

En este artículo, y como complemento del anteriormente publicado «Diseño de osciladores de frecuencia variable», EA7ED nos explica las técnicas de diseño de los VCO.

Osciladores controlados por tensión (VCO)

JOSE ANTONIO GAZQUEZ*, EA7ED

Este artículo amplía el dedicado al «Diseño de osciladores de frecuencia variable» publicado en *CQ Radio Amateur*, núm. 9, junio 1984, y nos enseñará las técnicas de diseño de *osciladores controlados por tensión* (VCO) para el margen de frecuencias que nosotros queramos, al igual que en el artículo anteriormente mencionado.

Es necesario por tanto utilizar aquella información como parte preliminar para el estudio de los VCO, ya que para el diseño de estos se utilizan las mismas fórmulas.

El *oscilador controlado por tensión* es un elemento fundamental en la electrónica moderna y tiene un sinfín de aplicaciones, entre las más importantes están los sintetizadores PLL, que incluyen uno o varios VCO en su conjunto. En radio-comunicación el sintetizador PLL es un circuito imprescindible, pues todos los equipos modernos emplean este sistema para el control de frecuencia.

El VCO es parte fundamental de vobuladores, analizadores de espectro y generadores de radiofrecuencia; también se usa como elemento de control de frecuencia de equipos de radio.

El VCO tiene varias ventajas sobre el oscilador de condensador variable: menor tamaño, ausencia de elementos mecánicos, menor influencia de vibraciones, puede colocarse en cualquier parte del chasis del equipo y controlar su frecuencia con un simple potenciómetro colocado en el frontal. Es cierto que un VCO requiere algo más de esfuerzo en su diseño, pero supone un notable ahorro en mecanización.

El diodo varicap

El diodo de capacidad variable o *diodo varicap*, es el elemento que sustituye al condensador variable en un VCO.

Como su mismo nombre indica es un diodo semiconductor capaz de variar su capacidad asociada (capacidad de la unión) cuando está polarizado en sentido inverso, es decir de manera que el diodo no conduce. La variación de capacidad se controla mediante la magnitud de la tensión inversa a que se somete el diodo (figura 1); a mayor tensión inversa menor capacidad asociada.

El efecto de la capacidad con la polarización inversa es un fenómeno intrínseco de cualquier diodo semiconductor. El *diodo varicap* se ha diseñado especialmente para que dicho efecto sea mucho más acusado que en el resto de diodos de otras aplicaciones, en las cuales no interesa presente capacidad en la unión.

Pongamos como ejemplo que un diodo de silicio típico de

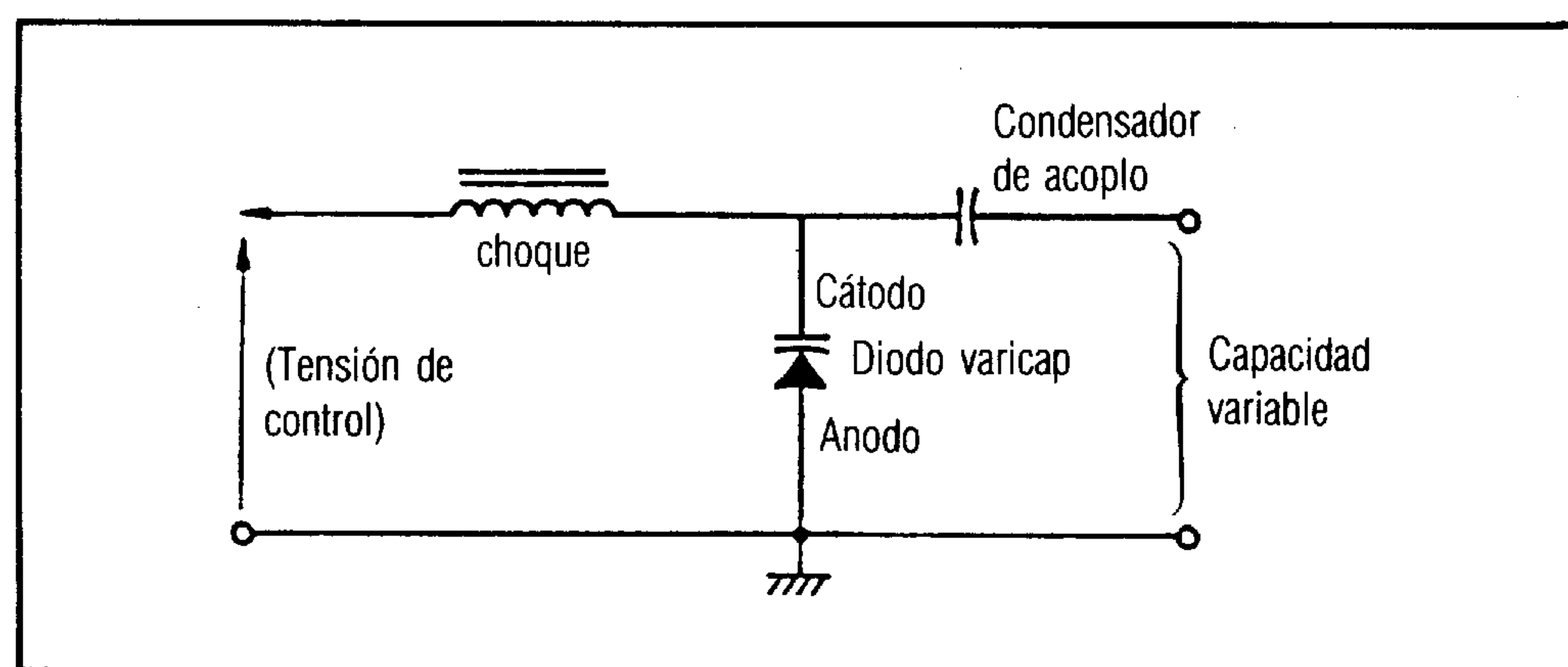


Figura 1. Polarización de un diodo varicap.

pequeña señal (1N914) presenta una capacidad inferior a 4 pF a cero voltios de polarización. Un diodo varicap de aplicaciones generales como el BA102 presenta una capacidad de 50 pF a 1 voltio en inverso. Un diodo varicap especial de *unión hiperabrupta* presenta una capacidad superior a 500 pF a 1 voltio inverso, este diodo es el MV1401 de Motorola.

Para los interesados en conocer el por qué de un diodo varicap se exponen seguidamente los fundamentos físicos de los mismos.

Si consideramos la estructura de un diodo de unión (figura 2), observamos tres regiones claramente diferenciadas; para los menos entendidos en el tema, diremos que un diodo semiconductor está formado por la unión de dos tipos distintos de semiconductor, uno llamado tipo N por tener electrones libres (de carga negativa) y el otro tipo P por tener *huecos* (de carga positiva) libres.

En el diodo hay pues una zona tipo N, otra tipo P y en medio de las dos, envolviendo la zona de unión llamada *unión metalúrgica* se encuentra la tercera zona denominada *zona de deplexión* o *zona de exclusión*, también llamada así por la carencia de portadores de corriente debido al campo eléctrico formado. Esta zona de exclusión al carecer de por-

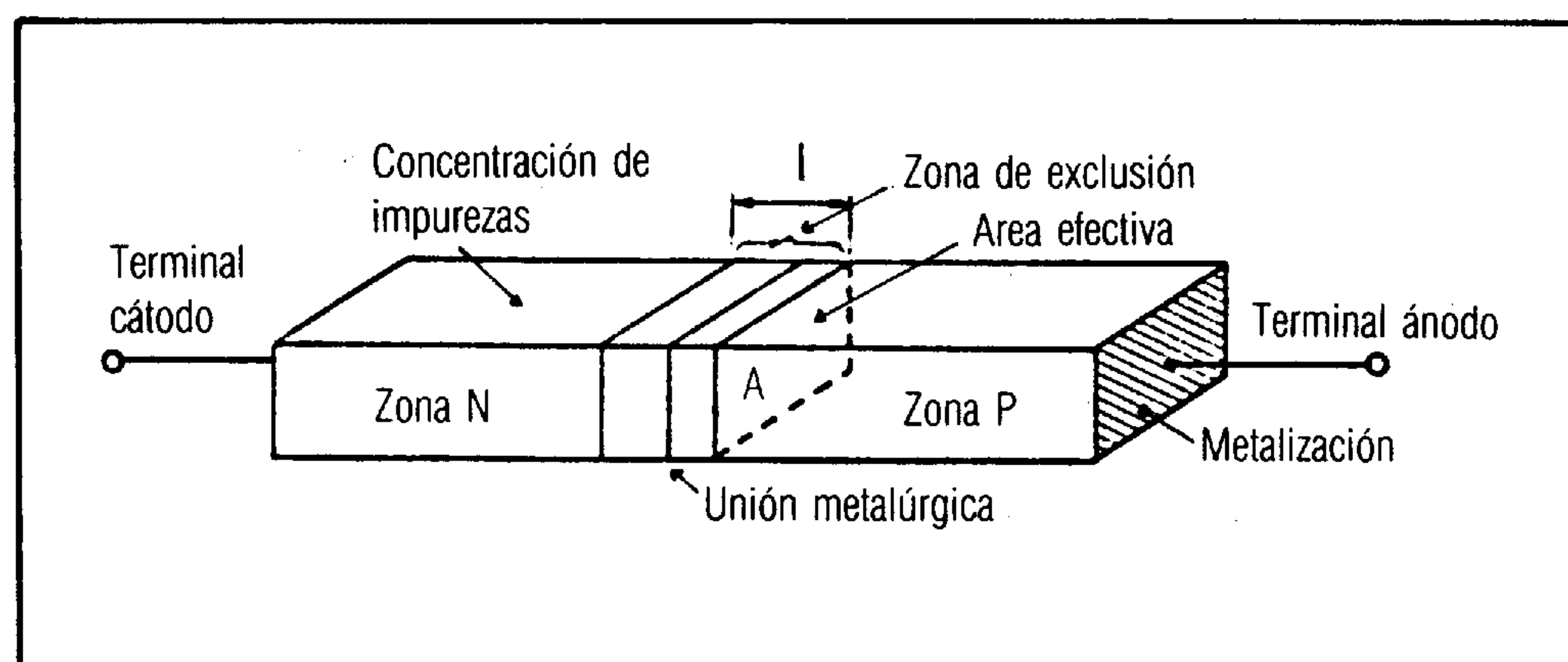


Figura 2. Estructura de un diodo semiconductor.

*Apartado de correos 546. 04080 Almería

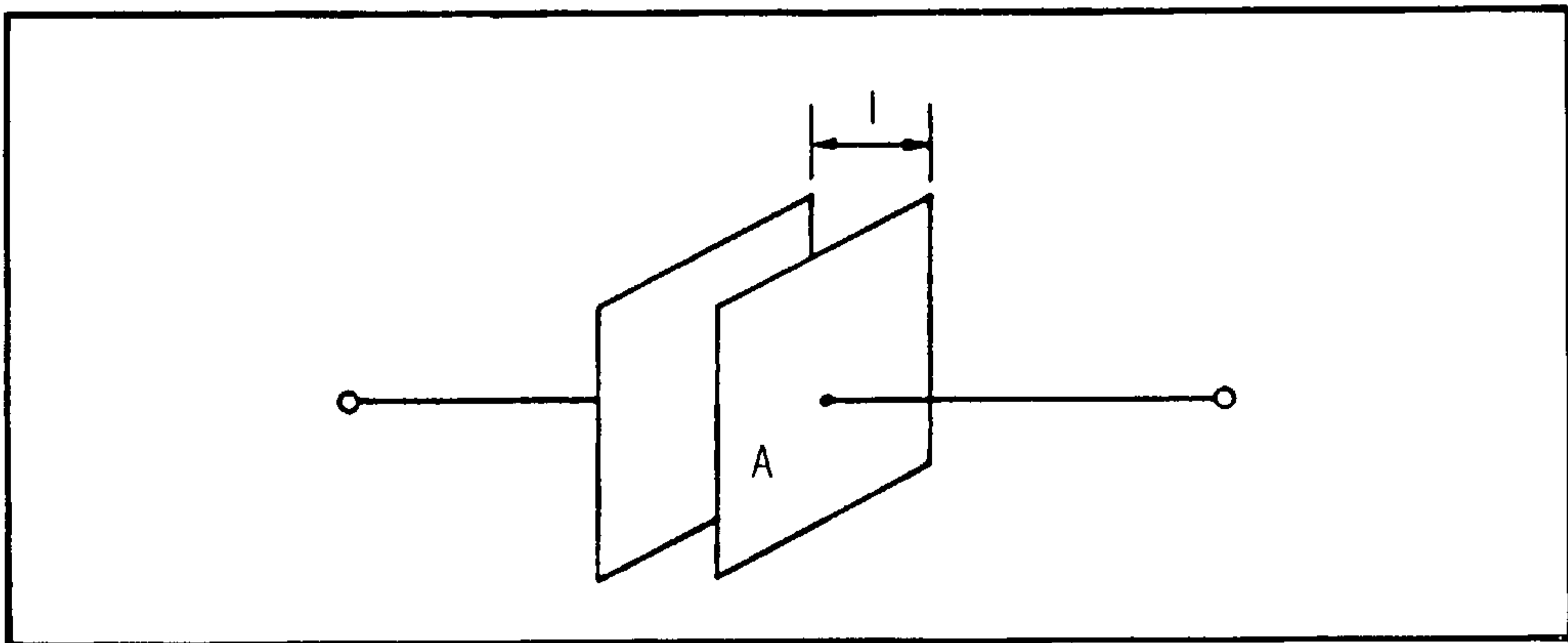


Figura 3.

tadores se comporta como un dieléctrico, y como las zonas P y N sí son conductoras, el conjunto nos define un condensador plano.

La capacidad de un condensador plano (figura 3) nos la da la siguiente fórmula:

$$C = \frac{\epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot A}{l}$$

ϵ : permitividad relativa del dieléctrico

ϵ_0 : permitividad absoluta del vacío = $8,85 \times 10^{-12}$ faradios/metro

A: área efectiva

l: longitud de separación

La longitud de la zona de exclusión l aumenta cuando polarizamos el diodo en inverso, por lo tanto disminuye su capacidad.

La siguiente fórmula nos da la longitud de l en función de la tensión aplicada al diodo y del resto de sus características físicas:

$$l = \left[\frac{2 \epsilon \epsilon_0}{q} (\psi_0 + V) \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right) \right]^{1/2}$$

$1/2$ = este coeficiente es para una unión abrupta

ψ_0 = potencial de contacto 0,2 V para el germanio y 0,7 V para el silicio

N_a = concentración de impurezas aceptadoras átomos/cm³

N_d = concentración de impurezas donadoras átomos/cm³

q = carga del electrón $1,6 \times 10^{-19}$ culombios

V = tensión inversa aplicada al diodo, voltios

Si observamos la fórmula que nos define l vemos que al aumentar la tensión inversa V lo hace también l y disminuye por tanto la capacidad que es inversamente proporcional a l . La capacidad C es proporcional a

$$\frac{1}{\sqrt{\psi_0 + V}}$$

(para una unión abrupta)

Parámetros del diodo varicap

Capacidad nominal. Es la capacidad que presenta el diodo a una tensión determinada, siendo el dato con el cual lo presenta el fabricante; por ejemplo el BA102 tiene 40 pF a 2 V.

Relación de capacidad. Es el cociente entre la capacidad a una tensión baja y la capacidad a una tensión alta; suelen ser 1 y 10 V o 4 y 25 V.

$$RC = \frac{C_1 \text{ voltio}}{C_{10} \text{ voltios}} \text{ o } \frac{C_4 \text{ voltios}}{C_{25} \text{ voltios}}$$

Este parámetro que nos da una idea de la brusquedad de

la variación de la capacidad con la tensión toma valores entre 1,4 y 15.

Factor de calidad Q. Dicho factor nos indica cómo se asemeja el diodo varicap a un condensador ideal. Interesa sea lo más grande posible y toma valores entre 5.000 y 50.

El factor de calidad es función de la frecuencia a que trabaja el diodo, de la tensión inversa y de la temperatura.

El Q a partir de 1 MHz disminuye al aumentar la frecuencia, aumenta cuando aumenta la tensión inversa y disminuye al aumentar la temperatura. El fabricante nos representa estas características en gráficos.

Coefficiente de temperatura. El coeficiente de temperatura es positivo en todos los diodos varicap, o sea que al aumentar la temperatura aumentan su capacidad.

El fabricante nos lo presenta en forma de gráficas en función de la tensión inversa. Véase la figura 4.

Técnicas de diseño de VCO

La técnica de diseño y sus fórmulas correspondientes, son las dadas en el artículo *Diseño de osciladores de frecuencia variable* (CQ Radio Amateur, núm. 9, junio 1984) con la particularidad de que al sustituir el condensador variable por el diodo varicap, habrá que sustituir los valores de capacidad máxima y mínima de C_v (C_{vmax} y C_{vmin}) por los valores de capacidad máxima y mínima del circuito de acoplo del diodo varicap (figura 5).

Para calcular cuales serán los valores C_{vmax} y C_{vmin} que nos definirán al nuevo condensador variable de estado sólido, seguiremos los siguientes pasos:

— *Elegir el diodo varicap más apropiado* (ver tablas de características) en función de los márgenes de frecuencia requeridos y de las tensiones de control que le vamos a aplicar.

— *Fijar el condensador C_s* según nos interese mayor o menor variación de capacidad del circuito de acoplo del diodo.

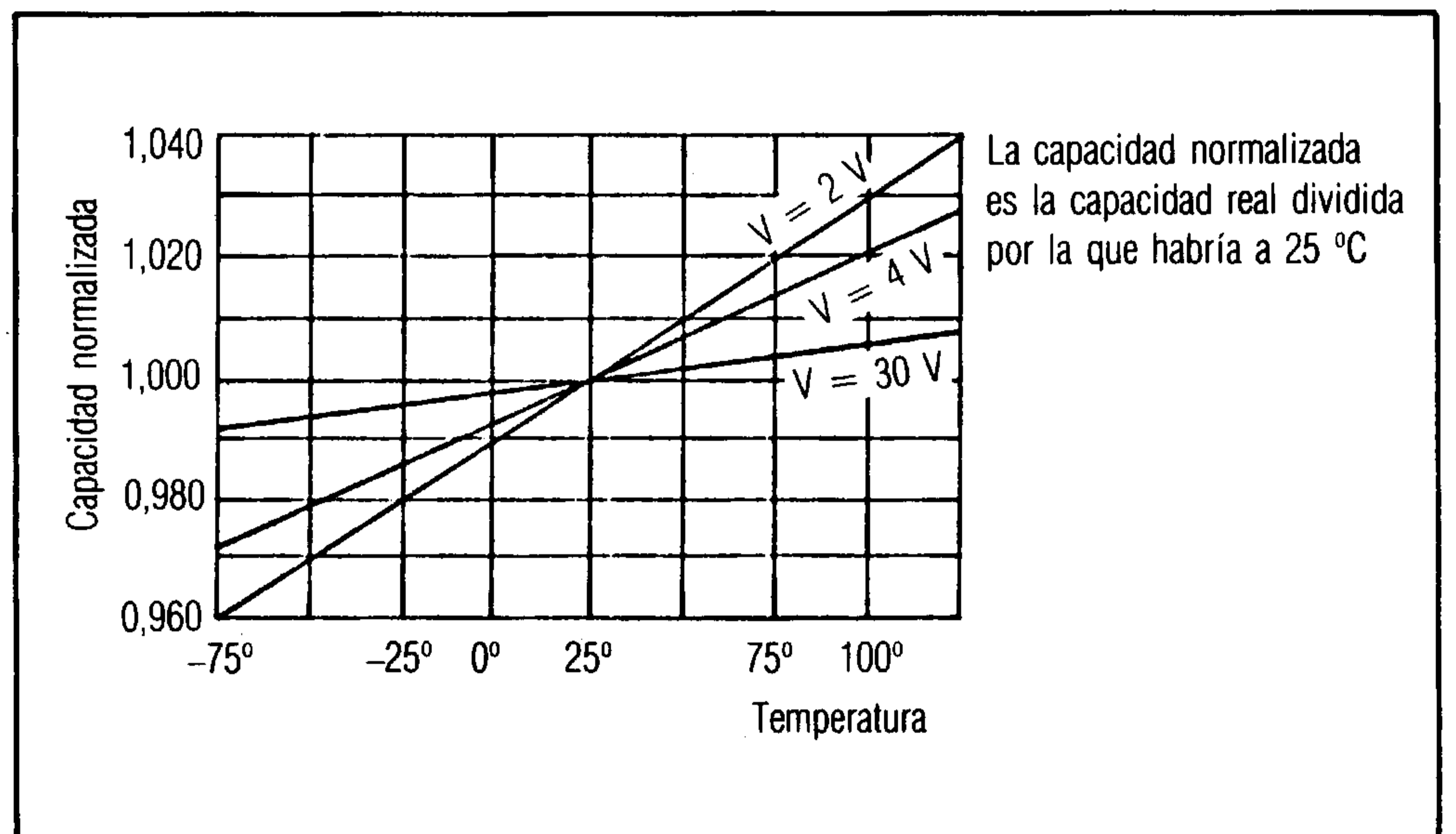


Figura 4. Coeficiente de temperatura de un varicap típico.

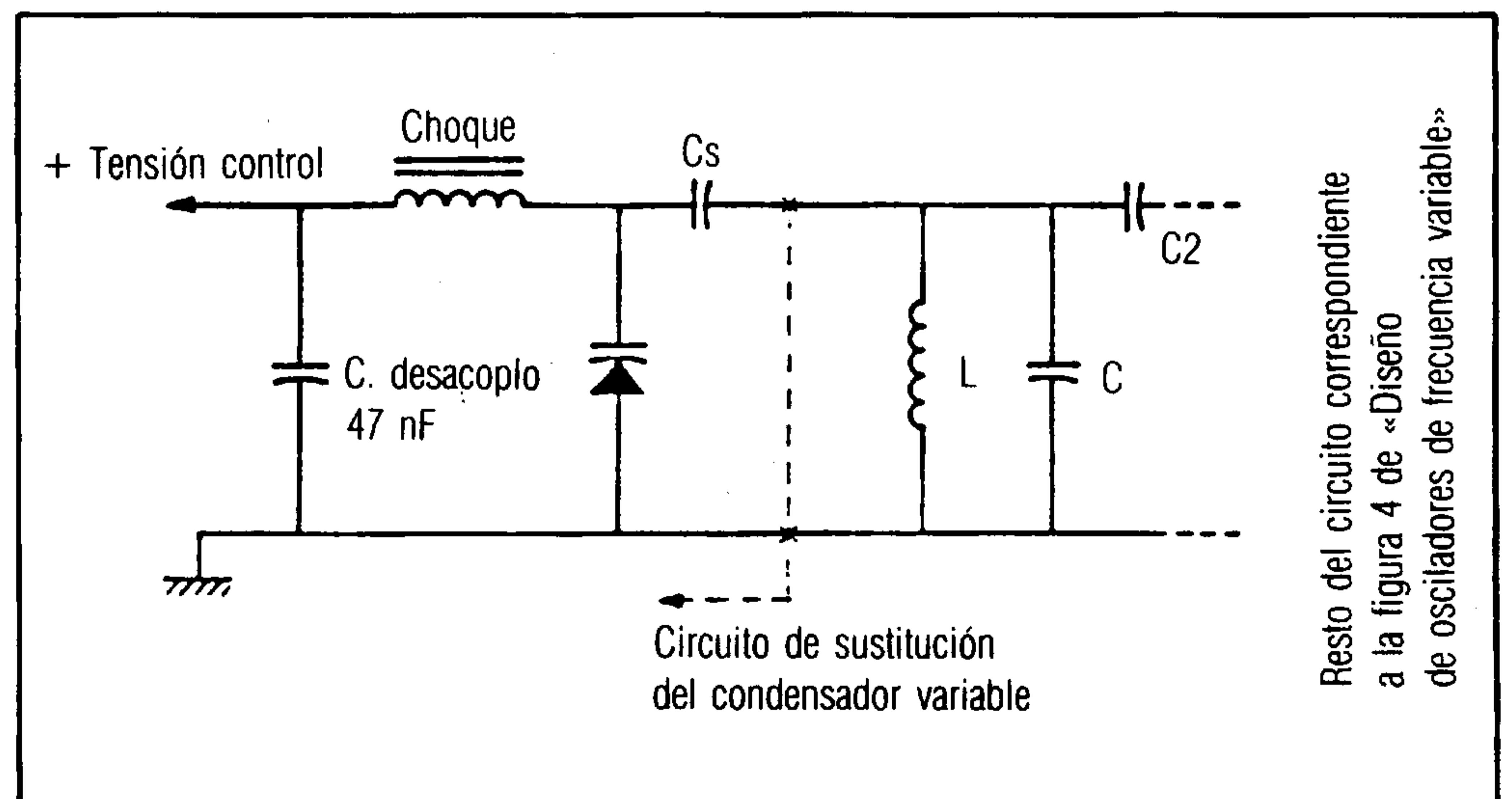


Figura 5. Inserción del diodo varicap en el oscilador.

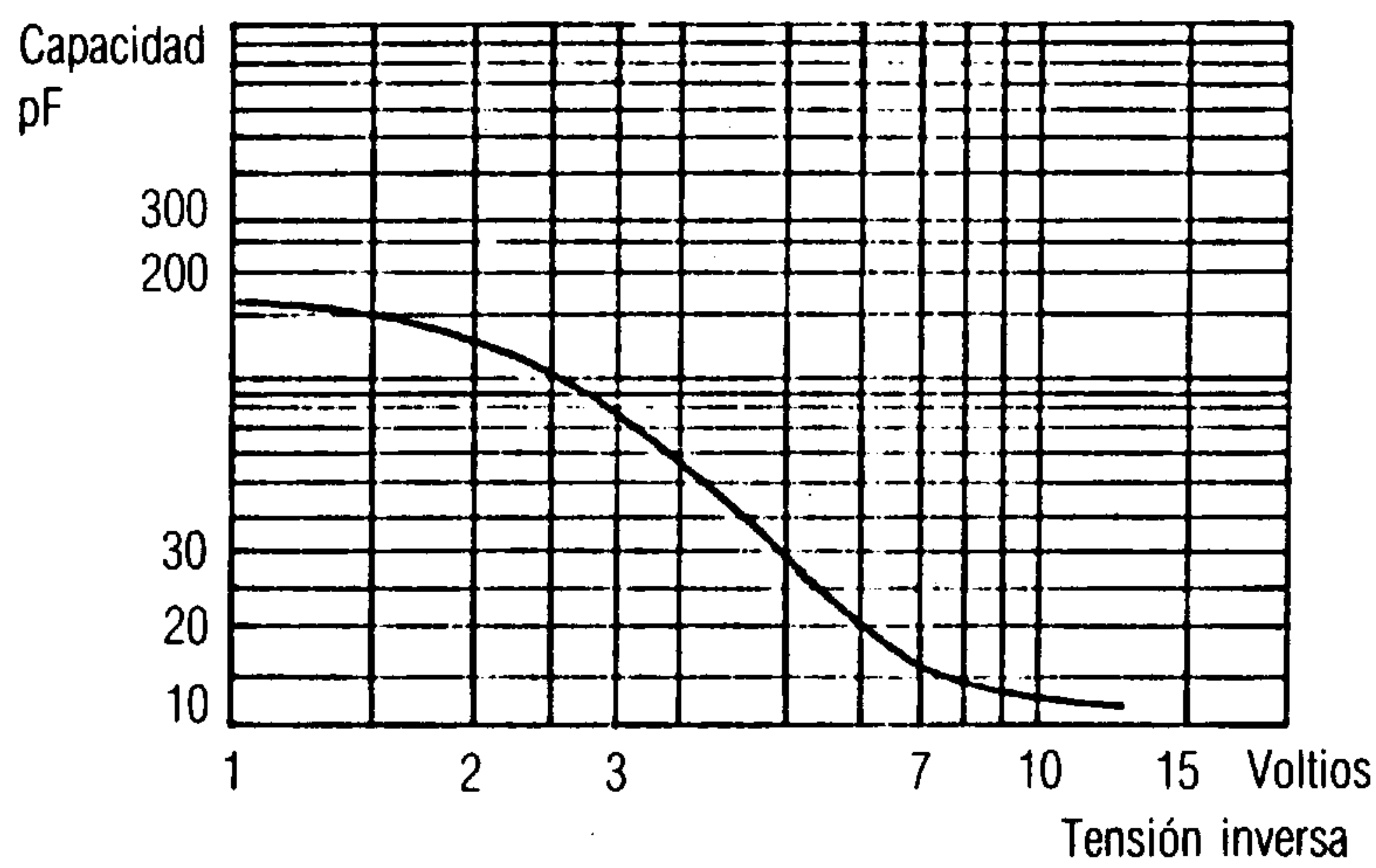


Figura 6. Curva de capacidad-tensión del diodo MV1404.

Si C_s es muy grande respecto a la capacidad máxima del diodo varicap, la variación de capacidad es la máxima que se podría obtener.

— Calcular C_{vmax} y C_{vmin} en función de las tensiones de control y de la curva capacidad-tensión del diodo dada por el fabricante. En la figura 6 se representa una curva capacidad-tensión típica.

Para fijar los márgenes de capacidad fijaremos primero los márgenes de tensión de control; como la alimentación del circuito ha de ser perfectamente estabilizada, la tensión de control V_{max} puede valer V_{cc} y la tensión de V_{min} no deberá ser inferior a 1 voltio debido a que el diodo varicap es muy inestable a tensiones bajas. Se puede emplear un potenciómetro como elemento de control de V_c (figura 7).

Una vez calculadas las capacidades máximas y mínimas del diodo a las tensiones de trabajo sobre la curva, C_{dvmax} y C_{dvmin} , obtenemos las capacidades resultantes del conjunto, teniendo en cuenta C_s :

$$C_{vmax} = \frac{C_{dvmax} \cdot C_s}{C_{dvmax} + C_s}$$

$$C_{vmin} = \frac{C_{dvmin} \cdot C_s}{C_{dvmin} + C_s}$$

las unidades son los faradios (a fin de corresponder con el resto de las fórmulas).

Se comprobará con un capacímetro conectado a C_s en el punto de unión con la bobina que dicho margen de capacidades corresponde a la realidad y que los cálculos han sido correctos.

— Sustituir C_{vmax} y C_{vmin} encontrados en las fórmulas del artículo *Diseño de osciladores de frecuencia variable* (CQ Radio Amateur, núm. 9, junio 1984).

Linealidad de los VCO

Es de gran interés en algunos circuitos que la curva tensión-frecuencia del VCO sea *lineal*; esto se consigue utilizando un diodo varicap de gran variación de capacidad y haciéndolo trabajar en un margen estrecho de tensiones próximas al centro de la curva tensión-capacidad del diodo. Entre 3 y 5 voltios por ejemplo (figura 8).

Una vez construido el oscilador controlado por tensión se puede determinar experimentalmente la zona lineal, y acotarla para trabajar en ella exclusivamente; para ello se calculará para que cubra un margen mucho más grande de frecuencias que el requerido.

El VCO lineal es el utilizado en la mayoría de circuitos profesionales.

Existe otra forma de acoplar el diodo varicap al resto del

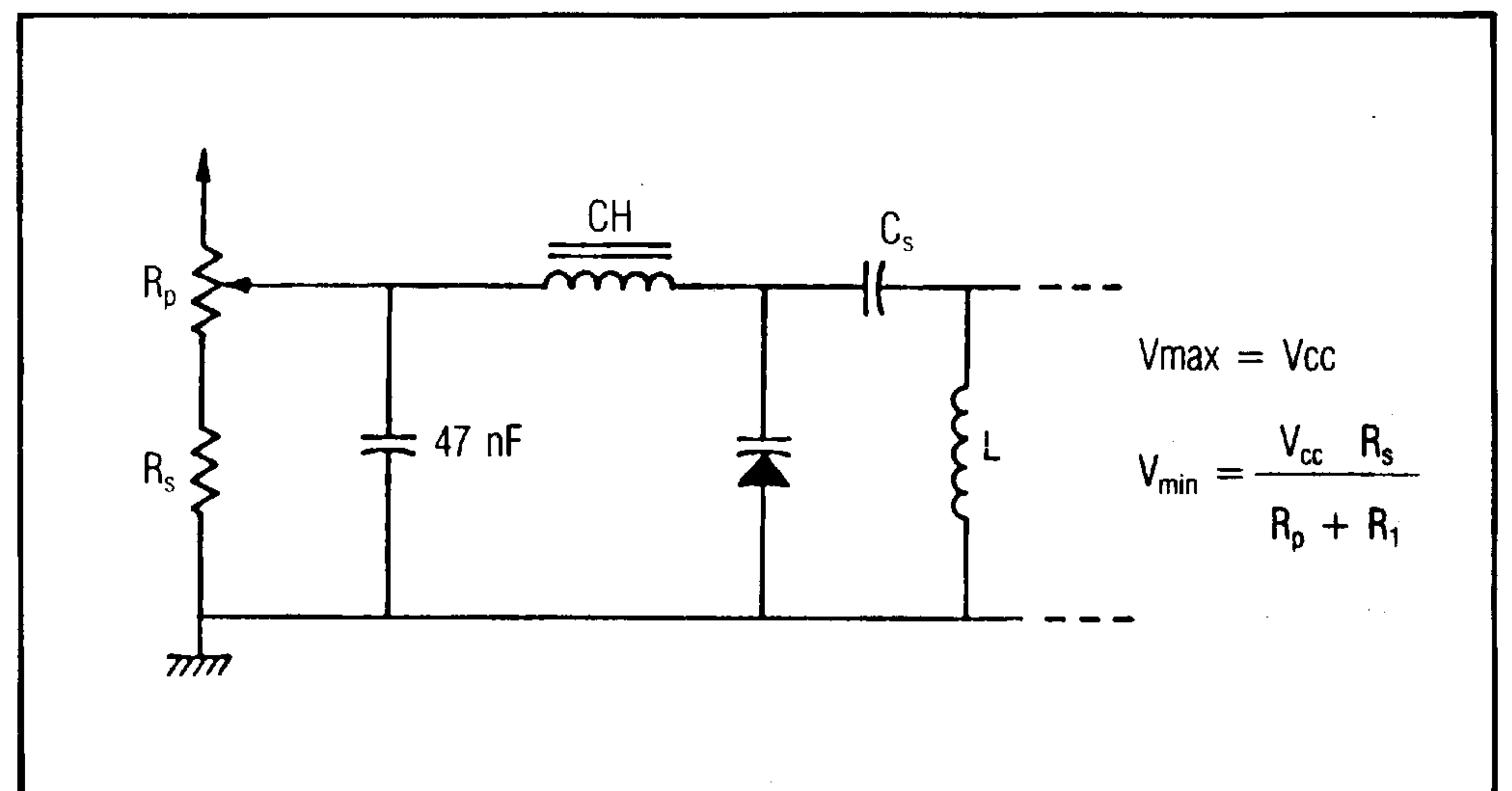


Figura 7. Control de frecuencia con un potenciómetro.

oscilador; es la conexión de diodos en oposición (figura 9).

Este montaje no requiere condensador serie C_s y tiene la ventaja de aceptar una mayor tensión de radiofrecuencia sin polarizar los diodos, a la vez se puede mejorar la linealidad, pero se pierde margen dinámico.

En este caso C_{vmax} y C_{vmin} toman los siguientes valores:

$$C_{vmax} = \frac{C_{dvmax}}{2} \quad C_{vmin} = \frac{C_{dvmin}}{2}$$

Compensación de la temperatura y consejos prácticos

Los diodos varicap presentan un coeficiente de temperatura positivo, es decir, aumentan su capacidad cuando aumenta la temperatura de la unión. Si se quiere estabilidad en el VCO es necesario compensar dicho efecto.

No bastará con colocar un condensador de coeficiente de temperatura negativo, como se explicaba en el diseño de osciladores de frecuencia variable, pues de esa forma sólo compensaremos a una tensión de control determinada.

Existe un método que da buenos resultados. Consiste en

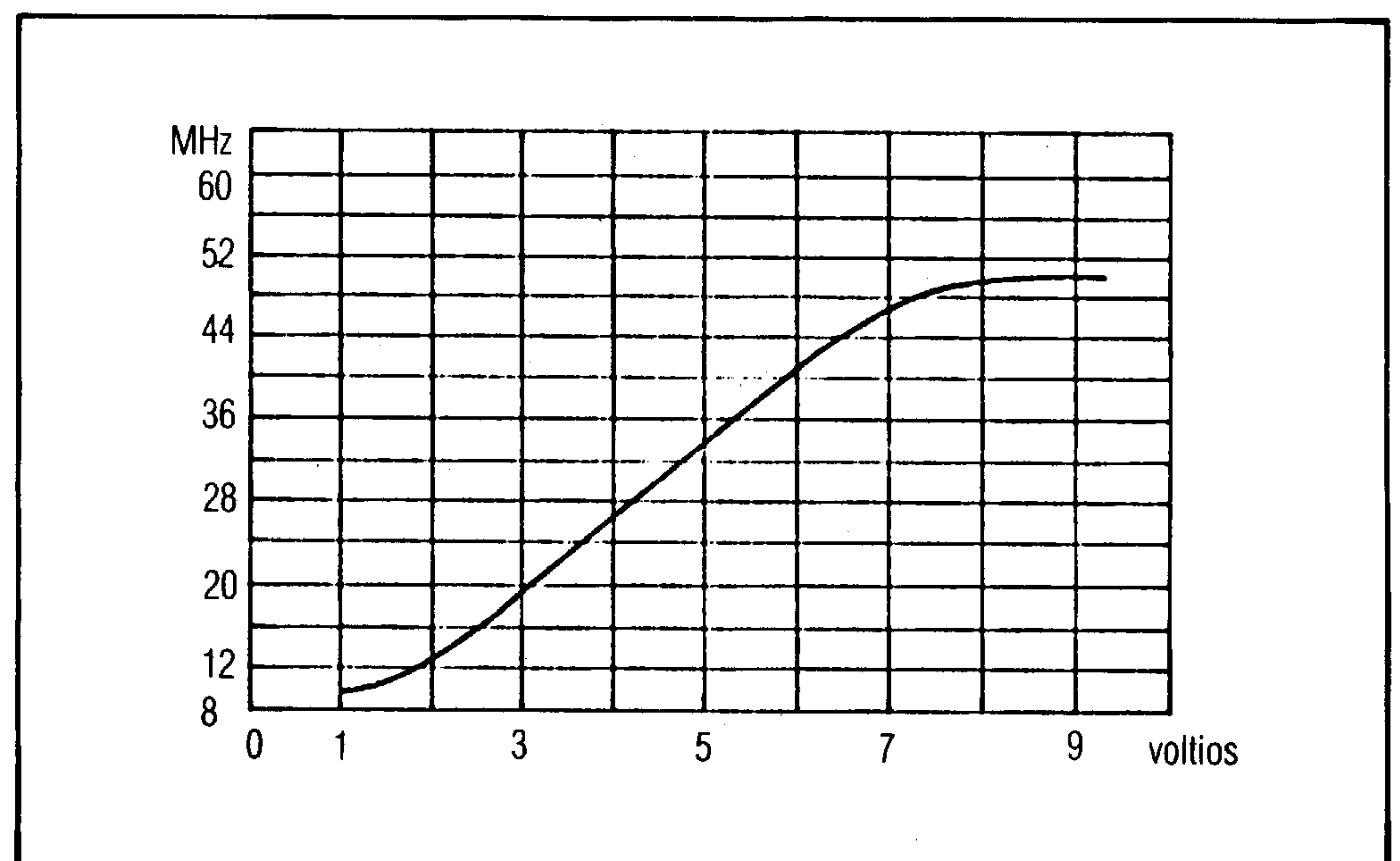


Figura 8. VCO lineal.

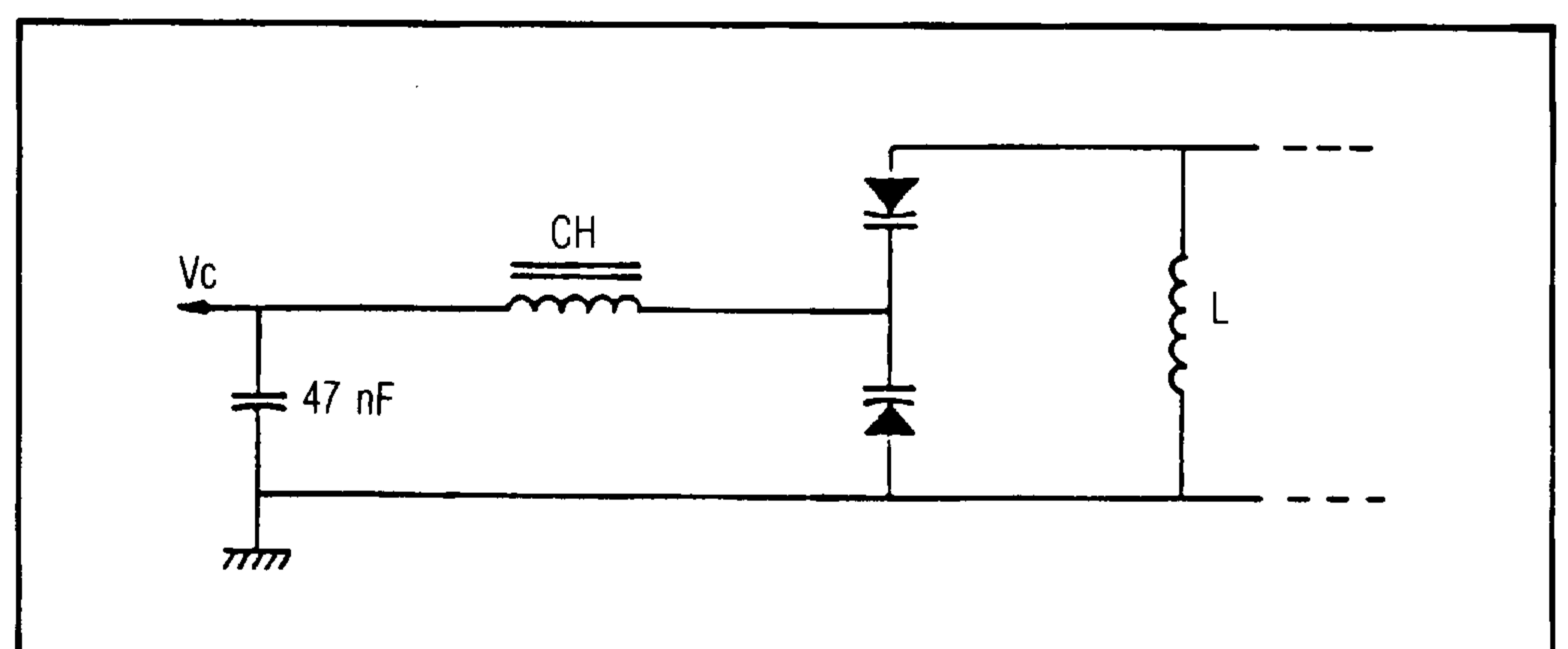


Figura 9. Diodos varicap en oposición.

intercalar un diodo de silicio en la entrada de la tensión de control, como se representa en la figura 10.

El diodo de silicio presenta una caída de tensión entre 0,6 y 0,7 voltios y dicha caída de tensión (potencial de contacto) presenta un coeficiente negativo de temperatura. Este coeficiente varía según la corriente que circula por el diodo desde unos $-2,8 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ a $1 \mu\text{A}$; hasta $-1,5 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ a 10 mA .

El estudio teórico de esta técnica de compensación es muy complicado y es difícil de llegar a una solución teórica buena.

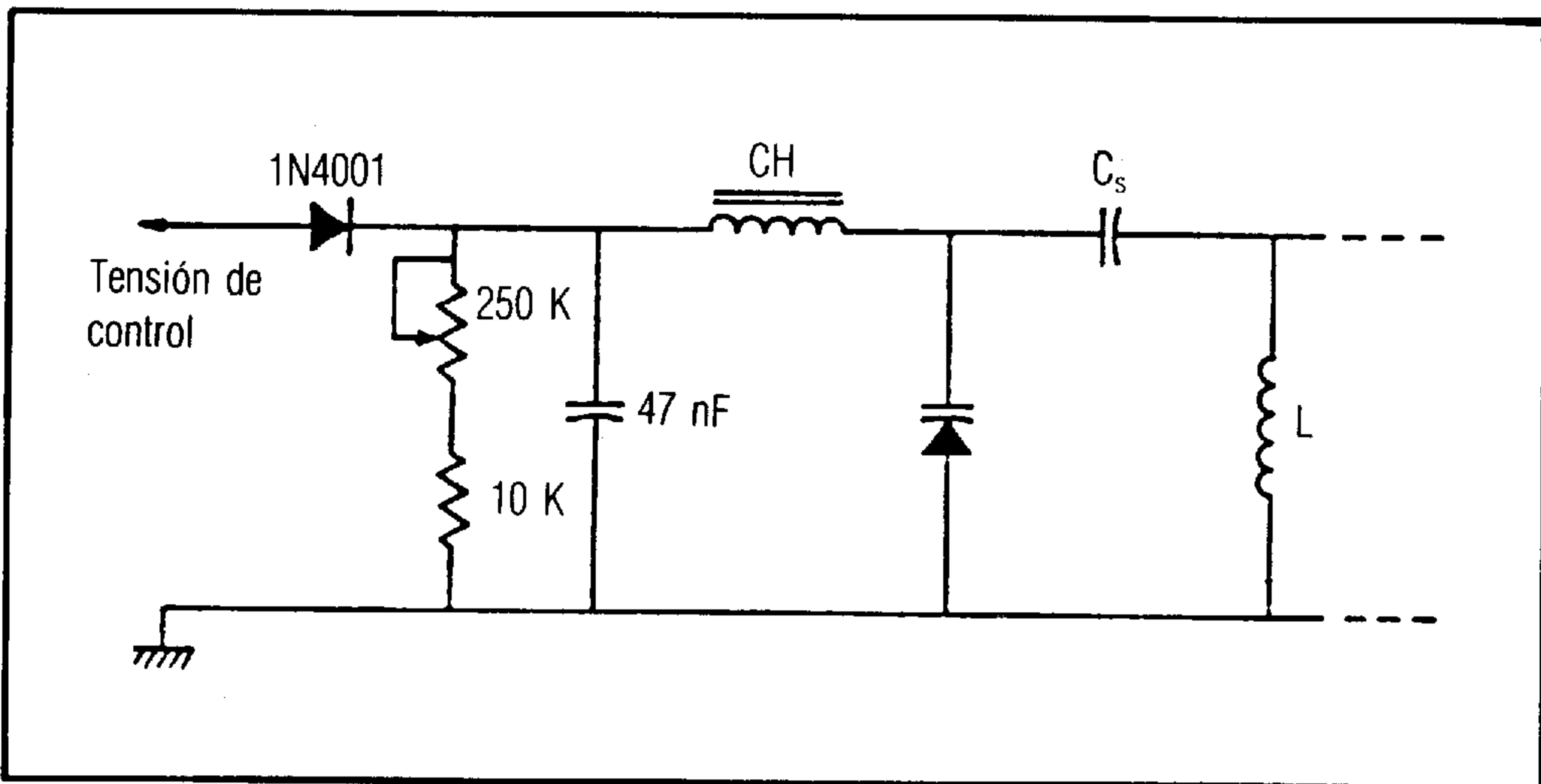


Figura 10. Circuito de compensación térmica.

Como explicación del efecto de compensación diremos que la causa del coeficiente de temperatura positivo en el varicap es la disminución del potencial de contacto de la unión con la temperatura, repercutiendo en una disminución de l y un aumento de capacidad. El diodo de silicio en serie produce el mismo efecto pero utilizado de manera inversa, con lo cual se compensan los cambios de temperatura. El problema es ajustar la corriente en el diodo de silicio a fin de

conseguir el coeficiente de temperatura opuesto al del diodo varicap, para ello utilizaremos la resistencia ajustable de $250 \text{ k}\Omega$ que retocaremos para la menor variación de frecuencia del oscilador ante cambios de temperatura. Este ajuste se hará en la tensión media de funcionamiento.

Antes de efectuar el ajuste anteriormente mencionado se deberá compensar el resto del circuito sustituyendo el varicap por un condensador de su capacidad (véase *CQ Radio Amateur*, núm. 9, pág. 18).

La alimentación del oscilador y de la tensión de control se obtendrá de un regulador tipo 78L08 o similar que suministrarán 100 mA con gran estabilidad y regulan bien con una entrada de $13,5 \text{ V}$.

Si se va a utilizar el VCO para controlar la frecuencia de un equipo, el potenciómetro R_p se aconseja sea uno de diez vueltas bobinado de precisión.

El choque de alimentación del varicap es idéntico al descrito en *Diseño de osciladores de frecuencia variable*, que lleva el transistor T_1 .

Algunos diseñadores en vez del choque, alimentan al diodo varicap con una resistencia de elevado valor. Dicho sistema tiene el inconveniente de que la tensión de radiofrecuencia polariza al diodo varicap y le hace aumentar la tensión continua entre sus terminales, con lo cual el circuito pierde estabilidad.

Bibliografía

1. Fundamentos físicos de los dispositivos electrónicos. Univer Internacional.
2. Electrónica física y modelos de circuitos de transistores. P.E. Gray y D. De Witt. Editorial Reverté.
3. RF Semiconductors. Motorola.
4. Tuner diodes. Miniwatt.

A todos los

Y SEGUIDORES DE LA ELECTRONICA

LOS LIBROS QUE PUBLICA

marcombo

LA EDITORIAL ESPECIALIZADA DE
MAS PRESTIGIO DE TODA EL AREA
HISPANOPARLANTE

ELECTRICIDAD • RADIO • TELEVISION
ELECTRONICA • INFORMATICA • ETC. ETC

CADA MES ADQUIERA **CQ Radio Amateur**
LA REVISTA DEL RADIOAFICIONADO

EDICION ESPAÑOLA DE
BOIXAREU EDITORES
EDITORES DE "MUNDO ELECTRONICO"
Y "ACTUALIDAD ELECTRONICA"

Solicítelos a su librero habitual o examínelos en GRAN VIA DE LES
CORTS CATALANES, 594 (frente Universidad) Barcelona

MANUAL DEL RADIOAFICIONADO MODERNO

SERIE: mundo electrónico

TELEVISION DIRECTA POR SATELITE

SERIE: mundo electrónico

SU PRIMER ORDENADOR

ROBERT ZINS

MAS DE 450 TITULOS