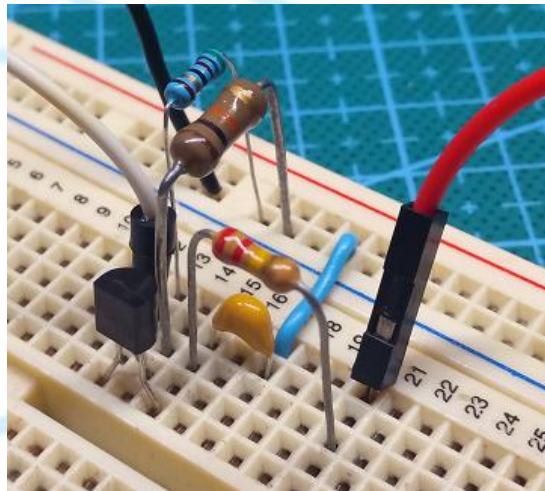


PULSADORES DE AVALANCHA



Erick Barrios Barocio.
Electrónica v.2025

En electrónica, es útil conocer los límites de resolución temporal de osciloscopios u otros aparatos que procesen temporalmente algunas señales. Sin embargo, para esto, se requieren de generadores de señales rápidas que por lo común son costosos y de no fácil acceso. Aquí mostramos como construir un generador de pulsos rápidos, sencillo de implementar y barato, el cual que permite solventar esta problemática de forma temporal.

Contenido

1	CIRCUITO	1
2	FUNCIONAMIENTO	2
3	DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN.....	3
4	FUENTE DE LUZ PULSADA.....	4
4.1	Uso de un diodo láser	4
5	REFERENCIAS.....	5

Comúnmente, en el ámbito de transmisión y medición de señales de alta frecuencia, es necesario conocer las capacidades de muestreo de instrumentos de medición como osciloscopios y analizadores de espectro, así como del retraso y deformación en la propagación de dichas señales en guías de onda (por ejemplo, cables coaxiales). Para llevar a cabo estas pruebas, es necesario utilizar pulsos de duración muy pequeña (del orden de nano-segundos), que permitan observar dichos efectos y limitaciones.

Los transistores de avalancha son transistores especializados que pueden generar pulsos eléctricos cuyos tiempos de subida sean rápidos, lo que posibilita usarlos para construir generadores de pulsos cortos que puedan ser utilizados para los propósitos antes mencionados. Su uso se popularizó después de la publicación de la nota de aplicación de la compañía Linear Technology redactada por Jim Williams ^[1], la cual, en su Apéndice B explica cómo construir un generador de pulsos para medir la respuesta de las puntas de prueba de osciloscopios.

Sin embargo, los transistores como el utilizado por Williams, no son muy accesibles, por lo que sería recomendable utilizar alternativas más económicas y comunes. En este texto se muestra como construir un generador de pulsos utilizando un transistor de unión bipolar (BJT) común.

1 CIRCUITO

El circuito básico de un generador de pulsos de avalancha se fundamenta en dos fenómenos:

- **Rompimiento de Avalancha en un Transistor.** En general, es un fenómeno que puede ocurrir en semiconductores, donde la corriente eléctrica se multiplica enormemente (avalancha). Ocurre cuando los portadores en la región de transición son acelerados por el campo eléctrico a energías suficientes para crear más pares electrón-hueco móviles mediante colisiones con electrones ligados. En un transistor, esto puede generarse aumentando el voltaje del colector, y del colector-emisor (V_{CE}), lo que conduce a una polarización inversa en el terminal del colector-base, llegando al punto en que la barrera de potencial entre la unión base-colector se rompe, lo que produce una corriente del colector al emisor que aumenta rápidamente (Figura 1). No es recomendable hacer que un transistor funcione en esta región ya que la gran corriente generada puede dañarlo.
- **Oscilador de relajación.** Es un circuito oscilador no lineal que produce una señal de salida repetitiva no sinusoidal, por ejemplo una señal triangular, una cuadrada o una pulsada. El circuito consta de un dispositivo de conmutación

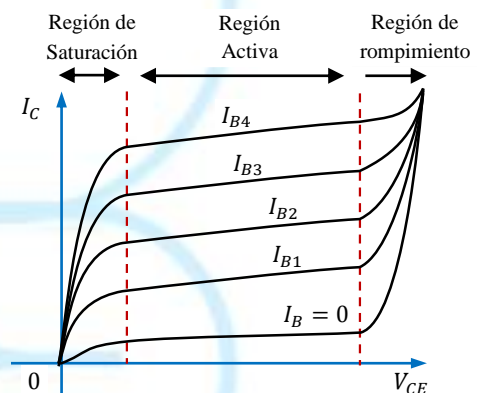


Figura 1. Gráfica I-V de un transistor mostrando su comportamiento en las distintas regiones de operación.

como un transistor que carga repetidamente un capacitor o inductor a través de una resistencia (a modo de oscilador RC) hasta que alcanza un nivel umbral, para luego descargarse. El período del oscilador depende de la constante de tiempo del capacitor y resistencia. El dispositivo cambia abruptamente entre la carga y la descarga, produciendo una señal repetitiva discontinua.

El circuito básico del generador de pulsos de avalancha es bastante simple y consta básicamente de un transistor NPN, un capacitor (C1) y unas resistencias (R1, R2 y R3, Figura 2).

El transistor utilizado originalmente por Jim Williams es el 2N2369 y tiene la ventaja de presentar la avalancha a 90V de alimentación, sin embargo, es bastante difícil de adquirir. Un transistor más común y accesible es el 2N3904, el cual también puede producir avalanchas y pulsos bastante consistentes, pero con la desventaja de que la avalancha se genera a 165V. Debido a esta accesibilidad, en este trabajo optamos por usar el transistor BJT con configuración NPN 2N3904.

2 FUNCIONAMIENTO

El capacitor C1 se carga mediante la resistencia R1 hasta un voltaje alto (el voltaje de rompimiento del transistor, el cual varía de un modelo a otro, pero por lo general siempre son voltajes mayores a 100V). Cuando el voltaje del capacitor alcanza el valor del voltaje de rompimiento del transistor (o voltaje de avalancha), se descarga rápidamente a través del colector-emisor. La corriente de descarga fluye a través de R3 durante la avalancha formando un pulso rápido entre la tierra y el emisor. Esto también produce que el capacitor se descargue abruptamente y el voltaje entre colector y emisor caiga, haciendo que la avalancha ya no se pueda sostener, por lo que se detiene casi inmediatamente después de haberse producido.

Como se puede ver, R1 y C1 definen la constante de tiempo de repetición del oscilador. La selección de sus valores es libre, pero se recomiendan valores de cientos de $K\Omega$ para la resistencia y de decenas de pF para el capacitor. En particular, entre mayor sea el valor de la capacitancia, el tiempo de repetición será mayor (menor frecuencia), y permitirá mayor acumulación de carga, generando pulsos de mayor amplitud (con mayor corriente y energía), lo cual puede ser útil; sin embargo, esto puede tener el peligro de dañar la unión PN del transistor.

La resistencia R3 solamente tiene la función de acoplar la impedancia de la señal de salida con el osciloscopio.

La resistencia R2 polariza la unión Colector-Base y, de acuerdo a la curva característica del transistor, entre mayor sea impide el flujo de corriente por la base (menor I_B), generando pulsos con menor corriente; entre menor sea el valor de R2, la corriente en los pulsos de avalancha es mayor (I_C), sin embargo, produce inestabilidades en el circuito.

Finalmente, el capacitor C2 solamente sirve para filtrar posibles fluctuaciones en el voltaje de alimentación, pero si la fuente de voltaje está filtrada, este capacitor se puede omitir.

Para generar el alto voltaje necesario para la avalancha, se puede utilizar una Fuente de Alto Voltaje DC ^[2] basada en un convertidor elevador de voltaje y un multiplicador Cockcroft-Walton.

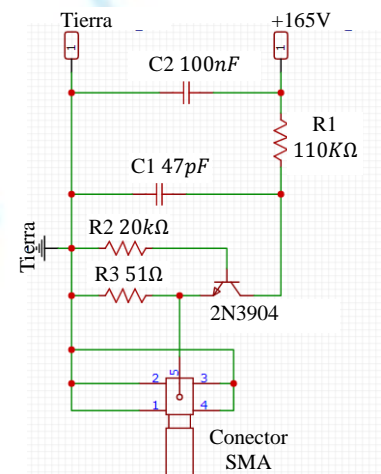


Figura 2. Diagrama de circuito de un pulsador de avalancha basado en el transistor 2N3904.

3 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

El diseño del circuito de la Figura 2 se hace teniendo en mente que algunos elementos conducirán grandes corrientes y además estarán sometidos a grandes voltajes, por lo que es recomendable utilizar elementos que soporten altos voltajes, por ejemplo, en el caso de C1, se sugiere usar elementos que soporten más de 50V, y en el caso de las resistencias, se sugieren utilizar unas que soporten más de 1W de potencia.

De igual forma, al tratarse de señales rápidas, para evitar la deformación del pulso, es recomendable mantener lo más próximos posible a todos los componentes (Figura 3), con el propósito de evitar inductancias grandes que afecten el tiempo de subida del pulso. Para obtener mejores resultados lo más recomendable es implementar el circuito en un PCB, aunque es posible implementarlo en un Protoboard; sin embargo, debido a las inductancias y capacitancias de las láminas de contacto, la señal puede presentar oscilaciones.

En nuestro caso, se utilizaron valores para los componentes de: $R1 = 110k\Omega$; $R2 = 20k\Omega$; $R3 = 51\Omega$ y $C1 = 47pF$. Estos son los mejores valores que se encontraron después de realizar varias pruebas de estabilidad de la señal con distintos valores de componentes.

En la Figura 4, se muestra el pulso generado por el circuito, observado en un osciloscopio con ancho de banda de 200MHz. El tiempo de subida del pulso es de 4ns, lo que se traduce en un ancho de banda de $BW = 0.35/\Delta t = 87MHz$ (siempre y cuando la impedancia de entrada del osciloscopio sea de 50Ω). Esto quiere decir, que cualquier osciloscopio con menos de 75MHz de banda no podrá medir de forma adecuada el pulso.

Por otro lado, debido a que la impedancia no se acopló apropiadamente y a que se utilizó un protoboard para implementar el circuito, el pulso presenta oscilaciones en su caída (Figura 4b).

En cuanto al ancho del pulso se tuvo que fue de 5ns a medio máximo positivo, con una frecuencia de repetición promedio de 33kHz. Sin embargo, debido a que el transistor no está diseñado para operar en esta forma (avalancha), presenta fluctuaciones considerables en esta frecuencia de repetición (Figura 4c).

Otra característica es que el pulso tiene un voltaje pico de aproximadamente 100V, lo que nos dice que en la resistencia de 51Ω , fluye una corriente de aproximadamente 2A, por lo que el pulso tiene una energía considerable.

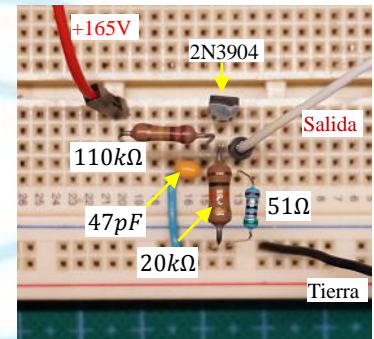


Figura 3. Implementación del circuito en un Protoboard.



Figura 4. a) Pulso de salida. El ancho del pulso a media amplitud es de aproximadamente 5ns. b) El pulso visto en una escala de 50ns por división, donde presenta oscilaciones en su caída debido a las inductancias y capacitancias parasitas. c) Pulso visto desde una escala de $10\mu s$, donde se puede apreciar la inestabilidad en la frecuencia de repetición (pulsos borrosos y no definidos).

4 FUENTE DE LUZ PULSADA

Utilizando este circuito pulsador, es posible alimentar un LED de forma que se comporte como estroboscopio. La particularidad es que los pulsos de luz serán muy cortos, pero con una relativa gran irradiancia, ya que son producidos por una gran corriente. El LED puede sobrevivir a tal corriente ya que el corto tiempo de duración no permite que el semiconductor se queme.

En nuestro caso, se implementó simplemente agregando un LED en paralelo a la resistencia de acoplamiento de impedancia de 51Ω a la salida del pulsador (Figura 5). Después de hacer varias pruebas, se encontró que, entre mayor sea esta resistencia de acoplamiento, el voltaje producido a través de ella (y en consecuencia el voltaje medido en el osciloscopio) es mayor (la resistencia consume mayor parte de la corriente generada por la avalancha); sin embargo, esto puede reducir la irradiancia del LED. Debido a esto, se decidió mantenerla en 51Ω para evitar dañar el LED. Aun así, se observó que el ancho del pulso de luz no cambia considerablemente (sigue manteniendo un ancho aproximado de 5ns a medio máximo); sin embargo, entre mayor sea la resistencia las oscilaciones en la caída de la señal se incrementan (Figura 6).

La frecuencia de parpadeo del LED dependerá del valor de la constante RC del circuito oscilador, y cómo podemos observar en la Figura 6c, se siguió manteniendo en aproximadamente 33kHz .

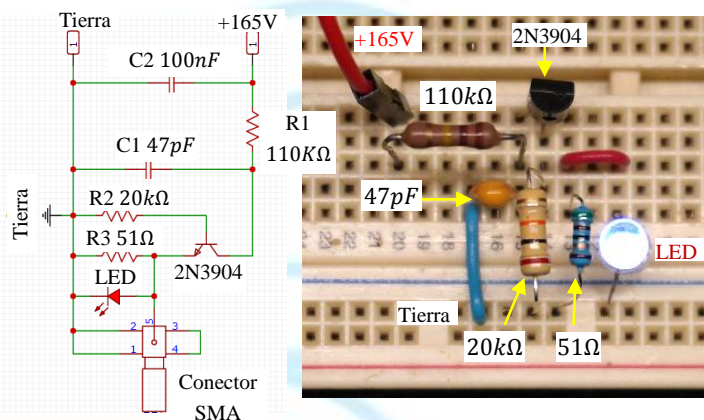


Figura 5. Diseño e implementación en protoboard de un LED pulsado.

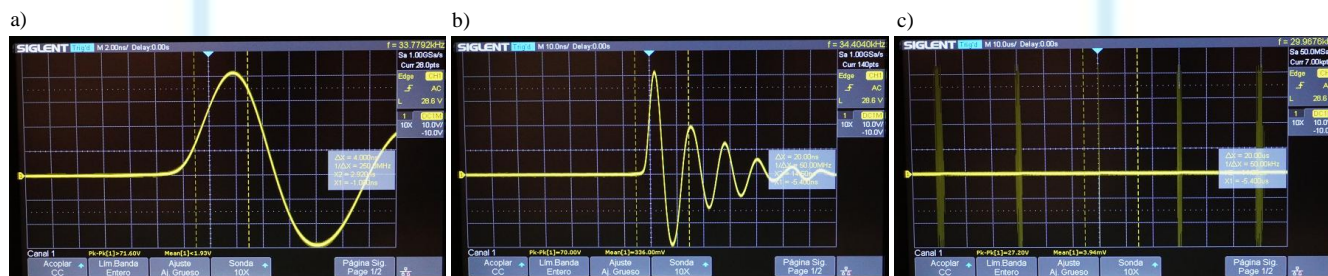


Figura 6. Capturas de la señal que alimenta al LED en el osciloscopio. a) El tiempo de subida sigue siendo de 4ns y el ancho del pulso a medio máximo 5ns . b) La oscilación en la caída de la señal se incrementó debido a la resistencia extra que presenta el LED; además, debido a que el LED consume parte del voltaje que tenía la resistencia de 51Ω , la amplitud del pulso se ha reducido. c) La frecuencia de repetición se mantuvo sin cambios.

4.1 USO DE UN DIODO LÁSER

En caso de requerir una irradiancia mayor y más concentrada, se puede utilizar un diodo láser comercial (Figura 7a). Una característica de estos diodos láser es que tienen integrada una resistencia de seguridad para evitar corrientes altas que quemen el diodo. En nuestra situación aunque la avalancha de corriente (o el voltaje al que estará sometido el láser) sea mucho mayor que lo estipulado para su uso, el tiempo de

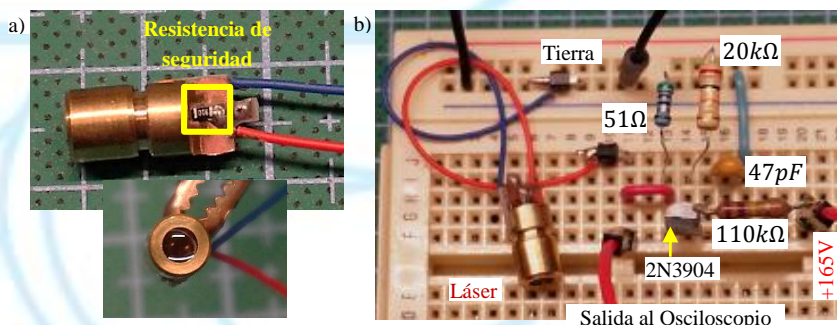


Figura 7. a) Diodo láser comercial (laser de apuntador) utilizado en el pulsador. b) Circuito para el láser pulsado.

duración de la misma es tan corto que no es suficiente para dañar el láser, por lo que es relativamente seguro utilizarlo, aunque acortando su tiempo de vida.

El circuito sigue siendo el mismo (Figura 7b), solo que, debido a la resistencia de seguridad del láser (típicamente de 91Ω), la corriente que fluye hacia el diodo es menor que la que fluía al LED y, esta resistencia junto con la resistencia R3, pueden generar un cambio de impedancia que provoque que el pulso presente mayores oscilaciones posteriores. A pesar de esto, el funcionamiento del láser como fuente pulsada no se ve afectado.

Para reducir estos detalles, se deben probar varios valores de R3 hasta encontrar uno que genere la menor amplitud en las oscilaciones y a la vez genere una irradiancia suficiente en la salida del láser.

En la Figura 8 se observa la forma del pulso óptico (señal morada) producido por el láser, medido con un fotodiodo de alta velocidad y sensibilidad. Como se puede apreciar, el pulso óptico principal sigue manteniendo un ancho de 5ns. Lo cual permitiría utilizar este láser pulsado para realizar experimentos que involucren la medición temporal del pulso (retraso o deformación).



Figura 8. Señales observadas en el osciloscopio: Amarilla, señal eléctrica directa de la salida del transistor (la que alimenta al láser); Morada, señal óptica emitida por el láser (recibida con un fotodiodo de alta velocidad). Escala de tiempo, 5ns por división.

El retraso de la señal eléctrica (amarilla) respecto de la señal recibida se debe principalmente al mal acoplamiento de impedancia del diodo láser y a la capacitancia del fotodiodo receptor; de igual forma aunque en menor medida, la distancia de separación entre el láser y el receptor (20cm en nuestra prueba) introduce un ligero retraso en la señal.

5 REFERENCIAS.

- [1] J. Williams. *Application Note 72 – A Seven-Nanosecond Comparator for Single Supply Operation*, Linear Technology, Mayo 1998.
- [2] E. Barrios, R. Ramírez. *Fuente de Alto Voltaje DC Ajustable*. Tsikbal Naat. 2024.
<https://tsikbal.github.io/Páginas/Áreas/Electronica/Electronica/FuenteHV.html>