

## CONVERTIDORES V/F (CVF)

El término convertidor de voltaje a frecuencia (CVF) se refiere a que la frecuencia de alguna señal periódica se hace proporcional a un voltaje de control analógico. La salida en frecuencia puede ser de cualquier forma de onda periódica, como una onda cuadrada, un tren de pulsos, una onda triangular o una onda senoidal. Las salidas de tren de pulsos o de ondas cuadradas son las que generalmente se desean si la salida está destinada a activar un contador de cualquier clase.

### CONVERTIDOR V/F DE ONDA CUADRADA

El circuito básico que realiza esta conversión se ilustra en la figura 1. Consta de un integrador (A1) y de un comparador (A2).

El comparador A2 invierte la salida cuando en su entrada no inversora el voltaje cambia de signo (inversión al cruzar por cero).

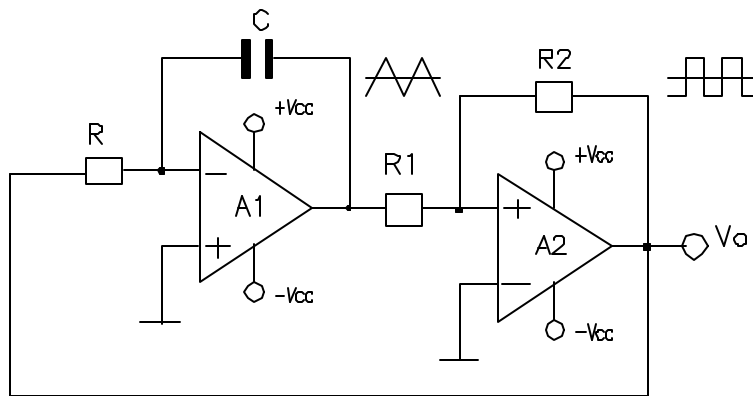


Figura 1.

La amplitud del voltaje  $V_o$  está determinada por el voltaje de polarización, es decir, el tiempo necesario para que la salida de A1 (constante de integración RC) alcance el valor que da lugar a la conmutación de A2 depende del valor del voltaje de saturación. De este modo se obtiene una variación de la frecuencia de  $V_o$  proporcional al voltaje de polarización, logrando con este circuito un convertidor V/F.

### CVF DE SALIDA DE TREN DE PULSOS

Un circuito que ejecuta la conversión V/F de salida de tren de pulsos se muestra en la figura 2. Se requieren solamente dos amplificadores operacionales para este convertidor, los cuales deben tener buenas características de saturación, elevada impedancia de entrada y buena capacidad de máxima rapidez de cambio. Los amplificadores operacionales del tipo J-FET cumplen con estas características.

Para entender el funcionamiento de este circuito, se considera primero el potenciómetro P de ajuste de amplitud. Si este potenciómetro está ajustado para una salida  $e_0$  de -8 V, la salida de A2 será negativa si  $e_2$  es más positivo que -8 V. Si A2 tiene salida negativa, el transistor Q1 tendrá por lo tanto en su base un voltaje negativo, lo cual indica que Q1 está en OFF.

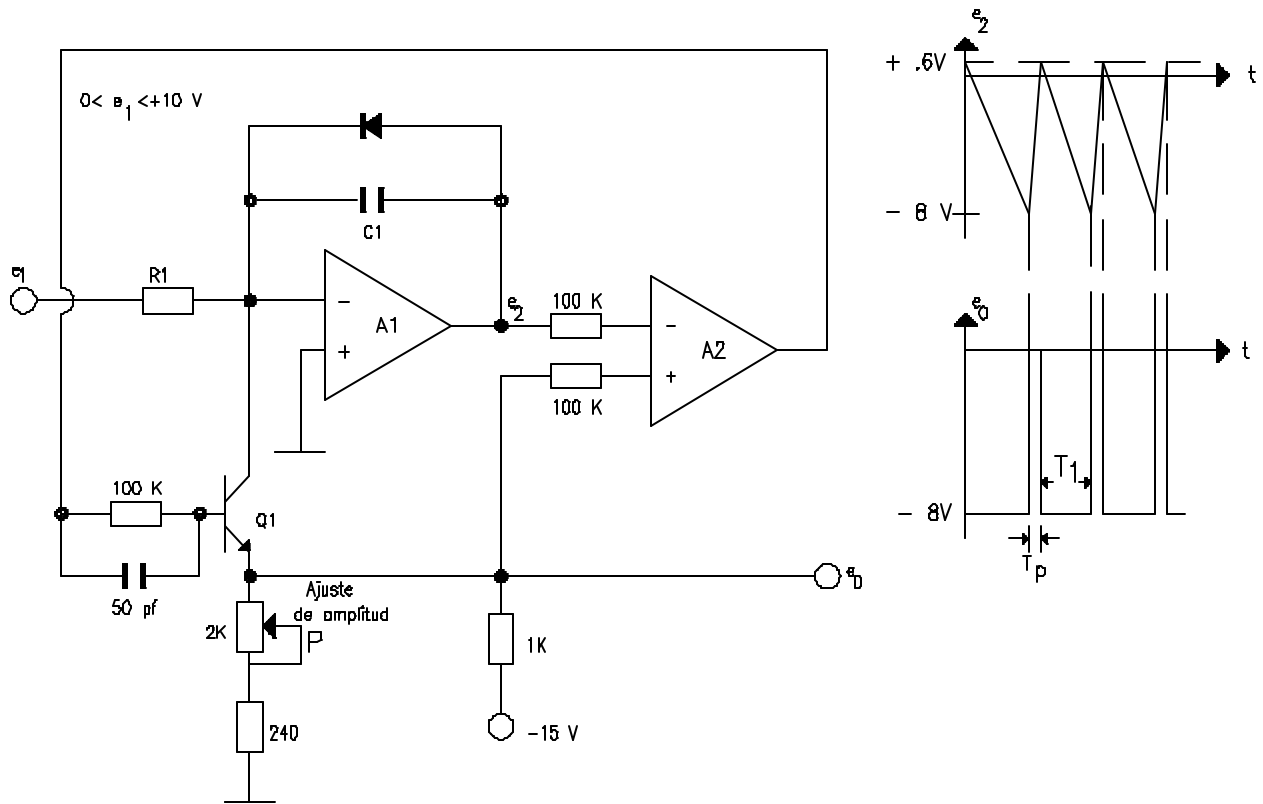


Figura 2.

El voltaje de entrada  $e_1$  es positivo, y por ello, el integrador A1 integrará en la dirección negativa. Cuando la salida de A1 supere el valor de  $-8\text{ V}$ , la salida de A2 conmutará a un valor positivo. Esto llevará a Q1 al estado de conducción, y como el colector de Q1 está aproximadamente a  $0\text{ V}$ <sup>1</sup>, la salida  $e_0$  estará también muy cerca de  $0\text{ V}$ . Más exactamente, el transistor Q1 estará en su voltaje de saturación, es decir, cerca de  $0.1\text{ V}$ . Con Q1 en ON, funcionará como fuente de corriente en el punto de unión con el integrador y A1 integrará rápidamente en la dirección positiva. Cuando la salida del integrador excede de cero, el comparador A2 conmutará a la condición de saturación negativa. El diodo en paralelo con el integrador impide el sobretiro y reduce el tiempo de retraso. Al hacerse negativa A2, Q1 volverá a la condición de OFF. se completa entonces el ciclo y comenzará de nuevo.

El tiempo de retraso al conmutar A2 de un estado saturado al otro, limita el intervalo de frecuencia práctico de este circuito.

El factor de conversión de este circuito se determina de acuerdo a las siguientes ecuaciones

1 Para más detalles ver el Apéndice B

$$\frac{e_1 T_1}{R_1 C_1} = 8.6 \quad y \quad f = \frac{e_1}{T_1 + T_p}$$

sustituyendo

$$f = \frac{1}{8.6 R_1 C_1 + T_p}$$

Si  $T_p < T_1$ , entonces

$$f = \frac{e_1}{8.6 R_1 C_1}$$

La linealidad de este circuito es bastante buena a bajas frecuencias, donde  $T_p$  es mucho menor que  $T_1$ , pero es mala a altas frecuencias.

### CVF DE ALTA CALIDAD

Un convertidor de voltaje a frecuencia lineal es el que usa dispositivos de alta calidad. Un circuito como éste, se muestra en la figura 3a.

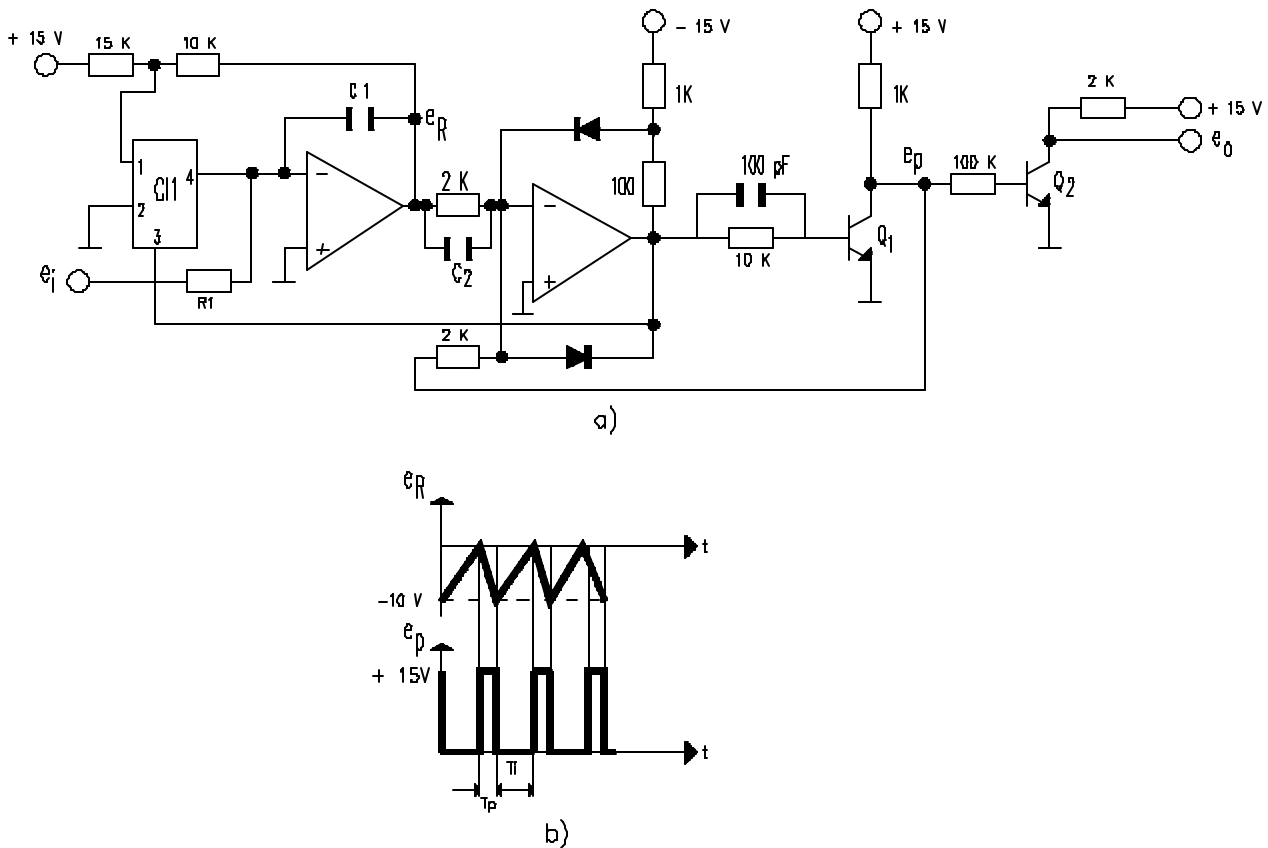


Figura 3.

Básicamente este convertidor es igual al anterior (CVF de salida de tren de pulsos), sólo que ahora se le agrega a la entrada un amplificador de corriente conmutada (CI1) y un integrador de alta velocidad (A1) con facultad para volver

a poner en cero la corriente amplificada. Además, cuenta con arreglos de capacitores, resistencias y transistores que permiten que la linealidad del convertidor mejore.

El integrador A1 está controlado por el amplificador de corriente conmutada (CI1). Cuando el voltaje en el pin 3 es alto (aproximadamente +4 V), A1 integra con la rapidez determinada por R1, C1 y e1. Cuando el voltaje en el pin 3 es bajo (aproximadamente + 0.6 V), el integrador volverá rápidamente a -10 V. El amplificador A2 y el transistor Q1 actúan como un comparador de alta velocidad. Q2 es una etapa de salida, separadora opcional. En la figura 3b. se muestran formas de onda típicas de este convertidor. La resistencia de entrada R1 o el capacitor C1 pueden variarse para que proporcionen el factor de escala deseado de conversión.

Las ecuaciones de operación son:

$$\frac{e_1 T_1}{R_1 C_1} = 10 \quad \text{y} \quad f = \frac{1}{T_1 + T_p}$$

sustituyendo

$$f = \frac{1}{10 R_1 C_1 + T_p}$$

El tiempo de reajuste,  $T_p$ , será de 3 a 4  $\mu$  seg usando los valores de los componentes mostrados. Si  $T_p = 3 \mu$  seg y  $C_1 = 0.01 \mu$  F entonces

$$f = \frac{e_1}{R_1 \times 10^{-7} + 3 e_1 \times 10^{-6}}$$

Si por ejemplo, se deseara un factor de escala de 1Khz/V, entonces,  $R_1$  debería ser aproximadamente de 10 K , por lo cual

$$f = e_1 \times 10^3 \text{ Hz}$$

$$\text{y } 0 < f < 10 \text{ KHz para } -10 \text{ V} < e_1 < 0$$

### CONVERTIDORES F/V

La conversión F/V es conocida sobre todo por los problemas derivados de los instrumentos (desde los tacómetros para automóviles hasta los dispositivos de detección de radioactividad).

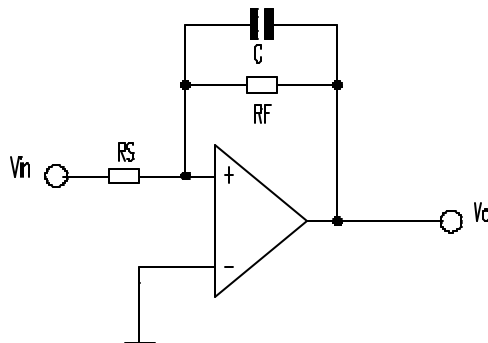


Figura 4.

Un caso sencillo es aquel en el que la frecuencia de entrada está constituida por una secuencia de pulsos de forma y amplitud bien determinados con área constante. En dicho caso para realizar la conversión basta usar un filtro paso-bajas como el que se muestra en la figura 4.

Las ecuaciones de operación son:

$$V_0 = - \frac{V_{in} R_F}{R_S (1 + 2 \Pi f R_F C)}$$

Con una constante de tiempo RC pequeña se tiene una respuesta rápida pero aumentará el rizo de la salida mientras que si la constante de tiempo RC es grande reducirá mucho la velocidad de respuesta del dispositivo.

Cuando la señal de entrada no sea un pulso (como puede ser una señal senoidal, triangular, etc.), basta con adoptar el esquema de la figura 5 para realizar la conversión. En el esquema, el detector de cruce por cero genera un pulso que va a controlar un monoestable formador de pulsos cuya señal de salida se envía al filtro paso-bajas.

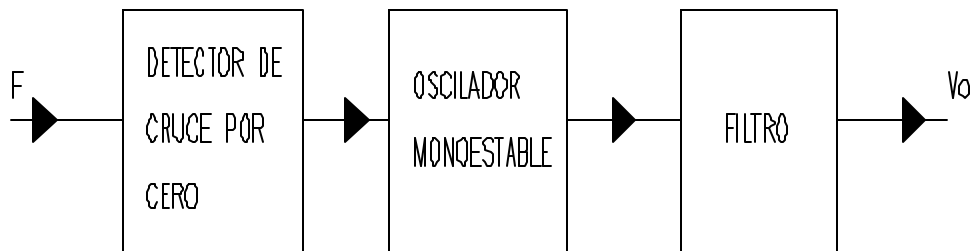


Figura 5.

## DESCRIPCION DEL EQUIPO

En la figura 6 se muestra el circuito electrónico de los convertidores V/F y F/V, los cuales constituyen el módulo G21. En dicho módulo se halla también representado el circuito de un fotoaislador con el cual se pueden llevar a cabo simulaciones de transmisión de datos analógicos aislando electricamente la parte transmisora de la parte receptora.

### CONVERTIDOR V/F

El circuito electrónico del convertidor V/F constituye el cuadro "V/F CONVERTER" del módulo G21. Para comprender el funcionamiento de este dispositivo se hará referencia al diagrama de la figura 7. Para analizar el principio de funcionamiento del dispositivo se considerará, que la salida del comparador es 0 V (saturación inferior). En esta condición, la posición de los interruptores analógicos es la representada en dicha figura.

El voltaje de entrada  $V_{in}$  es aumentado por el amplificador no inversor, cuya salida se conecta al integrador inversor. En el comparador, la entrada no inversora se halla presente un voltaje de -8 V, e invierte su estado de salida cuando su entrada inversora es más negativa que -8 V. La señal de salida del integrador asume valores cada vez más negativos (rampa de bajada) hasta llegar por debajo de los -8 V. En este punto, el comparador invierte su estado de salida pasando a la condición de saturación superior (alrededor de 12 V).

Debido a esto los interruptores analógicos cambian de posición, por lo que la señal que llega al integrador será ahora el voltaje de entrada  $V_{in}$  amplificado e invertido, mientras que el nuevo valor de umbral del comparador será 0 V.

Figura 6

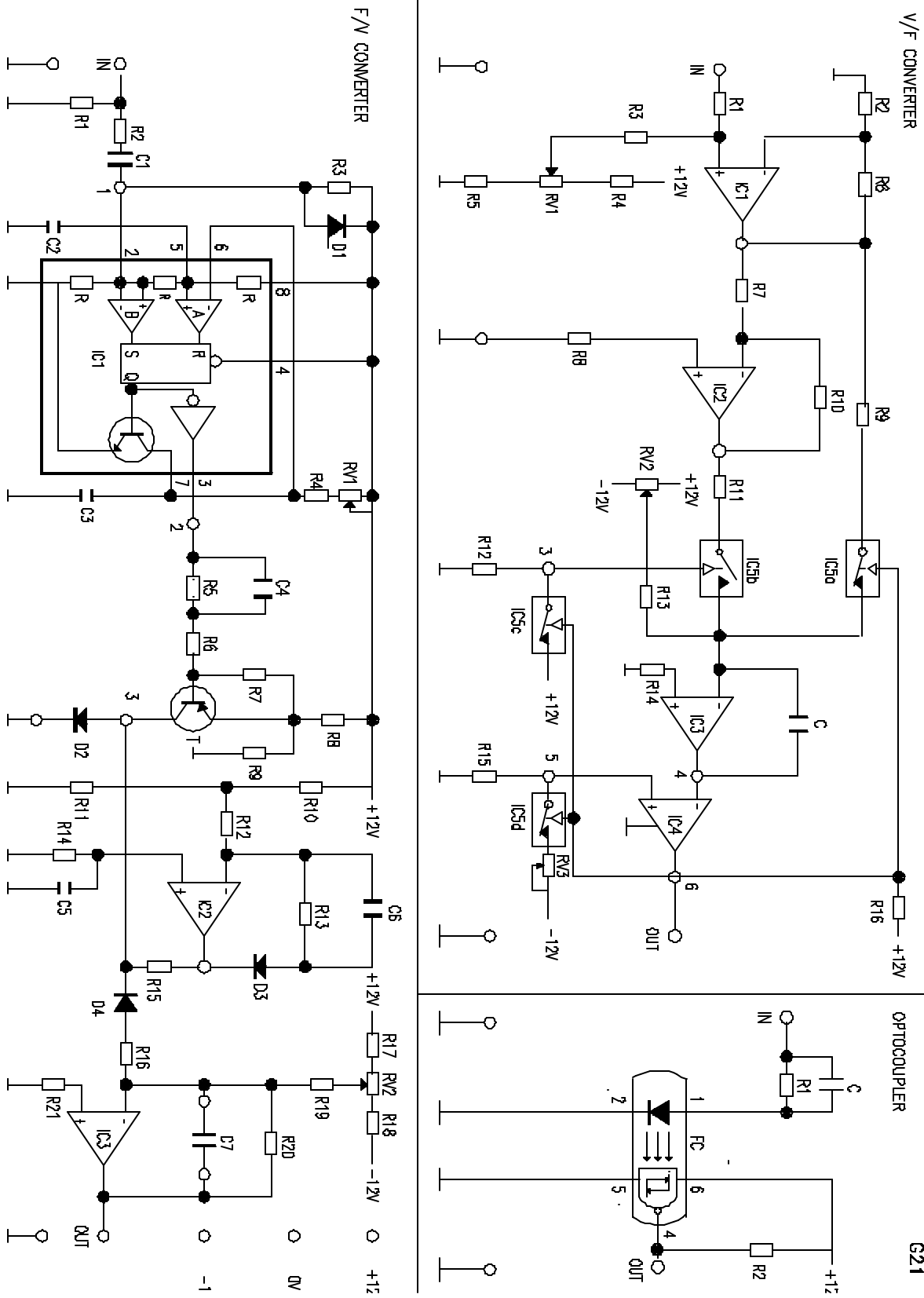


Figura 7

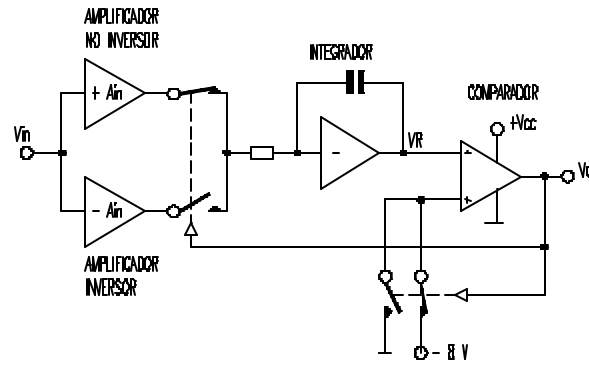


Figura 7.

El voltaje de salida del integrador empieza a subir (rampa positiva) pasando de valores negativos al valor cero. Tan pronto como la rampa supera este último valor la salida del comparador cambia y va a cero. Seguidamente, se desarrolla otro ciclo como el anterior, obteniéndose en la salida una onda cuadrada.

La velocidad de subida de la rampa está dada por la ecuación  $(V_{in} \cdot A_{in})/RC$ , es decir, que es función del voltaje de entrada.

Ya que el tiempo que transcurre entre dos conmutaciones del comparador depende de la velocidad de subida de la rampa, la frecuencia de la señal de salida  $V_o$  será directamente proporcional al voltaje de entrada.

Las formas de las señales que se encuentran en el convertidor están representadas en la figura 8, en la que se observa que la entrada debe ser positiva.

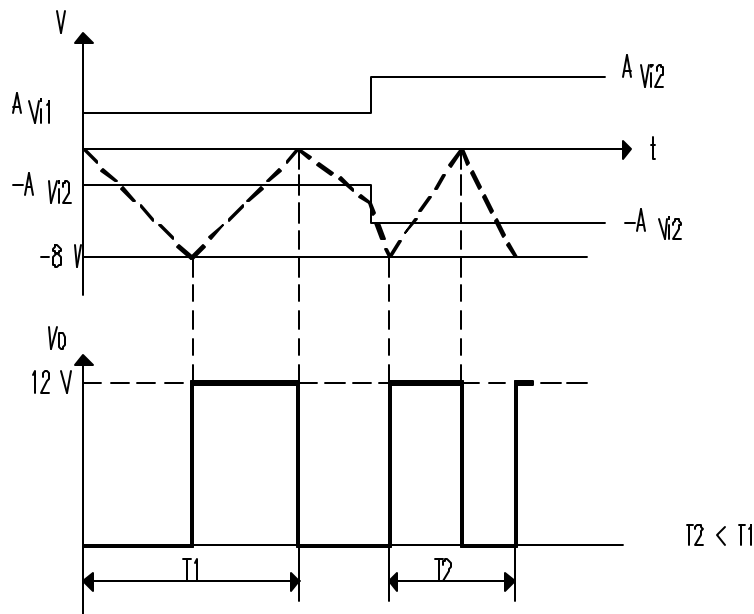


Figura 8.

Con base en lo anterior, se describirá el convertidor V/F del módulo G21 que se muestra en la figura 6.

Los amplificadores operacionales IC1 e IC2 (del tipo A741) constituyen, respectivamente, el amplificador de entrada no inversor e inversor. El potenciómetro RV1 junto con la resistencia R3 sirven para fijar la frecuencia mínima del convertidor. Esto es útil cuando se requiere que a un voltaje de entrada nulo le corresponda una frecuencia de salida

distinta de cero, para facilitar la operación inversa y para asegurar la transmisión del dato analógico "0". Para ello se introduce un voltaje de "offset" constante (mediante R3 y RV1) que permite obtener en la salida una cierta frecuencia.

El operacional IC3 constituye el integrador, con constante de integración igual a R9C o a R11C, según se trate de una rampa de bajada o de subida.

El potenciómetro RV2 sirve para equilibrar el "offset" de las dos señales (positiva o negativa) aplicadas al integrador, de modo que la onda cuadrada de salida resulte simétrica.

El comparador IC4 confronta la señal de salida del integrador con el voltaje de cero volts (rampa de subida) o con un voltaje negativo (rampa de bajada) adecuadamente escogida como para que la frecuencia de salida sea máxima. El valor de esta última se determinará variando el potenciómetro RV3.

Los interruptores analógicos de que consta el circuito integrado IC5 funcionan de la manera siguiente: cuando la salida del comparador IC4 está en cero, los interruptores "a", "c" y "d" se hallan en la condición de reposo (contactos cerrados). Ahora, en el punto 3 hay un voltaje de 12 V que sirve para controlar la apertura del contacto del interruptor "b". Por lo tanto, en la entrada del integrador IC3 se encuentra aplicada la señal de entrada Vin amplificada y sin invertir.

El umbral de conmutación del comparador IC4 está fijado en el valor del voltaje negativo establecido por el divisor R15-RV3.

Tan pronto como el voltaje del punto 6 alcanza 12 V (saturación superior) los contactos de los interruptores "a", "c" y "d" se abren, mientras que el interruptor "b" se cierra, ya que el voltaje del punto 3 es de 0 V. De este modo en la entrada del integrador se halla ahora aplicada la señal de entrada Vin amplificada e invertida, mientras que el umbral de conmutación del comparador es ahora de 0 V.

Se han elegido los valores de los componentes de forma que una frecuencia de salida de 1 KHz corresponda a un voltaje de entrada de 0 V, y que una frecuencia de salida de 9 KHz corresponda a un voltaje de entrada de 8 V.

### CONVERTIDOR FRECUENCIA/VOLTAJE

El diagrama electrónico del convertidor F/V constituye el cuadro "F/V CONVERTER" del módulo G21. Para comprender el funcionamiento de este convertidor, se hará referencia al diagrama a bloques de la figura 9.

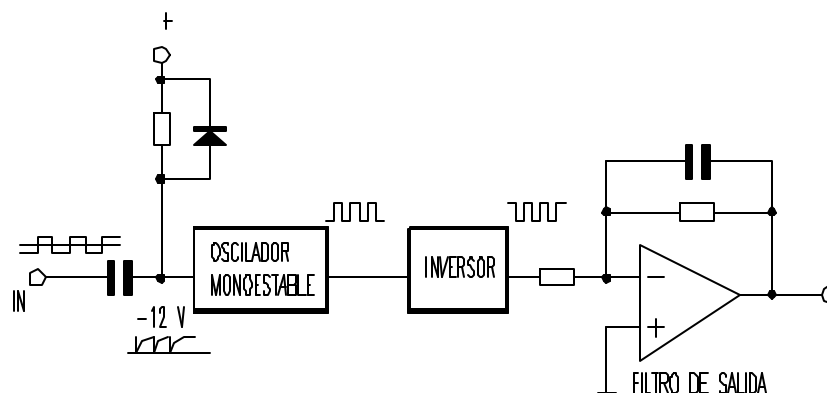


Figura 9.



Se considera una señal de entrada con una cierta frecuencia, la cual pasa a través del capacitor de entrada y activa el oscilador sólo con los frentes de bajada, en correspondencia con los cuales se tendrá en la salida del oscilador un tren de pulsos, de duración constante y de frecuencia igual a la de la señal de entrada, que después de ser invertidos se envían hasta un filtro paso-bajas. La salida del filtro proporciona un voltaje cuya amplitud es proporcional a la frecuencia de la señal de entrada.

En la figura 10 pueden observarse las formas de las señales detectadas en el convertidor.

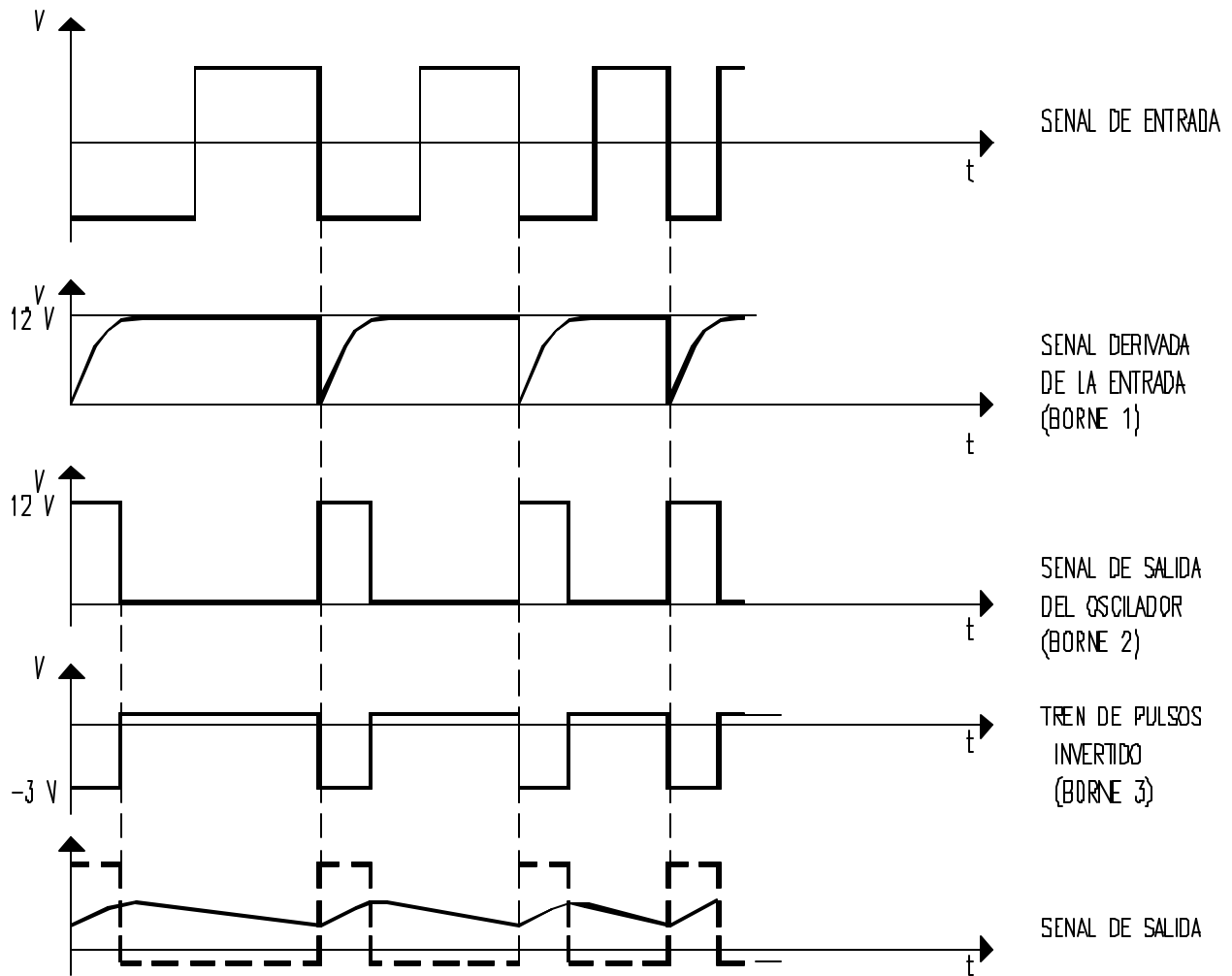


Figura 10.

Con base a lo anterior, se describirá el convertidor de frecuencia/voltaje del módulo G21 mostrado en la figura 6.

C1 es el capacitor de entrada; en correspondencia con el frente negativo de la señal de entrada, el punto 1 va a 0 V, pudiéndose así controlar el oscilador monoestable IC1 (SN555). En la salida del monoestable (punto 2 del módulo) habrá un pulso disponible cada vez que la señal de entrada presente un frente negativo. Dicho pulso tendrá una duración determinada por las resistencias RV1 y R4 y por el capacitor C3. Sin frente negativo, el punto 2 está a 0 V y el transistor T conduce. Por ello el diodo se polarizará directamente y se tendrá en el punto 3 un voltaje de + 0.6 V. En cambio, con un frente negativo, el voltaje en el punto 2 es positivo, llevando al transistor T al estado de corte.

En el punto 3 el voltaje de la señal alcanza un valor que depende de las resistencias R15 y R16. Dicha señal (véase la figura 10 borne 3) es filtrada e invertida por el circuito auxiliar del operacional IC3 (A741).

El potenciómetro RV1 sirve para fijar la duración del pulso suministrado por el monoestable. Naturalmente, dicho pulso deberá durar menos que el período de la onda cuadrada de entrada correspondiente a la máxima frecuencia. Otra función del potenciómetro RV1 es la de regular el voltaje de salida para la frecuencia máxima, haciendo que ésta corresponda al máximo voltaje de salida. Con el potenciómetro de "offset" (RV2), se regula el voltaje de salida para la frecuencia mínima.

Normalmente a la mínima frecuencia de trabajo se le debe hacer corresponder un voltaje nulo.

Evidentemente, estas dos calibraciones son interactivas, por lo que habrá que repetirlas hasta que se obtengan los valores deseados.

El transistor T y el amplificador operacional IC2 constituyen el bloque inversor de la figura 9.

### **FOTOACOPLADOR (O FOTOAISLADOR)**

Para llevar a cabo ensayos de transmisión de datos analógicos es necesario utilizar un sistema transmisor que resulte aislado eléctricamente de la parte receptora. Para ello el módulo G21 cuenta con un fotoacoplador. El diagrama electrónico de este dispositivo se halla reproducido en el cuadro "OPTOCOUPLER" del módulo G21.

Se puede conectar la salida del convertidor V/F con la entrada "IN" del fotoacoplador y, la salida "OUT" de éste a la entrada "IN" del convertidor F/V.

El fotoacoplador es del tipo disparador de Schmitt, de modo que en la salida se pueda disponer de una onda cuadrada bien definida.

Las gama de frecuencias útil debe ser tal que satisfaga los márgenes de los convertidores V/F y F/V.

### **OBJETIVOS**

- Conocer el principio de funcionamiento de los convertidores V/F y F/V.
  - Aprender la técnica de calibración de los convertidores V/F y F/V que constituyen el módulo G21.
  - Determinar la linealidad y rango de operación de los convertidores V/F y F/V.
  - Simular un sistema de transmisión interconectando ambos convertidores. Así mismo, determinar su linealidad y rango de operación.
-

## **EQUIPO Y MATERIAL**

- Módulo G21
- Generador de funciones
- Osciloscopio
- Frecuencímetro
- Vóltmetro digital
- Fuente de poder regulada
- Fuente de poder de +20 y -20 V
- Resistencia de 10 ohms
- Amplificador Operacional LM-741
- Capacitor de 0.22  $\mu F$
- Cables para conexiones

## **DESARROLLO**

### **EXPERIMENTO 1. CALIBRACION DEL CONVERTIDOR V/F**

- Conectar los bornes  $\pm 12 V$  y 0 V del módulo G21 a una fuente de poder regulada sin encenderla aún.
  - Conectar la fuente de poder regulada variable de 0 a 15 V (apagada), a la entrada "IN".
  - Conectar los canales A y B del osciloscopio al borne 4 y a la salida "OUT" (borne 6), respectivamente.
  - Conectar el frecuencímetro a la salida "OUT".
  - Verificar que el cableado sea el correcto; luego, encender la fuente de poder.
  - Aplicar 0 V a la entrada "IN".
  - Variar el potenciómetro RV1 hasta que el frecuencímetro indique 1KHz.
  - Variar el potenciómetro RV2 para hacer simétrica la onda triangular presente en el borne 4 (canal A del osciloscopio).
  - Aplicar 8 V a la entrada "IN".
-

- Variar el potenciómetro RV3 hasta que el frecuencímetro indique 9 KHz.
- Variar de nuevo RV1, RV2 y RV3 hasta que se obtengan los valores deseados.
- Verificar en el canal B del osciloscopio que esté presente en la salida "OUT" la onda cuadrada.

#### EXPERIMENTO 2. DETERMINACION DE LA LNEALIDAD Y RANGO DEL CONVERTIDOR V/F

- Calibrar el convertidor como se indica en el experimento 1.
- Conectar en la entrada "IN" la fuente de alimentación regulada variable.
- Conectar en la salida "OUT" un frecuencímetro.
- Variar el voltaje de entrada (de 0 hasta 8 V) con saltos de 0.5 V y, en correspondencia con cada uno de ellos, leer la frecuencia de la señal de salida. Anote los datos en la tabla 1.
- Aumente el voltaje a más de 8 V lentamente, hasta que la frecuencia de salida sea constante. Anote el valor del voltaje a partir del cual la frecuencia no varía.

$V_{in}$	$f_{out}$

Tabla 1.

#### EXPERIMENTO 3. CALIBRACION DEL CONVERTIDOR F/V

- Conectar los bornes ± 12V y 0 V del módulo G21 con una fuente de poder regulada (apagada).
  - Conectar el generador de funciones y el frecuencímetro a la entrada "IN" del convertidor F/V.
  - Conectar el vóltmetro digital a la salida "OUT".
-

- 
- Conectar los canales A y B del osciloscopio, al borne 2 y a la salida "OUT" respectivamente.
  - Verificar que el cableado éste correcto, luego encender la fuente de poder
  - Aplicar con el generador de funciones una señal cuadrada, de amplitud 12 Vpp y frecuencia de 1 KHz.
  - Variar RV2 hasta obtener un voltaje de salida de 0 V.
  - Cambiar la frecuencia de la señal de entrada a 9KHz.
  - Variar RV1 hasta obtener un voltaje de salida de 8 V.
  - Variar de nuevo RV1 y RV2 hasta que se obtengan los valores deseados,
  - Verificar con el osciloscopio que con 9 KHz el pulso presente en el borne 2 dure menos que el período de la señal de entrada.

**EXPERIMENTO 4. DETERMINACION DE LA LINEALIDAD, RANGO Y DIAGRAMA DE TIEMPOS DEL CONVERTIDOR F/V**

- Calibrar el convertidor como se indica en el experimento 3.
- Conectar en la entrada "IN" el generador de funciones y el frecuencímetro.
- Conectar en la salida "OUT" el vóltmetro digital.
- Variar la frecuencia de la señal (de 1 KHz a 9 KHz) con saltos de 500 Hz y, en correspondencia con cada uno de ellos, leer el voltaje de salida. Anote los datos obtenidos en la tabla 2.

$f_{in}$	$V_{out}$

Tabla 2

- Con la señal de entrada de 9 KHz, vea en canal A del osciloscopio la señal de entrada y en el canal B vea las señales que se presentan en los bornes 1, 2 y 3 y también la señal del borne de salida. Dibuje la señales vistas.
- Aumente la frecuencia de la señal de entrada a más de 9 KHz hasta que el voltaje de salida sea constante. Anote el valor de la frecuencia a partir del cual el voltaje de salida no varía.

**EXPERIMENTO 5. SIMULACION DE UN SISTEMA DE TRANSMISION DE SENAL ANALOGICA CON LOS CONVERTIDORES DE V/F Y DE F/V**

- Calibrar el equipo como se indica en los experimentos 1 y 3.
- Conectar en la entrada "IN" del convertidor V/F una fuente de alimentación regulada variable (apagada).
- Armar el circuito que se muestra en la figura 11.
- Conectar la salida "OUT" del convertidor V/F a la entrada de la linea de transmisión.
- La salida de la linea de transmisión conectarla a la entrada "IN" del convertidor F/V.

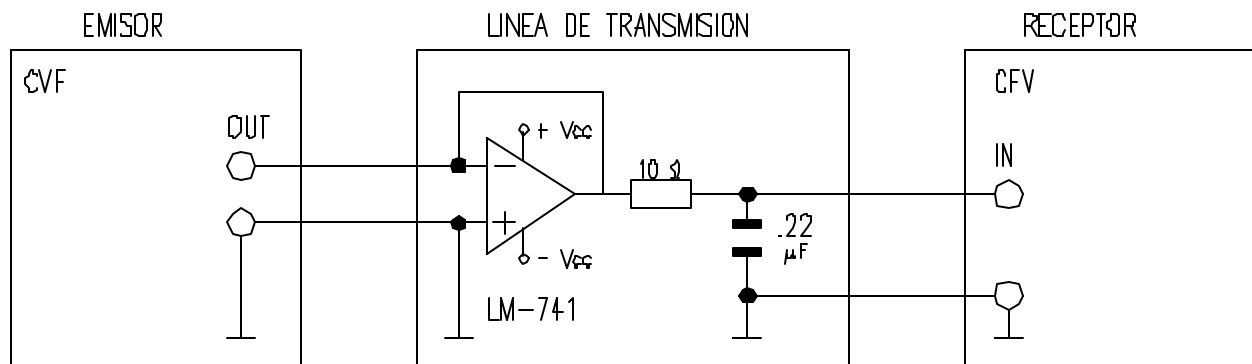


Figura 11.

- Conectar un voltmetro digital a la salida "OUT" del convertidor F/V.
- Verificar el cableado, luego encender las fuentes de poder.
- Variar el voltaje de entrada de 0 a 8 V con saltos de 0.5 V y, en correspondencia con cada uno de ellos, leer y registrar el voltaje de salida.
- Apague las fuentes de poder.
- Ahora conecte la salida de la linea de transmisión a la entrada del fotoaislador y, la salida del fotoaislador conéctela a la entrada del convertidor F/V como se ilustra en la figura 12.

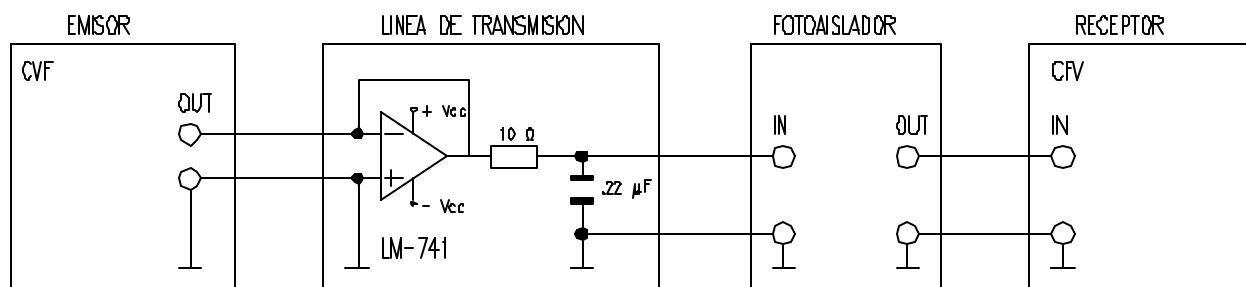


Figura 12.

- Encienda las fuentes de poder.
- Variar el voltaje de entrada de 0 a 8 V con saltos de 0.5 V y, en correspondencia con cada uno de ellos, leer y registrar el voltaje de salida. Anote los datos obtenidos en la tabla 3.

$V_{in}$	$V_{out}$

Tabla 3.

**ANÁLISIS DE DATOS Y RESULTADOS**

1. Con base a los datos de la tabla 1, graficar la curva voltaje vs frecuencia, asimismo, determinar la linealidad y rango de operación del convertidor V/F.
2. ¿Porqué es necesario que la onda triangular presente en el borne 4 esté correctamente definida?.
3. Con base a los datos de la tabla 2, graficar la curva frecuencia vs voltaje, asimismo, determinar la linealidad y rango de operación del convertidor F/V.

## Práctica 11

---

4. Explique cómo se podría aumentar el rango de operación del convertidor F/V.
5. Tomando de referencia la señal de entrada de 9 KHz, dibuje el diagrama de tiempos de acuerdo a las señales observadas en los bornes 1, 2 y 3 y en el borne de salida del convertidor F/V.
6. Con base a los datos de la tabla 3, graficar la curva  $V_{in}$  vs  $V_{out}$ , asimismo, determinar la linealidad del circuito transmisor.
7. Comente por qué al conectar directamente ambos convertidores de V/F y de F/V no se registro ningún voltaje de salida.
8. En el esquema de la figura 11, qué función realiza el amplificador operacional LM-741?
9. ¿Por qué la línea de transmisión está representada por una resistencia y un capacitor.
10. ¿Qué función realiza el fotoaislador?