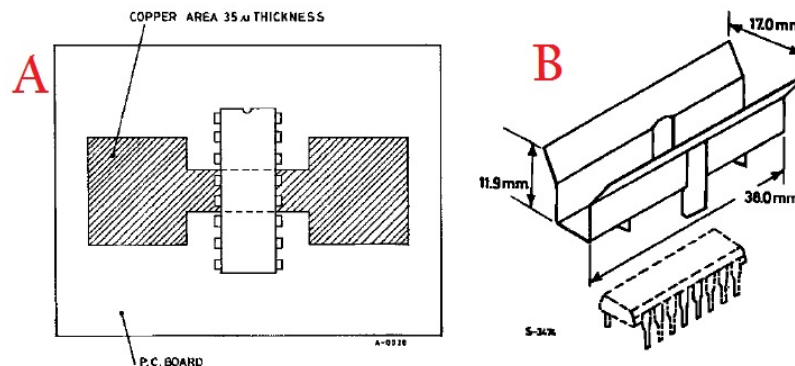


Figura 5.2 Opciones para disipar la temperatura en el L293B. [k]
A) Superficie de cobre sobre la PCB B) con montaje externo

El microcontrolador envía oportunamente los datos al controlador del motor DC para seleccionar el sentido de giro. La tabla 5.a muestra los estados de entrada al circuito L293B en el pin2 y en el pin7, denominados respectivamente SELEC_B.5 Y SELEC_B.6. En la figura 5.3 se observa el diagrama electrónico para su conexión con el motorreductor.

Estados de entrada			Función	Columna
Inhibir	SELEC_B.6	SELEC_B.5	torque	desplazamiento
1	0	0	Alto forzado	Sin movimiento
1	0	1	Gira a la izquierda	Sube
1	1	0	Gira a la derecha	Baja
1	1	1	Alto forzado	Sin movimiento
0	*	*	Ninguna	Sin movimiento

*No importa la condición

Tabla 5.a Tabla de verdad particular con L293B

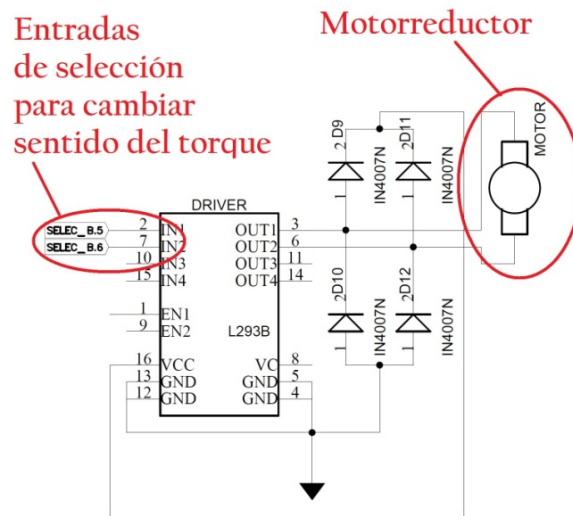


Figura 5.3 Diagrama electrónico con L293B

V.2 Diseño mecánico de la columna.

El diseño mecánico de la columna tiene una función importante en la automatización del sistema, con ella se podrán desplazar los dos electrodos de forma vertical. En la figura 5.4 se indican los nombres de las piezas que se requieren para su construcción en los tornos.

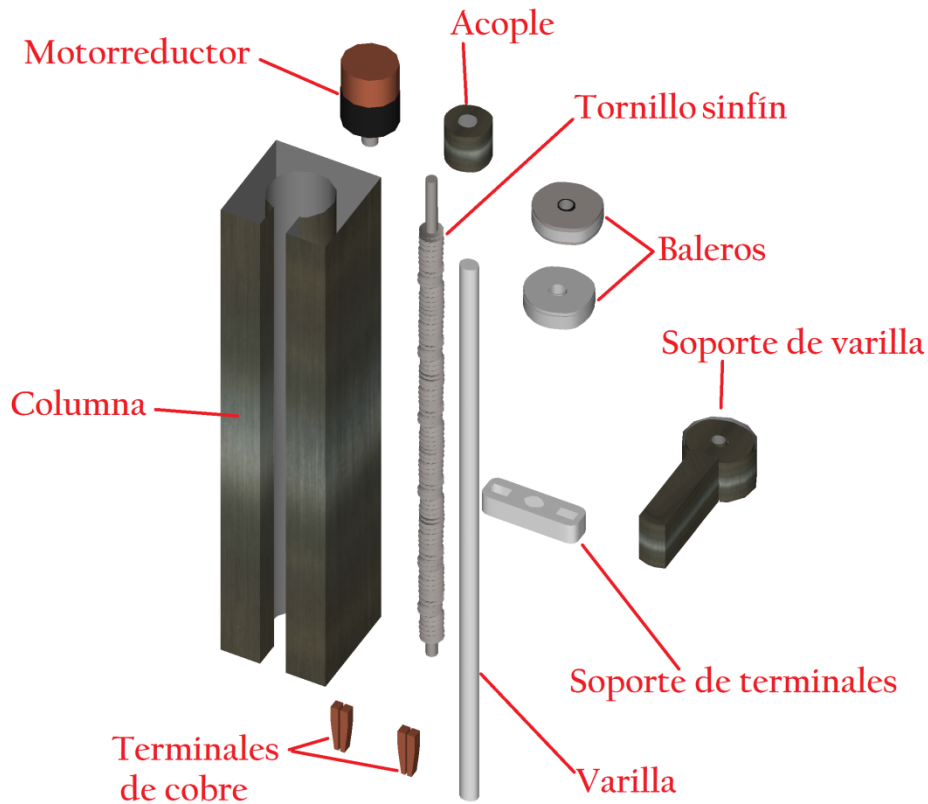


Figura 5.4 Partes que conforman la columna para desplazamiento lineal

El eje del motorreductor lleva un acople al tornillo sinfín que va dentro de la columna, el tornillo sinfín está sujeto con dos baleros colocados en los extremos de la columna; los baleros ayudan a mantener al tornillo alineado en un eje vertical. Se debe lubricar todo el tornillo sinfín y sus extremos conectados a los baleros, para evitar durante el torque un desgaste por efectos de la fricción en el tornillo sinfín y en el soporte de varilla.

La varilla lleva en el extremo inferior el soporte de terminales al que se le adaptan las terminales de cobre (tipo caimán) en donde se colocan los dos electrodos.

La columna se fija con tornillos a la base interna superior del gabinete y el motor se fija a la tapa del gabinete, de modo que la varilla quede al centro del contenedor en la parte inferior del gabinete cuando se desplace. En la figura 5.5 se ilustra la posición de la columna en el gabinete.

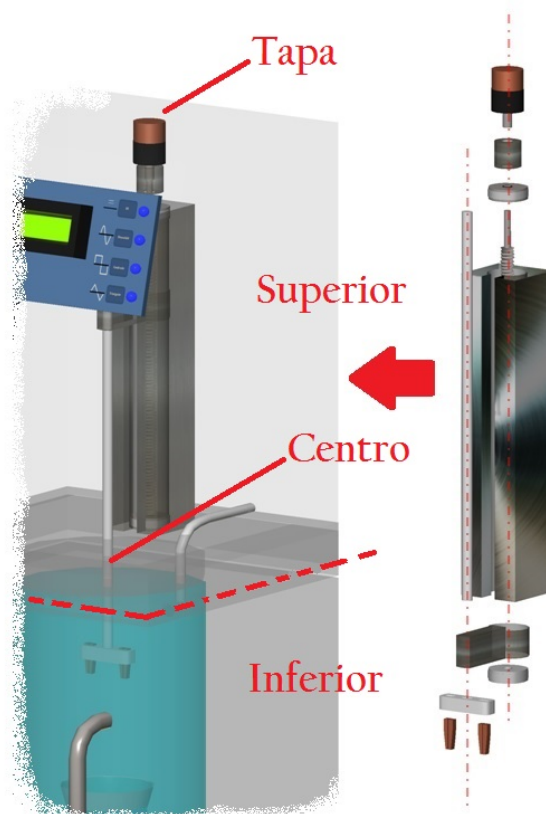


Figura 5.5 Representación en 3-D de las piezas alineadas y su posición en el gabinete

V.3 Sensores para interrumpir desplazamiento vertical

Como parte del proceso en un experimento, el motor ejecuta por medio del tornillo sinfín el ascenso o descenso de los electrodos y existen ciertas condiciones para interrumpir el desplazamiento vertical con la columna. Durante el descenso se debe evitar que los electrodos no choquen en la base del vaso de precipitados, que las terminales caimán no se introduzcan en el electrolito y que no choque el soporte de varilla en la parte inferior de la columna; en el ascenso se debe evitar el choque del soporte de varilla con el extremo superior de la columna. Para ello se colocan los sensores infrarrojos conectados en la columna de forma estratégica.

Los sensores se conectan al circuito integrado LM339 que tiene cuatro comparadores de tensión de precisión independientes y que operan en un ancho rango de voltajes con una sola fuente de alimentación. Éste comparador tiene la única característica de que el rango de voltaje de la entrada en modo común incluye tierra, así que pueden ser operados desde una sola fuente de voltaje. Los sensores con configuración emisor-receptor infrarrojo interrumpen la alimentación que origina el torque del motor. En la figura 5.6 se muestra el diagrama electrónico de los sensores.

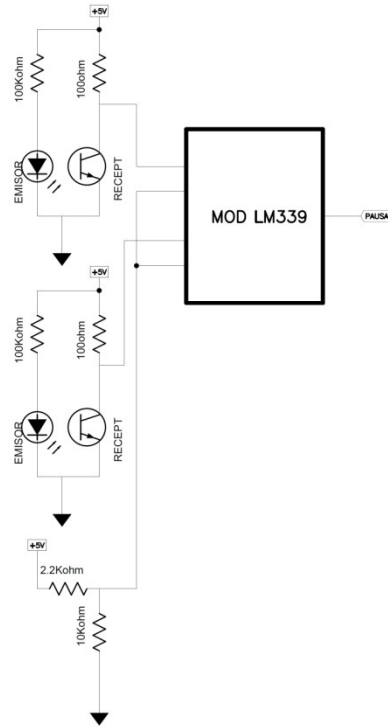


Figura 5.6 Diagrama electrónico de emisor-receptor infrarrojo conectados al LM339

El sensor colocado en la parte superior tiene siempre la misma posición con respecto a la columna.

El sensor en la parte inferior de la columna se puede desplazar independientemente, de forma manual. Su posición en la columna se ajusta de acuerdo a una relación que involucra la distancia vertical que existe desde el nivel máximo superior del electrolito con respecto a la base del contenedor del gabinete, la longitud máxima de los electrodos utilizados para cada experimento y de acuerdo a la posición del punto en que se fija la varilla con respecto al soporte de varilla.

V.4 GABINETE, DISEÑO FINAL

El diseño del gabinete es el último en realizarse, ya que depende del espacio que generen los demás diseños; tanto el electrónico como el mecánico.

En éste se procura de forma funcional y estética, la mejor disposición de los elementos requeridos para el manejo del sistema propuesto.

Los materiales para su construcción deben elegirse de modo que estén protegidos en la parte superior, los circuitos electrónicos y la columna mecánica. La varilla que va unida a la pieza que soporta a los electrodos se desplaza entre la parte superior y la parte inferior del gabinete dentro del contenedor; así es que se debe colocar un empaque que evite que los gases que se producen durante el proceso de un experimento asciendan a la parte superior

del gabinete y daña por efectos de corrosión tanto a los circuitos electrónicos como al diseño mecánico.

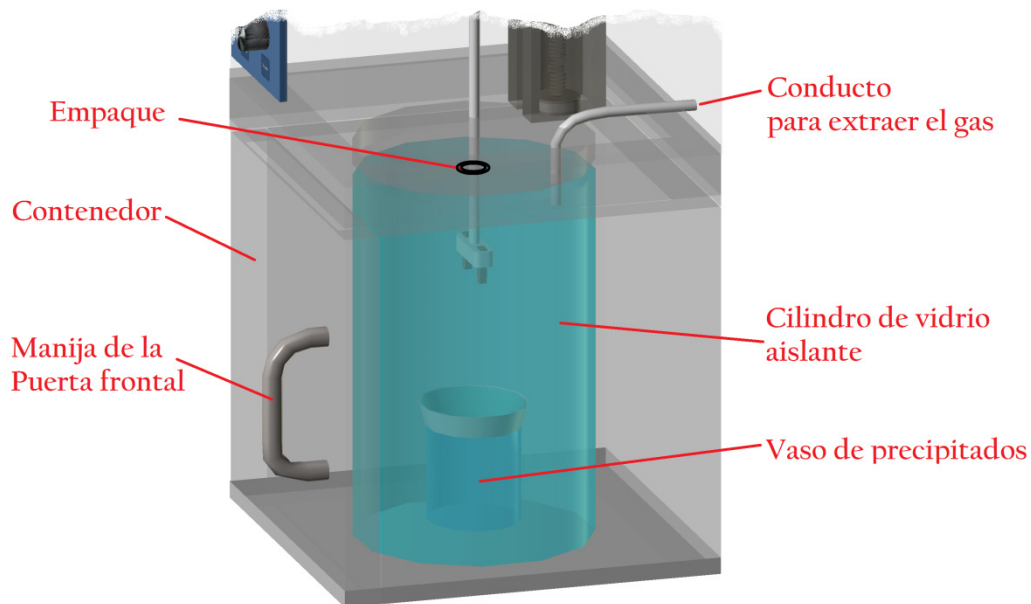


Figura 5.7 Sección inferior del gabinete y partes que lo conforman.

La figura 5.7 muestra el contenedor en la parte inferior del sistema; para tener acceso a su interior se utiliza la **manija de la puerta frontal**. En el centro se encuentra el **vaso de precipitados** que contendrá el electrolito, alrededor se tiene un **cilindro de vidrio pyrex** que tiene el objetivo de aislar las paredes del contenedor para evitar los efectos de la corrosión y la contaminación por residuos (como ácido y polvo). Durante el experimento en el interior del vaso de precipitados, el electrolito cambia su concentración y en la reacción electroquímica que existe se producen gases; en el caso del gas producido con ácido sulfúrico, se va depositando azufre en las terminales en donde se conectan los electrodos (los cuales con el tiempo se deben cambiar porque se deterioran).

Para la construcción de la sección inferior del gabinete se colocará un **conducto para extraer el gas**, éste va conectado a un extractor para canalizar los gases a una campana adecuada en el laboratorio y así evitar que se acumulen en el contenedor.

A continuación se muestran más imágenes 3-D representativas del sistema, diseñadas con el software libre Anim8or versión 0.95 [o], Desde figura 5.8 a la figura 5.12

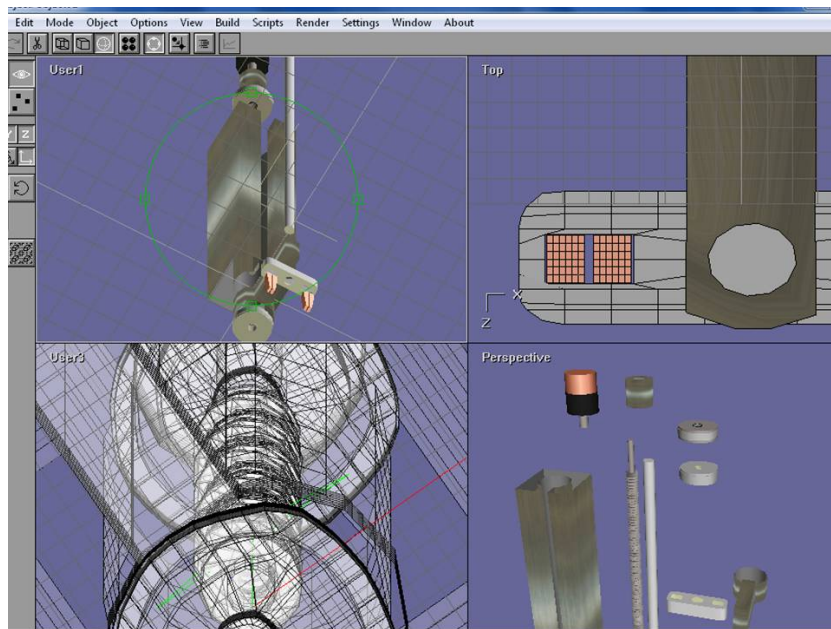


Figura 5.8 Diseño de la columna mecánica

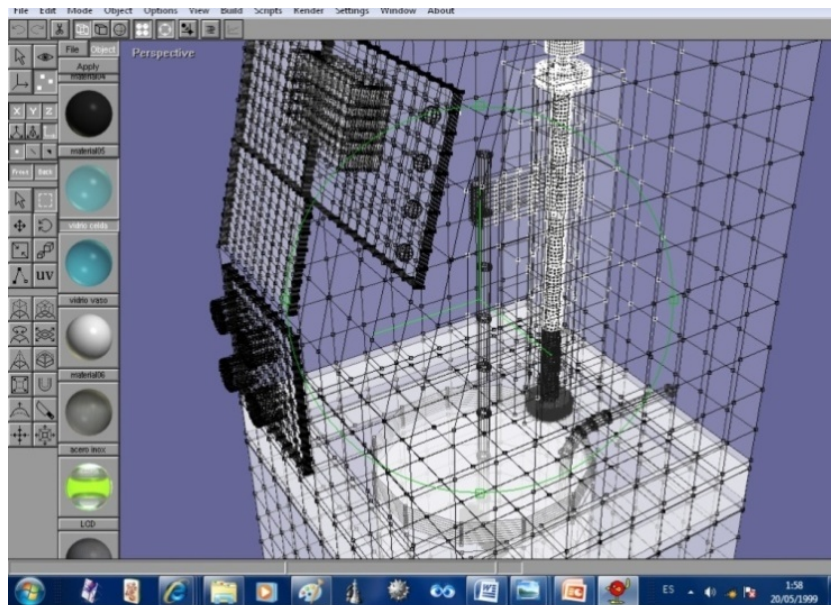


Figura 5.9 Vista de nodos del sistema

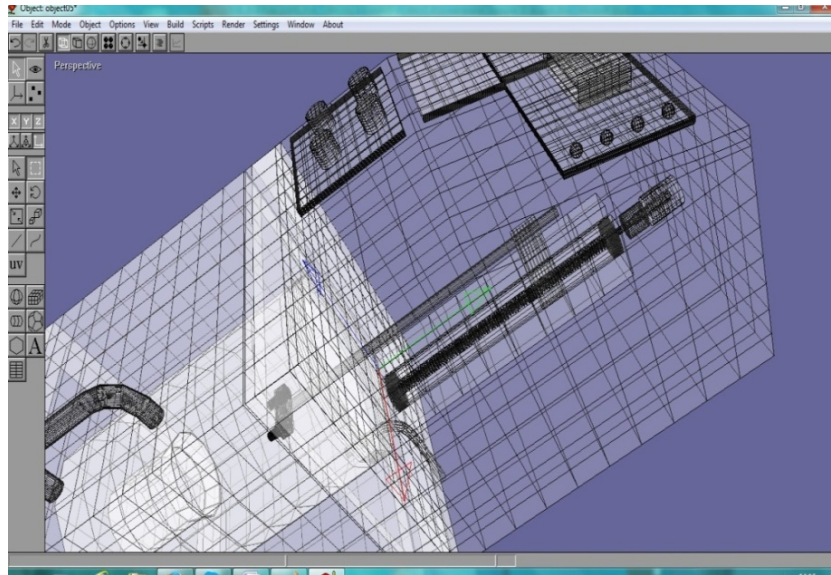


Figura 5.10 Vista de la malla del sistema



Figura 5.11 Gabinete



Figura 5.12 Modelado final del gabinete

CONCLUSIONES:

Los resultados que se obtienen al formar grupos multidisciplinarios suelen ser muy satisfactorios; particularmente en éste trabajo se planea una solución que involucra la ingeniería con la investigación en la ciencia de materiales.

Generalmente como no hay en el mercado equipos baratos para controlar algunos experimentos en diversas áreas, se deben plantear sistemas más costeables que ayuden a desarrollar la tecnología en el país. El sistema de la celda electroquímica automatizada puede ser parte de este desarrollo tecnológico.

Al mejorar el sistema original de la celda obtendremos más certidumbre en los resultados esperados, como en el control del tamaño de los nanoporos; de este modo se logra un diseño específico para obtener membranas nanoporosas en aluminio.

Aplicar formas de onda en la celda electrolítica ayudará a encontrar como cambiar la morfología del poro en las membranas.

Bajo diferentes condiciones experimentales, (que serían fáciles de cambiar con el diseño propuesto) se podrían unir poros con ciclos y generar interconexiones, haciendo estructuras en forma de Y.

En cuanto al diseño electrónico y el mecánico, las características finales de la celda electrolítica son:

Un sistema con un panel físico conformado por un teclado, unos potenciómetros, un display LCD y unos LED's indicadores.

Se puede tener en la celda para cada experimento, una de las cuatro posibles señales (DC, sinusoidal, cuadrada y triangular). La tensión en la señal DC se puede variar de $0[V_{DC}]$ a $20[V_{DC}]$, con la posibilidad de aplicar una tensión de offset variable entre $\pm 5[V_{DC}]$.

Para el generador de formas de ondas: El rango de la frecuencia es de $1[Hz]$ a $10[KHz]$, con una amplitud que se puede variar hasta una máxima de $20[V_{pp}]$ y si se requiere, con una tensión de offset variable entre $\pm 15[V_{DC}]$.

El tiempo del proceso experimental puede elegirse en un rango de $1[\text{min}]$ a $24[\text{Hrs}]$.

La columna mecánica provee el soporte para los dos electrodos; ya colocados manualmente e introducido los datos al sistema con el teclado y los potenciómetros, se da inicio al proceso. Los electrodos son sumergidos en el electrolito durante el tiempo elegido y al final del proceso son emergidos del electrolito.

El mantenimiento preventivo es fundamental, sobre todo en la parte mecánica, en lo que se refiere a la lubricación del tornillo sinfín. Del mismo modo se deben revisar el estado de los caimanos que sostienen a los electrodos, ya que la corrosión es un factor no deseado; pero muy complejo de erradicar, por lo que se deben cambiar cuando sea considerado.

Técnicamente para el desarrollo de las membranas nanoporosas se observa que:

Es diferente el comportamiento de la celda electrolítica bajo régimen potencioestático y galvanostático.

La concentración del electrolito va siendo afectada y disminuye conforme transcurre el tiempo, cuando la corriente circula a través del mismo.

Se debe cuidar el material que funge como ánodo; deberá ser un sustrato sin impurezas y lo más uniforme posible en su superficie.

La formación de óxido conocida como crecimiento en estado estacionario, que da origen a la capa barrera nos determina parte de la uniformidad y distribución del óxido creciendo en forma de poros.

Es importante determinar que electrolito se utilizará para los efectos de crecimiento en las membranas de óxido de aluminio. La uniformidad en el diámetro de poro, se verá afectada por la estructura dada en la capa barrera; dependiendo del electrolito utilizado influirá o no la temperatura. El tiempo de exposición en el electrolito influye en el ensanchamiento de las paredes del poro, más aun por los diferentes porcentajes en las concentraciones.

Obviamente influye una buena regulación en la tensión y/o la densidad de corriente a través de la celda.

La longitud de los poros dependerán del tiempo de anodizado, el comportamiento de la celda es diferente cuando el electrolito se tiene en agitación o está lo más estático posible.

APÉNDICE A

ELECTROQUÍMICA EN MEMBRANAS

A.1 COMPORTAMIENTO ELECTROQUÍMICO: Dentro de la celda electrolytica

Existen dos tipos de celdas en las que se llevan a cabo las reacciones electroquímicas:

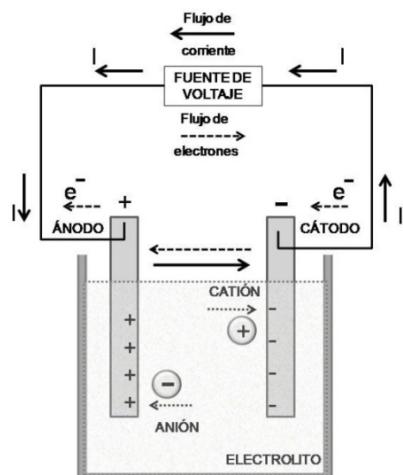
- 1) Una celda galvánica que utiliza la energía liberada en una reacción espontánea para generar electricidad.
- 2) Una celda electrolytica que utiliza la energía eléctrica para provocar una reacción química no espontanea. [2]

	Celda galvánica o pila	Celda electrolytica
Transforma	E. química \rightarrow E. eléctrica	E. eléctrica \rightarrow E. química
	Proporciona energía	Consume energía
Electrodo (+)	Cátodo (reducción)	Ánodo (oxidación)
Electrodo (-)	Ánodo (oxidación)	Cátodo (reducción)

Tabla A.a Tipos de celda electroquímica.

En la Tabla A.a se observa que la polaridad depende del tipo de celda y se establece según la dirección de corriente eléctrica.

Una celda electrolytica básica está constituida por dos electrodos llamados ánodo y cátodo, sumergidos dentro de un recipiente que contiene un electrolito y una fuente que proporciona una diferencia de potencial (ver figura A.1). Al cerrar el circuito, ocurren reacciones en cada interfaz por flujo de electrones.



Coloquialmente se dice que la fuente funciona como una bomba de electrones, llevando electrones al cátodo, donde ocurre la reducción; y sacando electrones al ánodo, donde ocurre la oxidación.

Figura A.1 Celda electrolytica

A continuación se explica con más detalle la descripción sobre que sucede en una interfaz metal-disolución; ésta nos ayudará a entender de forma más puntual el proceso de formación de las membranas nanoporosas.

De manera particular se sabe que cuando un átomo o molécula neutros, pierden o ganan electrones, forman un catión o un anión respectivamente; éstas son partículas cargadas conocidas como iones [2]. Los aniones y los cationes tendrán un papel importante, ya que al circular una corriente eléctrica a través del electrolito se presenta uno de los procesos conocidos como solvatación.

La solvatación es un proceso de asociación de moléculas de un disolvente con moléculas o iones de un soluto. Los iones se dispersan y son rodeados por moléculas del disolvente. A menor tamaño del ión, más moléculas del disolvente lo pueden rodear y más solvatado se encontrará (Así, el ión pequeño se une fuertemente con el disolvente). Esto es porque la fuerza electrostática entre el núcleo del ión y la molécula del disolvente, disminuye notablemente con la distancia entre ellos. Si a un ión solvatado se le rompe su envoltura de solvatación y este ión es adsorbido por el electrodo, se le llamará adsorbato.

A.2 EL ALCANCE DE LA ELECTROQUÍMICA

En la electroquímica nos interesan las estructuras y los procesos en la interfaz entre un conductor electrónico (electrodo) y un conductor iónico (electrolito) o en la interfaz entre dos electrolitos. [18]

Por Interfaz denotamos esas regiones de dos fases adyacentes, cuyas propiedades difieren significativamente de la masa restante. La modificación de la superficie del electrodo por diferentes tipos de adsorbatos, puede producir diferentes estructuras. Tales modificaciones tienen importantes aplicaciones en diferentes campos, tales como la protección contra la corrosión, en electrocatálisis, y el desarrollo de sensores. [18]

A.2.1 UN SISTEMA TÍPICO: La interfaz de metal-solución

Reacciones que impliquen transferencia de carga a través de la interfaz y por lo tanto flujo de corriente, son llamadas reacciones electroquímicas.

Si una sola reacción de transferencia de carga se lleva a cabo en el sistema, su velocidad es directamente proporcional a la densidad de corriente, es decir, la corriente por unidad de área.

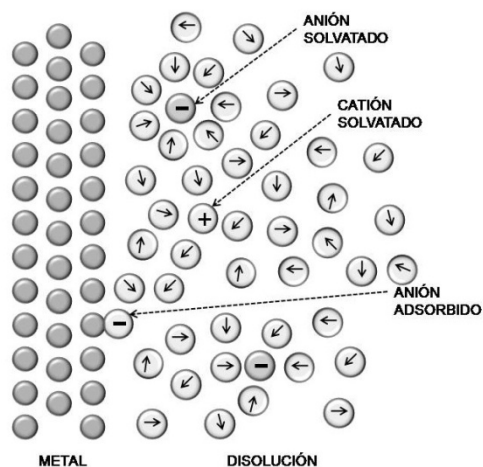


Figura A.2 Estructura y procesos en la interfaz metal-disolución. [18]

En la figura A.2, tenemos un ejemplo de deposición de metal. Los átomos de metal son indicados por los círculos grises. Las moléculas de disolvente generalmente llevan un momento dipolar, los momentos inducen una fuerte interacción con los iones, lo que se conoce como solvatación o, en el caso del agua, como la hidratación; son representados como esferas con un dipolo en el centro.

Los iones (aniones y cationes) se indican mediante esferas con una carga en el centro.

En la parte superior de la imagen se observa un anión y un catión, que están cerca de la superficie del electrodo, pero no en contacto con ella; están separados del metal por sus envolturas de solvatación.

Abajo se observa un anión en contacto con el metal; decimos que es específicamente adsorbido si se mantiene allí por las interacciones químicas. Generalmente los aniones son solvatados con menos fuerza que los cationes, por lo que sus vainas de solvatación son más fáciles de romper, y son más a menudo específicamente adsorbidos, particularmente sobre las superficies metálicas cargadas positivamente.

El sustrato es cualquier sustancia sobre la que actúan los adsorbatos produciendo su modificación en productos finales de la reacción. En esta tesis en particular se busca obtener la membrana nanoporosa en el ánodo y un electrodo de aluminio es el que funge como sustrato.

Generalmente la interfaz está cargada, la superficie del metal lleva un exceso de carga que se equilibra con una carga de igual magnitud y de signo contrario en el lado de la disolución de la interfaz. Ver figura A.3

En la distribución de carga para el caso en el que el metal lleva una carga positiva en exceso y la solución una carga negativa; hay un déficit de electrones en la superficie del metal y más aniones que cationes en el lado de la disolución de la interfaz.

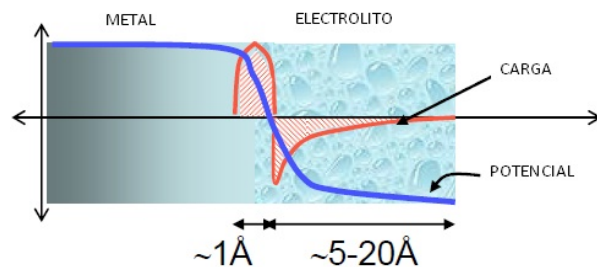


Figura A.3 Distribución de la carga y el potencial en la interfaz metal-solución. [18]

A.3 LA INCORPORACIÓN DE ANIONES

La incorporación de aniones en la estructura de la capa de óxido anódico depende fuertemente del tipo de película de óxido formado. La formación de alúmina porosa durante anodización conduce a un contenido de aniones superior en la estructura, que para los recubrimientos de tipo barrera [19].

Para el crecimiento en estado estacionario de la película tipo barrera, la formación de óxido se produce simultáneamente en la interfaz electrolito-óxido y óxido-metal, y está asociada con la dirección en sentidos opuestos de los iones Al^{3+} y $\text{O}^{2-} / \text{OH}^-$. Sin embargo, una parte de la migración de iones Al^{3+} es expulsada directamente en la solución y no toman una parte en la formación de la película de óxido sólido [20.21].

Por lo tanto en un crecimiento con una alta eficacia, 40% del material se forma en la superficie de la película y el resto formado se da en la interfaz óxido-metal.

Hay una diferencia significativa en el crecimiento de la película porosa en comparación con la de tipo barrera formada sobre aluminio. Para el crecimiento de la película de alúmina porosa, la formación se produce sólo en la interfaz óxido / metal, y los aniones migran a la capa de barrera de acuerdo con el campo eléctrico. El campo eléctrico en la capa barrera no es uniforme debido a la forma semi-esférica de la base de poros, y es mucho mayor cerca de la base del poro para la interfaz electrolito-óxido que en la base de la celda cerca de la interfaz óxido-metal [22]; por esta razón, la incorporación de aniones electrolíticos se produce más fácilmente. El mayor contenido de aniones incorporados en alúmina porosa es también una consecuencia directa de una exposición a largo plazo de las paredes de óxido en un ácido con penetración activa.

La uniformidad de diámetro del poro está fuertemente afectada por el ataque químico del ácido.

La duración de anodización también alterna la regularidad de la estructura anódica alúmina porosa. Una mejora en la disposición de nanoporos y un aumento en el tamaño medio de los dominios que presenta la estructura de un poro ideal, se observaron al aumentar el tiempo de anodización para soluciones sulfúrico [23.24.25], oxálico [23.26], fosfórico [23.27] y ácido malónico [28].

Además, la extendida anodización no sólo reordena las células sino que también reduce el número de defectos y dislocaciones en la nanoestructura.

Recientemente, las películas con poros de óxido de aluminio anodizado, conocidas como AAO (Porous Anodized Aluminum Oxide) han sido ampliamente utilizadas como plantillas para fabricación de otros nanomateriales. Suelen ser sometidas a un post-tratamiento opcional que incluye retirar la base de aluminio y la eliminación o reducción de la capa barrera. [1]

A.4 TRANSPORTE DE IONES EN LAS DISOLUCIONES: Como respuesta a diferentes señales eléctricas

Se propone un generador de ondas con diferentes señales eléctricas, para realizar nuevos experimentos y obtener resultados dados por su comportamiento a través del electrolito.

Así, observando como un comportamiento de grupo, al movimiento de iones en una dirección preferida, tenemos como origen a un flujo definido como velocidad de transporte. Estos movimientos son de vital importancia para que un sistema electroquímico pueda funcionar con continuidad.

Un flujo de iones puede producirse de tres formas:

- Si en distintas regiones de un electrolito hay diferencias de concentración de los iones, el gradiente de concentración resultante producirá un flujo de iones. Este fenómeno se llama **difusión**.
- Si entre distintos puntos de un electrolito existen diferencias de potencial electrostático, el campo eléctrico resultante es causa de un flujo de cargas en el sentido del campo. Este es llamado **emigración o conducción**.
- Finalmente, si en varias partes del electrolito existen diferencias de densidad o temperatura, el líquido empieza a desplazarse como conjunto, o bien unas partes del mismo con respecto a otras. Se trata, en este caso, de un **flujo hidrodinámico** [29].

La medida y control de los potenciales de celda es uno de los aspectos más importantes de la electroquímica experimental [30]. En general se requiere de una investigación compleja para analizar las respuestas dadas por transporte de iones en las disoluciones a los diferentes estímulos producidos por una señal escalón, sinusoidal, etc.

Con el diseño de la celda electrolítica que se propone, se pretenden obtener muestras de flujos manifestados por estas diferentes señales aplicadas; como las formas de onda sinusoidal, cuadrada y triangular. Con las que cuenta la etapa de generación aquí dada por el circuito integrado ICL8038. Principalmente, con estas formas de onda, es como se pretende cambiar la morfología de las membranas nanoporosas de óxido de aluminio.

Se enumeran valores experimentales de B_U para una variedad de electrolitos, conocidos como relación de anodización; B_U se define como una relación entre el espesor de la capa barrera y el potencial de anodización, la variación de espesor por voltio depende de si las películas de óxido se forman a un potencial constante o densidad de corriente constante [4]. Esto se puede atribuir al hecho de que, a densidad de corriente constante, se mantiene un campo eléctrico constante a través de la capa barrera propuesta.

Electrolyte	Current density ^a (mA cm ⁻²) or anodizing potential ^b (V)	Concentration (M)	Temperature (°C)	B_U (nm V ⁻¹)	Reference(s)
H ₃ PO ₄	100 ^a ; 80 ^b	0.4 (3.8%)	20	0.89 ^a ; 1.14 ^b	[208]
			25	0.90 ^a ; 1.09 ^b	
			30	1.05 ^a ; 1.04 ^b	
		1.5 (13%)	25	1.10 ^a ; 1.04 ^b	
		2.5 (21%)		1.17 ^a ; 0.82 ^b	
	(20–60) ^b	0.42 (4%)	24	1.19 ^b	[197,243]
	87 ^b		25	0.99 ^b	[232]
	103 ^b			0.96 ^b	
	117.5 ^b			1.08 ^b	
	87 ^b	1.70 (15%)		0.99 ^b	
87 ^b	3.10 (25%)		0.97 ^b		
H ₂ C ₂ O ₄	(20–60) ^b	0.22 (2%)	24	1.18 ^b	[197,243]
	3 ^b	0.45 (4%)	30	1.66 ^b	[237]
	10 ^b			1.40 ^b	
	20 ^b			1.19 ^b	
	30 ^b			1.10 ^b	
	40 ^b			1.06 ^b	
H ₂ SO ₄	15 ^b	1.70 (15%)	10	1.00	[243]
		1.10 (10%)	21	1.00 ^b	[244]
		1.70 (15%)		0.95 ^b	
		5.6–9.4 (40–60%)		0.80 ^b	
		12.8 (75%)		0.95 ^b	
		16.5 (90%)		0.10 ^b	
	3 ^b	2.0 (17%)	20	1.45 ^b	[238]
	10 ^b			1.23 ^b	
	15 ^b			1.05 ^b	
	18 ^b			0.92 ^b	
H ₂ CrO ₄	(20–60) ^b	0.26 (3%)	38	1.25 ^b	[244]
Na ₂ B ₄ O ₇	60 ^b	0.25 (pH = 9.2)	60	1.3 ^b	[201]
(NH ₄) ₂ C ₄ H ₄ O ₆	(25–100) ^b	0.17 (3%, pH = 7.0)	–	1.26 ^b	[223]
Citric acid	(260–450) ^b	0.125	21	1.1 ^b	[217]

^aConstant current density anodizing.

^bConstant potential anodizing.

Tabla A.b Relación de anodización (B_U) para varios electrolitos.

APÉNDICE B

GENERADOR DE FORMA DE ONDA

B.1 GENERADOR DE FORMA DE ONDA DE PRECISIÓN (ICL8038)

El circuito integrado ICL8038 es un generador de onda de precisión, fungen como oscilador controlado por voltaje (VCO, Voltage-Controlled Oscillator). Fabricado con tecnología monolítica avanzada, usa diodos de barrido Schottky y delgadas películas de resistores. Es capaz de producir con alta aproximación formas de onda sinusoidal, cuadrada, triangular, diente de sierra y pulsos con un mínimo de componentes externos. Posee una alta estabilidad de la frecuencia (250 ppm/°C) ante las variaciones de temperatura y el voltaje de alimentación. La frecuencia (repetition rate) puede ser seleccionada de 0.001 Hz a 300KHz. Cuenta con la posibilidad de realizar modulación en frecuencia (FM), proporcionando señales periódicas a la salida por medio de la variación del nivel de voltaje en el pin 8 [c].

B.1.1 Información sobre la aplicación.

El voltaje de alimentación puede ser de 10V a 30V si utilizamos fuente simple o $\pm 5V$ a $\pm 15V$ si usamos fuente simétrica.

Analizando el diagrama en bloques de la hoja de datos del ICL8038 provisto por el fabricante, encontramos lo siguiente: dos comparadores, dos fuentes de corriente #1 y #2, un flip-flop que selecciona la fuente de corriente #1 o #2, amplificadores de salidas y un convertidor de onda triangular a sinusoidal. Ver figura B.1

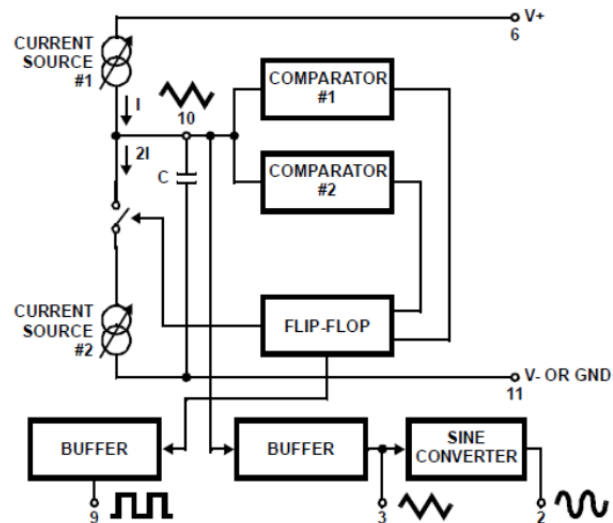


Figura B.1 Diagrama de bloques ICL8038 [c].

Un capacitor externo C es cargado y descargado por dos fuentes de corriente. La fuente de corriente #2 es conectada y desconectada por un flip-flop, mientras que la fuente #1 funciona continuamente. Asumiendo que el flip-flop está en un estado tal que la fuente #2 este desconectada y el capacitor es cargado con la corriente I de la fuente #1, la tensión a través del capacitor sube linealmente con el tiempo. Cuando ésta tensión alcanza el nivel determinado del comparador #1, correspondiente a $2/3V_{cc}$, el comparador #1 (Comparator#1) dispara el flip-flop y hace cambiar de estado a la fuente de corriente #2. Esta fuente normalmente transporta una corriente 2I, entonces el capacitor es descargado con una corriente neta I por estar la fuente #2 en oposición, y con eso la tensión en bornes del capacitor decrece linealmente con el tiempo.

Cuando la tensión de descarga alcanza el nivel determinado del comparador #2, correspondiente a $1/3V_{cc}$, el comparador 2 (Comparator#2) dispara nuevamente el flip-flop, colocándolo en su estado original y el ciclo comienza nuevamente [c].

B.2 CÁLCULOS PARA EL GENERADOR DE FORMAS DE ONDAS

B.2.1 Determinación de ecuaciones principales

Para utilizar los valores de resistencias interna del integrado ICL8038; $R_1 = 11[K\Omega]$ y $R_2 = 39[K\Omega]$, el fabricante proporciona las expresiones:

$$V_{SUPPLY} = V_{CC} = |(V_{cc+})| + |(V_{cc-})| \quad (ec\ 1)$$

$$I = \left(\frac{R_1[|(V_{cc+})| + |(V_{cc-})|]}{R_1 + R_2} \right) \left(\frac{1}{R_A} \right) \quad (ec\ 2)$$

$$t_1 = \frac{CV}{I_1} \quad (ec\ 3)$$

$$t_2 = \frac{CV}{I_2} \quad (ec\ 4)$$

$$f = \frac{1}{t_1 + t_2} \quad (ec\ 5)$$

En lugar de unir el (pin 7) y el (pin 8) del circuito, como propone el fabricante, Diseñamos nuestra R_1 y R_2 , para barrer (sweep) el voltaje en el (pin 8).

Es importante observar lo siguiente:

$$V = \left(\frac{1}{3}\right)V_{SUPPLY} \quad (\text{ec 6})$$

$$I_1 = I_{R_A} \quad (\text{ec 7})$$

$$I_2 = 2I_{R_B} - I_{R_A} \quad (\text{ec 8})$$

Con (ec 2) en R_A y R_B ; para encontrar I_1 e I_2 tendremos:

$$I_{R_A} = \left(\frac{R_1[V_{SUPPLY}]}{R_1 + R_2}\right)\left(\frac{1}{R_A}\right) = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2}\right)\left(\frac{V_{SUPPLY}}{R_A}\right) \quad (\text{ec 9})$$

$$I_{R_B} = \left(\frac{R_1[V_{SUPPLY}]}{R_1 + R_2}\right)\left(\frac{1}{R_B}\right) = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2}\right)\left(\frac{V_{SUPPLY}}{R_B}\right) \quad (\text{ec 10})$$

Sustituyendo I_{R_A} (ec 9) e I_{R_B} (ec 10) en t_1 (ec 3) y t_2 (ec 4) obtenemos:

$$t_1 = \frac{CV}{I_{R_A}} = \frac{C \left(\frac{1}{3}\right) V_{SUPPLY}}{\frac{R_1(V_{SUPPLY})}{(R_1 + R_2)} \left(\frac{1}{R_A}\right)} = \frac{R_A C}{3 \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2}\right)}$$

$$\begin{aligned} t_2 &= \frac{CV}{2I_{R_B} - I_{R_A}} = \frac{C \left(\frac{1}{3}\right) V_{SUPPLY}}{2 \left[\left(\frac{R_1}{R_1 + R_2}\right) \frac{V_{SUPPLY}}{R_B} \right] - \left[\left(\frac{R_1}{R_1 + R_2}\right) \frac{V_{SUPPLY}}{R_A} \right]} \\ &= \frac{C \left(\frac{1}{3}\right) V_{SUPPLY}}{\left[\left(\frac{R_1}{R_1 + R_2}\right) (V_{SUPPLY}) \right] \left[\frac{2}{R_B} - \frac{1}{R_A} \right]} = \frac{C \left(\frac{1}{3}\right)}{\left(\frac{R_1}{R_1 + R_2}\right) \left[\frac{2R_A - R_B}{R_A R_B} \right]} \\ &= \frac{C \left(\frac{1}{3}\right) R_A R_B}{\left(\frac{R_1}{R_1 + R_2}\right) (2R_A - R_B)} = \frac{C R_A R_B}{3 \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2}\right) (2R_A - R_B)} \\ &= \frac{R_A R_B C}{3 \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2}\right) (2R_A - R_B)} \end{aligned}$$

Ahora sustituyendo t_1 y t_2 en (ec 5)

$$f = \frac{1}{t_1 + t_2} = \frac{1}{\left[\frac{R_A C}{3 \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right)} \right] + \left[\frac{R_A R_B C}{3 \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) (2R_A - R_B)} \right]}$$

$$= \frac{1}{\left[\frac{R_A C}{3 \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right)} \right] \left[1 + \frac{R_B}{(2R_A - R_B)} \right]} = \frac{3 \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right)}{R_A C + \left[\frac{2R_A - R_B + R_B}{(2R_A - R_B)} \right]}$$

$$f = \frac{3 \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right)}{R_A C + \left(\frac{2R_A}{(2R_A - R_B)} \right)}$$

De los movimientos algebraicos anteriores, las nuevas ecuaciones son:

$$I = \left(\frac{R_1 [|V_{cc+}| + |V_{cc-}|]}{R_1 + R_2} \right) \left(\frac{1}{R_A} \right) \quad (\text{ec 11})$$

$$t_1 = \frac{R_A C}{3 \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right)} \quad (\text{ec 12})$$

$$t_2 = \frac{R_A R_B C}{3 \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) (2R_A - R_B)} \quad (\text{ec 13})$$

$$f = \frac{3 \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right)}{R_A C + \left(\frac{2R_A}{(2R_A - R_B)} \right)} \quad (\text{ec 14})$$

B.2.2 Determinación de tiempo en forma de onda.

La simetría de todas las formas de onda, pueden ser ajustadas con resistores externos que determinan la duración del tiempo (timing external resistors).

R_A controla la porción creciente de la onda triangular y sinusoidal, y el primer estado o flanco alto de la señal cuadrada. Tenemos que la frecuencia será de: 1Hz hasta 10kHz

Determinamos el tiempo en forma de onda con ciclo de trabajo al 50%.

Entonces el ciclo de trabajo de 50% es activado cuando $R_A = R_B$

Para lograr un ciclo de trabajo de 50% deberá usarse un potenciómetro de 2K Ω o 5K Ω

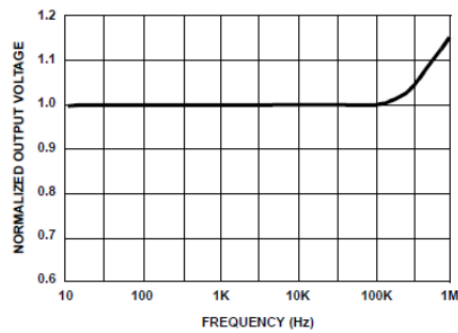


Figura B.2 Voltaje de salida de onda triangular vs frecuencia [c].

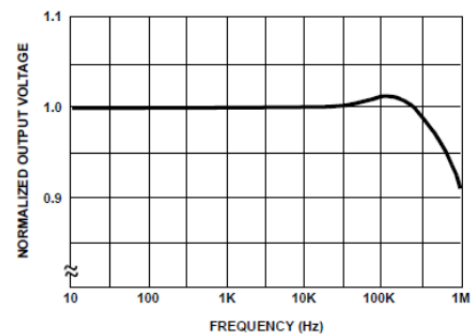


Figura B.3 Voltaje de salida de onda sinusoidal vs frecuencia [c].

Ni el tiempo, ni la frecuencia, dependen de la fuente de tensión, aunque los voltajes no estén regulados dentro del circuito integrado. Esto es debido al hecho de que ambas corrientes y umbrales están directos, y son funciones lineales de la fuente de tensión y entonces sus efectos se cancelan. En la figura B.2 y la figura B.3 se observa que el voltaje normalizado es lineal y estable hasta la frecuencia de 10KHz que es la seleccionada en nuestro diseño; aproximándose a los 100KHz cambian sus valores.

Finalmente fijando el ciclo de trabajo al 50% | 50%; es decir para t_1 y t_2 tenemos $R = R_A = R_B$. También sust. en ecuaciones 11,12,13,14,15 se obtienen:

$$I = \left(\frac{R_1[|(V_{cc+})| + |(V_{cc-})|]}{R_1 + R_2} \right) \left(\frac{1}{R} \right) \quad (\text{ec A})$$

$$t_1 = \frac{RC}{3 \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right)} \quad (\text{ec B})$$

$$t_2 = \frac{RC}{3 \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right)} \quad (\text{ec C})$$

$$f = \frac{3}{2} \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) \left(\frac{1}{RC} \right) \quad (\text{ec D})$$

$$T = \frac{1}{f} \quad (\text{ec E})$$

B.2.3 Cálculos para determinar R_1 , R_2 y el voltaje de barrido.

Debemos de tomar en cuenta los rangos de operación máximos para ICL8038 dadas por las especificaciones del fabricante:

<i>Fuente Simple</i>	$10[V] \leq V_{SUPPLY} \leq 30[V]$
<i>Fuente Bipolar</i>	$\pm 5[V] \leq V_{SUPPLY} \leq \pm 15[V]$
<i>Rango de frecuencia</i>	$0.001[Hz] \text{ a } 300[KHz]$
<i>Corriente</i>	$10[\mu A] \leq I \leq 1[mA]$

En el sistema mejorado que proponemos, elegimos una fuente bipolar simétrica para alimentar el ICL8038, al observar la figura B.4, en 20[V] se tiene un comportamiento más cercano al valor de 1.00 en la frecuencia normalizada. Por esa razón de comportamiento más estable del integrado, elegimos el voltaje de alimentación de nuestro diseño de $\pm 10[V_{DC}]$. En total la suma del valor absoluto de la tensión positiva y el valor absoluto de la tensión negativa nos dan los 20[V]

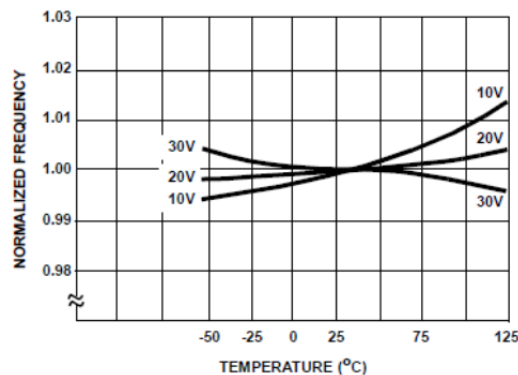


Figura B.4 Frecuencia vs temperatura para polarización de ICL8038 [c].

En la (ec 1) sustituimos los valores elegidos

$$\text{Para } V_{CC+} = +10[V_{DC}] ; V_{CC-} = -10[V_{DC}]$$

$$\text{Tenemos que } V_{SUPPLY} = V_{CC} = |(+10)| + |(-10)| = \pm 10[V_{DC}] = 20[V_{DC}]$$

Nota: Para la tensión de alimentación V_{supply} es el voltaje total de la fuente, en las ecuaciones encontraremos la expresión V_{cc} , es decir, $V_{supply} = V_{cc}$; de igual modo V_{cc+} y V_{cc-} corresponden en este caso, a un valor de +10V y -10V respectivamente.

La frecuencia del generador es una función directa del voltaje DC, el potencial (V_{SWEEP}) en el pin8 debe ser barrido desde V_{CC} . Alterando este voltaje, la modulación de frecuencia es ejecutada [d].

$$\frac{2}{3} V_{SUPPLY} + 2V \leq V_{Sweep} \leq V_{SUPPLY} \quad (\text{ec 15})$$

El intervalo de tensión de barrido con respecto al voltaje total de la fuente de alimentación, será:

$$\begin{aligned} \frac{2}{3} (20)[V] + 2V &\leq V_{Sweep} \leq 20[V] \\ \frac{46}{3} [V] &\leq V_{Sweep} \leq 20[V] \\ 15. \overline{33}[V] &\leq V_{Sweep} \leq 20[V] \end{aligned}$$

Divisor de tensión para la entrada en (pin 8)

$$V_{Sweep} = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) [|V_{CC+}| + |V_{CC-}|] \quad (\text{ec 16})$$

$$V_{Sweep} - |V_{CC-}| \leq V'_{Sweep} \leq V_{Sweep} - |V_{CC+}| \quad (\text{ec 17})$$

$$V_1 = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) (V_{CC}) \quad (\text{ec 18})$$

De la (ec 17) encontramos el intervalo de tensión de barrido con respecto a la tensión real de la fuente simétrica bipolar:

$$\begin{aligned} (15. \overline{33} - 10)[V] &\leq (V'_{Sweep}) \leq (20 - 10)[V] \\ 5. \overline{33}[V] &\leq (V'_{Sweep}) \leq 10[V] \end{aligned}$$

Ahora para obtener los valores en R_1 y R_2 , se debe barrer la tensión, dentro del siguiente intervalo:

$$15. \overline{33}[V] \leq V_{Sweep} \leq 20[V]$$

Para el valor del extremo $V_{CC} = 20[V_{DC}]$, utilizamos la (ec 18)

$$V_1 = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) (V_{CC}) ; \text{ propongo } V_1 = 19.6[V_{DC}]$$

$$\left(\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right)(V_{cc}) \leq V_1 \quad ; \quad \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right) \leq \frac{V_1}{V_{cc}}$$

$$\left(\frac{R_2 \left(1 - \frac{V_1}{V_{cc}}\right)}{\left(\frac{V_1}{V_{cc}}\right)}\right) \leq R_1$$

$$\left(\frac{R_2 \left(1 - \frac{19.6}{20}\right)}{\left(\frac{19.6}{20}\right)}\right) \leq R_1 \quad ; \quad \left(\frac{R_2(1 - 0.98)}{(0.98)}\right) \leq R_1$$

$$R_2(0.020408) \leq R_1 \quad ; \quad R_2 \leq \frac{R_1}{0.020408}$$

$$R_2 \leq \frac{R_1}{0.020408} \quad (\text{ec } 19)$$

$$\text{Si } R_1 = 1[K\Omega] \quad ; \quad R_2 \leq \frac{1}{0.020408} \quad ; \quad \therefore R_2 \leq 49[K\Omega] \quad \checkmark$$

$$\text{Si } R_1 = 11[K\Omega] \quad ; \quad R_2 \leq \frac{11}{0.020408} \quad ; \quad \therefore R_2 \leq 539[K\Omega] \quad \mathbf{X}$$

Ahora para el valor del otro extremo $\frac{46}{3} = 15.\overline{33}[V]$ de nuevo la (ec 18)

$$\left(\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right)(V_{cc}) \geq V_1 \quad ; \quad \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right) \geq \frac{V_1}{V_{cc}}$$

$$\left(\frac{R_2 \left(1 - \frac{V_1}{V_{cc}}\right)}{\left(\frac{V_1}{V_{cc}}\right)}\right) \geq R_1$$

$$\left(\frac{R_2 \left(1 - \frac{46/3}{20}\right)}{\left(\frac{46/3}{20}\right)}\right) \geq R_1 \quad ; \quad \left(\frac{R_2 \left(1 - \frac{23}{30}\right)}{\left(\frac{23}{30}\right)}\right) \geq R_1$$

$$R_2 \left(\frac{7}{23} \right) \geq R_1 \quad ; \quad R_2(0.304347) \geq R_1$$

$$R_2 \geq \frac{R_1}{0.304347} \quad (\text{ec } 19)$$

$$\text{Si } R_1 = 1[\text{K}\Omega] \quad ; \quad R_2 \geq \frac{1}{0.304347} \quad ; \quad \therefore R_2 \geq 3.28[\text{K}\Omega] \quad \mathbf{X}$$

$$\text{Si } R_1 = 11[\text{K}\Omega] \quad ; \quad R_2 \geq \frac{11}{0.304347} \quad ; \quad \therefore R_2 \geq 36.142[\text{K}\Omega] \quad \checkmark$$

Al seleccionar los valores funcionales de las resistencias:

$$1 \leq R_1 \leq 11 \quad [\text{K}\Omega]$$

$$36.142 \leq R_2 \leq 49 \quad [\text{K}\Omega]$$

Aquí va el divisor de tensión para

$$R_1 = 1[\text{K}\Omega] \quad ; \quad R_2 = 49[\text{K}\Omega]$$

$$R_1 = 11[\text{K}\Omega] \quad ; \quad R_2 = 39[\text{K}\Omega]$$

Finalmente:

$$1 \leq R_1 \leq 11 \quad [\text{K}\Omega]$$

$$39 \leq R_2 \leq 49 \quad [\text{K}\Omega]$$

Verificando que V_{Sweep} queda dentro del intervalo:

$$15.33[V] \leq V_{Sweep} \leq 20[V]$$

$$V_1 = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) (V_{CC}) \quad ; \quad V_{CC_{TOTAL}} = 20[V_{DC}]$$

$$V_1 = \left(\frac{49}{50} \right) (20) = 19.6[V_{DC}] \quad ; \quad V_{CC} = 20[V_{DC}] \quad ; \quad R_1 = 1[\text{K}\Omega] \quad ; \quad R_2 = 49[\text{K}\Omega]$$

$$V_1 = \left(\frac{39}{50} \right) (20) = 15.6[V_{DC}] \quad ; \quad V_{CC} = 20[V_{DC}] \quad ; \quad R_1 = 11[\text{K}\Omega] \quad ; \quad R_2 = 39[\text{K}\Omega]$$

$$15.6[V] \leq V_{Sweep} \leq 19.6[V] \quad \therefore \quad \blacksquare \quad \text{Si cumplen } R_1 \text{ y } R_2$$

B.2.4 Cálculos para fijar intervalo de corriente y obtener R_A

Para fijar el intervalo de corriente y obtener R_A , tomamos la (ec A):

Para $V_{CC} = 20[V_{DC}] = \pm 10[V_{DC}]$

Recordando que la Corriente optima de trabajo $10[\mu A] \leq I \leq 1[mA]$

$$I = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) \left(\frac{[|(V_{CC+})| + |(V_{CC-})|]}{R_A} \right)$$

$$I = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) \left(\frac{[|(+10)| + |(-10)|]}{R_A} \right)$$

$$I = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) \left(\frac{20}{R_A} \right) \quad (\text{ec 20})$$

De (ec 20) para $R_1 = 1[K\Omega]$; $R_2 = 49[K\Omega]$

$$I = \left(\frac{1}{1 + 49} \right) \left(\frac{20}{R_A} \right) = \left(\frac{1}{50} \right) \left(\frac{20}{R_A} \right) = \frac{0.4}{R_A}$$

$$I = \frac{0.4}{R_A} \quad (\text{ec 21})$$

De (ec 20) para $R_1 = 11[K\Omega]$; $R_2 = 39[K\Omega]$

$$I = \left(\frac{11}{1 + 39} \right) \left(\frac{20}{R_A} \right) = \left(\frac{11}{50} \right) \left(\frac{20}{R_A} \right) = \frac{4.4}{R_A}$$

$$I = \frac{4.4}{R_A} \quad (\text{ec 22})$$

O también podemos obtener la corriente desde las siguientes expresiones:

$$I = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) \left(\frac{V_{CC}}{R_A} \right) ; \quad \frac{V_{CC}}{R_1 + R_2} = \frac{IR_A}{R_1}$$

$$V_1 = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) (V_{CC}) ; \quad \frac{V_{CC}}{R_1 + R_2} = \frac{V_1}{R_2}$$

Despejando e igualando términos:

$$\frac{IR_A}{R_1} = \frac{V_1}{R_2} ; I = \left(\frac{V_1 R_1}{R_2}\right) \left(\frac{1}{R_A}\right)$$
$$I = \left(\frac{V_1 R_1}{R_2}\right) \left(\frac{1}{R_A}\right) \quad (\text{ec 23})$$

De (ec 23), para el extremo $V_1 = 19.6[V_{DC}]$; $R_1 = 1[K\Omega]$; $R_2 = 49[K\Omega]$

$$I = \left(\frac{(19.6)(1)}{49}\right) \left(\frac{1}{R_A}\right) = \frac{0.4}{R_A}$$
$$I = \frac{0.4}{R_A} \quad (\text{ec 24})$$

Para el otro extremo con valor $V_1 = 15.6[V_{DC}]$; $R_1 = 11[K\Omega]$; $R_2 = 39[K\Omega]$

$$I = \left(\frac{(15.6)(1)}{39}\right) \left(\frac{11}{R_A}\right) = \frac{4.4}{R_A}$$
$$I = \frac{4.4}{R_A} \quad (\text{ec 25})$$

Vemos que (ec 21) es idéntica a (ec 24)

Del mismo modo (ec 22) es idéntica a (ec 25)

Calculando el intervalo de posibles valores de R_A para quedar dentro del intervalo esperado de corriente, con (ec 24) tenemos:

$$10[\mu A] \leq \frac{0.4}{R_A} ; R_A \leq \frac{0.4}{10 \times 10^{-6}[A]} ; R_A \leq 40000$$

$$\frac{0.4}{R_A} \leq 1[mA] ; \frac{0.4}{1 \times 10^{-3}[A]} \leq R_A ; 400 \leq R_A$$

$$\therefore 400 \leq R_A \leq 40000 \quad [\Omega]$$

Para el otro extremo de corriente y buscando otros valores de R_A , de (ec 25)

$$10[\mu A] \leq \frac{4.4}{R_A} ; R_A \leq \frac{4.4}{10 \times 10^{-6}[A]} ; R_A \leq 440000$$

$$\frac{4.4}{R_A} \leq 1[mA] ; \frac{4.4}{1 \times 10^{-3}[A]} \leq R_A ; 4400 \leq R_A$$

$$\therefore 4400 \leq R_A \leq 440000 \quad [\Omega]$$

Para estar dentro de $10[\mu A] \leq I \leq 1[mA]$, los posibles valores son:

$$\therefore 4400 \leq R_A \leq 40000 \quad [\Omega]$$

$$\text{Para } I = \frac{0.4}{R_A} ; 4400 \leq R_A \leq 40000 \quad [\Omega] ; 10[\mu A] \leq I \leq 90[\mu A]$$

$$\text{Para } I = \frac{4.4}{R_A} ; 4400 \leq R_A \leq 40000 \quad [\Omega] ; 110[\mu A] \leq I \leq 1[mA]$$

(Aquí: Los colores indican la correspondencia de los valores para cada extremo de intervalos en R_A e I)

Calculando la siguiente relación de resistencias:

$$\text{Si } R_1 = 1[K\Omega] \text{ y } R_2 = 49[K\Omega]$$

$$\left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) = \left(\frac{1}{50} \right) ; 3 \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) = \left(\frac{3}{50} \right) = 0.06$$

$$\text{Si } R_1 = 11[K\Omega] \text{ y } R_2 = 39[K\Omega]$$

$$\left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) = \left(\frac{11}{50} \right) ; 3 \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) = \left(\frac{33}{50} \right) = 0.66$$

Los resultados se sustituyen en (ec B) y (ec C) con $t_1 = t_2$:

$$\text{Para } R_1 = 1[K\Omega] \text{ y } R_2 = 49[K\Omega] ; V_1 = 19.6[V_{DC}]$$

$$t_1 = \frac{R_A C}{0.06} \quad (\text{ec 26})$$

Para $R_1 = 11[K\Omega]$ y $R_2 = 39[K\Omega]$; $V_1 = 15.6[V_{DC}]$

$$t_1 = \frac{R_A C}{0.66} \quad (\text{ec } 27)$$

$$\therefore \frac{R_A C}{0.06} \leq t_1 \leq \frac{R_A C}{0.66}$$

Entonces para $4400 \leq R_A \leq 40000 [\Omega]$. Fijo el valor de R_A

$$\text{Eligiendo } R_A = 6[K\Omega] = 6000[\Omega] = R_B = R$$

Sustituyendo R_A en expresiones de corriente (ec 24) y (ec 25)
y en expresiones de tiempo (ec 26) y (ec 27)

Para $R_1 = 1[K\Omega]$ y $R_2 = 49[K\Omega]$; $V_1 = 19.6[V_{DC}]$

$$I = \frac{0.4}{6 \times 10^3} = 66[\mu A]$$

$$t_1 = \frac{6 \times 10^3 C}{0.06} = 100000C$$

$$t_1 = 100000C \quad (\text{ec } 28)$$

Para $R_1 = 11[K\Omega]$ y $R_2 = 39[K\Omega]$; $V_1 = 15.6[V_{DC}]$

$$I = \frac{4.4}{6 \times 10^3} = 733[\mu A] = 0.733[mA]$$

$$t_1 = \frac{6 \times 10^3 C}{0.66} = 9090.909C$$

$$t_1 = 9090.909C \quad (\text{ec } 29)$$

$$\therefore \text{La corriente queda definida como } 66[\mu A] \leq I \leq 0.733[mA]$$

Nota: Cuando entra más voltaje en pin8, menor es la frecuencia.

B.2.5 Determinando intervalos de frecuencia

Ahora elegimos el valor de los capacitores para obtener el periodo y la frecuencia.

$$T = t_1 + t_2 = 2t_1 [s] ; f = \frac{1}{T} [Hz]$$

$$t_1 = 100000C$$

$$t_1 = 9090.909C$$

$$C_1 = 5[\mu F] = 5 \times 10^{-6}[F]$$

$$t_1 = 0.5[s] ; T = 1[s] ; f = 1 [Hz]$$

$$t_1 = 0.04545[s] ; T = 0.0909[s] ; f = 11 [Hz]$$

$$\therefore 1[Hz] \leq f \leq 11[Hz] ; 1[s] \geq T \geq 0.0909[s]$$

$$C_2 = 0.5[\mu F] = 0.5 \times 10^{-6}[F]$$

$$t_1 = 0.05[s] ; T = 0.1[s] ; f = 10 [Hz]$$

$$t_1 = 0.004545[s] ; T = 0.00909[s] ; f = 110 [Hz]$$

$$\therefore 10[Hz] \leq f \leq 110[Hz] ; 0.1[s] \geq T \geq 0.00909[s]$$

$$C_3 = 0.05[\mu F] = 0.05 \times 10^{-6}[F] = 50[nF]$$

$$t_1 = 0.005[s] ; T = 0.01[s] ; f = 100[Hz]$$

$$t_1 = 0.0004545[s] ; T = 0.00090909[s] ; f = 1100[Hz]$$

$$\therefore 100[Hz] \leq f \leq 1100[Hz] ; 0.01[s] \geq T \geq 0.00090909[s]$$

$$C_4 = 0.005[\mu F] = 0.005 \times 10^{-6}[F] = 5[nF]$$

$$t_1 = 0.0005[s] ; T = 0.001[s] ; f = 1000[Hz]$$

$$t_1 = 0.00004545[s] ; T = 0.000090909[s] ; f = 11000[Hz] = 11[KHz]$$

$$\therefore 1000[Hz] \leq f \leq 11000[Hz] ; 0.001[s] \geq T \geq 0.000090909[s]$$

B.3 Datos finales de nuestro generador

$$\text{Para } V_{CC} = \pm 10[V_{DC}] = 20[V_{DC}] ; V_{CC+} = +10[V_{DC}] ; V_{CC-} = -10[V_{DC}]$$

$$15.6[V] \leq V_{Sweep} \leq 19.6[V]$$

$$5.6[V] \leq (V'_{Sweep}) \leq 9.6[V]$$

$$66[\mu A] \leq I \leq 0.733[mA]$$

$$R_1 = R'_1 + R''_1 ; R'_1 = 1[K\Omega] ; R''_1 = 10[K\Omega] \text{ (potenci6metro)}$$

$$R_2 = R'_2 + R''_2 ; R'_2 = 10[K\Omega] \text{ (potenci6metro)} ; R''_2 = 39[K\Omega]$$

$$1[K\Omega] \leq R_1 \leq 11[K\Omega]$$

$$39[K\Omega] \leq R_2 \leq 49[K\Omega]$$

$$R_A = R_B = R = 6[K\Omega]$$

$$C_1 = 5[\mu F] \quad ; \quad 1[Hz] \leq f \leq 11[Hz]$$

$$C_2 = 0.5[\mu F] \quad ; \quad 10[Hz] \leq f \leq 110[Hz]$$

$$C_3 = 0.05[\mu F] \quad ; \quad 100[Hz] \leq f \leq 1100[Hz]$$

$$C_4 = 0.005[\mu F] \quad ; \quad 1000[Hz] \leq f \leq 11000[Hz]$$

Un capacitor es un dispositivo pasivo que almacena energía en forma de un campo eléctrico.

Está formado básicamente por dos placas de material conductor, separadas por un material aislante llamado dieléctrico.

La cantidad de carga eléctrica relacionada a la tensión aplicada se llama “capacitancia”, y se mide en unidades llamadas Faradio.

La cantidad de energía que un capacitor puede almacenar, estará directamente relacionada con el tipo de material dieléctrico y con el tamaño del capacitor [p].

Los cambios de la temperatura pueden afectar la capacitancia, y los diferentes tipos de dieléctricos pueden responder de distinta manera a los valores de frecuencia que se utilicen.

C.1 Principios de funcionamiento

Un capacitor se carga con una corriente a través del mismo, el límite de la carga estará dado por la tensión máxima que pueda desarrollar la fuente de alimentación. La corriente alterna causará que el capacitor se cargue en dos polaridades, cambiando continuamente de una a otra. Los materiales dieléctricos normalmente sufrirán un calentamiento debido a las alternancias y por ello habrá una pérdida de energía en forma de calor.

La cantidad de energía perdida en relación con la aplicada se conoce como “factor de disipación” y representa una medida de que tan eficiente es un capacitor. Al recíproco del factor de disipación se le llama “factor de calidad” (Q). Si Q es alto se considera el capacitor como eficiente. El factor de disipación es significativo para corriente alterna solamente [p].

C.2 Variables que afectan al funcionamiento de los capacitores

En términos generales mientras más alta sea la constante dieléctrica (K) mayor será la capacitancia producida por un área dada, sin embargo mientras mayor sea la constante dieléctrica, menor será la estabilidad del capacitor. La estabilidad se refiere al efecto que causaran las variables de aplicación (temperatura, tensión y frecuencia) sobre el componente y que afectarán su funcionamiento [p].

Temperatura: La mayoría de los capacitores ganan o pierden capacitancia al cambiar la temperatura de operación.

Coeficiente de temperatura: Expresa la variación del valor del condensador con la temperatura. Se suele expresar en $\%/^{\circ}\text{C}$ (tanto por ciento por grado centígrado), o en $\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$ (partes por millón por grado centígrado)

Frecuencia: Los diferentes tipos de dieléctrico responden a las distintas frecuencias como lo hacen a la temperatura.

Tensión: Todos los capacitores se especifican con la tensión que pueden tolerar, conocida como tensión de trabajo. Valor dado por el fabricante, en el cual, el capacitor puede operar sin dañarse.

En corriente alterna se recomienda que el valor en tensión no exceda más del 10% del valor especificado en el capacitor. Picos o pulsos demasiado grandes pueden romper el dieléctrico y causar que el componente se dañe.

En el siguiente diagrama de la figura C.1 tenemos un panorama general de los tipos de capacitores existentes; estos poseen ventajas y desventajas de acuerdo a sus características.

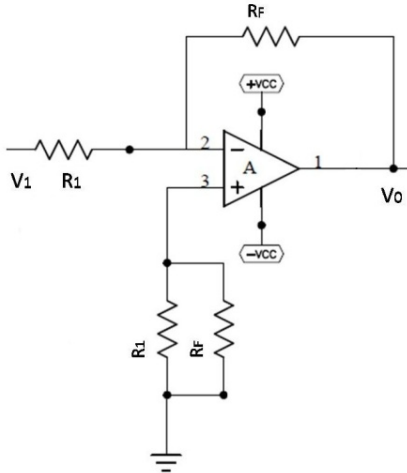


Figura C.1 Diagrama de capacitores en división por construcción [p].

APÉNDICE D

CONFIGURACIONES DE AOP UTILIZADOS*

Amplificador inversor



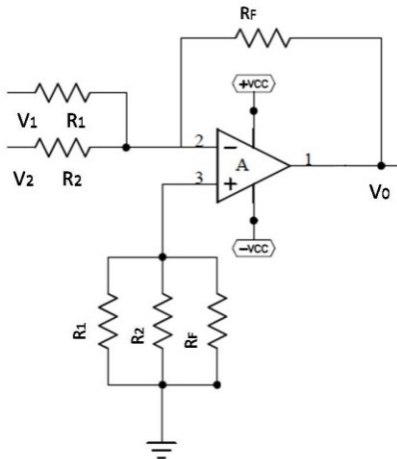
$$A_{vf} = -\frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_f}{R_1}$$

$$\text{Si } R_1 = R_f \rightarrow A_{vf} = -1$$

Como los transistores de la etapa diferencial de entrada del AOP no son idénticos, existe un desequilibrio interno que provoca una tensión no deseada en la salida, aun cuando las entradas del amplificador estuvieran puestas a tierra. Esta es denominada tensión de offset de salida. Para minimizar el efecto, se coloca en la entrada no inversora una resistencia de equivalencia.

$$R_e = R_1 \parallel R_f ; R_e = \frac{R_1 R_f}{R_1 + R_f}$$

Amplificador sumador inversor



$$V_o = -R_f \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} \right)$$

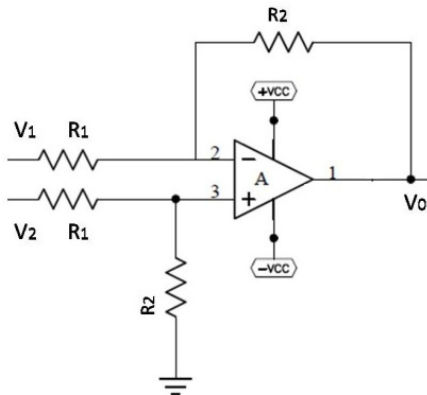
$$\text{Si } R_f = R_1 = R_2 ; V_o = -(V_1 + V_2)$$

Su resistencia de equivalencia en la entrada no inversora es:

$$R_e = R_f \parallel R_1 \parallel R_2$$

$$R_e = \frac{R_f \left(\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right)}{R_f + \left(\frac{R_1 R_f}{R_1 + R_f} \right)}$$

Amplificador diferencial o sustractor



Este permite obtener a la salida una tensión igual a la diferencia de las señales aplicadas multiplicadas por una ganancia

$$V_o = \frac{R_2}{R_1} (V_2 - V_1)$$

$$\text{Si } R_1 = R_2 \rightarrow V_o = (V_2 - V_1)$$

*Configuraciones de amplificadores operacionales [q] y [r]

Una señal es una magnitud física cuyo valor o variación contiene información. Los circuitos electrónicos procesan señales, las cuales se expresan normalmente mediante una tensión o una corriente que pueden variar con el tiempo. Con frecuencia se denomina generador de señal a una fuente independiente de tensión o de corriente. La representación gráfica de una señal se suele denominar forma de onda.

Las señales reales pueden ser muy complejas y se suele recurrir a unas pocas señales simples, descritas mediante funciones sencillas que permitan aproximar las señales reales, ya sea cada una por separado o bien mediante combinación de ellas. Podemos tener señales básicas como el escalón, la exponencial y la senoide, y otras que se obtienen a partir de ellas, como el pulso, la rampa, etc.

El escalón suele usarse para fijar el inicio de otras señales.

Combinando dos funciones escalón puede obtenerse una señal de amplio uso en electrónica: un pulso.

Cuando un pulso se repite en el tiempo la forma de onda resultante se denomina tren de pulsos.

Otra señal que puede obtenerse a través de la función escalón es la rampa.

Combinando rampas y escalones pueden obtenerse señales triangulares.

Se suele definir para las señales un valor medio y un valor eficaz en un cierto intervalo de tiempo.

En las señales periódicas este intervalo de tiempo se toma de valor un período de la señal. El valor medio es el área encerrada entre la función y el eje de abscisas durante el intervalo T, dividida por T. Matemáticamente se expresa por:

$$V_m = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt$$

El valor eficaz de una señal (r.m.s., por sus siglas en inglés: root mean square) es un valor de tensión o corriente que está relacionado con la potencia que transporta la señal, y viene dado por:

$$V_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt}$$

E.1 Onda triangular

Con la conmutación de las fuentes de corriente, obtenemos tiempos iguales de carga y descarga del capacitor C, obteniendo así una forma de onda triangular simétrica creada a través del capacitor. La magnitud de la onda triangular es $1/3 V_{supply}$

La amplitud de esta forma de onda triangular (pin 3) es de $0.33xV_{supply}$.

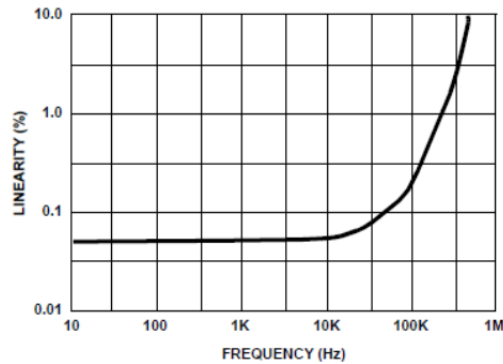


Figura E.1 Linealidad de onda triangular vs frecuencia [c].

En la figura E.1, podemos observar que para 10KHz la linealidad es menor a 0.1% y casi constante, la frecuencia máxima elegida para nuestro generador es de 10KHz. Esto es muy bueno para nuestra señal triangular.

La amplitud (A) de esta forma de onda triangular es $V_{pp} = 0.33xV_{supply}$ (pin 3)

$$V_{pp} = 0.33 \times 20 = 6.6 [V_{pp}] \quad (\text{ec f. 1})$$

$$A = V_p = \frac{V_{pp}}{2} = \frac{6.6}{2} = 3.3 [V_p] \quad (\text{ec f. 2})$$

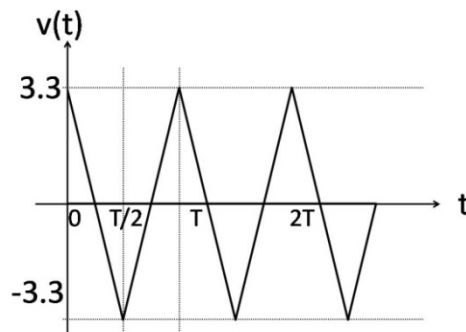


Figura E.2 Señal triangular para ICL8038

$$V_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \left(\int_0^{T/2} \left(-\frac{4A}{T}(t) + A \right)^2 dt + \int_{T/2}^T \left(\frac{4A}{T}(t) - 3A \right)^2 dt \right)}$$

$$V_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \left(\frac{16A^2t^3}{3T^2} - \frac{8A^2t^2}{2T} + A^2t \right)_0^{T/2} + \frac{1}{T} \left(\frac{16A^2t^3}{3T^2} - \frac{24A^2t^2}{2T} + 9A^2t \right)_{T/2}^T}$$

$$V_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \left(\frac{2A^2T^3}{3T^2} - \frac{A^2T^2}{T} + \frac{A^2T}{2} + \frac{14A^2T^3}{3T^2} - \frac{9A^2T^2}{T} + \frac{9A^2}{2}T \right)}$$

$$V_{ef} = \sqrt{\left(\frac{2A^2}{3} - A^2 + \frac{A^2}{2} + \frac{14A^2}{3} - 9A^2 + \frac{9A^2}{2} \right)} = \sqrt{\left(\frac{2}{6} \right) A^2}$$

$$V_{ef} = \frac{A}{\sqrt{3}} = \frac{(3.3)}{\sqrt{3}} = 1.90525 [V_{rms}] \quad (\text{ec f. 3})$$

Utilizando un amplificador operacional inversor a la salida del generador, la ganancia es:

$$A_{vf} = -\frac{V_{salida}}{V_{entrada}} = -\frac{6.6[V_{pp}]}{6.6[V_{pp}]} = -1$$

$$A_{vf} = -\frac{R_f}{R_1} = -1$$

Despreciando el signo (-) que indica un desfase de señal de 180°, tenemos:

$$R_1 = \frac{R_f}{A_{vf}}$$

$$\text{Si } R_f = 10 \text{ K}\Omega \quad R_1 = \frac{10 \times 10^3}{1} = 10 \times 10^3 = 10 [\text{K}\Omega]$$

$$A_{vf} = -\frac{R_f}{R_1} = -\frac{10 \times 10^3}{10 \times 10^3} = -1$$

Colocando un divisor de tensión a la salida, como el de (ec 18) tenemos que:

$$V_{triangular} = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) (V_{pp})$$

$$V_{triangular} = \left(\frac{1 \text{ K}\Omega}{2.3 \text{ K}\Omega + 1 \text{ K}\Omega} \right) (6.6) = \left(\frac{1}{3.3} \right) (6.6) = 2[V_{pp}]$$

E.2 Onda cuadrada

Siguiendo el análisis en el diagrama del integrado, vemos que a la salida del flip-flop tenemos una onda cuadrada.

La amplitud para la onda cuadrada (pin 9) es $0.98 \times V_{supply}$, prácticamente V_{supply} .

La amplitud para la onda cuadrada es $V_{pp} = 0.98 \times V_{supply}$, prácticamente V_{supply} . (pin9)

$$V_{pp} = 0.98 \times 20 = 19.6[V_{pp}] \quad (\text{ec f. 4})$$

$$A = V_p = \frac{V_{pp}}{2} = \frac{19.6}{2} = 9.8 [V_p] \quad (\text{ec f. 5})$$

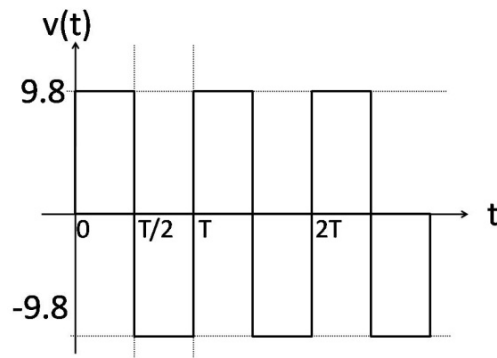


Figura E.3 Señal cuadrada para ICL8038

$$V_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \left(\int_0^{T/2} (A)^2 dt + \int_{T/2}^T (-A)^2 dt \right)}$$

$$V_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \left[(A^2 t)_0^{T/2} + (A^2 t)_{T/2}^T \right]}$$

$$V_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \left(\frac{A^2 T}{2} + \frac{A^2 T}{2} \right)}$$

$$V_{ef} = \sqrt{\left(\frac{A^2}{2} + \frac{A^2}{2} \right)} = \sqrt{A^2}$$

$$V_{ef} = A = 9.8 [V_{rms}] \quad (\text{ec f. 6})$$

La ganancia con un amplificador operacional inversor

$$A_{vf} = - \frac{19.6[V_{pp}]}{19.6[V_{pp}]} = -1$$

$$A_{vf} = - \frac{R_f}{R_1} = -1$$

$$R_1 = \frac{R_f}{A_{vf}}$$

$$\text{Si } R_f = 10[\text{K}\Omega] ; R_1 = \frac{10 \times 10^3}{1} = 10 \times 10^3 = 10[\text{K}\Omega]$$

$$A_{vf} = - \frac{R_f}{R_1} = - \frac{10 \times 10^3}{10 \times 10^3} = -1$$

Colocando un divisor de tensión a la salida, tenemos que:

$$V_{cuadrada} = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) (V_{pp})$$

$$V_{cuadrada} = \left(\frac{1 \text{ K}\Omega}{8.8 \text{ K}\Omega + 1 \text{ K}\Omega} \right) (19.6) = \left(\frac{1}{9.8} \right) (19.6) = 2[V_{pp}]$$

E.3 Onda sinusoidal

La forma de onda sinusoidal es creada por retroalimentación a partir de la onda triangular, introduciendo la misma en una red no lineal que cumple la función de convertidor triangular-senoidal. Esta red formada por un arreglo de transistores que, por medio de aproximaciones por segmentos, nos proporciona una senoidal con un máximo de distorsión de 3% a 100kHz, suficiente para nuestro diseño que alcanza los 10kHz con un máximo de distorsión de 1%

La amplitud máxima de salida senoidal (pin 2) es de $0.22 \times V_{supply}$.

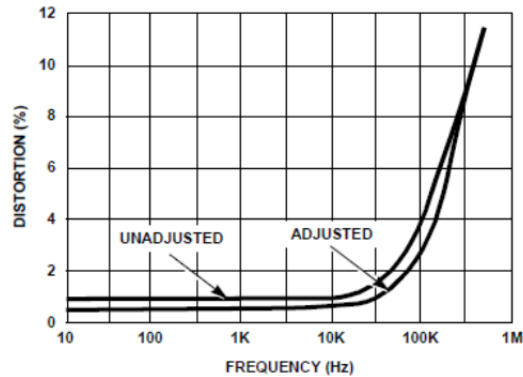


Figura E.4 Distorsión de onda sinusoidal vs frecuencia [c].

Del mismo modo que la linealidad en la señal triangular, es teóricamente funcional. En la figura E.4 se observa que para 10KHz ajustando la onda sinusoidal la distorsión es aproximadamente 0.5%

La amplitud máxima de salida senoidal es $V_{pp} = 0.22 \times V_{supply}$ (pin 2)

$$V_{pp} = 0.22 \times 20 = 4.4 [V_{pp}] \quad (\text{ec f. 7})$$

$$A = V_p = \frac{V_{pp}}{2} = \frac{4.4}{2} = 2.2 [V_p] \quad (\text{ec f. 8})$$

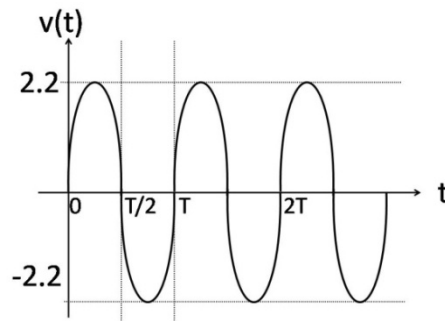


Figura E.5 Señal sinusoidal para ICL8038

$$V_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \left(\int_0^{T/2} \left(A \operatorname{sen} \left(\frac{2\pi}{T} t \right) \right)^2 dt + \int_{T/2}^T \left(-A \operatorname{sen} \left(\frac{2\pi}{T} t \right) \right)^2 dt \right)}$$

Por sustitución $u = \frac{2\pi}{T} t$; $du = \frac{2\pi}{T} dt$; ahora completando la integral:

$$V_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \left(A^2 \left(\frac{T}{2\pi} \right) \int_0^{T/2} \operatorname{sen}^2(u) du + A^2 \left(\frac{T}{2\pi} \right) \int_{T/2}^T \operatorname{sen}^2(u) du \right)}$$

$$V_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \left(\frac{A^2 T}{2\pi} \right) \left(\left(\frac{u}{2} - \frac{1}{4} \operatorname{sen} 2(u) \right)_0^{T/2} + \left(\frac{u}{2} - \frac{1}{4} \operatorname{sen} 2(u) \right)_{T/2}^T \right)}$$

reemplazando $u = \frac{2\pi}{T} t$; valuamos la integral

$$V_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \left(\frac{A^2 T}{2\pi} \right) \left(\left(\frac{2\pi t}{2T} - \frac{1}{4} \operatorname{sen} 2 \left(\frac{2\pi}{T} t \right) \right)_0^{T/2} + \left(\frac{2\pi t}{2T} - \frac{1}{4} \operatorname{sen} 2 \left(\frac{2\pi}{T} t \right) \right)_{T/2}^T \right)}$$

$$V_{ef} = \sqrt{\left(\frac{A^2}{2\pi} \right) \left(\frac{\pi T}{2T} - \frac{1}{4} \operatorname{sen} \left(\frac{2\pi T}{T} \right) + \frac{\pi T}{T} - \frac{1}{4} \operatorname{sen} \left(\frac{4\pi T}{T} \right) - \frac{\pi T}{2T} - \frac{1}{4} \operatorname{sen} \left(\frac{2\pi T}{T} \right) \right)}$$

$$V_{ef} = \sqrt{\left(\frac{A^2}{2\pi} \right) \left(\frac{\pi}{2} - \frac{1}{4} \operatorname{sen}(2\pi) + \pi - \frac{1}{4} \operatorname{sen}(4\pi) - \frac{\pi}{2} + \frac{1}{4} \operatorname{sen}(2\pi) \right)} = \sqrt{\left(\frac{A^2}{2\pi} \right) (\pi)}$$

$$V_{ef} = \frac{A}{\sqrt{2}} = \frac{(2.2)}{\sqrt{2}} = 1.5556[V_{rms}] \quad (\text{ec f. 9})$$

Utilizando una amplificador operacional inversor a la salida del generador, la ganancia es:

$$A_{vf} = -\frac{V_{salida}}{V_{entrada}} = -\frac{4.4[V_{pp}]}{4.4[V_{pp}]} = -1$$

$$A_{vf} = -\frac{R_f}{R_1} = -1$$

$$R_1 = \frac{R_f}{A_{vf}}$$

$$\text{Si } R_f = 10[\text{K}\Omega] ; R_1 = \frac{10 \times 10^3}{1} = 10 \times 10^3 = 10[\text{K}\Omega]$$

$$A_{vf} = -\frac{R_f}{R_1} = -\frac{10 \times 10^3}{10 \times 10^3} = -1$$

Colocando un divisor de tensión a la salida, tenemos que:

$$V_{\text{sinusoidal}} = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) (V_{pp})$$

$$V_{\text{sinusoidal}} = \left(\frac{1 \text{ K}\Omega}{1.2 \text{ K}\Omega + 1 \text{ K}\Omega} \right) (4.4) = \left(\frac{1}{2.2} \right) (4.4) = 2[V_{pp}]$$

Se pretende obtener una ganancia que nos proporcione un voltaje de salida de 2 V pico a pico, para ser canalizada en el multiplexor y así manipular la señal en la etapa de amplificadores operacionales.

APÉNDICE F

PROGRAMA DEL EDITOR PARA PICAXE

#picaxe 40x2

'Converted by X2 Conversion Wizard Version 1.0.2

let dirsB = %11111111

let adcsetup = 7 `change to %10101100 on 3V parts

`Programa para hacer un menu de selección VRN\$19102K12

#rem

Pin para contar pulsos de FRECUENCIA

input D.0= count, pin19(entrada digital)

TECLADO

input D.1= columna3, pin20(entradas digitales)

input D.2= columna2, pin21

input D.3= columna1, pin22

input D.4= enter, pin27

input D.5= resetea, pin28

input D.6= pausa, pin29

input D.7= pin30

output B.0= renglón1, pin33(salidas digitales)

output B.1= renglón2, pin34

output B.2= renglón3, pin35

output B.3= renglón4, pin36

output B.4= buzzer, pin37(ALARMA-BUZZER)

output B.5= pin35

output B.6= pin36

output B.7= LCD, pin40(salida serial de datos a LCD)

Pines de RELOJ(D\$1307)

portc 1= PWM, pin16 (salidas)

portc 2= PWM, pin17

Pines de RELOJ(D\$1307)

portc 3= \$CL, pin18 salida*

portc 4= \$DA, pin23 entrada*

Pines de SELECCIÓN DE SEÑAL

portc 5= selecB (MUX), pin24

portc 6= selecA (MUX), pin25

portc 7= enable (MUX), pin26

Pines para LECTURA ANALÓGICA (entradas analógicas)

ADC 0= voltaje, pin2
ADC 1= offset, pin3
ADC 2= pin4
ADC 3= pin5
ADC 4= SERIAL OUT, pin7
ADC 5= pin8
ADC 6= pin9
ADC 7= pin10

b0 branch - MENU

b1 key_orden

b2 key_valor = y

b3 unidad minuto T.TOTAL (dato fijado desde teclado)

b4 decena minuto T.TOTAL (dato fijado desde teclado)

b5 unidad hora T.TOTAL (dato fijado desde teclado)

b6 decena hora T.TOTAL (dato fijado desde teclado)

b7 mins1 (decena b4 + unidad b3)

b8 hrs1 (decena b5 + unidad b6)

b9 No asignado

b10 seconds (dato D\$1307)

b11 mins (dato D\$1307)

b12 hour (dato D\$1307)

b13 control (dato D\$1307)

b14 relacion1

b15 relacion2

b16 No asignado

b17 = 765/10

b20 volt DIG 0

b21 volt DIG 1

b22 volt DIG 2

b30 offset DIG 0

b31 offset DIG 1

b32 offset DIG 2

w9 npulsos = b19,b18

w12 freq = b25,b24

w13 volt = b27,b26

w14 offset = b29,b28

#endrem

pause 5000

symbol key_orden = b1 `orden de tecla presionada, secuencia de teclas

symbol key_valor = b2 `valor de tecla presionada en cada renglón

symbol y = key_valor

let adcsetup = 2 `pone ADC0,ADC1 como análogo

`let dirsC = %1:1:bit5:1:bit3:0:0:0 `pines del puerto C (PORTC,C.)

let dirsC = %11101110 `pines del puerto C (PORTC,C.)

serout B.7,T2400,(\$FE, 1)

menu:

`high C.7 PARA DESACTIVAR enable del MUX,(SEÑALES DEL GENERADOR Y DC)

let b0 = 0

let b6 = 0

let b5 = 0

let b4 = 0

let b3 = 0

sound B.4,(100,20)

serout B.7,T2400,(\$FE, 1)

serout B.7,T2400,(\$FE, \$10)

serout B.7,T2400,(\$FE, \$80)

serout B.7,T2400,(" Sistemas Nano- ")

serout B.7,T2400,(\$FE, \$Co)

serout B.7,T2400,(" estructurados ")

pause 4000

sound B.4,(100,20)

serout B.7,T2400,(\$FE, 1)

serout B.7,T2400,(\$FE, \$10)

serout B.7,T2400,(\$FE, \$80)

serout B.7,T2400,("Ingreso de datos")

serout B.7,T2400,(\$FE, \$Co)

serout B.7,T2400,(" Para Proceso ")

pause 4000

serout B.7,T2400,(\$FE, 1)

serout B.7,T2400,(\$FE, \$10)

serout B.7,T2400,(\$FE, \$80)

serout B.7,T2400,(" Elegir Fuente ")

pause 2000

serout B.7,T2400,(\$FE, 1)

gosub scan

datofuent:

pause 1000

if key_valor > 5 then scan

if key_valor = 4 then triangular

if key_valor = 3 then cuadrada

if key_valor = 2 then sinusoide

if key_valor = 1 then dc

```

dc:
sound B.4,(80,20)
low C.5      `**activo DC Seleccion 00 con MUX 4:1
low C.6      `**y Led indicador con DEMUX 1:4
let b0 = 0
goto main

sinusoide:
sound B.4,(80,20)
low C.5      `**activo sinusoidal Seleccion 01 con MUX 4:1
high C.6     `**y Led indicador con DEMUX 1:4
goto ingreso

cuadrada:
sound B.4,(80,20)
high C.5     `**activo cuadrada Seleccion 10 con MUX 4:1
low C.6     `**y Led indicador con DEMUX 1:4
goto ingreso

triangular:
sound B.4,(80,20)
high C.5     `**activo triangular Seleccion 11 con MUX 4:1
high C.6     `**y Led indicador con DEMUX 1:4
goto ingreso

```

ingreso:

let b0 = -1

main:

```

sound B.4,(100,10)
pause 4000
serout B.7,T2400,($FE, 1)
let b0 = b0 + 1
if b0 > 4 then ingreso

```

branch b0,(btna0,btna1,btna2,btna3)

btna0: `FRECUENCIA

main0:

```

symbol npulsos = w9
symbol frec = w12

```

```

count D.0, 1000, w9      `cuenta pulsos en 2 segundos
let frec = npulsos

```

```

serout B.7,T2400,($FE, 1)
serout B.7,T2400,($FE, $10)

```

```
serout B.7,T2400,($FE, $80)
serout B.7,T2400,("Frecuencia:")
serout B.7,T2400,($FE, $C1)
serout B.7,T2400,("#frec," ", "Hz")
pause 1000
serout B.7,T2400,($FE, 1)
```

```
if pinD.4 = 1 then main      `ENTER teclado
pause 20
goto main0
```

btna1: `VOLTAJE

main1:

```
symbol relacion1 = b14 `symbol relacion1 = w27
symbol volt = w13
```

```
readadc10 2,b14      `readadc10 2,w27
```

```
let volt = relacion1*250/255
let volt = volt*2
let b20 = volt DIG 0
let b21 = volt DIG 1
let b22 = volt DIG 2
```

```
serout B.7,T2400,($FE, 1)
serout B.7,T2400,($FE, $10)
serout B.7,T2400,($FE, $80)
serout B.7,T2400,("Voltaje :")
serout B.7,T2400,($FE, $C1)
serout B.7,T2400,("#b22,#b21,",".#b20," ", "Vp")
pause 1000
serout B.7,T2400,($FE, 1)
```

```
if pinD.4 = 1 then main `ENTER teclado
pause 20
goto main1
```

btna2: `OFFSET

main2:

```
symbol relacion2 = b15 `symbol relacion2 = w26
symbol offset = w14
```

```
readadc10 3,b15      `readadc10 3,w26
let b17 = 765/10
```

```
let offset = relacion2/2*250/255
let offset = offset*2
let b30 = offset DIG 0
let b31 = offset DIG 1
let b32 = offset DIG 2
```

```
serout B.7,T2400,($FE, 1)
serout B.7,T2400,($FE, $10)
serout B.7,T2400,($FE, $80)
serout B.7,T2400,("Offset  :")
serout B.7,T2400,($FE, $C1)
```

negativo1:

if b15 = 0 then

```
let b30 = 0
let b31 = 5
let b32 = 1
```

```
serout B.7,T2400,("-",#b32,#b31,".",#b30," ","V")
pause 1000
serout B.7,T2400,($FE, 1)
```

```
if pinD.4 = 1 then main `ENTER teclado
pause 20
goto main2
```

elseif b15 < 77 then

```
serout B.7,T2400,("-",#b32,#b31,".",#b30," ","V")
pause 1000
serout B.7,T2400,($FE, 1)
```

```
if pinD.4 = 1 then main `ENTER teclado
pause 20
goto main2
```

elseif b15 = 77 then

```
let b30 = 0
let b31 = 0
let b32 = 0
```

```
serout B.7,T2400,(#b32,#b31,".",#b30," ","V")
pause 1000
serout B.7,T2400,($FE, 1)
```



```

        if pinD.4 = 1 then main `ENTER teclado
        pause 20
        goto main2

elseif b15 > 77 then

        serout B.7,T2400,(#b32,#b31,".",#b30," ","V")
        pause 1000
        serout B.7,T2400,($FE, 1)

        if pinD.4 = 1 then main `ENTER teclado
        pause 20
        goto main2
endif

btna3: `TIEMPO

        sound B.4,(100,20)
        serout B.7,T2400,($FE, 1)
        serout B.7,T2400,($FE, $10)
        serout B.7,T2400,($FE, $80)
        serout B.7,T2400,(" Ingresa Tiempo ")
        serout B.7,T2400,($FE, $Co)
        serout B.7,T2400,("en Hrs:Min xx:xx")
        pause 2000

        gosub inicio

                main3:

                datotiempi:

                let key_orden = key_orden + 1

                        if key_orden = 1 then test1
                        if key_orden = 2 then test2
                        if key_orden = 3 then test3
                        if key_orden = 4 then test4
                        if key_orden = 5 then final

~ *** Ahora testea el valor para cada posición individualmente ***
~ *** La cuarta tecla presionada ya no permite el acceso de dígitos ***
~ *** Si la hora fijada no es coherente, pide de nuevo el ingreso de los cuatro dígitos ***

test4:
        let b6 = b5
        gosub continua

test3:
        let b5 = b4
        gosub continua

```

test2:

```
let b4 = b3
gosub continua
```

test1:

```
let b3 = y
gosub continua
```

`* Bien entonces continua regresando a al main loop *****

presionada:

```
sound B.4,(100,10)
goto scan
```

continua:

```
if pinD.4 = 1 then main `ENTER teclado
return
```

final:

```
serout B.7,T2400,($FE, $10)
serout B.7,T2400,($FE, $80)
serout B.7,T2400,("T.TOTAL=", #b6,#b5,":",#b4,#b3,"Hrs")
```

gosub verifica

```
pause 100
sound B.4,(40,20)
pause 20
sound B.4,(60,20)
pause 20
sound B.4,(80,20)
pause 20
sound B.4,(100,20)
pause 20
gosub main4
```

`Si el valor no es correcto,resetea pos init del contador,entonces regresa

verifica:

```
if b6 > 2 or b4 > 5 then error
return
```

error:

```
let b6 = 0
let b5 = 0
let b4 = 0
let b3 = 0
serout B.7,T2400,($FE, 1)
pause 50
serout B.7,T2400,($FE, $84)
serout B.7,T2400,("Tiempo")
```

```

serout B.7,T2400,($FE, $C2)
serout B.7,T2400,("Incoherente")
sound B.4,(100,100)
serout B.7,T2400,($FE, 1)
goto inicio

```

`ELEGIR REINGRESAR DATOS O INICIAR PROCESO

main4:

```

serout B.7,T2400,($FE, 1)
serout B.7,T2400,($FE, $10)
serout B.7,T2400,($FE, $80)
serout B.7,T2400,("Presione RESET o")
serout B.7,T2400,($FE, $10)
serout B.7,T2400,($FE, $C0)
serout B.7,T2400,("INICIAR PROCESO ")
pause 1000
serout B.7,T2400,($FE, 1)
`let pins = %00000011
if pinD.5 = 1 then menu           `Reinicia a MENU Tecla:RESETEAR
if pinD.4 = 1 then relojito      `Inicia PROCESO Tecla:ENTER
pause 20

```

goto main4

#rem

Keypad para PICAXE-40X2 con corrimiento de dígito a la izquierda

Fijo el tiempo deseado de experimentación

Dejo inhabilitado el teclado después de ingresar datos correctos

#endrem

pause 2000

serout B.7,T2400,(\$FE, 1)

inicio: ' * Resetea posición a cero *****

let key_orden = 0

#rem

***** Ahora scanea cada renglón en turno *****

***** Poniendo solo un renglón (y el LED) en alto *****

***** Si un switch es teclado salta al subprocedimiento testeando columnas *****

#endrem

scan:

if b0 = 0 then fuente

if b0 = 3 then tiempo

fuentes:

```
serout B.7,T2400,($FE, 1)
serout B.7,T2400,($FE, $10)
serout B.7,T2400,($FE, $80)
serout B.7,T2400,("1)DC 2)Sinus ")
serout B.7,T2400,($FE, $Co)
serout B.7,T2400,("3)Cuadr 4)Triang")
```

goto barrido

tiempo:

```
serout B.7,T2400,($FE, 1)
serout B.7,T2400,($FE, $10)
serout B.7,T2400,($FE, $80)
serout B.7,T2400,("T.TOTAL=", #b6,#b5,":",#b4,#b3,"Hrs")
```

goto barrido

barrido:

```
let key_valor = 0
let pinsB = %00000001
if pinD.4 = 1 then final
gosub key_test
```

```
let key_valor = 3
let pinsB = %00000010
if pinD.4 = 1 then final
gosub key_test
```

```
let key_valor = 6
let pinsB = %00000100
if pinD.4 = 1 then final
gosub key_test
```

```
let key_valor = -2
let pinsB = %00001000
if pinD.4 = 1 then final
gosub key_test
```

goto scan

key_test:

```
if pinD.3 = 1 then suma1
if pinD.2 = 1 then suma2
if pinD.1 = 1 then suma3
return `a la primer etiqueta de gsub inicio
```

```
`*** key_valor podría ser 0, 3, 6, ó -2 ***  
`*** Entonces suma 1, 2 ó 3 a éste valor ***
```

```
suma3: let key_valor = key_valor + 1  
suma2: let key_valor = key_valor + 1  
suma1: let key_valor = key_valor + 1  
serout B.7,T2400,(1)
```

```
`*** Ahora incrementa la posición del contador por 1 ***  
`*** Y testea para el 1er, 2o 3er ó 4o push bootom ***
```

```
if b0 = 0 then datofuent  
if b0 = 3 then datotiemp
```

```
#rem  
AQUI VA RELOJITO
```

```
*****Programa que inicializa reloj, el tiempo de proceso*****  
*****Se detiene en el tiempo indicado y despliega "Fin de proceso"*****  
#endrem
```

```
relojito:  
pause 100
```

```
symbol hrs1 = b8  
let hrs1 = 10*b6  
let hrs1 = hrs1 + b5
```

```
symbol mins1 = b7  
let mins1 = 10*b4  
let mins1 = mins1 + b3
```

```
motorbajar:                                `bajar placas con motor  
low B.5                                    `a entrada L293D  
high B.6                                    `entrada 2 L293D  
if pinD.6 <> 1 then motorbajar `Sensor para frenar motor
```

```
high B.5                                    `a entrada L293D  
high B.6                                    `entrada 2 L293D  
pause 5000
```

```
relojo:
```

```
if pinD.5 = 1 then termina                `Tecla RESETEAR
```

```
reloj:
```

```
#rem  
Uso de D$1307 Time Clock  
Note que los datos son sent/received en formato BCD  
Note que los seconds, mins etc son variables que necesitan
```

definirse e.g. symbol seconds = b10 etc.
Poner el PICAXE como master y D51307 como slave address
#endrem

```
`let b13 = 1
symbol seconds = b10
symbol mins = b11
symbol hour = b12
symbol control = b13
hi2csetup i2cslave, %11010000
```

```
`hi2csetup i2cmaster, %11010000, i2cslow, i2cbyte
```

start_clock:

```
let seconds = $00 `00 formato BCD
let mins = $00 `00 formato BCD
let hour = $00 `00 formato BCD
let control = %00010000 ' Habilita la salida a 1Hz del D51307
hi2cout 0,(seconds,mins,hour,control) `escribo en D51307
```

main22:

```
`(control = b13,seconds = b10,mins = b11, hour = b12)
```

```
hi2cin 0,(b10,b11,b12,b13) `lee desde D51307 en PICAXE
```

```
`pause 2000
```

```
let b10 = bcdtobin b10
let b11 = bcdtobin b11
let b12 = bcdtobin b12
```

```
serout B.7,T2400,($FE, 1)
serout B.7,T2400,($FE, $10)
serout B.7,T2400,($FE, $80)
serout B.7,T2400,("T.TOTAL=", #b8,":",#b7,"Hrs")
serout B.7,T2400,($FE, $C0)
serout B.7,T2400,("T.REAL =", #b12,":",#b11,#b10,"Hrs")
pause 500
if pinD.5 = 1 then termina `Tecla RESETEAR
```

```
if mins <> b7 then main22
```

```
if hour <> b8 then main22
```

ascenso:

```
motorsubir: `subir placas con motor
high B.5 `a entrada L293D
low B.6 `entrada 2 L293D
if pinD.7 <> 1 then motorsubir `Sensor para frenar motor

high B.5 `a entrada L293D
```

high B.6
pause 5000

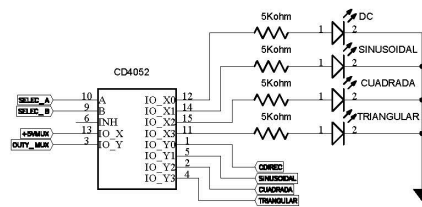
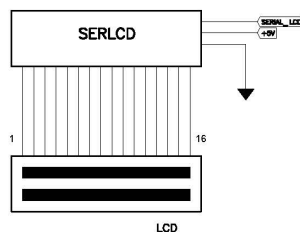
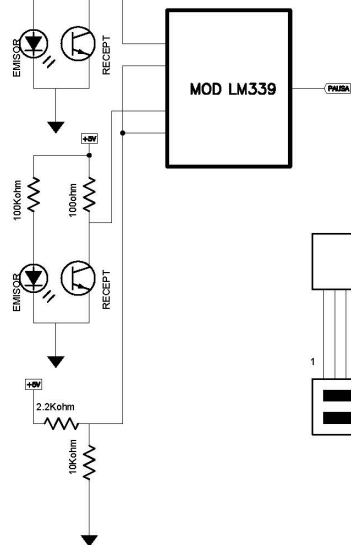
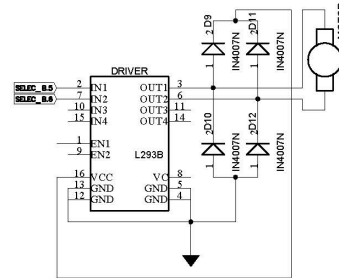
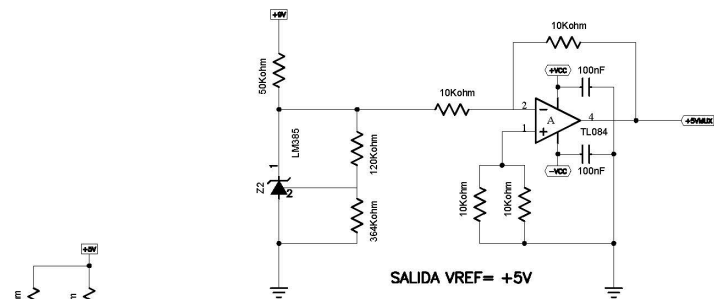
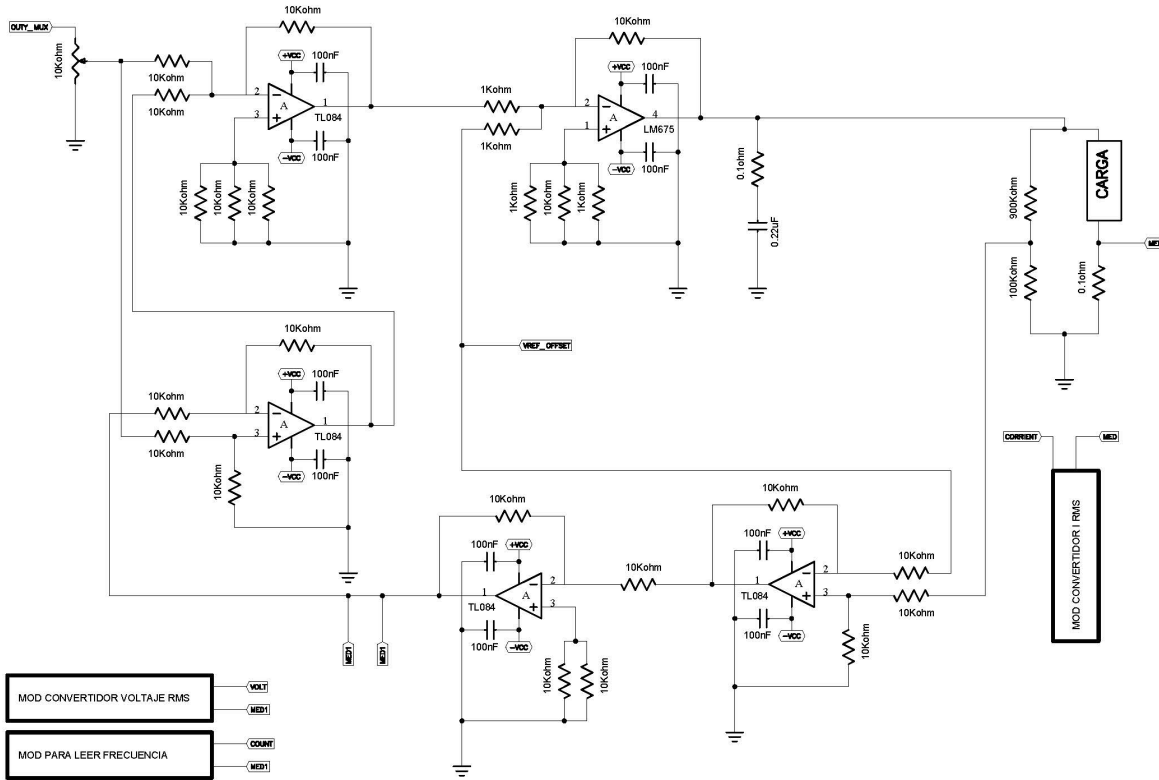
`entrada 2 L293D

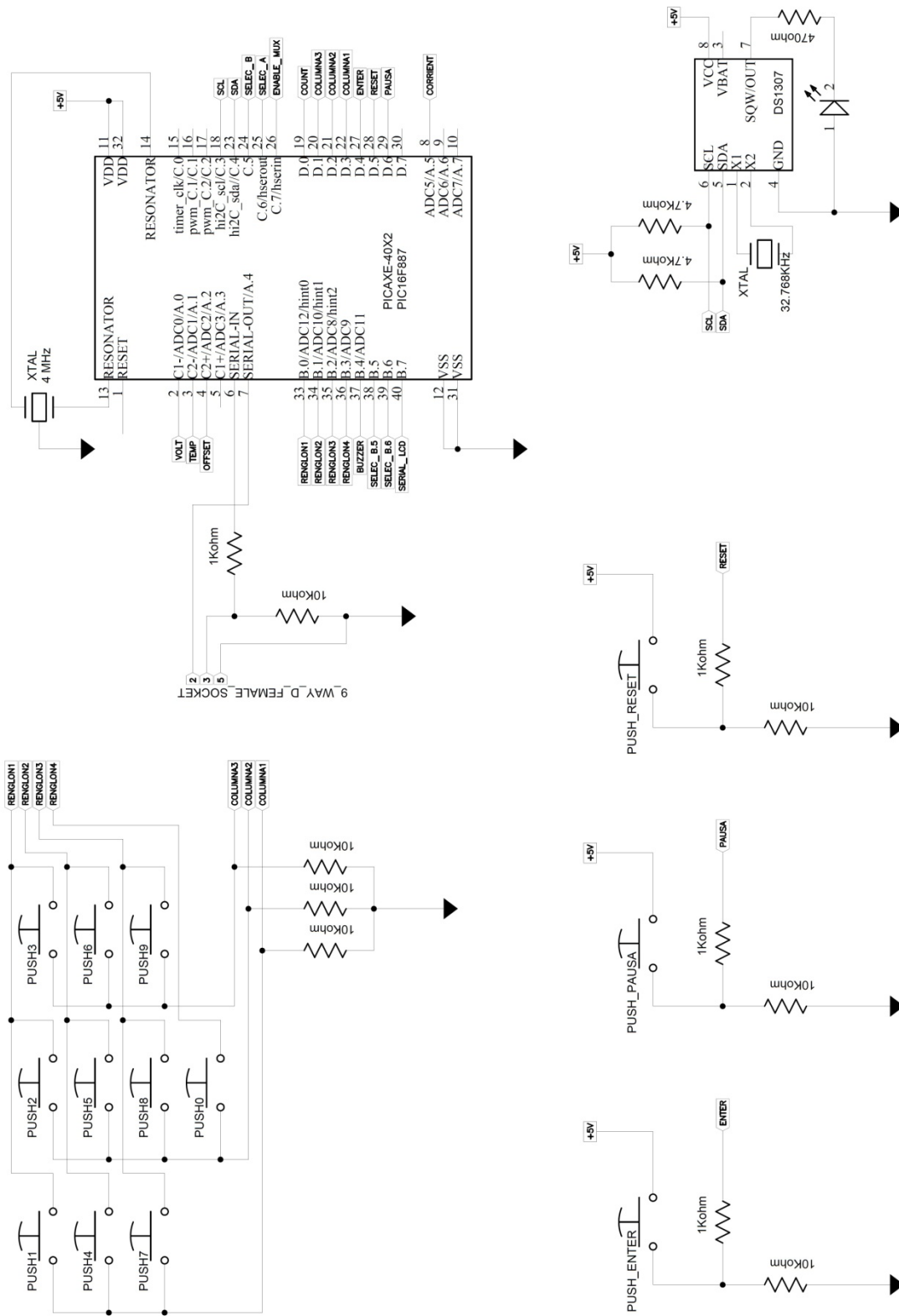
termina:

pause 1000
serout B.7,T2400,(\$FE, 1)
serout B.7,T2400,(\$FE, \$10)
serout B.7,T2400,(\$FE, \$80)
pause 1000
sound B.4,(100,100)
serout B.7,T2400,(\$FE, \$10)
serout B.7,T2400,(\$FE, \$81)
serout B.7,T2400,("Fin de proceso")
`serout B.7,T2400,(\$FE, \$10)
serout B.7,T2400,(\$FE, \$C4)
serout B.7,T2400, (#b12,"Hrs",#b11,"min",#b10,"seg")
pause 100
goto termina

end

*Para analizar el programa, consultar [s]





APÉNDICE H

MULTIPLEXOR

H.1 Multiplexor-demultiplexor

En el caso general de N canales de entradas y un canal de salida, se le llama multiplexor analógico Nx1; cada canal de entrada es conectado a la salida a través de un switch de estado sólido, típicamente un transistor de efecto de campo (FET). Cada switch es seleccionado por una palabra digital que corresponde a la dirección de los canales. De ahí que un MUX con dirección de n-bit puede asumir $N = 2^n$ canales. El canal seleccionado es conducido por el microcontrolador, el cual coloca la dirección del canal sobre la dirección del bus, enviando una señal de control para habilitar el MUX, así decodifica la dirección y activa el FET correspondiente. De esta manera la selección de un canal se puede obtener de manera arbitraria y en un tiempo arbitrario controlado por el microcontrolador [32].

El integrado CD4052BC es un multiplexor-demultiplexor dual de cuatro canales, es un multiplexor diferencial de 4 canales, teniendo dos entradas de control binario (B, A) y una entrada para inhibir. Las señales de las dos entradas binarias seleccionan uno de los cuatro pares de canales para encender las entradas diferenciales análogas y conectar las salidas diferenciales análogas.

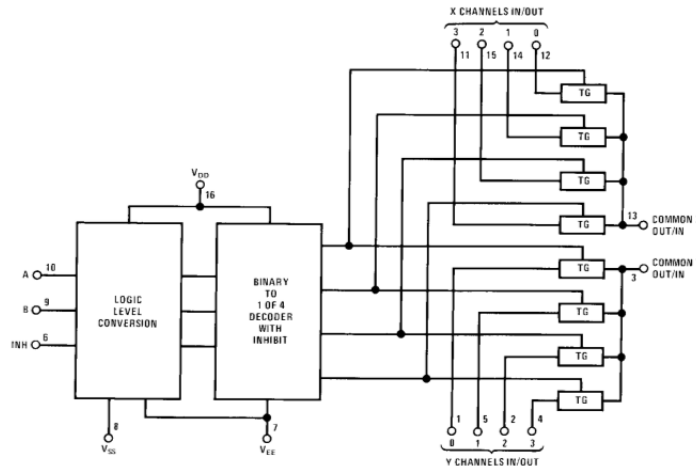


Figura H.1 Diagrama lógico de CD4052BC [g]

INPUT STATES				"ON" CHANNELS		
INHIBIT	C	B	A	CD4051B	CD4052B	CD4053B
0	0	0	0	0	0X, 0Y	cx, bx, ax
0	0	0	1	1	1X, 1Y	cx, bx, ay
0	0	1	0	2	2X, 2Y	cx, by, ax
0	0	1	1	3	3X, 3Y	cx, by, ay
0	1	0	0	4		cy, bx, ax
0	1	0	1	5		cy, bx, ay
0	1	1	0	6		cy, by, ax
0	1	1	1	7		cy, by, ay
1	*	*	*	NONE	NONE	NONE

*Don't Care condition.

Tabla H.a Tabla de verdad CD4052BC [g].

GLOSARIO

Anión: posee carga parcial negativa porque ha captado uno o más electrones, teniendo como consecuencia un mayor número de electrones (cargas negativas) que de protones (cargas positivas)

Ánodo: para una celda electrolítica, en el ánodo el paso de la corriente eléctrica le sustrae electrones; así el material aumenta su estado de oxidación o carga eléctrica (Reacción de oxidación)

Átomo neutro: es cuando hay igual número de protones en el núcleo que de electrones en las órbitas.

Catión: posee carga parcial positiva porque ha perdido uno o más electrones, teniendo como consecuencia mayor número de protones (cargas positivas) que de electrones (cargas negativas)

Cátodo: para una celda electrolítica, en el cátodo el paso de la corriente eléctrica le suministra electrones; así el material reduce su estado de oxidación o carga eléctrica (Reacción de reducción)

Disolución: es una mezcla homogénea de dos o más sustancias; (un disolvente y por uno o varios solutos). La sustancia presente en menor proporción se llama soluto y la de mayor proporción se llama disolvente.

Electrólito: es una sustancia que, cuando se disuelve en agua, forma una disolución que conduce la corriente eléctrica [5]. Los electrolitos pueden ser ácidos, bases o sales.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Eftekhari, Ali, *Nanostructured Materials in Electrochemistry*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 1st Edition (2008), pp. 5- 11, 14, 17, 24, 29, 81, 88, 89
- [2] Raymond, Chang, *Química*, McGraw Hill, (1992), 4^a Edición, pp. 54, 94, 777, 843
- [3] Nielsch, K., Choi, J., Schwirn, K., Wehrspohn, R.B. and Gösele, U. (2002) *Nano Lett.*, 2, pp. 677–680.
- [4] O'Sullivan, J.P. and Wood, G.C. (1970) *Proc. Roy. Soc. Lond. A*, 317, pp. 511–543.
- [5] Hwang, S-K., Jeong, S-H., Hwang, H-Y., Lee, O-J. and Lee, K-H. (2002) *Korean J. Chem. Eng.*, 19, pp. 467–473.
- [6] Sulka, G.D. and Parko»a, K.G. (2007) *Electrochim. Acta*, 52, pp. 1880–1888.
- [7] Schneider, J.J., Engstler, J., Budna, K.P., Teichert, Ch. and Franzka, S. (2005) *Eur. J. Inorg. Chem.*, pp. 2352–2359.
- [8] Yuan, J.H., Chen, W., Hui, R.J., Hu, Y.L. and Xia, X.H. (2006) *Electrochim. Acta*, 51, pp. 4589–4595.
- [9] Mata-Zamora, M.E. and Saniger, J.M. (2005) *Rev. Mex. Fis.*, 51, pp. 502–509.
- [10] Jia, Y., Zhou, H., Luo, P., Luo, S., Chen, J. and Kuang, Y. (2006) *Surf. Coat. Technol.*, 201, pp. 513–518.
- [11] Sulka, G.D., Stroobants, S., Moshchalkov, V., Borghs, G. and Celis, J-P. (2002) *J. Electrochem. Soc.*, 149, D97–D103.
- [12] Sulka, G.D., Stroobants, S., Moshchalkov, V., Borghs, G. and Celis, J-P. (2002) *Bulletin du Cercle d'Etudes des Métaux*, 17, P1/1-8.
- [13] Ba, L. and Li, W.S. (2000) *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 33, pp. 2527–2531.
- [14] Rehn, L.E., Kestel, B.J., Baldo, P.M., Hiller, J., McCormick, A.W. and Birchter, R.C. (2003) *Nuc. Instrum.Meth. Phys. Res. B*, 206, pp. 490–494.
- [15] Xu, T., Zangari, G. and Metzger, R.M. (2002) *Nano Lett.*, 2, pp. 37–41.
- [16] Li, A.P., Müller, F. and Gösele, U. (2000) *Electrochem. Solid State Lett.*, 3, pp. 131–134.

- [17] Tafoya, Ma. Luisa, Tesis: Software de Desarrollo para el Control de Películas de Óxido Anódico Nanoporoso, México D.F., Septiembre (2006), pp. 35, 43, 47, 48
- [18] Schmickler, Wolfgang; Santos, Elizabeth, Interfacial Electrochemistry, Springer-Verlag Berlin Heidelberg (2010), 2nd Edition, pp. 2, 3, 5
- [19] Thompson, G.E. and Wood, G.C. (1983) in Treatise on Materials Science and Technology, (ed. J.C. Scully), Academic Press New York, Vol. 23, pp. 205–329.
- [20] Thompson G.E. (1997) Thin Solid Films, 297, pp. 192–201.
- [21] Xu, Y., Thompson, G.E., Wood, G.C. and Bethune, B. (1987) Corros. Sci., 27, pp. 83–102.
- [22] Ono, S. and Masuko, N. (1992) Corros. Sci., 33, pp. 503–507.
- [23] Ono, S., Saito, M., Ishiguro, M. and Asoh, H. (2004) J. Electrochem. Soc., 151, B473–B478.
- [24] Sulka, G.D., Stroobants, S., Moshchalkov, V., Borghs, G. and Celis, J-P. (2002) J. Electrochem. Soc., 149, D97–D103.
- [25] Masuda, H., Hesegwa, F. and Ono, S. (1997) J. Electrochem. Soc., 144, L127– L130.
- [26] Masuda, H. and Fukuda, K. (1995) Science, 268, pp. 1466–1468.
- [27] Masuda, H., Yada, K. and Osaka, A. (1998) Jpn. J. Appl. Phys., 37, L1340– L1342.
- [28] Ono, S., Saito, M. and Asoh, H. (2005) Electrochim. Acta, 51, pp. 827–833.
- [29] Bockris, John O'M., Reddy, A. K. N., Electroquímica moderna, Vol 1., Editorial Reverté, S. A., (2003), pp. 299-300
- [30] Alonso-Vante, Nicolás, Electroquímica y electrocatálisis, Materiales: aspectos fundamentales y aplicaciones Vol. Ia, Primera edición virtual y en papel, e-libro.net, Buenos Aires, (2003)
- [31] PCAD. Versión (2001), ACCEL Technologies
- [32] De Silva, Clarence W., Mechatronics: An Integrated Approach, CRC PRESS, 2004, pp. 364-366, 974-975

MESOGRAFÍA

[a] Igarashi, Kazuo, Nanotechnology, For New Industry Creation and Life-Style Innovation, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology AIST, Japan pp. 4

http://www.aist.go.jp/Portals/0/resource_images/aist_e/research_results/publications/pamphlet/today/nanotechnology_e.pdf

[b] Anodizado del aluminio, Blog de control y la metrología

<http://www.measurecontrol.com/anodizado-del-aluminio/>

[c] Intersil ICL8038, Precision Waveform Generator/Voltage Controlled Oscillator, April (2001), File Number 2864.4

<http://www.intersil.com/content/dam/Intersil/documents/icl8/icl8038.pdf>

[d] Harris Application Note AN013, “Everything You Always Wanted to Know About the ICL8038”.

<http://www.intersil.com/content/dam/Intersil/documents/an01/an013.pdf>

[e] National Semiconductors, LM185/LM285/LM385 Adjustable Micropower Voltage References, (2000)

<http://www.emesystems.com/pdfs/parts/LM185-1.2.pdf>

[f] Texas Instruments, TL081, TL081A, TL081B, TL082A, TL082B, TL084, TL084A, TL084B, JFET-INPUT Operational Amplifiers, (2004)

<http://www.ti.com.cn/cn/lit/ds/symlink/tl084.pdf>

[g] CD4051BC * CD4052BC * CD4053BC, Single 8-Channel Analog, Multiplexer/Demultiplexer * Dual 4-Channel Analog Multiplexer/Demultiplexer * Triple 2-Channel Analog Multiplexer/Demultiplexer, (2000)

http://datasheet.eeworld.com.cn/pdf/FAIRCHILD/19647_CD4052.pdf

[h] National Semiconductors, LM675, Power Operational Amplifier, (1999)

<http://www.datasheetarchive.com/LM675-datasheet.html>

[i] Philips Semiconductors, LM139/239/239A/339/339A/LM2901/MC 3302, Quad voltage comparator, (1995)

http://www.datasheetlib.com/datasheet/259648/mc3302_philips-semiconductors.html

[j] DALLAS Semiconductor, DS1307/DS1308 64 X 8 Serial Real Time Clock
<http://www.alldatasheet.es/datasheet-pdf/pdf/123887/DALLAS/DS1308.html>

[k] SGS-THOMSON Microelectronics, L293B, Push-Pull Four Channel Drivers, (1993)
http://datasheet.eeworld.com.cn/pdf/STMICROELECTRONICS/10457_L239B.pdf

[l] Jack G. Ganssle, A Guide to Debouncing, The Ganssle Group, August 2004, Rev 1: April, 2006, Rev 2: April, 2007, Rev 3: June, (2008)
<http://www.eng.utah.edu/~cs5780/debouncing.pdf>

[m] Electrónica estudio,
sitio: <http://www.electronicaestudio.com/picmaster.htm#715>

[n] Getting Started, (c) Revolution Education Ltd, Version 6.8 02/2009
Email: info@rev-ed.co.uk
<http://www.rev-ed.co.uk/>

[o] Anim8or. Versión 0.95 Steven Glanville, (2007)
<http://www.anim8or.com/>

[p] Guía de compras DICOPEL® G-II, pp. 5-6 (DICOPEL desapareció, ahora es ARROW)
<http://www.arrowmx.com/>

[q] Carter, Bruce, R. Brown, Thomas, Application Report, SBOA092A, Handbook of Operational Amplifier Applications, October (2001).
<http://www.ti.com/lit/an/sboa092a/sboa092a.pdf>

[r] Ron Mancini, Editor in chief, SLOD006B, Op Amps For Everyone, Design Reference, Advanced Analog Products, Texas Instruments Incorporated, August (2002)
<http://www.foxcomputer.se/Op%20Amps%20For%20Everyone%20SLOD006B.pdf>

[s] Basic Commands, (c) Revolution Education Ltd, Version 6.9 06/2009
Email: info@rev-ed.co.uk
<http://www.rev-ed.co.uk/>

MI SINCERO AGRADECIMIENTO A . . .

PAPIIT. Cabe decir en lo que se refiere a este proyecto, que estas variables son de importancia para el proyecto: PAPIIT IN-113411

La Corporación Universitaria para Desarrollo de Internet A.C. (CUDI), por creer en mí y enseñarme extensas posibilidades para formar grupos multidisciplinarios.

La Facultad de Ingeniería de la UNAM, por darme herramientas necesarias del conocimiento, para estratificar los retos; no solo en ingeniería, también en otras áreas.

El Instituto de Física de la UNAM, por haber sido parte de mi hogar, durante mi estancia y las facilidades en algunas de sus instalaciones. Así como el grato apoyo de mucha gente en todos sus niveles laborales.

A las personas y al lugar en donde puse en práctica lo aprendido... el Laboratorio de Materiales Nanoestructurados a cargo de la Dra. Patricia Santiago Jacinto.

Quien en su momento me enseñó con hábil didáctica, los pasos básicos y fundamentales de gran parte del proceso experimental de formación de las membranas nanoporosas. Gracias Dra. Carmen Reza.

Un gran maestro, con quien me atrevo a resaltar, una caravana de respeto en cualquier parte del mundo... Luis Rendón por su excelencia en la Microscopía Electrónica de Transmisión de Alta Resolución, concebí con sus micrografías una visión diferente del entorno.

Mi Asesora en la parte Nanociencia, Dra. Patricia Santiago Jacinto. Por la infinita paciencia que ha tenido conmigo en mi paso por esta etapa, me faltarían oraciones para decir: Muchas Gracias... Gracias por iniciarme en la preparación de muestras, la síntesis y la caracterización de la materia; aunque siento que sólo aprendí una pizca de su conocimiento. Gracias también, por darse el tiempo para escucharme.

M. en I. Ingeniero Jorge Israel Cruz. Gracias por su asesoría técnica en cuanto a la parte de Ingeniería y ayudarme a clarificar, el rumbo que refiere el camino en un diseño electrónico.

El Ingeniero Neptalí González por su apoyo técnico, de quién aprendí mucho en ámbitos relacionados con la computación y enlaces de teleconferencias.

Ing. Eduardo Carranza Torres e Ing. Joaquín Jorge Téllez Lendech
...por sus conocimientos y apoyo moral.

Cada uno de mis Sinodales por leer esta tesis y compartirme su conocimiento.

Dr. Pablo Roberto Pérez Alcázar

M.I. Luis César Vázquez Segovia

Dr. José Ismael Martínez López

Dra. Laura Adriana Oropeza Ramos

Mi familia, porque son quienes complementaron fuera de lo académico; mis estados emocionales y humanos.

DEDICADO A:

Dios, la vida...

a todos quienes agradecí anteriormente,

...así como mis motivos.

“Mucho de lo que he sido, soy y seré.... es parte de todos”

Mi Madre Gloria Alcaraz y a mi Padre Fidel Rubio, infinitamente... por haberme traído a este mundo y estar pendiente de mis experiencias de vida. Ellos junto con mis hermanos me ayudaron a entender que siempre hay una nueva oportunidad para levantarse.

Mis hijas Angie Camila y Aline Sophia, lo mejor que me ha pasado en la vida... mis principales motivos para no haber desistido en los tropiezos. En las dos encontré más razones para forjar nuevos retos y compartirlos. La satisfacción que se libera al estar en la cima de una montaña, escuchar una composición musical propia o cualquier otro logro no se comparan para mí, con la satisfacción de estar con ellas y verlas crecer día a día.

....Mil gracias hijas por vivir conmigo y enseñarme a ser mejor....

M. en C. Ma. Luisa Tafoya, por compartir algunos años en el pasado.

Mis lazos sanguíneos... mi incondicional apoyo... mis fuertes pilares... mis hermanas Consuelo Rubio y Antonia Rubio, mi gran hermano Gerardo Rubio.

Mis queridos sobrinos, Christian Ortega, Cristopher Ortega y Bruno Rubio, mi compadre César Ortega y mi cuñada Anabel Muñiz.

A todos mis tíos, en especial a quienes me han apoyado continuamente: Antonio Alcaraz Vidal, Martha Alcaraz Vidal, Daniel Alcaraz, Catarino Alcaraz, Joel Alcaraz, Noé Alcaraz, Abel Vidal, Francisco Vidal y Gabriela González, Ana Martha Veytia; deseándole lo mejor a Heriberto Alcaraz y sus hijos... mis primos. Mi Tío Manuel Rubio †

Mis primos de mi lado paterno...

Manuel, Concepción, Héctor, Gerardo, Gilberto, Juan, Marcos, Hugo, Hilda, María, Araceli, Rocío, Elizabeth, Elena, Claudia, José, Carlos, David, Octavio, Guadalupe, Silvia, Ángel, Armando, Verónica, Valdemar Frías, Salvador, Graciela, María Eugenia, Rafael, Arturo, Beto, Carlos, Imelda, Enrique, Guillermo, Eduardo, Miguel, Jesús, José Luis Coronel, Leopoldo, Carina...

Mis primos de mi lado materno...

Edgar, Aldo, Erick, Jacqueline, Goretti, Jonathan, María Elena, Noé, Adán, María José, Sinaí, Ana, Omar Meneses, Karen, Erika, Alejandro Rosales, Marco Polo, David, Ángel, Antonio Vidal, Dolores, Lizeth, Geovanna, Armín, Tibizai, Gabriela, Daniela...

.... así como a todos mis demás familiares... escribiría una gran lista.

Mis grandes amigos, a quienes fui conociendo desde los 6 años de edad y en el transcurso... Lic. Adrián Domínguez, Lic. Isabel Torres, QFB. Olaf Falaize, Ing. Alejandro Campos, Ing. Manuel Delgado, Lic. Ricardo Morales, Lic. Brenda S. L. Sánchez e Ing. Manuel López... A sus familias y a ustedes... Gracias por compartir todas las experiencias, las colaboraciones en la música, en el cine, el alpinismo y en los andares... y con gran recuerdo al inquieto Cineasta Roberto A. Sánchez † (Roberto de Coria), quien nos acompañó casi hasta su último suspiro en este mundo.

En las buenas y en las malas... mis amigos... mis otros hermanos.

Todos mis amigos, maestros y personas que formaron parte de mi vida en:

La UNAM, principalmente de Ciudad Universitaria
La Facultad de Ingeniería,
El Instituto de Física,
Asociación de Montañismo,

Toda la comunidad La Salle... en particular La Escuela Fundación Mier y Pesado,
...Y en donde viví algunos años El Aspirantado Distrito Sur,
...buen recuerdo de todos...

El Seminario de Misioneros de Guadalupe, AR.

El Centro de Capacitación Cinematográfica,

Estudios Churubusco Azteca, S.A.

INBA,

El Centro Libanes A.C.,

Los muchos escenarios como... Rockotitlán,
...Hard Rock....

La Sierra de Veracruz y la Sierra de Puebla... con la grandiosa gente de los muchos pueblos... quienes me alojaron y me ofrecieron lo que tenían en varias ocasiones;
...aprendí más de ellos de lo que pretendí enseñarles...

En especial dedicatoria y con mucho aprecio, por fortalecer las raíces que me dieron un sentido y una dirección en mi formación...

Ing. Agustín Rodríguez Fuentes por su apoyo incondicional a mi familia, moralmente le estoy muy agradecido. Mi sincero respeto por su trayectoria a en STUNAM.

Dr. José Manuel Velasco Arzac muchas gracias por su aprecio, por ser mi maestro en Mier y Pesado... aprendí de su temple cuando estuvo a cargo de la Confederación Nacional de Escuelas Particulares... no sé cómo expresarlo... gracias porque siempre escucho a mi madre y porque siempre me escucho cuando lo necesite moralmente...

Maestro Juan José García Melo... Mil gracias por ser mi maestro en Mier y Pesado; por dedicarme a diario tan valioso tiempo al ser mi Tutor cuando viví en el Aspirantado "La Salle"... antes de que yo entrara a la Universidad.

Maestro Flavio Arias por ser mi padrino, maestro. Buenos recuerdos de la escuela Fundación Mier y Pesado, el coro, alpinismo, las misiones a la Sierra de Puebla o Veracruz...

Maestro Gerardo Rábago Palafox gracias por creer en mí, siempre tengo presente aquella primera vez en CENART, cuando con emoción escuché la música coral que imaginé...ejecutada con la magia que plasma a su batuta en la dirección de las partituras. Gracias por su tiempo en la dirección del Coro Nacional de México y tantos tesoros más...

Ing. Monir Salum Kattas † e Ing. Carlos Brassel... y por los gratos momentos con un buen café y por sus grandes enseñanzas en el arte de la oratoria en el Centro Libanes A.C.

Emilio Hernández que con mucha paciencia mantiene vivos los grandes legados de mucha gente en el cine mexicano en la Fonoteca de Estudios Churubusco... un ejemplo para mí.

Maestro Mérlindon Crostwaytt que aparte de tu legado en el grupo de rock Kerigma... tus enseñanzas en el kung Fu, me cambiaron la forma de ver la vida. Mil gracias Merlin.

Ing. Luis René Cárdenas (BORO), gracias por esa visión siempre positiva y por la destreza para darle forma a la música que muchos imaginan en Mixtlán Producciones.

Maestros Raúl Sánchez "El noble" y Carlos Carsolio... por sus consejos en el alpinismo.

Maestro Alberto Mejía Barón † (ALFÍN) y a su familia. Mil Gracias por los momentos de trabajo en el taller... los títeres, las maquetas... Entendí porque el Maestro Jim Henson te llegó a buscar para que lo asesoraras... Te dedico las palabras que decías a Rosete Aranda: ..."Gracias por tu gran legado al mundo"... a donde se encuentre tu espíritu.

Finalmente a los responsables de un gran árbol genealógico....

...Mis grandes abuelos...

Antonia Vidal Caracheo †,
Salvador Rubio Mercado † y María Avila Nuñez †

Y mi gran Abuelo Catarino Alcaraz con su gran Doctorado de la vida,
... con sus caballos...

...con sus costumbres...

...quien orgullosamente perteneció a los “Dorados de Francisco Villa”,

...el pupilo de Don José Doroteo Arango... mi abuelito.