

MEDICION LA VELOCIDAD DE LA LUZ.

*Mario A. Agadakis
Reinaldo R. Yañez (ryaayr@HotPOP.com)
Laboratorio 5 - 1er Cuatrimestre 1999
(última revisión 2002-08-19: R. Yañez)*

Este trabajo describe el comportamiento de un oscilador libre optoelectronicamente realimentado, que puede utilizarse para la determinación de la velocidad de la luz en distancias de laboratorio. El bucle de realimentación consiste en un emisor láser de bajo costo y un detector a cierta distancia de este. Los pulsos recibidos son regenerados en el emisor produciéndose así la oscilación del sistema. Mediante la variación de la distancia emisor-detector, se introduce un cambio en la frecuencia a partir del cual se determina la velocidad de la luz. El resultado obtenido fue $c = (2.9 \pm 0.2) 10^8$ m/s para un rango de distancia que varía entre 4 y 11 metros.

INTRODUCCION.

El método propuesto en este trabajo consiste en formar un "lazo" optoelectrónico, formado por un fotoemisor pulsado, un fotoreceptor separado del fotoemisor una distancia d variable (del orden del metro) y un circuito electrónico de realimentación entre la salida del fotoreceptor y la entrada del fotoemisor que incluye una unidad de retardo fija. La entrada del fotoemisor está conectada además a un circuito binario contador de pulsos, formado por un número n grande (>20) de unidades en cascada. Este contador no es parte del bucle de realimentación sino que provee una forma conveniente de conteo de ciclos del oscilador. El sistema se activa con un generador auxiliar de pulso único, que actúa sobre el fotoemisor produciendo un pulso luminoso, que a partir de ese momento comienza a operar cíclicamente. La velocidad de la luz puede calcularse a partir de la variación de esta frecuencia.

Dada la gran magnitud de c , para las distancias manejables dentro del laboratorio, el tiempo de vuelo de un pulso es muy corto y difícil de medir con gran precisión con los instrumentos usualmente disponibles. Por esto se hace necesario medir el efecto acumulativo del tiempo de vuelo de los fotones entre emisor y receptor, durante un intervalo largo de tiempo. El método consiste entonces, en emitir un pulso de luz corto y de rampa muy pronunciada desde el emisor; éste viaja hacia el receptor que al detectarlo envía una señal a un circuito (que llamamos R) que regenera y dispara un nuevo pulso idéntico al anterior en el emisor. Así se renueva el ciclo y el sistema queda oscilando con una frecuencia determinada por el tiempo de vuelo (determinado a su vez por la distancia entre el emisor y el detector) y por la electrónica del sistema, que naturalmente no actúa en forma instantánea, sino que introduce un tiempo que llamamos retardo (T_r).

De esta forma, si se permite que el sistema oscile hasta cumplir N ciclos, habrá transcurrido un tiempo total T dado por:

$$T = N \cdot T_r + N \cdot T_v \quad (1)$$

donde T_r es el tiempo de retardo mencionado y T_v el tiempo de vuelo de cada pulso
El tiempo de vuelo a su vez se puede expresar simplemente por :

$$T_v = D/c \quad (2)$$

donde D es la distancia entre el emisor y el detector.

Entonces, (1) puede expresarse:

$$T = N \cdot Tr + N \cdot D/c \quad (3)$$

o,

$$T/N = 1/c \cdot D + Tr \quad (4)$$

Así, para N fijo, tomando varias distancias y midiendo los tiempos totales para cada una, podemos hallar c de la pendiente de la recta determinada por (4). Para mantener la validez de la ecuación (4), se debe poder afirmar que Tr es una constante. Pero esto no es necesariamente así para las distintas distancias, ni aún para dos mediciones de la misma distancia, ya que Tr varía aleatoriamente. Para garantizar que Tr permanezca dentro de un pequeño intervalo de valores debemos mantener toda la electrónica y la geometría del sistema fija para todas las distancias utilizadas. En principio una variación, por ejemplo, en la longitud del cableado, podría introducir retardos espurios no aleatorios. Este problema se soluciona en principio con la utilización de un espejo retroreflector que devuelve la luz del emisor hacia el detector ubicado junto a éste (fig.1). Esto fija la geometría del sistema electrónico para cualquier distancia utilizada.

Por otra parte, aumentando el numero de ciclos N lo suficiente es posible desembarazarse del problema de la condición aleatoria de Tr para una misma distancia (lo que permite identificar a Tr como un valor medio).

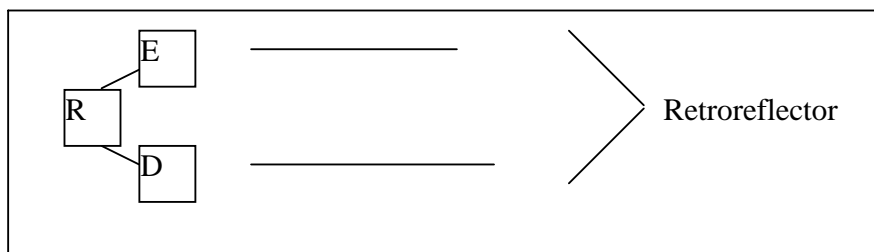


FIGURA 1: *disposición del sistema.*

Las características del sistema, específicamente el rango de distancias utilizado, hacen que la frecuencia de oscilación del sistema sea mayor que la máxima frecuencia a la cual responden satisfactoriamente tanto el emisor como el detector (el límite máximo es de aproximadamente 2 Mhz). Para solucionar este inconveniente bastaría con realizar las mediciones para distancias mayores. En su lugar, y para poder trabajar dentro de las dimensiones permitidas por el laboratorio, se propone modificar el circuito R, cuyo objetivo ahora es no solo reconformar el pulso y dispararlo nuevamente, sino además retrasarlo durante un pequeño intervalo de tiempo Δt . Este Δt se determina de acuerdo a la respuesta en frecuencia de los demás componentes del sistema y a los valores aproximados de los tiempos de vuelo para las distancias utilizadas. Δt debe entonces ser suficientemente alto como para que el emisor-detector funcione correctamente y suficientemente bajo como para no volver a T_v (tiempo de vuelo) despreciable. Este valor va a estar además íntimamente relacionado con el valor final de Tr.

Una forma alternativa de llevar a cabo la medición es fijar el tiempo total T para el cual se miden los ciclos N que cumple el sistema. Un tercer método sería medir el período de oscilación del sistema con un tiempo de integración largo; este representaría la variable dependiente en la recta de la ec.(4).

DESARROLLO.

Se utilizaron para este trabajo los siguientes dispositivos, que fueron testeados independientemente y en conjunto con un generador de funciones a distintas frecuencias.

Detector.

Se utilizó como detector de luz un receptor para link de fibra óptica marca Hewlett Packard, HFBR 2528, que viene provisto con su par emisor, HFBR 1528 (ambos son de tecnología TTL). Este detector responde para frecuencias de hasta 10 Mhz. Para verificarlo se usó en principio el emisor del par, conectado a un generador de funciones y enfrentado al detector, comparando las señales de entrada y salida con un osciloscopio.

Emisor.

Como emisor se usó un puntero láser de aprox. 5 mW de potencia, alimentado por un circuito de rampa de tecnología TTL a través de la cual se ingresa al láser la señal a emitir. La elección de un láser tiene que ver con que permite realizar la medición para distancias mayores que el emisor original del par. Debido a su coherencia, el láser permite que la iluminación que incide sobre el detector no varíe de forma significativa con la distancia y facilita la alineación. A modo de prueba, se moduló el haz de láser con una función cuadrada provista por la salida TTL de un generador de funciones y se lo acopló ópticamente al detector (ya revisado). Se comparó con un osciloscopio la señal de salida del generador con la obtenida por el detector para un amplio rango de frecuencias (hasta 2 Mhz) y se determinó que el par laser-detector opera satisfactoriamente para dos bandas de frecuencia: desde DC (0 Hz) a 40 KHz y entre 0.75 Mhz y 1.8 Mhz. Fuera de estos dos rangos, la intensidad del haz es insuficiente para excitar el receptor.

Circuito R.

La tarea de este circuito (TTL) es tomar el pulso electrónico en su entrada, reconformarlo, retenerlo un intervalo de tiempo Δt y emitirlo nuevamente en su salida. Este circuito posee además, un generador de pulso único, que al ser accionado, genera el primer pulso pone en marcha al sistema (comienza a oscilar). Para probar este circuito inicialmente se conectó el generador de funciones (sync TTL) a sus distintas etapas y se verificó con un osciloscopio que la duración del pulso generado (357 ns) fuera constante e independiente de la frecuencia de la señal de entrada. Luego, se lo realimentó electrónicamente, es decir, conectando entrada y salida del circuito de retardo, y se verificó que oscilara a la frecuencia impuesta (a la cual responden correctamente el láser y el detector). Esta frecuencia, determinada por las condiciones expuestas anteriormente, fue fijada en 1.4 Mhz. Así, realimentándolo luego ópticamente (laser-espejo-detector), se introduce una pequeña variación en la frecuencia debida a los tiempos de vuelo correspondientes a las distintas distancias.

Contador binario.

Este circuito tiene como objetivo contar la cantidad de ciclos ("viajes de la luz" + retardo) que cumple el sistema. Se trata de un contador binario de varias etapas. Cada una de ellas da cuenta de los ciclos como potencias de 2; por ejemplo, cada vez que la cuarta etapa cambia de estado, se habrán contado 16 pulsos. Una vez fijado el número de ciclos N necesarios para mantener las hipótesis mencionadas en la introducción, se hace que cuando el contador llegue a esa cifra, detenga un timer que indica el tiempo T utilizado por el sistema en completarlos. Para probar el

contador se conectó su entrada al generador de funciones, y la salida de las distintas etapas a un frecuencimetro que permitió verificar su buen funcionamiento hasta la vigésimo segunda etapa (conteos hasta 2^{22}) para frecuencias de hasta 10Mhz. Se montó el dispositivo experimental en la forma siguiente.

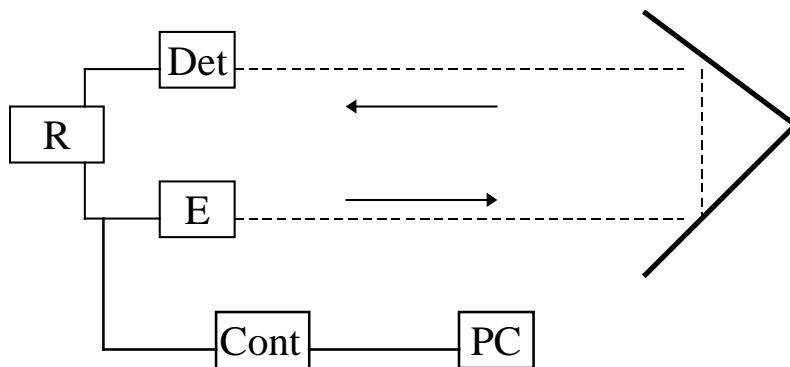


FIGURA 2: *Dispositivo experimental utilizado.*

Se dispuso el bloque emisor-detector paralelamente sobre una superficie, y alineado con este, se montó el retroreflector (espejo plano de primera superficie) a distintas distancias de manera que el láser incidiera sobre el detector. El rango de distancias utilizado varió entre 4 y 11 metros.

Se conectó la entrada del contador a la salida de circuito R y se midió mediante una PC el período de la oscilación en la vigésima etapa de este contador. Todos los bloques del sistema (láser, detector, R, contador) fueron alimentados eléctricamente por una fuente de tensión a 5 Volts. Se determinó la necesidad de utilizar una fuente de alimentación con excelente regulación de ripple, ya que este factor introducía importantes errores de conteo. Aun con una fuente muy estable (del tipo utilizado para alimentar PCs), se debió incluir una etapa de filtrado de alimentación (bypassing). Las mediciones se realizaron de la siguiente forma. Una vez determinada la distancia y alineada la óptica, se procede a hacer oscilar el sistema mediante el pulsador. Luego se inicia el programa de adquisición, tomando muestras regulares de duración fijada por la frecuencia de la salida número 20 del contador. (período de la oscilación)

Se repite este procedimiento para distintas distancias.

RESULTADOS.

Recordemos que la forma del gráfico de 'período de oscilación' versus distancia debería ser una recta, si se lograra incidir siempre con la misma cantidad de luz en el detector (Ecuacion 4).

La forma obtenida para distancias menores a 11 metros es la siguiente :

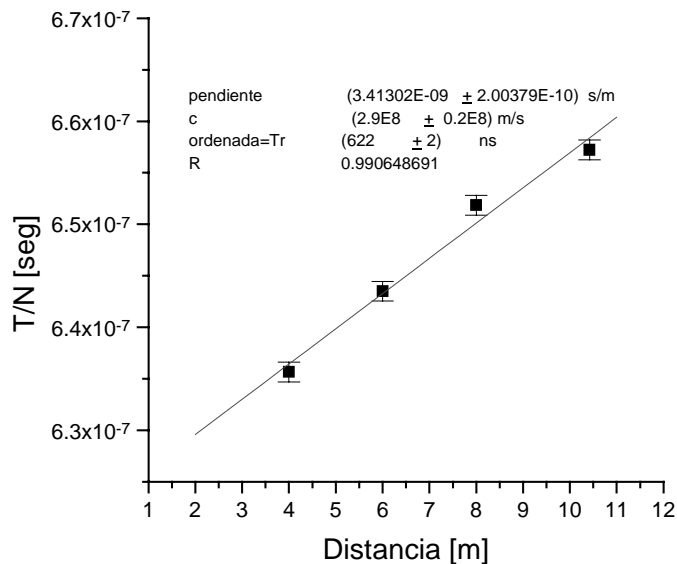


FIGURA 3: Mediciones y regresión lineal.

La velocidad de la luz obtenida es de $c = (2.9 \pm 0.2) \cdot 10^8$ m/s. El valor de la ordenada al origen tiene significado físico y corresponde al retardo introducido por la electrónica. Este es de (622 ± 2) nanosegundos, que corresponde a una frecuencia de oscilación de aproximadamente 1.6 Mhz. El coeficiente de correlación de la regresión lineal es $R=0.991$.

Cabe aclarar que la curva obtenida cuando se consideran distancias mayores (desde 0 a 30 metros) es muy diferente y luce de esta forma:

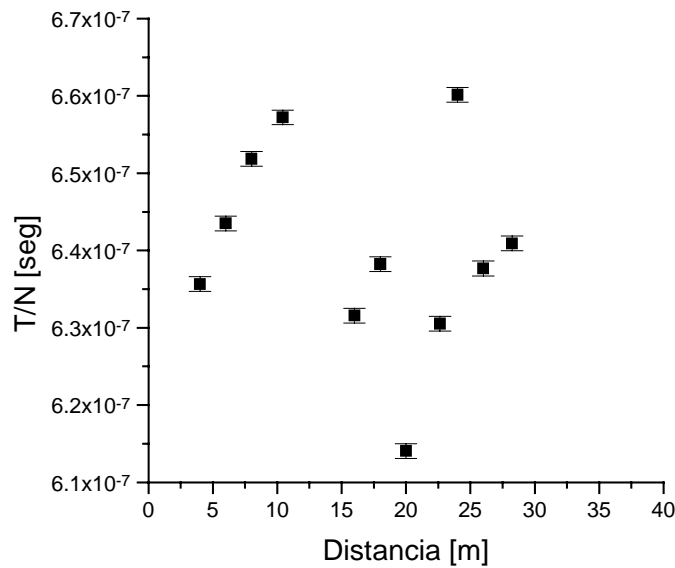


FIGURA 4: Mediciones completas para el rango de distancias comprendido entre 2 y 30 metros

Claramente este gráfico no luce como una recta. Sin embargo, si se tiene en cuenta que la respuesta en frecuencia del receptor varía notablemente con la iluminación, es posible conjeturar que el detector tiene varias 'bandas' de respuesta en frecuencia, excitadas cada una de ellas por un tipo de iluminación particular. Es por ello que se podría interpretar el resultado, como varias series de datos. Cada serie correspondería a un tipo de iluminación dado. Una forma de proceder a partir de esa idea es la siguiente:

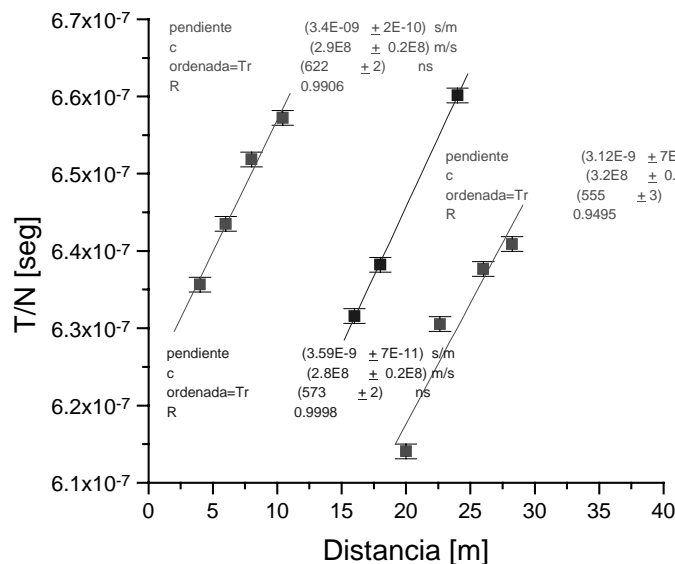


FIGURA 5: Mediciones y regresión lineal para cada 'serie' de datos

Se obtienen tres valores para 'c' que NO son contradictorios.

$$c(0) = (2.9 \pm 0.2) \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

$$c(1) = (2.8 \pm 0.2) \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

$$c(2) = (3.2 \pm 0.8) \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Lo que queda claro, es que el resultado obtenido para distancias menores a 11 metros no requiere interpretación alguna. Surge de este análisis que es necesario agregar una verificación experimental adicional para que el experimento sea completamente satisfactorio en todo el rango de distancias. Este tema crucial se discute como parte de las conclusiones.

CONCLUSIONES.

Este método introduce una ventaja sobre los métodos que involucran electrónica para la medición de 'c' usando un solo tiempo de vuelo. Principalmente se logra la acumulación de N tiempos de vuelo en el tiempo medido. Esto permite realizar la medición con relojes o instrumentación de bajo costo, sin degradar demasiado la precisión respecto de los métodos comunes. Por otro lado, esta característica acumulativa introduce una dificultad. Hay que asegurarse de que no existan variaciones en la frecuencia dependientes de la distancia que no tengan que ver con el tiempo de vuelo, ya que la naturaleza del método los amplifica en forma proporcional al número de cuentas involucrado. La variación de iluminación en el detector es un ejemplo de lo mencionado, por lo que sería necesario asegurar iluminación idéntica para todo el rango de distancias.

Este factor es el que aparentemente introduce un problema cuando se quieren utilizar distancias mayores a los 10 metros. La mejora substancial a introducir en una futura revisión de este experimento, es medir la cantidad de luz que llega al receptor en forma absoluta. Para abreviar, es necesario garantizar que el receptor presenta la misma respuesta en frecuencia cuando se varía la distancia.

Otra mejora importante consistiría en utilizar un rango de distancias cercano a los 200 metros. De esta forma, se hace innecesaria la unidad de retardo fija para el mismo par detector-emisor. Además, el tiempo de vuelo sería el parámetro predominante en la frecuencia de oscilación del sistema.

La velocidad de conteo es un parámetro crucial de la optoelectrónica (respuesta en frec. del par emisor-receptor), lo cual introduce una seria limitación al experimento. La frecuencia de contaje está fijada de antemano (a distancia cero) para poder garantizar el buen funcionamiento del par.

En nuestro caso este valor fue fijado en aproximadamente 1.4 Mhz, lo que equivale a un retardo fijo de 700 ns.

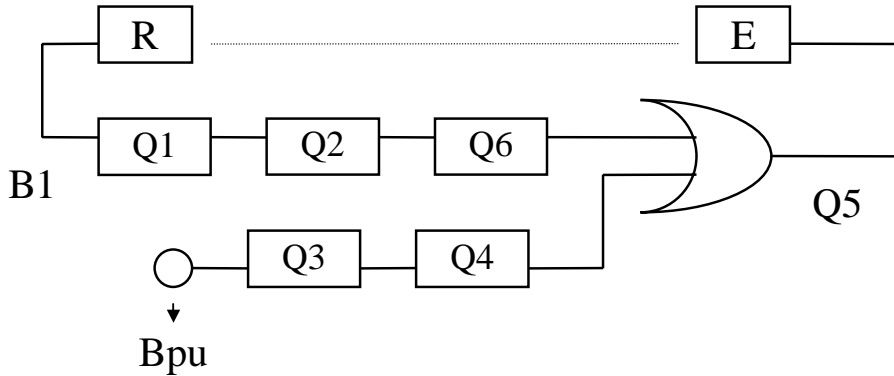
Como puede observarse, el resultado obtenido para $T_r = (622 \pm 2) \text{ ns}$ concuerda razonablemente con el valor anterior dentro de la tolerancia de los componentes electrónicos utilizados. Este retardo es fijado básicamente por una resistencia y un capacitor con tolerancias del 5% y 20% respectivamente.

Con respecto al conteo de pulsos, el sistema utilizado demostró ser altamente confiable con incertezas de 1 en 2^{19} (aprox. 1 en 10^6). Aún con contadores de precisión cercana al 1%, una medición semejante a la presentada es posible.

Por último, cabe destacar que la medición presentada, con una incerteza porcentual de 6%, comprende al valor de 'c' aceptado. La misma fue realizada con una disponibilidad de espacio reducida (6 metros, que en un camino de ida y vuelta suman 12 metros), lo que permitiría reproducir fácilmente el experimento dentro de cualquier laboratorio. El dispositivo actualmente se encuentra montado y funcionando.

APENDICE :

Diagrama de bloques y simulación del circuito de retardo fijo.



Donde : R simboliza al detector, E al emisor laser.

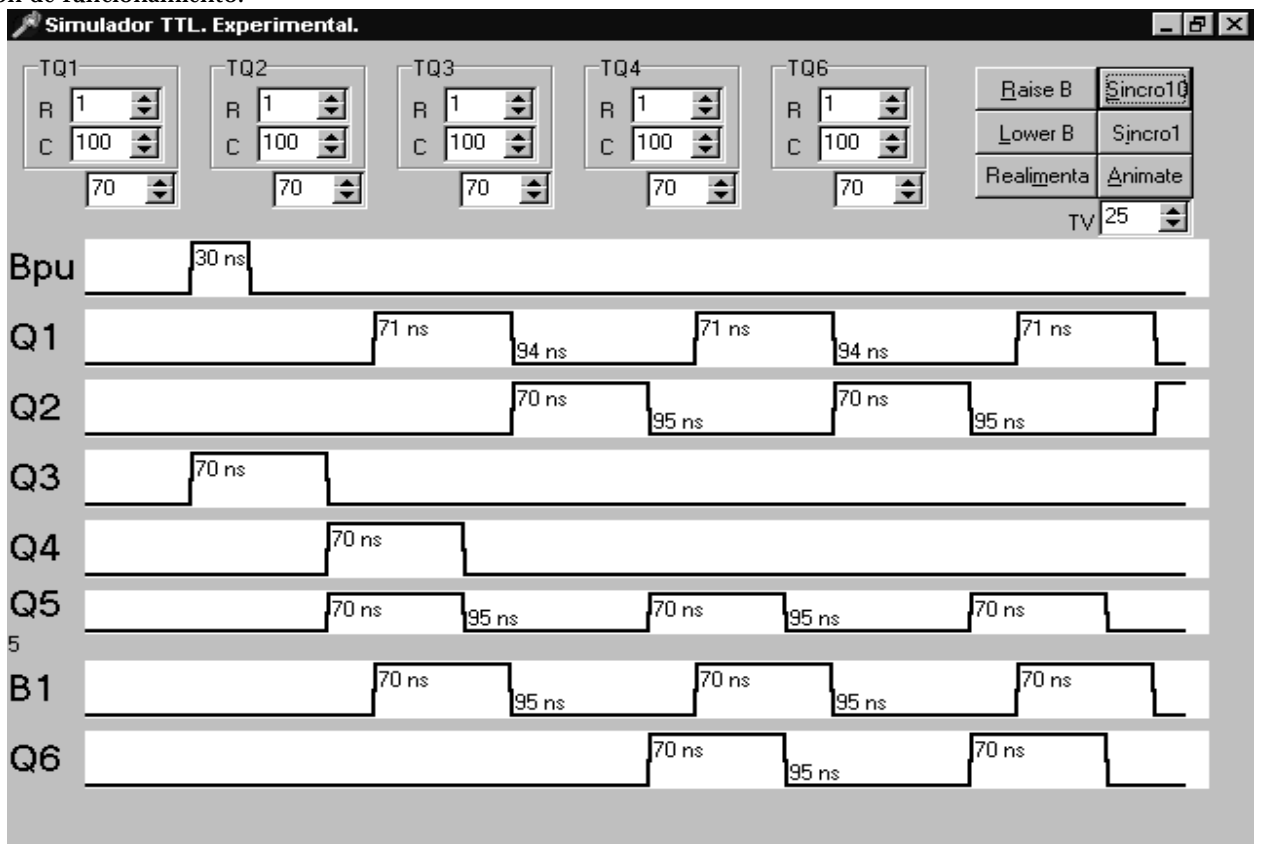
Bpu : es un pulsador común.

Cada uno de los bloques Q simboliza un monoestable de frecuencia fijada externamente por un capacitor y una resistencia. La constante de tiempo se calcula como $TQ_i = \ln(2) \cdot C \cdot R$.

Someramente, la función de los bloques Q3 y Q4 es impedir el debounce del pulsador, mientras que los bloques Q1, Q2 y Q6 proveen la funcionalidad de la unidad de retardo fija.

La oscilación tiene periodo $TQ_1 + TQ_2$ y el pulso tiene duración fijada por TQ_6 , así TQ_6 debe ser menor que la suma mencionada.

Simulación de funcionamiento.



Fotos del dispositivo:

