

CONVERTIDOR ELEVADOR DE VOLTAJE



Erick Barrios Barocio.
Electrónica (2024)

Muchos dispositivos electrónicos cotidianos requieren de voltajes grandes, los cuales no son fáciles de alcanzar u obtener con baterías comunes; por ejemplo, algún dispositivo que opere a 30V requeriría de 20 baterías AA, lo cual sería complejo de manipular. Una posible solución a este problema, cuando mantener la corriente no es crucial, es utilizar convertidores DC-DC. Estos dispositivos pueden alcanzar voltajes altos sacrificando corriente y manteniendo un tamaño, peso y costo bajos. Se pueden encontrar comúnmente en cámaras fotográficas, sistemas de iluminación, sistemas de encendido de autos o fuentes de voltaje basadas en baterías.

Contenido

1	COMPONENTES.....	1
1.1	Capacitor.....	1
1.2	Diodo.....	2
1.3	Inductores.....	2
2	FUNCIONAMIENTO DE UN CEV	3
2.1	Consideraciones para MCC.....	6
2.2	Ejemplo de diseño.....	7
3	CEV COMO FUENTE PULSADA.....	7
4	REFERENCIAS	8

El Convertidor Elevador de Voltaje (CEV) es un convertidor de potencia DC-DC que eleva el voltaje a cambio de reducir la corriente, conservando la potencia.

$$P = I V \quad (1)$$

Un CEV es un tipo de fuente conmutada (Figura 1) que contiene un diodo, un interruptor y dos elementos para almacenar energía (un inductor y un capacitor). La energía que consume el convertidor proviene de una fuente de DC externa.

Las principales aplicaciones de estos convertidores se presentan en sistemas de baterías que necesitan proporcionar altos voltajes, pero manteniendo un tamaño reducido, como calculadoras, celdas solares y motores eléctricos. Por ejemplo, obtener 60V (con baja corriente) a partir de pilas de 1.5V, requeriría de 40 pilas; sin embargo, utilizando un CEV, es posible utilizar solo 5 pilas.

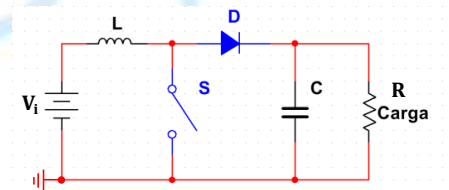


Figura 1. Diagrama de circuito de un CEV. El interruptor S se abre y cierra cíclicamente. L : Inductor; C : Capacitor; R : Resistencia de carga; V_i : Voltaje alimentación.

1 COMPONENTES

Para entender cómo opera un CEV necesitamos una idea básica del funcionamiento de sus componentes.

1.1 CAPACITOR

Es un elemento eléctrico el cual puede almacenar energía y servir como fuente de voltaje durante su descarga ^[1]. Cuando un capacitor es conectado a una fuente de voltaje, éste adquiere la polaridad de la fuente y se carga con esa polaridad (Figura 2a). Si posteriormente la fuente se remueve y se sustituye por una carga resistiva, el capacitor actuará como fuente de voltaje y se comenzará a descargar hasta llegar a un voltaje de 0V (Figura 2b) de acuerdo a la ecuación

$$V_R(t) = V_0 e^{-\frac{t}{RC}}$$

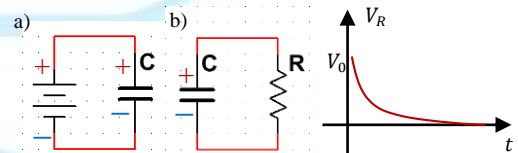


Figura 2. a) Carga de un capacitor con una fuente DC, adquiriendo la misma polaridad que la fuente. b) Descarga del capacitor a través de una resistencia la cual experimenta un voltaje que decrece en el tiempo (recuadro).

Dado que un capacitor cargado se puede ver como una fuente de voltaje temporal, cuando se encuentra en serie con otro capacitor o con una fuente de voltaje DC, sería equivalente a tener dos fuentes de voltaje en serie, por lo que se sumarían (o restarían, dependiendo de la polaridad) sus voltajes.

1.2 DIODO

Es un semiconductor cuya principal propiedad es que permite el flujo de corriente en una sola dirección (Figura 3). Alternativamente se puede ver como un dispositivo que presenta una resistencia muy pequeña en una dirección y una resistencia muy alta en la otra ^[1].

En la práctica, los diodos presentan una caída de voltaje cuando los atraviesa una corriente la cual es típicamente de 0.7V en diodos de silicio y 0.3V en diodos de germanio.



Figura 3. El diodo es un elemento semiconductor que solo permite el flujo de la corriente en la dirección de la flecha (en su representación pictórica) o de la banda (en su marcación física).

1.3 INDUCTORES

Cuando una corriente (I) fluye por un conductor, genera un flujo de campo magnético (ϕ_B) alrededor de él. La magnitud de este flujo magnético depende de la geometría del conductor y del material del mismo, lo cual es tomado en cuenta mediante la inductancia (L).

Así, un inductor es un componente capaz de almacenar energía generando un campo magnético cuando una corriente eléctrica fluye a través de él. Por lo general, suele consistir en un cable aislado y enrollado de forma cilíndrica alrededor de algún material ferromagnético, lo cual permite almacenar de mejor forma la energía (Figura 4).

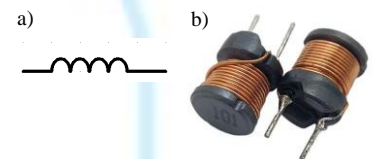


Figura 4. a) Símbolo de un inductor. b) Inductor típico que consta de un alambre enrollado de forma cilíndrica alrededor de un núcleo metálico.

Cuando la corriente que circula por el inductor cambia en el tiempo, el campo magnético también variará e inducirá una fuerza electromotriz (voltaje) en los extremos del inductor. De acuerdo a la *Ley de Inducción de Faraday* ^[2] el voltaje en el inductor está relacionado con la inductancia y el cambio de la corriente mediante la relación

$$V_L = -L \frac{dI}{dt} \quad (2)$$

El signo negativo es consecuencia de la *Ley de Lenz*, ya que el voltaje inducido debe tener una polaridad tal que genere una corriente que se oponga al cambio de corriente que la ha creado. Es decir, los inductores se oponen a cualquier cambio en la corriente que los atraviesa, implicando que bajo una corriente cambiante pueden funcionar como fuente de voltaje cuya polaridad depende de si la corriente crece o decrece.

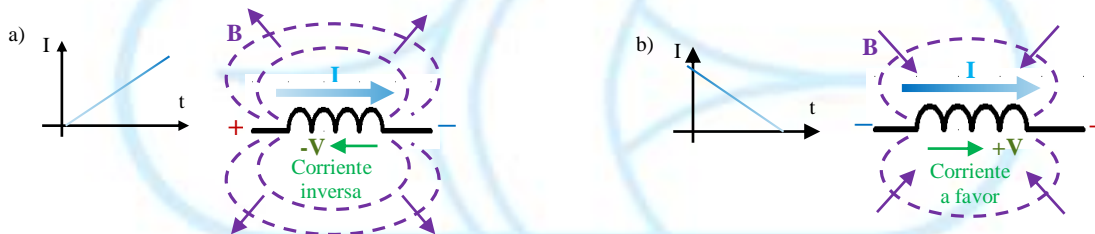


Figura 5. a) Comportamiento de un inductor cuando la corriente que lo cruza crece, el inductor presenta un voltaje tal que genera una corriente inversa a la que lo cruza. b) Cuando la corriente que lo cruz disminuye, el inductor presenta un voltaje que genera una corriente a favor evitado su disminución.

- I. Cuando por un inductor fluye una corriente cuya magnitud crece en el tiempo (Figura 5a), su derivada es positiva ($\frac{dI}{dt} > 0$). De la ecuación (2), el voltaje generado será negativo; lo que podemos interpretar como una caída de voltaje cuando la corriente cruza el inductor de izquierda a derecha, por lo que la polaridad positiva del inductor se encontrará a la izquierda y la negativa a la derecha. Así, el inductor genera una corriente contraria, la cual intenta contrarrestar el incremento de la que cruza por él, es decir, evita el incremento de la corriente transfiriendo parte de la energía (reduciendo la corriente) hacia el campo magnético generado, de ahí que se diga que los inductores almacenan energía expandiendo el campo magnético que los rodea.
- II. Cuando fluye una corriente cuya magnitud decrece en el tiempo (Figura 5b), su derivada es negativa ($\frac{dI}{dt} < 0$), y de la ecuación (2), el voltaje generado será positivo; interpretado como una subida de voltaje cuando la corriente cruza el inductor de izquierda a derecha, es decir, la polaridad positiva del inductor se encuentra a la derecha y la negativa a la izquierda. El inductor genera una corriente a favor, la cual intenta contrarrestar la disminución de la corriente que cruza por él. Esta corriente es producida a partir del consumo de energía del campo magnético, generando una corriente a partir de colapsar el campo magnético que lo rodea.

Algo importante a notar en la ecuación (2) es que entre más rápido sea el cambio en la corriente, mayor será el voltaje generado.

2 FUNCIONAMIENTO DE UN CEV

El CEV opera bajo el hecho de que un inductor se resiste al cambio de corriente.

De la Figura 1, existen dos estados, cuando el interruptor S se encuentra cerrado y cuando se encuentra abierto, por lo que es necesario estudiar lo que ocurre durante estos estados [3, 4].

Para comenzar, consideraremos que el interruptor se cierra y abre en un tiempo T (Figura 6). De este periodo, una fracción de tiempo el interruptor está cerrado (D , denominado ciclo de trabajo) y el resto está abierto, por lo que D toma valores desde 0 (implicando que siempre está abierto) hasta 1 (siempre cerrado).

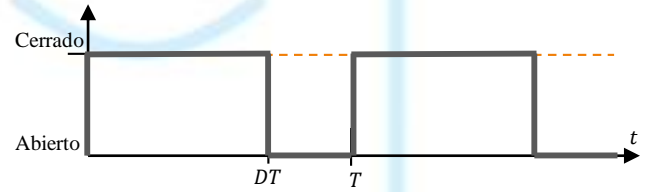


Figura 6. Ciclo de trabajo del interruptor.

- I. Cuando el interruptor está cerrado (Figura 7a), la corriente fluye a través del inductor y por el interruptor ya que presenta un camino con menor resistencia que el capacitor y la resistencia de carga. En consecuencia, se puede considerar que la corriente prácticamente no fluye a través del diodo, por lo que el capacitor y la carga se pueden desacoplar del resto del circuito, es decir, se tienen dos circuitos separados (lazo A y lazo C, Figura 7b). Dado que el inductor es un alambre, se tiene un corto circuito (ambos polos de la batería están conectados), lo que genera un cambio en el flujo de corriente muy grande y positivo ($\frac{dI_A}{dt} > 0$), haciendo que el inductor almacene una gran cantidad de energía en su campo magnético y presente una caída de voltaje. En esta situación, la polaridad del inductor es positiva a la izquierda y negativa a la derecha ya que intenta impedir el cambio creciente de corriente. Al estar conectado directamente a la fuente, y de la ley de voltajes de Kirchhoff aplicada al lazo A ($\sum V_n = 0$), se encuentra que $V_i + V_L = 0$ (Figura 7d). Utilizando la ecuación (2), se puede construir la ecuación diferencial que describe la corriente en este lazo, que es lo mismo que buscar la corriente en la bobina:

$$\Rightarrow L \frac{dI_A}{dt} = V_i \Rightarrow \frac{dI_A}{dt} = \frac{V_i}{L}$$

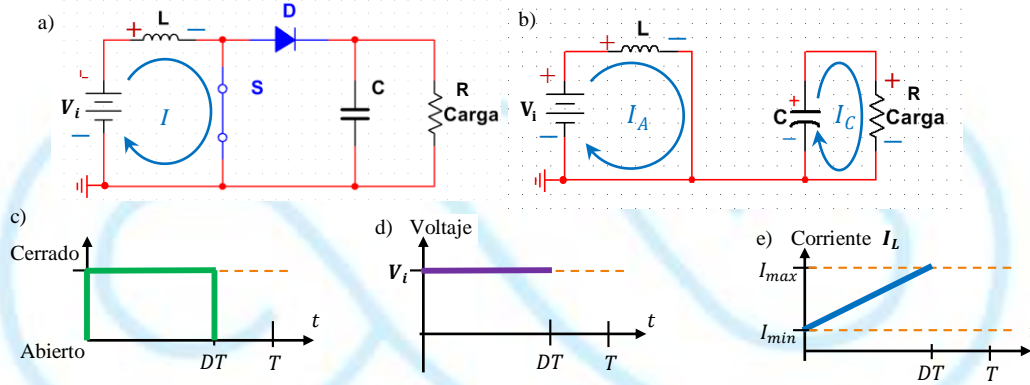


Figura 7. a) Diagrama de circuito y flujo de corriente de un CEV cuando el interruptor se encuentra en estado cerrado. b) Circuito equivalente. c) Gráfica del estado del interruptor. d) Voltaje en el inductor. e) Corriente en el inductor.

Así, la corriente crece de forma lineal con el tiempo a través del inductor, es decir, “carga de energía al inductor” (Figura 7e). Al final del tiempo de interruptor cerrado se encuentra que el cambio de corriente está dado por:

$$\Delta I_A = \frac{V_i}{L} \int_0^{DT} dt = \frac{V_i}{L} DT \quad (3)$$

De igual forma, aplicando la ley de voltajes de Kirchhoff al lazo C durante este tiempo, se encuentra la relación: $V_C = -V_R$, donde el capacitor actúa como fuente de voltaje de la carga, con V_R el voltaje que recibe la carga.

- II. Cuando el interruptor está abierto, la única trayectoria que puede seguir la corriente en el circuito es a través de la carga y capacitor, es decir, por el lazo B que contiene a la fuente, el inductor, el diodo y el capacitor (Figura 8a). Debido a esto, encuentra mayor resistencia produciendo que dicha corriente sea menor que en el caso del interruptor cerrado. En esta situación, el inductor reaccionará a la disminución de corriente ($\frac{dI_B}{dt} < 0$) liberando la energía contenida en su campo magnético, es decir, producirá una corriente hacia la carga (aun así la corriente decrece), lo que implica que la polaridad del inductor será positiva a la derecha y negativa a la izquierda. De la ley de voltajes de Kirchhoff, el voltaje del inductor está en serie con el de la batería, por lo que (Figura 8b)

$$0 = V_i + V_L + V_C \Rightarrow \frac{dI_B}{dt} = \frac{V_i - V_R}{L}$$

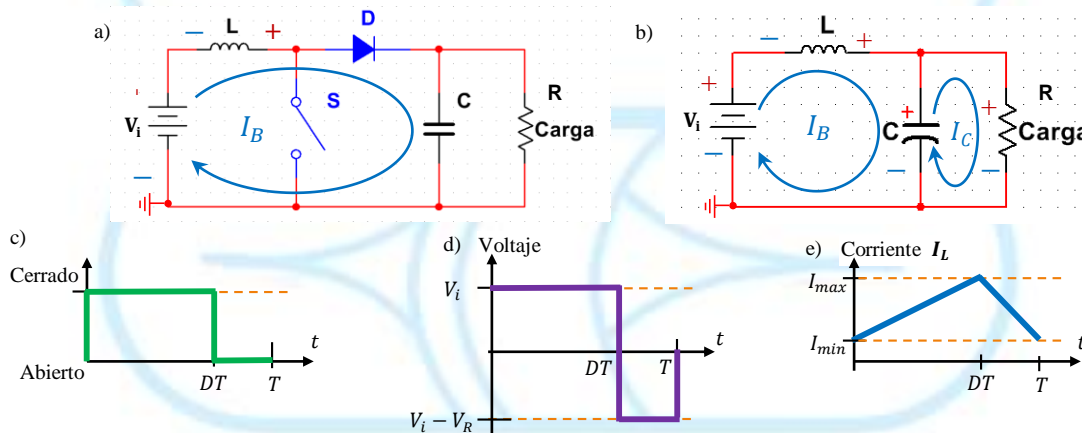


Figura 8. a) Diagrama de circuito y flujo de corriente de un CEV cuando el interruptor se encuentra en estado abierto. b) Circuito equivalente. c) Gráfica del estado del interruptor. d) Voltaje en el inductor. e) Corriente en el inductor.

Donde se utilizó la ecuación (2) y el hecho de que, en el lazo C, se tiene que $V_C = -V_R$. En esta situación, los voltajes de la batería y el inductor cargarán el capacitor. Hay que señalar que, la cantidad $V_i - V_R$ es negativa ya que el propósito de este sistema es elevar el voltaje (Figura 8d), lo cual será demostrado más adelante.

De la ecuación diferencial se encuentra que

$$dI_B = \frac{V_i - V_R}{L} dt \Rightarrow \Delta I_B = \frac{V_i - V_R}{L} \int_{DT}^T dt = \frac{V_i - V_R}{L} (1 - D)T \quad (4)$$

Donde hay que notar que se integra durante el tiempo en que el interruptor está abierto (Figura 8e).

- III. Finalmente, si el interruptor se abre y cierra a una frecuencia alta, de forma que no dé tiempo a que el inductor descargue toda su energía, la carga siempre observará un voltaje promedio mayor que el de la batería. Durante el estado en el que el interruptor está abierto, el capacitor se cargará al voltaje producido por la batería más el inductor (Figura 9a); pero cuando se cierra, dado que el capacitor y carga se desacoplan del resto del circuito, el capacitor será el que proporcione voltaje a la carga de forma temporal, éste será un voltaje mayor que el de la batería, debido a que se cargó hasta el voltaje suma del inductor más la batería. En esta situación hay que recordar que la función del diodo es evitar que el capacitor se descargue a través del interruptor cuando éste está cerrado (Figura 9b). Otro punto a señalar es que entre más rápido cambie de estado el interruptor, el cambio en la corriente será mayor por lo que el inductor producirá un mayor voltaje y cargará el capacitor a un mayor voltaje. Este incremento en la carga del capacitor se dará hasta alcanzar un *estado de equilibrio*, donde la tasa de transferencia de energía del inductor al capacitor durante el estado abierto será la misma que la tasa de transferencia de energía del capacitor a la carga durante el estado cerrado (Figura 9d y e). Esto implica que la energía y la corriente en el circuito deben de ser iguales al inicio y al final de cada periodo de conmutación del interruptor. Esto implica que la suma de los cambios de corriente debe sumar cero:

$$\Delta I_A + \Delta I_B = 0 = \frac{V_i}{L} DT + \frac{V_i - V_R}{L} (1 - D)T$$

Con lo que finalmente se encuentra que:

$$\frac{V_R}{V_i} = \frac{1}{1 - D} \quad (5)$$

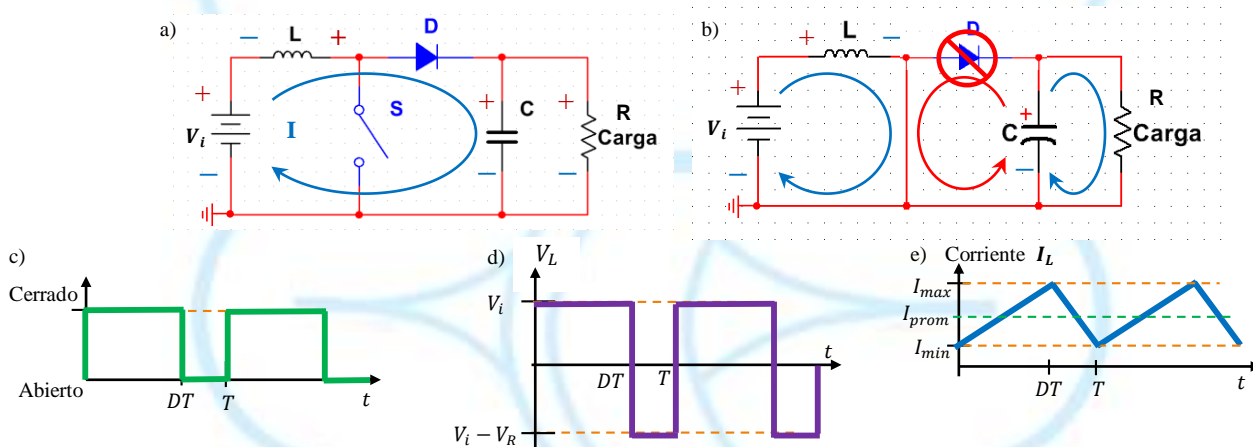


Figura 9. a) Etapa de carga del capacitor, donde el diodo permite el flujo de corriente. b) Etapa en la que el capacitor opera como fuente de voltaje temporal. c) Gráfica del estado del interruptor. d) Voltaje en el inductor. e) Corriente en el inductor.

Así, se puede concluir que el voltaje en la resistencia de carga (salida) es mayor que el voltaje de entrada ya que el valor del ciclo de trabajo D siempre está entre 0 y 1, y se incrementa conforme D se acerca a 1. En la práctica, si el ciclo de trabajo se acerca a un valor de 1, la amplificación de voltaje debería divergir, implicando que el interruptor estará cerrado todo el ciclo; sin embargo, mantener una situación como esta es ilógico ya que no permitiría que el capacitor se cargue, además de que quemaría el inductor. En la práctica lo más conveniente es tener valores de D de entre 60% y 85%.

De lo anterior se observa que la parte fundamental del CEV es el inductor y el interruptor, el capacitor simplemente funciona como almacén de “voltaje” temporal y filtro pasa-bajo del voltaje cambiante del inductor.

Algo importante a notar en el comportamiento de este circuito es que la corriente oscilará entre un valor máximo y uno mínimo. En particular, la corriente mínima se puede modificar dependiendo de los valores de inductancia L y ciclo de trabajo D , y la cual se puede hacer $I_{min} = 0$. Esta libertad sobre el valor de la corriente mínima, da lugar a tres modos de operación del circuito (Figura 10). El más recomendado es el *Modo de Conducción Continua* (MCC), donde la corriente mínima es mayor a cero y siempre hay corriente en la bobina; el segundo es el *Modo de Conducción Límite* (MCL), en el cual la corriente mínima alcanza a ser cero en un instante; y el último es el *Modo de Conducción Discontinua* (MCD), en el cual la corriente es interrumpida (mantiene un valor de cero) durante un tiempo dentro del periodo del interruptor.

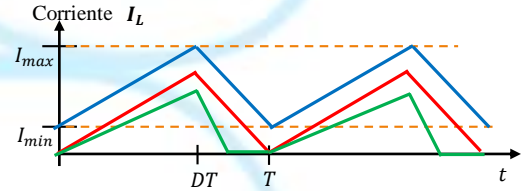


Figura 10. Casos de comportamiento que producen los casos de corriente mínima. *Modo de Conducción Continua*; *Modo de Conducción Límite*; *Modo de Conducción Discontinua*.

En particular los modos MCL y MCD, implican que la bobina se queda sin energía por un momento, lo cual produce que el voltaje de salida también pueda llegar a perder continuidad o que fluctúe considerablemente, debido a esto no son recomendados. Sin embargo, el modo MCC, se puede diseñar de forma que la fluctuación de corriente sea mínima y que el voltaje de salida sea prácticamente constante.

2.1 CONSIDERACIONES PARA MCC

De la ecuación (3) se puede encontrar la relación:

$$I_{max} - I_{min} = \frac{V_i}{L} DT$$

De donde:

$$L = \frac{V_i DT}{I_{max} - I_{min}} \quad (6)$$

El caso en que $I_{min} = 0$ (MCL) da lugar a la *inductancia crítica* (L_{crit}). Si se utiliza una $L > L_{crit}$, se estará en el MCC pero si se toma una $L < L_{crit}$, se estará en el MCD.

En cuanto al valor del capacitor, hay que observar lo que ocurre con su voltaje durante el ciclo del interruptor (Figura 11). Mientras el interruptor este cerrado, el capacitor será el que proporcione el voltaje a la carga, y mientras transcurre el tiempo, dicho voltaje disminuirá de la forma

$$V_{Rmin} = V_{Rmax} e^{-\frac{DT}{RC}}$$

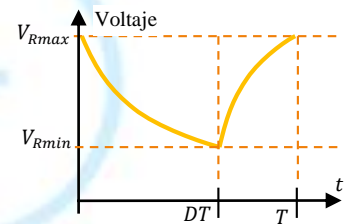


Figura 11. Voltaje en el capacitor medido en la carga conforme transcurre el tiempo.

De esta ecuación se puede observar que si el ciclo cambia lo suficientemente rápido, el capacitor no tendrá tiempo de descargarse considerablemente, por lo que la fluctuación de voltaje en la carga se reducirá; además, si el factor de tiempo de descarga RC es mayor que el producto DT , la descarga será lenta, contribuyendo a que $V_{Rmin} \rightarrow V_{Rmax}$.

Así, las ecuaciones (5) y (6) son las mínimas necesarias para diseñar un CEV en MCC. En la práctica este análisis es una aproximación a primer orden del sistema, por lo que puede haber desviaciones considerables de las predicciones, ya que no toma en cuenta otros factores como impedancias y resonancias.

2.2 EJEMPLO DE DISEÑO

Para saber cómo se utilizan las ecuaciones anteriores, tomemos la siguiente situación: Queremos implementar un CEV que eleve un voltaje de $V_i = 1V$ a uno de $V_R = 5V$ a $I_R = 24mA$, y donde el voltaje de salida sea constante dentro de un error del 3%. Para comenzar, dado que la potencia debe conservarse,

$$P_i = V_i I_i = V_R I_R = P_R \rightarrow I_i = 120mA$$

Esto quiere decir que nuestra fuente de alimentación debe ser capaz de proporcionar $120mA$. Si esta corriente de entrada presenta una fluctuación del 6%, implicará que $I_{max} - I_{min} = 7.2mA$. Por otro lado, de la ecuación (5), se encuentra que:

$$\frac{V_R}{V_i} = 5 \Rightarrow D = 0.8$$

Como se mencionó anteriormente, para evitar que el voltaje de salida fluctúe, lo más recomendable es hacer que el ciclo de trabajo del interruptor sea rápido. Esto se puede realizar utilizando un transistor en lugar de un interruptor mecánico (Figura 12). Cuando la Base de un transistor (que pueda soportar corrientes altas) se conecta a una fuente de voltaje cuadrada, éste funcionará como interruptor entre el Colector y el Emisor. Para controlar el cambio rápido de estado de la Base, se puede utilizar un temporizador 555 en modo astable conectándolo a la base del transistor con una resistencia que limite la corriente [5]. Con esto en mente, se diseña un oscilador astable 555, que genere una señal cuadrada con ciclo de trabajo del 80%. Por ejemplo, con un tiempo cerrado de $DT = 221\mu s$ y periodo de $T = 276\mu s$, es decir, frecuencia de $3.7KHz$. Utilizando la ecuación (6), se encuentra que la inductancia debe ser de $30.3mH$, y para asegurar que se está en el modo MCC, se recomienda utilizar una inductancia mayor a este valor.

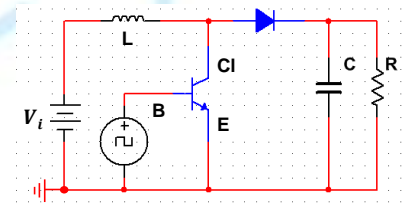


Figura 12. Circuito CEV utilizando un transistor como interruptor. La señal en la Base del transistor es de frecuencia alta. B – Base; Cl – Colector; E – Emisor.

Finalmente, para tener una salida estable, se necesita un valor de RC mucho mayor a $221\mu s$, por lo que se pueden usar $10K\Omega$ y $22\mu F$, lo cual da un valor $RC = 220ms$.

3 CEV COMO FUENTE PULSADA.

Como característica final de un CEV, dado que un diodo presenta una resistencia infinita cuando la corriente intenta fluir en sentido inverso, es posible utilizar un CEV como fuente de voltaje alterno a partir de los polos Diodo (puntos A y B en la Figura 13a).

Cuando el interruptor está cerrado el punto A está conectado a tierra y B al capacitor, el cual tiene un voltaje positivo y decreciente. En esta situación, el diodo presenta una resistencia muy grande que no permite flujo de corriente de B a A, por lo que se interpreta como dos puntos separados. En este caso la diferencia de potencial $\Delta_{AB} = V_A - V_B$ es negativa (Figura 13b).

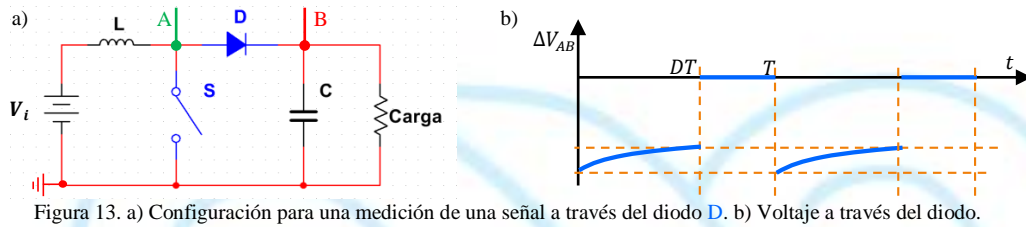


Figura 13. a) Configuración para una medición de una señal a través del diodo D . b) Voltaje a través del diodo.

En el momento en que se abre el interruptor, la corriente fluye de A a B cruzando el diodo. Idealmente, el diodo se comporta como un alambre, por lo que ambos puntos estarán al mismo potencial y su diferencia será cero.

4 REFERENCIAS

- [1] T. L Floyd. *Electronics Fundamentals*, Pearson – Prentice Hall, 6ª edición, 2004.
- [2] D. J. Griffiths *Introduction to Electrodynamics*, Prentice Hall, 3ª edición, 1999.
- [3] D. I. Crecraft, S. Gergely. *Analog Electrónica*. Butterworth-Heinemann. 2002.
- [4] P. Scherz, S. Monk. *Practical Electronics for Inventors*. McGraw-Hill, 3a ed. 2013. USA.
- [5] E. Barrios Barocio. *Temporizador Integrado NE-555*. Tsikbal-Naat. 2024.