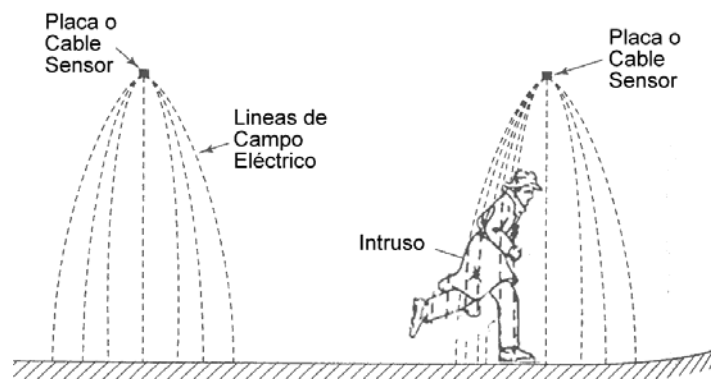


## Capítulo 3. Sensor de Proximidad.

### 3.1 Introducción al sensado de proximidad.

De acuerdo con Carr, los sensores de proximidad o presencia son usados tanto en sistemas de alarmas contra intrusos así como en algunos procesos industriales para detectar si un objeto o persona (o animal) se encuentra en algún sitio crítico de un proceso dado.[12]

Muchos fenómenos diferentes son usados por los sensores de proximidad/presencia, incluyendo capacitancia, inductancia, luz, ultrasonido y microondas.



**Figura 3.1.** Sensor capacitivo de proximidad.

La Figura 3.1 muestra un sistema que utiliza la capacitancia, propiedad eléctrica que existe entre dos conductores cualesquiera que estén separados por un aislante y que es función del área de las placas conductoras, el espacio entre ellas y la naturaleza del

material aislante. En este sistema el área de las placas y el espacio entre ellas son constantes por lo que la alarma se activa cuando hay un incremento en el flujo eléctrico entre la placa y tierra (capacitor), debido a que la constante dieléctrica del intruso es aproximadamente unas 80 veces mayor que la del aire.

Un oscilador LC produce una frecuencia de salida que se determina por la capacitancia y la inductancia del circuito tanque, variar uno de estos parámetros provoca que la frecuencia de operación también cambie. La Figura 3.2 muestra un ejemplo de este principio aplicado a un sensor de proximidad. Cuando el sistema está en reposo (no hay intruso), se ajustan la frecuencias de los dos osciladores de forma tal que el 3er armónico sea aproximadamente igual al 4º armónico del oscilador 2. La presencia del intruso hará variar  $C_1$  y  $C_2$  haciendo que los armónicos (3º y 4º) difieran activando el circuito de disparo.

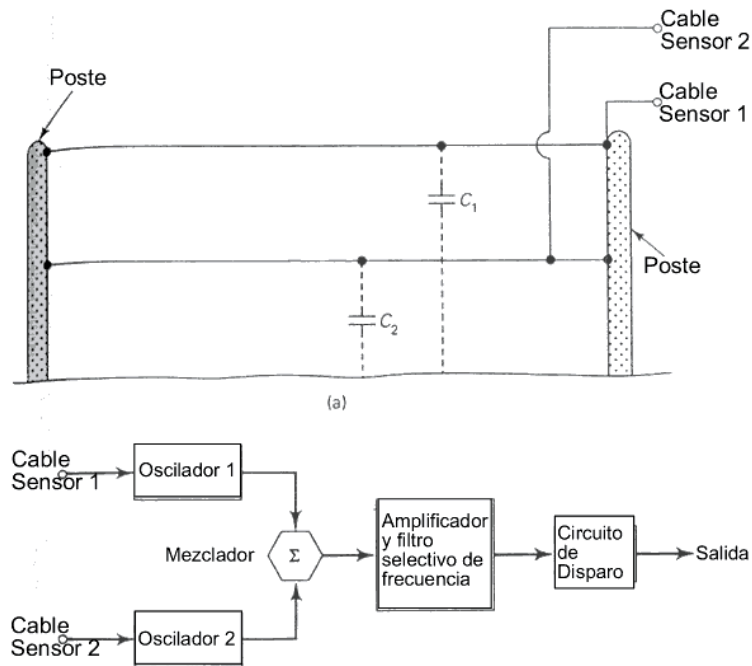
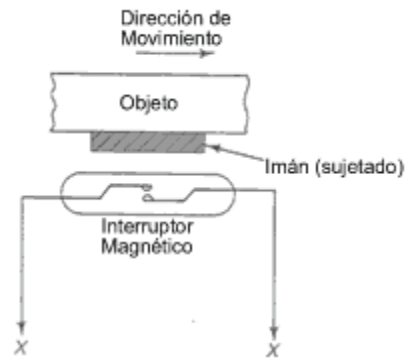


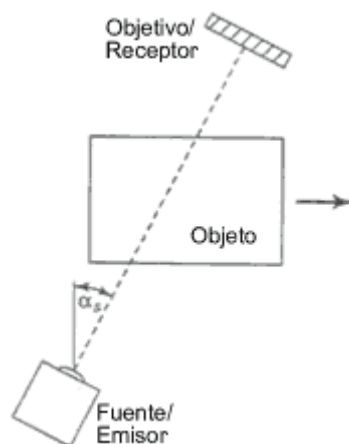
Figura 3.2. Sensor LC de proximidad.

Los sensores inductivos de proximidad dependen de un cambio en el campo magnético alrededor del elemento sensor, a este tipo de sensor se le conoce como interruptor de proximidad.



**Figura 3.3.** Interruptor de proximidad.

Dentro de los sensores de proximidad operados por luz, existen diferentes tipos disponibles en el mercado, que utilizan dispositivos como celdas fotoconductoras, celdas fotovoltaicas, fotodiodos, y fototransistores. La forma más simple de utilizar este tipo de dispositivos se muestra en la Figura 3.4. En este sistema, el sensor (un fototransistor) se posiciona en frente de una fuente de luz. Cuando un objeto opaco pasa entre el sensor y la fuente de luz, desaparece la luz en el fototransistor y el estado cambia.



**Figura 3.4.** Sensor de proximidad basado en sensores de luz.

Un problema con este sistema es que la fuente de luz y el sensor de luz están separados. No obstante es posible aprovechar la reflexión del objeto y colocar el sensor y la fuente en el mismo encapsulado.

Sin embargo, en estos sistemas de proximidad basados en foto-sensores, la luz de fondo también puede afectar la detección de objetos, ya que si el nivel de luz es alto, el sensor se mantendrá en excitación permanente independientemente de la presencia o ausencia del objeto. Afortunadamente existen maneras de solucionar el problema de la luz de fondo sin tener que atenuar las luces del cuarto, (ya que trabajar a oscuras es en muchas ocasiones un riesgo de seguridad).

Los sensores de proximidad por microondas, utilizan ondas electromagnéticas de radio que van desde 1GHz hasta 300GHz. Las aplicaciones más comunes de este tipo de sensores son el radar simple y radar *Doppler*. El principio básico del radar es sencillo, se transmite una pequeña ráfaga de energía RF, después se enciende un receptor para escuchar el eco de esa ráfaga reflejada por el objeto a sensar (llamado comúnmente objetivo o *target*). El pulso se propaga a la velocidad de la luz, por lo que la distancia se puede medir indirectamente por medio del tiempo requerido para que el eco regrese de acuerdo con la Ecuación 3.1

$$d = \frac{ct}{2}$$

Donde:

$d$  = distancia

$c$  = velocidad de la luz

$t$  = tiempo

**Ecuación 3.1**

Finalmente los sensores de proximidad ultrasónicos, utilizan vibraciones acústicas en un rango superior al del oído humano. Aunque normalmente se piensa que este rango

de frecuencias pertenece exclusivamente a frecuencias de radio, se pueden lograr estas frecuencias para ondas sónicas.

### **3.2 Sensor ultrasónico de Proximidad.**

El ultrasonido es la energía sónica que está por encima del espectro audible. Aunque normalmente se piensa que este rango de frecuencias pertenece exclusivamente a frecuencias de radio, se pueden lograr estas frecuencias para ondas sónicas. Es necesario entender las propiedades de las vibraciones ultrasónicas para aprovechar todo el potencial de éstas. La diferencia entre ondas de radio (como las usadas en detectores de microondas) y las ondas ultrasónicas es que las ondas de radio son electromagnéticas, mientras que las ultrasónicas son vibraciones mecánicas que requieren de un medio físico que soporte la propagación de la onda (el sonido requiere un medio para transmitirse).

Fuera de esta distinción, ambos tipos de onda tienen mucho en común, algunas similitudes son: que ambas pueden ser reflejadas y refractadas en las fronteras entre diferentes sustancias, ambas siguen las reglas de la óptica y por lo tanto pueden ser concentradas (enfocadas), y finalmente la energía de ambas es atenuada al atravesar el medio.[11]

En un sistema ultrasónico deben existir medios para producir, recibir y mostrar señales ultrasónicas; dispositivos magnetostrictivos y piezoeléctricos son dos tipos de transductores que se usan ampliamente para la conversión de energía eléctrica a mecánica y viceversa. Los primeros (típicamente hechos de níquel o aleaciones de níquel) son rugosos y capaces de manejar grandes potencias, mientras que los transductores piezoeléctricos son pequeños y más eficientes. La aplicación de campos

magnéticos o eléctricos, respectivamente, provoca que el transductor ultrasónico vibre a la misma frecuencia de la fuente de excitación.

El ultrasonido es transmitido a través de un medio debido a la vibración de partículas, por lo que no hay un movimiento neto del medio. Las partículas están unidas elásticamente y el desplazamiento de una partícula provocará que otra se mueva, transmitiendo gradualmente la vibración a través de todo el medio. Cada partícula tiene una masa finita y dado que los enlaces son elásticos existirá un retraso en la transmisión de energía de una partícula a otra. Por otro lado, dado que existen fuerzas de fricción en el medio la energía de vibración será gradualmente absorbida por el medio.

La velocidad  $c$  de ondas de sonido longitudinales en un medio homogéneo se expresa como función de la elasticidad y densidad de acuerdo con la Ecuación 3.2

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

Donde:

$c$  = Velocidad del sonido

$E$  = Módulo de elasticidad del medio

$\rho$  = Densidad del medio

**Ecuación 3.2**

### **3.3 Construyendo un Sensor de Proximidad**

#### **3.3.1 Por Onda Estacionaria.**

Para los propósitos de detección de proximidad, se utilizan frecuencias acústicas entre 20kHz. y 60kHz. Un detector ultrasónico de proximidad utiliza un transductor ultrasónico para crear señales acústicas que viajan a lo largo del espacio.

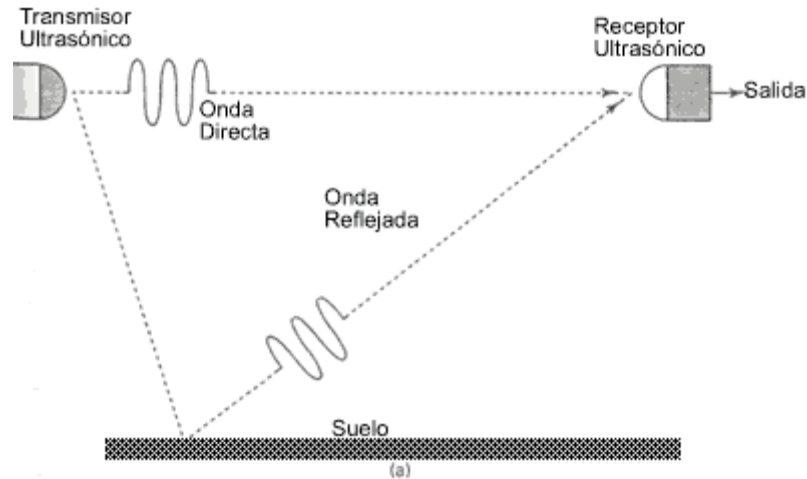


Figura 3.5. Sistema ultrasónico de proximidad.

Un transductor receptor, (que puede ser del mismo tipo que el transmisor, dado que se trata de dispositivos bidireccionales) recoge la señal ultrasónica del ambiente. La onda estacionaria, recogida por el receptor, es el resultado de todas las reflexiones presentes en el cuarto, su forma de onda es función de la frecuencia ultrasónica y la velocidad de propagación del sonido en cierto medio, en el caso del aire:  $c = 331 \text{ m/s}$

$$\lambda = \frac{c}{2F_s}$$

Ecuación 3.3

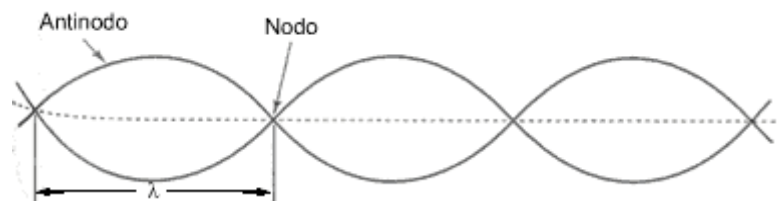


Figura 3.6. Ejemplo de Onda Estacionaria.

El factor de 2 aparece debido a que la onda estacionaria es creada por la interacción de ondas directas y reflejadas. Un detector de proximidad sencillo, mide la amplitud de la onda estacionaria. Si nadie entra al cuarto, la onda estacionaria permanece constante, pero si un intruso aparece, se crea una nueva ruta de reflexión, que altera la onda estacionaria en el reflector.

### **3.3.2 Por Pulsaciones de Ultrasonido (sensor de distancia).**

Utilizando un equipo ultrasónico pulsado, es decir, emitiendo únicamente unos pocos ciclos a la vez, se puede calcular la distancia  $d$  de una superficie reflejante desde el transductor mediante la fórmula:

$$d = 0.5c\Delta t$$

Donde:

$d$  = distancia

$c$  = velocidad de propagación del sonido

$\Delta t$  = tiempo

**Ecuación 3.4**

Vemos que el principio es similar a como lo hace el radar, sólo que utilizando ondas acústicas en vez de ondas electromagnéticas (al comparar la Ecuación 3.4 con la Ecuación 3.1).  $\Delta t$  es el tiempo requerido por el impulso ultrasónico para tocar la frontera reflejante y regresar al transductor. El factor 0.5 es debido al hecho de que la onda ultrasónica viaja de ida y vuelta, esto es, dos veces la distancia desde el transductor a la superficie reflejante.

### **3.3.3 Procedimiento.**

Utilizando esta segunda idea se pretendió determinar la distancia al enviar una serie de pulsos utilizando los transductores de ultrasonido 400ST/R160, estos dispositivos piezoeléctricos resuenan a una frecuencia de 40kHz. (Ver hoja de especificaciones Apéndice D).

Básicamente la idea era generar una señal cuadrada a 40kHz mediante un Timer L555 para que el transductor convirtiera la energía eléctrica en energía ultrasónica, la frecuencia se ajusta mediante el potenciómetro de 2Meg. El acoplamiento entre la salida del L555 y el 400ST160 se llevaba a cabo mediante un transistor Q2N2222, este circuito



era alimentado mediante el PUERTO\_A (salida para motor) que se encendía durante un breve instante.

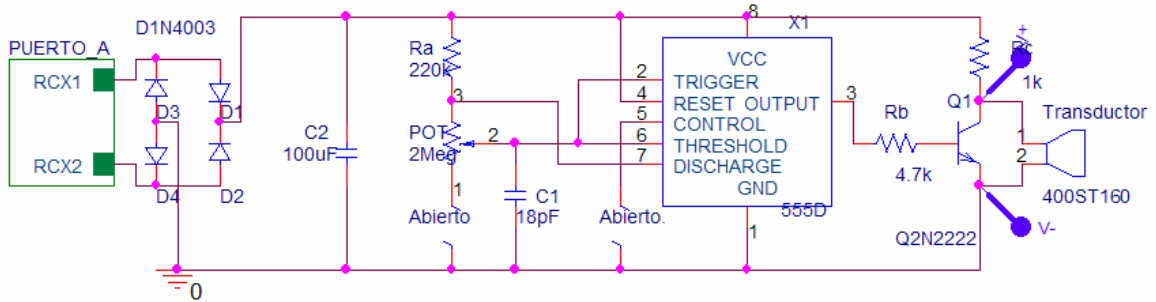


Figura 3.7. Circuito Transmisor de señales ultrasónicas.

En la Figura 3.8 se observa que si encendemos el puerto durante 110µs aproximadamente se obtienen 6 pulsos, 4 de amplitud constante y 2 un poco más pequeños que corresponden a la descarga del capacitor C<sub>2</sub>.

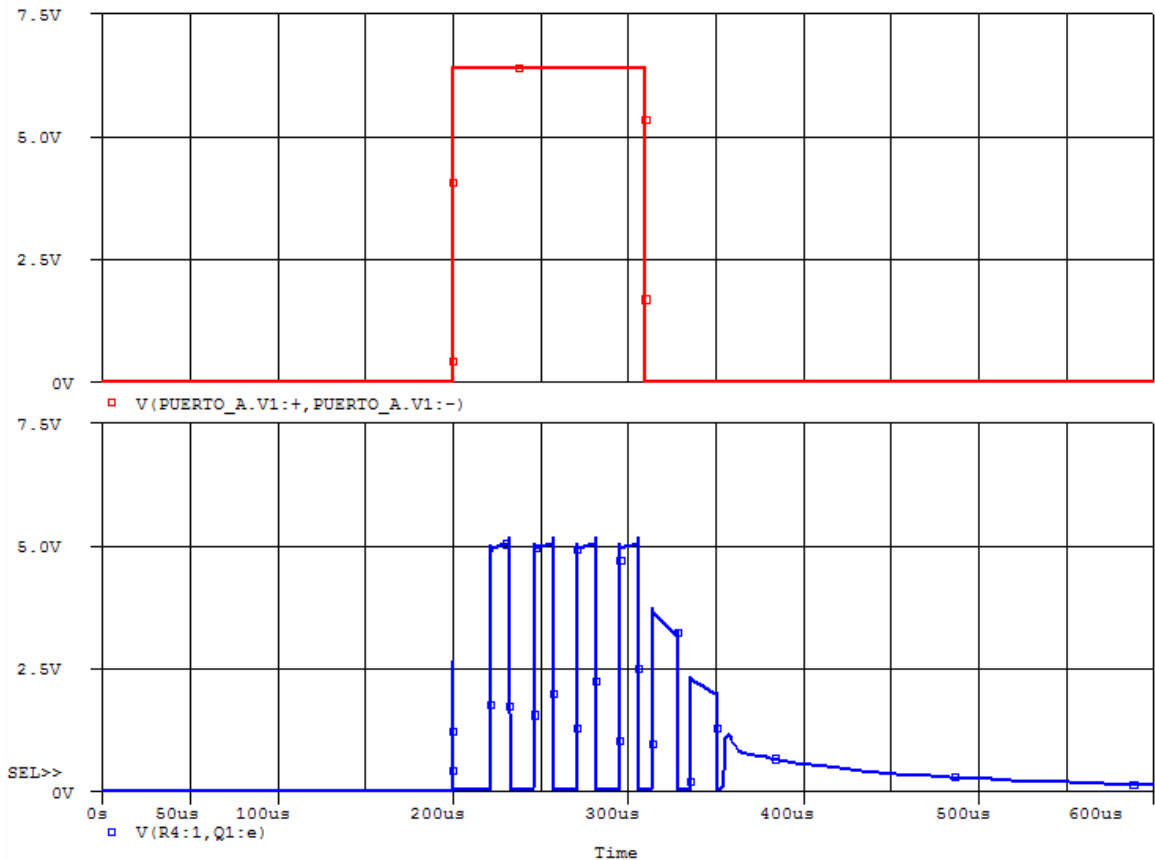


Figura 3.8. Simulación del Circuito Transmisor Ultrasónico.

Los pulsos así generados, viajan hasta algún objeto cercano y son reflejados nuevamente hacia el transmisor, aunque a medida que viajan en el medio, éste absorbe parte de la energía y los pulsos son atenuados.

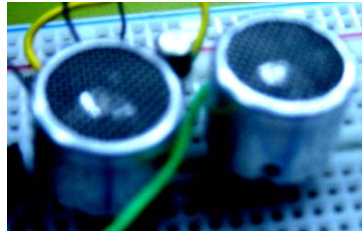


Figura 3.9. Transductores 400ST160 y 400SR160.

Un transductor 400SR160 se colocaba junto al 400ST160 del circuito transmisor, de forma que recuperaba los pulsos una vez que estos habían sido reflejados por el objeto cercano y los convertía a una señal eléctrica. Sin embargo, la energía de esta señal era poca, por lo que debía ser amplificada mediante el circuito mostrado en la Figura 3.10. La señal así convertida era leída por el RCX mediante el PUERTO\_1.

Las dos primeras etapas son etapas amplificadoras, el capacitor  $C_2$  sirve para eliminar el voltaje de DC presente en la señal debido a que la alimentación de este circuito la hace el RCX con 5V para la terminal positiva (debido al regulador de voltaje) y 0V en la terminal negativa del dispositivo LM324, es decir, se carece de fuente de voltaje negativa por lo que el voltaje de operación de los opamps no puede ser negativo. Como las 2 primeras etapas son amplificadores inversores se debe crear un desplazamiento hacia arriba u *offset* para operar a 2.5V.

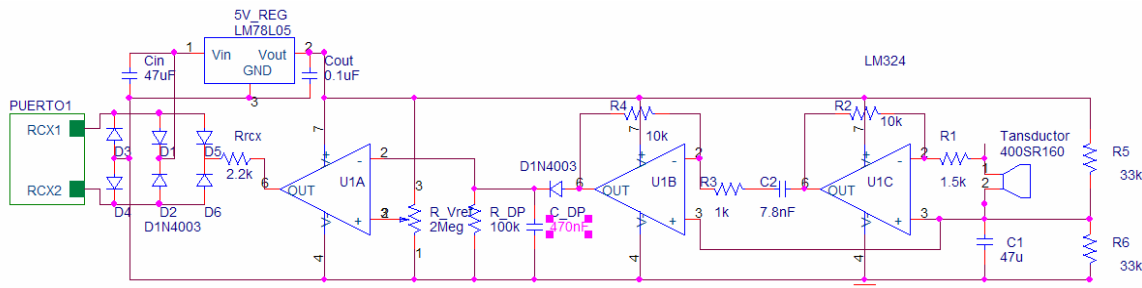
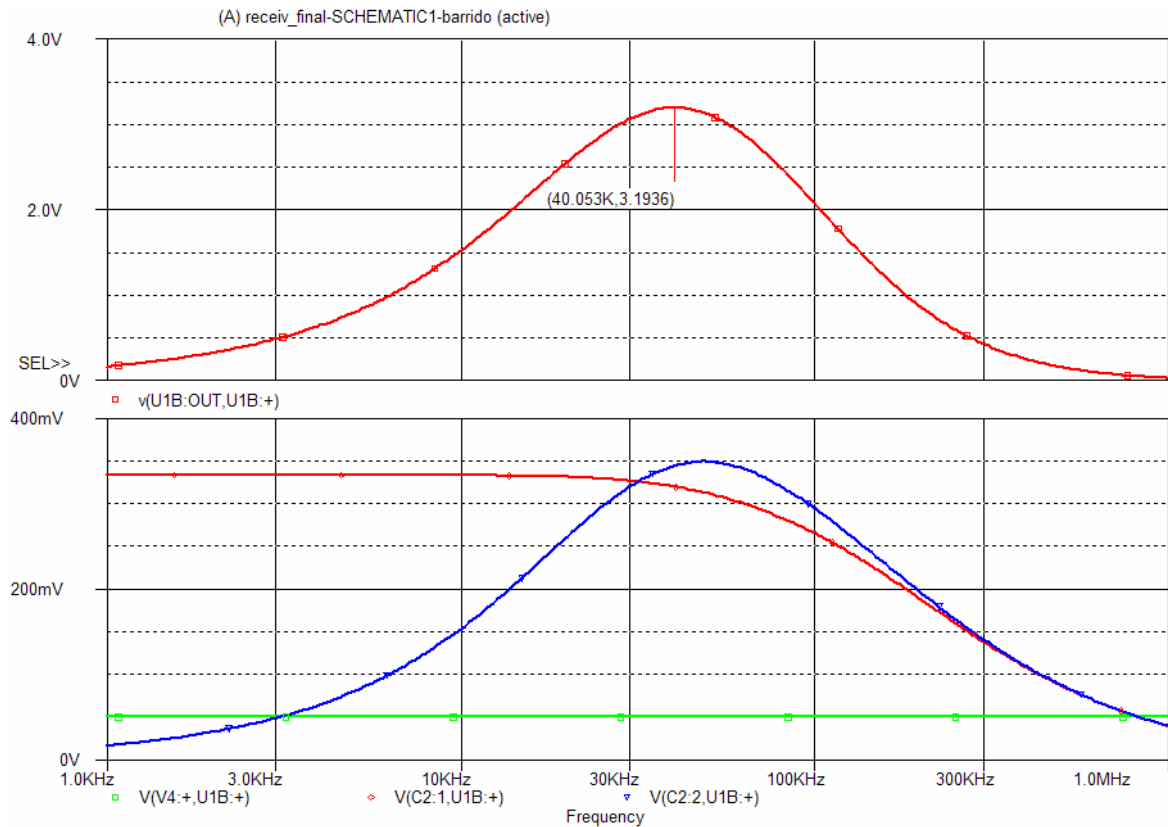


Figura 3.10. Circuito Receptor y Acondicionador de Señales Ultrasónicas.

La señal recuperada por el transductor piezoeléctrico variaba desde 50mV cuando la trayectoria recorrida era de aproximadamente 1m, hasta 140mV cuando el objeto se encontraba a menos de 10cm de los transductores.

La Figura 3.11 muestra un barrido en frecuencia de este circuito, para lo cual el transductor se ha sustituido por una fuente AC y se ha ajustado a 50mV ya que nos enfocamos en la presencia de objetos a menos de 1m de distancia.

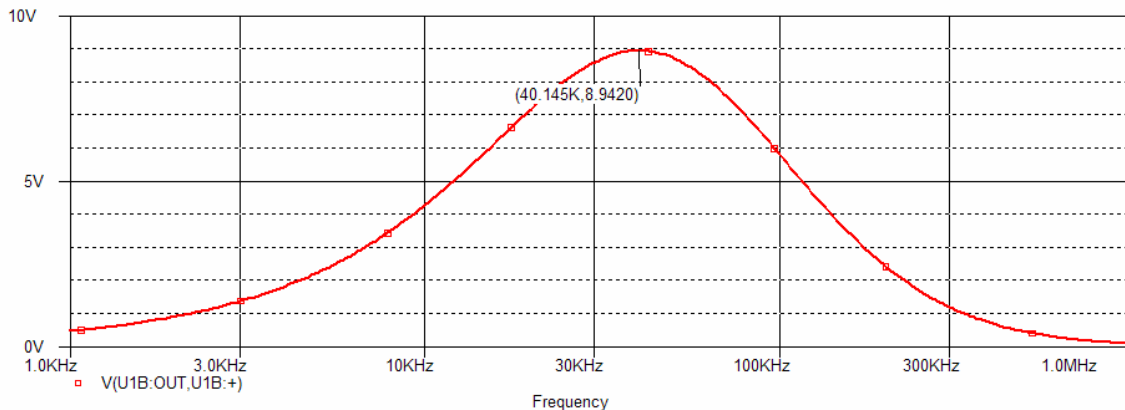
El dispositivo  $U_{1C}$  es un amplificador inversor con un factor de ganancia de  $-6.67$  ( $-20/3$ ) y debido a las capacitancias internas del amplificador operacional presenta un comportamiento de filtro pasa-bajas (línea roja en la Figura 3.11). El capacitor  $C_2$  funciona como filtro pasa-altas. El capacitor  $C_2$  y el dispositivo  $U_{1C}$  en conjunto forman un filtro pasa-bandas centrado en 40kHz (línea azul en la Figura 3.11).



**Figura 3.11.** Barrido en Frecuencia para una fuente AC de 50mV salida (arriba); etapas intermedias (abajo).

El dispositivo  $U_{1B}$  es otro amplificador inversor con un factor de ganancia de -10, excepto que al conectar el diodo en serie con el paralelo formado por la resistencia  $R_{DP}$  y  $C_{DP}$  se convierte en un circuito detector de pico, cuya función es mantener el valor de voltaje más alto presente a la salida de  $U_{1B}$ .

Si combinamos la ganancia de los dos dispositivos ( $U_{1C}$  y  $U_{1B}$ ) obtenemos una ganancia total de 66.7 (200/3) para señales con 40kHz de frecuencia. Suponiendo que el objeto se encuentre muy cerca de los transductores la señal recogida por el transductor receptor será aproximadamente 140mV lo que idealmente daría una senoide de 40kHz y 9.3V de amplitud. Sin embargo, nuestros dispositivos están limitados por medio del regulador de voltaje L7805 (regulador positivo a 5V) y tienen como voltaje de referencia 2.5V (debido al divisor de voltaje formado por  $R_5$  y  $R_6$ ) con lo que la salida estará saturada a partir de 2.5V (5-2.5).



**Figura 3.12.** Barrido en Frecuencia para una fuente AC de 140mV.

La señal recuperada del transductor, una vez amplificada, se introduce posteriormente a un circuito comparador, de forma que si el voltaje introducido es mayor a cierto valor de referencia, ajustable mediante el potenciómetro, la salida en  $U_{1A}$  ( $V_{out}$ )

será aproximadamente 5V y si es menor la salida será aproximadamente 0V (con respecto a la Terminal V- del LM324).

Dicho voltaje de salida es leído por el PUERTO\_1 del RCX a través de la resistencia  $R_{rcx}$  con ayuda del diodo  $D_5$ . Sin embargo internamente el RCX conecta una resistencia de 10k al momento de realizar la medición de acuerdo con la descripción que se hizo del sensado activo en el capítulo anterior.

Asimismo, debido a la solución empleada para evitar el problema de la inversión de polaridad tenemos que el diodo  $D_4$  también queda conectado, por eso en realidad la lectura en el RCX varía entre 2.5V y 5V aproximadamente.

El circuito simplificado se muestra en la Figura 3.13 y a pesar de las pérdidas generadas por los diodos y la resistencia de 10k, la variación a la salida del comparador es suficiente para detectar dos diferentes niveles, con lo cual podríamos detectar el momento en que los pulsos sónicos han viajado al objeto y regresado al punto de origen.

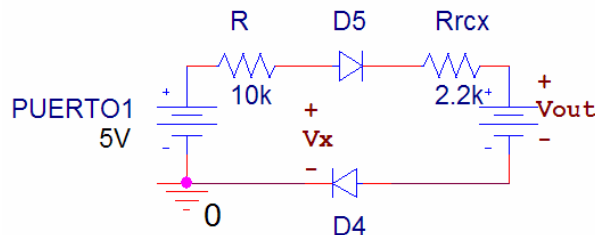


Figura 3.13. Circuito equivalente simplificado.

De esta forma, podríamos encender el PUERTO\_A y al mismo tiempo inicializar uno de los TIMERS del RCX, apagar el PUERTO\_A y esperar a que el comparador se dispare. Si no lo hace después de cierto tiempo, supondríamos que no hay objetos presentes en ese instante aunque tendríamos que volver a encender el PUERTO\_A y esperar por un nuevo disparo del comparador para estar seguros de que no hay ningún objeto presente en todo momento. Si el comparador se dispara, indica que de hecho hay

un objeto frente al sensor, por lo que detenemos el TIMER del RCX e indirectamente podríamos saber a que distancia está utilizando la Ecuación 3.4.

Una desventaja del sensor discutido hasta el momento, es que utiliza dos puertos del RCX (el PUERTO\_A y el PUERTO\_1). Lo cual sería aceptable si el sensor determinara con exactitud la distancia a cierto objeto. Desafortunadamente el *firmware* incluido por Grupo LEGO® determina el tiempo mínimo para incrementar cualquier contador en un valor de 10ms.

En otras palabras, la estimación del tiempo transcurrido se hace en múltiplos enteros de 10ms. Considerando que el objeto estuviera a una distancia de 3m y que la velocidad de la energía ultrasónica en el aire es de 331m/s, el tiempo empleado por un pulso de energía para ir hasta el objeto y regresar sería tan sólo de 6ms, es decir, tiempo insuficiente para que el RCX haya incrementado siquiera en 1 el TIMER correspondiente.

De hecho si  $\Delta t$  es 10ms la resolución mínima de distancia del sensor sería igual a 1.655m, utilizando la Ecuación 3.4. O visto de otra forma si queremos una resolución de 1cm, los TIMERS del RCX deberían incrementar su cuenta cada 60 $\mu$ s.

De este modo se limitó la funcionalidad del sensor para que indicara solamente la presencia de algún objeto dentro de un rango determinado por el voltaje de referencia presente en las terminales del potenciómetro. Y se buscó que sólo utilizara el PUERTO\_1.

Básicamente se integraron los dos circuitos presentados anteriormente, y en este nuevo diseño se utiliza el primer principio, aquél donde la energía acústica se envía permanentemente y se detecta un cambio brusco en la amplitud de la onda estacionaria mediante el detector de pico y el circuito comparador.

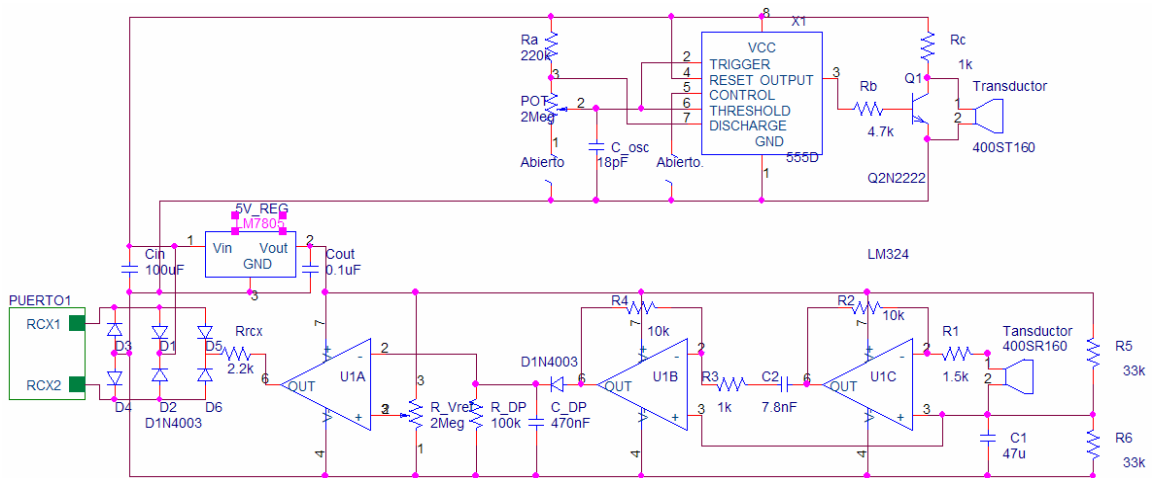


Figura 3.14. Diseño Final: Integración de los dos circuitos.

El regulador L7805 (Apéndice E) se utilizó para conseguir un voltaje de referencia constante, sin importar el estado de las baterías, ya que si las pilas están completamente cargadas el voltaje presente será diferente que si están casi descargadas (de hecho varía entre 9V y 6.5V).

Sin embargo este dispositivo otorga una fuente regulada de 5V sólo cuando el voltaje presente entre las terminales Vin y GND es mayor o igual a 7.5V (ver Figura 3.15). Por lo que considerando el voltaje perdido por el puente de diodos: 1.3V aproximadamente, se deduce que las baterías deben estar casi completamente cargadas para que el funcionamiento del sensor sea el esperado.

Electrical Characteristics (KA7805A)						
(Refer to the test circuits. 0°C < T <sub>J</sub> < +125 °C, I <sub>o</sub> = 1A, V <sub>I</sub> = 10V, C <sub>I</sub> = 0.33µF, C <sub>O</sub> = 0.1µF, unless otherwise specified)						
Parameter	Symbol	Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
Output Voltage	V <sub>O</sub>	T <sub>J</sub> = +25 °C	4.9	5	5.1	V
		I <sub>o</sub> = 5mA to 1A, P <sub>O</sub> ≤ 15W	4.8	5	5.2	

Figura 3.15. Extracto de las especificaciones eléctricas del regulador L7805: Voltaje de Salida (nótese que V<sub>1</sub> se especifica entre 7.5V y 20V).

La Figura 3.16 muestra una fotografía del sensor una vez terminado. (El encapsulado se hizo a partir de un estuche de bolígrafo).



**Figura 3.16.** Fotografía del Sensor Ultrasónico de Proximidad Construido.

Lamentablemente el consumo de las baterías cuando se usa este sensor es muy alto, debido principalmente a la corriente que se utiliza en el transductor transmisor, mientras que en el circuito receptor la corriente es consumida en su mayor parte por el dispositivo LM324. Una alternativa sería utilizar dos puertos (uno para el receptor y otro para el transmisor), con lo que se ampliaría un poco la corriente suministrada al sensor.

Dado que el detector de pico alcanza diferentes voltajes dependiendo de la distancia a la que se encuentra el objeto se propone realizar un control PWM a partir de este voltaje para que se pueda aproximar la medición de la distancia.