



ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad
y Computación



BIBLIOTECA
CENTRAL

“Diseño y Construcción de un Troceador Clase B
Conmutado por Corriente”

INFORME TECNICO

Previo a la obtención del título de:

INGENIERO ELECTRICO

ESPECIALIZACION: ELECTRONICA

Presentada por:

Manuel Chalén Guerrero

Marco Díaz Medina

Edwin Escobar Medina

Edison Panchana Tigrero

Alex Plazas

Jorge Ramírez Ortiz

Sara Rios Orellana

Guayaquil - Ecuador

1996

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL
FACULTAD DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

**“Diseño y Construcción de un Troceador Clase B
Conmutado por Corriente”.**

INFORME TÉCNICO

Previo a la obtención del título de:

INGENIERO ELÉCTRICO

ESPECIALIZACIÓN: ELECTRÓNICA

presentada por:

**Manuel Chalén Guerrero
Marco Díaz Medina
Edwin Escobar Medina
Edison Panchana Tigrero
Alex Plazas
Jorge Ramírez Ortiz
Sara Ríos Orellana**

Guayaquil - Ecuador

1996

AGRADECIMIENTO

A nuestros Padres por su constante apoyo

Al Ing. Alberto Larco, Profesor del Tópico, por su ayuda y colaboración para la realización de este proyecto.

DEDICATORIA

A nuestros Padres y hermanos.

RESUMEN

En el presente informe técnico se realiza el diseño y estudio teórico, simulado y experimental de un Troceador Clase B Conmutado por Corriente y su control que comanda la velocidad de un motor DC de 12V.

En la primera parte se hace un estudio teórico sobre el funcionamiento de un troceador clase B conmutado por corriente cuyos componentes de switcheo son los SCR de potencia. A partir de las características nominales del motor y de los elementos de switcheo se realizó el cálculo de los parámetros del circuito de conmutación. Para el disparo de los SCR se usó una onda controlada por modulación de ancho de pulso.

Partiendo de parámetros prefijados, en el segundo capítulo se realizó el diseño del circuito de control. Para tal efecto el circuito fue dividido en etapas y se procedió a analizar y diseñar una por una de acuerdo a los requerimientos de funcionamiento final.

En el tercer capítulo se realizó la simulación del circuito de fuerza y del circuito de control, usando para tal propósito el programa Pspice bajo ambiente de Windows. Se incluyen los archivos de salida de las diversas etapas y los gráficos de los diferentes voltajes y corrientes que se obtuvieron.

En el cuarto capítulo se analizan los resultados que se obtuvieron experimentalmente y se realiza una comparación con la simulación y con los datos teóricos. También se incluyen diversas gráficas obtenidas experimentalmente durante las pruebas del troceador y su control.

Finalmente se presenta un estudio económico sobre el precio total de construcción de un troceador de estas características, incluyendo los valores de los elementos de la parte de fuerza, de conmutación y de control.



ÍNDICE GENERAL

RESUMEN .	IV
INDICE GENERAL .	. V
ÍNDICE DE FIGURAS .	Vii
INTRODUCCIÓN .	. 9
CAPITULO I TROCEADORES	
1.1. Funcionamiento Básico .	10
1.2. Tipos de Troceadores .	11
1.3. Análisis del circuito de fuerza cuando trabaja en el primer cuadrante .	14
1.4. Análisis del circuito de conmutación por corriente del troceador cuando trabaja en el primer cuadrante. .	16
1.5. Diseño del circuito de conmutación	25
1.6. Resultados de los cálculos realizados para el diseño del circuito de conmutación. .	26
1.7. Circuito de fuerza del troceador clase B .	29
1.8. Conmutación de un troceador clase B .	35
CAPITULO II CIRCUITO DE CONTROL	
2.1. Características del circuito de control .	39
2.1.1 Funcionamiento básico del troceador y su control	39
2.2. Regulador de frecuencia .	43
2.3. Generador de rampa	44
2.4. Comparador .	48
2.5. Circuito inversor y RC .	49
2.6. Generador del pulso principal VG1 .	50
2.7. Generador del pulso de conmutación VG11 .	53
2.8. Generador del primer tiempo de separación .	56
2.9. Generador del pulso principal VG2.	58
2.10. Generador del pulso de conmutación VG22 .	61
2.11. Generador del segundo tiempo de separación .	63

CAPITULO III SIMULACIÓN DEL TROCEADOR

3.1. Simulación del circuito de fuerza del troceador .	66
3.2. Simulación circuito de control del troceador .	81
3.2.1. Simulación del circuito regulador de frecuencia .	81
3.2.2. Simulación del circuito generador de rampa .	84
3.2.3. Simulación del circuito comparador	87
3.2.4. Simulación del circuito generador del pulso principal VG1	92
3.2.5. Simulación del circuito generador del pulso de conmutación VG11 .	98
3.2.6. Simulación del circuito generador del primer tiempo de separación.	102
3.2.7. Simulación del circuito generador del pulso principal VG2	105
3.2.8. Simulación del circuito generador del pulso de conmutación VG22. .	111
3.2.9. Simulación del circuito generador del segundo tiempo de separación .	115

CAPITULO IV RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.1. Respuestas del circuito de fuerza del troceador .	118
4.2. Respuestas del circuito de control del troceador .	122
4.3. Listados de componentes .	129
4.3.1 Datos del motor usados en la parte experimental .	131
4.4. Diseño del circuito impreso y construcción de la tarjeta.	131

CAPITULO V CONSIDERACIONES ECONÓMICAS

5.1. Costo de los diferentes componentes .	136
5.2. Análisis de costos	139

CONCLUSIONES .	140
----------------	-----

BIBLIOGRAFÍA	142
--------------	-----



ÍNDICE DE FIGURAS

NO.	Pag.
1.1. Funcionamiento Básico	10
1.2. Tipo de Troceadores	12
1.3. Troceador Tipo B	13
1.4. Troceador Tipo E	14
1.5. Troceador clase A conmutado por corriente	17
1.6. Funcionamiento Básico del troceador y su control	20
1.7. Circuito de fuerza del Troceador clase 5	29
1.8. Principios Básicos del Troceador Clase 5	31
1.9. Principios Básicos del Troceador Clase B	32
1.10. Conmutación del Troceador Clase 5	37
2.1. Funcionamiento básico del Troceador y su control	41
2.2. Diagramas de tiempo	41
2.3. Diagrama de tiempo del Regulador de frecuencia	43
2.4. Regulador de Frecuencia	44
2.5. Generador de rampa	45
2.6. Esquema del Generador de Rampa	47
2.7. Diagrama de tiempo del generador de rampa	47
2.8. Comparador	48
2.9. Diagrama de Tiempo del Comparador	49
2.10. Circuito inversor y RC	50
2.11. Generador del Pulso principal Q?	51
2.12. Diagramas de tiempo del generador del pulso principal Q1	52
2.13. Generador del pulso de conmutación Q11 54	
2.14. Diagramas de tiempo del generador de pulso Q11	55
2.15. Generador del primer tiempo de separación	57
2.16. Diagrama de tiempo del circuito generador del tiempo t_c	58
2.17. Generador del pulso principal Q2	59
2.18. Diagramas de tiempo del circuito generador del pulso Q2	60
2.19. Generador del pulso de conmutación Q22	61
2.20. Diagramas de tiempo del circuito generador del pulso Q22	62
2.21. Generador del segundo tiempo de separación	64
2.22. Diagramas de tiempo del segundo tiempo de separación	65
3.1. Circuito de fuerza del troceador clase B conmutado por corriente	68
3.2. Respuestas de la simulación	69
3.3. Respuestas de la simulación	70
3.4. Respuestas de la simulación	71
3.5. Respuestas de la simulación	72
3.6. Respuestas de la simulación	73
3.7. Respuestas de la simulación	74
3.8. Respuestas de la simulación	75
3.9. Respuestas de la simulación	76
3.10. Simulación del circuito regulador de frecuencia.	81
3.11. Circuito regulador de frecuencia	82
3.12. Respuestas de la simulación	83
3.13. Simulación del circuito generador de rampa	84
3.14. Circuito generador de rampa	85

3.15	Respuestas de la simulación .	86
3.16	Simulación del circuito comparador	87
3.17	Circuito comparador .	88
3.18	Respuestas de la simulación .	89
3.19	Respuestas de la simulación .	90
3.20	Respuestas de la simulación .	91
3.21	Simulación del circuito generador del pulso principal VG1 .	92
3.22	Circuito generador del pulso VG1 .	93
3.23	Circuito acoplador de los pulso VG1	94
3.24	Respuestas de la simulación .	95
3.25	Respuestas de la simulación .	96
3.26	Respuestas de la simulación .	97
3.27	Simulación del circuito generador del pulso de conmutación VG11	98
3.28	Circuito generador del pulso VG11 .	99
3.29	Respuestas de la simulación .	100
3.30	Respuestas de la simulación .	101
3.31	Simulación del circuito generador del primer tiempo t_c .	102
3.32	Circuito generador del primer tiempo de separación .	103
3.33	Respuestas de la simulación .	104
3.34	Simulación del circuito generador del pulso principal VG2 .	105
3.35	Circuito generador del pulso VG2 .	106
3.36	Circuito generador del pulso VG2 .	107
3.37	Respuestas de la simulación .	108
3.38	Respuestas de la simulación .	109
3.39	Respuestas de la simulación .	110
3.40	Simulación del circuito generador del pulso de conmutación VG22	111
3.41	Circuito generador del pulso VG22 .	112
3.42	Respuestas de la simulación .	113
3.43	Respuestas de la simulación .	114
3.44	Simulación del circuito generador del segundo tiempo t_c .	115
3.45	Circuito generador del segundo tiempo de separación .	116
3.46	Respuestas de la simulación .	117
4.1	Formas de onda experimentales del circuito de fuerza .	120
4.2	Formas de onda experimentales del circuito de fuerza .	121
4.3	Formas de onda experimentales del circuito de control .	124
4.4	Formas de onda experimentales del circuito de control .	125
4.5	Formas de onda experimentales del circuito de control .	126
4.6	Formas de onda experimentales del circuito de control .	127
4.7	Formas de onda experimentales del circuito de control .	128
4.8	Capa superior de la tarjeta 1	132
4.9	Capa inferior con espejo de la tarjeta 1 .	133
4.10	Capa de componentes de la tarjeta 2 .	134
4.11	Capa inferior con espejo de la tarjeta 2 .	135

INTRODUCCION

El troceador es un interruptor situado entre una fuente de corriente continua y la carga, que se abre y se cierra cíclicamente. La tensión media en la carga se controla variando la relación entre el tiempo de cierre y el del ciclo completo (ciclo de trabajo). Si la tensión continua de entrada se interrumpe durante un 10% del ciclo de trabajo, la tensión media en la carga será el 90% de la tensión continua de entrada. Inversamente, se obtiene un 10% de la tensión continua de entrada, interrumpiendo esta tensión durante el 90% del ciclo. La característica resultante del control de potencia depende del tipo de carga (resistiva, inductiva o motor).

Los troceadores electrónicos presentan varias características por las cuales resultan ideales para la conversión de c.c. en c.c. Muchas veces es necesario disponer de una fuente de corriente continua variable, lo cual no plantea problemas con troceadores electrónicos. Su ciclo de trabajo se ajusta fácilmente, lo cual da por resultado un control progresivo de la salida dentro de un amplio margen. Las pérdidas son pequeñas incluso a frecuencias de conmutación elevadas y se obtienen rendimientos de más del 90% en todo margen de control.

Hay que tener presente que una corriente de salida bien filtrada es uno de los principales objetivos al diseñar troceadores para el control de motores, ya que esto evita un excesivo calentamiento del motor. Como los troceadores electrónicos pueden trabajar a frecuencias elevadas, las componentes de ondulación en la carga se suprimen fácilmente empleando un sencillo filtro

Los troceadores electrónicos tienen una larga duración de vida, puesto que el desgaste de sus elementos de control es pequeño o nulo. Los elementos de control pueden ser transistores, tiristores y otros. Estos pueden trabajar indefinidamente y son de pequeño tamaño.

CAPITULO I

TROCEADORES

1.1. FUNCIONAMIENTO BASICO.

Como hemos dicho, los troceadores son empleados para variar el valor promedio del voltaje directo aplicado a una carga introduciendo uno o más tiristores entre la carga y la fuente dc. La función del troceador se ilustra en la fig.1.1



fig. 1.1.

La figura 1.1 muestra que el troceador aplica un tren de pulsos unidireccionales de voltaje a la carga, la magnitud de estos pulsos es el mismo que el de la fuente de voltaje. El voltaje de la carga V_o podrá variar de tres maneras diferentes.

1. Variando t_{on} , mientras el periodo T se mantiene constante (modulación de ancho de pulso).
2. Manteniendo t_{on} constante, mientras que el periodo T varía (modulación de frecuencia).
3. Combinando ancho de pulso y modulación de frecuencia.

Antes de empezar el análisis de un troceador clase **B** cabe mencionar que este actúa como un troceador clase **A** cuando trabaja en el primer cuadrante, por lo tanto tenemos que estudiar su funcionamiento cuando trabaja en este cuadrante ya que esto nos servirá más adelante cuando se esté describiendo al troceador clase B.

1.2. TIPO DE TROCEADORES.

La figura 1.2a muestra el principio básico del troceador tipo A, en el cual tanto V_o como i_o solo pueden ser positivos.

En el diagrama del circuito, el símbolo del tiristor encerrado en un círculo significa que el tiristor debe ser prendido y conmutado a través de elementos no incluidos en el diagrama; note que D1 es un diodo de paso libre.

En la figura también se muestran dos condiciones posibles de operación; se asume que el control es hecho por modulación de frecuencia y de ancho de pulso. Para el Proyecto, el troceador construido tiene un control por modulación de ancho de pulso.

En la fig. 1.2b la corriente de carga es discontinua, así que durante el intervalo en el cual $i_o=0$, $v_o=V_c$.

En la fig. 1.2c el periodo T y el tiempo t_{on} ha sido reducidos de tal manera que i_o no cesa de fluir antes de que Q1 se vuelva a prender. Como

consecuencia tenemos que la salida de voltaje consiste de un tren de pulsos rectangulares de magnitud V .

La figura 1.3 muestra un troceador tipo B, en el cual la corriente de la carga lo puede ser positiva o negativa, pero V_o solo puede ser positivo.



fig. 1.2

Un incremento en la inductancia de carga, o un decremento en el voltaje V_c también nos conduciría a un caso de corriente continua.

Un convertidor de este tipo puede ser empleado con una carga que es capaz de regresar energía a la fuente V .

Este troceador tiene dos tiristores; para la operación con corriente de salida positiva, el tiristor 1 y el diodo 1 son controlados y funcionan exactamente igual que el tiristor y el diodo de la figura 1.2a. Para la operación con corriente de salida negativa, Q2 y D2 son empleados, mientras que Q1 es apagado.

Si $V_c > 0$, y Q2 está prendido, una i_o negativa fluirá y la energía proveniente de la fuente V_c será almacenada en la inductancia L . Si luego Q2 es conmutado, tendremos un valor positivo de V_L , que en conjunción con V_c provocarán que la corriente i_o fluya a través del diodo D2 y la fuente V , entregando de esta manera la energía guardada en la inductancia L a la fuente V .

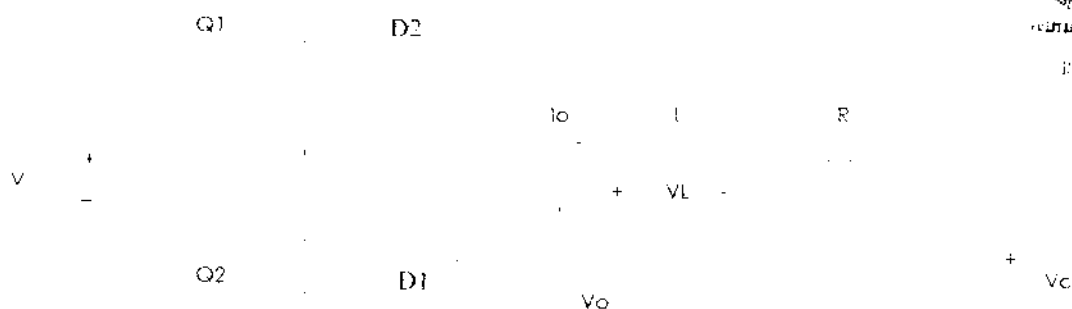


fig. 1.3

En la figura 1.4 vemos un troceador en el cual ambos, V_o e i_o , pueden ser positivas o negativas, separada o simultáneamente. Este tipo de troceador provee ambos, regeneración e inversión de la fuente al circuito de la carga. Si el control es arreglado de tal manera que las inversiones de V_o e i_o ocurran cíclicamente a la misma frecuencia, luego, el convertidor

estará operando como un sistema ac no sinusoidal, y funcionará como un puente inversor monofásico.



fig. 1.4

En la práctica encontraremos troceadores de conmutación de carga y de conmutación forzada, aunque los últimos son los más usados. Dentro de los troceadores de conmutación forzada tenemos: (a) los de conmutación por voltaje, y (b) los de conmutación por corriente. El troceador del proyecto tiene conmutación por corriente.

1.3. ANALISIS DEL CIRCUITO DE FUERZA CUANDO TRABAJA EN EL PRIMER CUADRANTE

Para realizar este análisis utilicemos la figura 1.2 tomando en consideración que el funcionamiento posee una corriente de salida que es continua según como se muestra en la figura 1.2c.

Del circuito de la figura 1.2.a se tiene:

$$-v_o + v_L + v_T + V_c = 0 \quad (1)$$

de donde:

$$\frac{di_o}{dt} - \frac{R}{L} i_o = \frac{v_o - V_c}{L} \quad (2)$$

Cuando el tiristor Q_1 es encendido en $t=0^+$, $v_o=V$, $i_o=I_{cr}$

De la ecuación (2), reemplazando condiciones iniciales se tiene:

$$i_o = \frac{V - V_C}{R} (1 - e^{-t/\tau}) + I_{max} e^{-t/\tau} \quad \text{A} \quad 0 \leq t < t_{on} \quad \text{s} \quad (3)$$

donde

$$\tau = L / R \quad \text{s} \quad (4)$$

En $t=t_{on}$, cuando Q es conmutado,

$$i_o = I_{max} = \frac{V - V_C}{R} (1 - e^{-t_{on}/\tau}) + I_{max} e^{-t_{on}/\tau} \quad (5)$$

Cuando v_o se hace cero debido a la conducción del diodo de paso libre, de la ecuación (2) se tiene:

$$\frac{di_o}{dt'} = - \frac{R}{L} i_o = - \frac{V_C}{L} \quad \text{A/s} \quad (6)$$

$$t' = t - t_{on} \quad \text{s} \quad (7)$$

A $t=0'$, $i_o=I_{max}$, tomando en consideración la ecuación (6)

$$i_o = - \frac{V_C}{R} (1 - e^{-t'/\tau}) + I_{max} e^{-t'/\tau} \quad \text{A} \quad t_{on} \leq t < T \quad (8)$$

A $t' = T - t_{on}$, o $t=T$, $i_o=I_{min}$, reemplazando en la ecuación (8)

$$I_{min} = - \frac{V_C}{R} (1 - e^{-t'(T-t_{on})/\tau}) + I_{max} e^{-t'(T-t_{on})/\tau} \quad \text{A} \quad (9)$$

Resolviendo las ecuaciones (5) y (9), se tiene :

$$I_{max} = \frac{V (1 - e^{-t_{on}/\tau})}{R (1 - e^{-t_{on}/\tau})} = \frac{V_C}{R} \quad \text{A} \quad (10)$$

$$I_{min} = \frac{V (e^{-t_{on}/\tau} - 1)}{R (e^{-T/\tau} - 1)} = \frac{V_C}{R} \quad \text{A} \quad (11)$$

1.4. ANALISIS DEL CIRCUITO DE CONMUTACION POR CORRIENTE DEL TROCEADOR CUANDO TRABAJA EN EL PRIMER CUADRANTE

El troceador cuando trabaja en el primer cuadrante con conmutación por corriente se muestra en la fig. 1.5a. Los dispositivos principales que llevan la corriente son el tiristor Q1 y el diodo de paso libre D1. Los elementos adicionales que no se muestran en la fig. 1.2a son los que se requieren para efectuar la conmutación por corriente; en especial el capacitor C que es cargado y empleado para iniciar la conmutación del tiristor Q1.

La secuencia de operación ocurre de la siguiente manera:

1. El troceador es conectado a la fuente cerrando el switch SW, y el capacitor C es cargado hasta $v_c = V$ volts. a través del resistor R-.
2. En el tiempo $t=0$, cuando el capacitor esta totalmente cargado, el tiristor Q1 es prendido, y la corriente de la carga incrementa exponencialmente desde cero hasta I_{max} .
3. En el tiempo $t=t_{on}$, el tiristor Q2 es encendido, iniciando así el ciclo de conmutación, y una corriente oscilatoria fluye a través del lazo comprendido por C, L1 y Q2; I_c inicialmente es negativa. Se asume que el periodo de conmutación es tan pequeño que lo permanece constante en I_{max} a lo largo de todo el intervalo. También se asume que R1 es lo suficientemente grande como para que I_R no sea tomada en cuenta en el análisis del circuito de conmutación; pero es lo suficientemente pequeña como para permitir que V_c baje hasta el valor de V antes de que el siguiente ciclo de conmutación sea iniciado.
4. Cuando I_c se vuelve positiva, el diodo D2 conduce, Q2 se apaga, y como lo permanece constante, I_c reduce I_{Q1} .
5. Cuando I_{Q1} es reducida a cero debido al incremento de I_c , el diodo D3 empieza a conducir, y la caída de voltaje en este diodo conmuta el tiristor Q1. La corriente que fluye por D3 es $I_c - I_{max}$.

6. Una vez que i_c haya pasado su máximo valor positivo y otra vez se vuelva menor que i_{max} , el diodo $D1$ conduce; formando así un nuevo lazo que comprende C , $L1$, $D2$, $D1$ y la fuente V .
7. El ciclo oscilatorio de i_c se completa, e i_c se vuelve cero, dejando que $v_c > V$.
8. i_c decae exponencialmente a través de $D1$ desde i_{max} ; y simultáneamente v_c decae, a través de $R1$, hasta llegar a ser $v_c = V$.
9. En el tiempo $t = T$, cuando $i_c = i_{min}$; $Q1$ es encendido nuevamente.



fig. 1.5

Para realizar el análisis en detalle del circuito de conmutación una nueva escala es asumida, esto es cuando Q_2 es encendido se considera $t=0$, obteniéndose la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{C} \int i_c dt + L \frac{di_c}{dt} = 0 \quad V \quad (12)$$

aplicando diferenciación:

$$\frac{d^2 i_c}{dt^2} + \frac{i_c}{L \cdot C} = 0 \quad A/s^2 \quad (13)$$

Las condiciones requeridas para la solución de la ecuación (13) son:

$$\begin{aligned} t=0^+ \text{ s.} \\ i_c=0 \text{ A : } v_{c2}=0 \text{ V : } v_c=V \text{ V} \\ v_c + v_{L1} = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

Reemplazando condiciones iniciales en la ecuación (14) a $t = 0^+$,

$$\frac{di_c}{dt} = - \frac{V}{L} \quad A/s \quad (15)$$

De las ecuaciones (13), (15), se obtiene la corriente i_c ,

$$i_c = - \frac{V}{\omega L} \text{ Sen} \omega t \quad (16)$$

mientras que,

$$v_c = V \text{ Cos} \omega t \quad (17)$$

Las ecuaciones (16) y (17) son aplicables al período I del intervalo de conmutación, tiempo en el cual los elementos del circuito oscilatorio son cortocircuitados a través de una sucesión de tiristores y diodos. Las variaciones en el tiempo de i_c y v_c en el intervalo $0 < t < t_2$ son por tanto puramente sinusoidales, tal como se muestra en la figura 1.6

En el instante $t=\pi/\omega$, i_c fluye a través del diodo D_2 , y desde aquí el voltaje en el tiristor principal es cero, los elementos oscilatorios continúan cortocircuitados. Para esta parte del período i_c puede ser considerada en dirección negativa a través de Q_2 , o alternativamente a través de la fuente y la carga. Desde otro punto de vista:

$$i_{L2} = I_{max} - i_0 = I_0 - i_0 \quad A \quad t > \pi/\omega \quad (18)$$

En el instante $t = t_1$, $i_1 = I_{max}$, $i_2 = 0$, y el diodo D_3 empieza la conducción, así, $i_{D3} = i_1 - i_2 = A$ ∴ también $v_{AK3} = -v_{D3} = V$.

QT es conmutado; es decir se hace uso aquí de la naturaleza no ideal de los dispositivos, que ellos poseen una resistencia interna que resulta ser de bajo valor para nuestro análisis.

Cuando QT es conmutado:

$$i_2 = I_0 = \frac{V}{\omega L_2} \sin \omega t \quad A \quad (19)$$

de la cual

$$t_1 = \frac{1}{\omega} \sin^{-1} \left(\frac{\omega L_2 I_0}{V} \right) = \frac{\pi}{\omega} - \frac{+1}{\omega} \sin^{-1} \left(\frac{\omega L_2 I_0}{V} \right) \quad (20)$$

de la fig. 1.6 este $\omega \cdot t_1$ es un ángulo en el tercer cuadrante. En $t = t_2$, i_2 ha pasado su máximo positivo y cae al valor de I_0 . Así

$$t_2 = \frac{2\pi}{\omega} - \frac{1}{\omega} \sin^{-1} \left(\frac{\omega L_2 I_0}{V} \right) \quad (21)$$

$$= \frac{2\pi}{\omega} - t_1 + \frac{\pi}{\omega} = \frac{3\pi}{\omega} - t_1 \quad (22)$$

En este instante, en la cual finaliza el periodo t de el intervalo de conmutación, el diodo D_1 tiende a conducir, puesto que i_0 es constante e i_C decrece. El resultado conduce D_1 , sin embargo, sería que v_0 se hace cero, y puesto que $v_C < V$, i_C debería tender a subir, apagando D_1 . Esta aparente contradicción surge fuera de la asunción simplificada original que por todo el periodo de conmutación i_0 permanece constante en I_{max} . Esto por tanto debe ser considerado que resulta en un corto intervalo durante la cual el capacitor es cargado a una corriente constante $i_C = I_0$, hasta $v_C = V$. Durante este intervalo de carga, la cual es llamado periodo II de el intervalo de conmutación,

$$v_0 = V - v_C = V \quad (23)$$

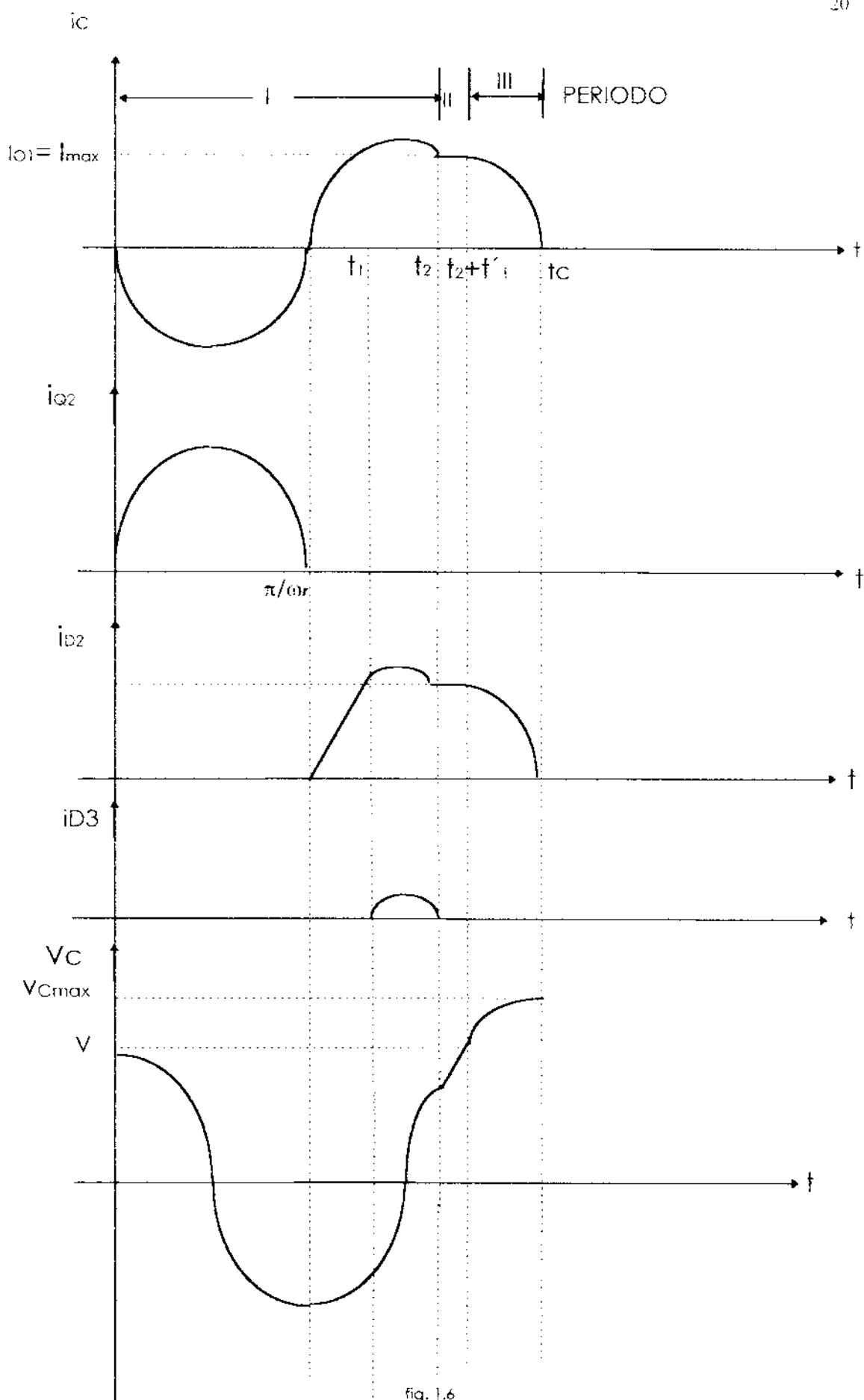


fig. 1.6

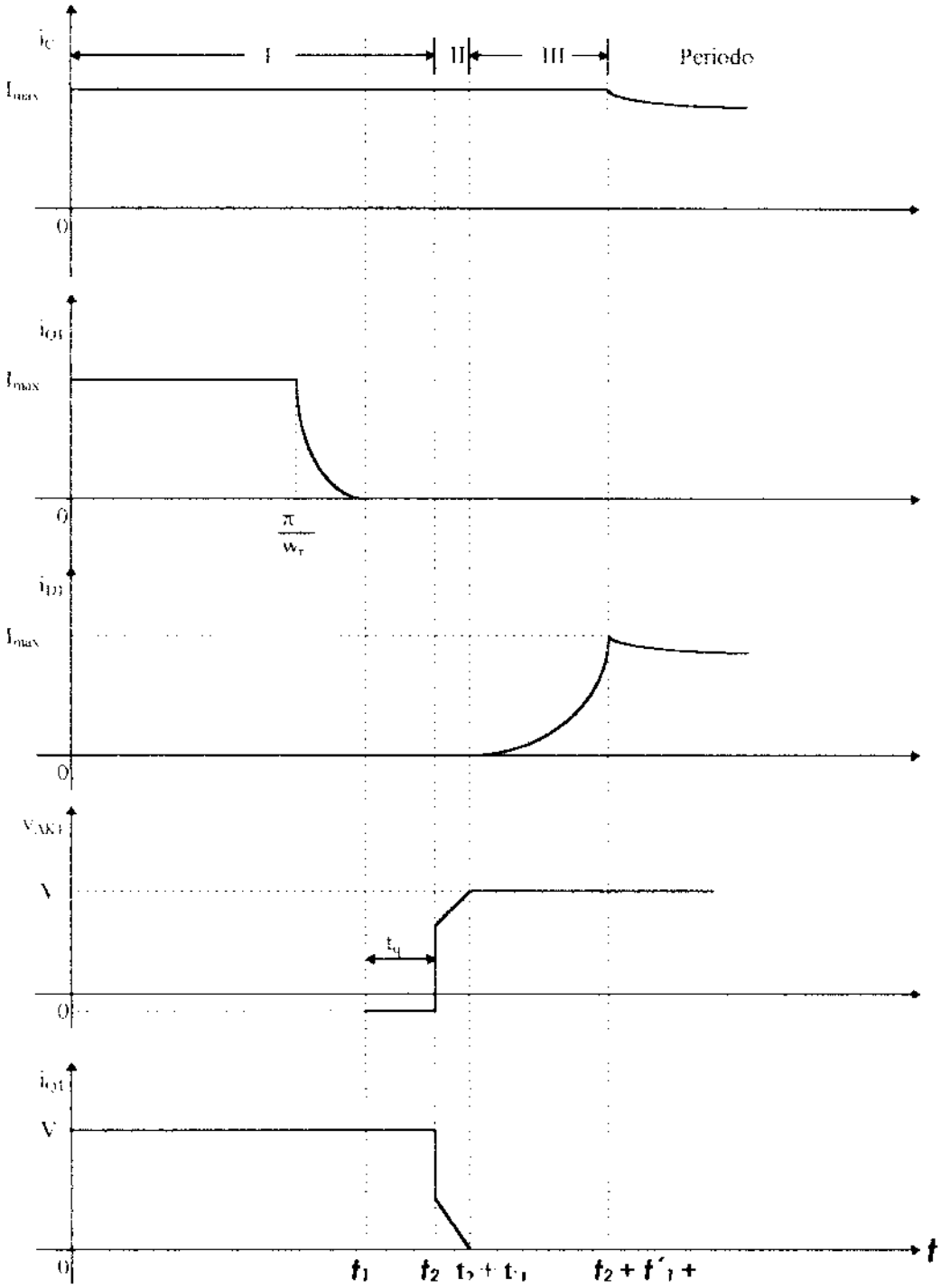


Fig. 3.6. Continuación

Esto implica que mientras un voltaje aparece a través de la inductancia L tal que $v_{AK} = -v_L$, todavía i_c no varía apreciablemente desde el valor I_{max} ...

También en el instante $t = t_{\text{cr}}$, D_2 cesa de conducir, tal que el voltaje inverso es removido de el tiristor Q_1 , y para el lazo externo de la fig. 1.5a

$$-V + v_{\text{AK}} + v_C = 0 \quad V \quad (24)$$

y sustituyendo para v_C en la ecuación (23) produce

$$v_{\text{AK}} = v_C = V \quad (25)$$

es decir, un voltaje directo es aplicado al tiristor Q_1 como muestra la figura 1.6.

El circuito equivalente para el periodo II en el intervalo de conmutación se muestra en la fig. 1.5b, puesto que $i_C = 0$. Así

$$\bar{i}_C = I_C = C \frac{dv_C}{dt} \quad A \quad (26)$$

donde

$$t' = t - t_{\text{cr}} \quad s \quad (27)$$

en $t = t_{\text{cr}}$ de la ecuación (17),

$$v_C = v_{C0} = V \cos \omega t_{\text{cr}} \quad V \quad (28)$$

Así las ecuaciones (26) y (28),

$$v_C = \frac{I_C t' + V_{C0}}{C} \quad V \quad (29)$$

en $t' = t'$,

$$v_C = V = \frac{I_C t' + V_{C0}}{C} \quad V \quad (30)$$

así las ecuaciones (26) y (28)

$$t' = \frac{CV}{I_C} (1 - \cos \omega t_{\text{cr}}) \quad s \quad (31)$$

En el instante que v_C se hace cero, y diodo D_1 empieza a conducir; $i_C = I_C$ ahora se hace la corriente inicial en un circuito oscilatorio comprendido por C , L , D_1 , y la fuente V mostrada en la fig. 1.5c. La corriente en este

circuito debe ser considerada fluyendo en dirección inversa a través de D_1 , es decir

$$i_{D1} = i_0 - i_c > 0 \quad A \quad (32)$$

Para este nuevo circuito oscilatorio, el cual existe durante el periodo III del intervalo de conmutación,

$$v_C + v_{L1} - V = 0 \quad V \quad (33)$$

o

$$\frac{1}{C} \int i_c dt'' + L_1 \frac{di_c}{dt''} - V = 0 \quad V \quad (34)$$

donde

$$t'' = t - t_1 = t - t_0 - t_1 \quad s \quad (35)$$

de la ecuación (34),

$$\frac{d^2 i_c}{(dt'')^2} + \frac{1}{LC} i_c = 0 \quad A / s^2 \quad (36)$$

Las condiciones iniciales para la solución de esta ecuación son

$$i_c = i_0 \quad A; \quad \frac{di_c}{dt''} = 0 \quad A / s; \quad t'' = 0 \quad s \quad (37)$$

y de las ecuaciones (36) y (37),

$$i_c = i_0 \cos \omega_c t'' \quad A \quad (38)$$

i_c se hace cero cuando $t'' = t''_1$ y

$$t''_1 = \frac{\pi}{2\omega_c} \quad s \quad (39)$$

en este momento, toda la energía almacenada en la inductancia L en $t'' = 0$ ha sido transferida al capacitor C , y como consecuencia $v_c > V$. Es necesario determinar este voltaje máximo del capacitor. Así de la ecuación (38)

$$v_c = \frac{1}{C} \int i_0 \cos \omega_c t'' dt'' \quad V \quad (40)$$

también

$$v_c = V \quad V; \quad t'' = 0 \quad s \quad (41)$$

así de las ecuaciones (40) y (41)

$$v_c = \frac{I_{c0}}{\omega C} \sin \omega t'' + V \quad \text{V} \quad (42)$$

y sustituyendo en la ecuación (39) produce

$$V_{c(\text{max})} = V + \frac{I_{c0}}{\omega C} \quad \text{V} \quad (43)$$

Este voltaje decae a través de R a $v_c = V$, y simultáneamente I_c decae exponencialmente desde el valor $I_{c(\text{max})}$.

La longitud de la commutación total ahora puede ser determinada

$$t_c = t_a + t_1 + t'' \quad \text{s} \quad (44)$$

y de esta expresión podemos expresar el intervalo de commutación como una función de $I_{c(\text{max})}$ y los parámetros del circuito.

La longitud del intervalo de commutación no es importante en el diseño del troceador tipo A.

En el diseño del troceador tipo B, a fin de efectos en la operación debe ser considerado.

Para la curva de v_{ak} en la fig. 1.6 el tiempo disponible para la commutación del tiristor Q es

$$t_{av} = t_2 - t_1 \quad \text{s} \quad (45)$$

y sustituyendo para t_1 y t_2 en las ecuaciones (20) y (21) tenemos

$$t_{av} = \frac{\pi}{\omega} - \frac{2}{\omega} \frac{\sin^{-1}(\omega L I_{c0})}{V} \quad \text{s} \quad (46)$$

La ecuación (46) muestra que el tiempo disponible para apagar el tiristor principal decrece con el incremento de corriente de carga.

1.5. DISEÑO DEL CIRCUITO DE CONMUTACION.

El diseño del circuito de conmutación puede ser llevado a cabo en términos de una cantidad adimensional:

$$x = \frac{V}{\omega_r L_1 |I_0|} = \frac{V}{(L_1/C)^{1/2} |I_0|} \quad (47)$$

Donde $|I_0|$ será la corriente máxima que vaya a pasar a la carga, L_1 la inductancia del circuito de conmutación, ω_r la frecuencia y V el voltaje de entrada; C es el capacitor del circuito de conmutación.

Por lo general el valor de X para un troceador con conmutación por corriente suele estar dentro del rango $1.4 < X < 3.0$. El valor de X debe ser elegido, de tal manera que los parámetros del circuito nos conduzcan a valores aceptables de:

1. Voltaje máximo del capacitor
2. Corriente pico de conmutación del tiristor
3. Pérdidas en el resistor R_1 durante la carga del capacitor.

Sabiendo que :

$$\frac{V_{\text{max}}}{V} = 1 + \frac{1}{X} \quad (48)$$

Entonces $1/X$ será el factor en el cual, el voltaje máximo del capacitor sobrepasa al voltaje de la fuente, valor que deberá tener el voltaje del capacitor al comenzar el ciclo de conmutación.

Ahora bien, si definimos una función $G(x)$ de la siguiente manera:

$$G(x) = \omega_r t_1 = \pi - 2 \sin^{-1} (1/x) \quad (49)$$

Donde

$$t_{\text{off}} = t_{\text{off}} + \Delta t \quad (50)$$

Entonces, podríamos utilizar esta función para determinar los valores de L y C. En la ecuación anterior, t_{off} es el tiempo de apagado específico para el tiristor principal, y Δt es un margen de error, o tolerancia dado por el diseñador del circuito.

Las expresiones para determinar la inductancia y la capacitancia son las siguientes:

$$L_1 = \frac{V (t_{\text{off}} + \Delta t)}{x G(x) I_{\text{off}}} \quad \text{H} \quad (51)$$

$$C = \frac{x I_{\text{off}} (t_{\text{off}} + \Delta t)}{G(x) V} \quad \text{F} \quad (52)$$

Con respecto a la resistencia R1, se sabe que esta debe ser elegida de tal manera que:

$$T \geq 3 R C = 3 \tau \text{ segs.} \quad (53)$$

Ya que, si este no fuera el caso, no habría tiempo suficiente como para que el voltaje del capacitor caiga de V_{max} a V antes de que el siguiente ciclo de conmutación haya empezado.

1.6. RESULTADOS DE LOS CALCULOS REALIZADOS PARA EL DISEÑO DEL CIRCUITO DE CONMUTACION.

Para el cálculo de los valores de los elementos del circuito de conmutación, se siguió el proceso descrito anteriormente; a continuación mostramos los resultados obtenidos en cada paso del proceso.

Primero debemos anotar que se trabajó a una frecuencia de 11.5Hz., lo que implica un periodo de 8.8 ms.; una corriente $I_{O1} = 15 \text{ A}$. $V=12\text{v}$. Con respecto a los tiristores, debemos indicar que estos tienen un tiempo de apagado de 10usegs., así que para los calculos, asumimos $t_{off} + \Delta t = 40\text{usegs}$.

El valor de x que se ha escogido es de 2.2

Aplicando la ecuación:

$$\frac{V_{cmax}}{V} = 1 + \frac{I}{X}$$

$$\frac{V_{cmax}}{12} = 1 + \frac{1}{2.2}$$

$$V_{cmax} = 17.45 \text{ Volts.}$$

Entonces, según las formulas anotadas anteriormente, tenemos:

$$G(x) = 2.197$$

Por lo tanto:

$$L1 = \frac{V (t_{off} + \Delta t)}{x G(x) I_o} \quad \text{H}$$

$$L1 = \frac{12 * 40\text{useg}}{2.2 (2.197) (15\text{A})}$$

$$L1 = 6.62\mu\text{H}$$

$$C = \frac{x I_{O1} (t_{off} + \Delta t)}{G(x) V} \quad \text{F}$$

$$C = \frac{2.2 (15\text{A}) (40\text{usegs})}{2.197 (12\text{v})}$$

$$C = 50\mu\text{F}$$

Con respecto a la resistencia R , tenemos que:

$$8.80 \text{ msecs} \geq 3R \text{ (50}\mu\text{F)}$$

Entonces:

$$R < 58.66\Omega.$$

Se tomó una resistencia de:

$$R_1 = 20\Omega$$

El voltaje máximo de la capacitancia fue calculado de la siguiente fórmula:

$$V_{c \text{ max}} = V (1 + 1/x)$$

$$V_{c \text{ max}} = 12(1 + 1/2.2)$$

$$V_{c \text{ max}} = 17.45 \text{ V}$$

Para determinar el número de vueltas de la bobina se usó la siguiente igualdad:

$$L = \frac{1.257n^2 S 10^{-9}}{l} \quad (54)$$

Donde:

n : Número de vueltas

S : Sección o área interna de la bobina

l : Longitud de la bobina.

Si de la ecuación antes mencionada despejamos el valor de n obtendremos el número de vueltas deseado.

$$n^2 = \frac{L \cdot l}{1.257 S 10^{-9}}$$

$$n^2 = \frac{6.62\mu\text{H} (10\text{cm})}{1.257 (2.5 \pi) 10^{-9}}$$

$$n^2 = 268$$

$$n = 16.3 \text{ vueltas}$$

1.7. CIRCUITO DE FUERZA DEL TROCEADOR CLASE B.

El circuito de poder del troceador clase B se muestra en la fig. 1.3 presentada anteriormente, y que a continuación se recuerda (fig.1.7).

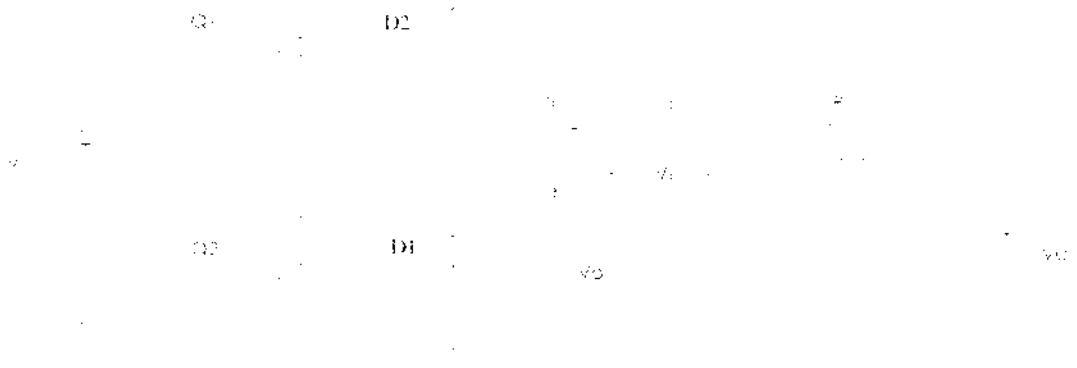


fig. 1.7

Las señales de compuerta para los dos tiristores se muestran en la fig. 1.8, y son asumidas tal que con estas señales de compuerta los valores de V y V_c son tal que la corriente de salida es positiva, y que por tanto el convertidor esta operando en el primer cuadrante de un diagrama de V_o vs i_o .

Después que el convertidor ha sido conmutado por un corto tiempo, este se puede establecer para operar con una variación de tiempo de las variables del circuito tales como se muestran en la fig. 1.8 Las formas de onda de la fig. 1.8 serían comparadas con la fig. 1. 2c.

Cuando se realiza esto, la diferencia entre los dos convertidores son, para la parte del ciclo del troceador clase B, $i_o < 0$, y ocurre debido a la presencia del tiristor Q_2 y diodo D_2 , de otro modo el troceador clase B no puede operar con corriente de carga discontinua. La forma de onda (i_o) de clase B pueden ser partidos en cuatro segmentos, y en la fig. 1.8 el dispositivo semiconductor identico con i_o para cualquier intervalo se indica en la forma de onda de i_o .

Es necesario determinar el parentesco entre las variables independientes T , t_{on} , V , V_c y las variables dependientes en el circuito, de la cual las más significantes son V_o , I_o , y I_s , la fuente de corriente promedio.

Esto sería notado en este estado, puesto que la operación de corriente discontinua no es posible, esto debe ser asumido para propósito de análisis del circuito de poder que no hay intervalo entre el fin de una señal de compuerta y el inicio de otra. Esto es sin embargo mostrado después que la operación del circuito de conmutación requiere un intervalo muy pequeño.

El análisis ya desarrollado en capítulos anteriores para troceador clase A se aplica directamente al circuito, así.

$$i_o = \frac{V - V_c}{R} (1 - e^{-t/\tau}) + I_{min} e^{-t/\tau} \quad A: \quad 0 < t < t_{off} \quad s \quad (55)$$

donde

$$\tau = L / R \quad s$$

$$i_o = -\frac{V_c}{R} (1 - e^{-t'/\tau}) + I_{max} e^{-t'/\tau} \quad A: \quad 0 < t' < t_{on} \quad s \quad (56)$$

donde

$$t' = t - t_{off} \quad s$$

Al sustituir la condición final en la ecuación 1 y 3 y resolver para I_{on} , e I_{off} , y las expresiones para estas dos corrientes son,

$$I_{max} = \frac{V(1 - e^{-t_{on}/\tau})}{R(1 - e^{-t_{off}/\tau})} - \frac{V_c}{R} \quad A \quad (57)$$

$$I_{min} = \frac{V(e^{-t_{off}/\tau} - 1)}{R(e^{t_{on}/\tau} - 1)} - \frac{V_c}{R} \quad A \quad (58)$$

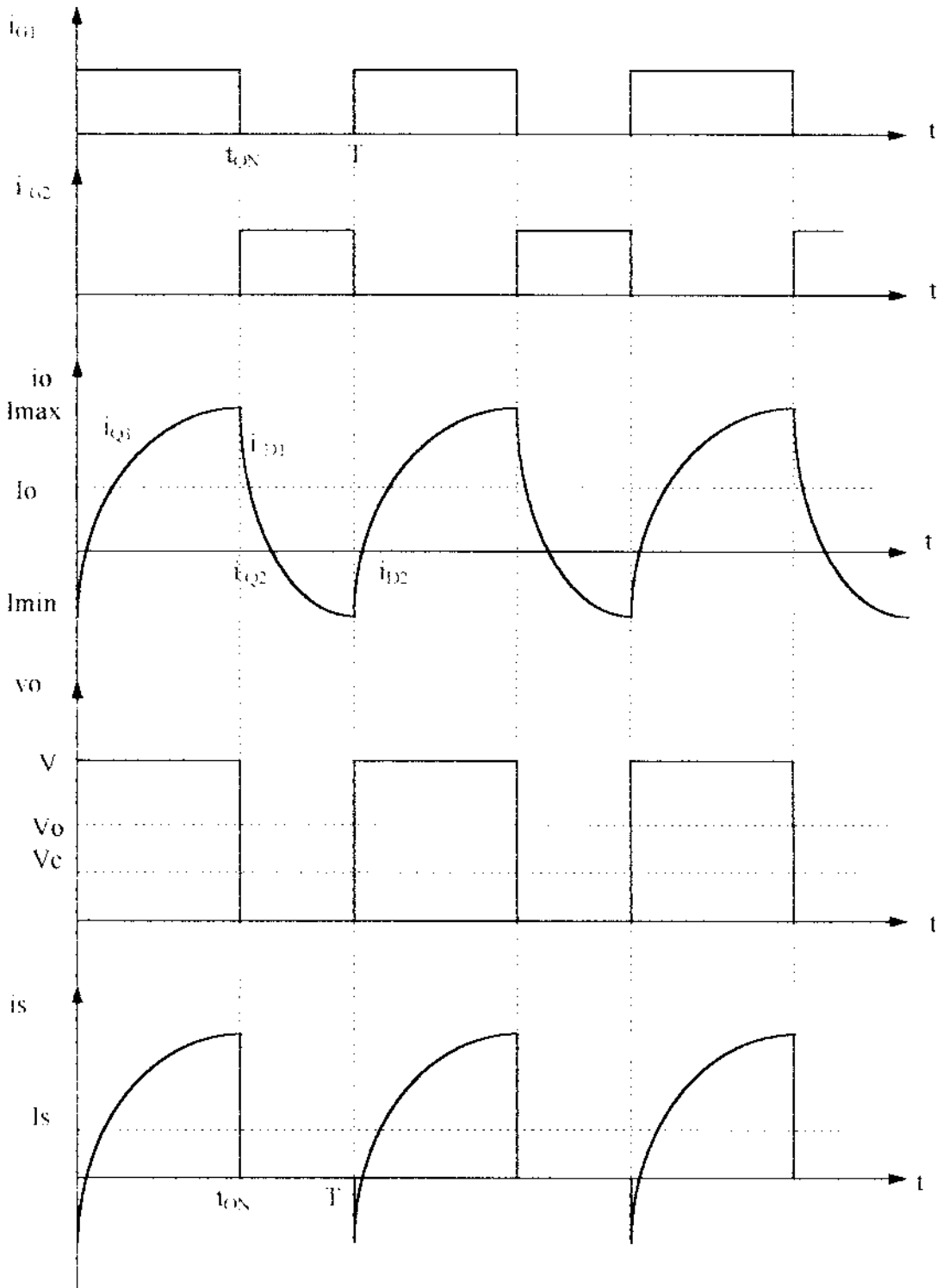


fig. 1.8

Principios Basicos de un Troceador Clase B

Las variables independientes en las ecuaciones (57) y (58) deben ser tal que $i_{min} > 0$. En este caso, el convertidor opera como un simple

troceador clase A con corriente continua de salida. El tiristor Q2 y diodo D2 no conducen durante una parte del ciclo. Esta es operación en el primer cuadrante como lo ilustra la fig. 1.2c.

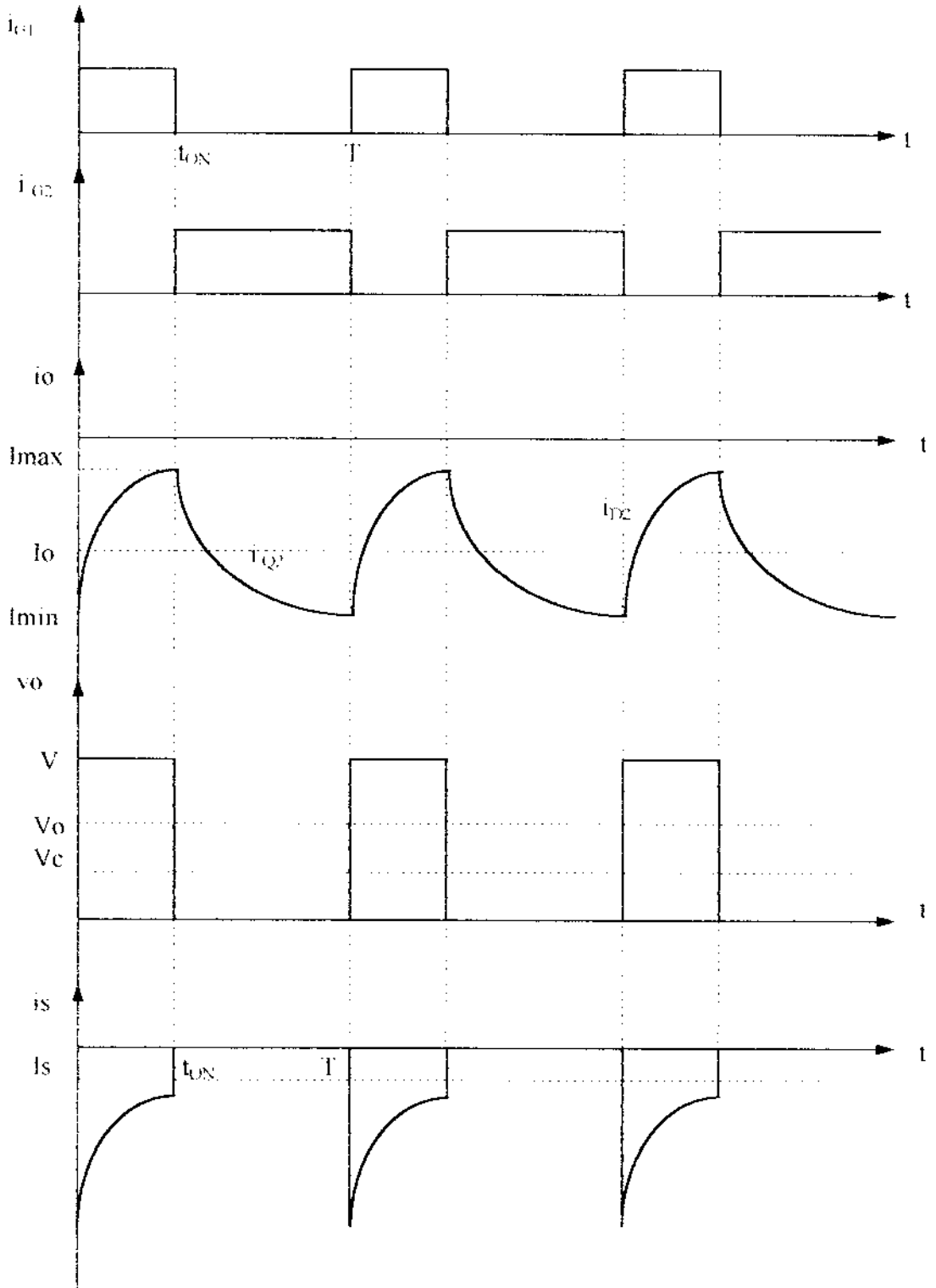


fig. 1.9

Si las variables independientes son tal que $I_{max} > 0$ e $I_{min} < 0$, entonces el resultado debe operación en el primer cuadrante, como lo ilustra la fig. 1.8, donde $I_o > 0$.

Si las variables independientes son tal que I_{max} tiene un valor positivo más pequeño e I_{min} un valor negativo mayor que los mostrados en la fig. 1.8, así que $I_o < 0$, entonces el resultado será operación en el segundo cuadrante.

Para finalizar, si las variables independientes son tal que $I_{max} < 0$, entonces $I_o < 0$, y el resultado es operación en el segundo cuadrante. Bajo estas condiciones, el tiristor Q1 y diodo D1 no conducen durante una parte del ciclo, esta condición se ilustra en la fig. 1.9.

El cuadrante en cual el convertidor esta operando puede ser fácilmente determinado desde los voltajes del circuito de carga. Como en el convertidor tipo A, V_o es siempre definido, y el voltaje promedio es

$$V_o = \frac{t_{on}}{T} V \quad \text{Volts} \quad (59)$$

Si ahora $V_o > V_c$, entonces la potencia promedio fluye al circuito de carga, y el convertidor opera en el primer cuadrante. Si, no obstante $V_o < V_c$, entonces la potencia promedio fluye del circuito de carga a la fuente V_c , y el convertidor opera en el segundo cuadrante. Estas condiciones son ilustradas en la fig. 1.8 y 1.9.

Cuando Q_1 esta continuamente encendido, tal que $t_{on} = T$, entonces.

$$I_{max} = I_{min} = \frac{V - V_c}{R} \quad \text{A} \quad (60)$$

Cuando Q_2 esta continuamente encendido, tal que $t_{on} = 0$, entonces.

$$I_{max} = I_{min} = - \frac{V_c}{R} \quad \text{A} \quad (61)$$

Si las variables independientes son tal que $I_{\text{max}} > 0$ e $I_{\text{min}} < 0$, entonces el resultado debe operación en el primer cuadrante, como lo ilustra la fig. 1.8, donde $I_o > 0$.

Si las variables independientes son tal que I_{max} tiene un valor positivo más pequeño e I_{min} un valor negativo mayor que los mostrados en la fig. 1.8, así que $I_o < 0$, entonces el resultado será operación en el segundo cuadrante.

Para finalizar, si las variables independientes son tal que $I_{\text{min}} < 0$, entonces $t_o < 0$, y el resultado es operación en el segundo cuadrante. Bajo estas condiciones, el tiristor Q1 y diodo D1 no conducen durante una parte del ciclo, esta condición se ilustra en la fig. 1.9.

El cuadrante en cual el convertidor esta operando puede ser fácilmente determinado desde los voltajes del circuito de carga. Como en el convertidor tipo A, V_o es siempre definido, y el voltaje promedio es

$$V_o = \frac{t_{\text{on}}}{T} V \quad \text{Volts} \quad (59)$$

Si ahora $V_o > V_c$, entonces la potencia promedio fluye al circuito de carga, y el convertidor opera en el primer cuadrante. Si, no obstante $V_o < V_c$, entonces la potencia promedio fluye del circuito de carga a la fuente V_c , y el convertidor opera en el segundo cuadrante. Estas condiciones son ilustradas en la fig. 1.8 y 1.9.

Cuando Q_1 esta continuamente encendido, tal que $t_{\text{off}} = T$, entonces,

$$I_{\text{max}} = I_{\text{min}} = \frac{V - V_c}{R} \quad \text{A} \quad (60)$$

Cuando Q_2 esta continuamente encendido, tal que $t_{\text{on}} = 0$, entonces,

$$I_{\text{max}} = I_{\text{min}} = - \frac{V_c}{R} \quad \text{A} \quad (61)$$

Tambiém, puesto que los tiristores considerados son ideales, se cumple que

$$V I_o = V_{cc} I_o = W \quad (62)$$

El resultado del análisis de Fourier del troceador clase A operando bajo condiciones de corriente continua puede ser aplicado directamente al troceador clase B. Así:

$$v_o = V_o + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \sin (n \omega t + \theta_n) \quad \text{Volts} \quad (63)$$

donde

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad \text{rad / s} \quad (64)$$

$$V_o = \frac{t_{on}}{T} V_{cc} \quad \text{Volts} \quad (65)$$

$$c_n = \frac{V_{cc}}{n\pi} \sqrt{1 - \cos n \omega t_{on}} \quad (66)$$

$$\theta_n = \tan^{-1} \frac{\sin n \omega t_{on}}{1 - \cos n \omega t_{on}} \quad \text{rad} \quad (67)$$

De estas expresiones, los valores r.m.s de el voltaje y corriente de salida también como las corrientes armónicas rms y factores de ondulación deben ser determinados.

Los valores promedio, rms máximos de la corriente del tiristor Q1 son idénticos y ocurre durante la operación del primer cuadrante, cuando $t_{on} = t$ se da la ecuación:

$$I_{D(\text{avg})} = I_{D(\text{rms})} = \frac{V - V_c}{R} \quad \text{A} \quad (68)$$

Correspondientemente, los valores máximos para diodo D1 ocurre también durante la operación del primer cuadrante es,

$$I_{D(\text{rms})} = \frac{V}{4R} \left[1 - \frac{V_c}{V} \right]^2 \quad \text{A} \quad (69)$$

$$I_{D2\text{max}} = -\frac{V_c}{2V_c R} \quad \text{A} \quad (70)$$

Los valores promedio, r.m.s. máximos de la corriente del tiristor Q2 son idénticos y ocurre durante la operación del segundo cuadrante, cuando $t_{on} = 0$ se da la ecuación

$$I_{D2\text{max}} = I_{Q2\text{max}} = V_c / R \quad \text{A} \quad (71)$$

Para el diodo D₂ las condiciones nominales pueden ser obtenidas asumiendo nuevamente que la inductancia del circuito de carga es lo suficientemente grande para mantener i_o en un valor constante dando la ecuación

$$I_{D2} = \frac{t_{on}}{T} \left[\frac{V_c}{R} - \frac{V_c}{R} \right] \quad \text{A} \quad (72)$$

La corriente promedio para el diodo es entonces

$$I_{D2} = \frac{t_{on}}{T} \left[\frac{t_{on} V_c}{T R} - \frac{V_c}{R} \right] \quad \text{A} \quad (73)$$

Diferenciando la ecuación 18 con respecto a t_{on} e igualando a cero,

$$t_{on} = \frac{V_c T}{2 V_c} \quad \text{s} \quad (74)$$

y

$$I_{D2\text{max}} = \frac{V_c^2}{4 V_c R} \quad \text{A} \quad (75)$$

Las corrientes máximas en los dispositivos serían en muchos casos controlados por los de retroalimentación que limitan la corriente en el sistema general, deben ser tomados en cuenta aquí también.

1.8. CONMUTACION DE UN TROCEADOR CLASE B

Existen dos tipos de conmutación por corriente para un troceador clase B, a continuación se detalla la conmutación por corriente de tipo 1.

Si el troceador tipo B esta operando en el primer cuadrante, e i_c también es positiva, entonces la explicación del circuito de conmutación dada ya, también es aplicado al circuito de la fig. 1.10a.

Conmutación por corriente tipo I para un troceador clase B

fig. 1.10a		fig. 1.5
Q	corresponde a	Q
D	corresponde a	D
Q ₂	corresponde a	Q ₂
D ₂	corresponde a	D ₂
D ₁	corresponde a	D ₁
C	corresponde a	C
L	corresponde a	L ₁
R ₁	corresponde a	R ₁



El circuito de conmutación empleado para la operación del segundo cuadrante es idéntico como se muestra en la fig.1.5, provee la siguiente correspondencia

fig. 1.10a		fig. 1.5
Q ₂	corresponde a	Q
D ₂	corresponde a	D ₁
Q ₁	corresponde a	Q ₂
D ₁	corresponde a	D ₂
D	corresponde a	D ₁
C ₂	corresponde a	C
L ₂	corresponde a	L
R ₂	corresponde a	R ₁

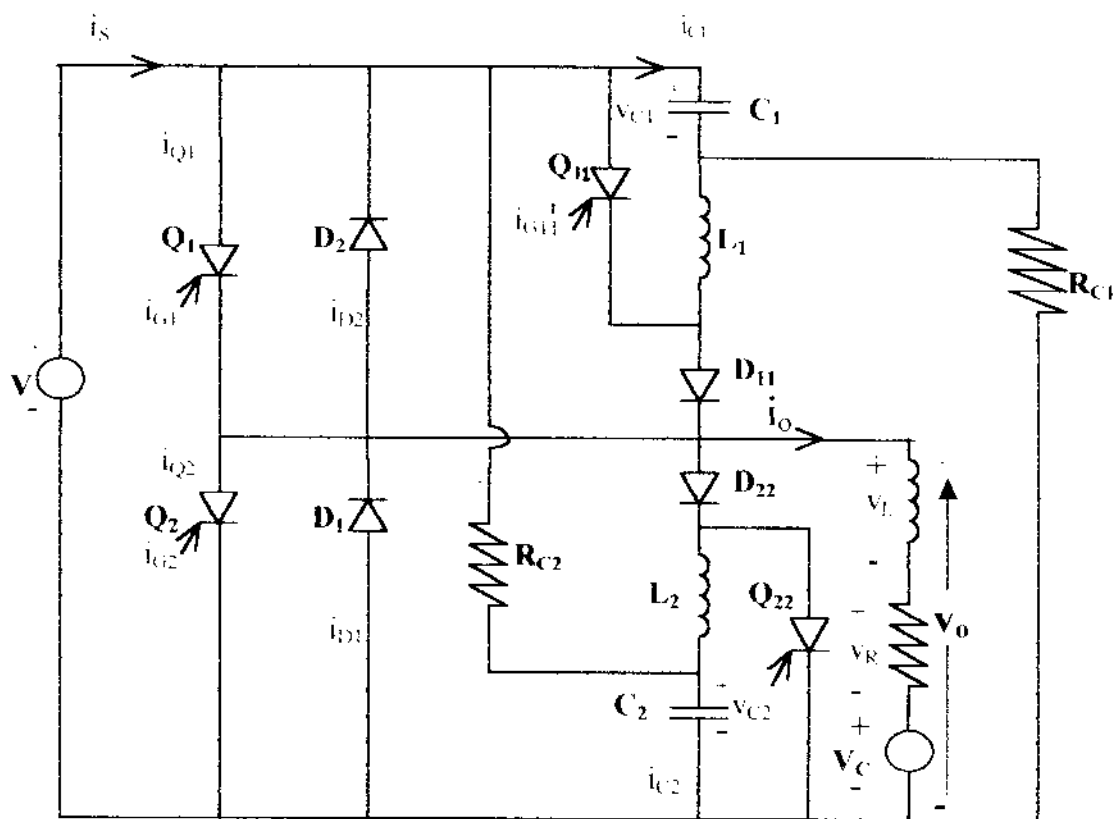


fig. 1.10a

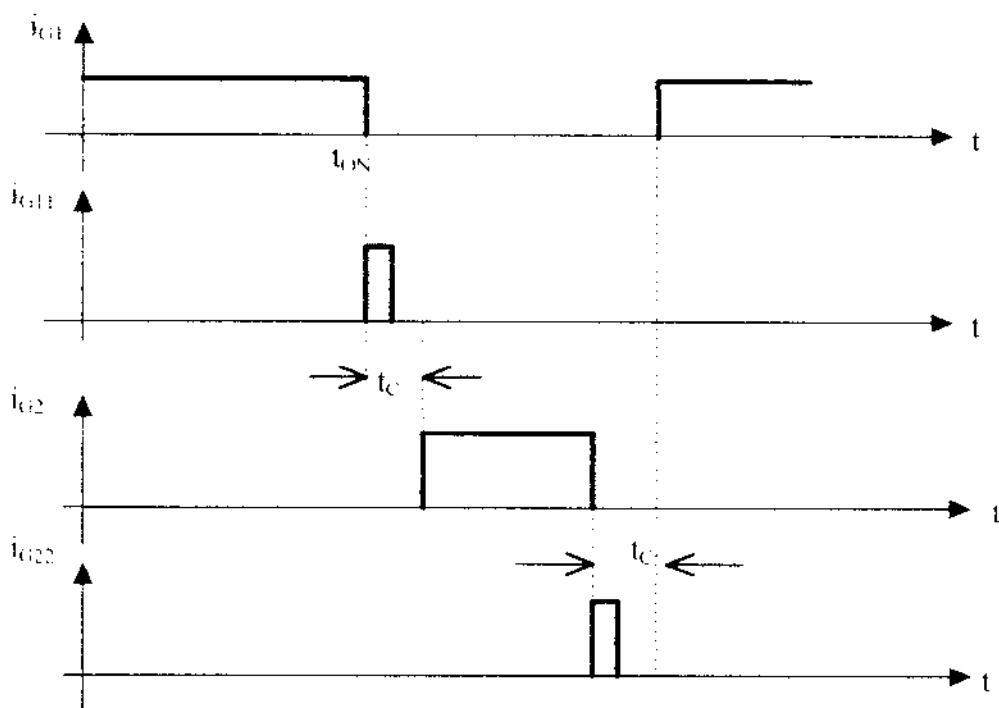


fig. 1.10b

Si el troceador clase B está operando ya sea en el primer o el segundo cuadrante bajo la condición $i_{L_{C1}} > 0$ e $i_{L_{C1}} < 0$, como lo ilustra la fig.

1.8 entonces un intervalo debe ser permitido que transcurra entre el fin de la señal de compuerta para un tiristor principal y el inicio de la señal de compuerta de la otra.

Cuando la señal de compuerta es retirada de Q_1 y Q_2 es encendido para iniciar el ciclo de conmutación, no es lícito encender Q_2 hasta que Q_1 se apague, de otro modo la fuente V se cortocircuitaría. El ciclo de conmutación de Q_1 debe por tanto ser completado, a menos que en el instante $t = t_0$ mostrado en la fig. 1.10b, antes que Q_2 sea encendido. Por tanto en la práctica normal retardar la señal de compuerta en cada uno de los tiristores principales hasta el intervalo de conmutación sea completado en el orden.

El arreglo necesario del disparo de las conpuertas es el de la fig. 1.10b, por otra parte es importante señalar que los cálculos para determinar el valor de los elementos que hacen falta para obtener un circuito como el de la figura 1.10a ya fueron realizados puesto que para el diseño del circuito de conmutación se utilizó como guía gráfica la figura 1.5 y como existe concordancia entre las figuras antes mencionadas se pueden utilizar los mismos valores de elementos, tomando en consireación la correspondencia entre las mismas, así por ejemplo el valor del capacitor C_1 es de $50\mu\text{F}$ puesto que este corresponde al valor de C encontrado anteriormente, el valor de R_1 es igual al valor de R_{12} , al valor de R_2 , esto es 20Ω ; y así sucesivamente.

C A P I T U L O II

CIRCUITO DE CONTROL

2.1. CARACTERÍSTICAS DEL CIRCUITO DE CONTROL.

En las operaciones del circuito troceador ya descrito se asumió que los tiristores principales Q1 y Q2 y los de conmutación Q11 y Q22 eran disparados a instantes apropiados como se indica en la figura 2.2. Analizaremos el funcionamiento de nuestro circuito de control, diseñado para un troceador clase B conmutado por corriente bajo control de ancho de pulso.

Otro requerimiento que debe cumplir el circuito de disparo, es que ejecute un control de ancho de pulso (PWM) sobre el troceador; esto significa que el circuito debe poder cambiar el tiempo en el cual se apaga Q1 y se enciende Q2 manteniendo constante el periodo de 8.8 mseg.

2.1.1. FUNCIONAMIENTO BASICO DEL TROCEADOR Y SU CONTROL

Este troceador requerirá de cuatro señales de disparo. El tiristor principal Q1 será disparado durante un tiempo t_{on} en cada periodo de troceo: este periodo T es mantenido constante.

El tiristor de conmutación Q11 es encendido al final del t_{on} y formará un lazo que apagará a Q1. Este pulso tiene una duración de algunos microsegundos ya que este se autoconmuta debido al circuito oscilatorio L1 y C1.

Luego de un tiempo t_c , suficiente para que el tiristor de conmutación Q11 se dispare y se apague, se enciende Q2 que permanecerá activado por el resto del periodo hasta $T-t_c$.

Al llegar al instante $T-t_c$ se enciende Q22 que formará un lazo que apagará a Q2. Q22 permanecerá prendido por unos pocos microsegundos y luego por la corriente del lazo formado por L_2 y C_2 se autoconmuta. Una vez transcurrido el tiempo t_c se podrá nuevamente disparar a Q1 y repetir todo el ciclo.

Las formas de onda de VG1, VG11, VG2 y VG22 son generadas mediante circuitería electrónica y digital; tal circuito consta de amplificadores operacionales UA/41, LM555, CD4069 y CD4011.

El circuito troceador de la fig. 2.1 consta de cuatro tiristores, dos principales y dos de conmutación. La lógica es generar una onda cuadrada para hacer disparar al tiristor principal Q1, y por la variación del ancho de esta onda cuadrada (modulación de ancho de pulso (PWM)) variar el voltaje DC que le llega a la carga y por ende la velocidad del motor.

Para apagar el tiristor principal Q1 se genera un pulso justo cuando termina la onda cuadrada, esto hace que entre a trabajar el tiristor de conmutación Q11. Pasado un tiempo suficiente t_c para que se apague Q11, se enciende Q2 que también tiene modulación por ancho de pulso. Cuando al final se debe apagar Q2 se dispara Q22.

Se trabajará con una frecuencia fija de 115Hz, la variación de la velocidad se realizará aumentando o disminuyendo el ancho del pulso del tiristor principal (PWM).

La frecuencia o periodo fijo de troceo se genera con un LM555 en configuración astable, cuya onda cuadrada de salida V1 tiene un gran tiempo en alto y mínimo tiempo en bajo. Esta onda sirve de entrada a otro

Luego de un tiempo t_1 , suficiente para que el tiristor de conmutación Q11 se dispare y se apague, se enciende Q2 que permanecerá activado por el resto del periodo hasta $T-t_1$.

Al llegar al instante $T-t_1$ se enciende Q22 que formará un lazo que apagará a Q2. Q22 permanecerá prendido por unos pocos microsegundos y luego por la corriente del lazo formado por L2 y C2 se autoconmuta. Una vez transcurrido el tiempo t_2 se podrá nuevamente disparar a Q1 y repetir todo el ciclo.

Las formas de onda de VG1, VG11, VG2 y VG22 son generadas mediante circuitería electrónica y digital; tal circuito consta de amplificadores operacionales UA741, LM555, CD4069 y CD4011.

El circuito troceador de la fig. 2.1 consta de cuatro tiristores, dos principales y dos de conmutación. La lógica es generar una onda cuadrada para hacer disparar al tiristor principal Q1, y por la variación del ancho de esta onda cuadrada (modulación de ancho de pulso (PWM)) variar el voltaje DC que le llega a la carga y por ende la velocidad del motor.

Para apagar el tiristor principal Q1 se genera un pulso justo cuando termina la onda cuadrada, esto hace que entre a trabajar el tiristor de conmutación Q11. Pasado un tiempo suficiente t_1 para que se apague Q11, se enciende Q2 que también tiene modulación por ancho de pulso. Cuando al final se debe apagar Q2 se dispara Q22.

Se trabajará con una frecuencia fija de 115Hz, la variación de la velocidad se realizará aumentando o disminuyendo el ancho del pulso del tiristor principal (PWM).

La frecuencia o periodo fijo de troceo se genera con un LM555 en configuración astable, cuya onda cuadrada de salida V1 tiene un gran tiempo en alto y mínimo tiempo en bajo. Esta onda sirve de entrada a otro

LM555 con una configuración que nos permite obtener una rampa V_2 . Para el control de velocidad tenemos un potenciómetro mediante el cual obtenemos un voltaje de referencia V_{ref} . Al efectuar la comparación de V_{ref} con V_2 en un $\mu A741$ obtenemos una onda cuadrada V_3 . La intersección de la rampa con un voltaje de referencia (V_{ref}) marca el fin del ton.

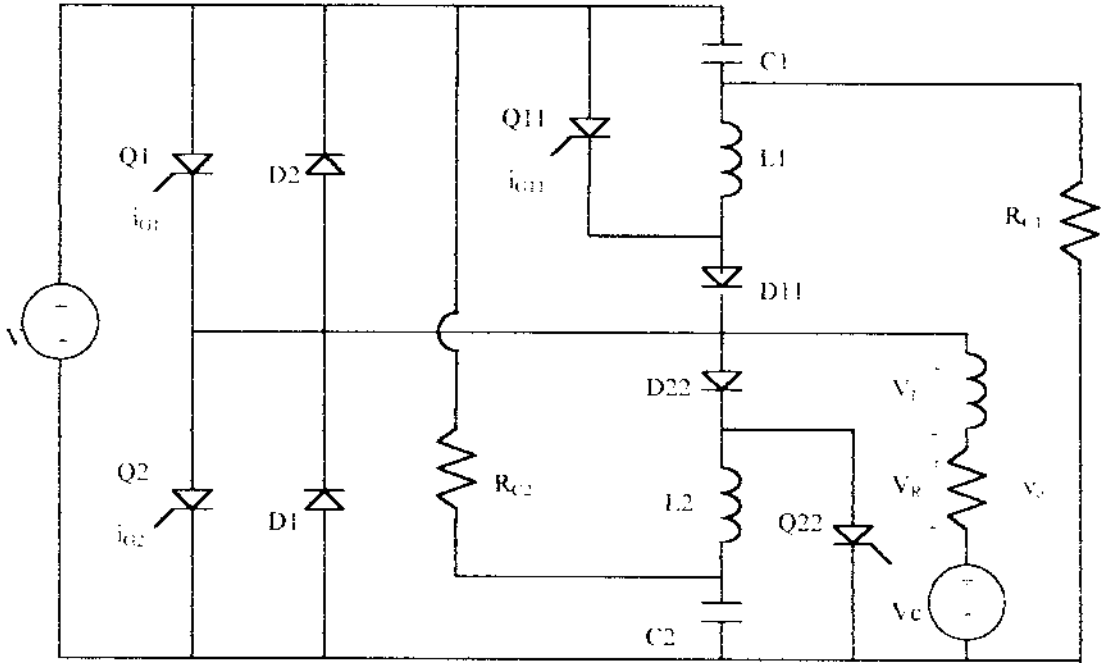


fig. 2.1

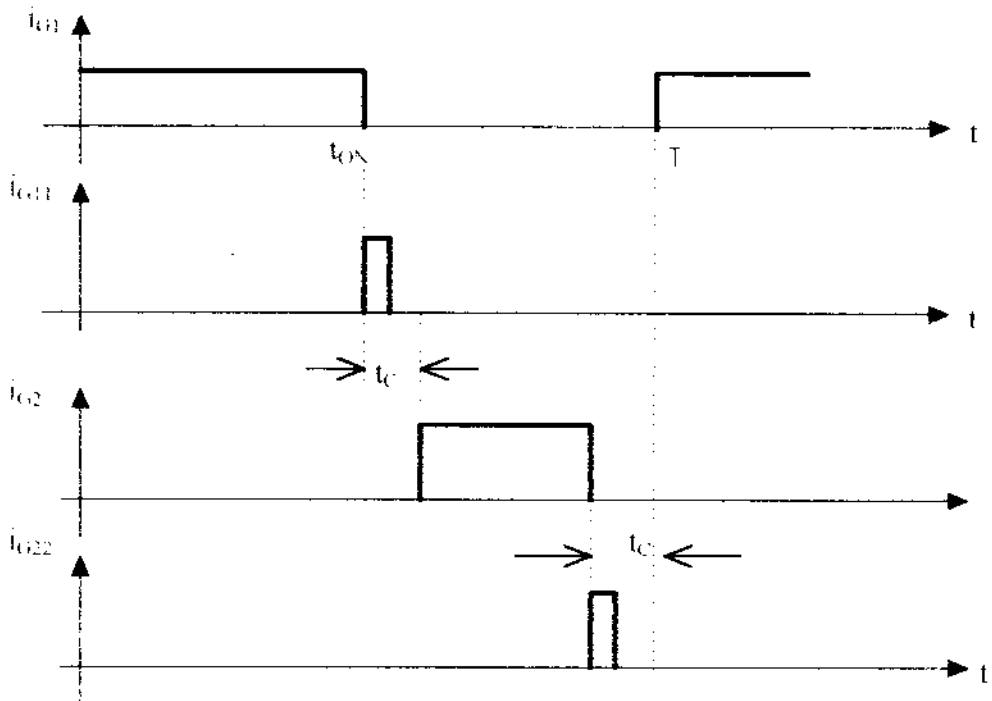


fig. 2.2

La salida V3 del comparador es invertida para obtener un desfase de 180 grados con respecto a la entrada. Esta onda V4 es nuevamente invertida obteniéndose la señal V5, la cual se multiplica con la salida negada del segundo generador del tiempo de separación $\overline{V14}$. La resultante V6 activa a un LM555 en configuración astable que genera la ráfaga de pulsos de alta frecuencia que dispara a Q1. Al tiempo con la señal V3 va al bajo y por ende V5 también. Con el flanco de bajada se activan 2 LM555 en configuración monoestable; el uno genera el pulso de conmutación Q11 y el otro genera un pulso de duración t_c que asegura que cuando se encienda Q2 ya estarán apagados Q1 y Q11.

Usando la señal V4 a través de un circuito RC que provoca un retardo mayor al obtenido en el generador del primer tiempo de separación obtenemos V12. Dicha señal la multiplicamos con la salida negada del primer generador de tiempo de separación $\overline{V11}$ y obtenemos V13 la cual activa a un LM555 en configuración astable. La onda de salida V14 también tiene modulación por ancho de pulso y será la que dispara a Q2.

Luego en el tiempo T-t, la señal V4 va al bajo y con el flanco de bajada se activan los LM555 del generador de pulso de Conmutación Q22 y del segundo Generador de tiempo de separación, los cuales están en configuración monoestable. Para producir los pulsos de disparo, tanto de Q1, Q11, Q2 y Q22 se utilizan transformadores de pulsos; utilizándose una circuitería adicional para poder acoplar estos transformadores al circuito de fuerza; tal circuitería consta de un transistor NPN, resistencias y diodos.

El circuito se lo puede dividir en lo siguiente: Regulador de Frecuencia, Generador de Rampa, Comparador, Circuito Inversor y RC, Generador de Pulso Principal VG1, Generador de Pulso de Conmutación VG11, Generador de Pulso Principal VG2, Generador de Pulso de Conmutación VG22, Generador del Primer tiempo de Separación y Generador del Segundo tiempo de Separación.

2.2. REGULADOR DE FRECUENCIA.

Se ha diseñado un circuito regulador de frecuencia con el fin de poder fijar la frecuencia de troceo del chopper que estamos diseñando. Podría suceder que luego se necesite cambiar la frecuencia y si no lo construimos variable, esto sería imposible. Para tal efecto el resistor R_{a1} en realidad es un potenciómetro, que dependiendo de la frecuencia que se requiera se fija en un determinado valor.

Para diseñar el regulador de frecuencia se usó la configuración astable del LM555, tomando en consideración que la onda de salida tenga la frecuencia de troceo del chopper y que exista solo un pequeño tiempo en el bajo para indicar que un periodo se ha cumplido.

En el multivibrador astable, con $R_{b1}=1K\Omega$, $R_{a1}=36K\Omega$, $f=115Hz$.

$$C1 = \frac{T}{0.69(R_{a1} + 2R_{b1})}$$

$$C1 = 0.0087 / (0.69 * 38K)$$

$$C1 = 0.33\mu f$$

$$t_{ow} = 0.69R_{b1} C1 = 227\mu\text{seg}$$

$$t_{per} = 8472 \mu\text{seg}$$

La siguiente gráfica muestra la onda de salida $V1$ del multivibrador astable, en donde se aprecia el período de 8.8msg. y el tiempo en bajo de 227useg.

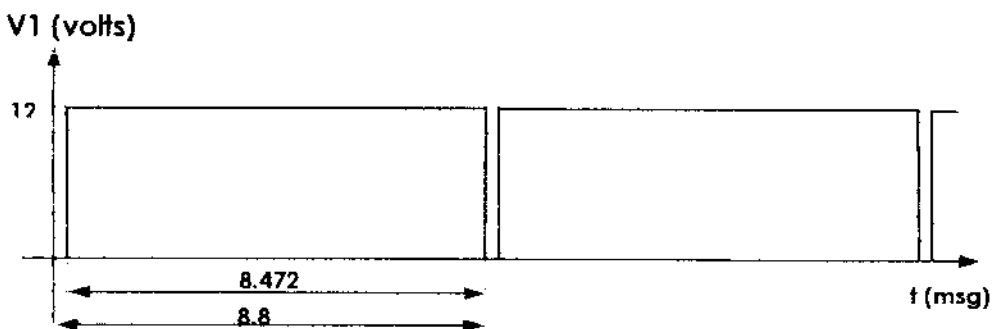


fig. 2.3

La figura 2.4 muestra una de las aplicaciones del LM555 como multivibrador astable.

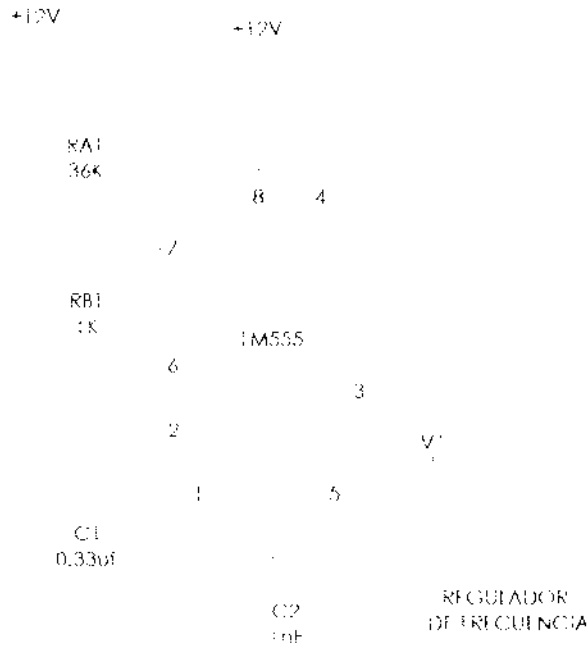


Fig. 2.4

Elementos: Un LM555N.

Dos capacitores cerámicos de 0.33µF y 1nF.

Una resistencia de 1kΩ.

Un potenciómetro de 50KΩ fijado en 36KΩ.

Alimentación de voltaje de +12V.

2.3. GENERADOR DE RAMPA.

Aplicación del LM555 para generar una onda diente de sierra tipo rampa, cuya aplicación es fundamental para el circuito.

El capacitor del circuito en la figura 2.6 se cargará y descargará con una corriente constante. Esto producirá un voltaje lineal de salida.

Observando la configuración interna del LM555 en la figura 2.5 tenemos los voltajes de umbral de los dos amplificadores:

$$V_{-(A1)} = 12 (10 \parallel 5) / \{ [5 \parallel 5 + (10 \parallel 5)] \}$$

$$V_{-(A1)} = 6.856 \text{ V.} = V_{-}$$

$$V_{+ (A2)} = V_{- (A1)} / 2 = 3.43 \text{ V.}$$

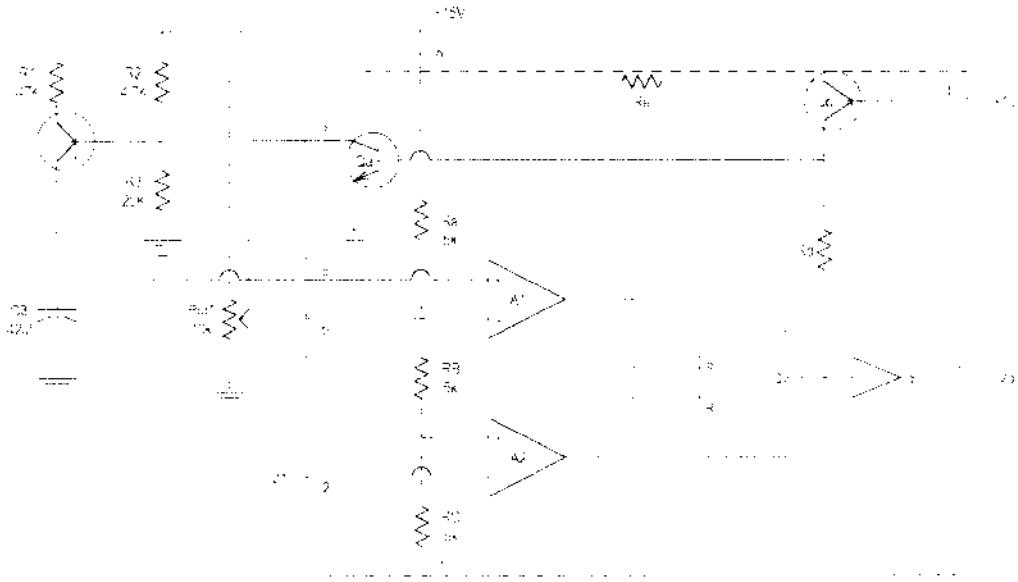


fig. 2.5

Mientras tanto para el análisis de la fuente de corriente constante realizamos un equivalente Thevenin de donde obtenemos lo siguiente:

$$R_{th} = 4.7 \parallel 20 = 3.8K$$

$$V_{th} = 12 (10/24.7) = 9.7 \text{ V.}$$

$$V_{cc} - V_{EB} - V_{th} - R_{th} I_b - R_1 (\beta + 1) I_b = 0$$

$$I_b = 1.59 / 8.5M$$

$$I_b = 0.186 \mu A$$

$$I_c = \beta I_b$$

$$I_c = 180(0.186) \mu A = 33 \mu A$$

$$t_{sig} = C_3 * V_{ce} / I_c$$

$$C_3 = 8472 \text{ useg} * 33 \mu A / 6.85$$

$$C_3 = 41.3 \text{ nf}$$

La señal V_1 ingresa al $V_-(A2)$. Supongamos que V_1 está en alto y que $Q_{n-1} = 0$ entonces Q_a está abierto y $C3$ se está cargando hasta el voltaje máximo V_{cc} . Si $V_1 = 12V$ entonces $V_-(A2) = 12V$ que se compara con $V_+(A2) = 3.43V$ y a la salida obtenemos $R=0$.

El voltaje del capacitor $C3$ corresponde a una rampa ascendente de carga que corresponde a $V_+(A1)$ y $V_-(A1) = 6.856V$ fijos que se comparan y se obtiene S . En este caso $V_-(A1) > V_+(A1)$ y se obtiene $S=0$

Según la siguiente tabla característica tenemos:

S	R	Q_{n-1}
0	0	0
0	1	0
1	0	1
1	1	Φ

que el próximo estado es igual al estado presente y todo continúa desarrollándose igual.

Esto sucede hasta que el voltaje del capacitor $C3$ alcanza su valor máximo y entonces $V_+(A1) > V_-(A1)$ y a la salida del comparador $A1$ tenemos $S=1$. Por otro lado si la forma de onda de V_1 continúa en el alto tenemos $V_-(A2) > V_+(A2)$ y a la salida del comparador $A2$ obtenemos $R=0$.

Según la tabla característica el próximo estado a la salida del flip-flop Q_{n-1} será un alto. Con este valor Q_a se satura y $C3$ se descarga rápidamente obteniéndose $V_2=0$. También $V_+(A1)=0$ y tenemos que $V_-(A1) > V_+(A1)$ y a la salida del comparador $A1$ obtenemos $S=0$ y dado que $R=0$ tenemos que V_2 continuará en cero.

Luego V_1 baja a cero y tenemos que $V_+(A2) > V_-(A2)$ y por ende $R=1$. Con $C3$ descargado $S=0$ continúa siendo verdad. Con estos valores de S y R y según la tabla tenemos que el próximo estado es cero. Con $Q_{n-1} = 0$ Q_a se abre y $C3$ comienza a cargarse nuevamente y todo el ciclo se repite.

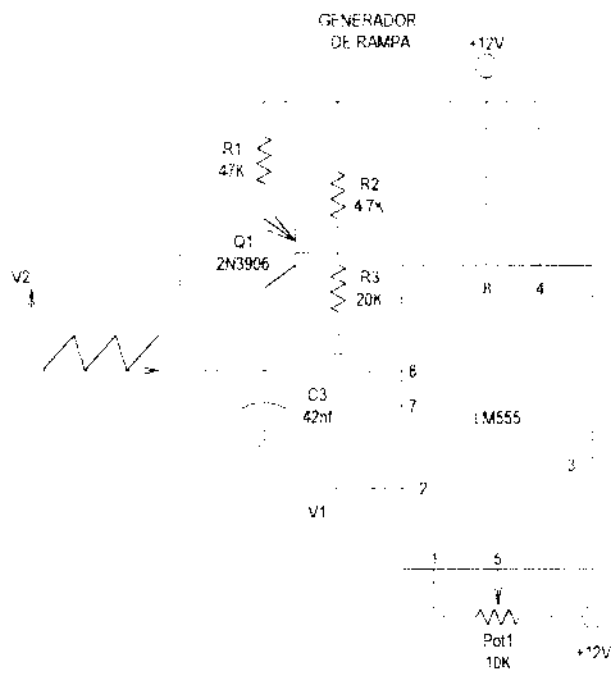


fig. 2.6

En la figura 2.7 se muestra la forma de onda final de la rampa V2 con magnitudes de voltajes y tiempos.

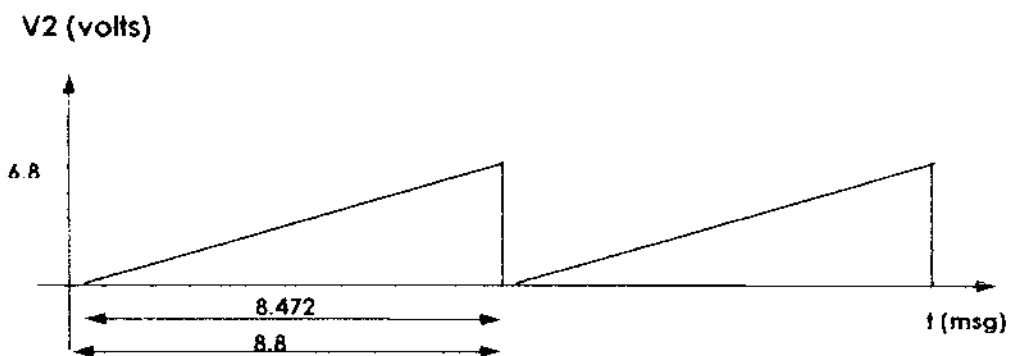


fig. 2.7

Elementos: Un LM555

Tres resistencias de $47k\Omega$, $4.7K\Omega$ y $20K\Omega$

Un capacitor ceramico de 42nf.

Un transistor 2N3906.

Un potenciometro de $10K\Omega$

2.4. COMPARADOR.

Aplicación del LM741 como comparador de la rampa generada en el circuito anterior con un nivel de voltaje DC ajustable (mediante un potenciómetro) como referencia. Se usan voltajes de polarización de +12V y de -2V para obtener a la salida el voltaje V3 ya sea en cero o en el alto.

$$\text{Si } V_2 > V_{\text{ref}} \Rightarrow V_3 = -V_{\text{CC}} + 2V$$

$$\text{Si } V_2 < V_{\text{ref}} \Rightarrow V_3 = +V_{\text{CC}} - 2V$$

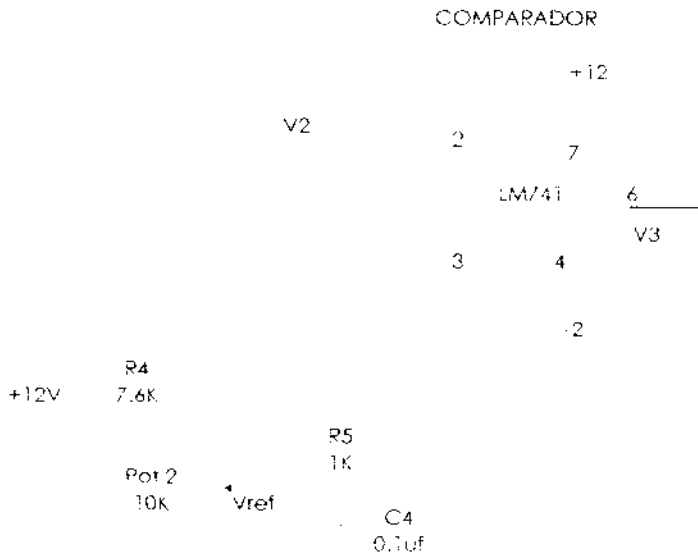


fig. 2.8

Mediante la resistencia R4 de 7,6K se consigue limitar el voltaje máximo de referencia.

$$V_{\text{ref max}} = \frac{12 (R_{\text{pot}})}{(R_4 + R_{\text{pot}})}$$

$$V_{\text{ref max}} = 6,8V$$

El capacitor C4 evita las variaciones bruscas de voltaje que suceden cuando se intenta cambiar rápidamente de velocidad. En la siguiente figura se muestra la forma de onda de la salida V3.

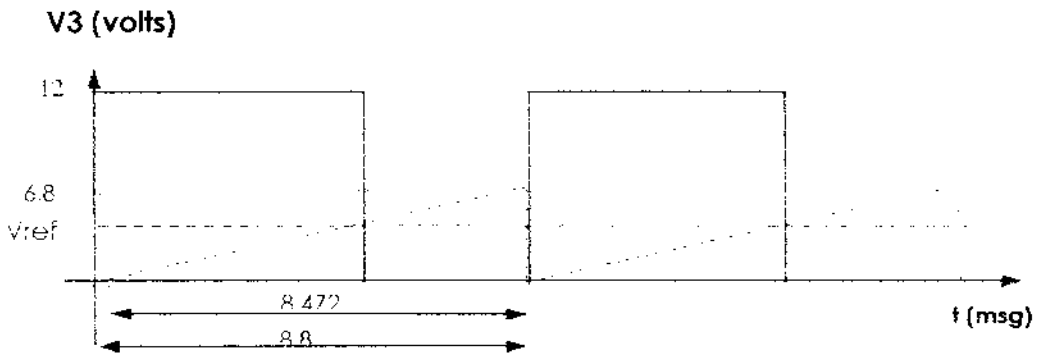


fig. 2.9

- Elementos:
- Un opamp LM741.
 - Resistencias de $7,6K\Omega$, $1K\Omega$.
 - Un potenciómetro de $10K\Omega$
 - Un capacitor de $0,1\mu f$.
 - Alimentación de voltaje de $+12V$ y $-2V$ DC.

2.5 CIRCUITO INVERSOR Y RC

El circuito inversor se usó por 2 motivos. El primero que es fijar los valores de la onda cuadrada V3 tanto en el bajo a cero voltios como en el alto a $12V$, lo cual se consigue pasando V3 por 2 inversores CD4069. La onda resultante es V5.

El segundo motivo era conseguir una onda que fuera el complemento de V3 o desfazar V3 en 180° con la finalidad de usar el fon como referencia para disparar luego de un tiempo t_c a Q2. Al pasar V3 por un inversor CD4069 se obtiene V4 que luego alimenta a un circuito RC que provoca un retardo.

El circuito RC con su retardo es necesario ya que compensa el retardo provocado en el circuito generador del primer tiempo de separación. Calculando τ tendremos una idea del retardo generado.

$$\tau = R6 * C5$$

$$\tau = 1K * 1,8nf$$

$$\tau = 1,8\mu seg$$

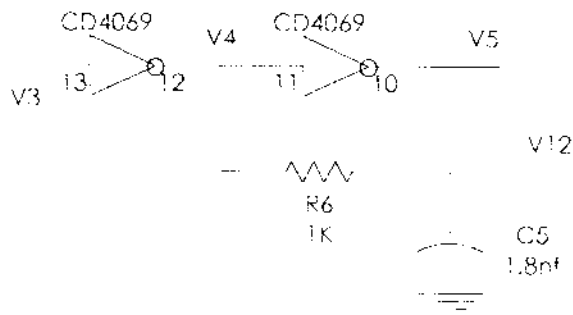


Fig. 2.10

Elementos: Dos inversores CD4069.
Resistencia de 1K Ω .
Un capacitor de 1.8nf.

2.6. GENERADOR DEL PULSO PRINCIPAL VG1.

Aplicación del LM555 como multivibrador en configuración astable, la salida del pin tres del LM555 es el pulso buscado que mediante el transformador de pulsos y una circuitería adicional será acoplado a la puerta del tiristor principal para dispararlo.

Existe una lógica que se conecta al pin 4 del LM555 para activarlo. Esta lógica controla que ya haya transcurrido el segundo tiempo de separación t_c para que pueda activarse el LM555 y generar V7.

La señal de voltaje V6 se aplica al pin 4 o reset del LM555, lo cual permite enviar una ráfaga de pulsos de alta frecuencia en el intervalo definido por el $t_{on} \cdot t_c$.

$$T = 0.69(R7+2R8)C6$$

$$T = 0.69(240+2(1000))0.1\mu F$$

$$T = 154\mu\text{seg}$$

$$f = 6469 \text{ Hz}$$

Una vez que se obtiene la señal V7 esta ya está lista para hacer disparar a Q1, pero para aumentar la corriente de disparo y asegurar que éste se prenda, hacemos que la señal pase por un transistor que tienen un transformador de pulsos conectado a su colector.

El diodo D1 sirve como diodo de paso libre, mientras que D2 rectifica los pulsos. El capacitor C8 evita cambios bruscos de voltaje, es un filtro de altas frecuencias.

Al pin 8 de polarización del LM555 se conectó una red RC para evitar que el pulso VG1 sea disparado a tiempos inadecuados como al principio de la operación, en el arranque en donde se podría provocar un cortocircuito.

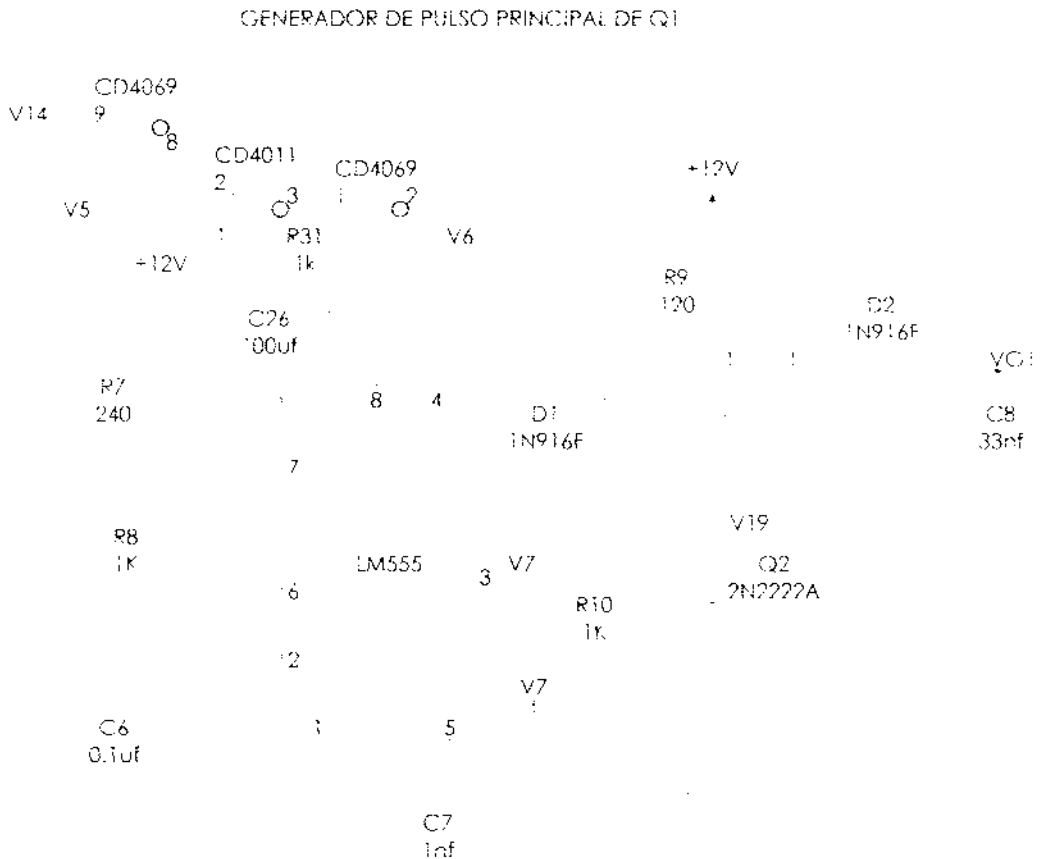


fig. 2.11

A continuación se presentan los gráficos ideales de entrada y salida del presente circuito.

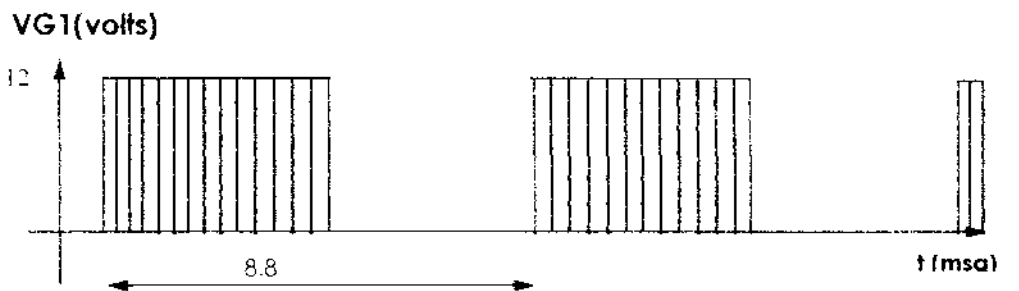
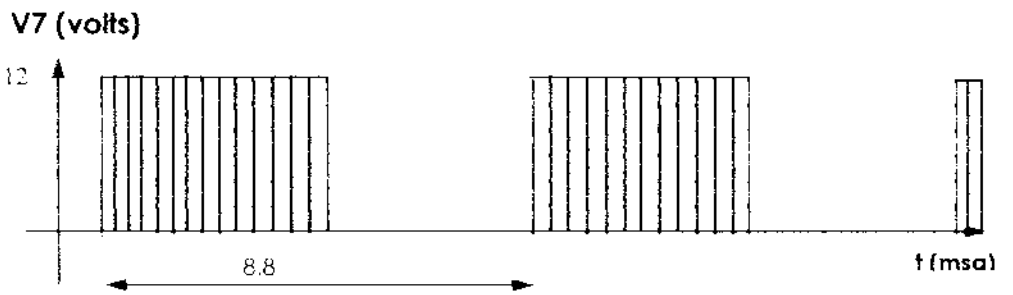
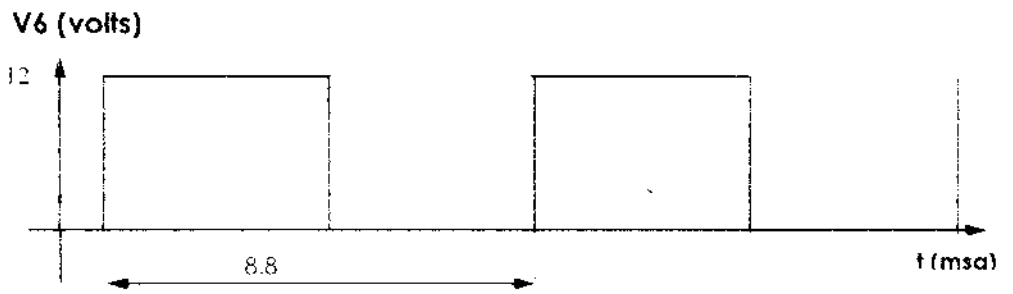
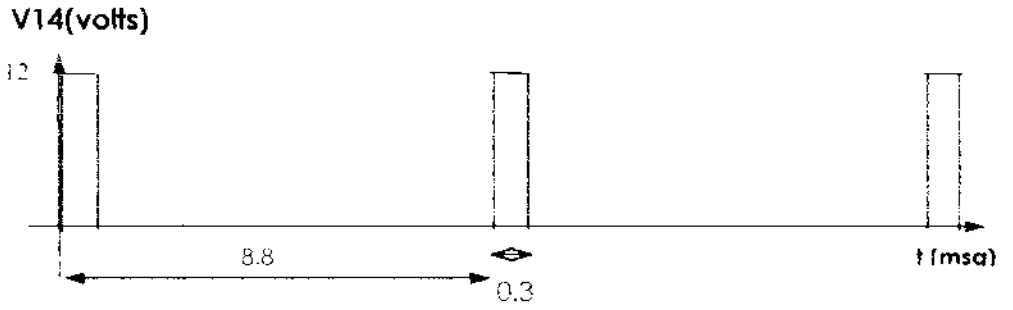
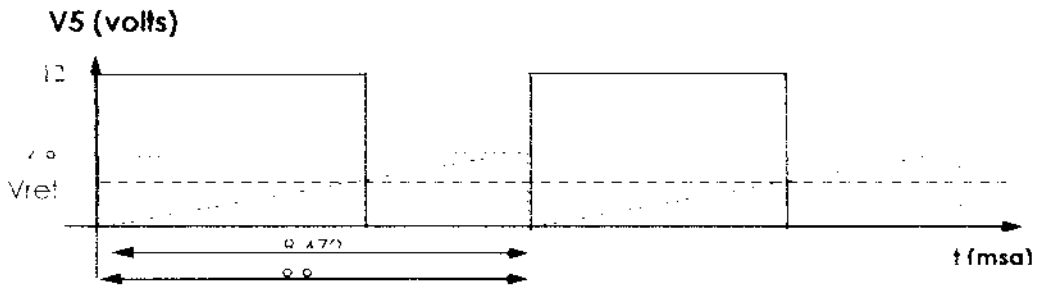


fig. 2.12

Elementos: Un LM555
 Dos inversores CD4069
 Una puerta NAND CD4011
 Resistencias de 240Ω , $1K\Omega$, 120Ω
 3 Resistencias de $1K\Omega$.
 Capacitores cerámicos de $1nf$, $0.1\mu f$ y $33nf$.
 Capacitor electrolítico de $100\mu f$.
 Dos diodos 1N916F
 Un transistor 2N2222A
 Un transformador de 1 a 1
 Alimentación de voltaje de $+12V$ DC.

2.7. GENERADOR DEL PULSO DE CONMUTACION VG11.

Aplicación del LM555 para generar el pulso de conmutación que dispara al tiristor Q11. Tomando la salida del inversor, V5 esta se inyecta a la red que generará los pulsos de conmutación del tiristor Q11. Es de destacar que estos pulsos son regulables, es decir que se puede cambiar el tiempo de duración de los mismos dependiendo del tiempo de apagado de los tiristores que se usen. Estos pulsos están en fase con la terminación de los pulsos del tiristor principal Q1 asegurando de esta manera la conmutación.

La onda cuadrada V5 de la salida del inversor ingresa al diferenciador formado por C9, R11 y R12. Cuando V5 se encuentra en el alto el capacitor C9 se encuentra descargado ya que en el pin 2 tenemos $12V$. El pin 2 del LM555 denominado trigger internamente es el pin V-(A2) y por tanto no circula corriente.

Cuando V5 cambia de un alto a un bajo, C9 comienza a cargarse desde cero, lo que produce en la entrada del pin 2 del LM555 un flanco negativo que activa al integrado, provocando que a la salida en el pin 3 el voltaje V9 vaya al alto por el tiempo requerido.

GENERADOR DEL PULSO DE CONMUTACIÓN Q11

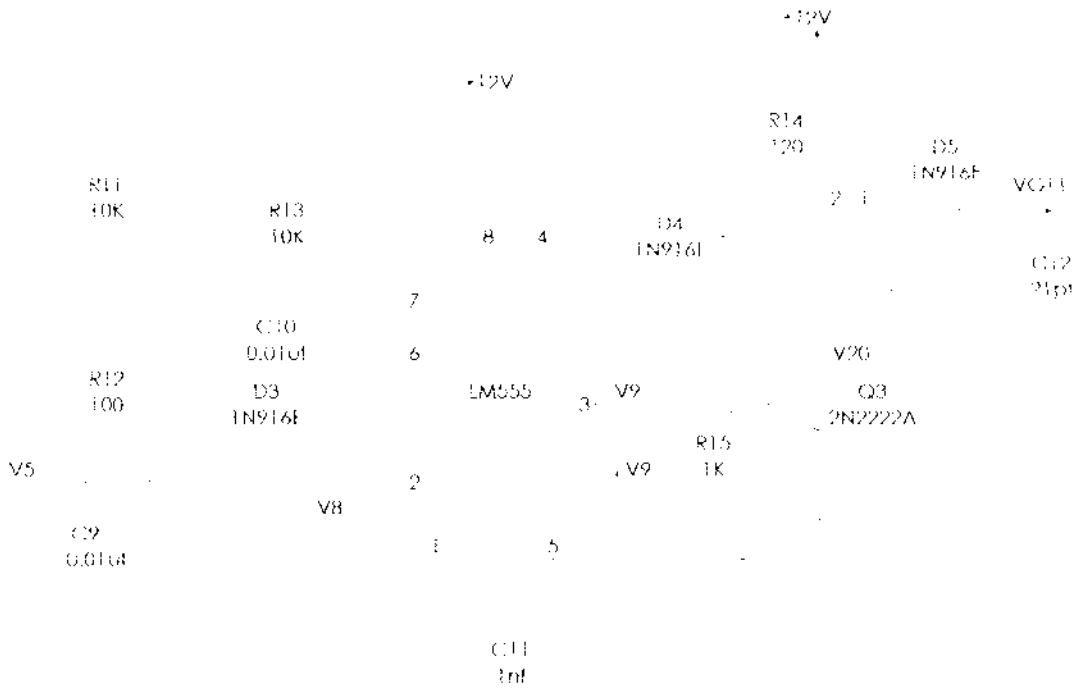


fig. 2.13

Con $t_{on} = 60\mu\text{seg.}$ y $C10 = 0.01\mu\text{f}$ calculamos el valor en el que $R13$ debe fijarse, usando la siguiente fórmula.

$$t_{on} = 1.09 C10 R13$$

$$R13 = 5.504K$$

Una vez que el capacitor $C9$ se ha cargado hasta los 12V permanece invariable hasta que sucede el cambio del voltaje $V5$ de bajo a alto. Dada la polaridad del voltaje inicial del capacitor tenemos

$$V8 = 12 + V_{c9}$$

el cual finalmente llegará hasta los 12V y el capacitor $C9$ se encontrará descargado.

El diodo $D3$ asegura que la transición positiva no exceda significativamente el voltaje de alimentación y dañe al integrado.

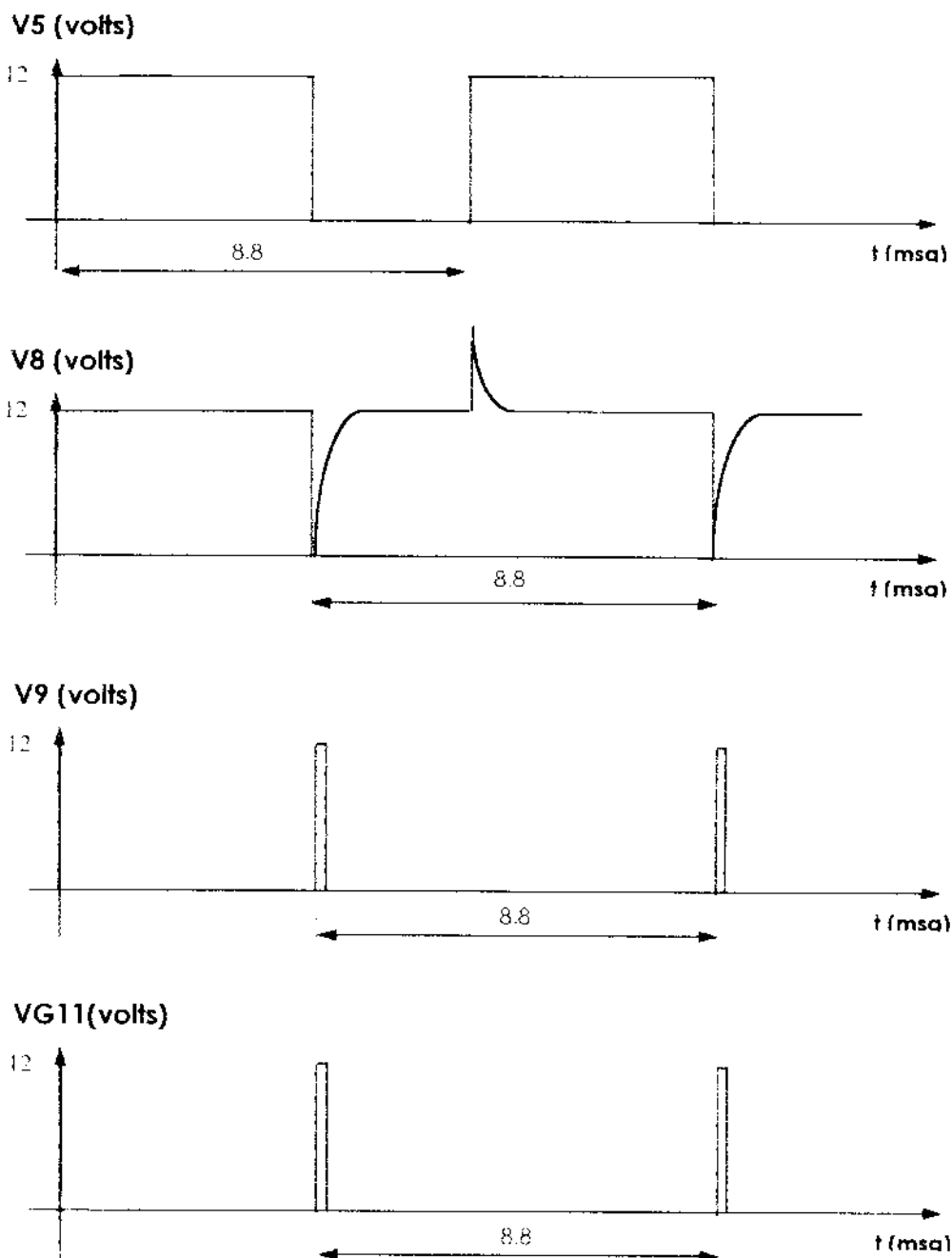


fig. 2.14

Cuando se obtiene la señal V9 esta ya está lista para hacer disparar a Q11, pero para aumentar la corriente de disparo y asegurar que éste se prenda, hacemos que la señal pase por un transistor que tienen un transformador de pulsos conectado a su colector. Desde el secundario de este transformador se toma la señal de disparo VG11.

En la figura 2.14 se muestran las formas de onda ideales que se obtendrán con los valores calculados.

Elementos: Un LM555.

Transistor 2N2222A

Resistencias de $1K\Omega$, 120Ω , 100Ω y de $10k\Omega$.

Un potenciómetro de $10K\Omega$.

Dos capacitores cerámicos de $0.01\mu f$.

Capacitores de $1n f$ y de $21pf$.

Tres diodos IN916F.

Un transformador de Pulsos de 2 a 1

Alimentación de voltaje de $+12V DC$.

2.8. GENERADOR DEL PRIMER TIEMPO DE SEPARACION

Aplicación del LM555 para generar el primer tiempo de separación t_c . Tomando la salida del inversor, V5 esta se inyecta a la red que generará el tiempo de separación. La duración de este pulso es fija y se calculó mayor a la duración del pulso de conmutación para asegurar que Q11 ya esté apagado cuando se dispare Q2. Este pulso está en fase con la terminación de los pulsos del tiristor principal Q1.

La onda cuadrada V5 de la salida del inversor ingresa al diferenciador formado por C13, R16 y R17. Cuando V5 se encuentra en el alto el capacitor C13 se encuentra descargado ya que en el pin 2 tenemos $12V$. El pin 2 del LM555 denominada trigger internamente es el pin V-(A2) y por tanto no circula corriente.

Cuando V5 cambia de un alto a un bajo, C13 comienza a cargarse desde cero, lo que produce en la entrada del pin 2 del LM555 un flanco negativo que activa al integrado, provocando que a la salida en el pin 3 el voltaje V11 vaya al alto por el tiempo requerido.

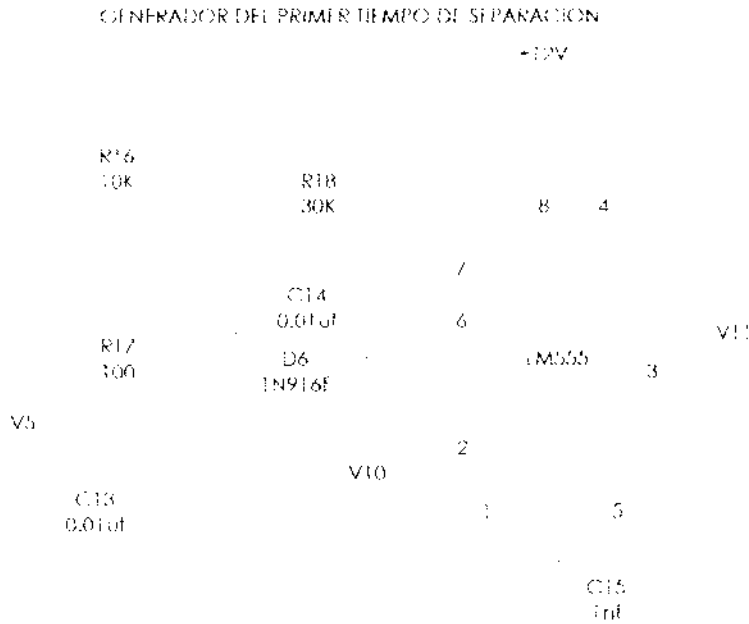


fig. 2.15

Con $R18=30K$ y $C14= 0.01\mu f$ calculamos el valor del t_{imp} que se obtiene desde la siguiente fórmula del monoestable.

$$t_{imp} = 1.09 C14 R18$$

$$t_{imp} = 300\mu s$$

Una vez que el capacitor $C13$ se ha cargado hasta los 12V permanece invariable hasta que sucede el cambio del voltaje $V5$ de bajo a alto. Dada la polaridad del voltaje inicial del capacitor tenemos

$$V8 = 12 + V_{C13}$$

el cual finalmente llegará hasta los 12V y el capacitor $C13$ se encontrará descargado.

Elementos: Un LM555

Resistencias de 100Ω , $30K\Omega$, $10K\Omega$

Capacitores cerámicos de $1nf$, $0.1\mu f$.

Un diodo 1N916F

Alimentación de voltaje de +12V DC.

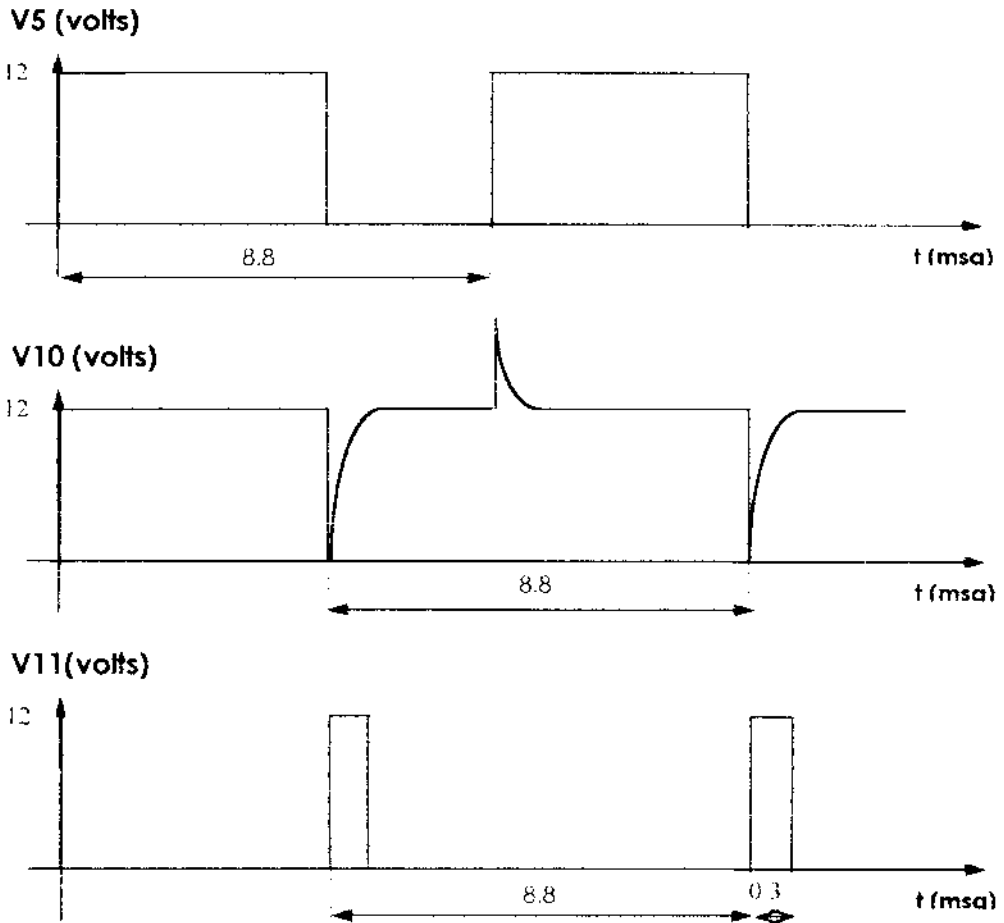


fig. 2.16

2.9. GENERADOR DEL PULSO PRINCIPAL VG2

Aplicación del LM555 como multivibrador en configuración astable, la salida del pin tres del LM555 es el pulso buscado que mediante el transformador de pulsos y una circuitería adicional será acoplado a la puerta del tiristor principal Q2 para dispararlo.

Existe una lógica que se conecta al pin 4 del LM555 para activarlo. Esta lógica controla que ya haya transcurrido el primer tiempo de separación t_c para que pueda activarse el LM555 y generar V14.

La señal de voltaje V13 se aplica al pin 4 o reset del LM555, lo cual permite enviar una ráfaga de pulsos de alta frecuencia en el intervalo definido por el $T_{\text{ton-tc}}$.

GENERADOR DEL PULSO PRINCIPAL Q2

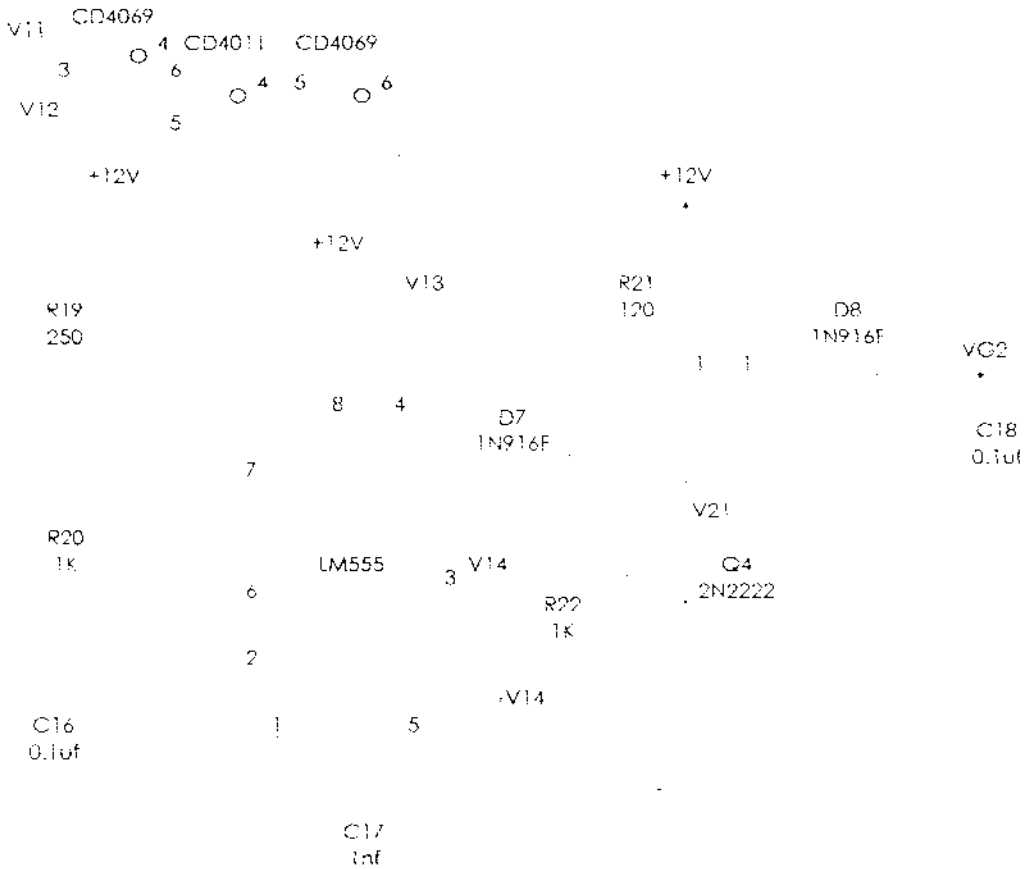


fig. 2.17

Usando la fórmula para la configuración astable podemos calcular la frecuencia de la ráfaga.

$$T = 0.69(R19 + 2R20)C16$$

$$T = 0.69(250 + 2(1000))0.1\mu F$$

$$T = 155\mu\text{seg}$$

$$f = 6441\text{ Hz}$$

A continuación se presentan los gráficos ideales de entrada y salida del presente circuito.

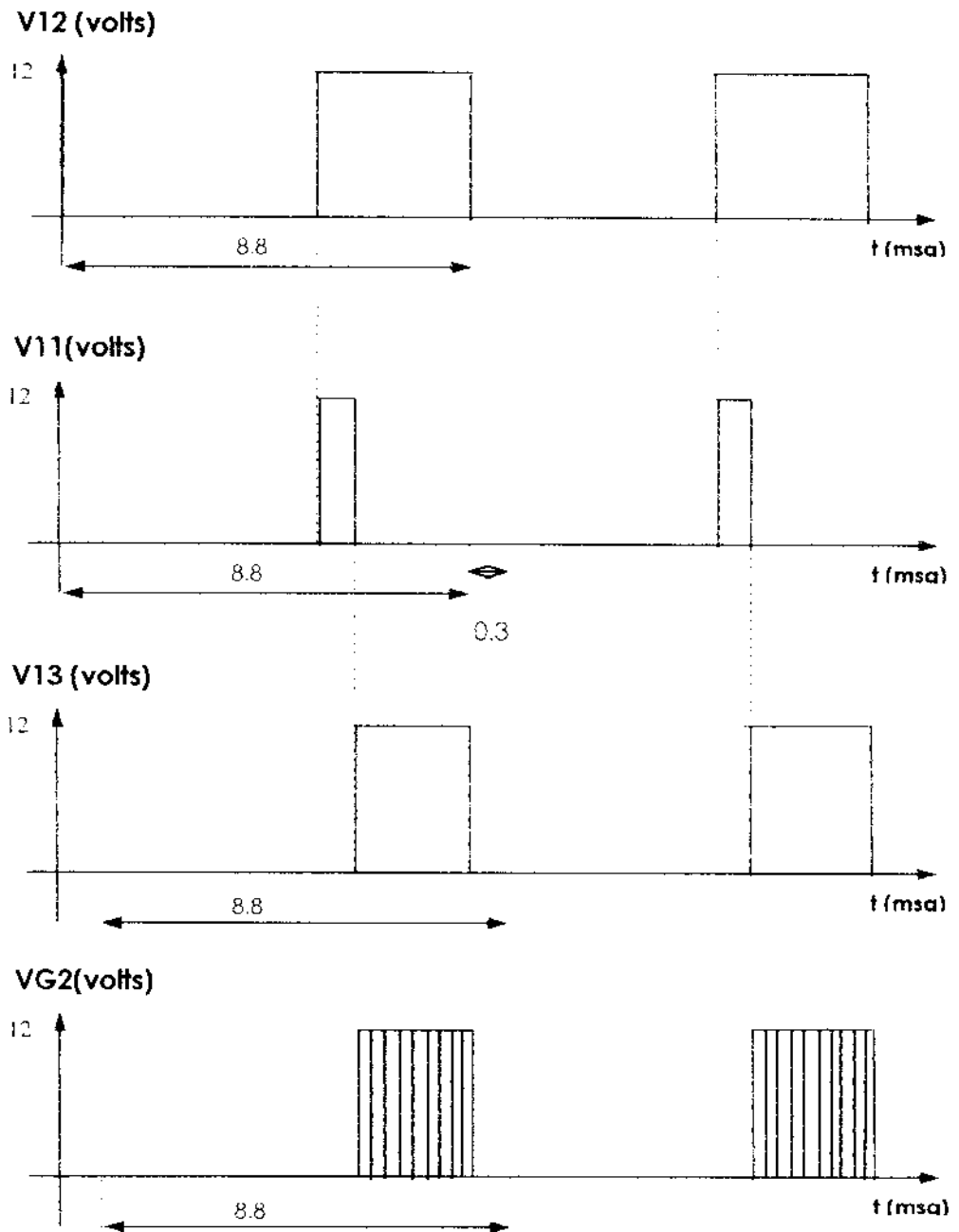


fig. 2.18

- Elementos:
- Un LM555
 - Dos inversores CD4069
 - Una puerta NAND CD4011
 - Resistencias de 250Ω , 120Ω
 - 2 Resistencias de $1K\Omega$.
 - Capacitores cerámicos de $1nF$, $0.1\mu F$.
 - Dos diodos 1N916F
 - Un transistor 2N2222A
 - Un transformador de 1 a 1

2.10. GENERADOR DEL PULSO DE CONMUTACION VG22.

Aplicación del LM555 para generar el pulso de conmutación que dispara al tiristor Q22. Tomando la salida de la red RC, V12 esta llega al circuito generador de los pulsos de conmutación del tiristor Q22. Es de destacar que estos pulsos son regulables, es decir que se puede cambiar el tiempo de duración de los mismos dependiendo del tiempo de apagado de los tiristores que se usen. Estos pulsos están en fase con la terminación de los pulsos del tiristor principal Q2 asegurando de esta manera la conmutación.

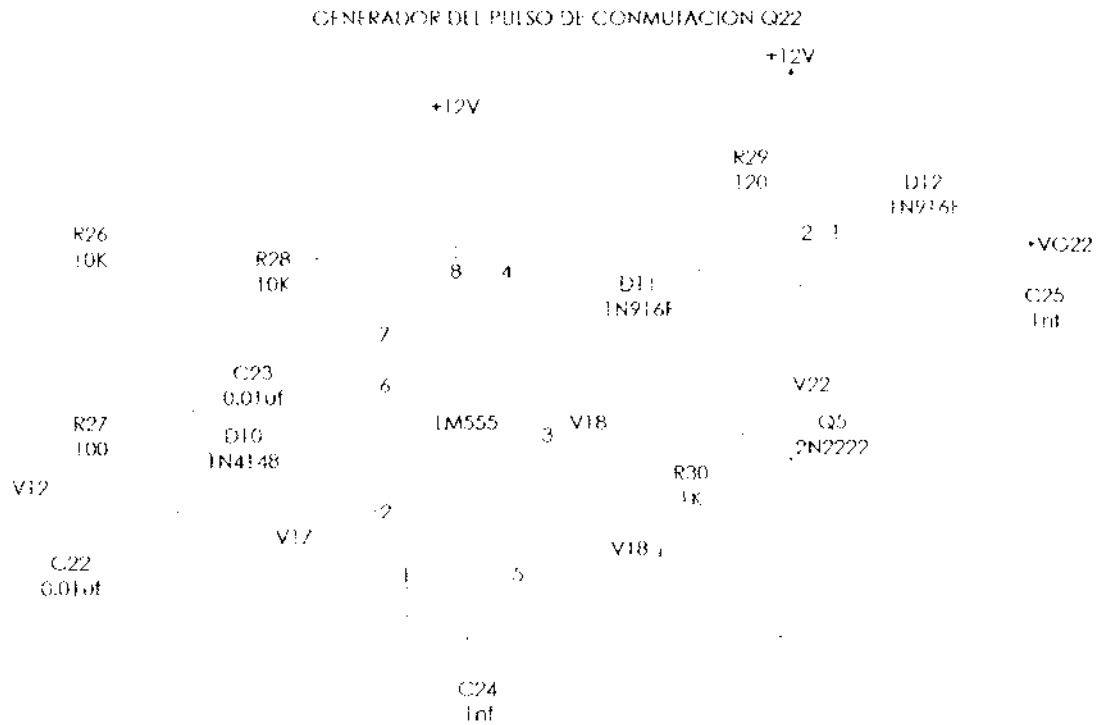


fig. 2.19

La onda cuadrada V12 de la salida de la red RC ingresa al diferenciador formado por C22, R26 y R27. Cuando V12 se encuentra en el alto, el capacitor C22 se encuentra descargado ya que en el pin 2 tenemos 12V. El pin 2 del LM555, V17 denominado trigger internamente es el pin V-(A2) y por tanto no circula corriente.

Cuando V12 cambia de un alto a un bajo, C22 comienza a cargarse desde cero, lo que produce en V17 un flanco negativo que activa al integrado, provocando que a la salida en el pin 3, el voltaje V18

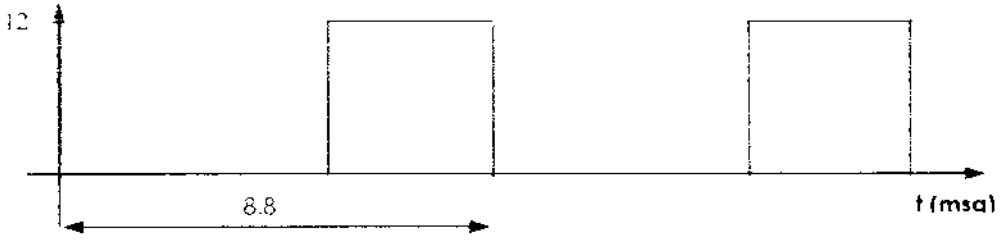
vaya al alto por el tiempo requerido. Con $t_{\text{sig}} = 60\text{useg.}$ y $C23 = 0.01\mu\text{f}$ calculamos el valor en el que R28 debe fijarse, usando la siguiente fórmula.

$$t_{\text{sig}} = 1.09 C23 R28$$

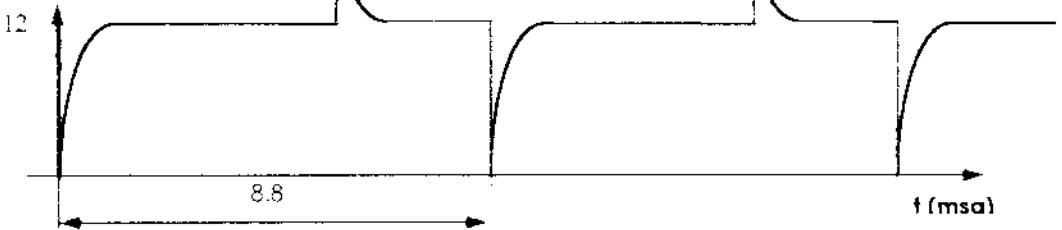
$$R28 = 5.504\text{K}$$

En la figura 2.20 se muestran las formas de onda ideales que se obtendrán con los valores calculados.

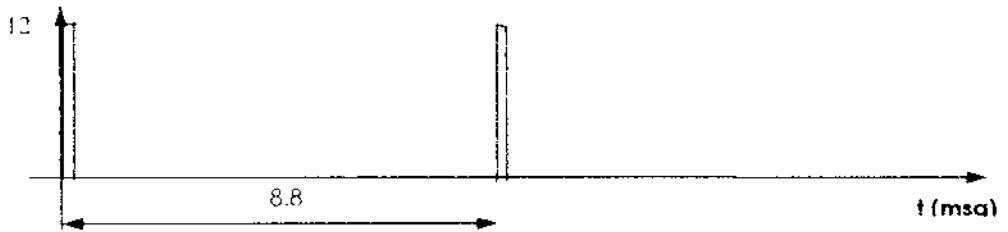
V12 (volts)



V17 (volts)



V18 (volts)



VG22 (volts)

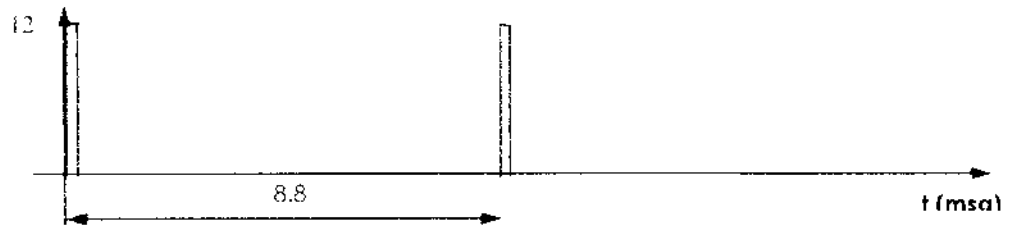


fig. 2.20

Una vez que el capacitor C23 se ha cargado hasta los 12V permanece invariable hasta que sucede el cambio del voltaje V12 de bajo a alto. Dada la polaridad del voltaje inicial del capacitor tenemos

$$V17 = 12 + V_{C23}$$

el cual finalmente llegará hasta los 12V y el capacitor C22 se encontrará descargado. El diodo D10 asegura que la transición positiva no exceda significativamente el voltaje de alimentación y dañe al integrado.

Cuando se obtiene la señal V18 esta ya está lista para hacer disparar a Q11, pero para aumentar la corriente de disparo y asegurar que éste se prenda, hacemos que la señal pase por un transistor que tienen un transformador de pulsos conectado a su colector. Desde el secundario de este transformador se toma la señal de disparo VG22.

Elementos: Un LM555.

Transistor 2N2222A

Resistencias de 1K Ω , 120 Ω , 100 Ω y de 10k Ω .

Un potenciómetro de 10K Ω .

Dos capacitores cerámicos de 0.01 μ f.

Capacitores de 1 μ f.

Tres diodos 1N916F.

Un transformador de Pulsos de 2 a 1

Alimentación de voltaje de +12V DC.

2.11. GENERADOR DEL SEGUNDO TIEMPO DE SEPARACION

Aplicación del LM555 para generar el segundo tiempo de separación t_c . Tomando la salida de la red RC, V12 esta se inyecta al circuito generador del segundo tiempo de separación.

La duración de este pulso es fija y se calculó mayor a la duración del pulso de conmutación para asegurar que Q22 ya esté apagado cuando se

dispare Q1. Este pulso está en fase con la terminación de los pulsos del transistor principal Q2.

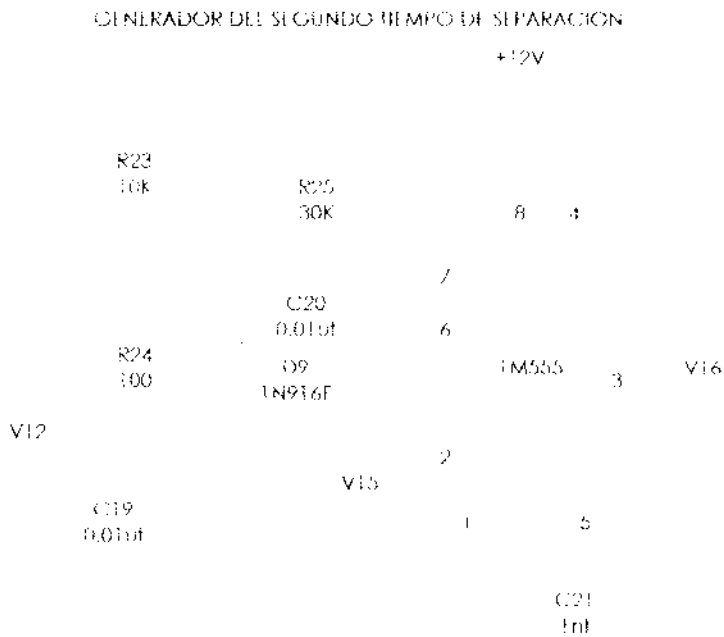


fig. 2.21

La onda cuadrada V12 de la salida de la red RC ingresa al diferenciador formado por C19, R23 y R24. Cuando V12 se encuentra en el alto el capacitor C19 se encuentra descargado ya que en el pin 2 tenemos 12V. El pin 2 del LM555, V15 denominado trigger, internamente es el pin V (A2) y por tanto no circula corriente.

Cuando V12 cambia de un alto a un bajo, C19 comienza a cargarse desde cero, lo que produce en la entrada del pin 2 del LM555 un flanco negativo que activa al integrado, provocando que a la salida en el pin 3 el voltaje V16 vaya al alto por el tiempo requerido.

Con $R25=30K$ y $C20=0.01\mu F$ calculamos el valor del t_{on} que se obtiene desde la siguiente fórmula del monoestable.

$$t_{on} = 1.09 C20 R25$$

$$t_{on} = 300\mu\text{seg}$$

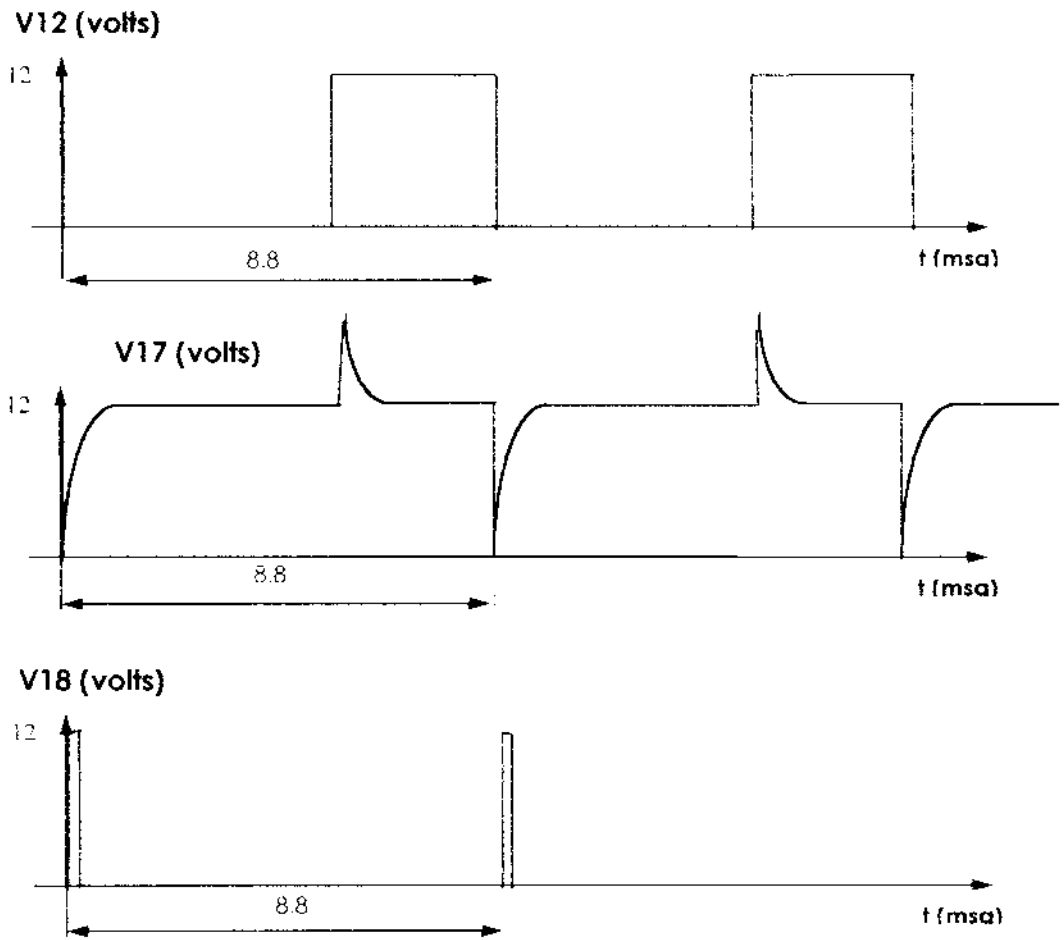


fig. 2.22

Elementos: Un LM555
 Resistencias de 100Ω , $30K\Omega$, $10K\Omega$
 Capacitores cerámicos de $1nf$, $0.1\mu f$.
 Un diodo 1N916F
 Alimentación de voltaje de +12V DC.

C A P I T U L O III

SIMULACIÓN DEL TROCEADOR

3.1. SIMULACIÓN DEL CIRCUITO DE FUERZA DEL TROCEADOR.

Para la simulación del Troceador Clase B conmutado por corriente se ha usado el Programa Pspice bajo ambiente de Windows. Se usó los elementos existentes en las librerías, tales como capacitores, resistencias, inductores, fuentes y diodos. Los parámetros de los diodos se modificaron para convertirlos en diodos ideales y que soporten altas corrientes.

Debido a limitaciones en el simulador, el SCR se modeló. Cuando se usaba el SCR existente en la librería del programa, el circuito de fuerza no corría debido a demasiados nodos.

Para el circuito de conmutación se usaron los valores de los elementos que existen en la parte experimental. Estos son valores aproximados a los calculados teóricamente que debido a dificultades para obtenerlos en los valores exactos se usaron los valores de los elementos que había en el mercado.

Las señales de disparo de los tiristores se simularon con fuentes de pulsos, las cuales tenían los parámetros calculados.

Posteriormente se realiza una comparación entre los datos experimentales, simulados y teóricos, con lo cual se analizan las aproximaciones.

En la figura 3.1. se muestra el circuito de Fuerza con los datos que se usaron para la simulación y en las figuras posteriores se muestran los gráficos de las formas de onda más importantes de dicho circuito tales como: Voltaje del Capacitor C1, Voltaje de Salida, Corriente del Capacitor C1, Voltaje del Tiristor Principal, etc. Dichas figuras van desde la fig. 3.2 hasta la fig. 3.9.

Como se puede apreciar de las gráficas de las formas de onda se nota que el circuito simulado funciona de acuerdo a lo esperado.

Se ve que el voltaje a la salida es troceado y que el capacitor C1 se descarga hasta un voltaje cercano a $-5V$ y luego se carga a $+12V$ nuevamente, mientras que el capacitor C2 se descarga hasta -7 y luego se carga hasta $+12$.

Para el fon usado se observa en la fig. 3.4 que la corriente tiene un pico positivo de $5.5 A$ y un pico negativo de $9mA$.

Se obtuvo también el voltaje promedio de voltaje que le llega al motor, el cual es de aproximadamente $4,75V$ y la corriente promedio que entra al motor es de $2.3 A$. Debo indicar que estos valores se obtuvieron para el fon usado en la simulación.

Finalmente se adiciona el archivo de salida en donde encontramos los parámetros de los diferentes elementos usados en la simulación, tales como fuentes, diodos, capacitores, inductores, etc. y el listado de conexiones de todos los componentes.

• • •

• • •

•

•

•

• • • • • •

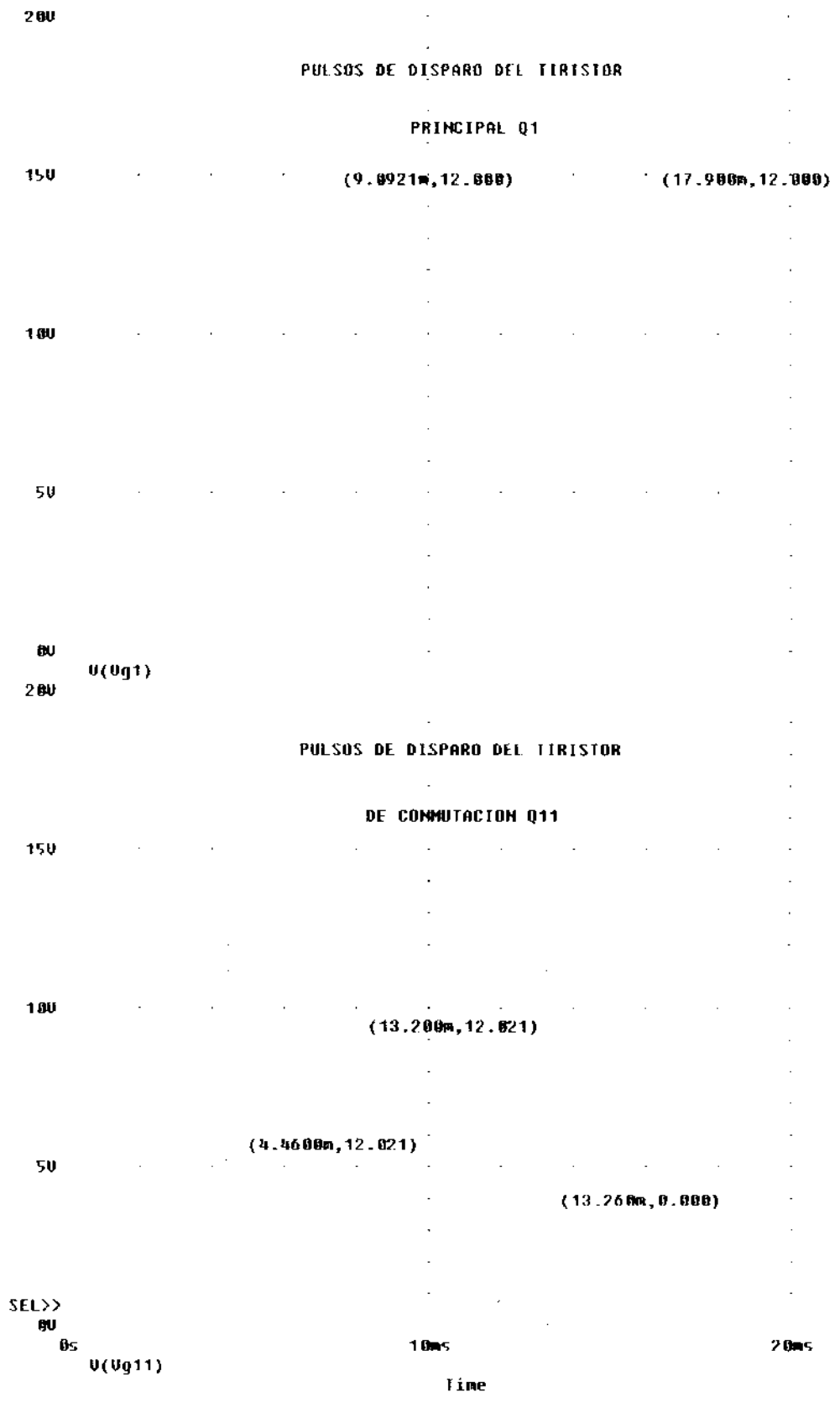
•

•

•

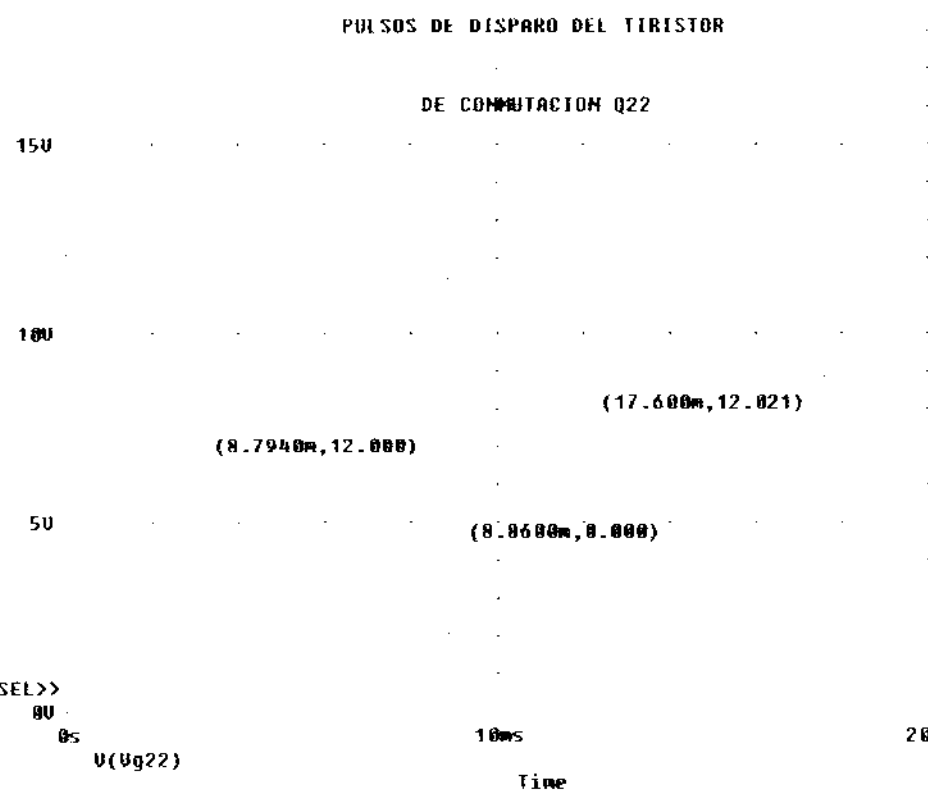
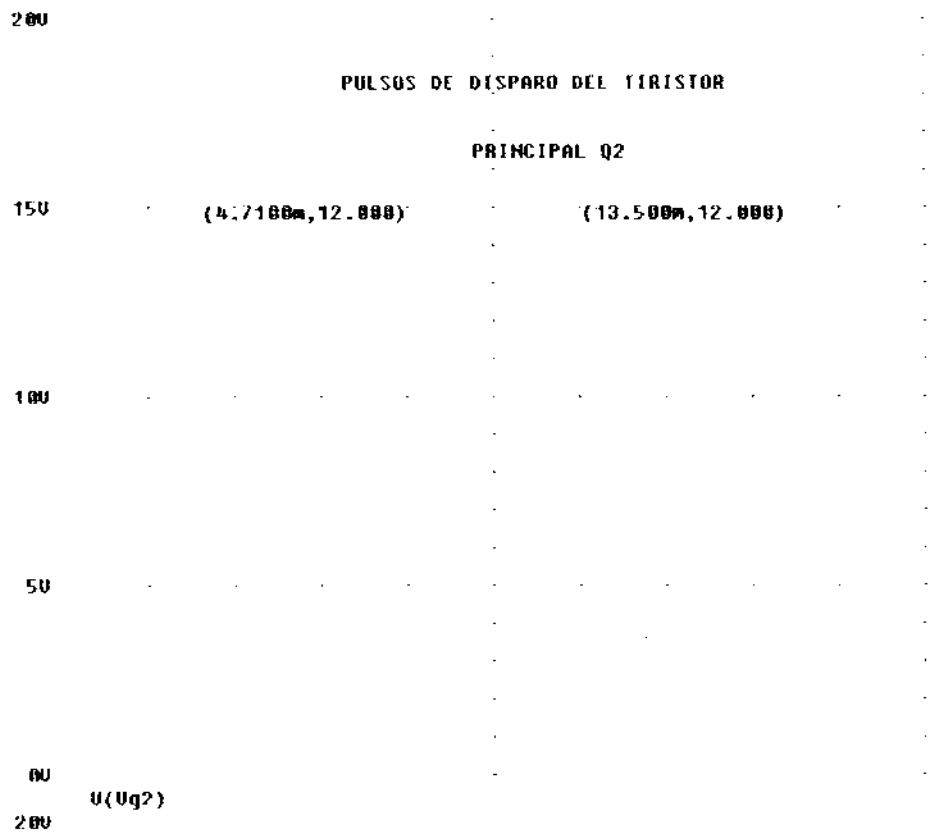
Temperature: 27.0

(A) TROCFADOR CLASE B CONMUTADO POR CORRIENTE



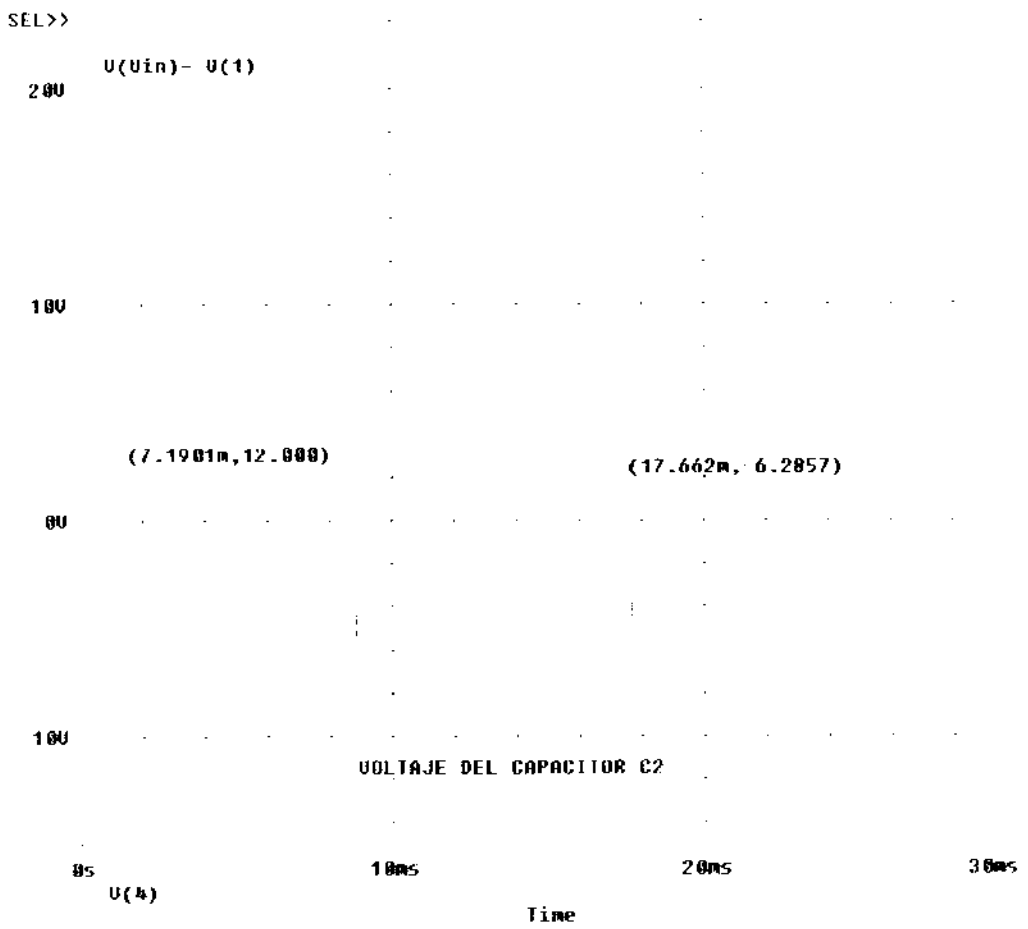
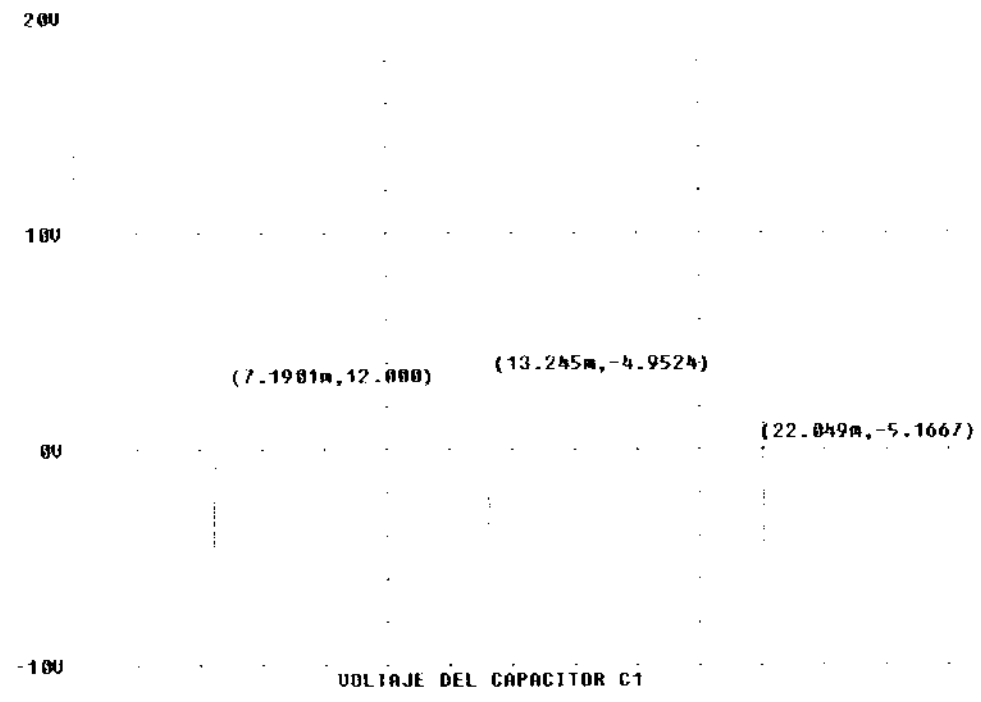
Temperature: 27.8

(A) TROCEADOR CLASE B CONMUTADO POR CORRIENTE



Temperature: 27.0

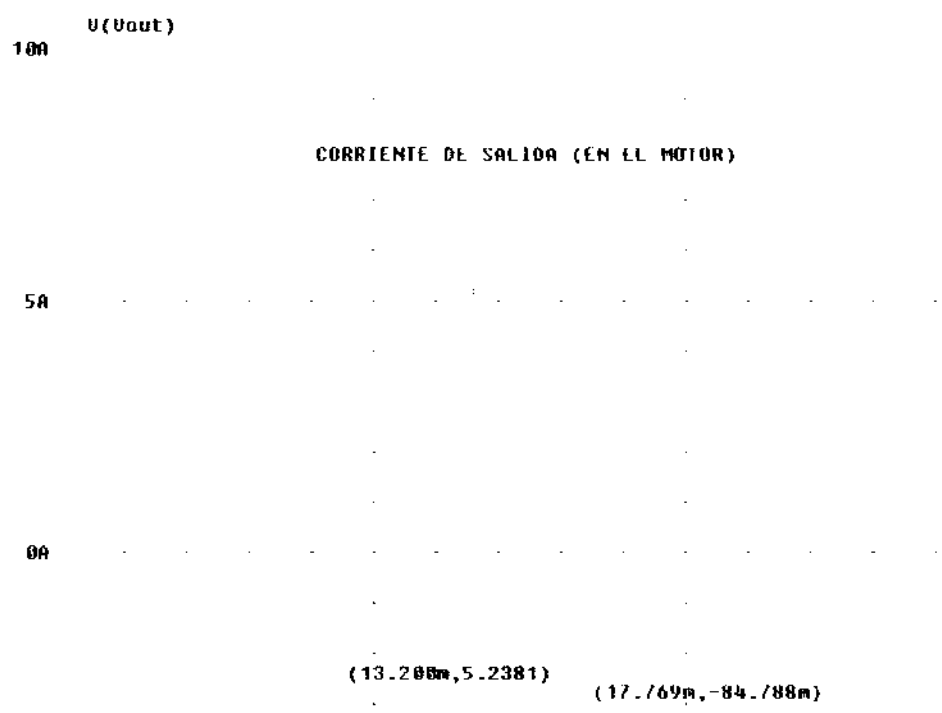
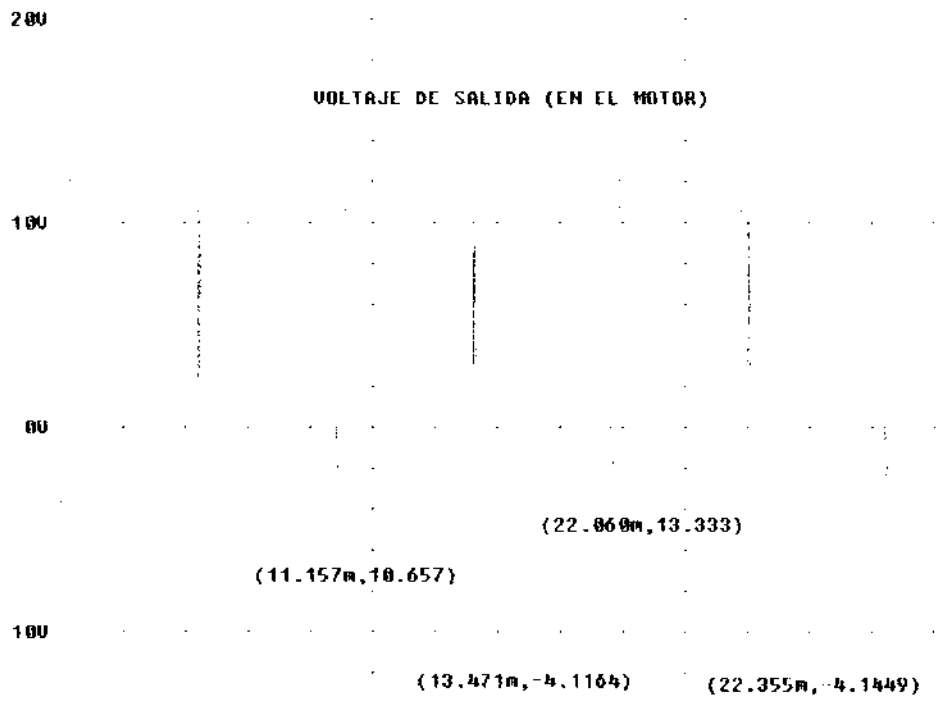
(A) C:\MSIMEU60\CH08PM00.DAT



Time

Temperature: 27.0

(A) PROCESADOR CLASE B CONMUTADO POR CORRIENTE



SEL>> 05 I(U2)
 SA 10ms 20ms 30ms
 Time

Temperature: 27.0

(A) C:\MSIMEU60\CHOPMOD.DAT

200

VOLTAJE DE ARMADURA DEL MOTOR

100

00

-100

100

U(Uout)

CORRIENTE DE LA BATERIA

5A

0A

(4.4599m, 13.000) (12.149m, 10.615)

(8.8819m, 8.8541m)

(4.4640m, 6.1482) (13.261m, 6.2143) (21.322m, 5.1643)

(8.8819m, 8.8541m)

SEL>>
-5A

0s

10ms

20ms

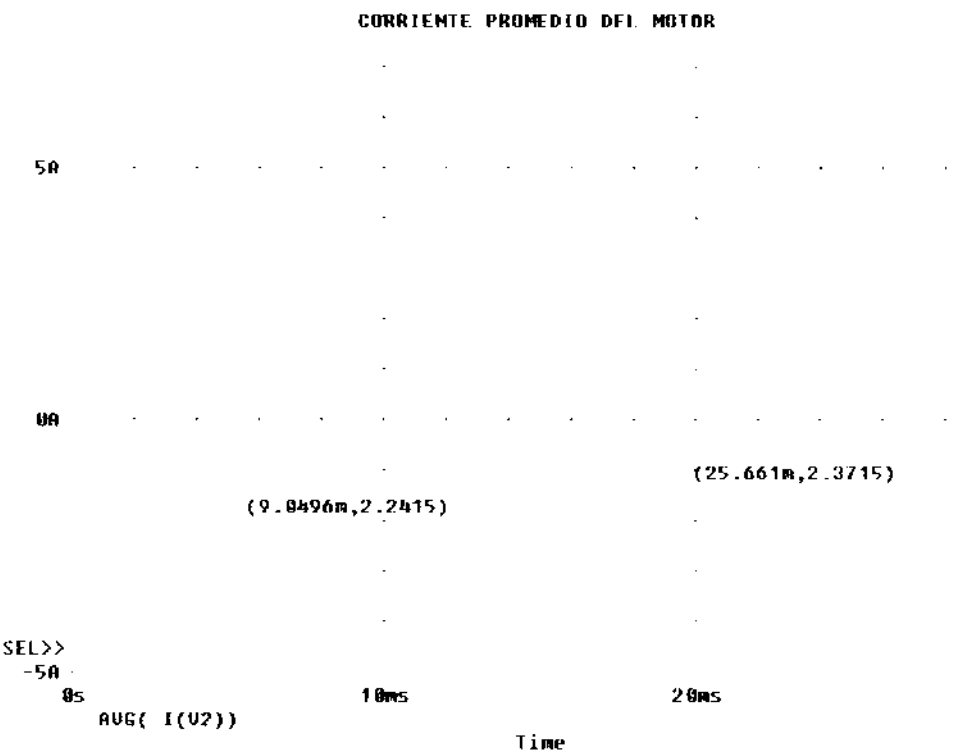
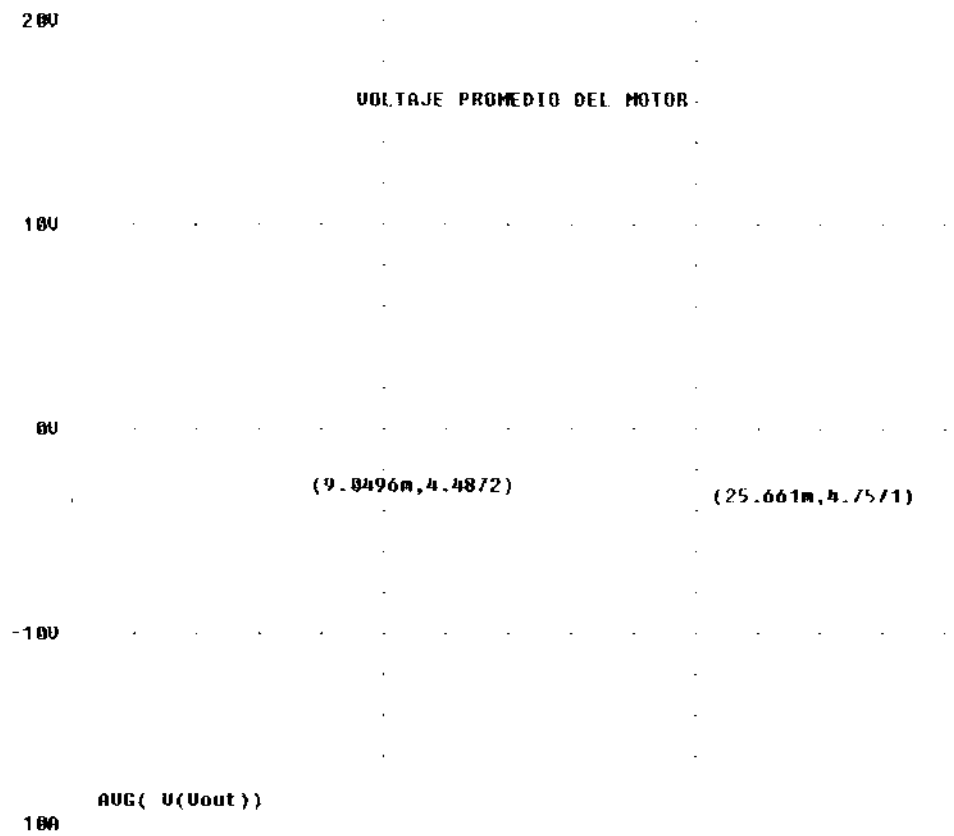
30ms

I(U1)

Time

Temperature: 27.0

(A) TROCEADOR CLASE B CONMUTADO POR CORRIENTE



SEL>>
-5A

8s

10ms

20ms

30ms

Time

Temperature: 27.0

(A) C:\MSIMEU68\CHOPMOD.DAT

200

VOLTAJE ANODO-CATODO DE Q2 O VOLTAJE INVERSO DEL DIODO D1

80

(2.4793m, 10.649)

(13.514m, -4.2339)

SFL>>

-150

U(Uout)

200

VOLTAJE ANODO-CATODO DE Q1 O VOLTAJE INVERSO DEL DIODO D2

180

00

(13.514m, 16.234)

(25.537m, 12.003)

(2.5207m, 1.3540)

-180

85

U(Uin) - U(Uout)

10ms

20ms

30ms

Time

Temperature: 27.8

(A) C:\MSIMEU60\CHOPMOD.DAT

280

200

(7.9832m, 12.816)

(17.968m, 25.543)

00

(22.068m, -8.2429)

VOLTAJE ANODO-CATODO DEL TIRISTOR DE CONMUTACION Q11

SEL>>
-15U

U(0in)- U(?)

VOLTAJE ANODO-CATODO DEL TIRISTOR DE CONMUTACION Q22

200

(24.832m, 12.001)

100

00

(17.668m, -6.7619)

(8.8565m, -7.7333)

-100

0s

10ms

20ms

30ms

U(3)

Time

**** 05/29/96 22:55:01 ***** Evaluation PSpice (Jan 1994) *****

* C:\MSIMFV60\CHOPMOD.SCH

**** CIRCUIT DESCRIPTION

* Schematics Version 6.0 - January 1994

* Wed May 29 22:54:57 1996

** Analysis setup **

.tran 1ms 30ms UIC

.OPTIONS ABSTOI=1nA

.OPTIONS I1L4=50

.OPTIONS RELTOL=0.01

.OPTIONS VNTOL=1uV

.OPTIONS LIST

.OPTIONS NOPAGE

.LIB C:\MSIMEV60\LIB\SCRI.LIB

.LIB CHOPPER.lib

.LIB CHOPMOD.lib

* From [SCHEMATICS NETLIST] section of msim.ini:

.lib C:\MSIMEV60\LIB\PROYE.LIB

.lib nom.lib

.INC "CHOPMOD.net"

**** INCLUDING CHOPMOD.net ****

* Schematics Netlist *

V_V1 Vin 0 DC 12V AC 0 0

D_D2 Vout Vin D1N4148

D_D1 0 Vout D1N4148-X

D_D11 2 Vout D1N4148-X

D_D22 Vout 3 D1N4148-X

C_C1 Vin 1 42uf IC=12

C_C2 0 4 42uf IC=12

L_L1 2 1 3.5uh

L_L2 4 3 3.5uh

L_L3 5 Vout 2mh

R_Rc2 Vin 4 15

R_RL 6 5 2

R_Rc1 0 1 15

V_V2 6 0 DC 0 AC 0 0

V_V6 Vg1 0 DC 0 AC 0

+PULSE 0 12V 300us 1ns 1ns 4.1ms 8.8ms


```

V_V7  Vg1 0 DC 0 AC 0
+PULSE 0 12V 4.4ms 1ns 1ns 60us 8.8ms
V_V8  Vg2 0 DC 0 AC 0
+PULSE 0 12V 4.7ms 1ns 1ns 4.1ms 8.8ms
V_V9  Vg22 0 DC 0 AC 0
+PULSE 0 12V 8.8ms 1ns 1ns 60us 8.8ms
X_Q1  Vin Vout Vg1 SCRE
X_Q11 Vin 2 Vg11 SCRE
X_Q22 3 0 Vg22 SCRE
X_Q2  Vout 0 Vg2 SCRE

```

```
**** RESUMING CHOPMOD.CIR ****
```

```
.probe
```

```
.END
```

```
**** Diode MODEL PARAMETERS
```

```

DIN4148  DIN4148-X  X_Q1.DMOD  X_Q11.DMOD
IS 100.000000E-15 100.000000E-15 10.000000E-15 10.000000E-15
BV 100          1.000000E+03 1.000000E+03 1.000000E+03
IBV 100.000000E-15 100.000000E-15
RS 1          1
TT 12.000000E-09 12.000000E-09
CJO 2.000000E-12 2.000000E-12
VJ          .7          .7

```

```

X_Q22.DMOD  X_Q2.DMOD
IS 10.000000E-15 10.000000E-15
BV 1.000000E+03 1.000000E+03
VJ .7          .7

```

```
**** Voltage Controlled Switch MODEL PARAMETERS
```

```

X_Q1.SMOD  X_Q11.SMOD  X_Q22.SMOD  X_Q2.SMOD
RON .1      .1      .1      .1
ROFF 10.000000E+06 10.000000E+06 10.000000E+06 10.000000E+06
VON .7      .7      .7      .7
VOFF 0      0      0      0

```

```
**** CIRCUIT ELEMENT SUMMARY
```

```
**** RESISTORS
```

NAME	NODES	MODEL	VALUE	TC1	TC2	TCE
R_Rc2	Vin 4		1.50E+01			
R_RL	6 5		2.00E+00			
R_Rc1	0 1		1.50E+01			

**** CAPACITORS

NAME	NODES		MODEL	VALUE	In. Cond.	TC1	TC2
C_C1	Vin	1		4.20E-05	1.20E+01		
C_C2	0	4		4.20E-05	1.20E+01		

**** INDUCTORS

NAME	NODES		MODEL	VALUE	In. Cond.	TC1	TC2
L_L1	2	1		3.50E-06	0.00E+00		
L_L2	4	3		3.50E-06	0.00E+00		
L_L3	5	Vout		2.00E-03	0.00E+00		

**** INDEPENDENT SOURCES

NAME	NODES		DC VALUE	AC VALUE	AC PHASE
V_V1	Vin	0	1.20E+01	0.00E+00	0.00E+00 degrees
V_V2	6	0	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00 degrees
V_V6	Vg1	0	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00 degrees
TRANSIENT: PULSE					
Initial Value 0.00E+00					
Pulsed Value 1.20E+01					
Delay 3.00E-04					
Rise Time 1.00E-09					
Fall Time 1.00E-09					
Pulse Width 4.10E-03					
Period 8.80E-03					
V_V7	Vg11	0	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00 degrees
TRANSIENT: PULSE					
Initial Value 0.00E+00					
Pulsed Value 1.20E+01					
Delay 4.40E-03					
Rise Time 1.00E-09					
Fall Time 1.00E-09					
Pulse Width 6.00E-05					
Period 8.80E-03					
V_V8	Vg2	0	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00 degrees
TRANSIENT: PULSE					
Initial Value 0.00E+00					
Pulsed Value 1.20E+01					
Delay 4.70E-03					

Rise Time 1.00E-09
 Fall Time 1.00E-09
 Pulse Width 4.10E-03
 Period 8.80E-03

V_V9 Vg22 0 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 degrees
 TRANSIENT: PULSE
 Initial Value 0.00E+00
 Pulsed Value 1.20E+01
 Delay 8.80E-03
 Rise Time 1.00E-09
 Fall Time 1.00E-09
 Pulse Width 6.00E-05
 Period 8.80E-03

**** DIODES

NAME	+	-	MODEL	AREA
D_D2	Vout	Vin	D1N4148	1.00E+00
D_D1	0	Vout	D1N4148-X	1.00E+00
D_D11	2	Vout	D1N4148-X	1.00E+00
D_D22	Vout	3	D1N4148-X	1.00E+00
X_Q1.D1	X_Q1.5	Vout	X_Q1.DMOD	1.00E+00
X_Q11.D1	X_Q11.5	2	X_Q11.DMOD	1.00E+00
X_Q22.D1	X_Q22.5	0	X_Q22.DMOD	1.00E+00
X_Q2.D1	X_Q2.5	0	X_Q2.DMOD	1.00E+00

**** VOLTAGE CONTROLLED SWITCHES

NAME	LOAD1	LOAD2	CTRL+	CTRL-	MODEL
X_Q1.ST1	Vin	X_Q1.5	Vg1	0	X_Q1.SMOD
X_Q11.ST1	Vin	X_Q11.5	Vg11	0	X_Q11.SMOD
X_Q22.ST1	3	X_Q22.5	Vg22	0	X_Q22.SMOD
X_Q2.ST1	Vout	X_Q2.5	Vg2	0	X_Q2.SMOD

JOB CONCLUDED

TOTAL JOB TIME 11.20

3.2. SIMULACIÓN DEL CIRCUITO DE CONTROL DEL TROCEADOR

Para la simulación del circuito de control este ha sido dividido en etapas debido a la gran cantidad de componentes. Cada una de estas etapas se mostrará con su respectivo circuito y una descripción de los parámetros usados para la simulación. Posteriormente se incluirán los gráficos de las diversas salidas de cada etapa del circuito de control.

3.2.1 SIMULACIÓN DEL CIRCUITO REGULADOR DE FRECUENCIA

Mediante el regulador de frecuencia fijamos la frecuencia de troceo en 115Hz. Con lo cual nos da un período de 8.8ms. Se necesita que el tiempo en bajo de la onda sea lo más pequeño posible, así que al colocar los valores obtenidos del diseño se observa que el tiempo en bajo es de aproximadamente de 227useg. Para la fuente de polarización se coloca $V_{cc}=12V$ que es el valor de voltaje de la batería. A continuación se presenta el circuito del regulador de frecuencia que fue simulado en el Programa Pspice bajo Windows.

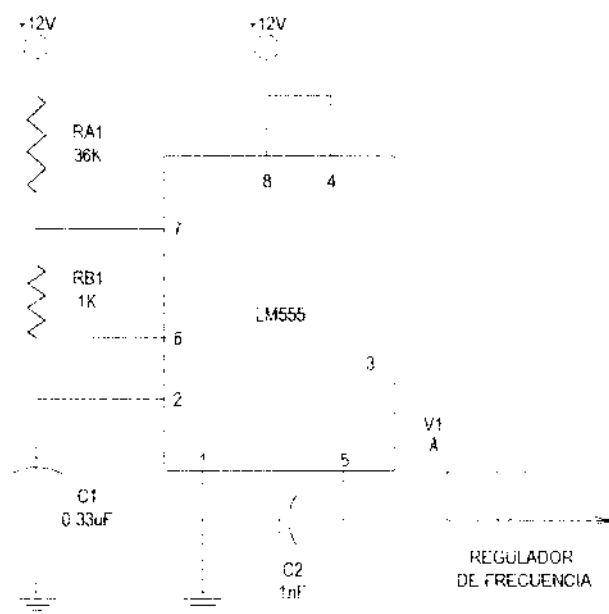


fig 3.10.

Para los gráficos se realizó un análisis transiente con un tiempo final que corresponde a varios periodos. La figura 3.12 nos muestra la forma de onda de salida del regulador de frecuencia V1.

•

•

•

•

•

Temperature: 27.0

(A) REGULADOR DE FRECUENCIA

120

VOLTAGE DE SALIDA DEL CIRCUITO REGULADOR DE FRECUENCIA

(U1)

80

(13.855m, 9.2286)

40

(17.521m, 5.6882)

(26.214m, 5.6882)

(26.445m, 5.6882)

00

120

U(out1)

VARIACION DEL VOLTAGE EN EL CAPACITOR C1

80

40

(26.214m, 8.0000)

(17.790m, 4.0235)

SEL>>
00

10ms
U(2)

20ms

30ms

35ms

Time



3.2.2. SIMULACIÓN DEL CIRCUITO GENERADOR DE RAMPA

En el circuito del generador rampa presentado en la figura 3.13, se usaron los valores de los elementos obtenidos en el diseño y que posteriormente se usaron en la parte experimental. Para la simulación de esta segunda etapa se usó una fuente de pulsos V1 que se inyectó como entrada al pin 2 del LM555. Esta fuente de pulsos contiene los mismos parámetros del voltaje de salida de la etapa anterior.

La polarización se simuló con una fuente VSRC con un valor DC de 12V igual al de la batería. Para evitar errores por nodos flotantes se colocó una carga de 10K en el pin 3 de salida del LM555.

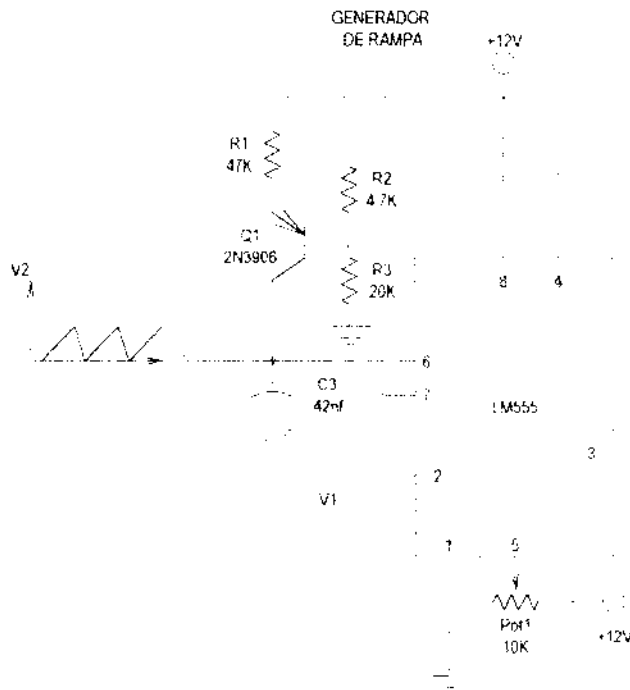


fig. 3.13.

La rampa V2 debido al pequeño tiempo en bajo de V1 también tiene un tiempo pequeño en bajo. Todo el resto del tiempo corresponde a una carga del capacitor lineal, cuyo máximo voltaje está dado por uno de los voltajes de umbral del LM555 de aproximadamente 8V. En la figura 3.15 se presenta el gráfico de V2 que corresponde a la salida de la presente

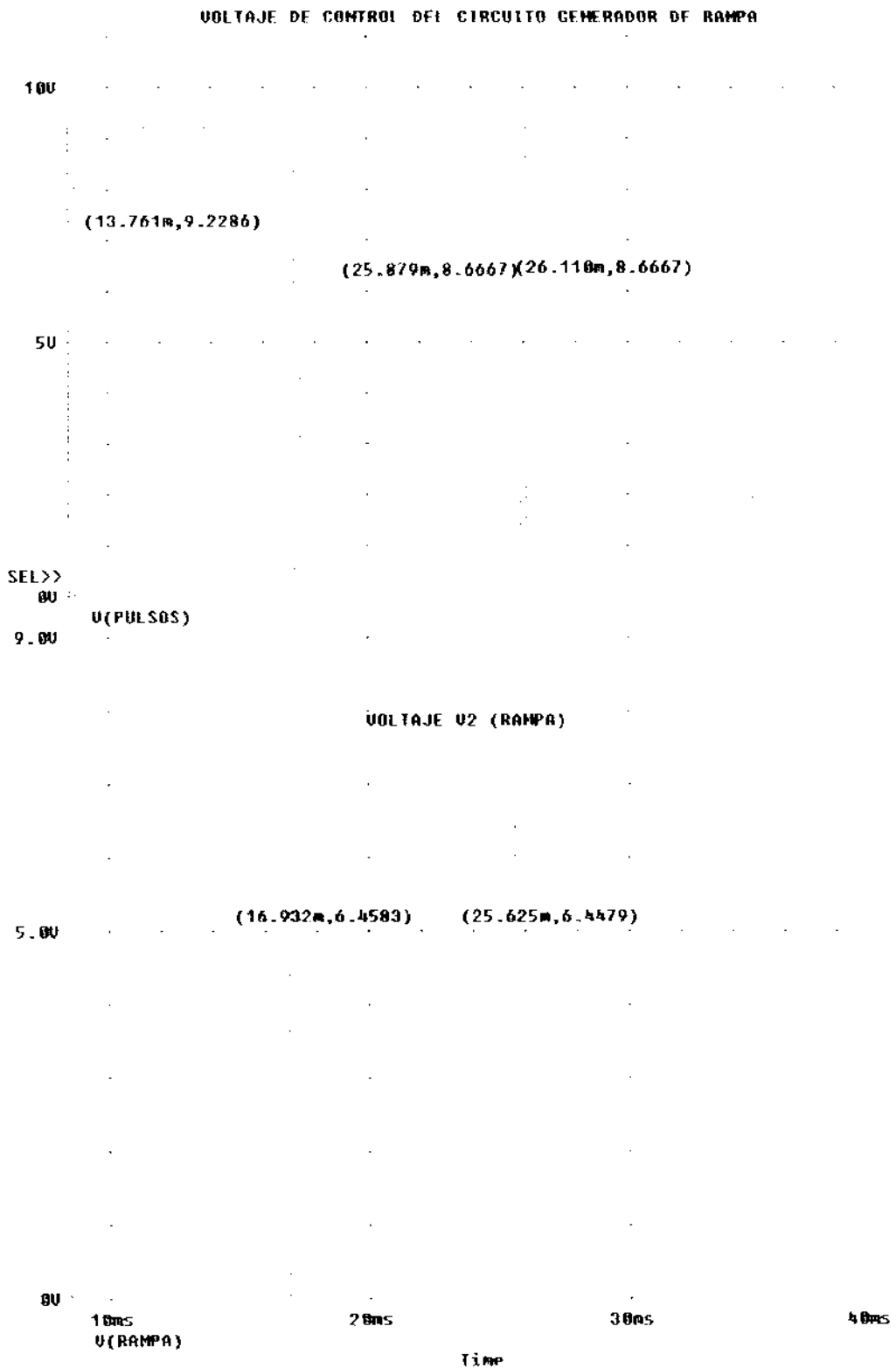


SUPERIOR TRIBUNAL DE JUSTICIA
DEL LITORAL

SECRETARIA
GENERAL

Temperature: 27.0

(A) GENERADOR DE RAMPA



3.2.3 SIMULACIÓN DEL CIRCUITO COMPARADOR

En la simulación del comparador se usó el LM741 que se encuentra en la librería del Pspice. Se usó una fuente de pulsos modificada para convertirla en una onda triangular. Para ello se usó un pequeño tiempo en alto y de bajada de 1ns, un largo tiempo de subida que abarca el resto del tiempo del período.

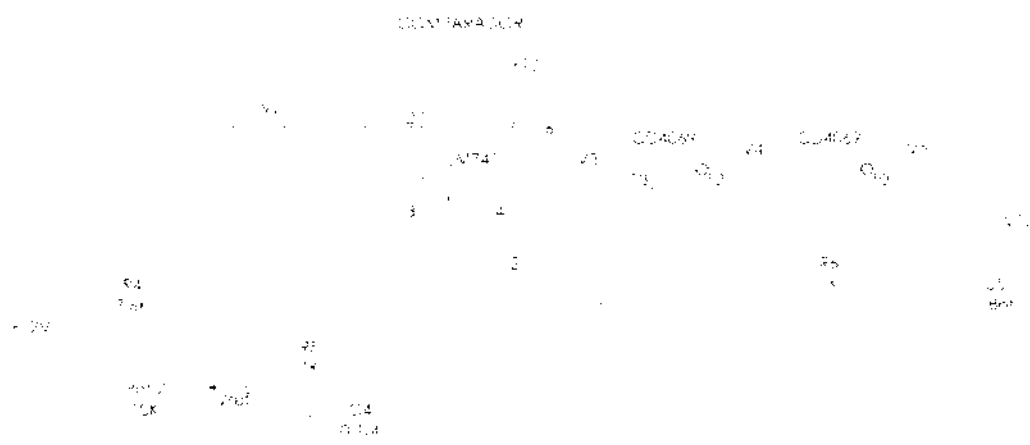
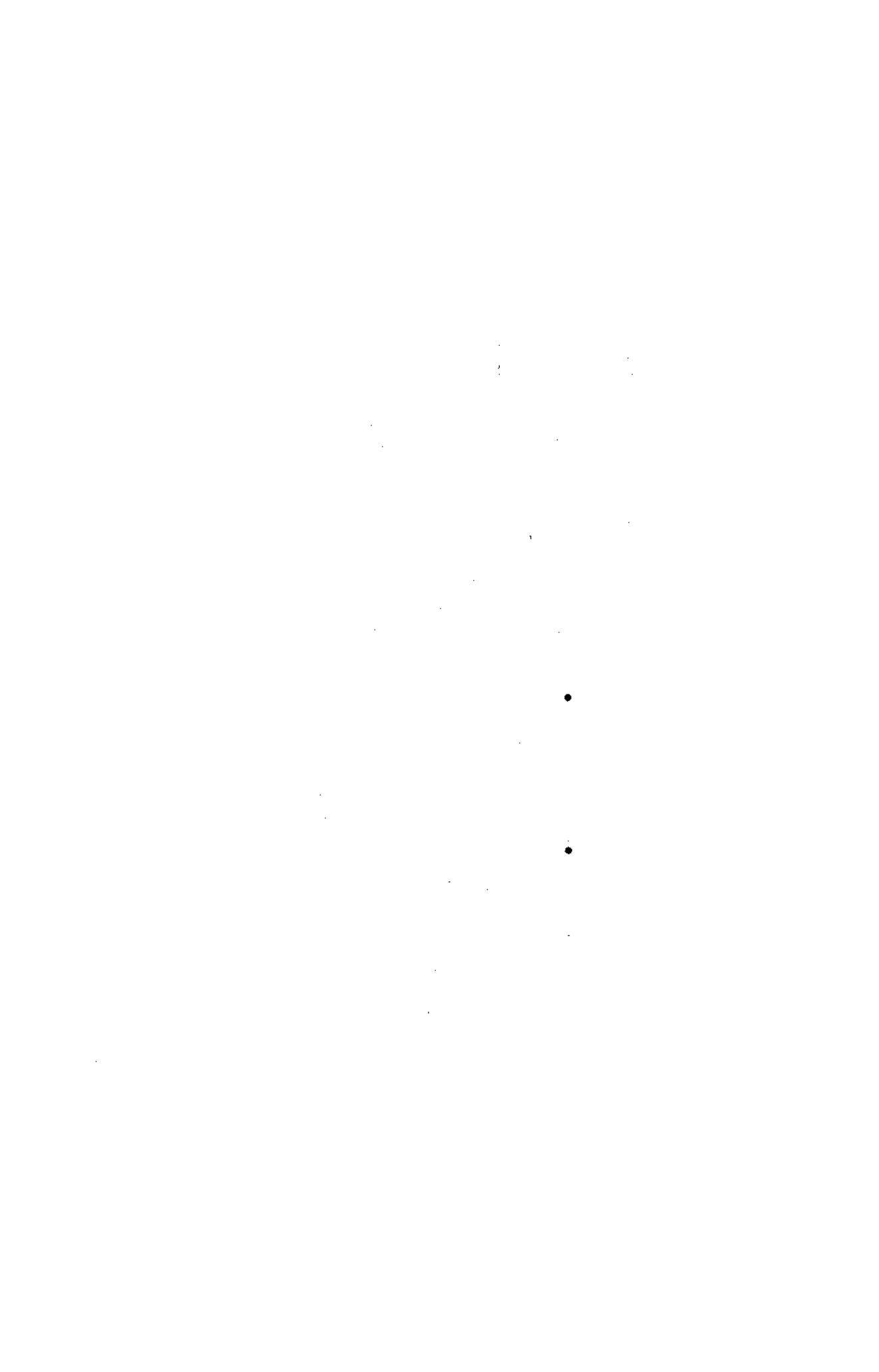


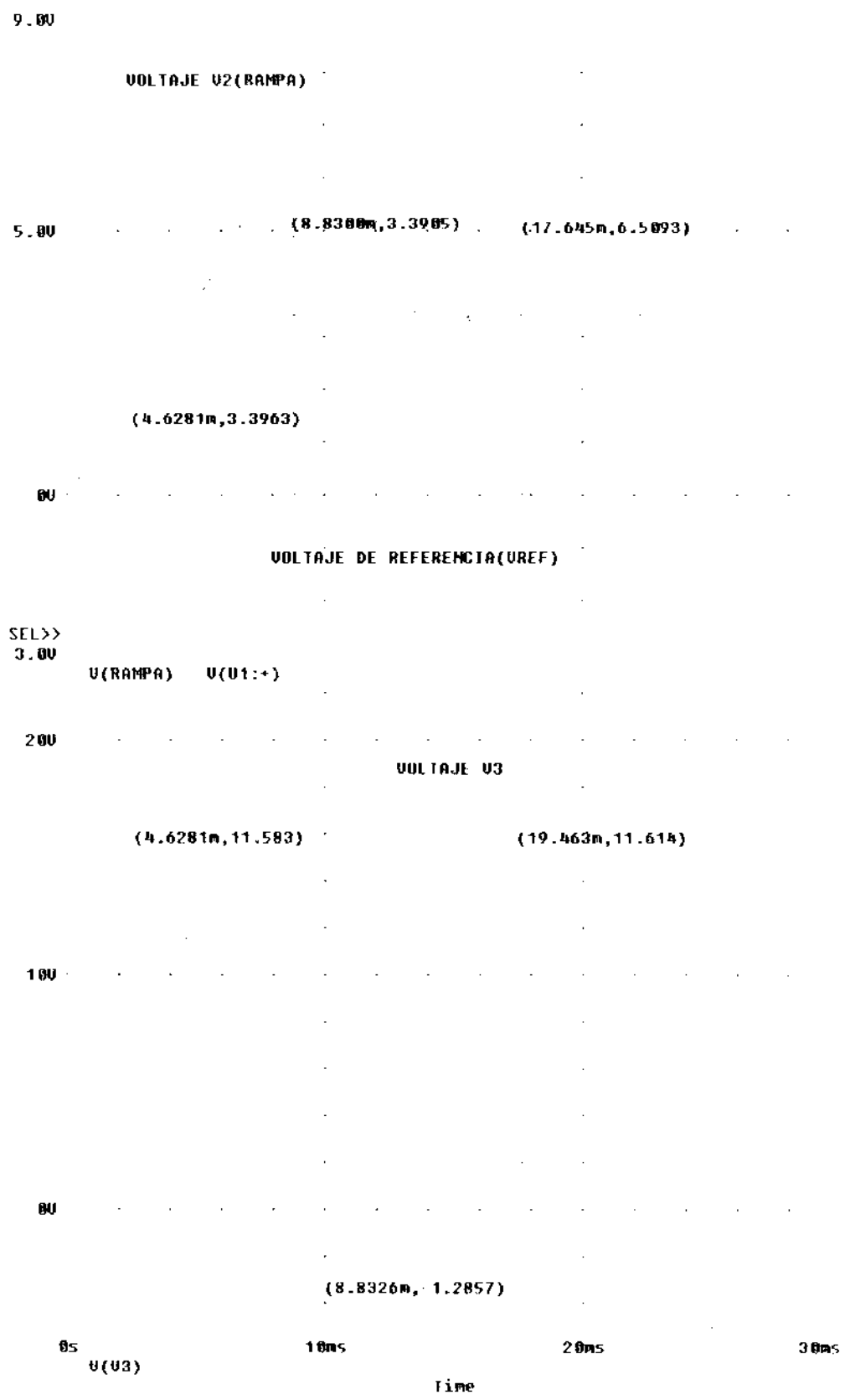
fig. 3.16.

En la figura 3.17. se presenta el circuito del comparador que fué simulado por Pspice. La fuente de voltaje V2 corresponde a la onda triangular. El potenciómetro Pot2 fué simulado colocando un potenciómetro en la mitad, con lo que se obtiene un tiempo de apagado en la mitad del período. El voltaje de salida del comparador corresponde a una onda cuadrada V3, la cual llega al voltaje -0.7V en su estado bajo que corresponde a un diodo en la salida del comparador. Para obtener el voltaje de V3 con 0V como estado bajo se usan dos inversores CMOS. De ésta manera se obtiene en V5 la misma onda V3 pero que llega a 0V en el estado bajo. La salida del primer inversor V4 nos sirve para poder sincronizar los disparos de Q2 y Q22. En la figura 3.18. se muestra el voltaje V3 que sale del LM741 así como el voltaje de referencia y de la rampa. De la misma manera en la figura 3.19 observamos la salida de voltaje V4 del primer inversor y en la fig. 3.20 la del otro inversor, el mismo que nos da la forma de onda requerida, con 0V como estado bajo y también V12, que nos proporciona un retardo requerido en la próxima etapa del circuito.



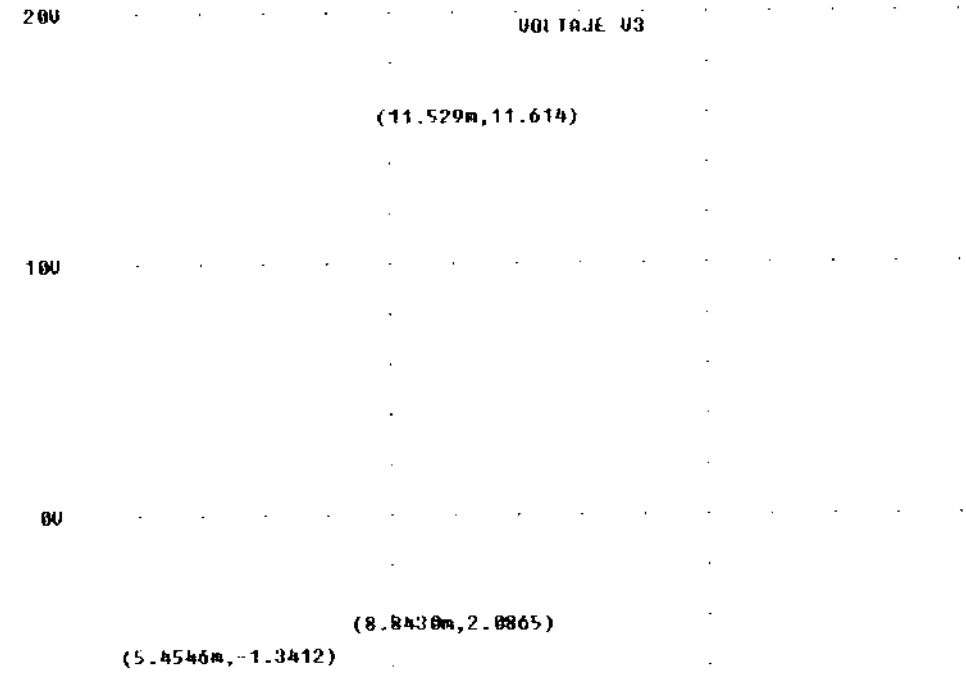
Temperature: 27.0

(A) CIRCUITO COMPARADOR



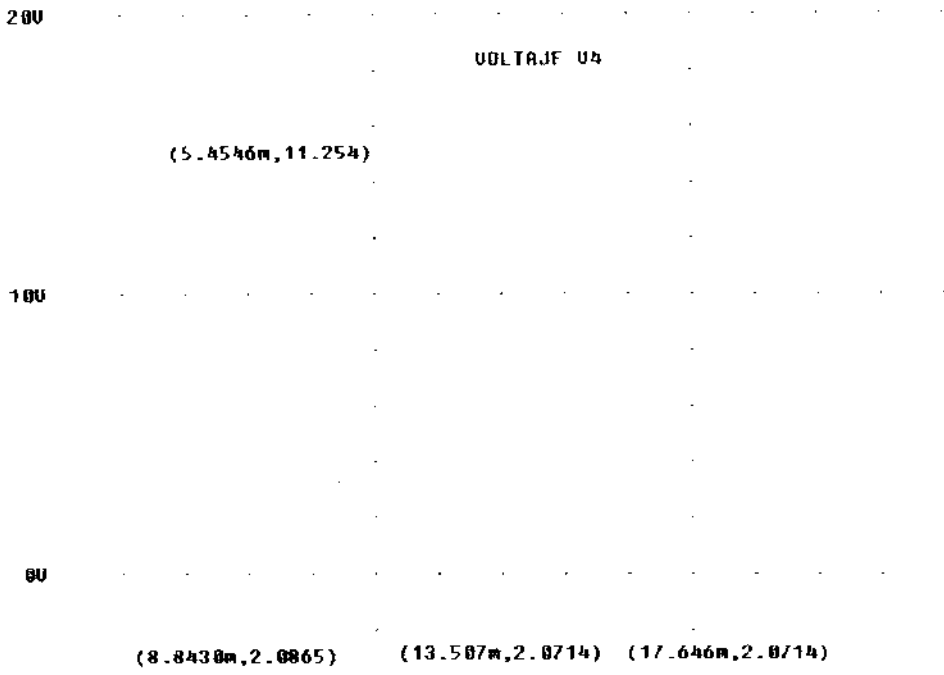
Temperature: 27.0

(A) CIRCUITO COMPARADOR



SEL>>

U(U3)



0s

U(U4)

10ms

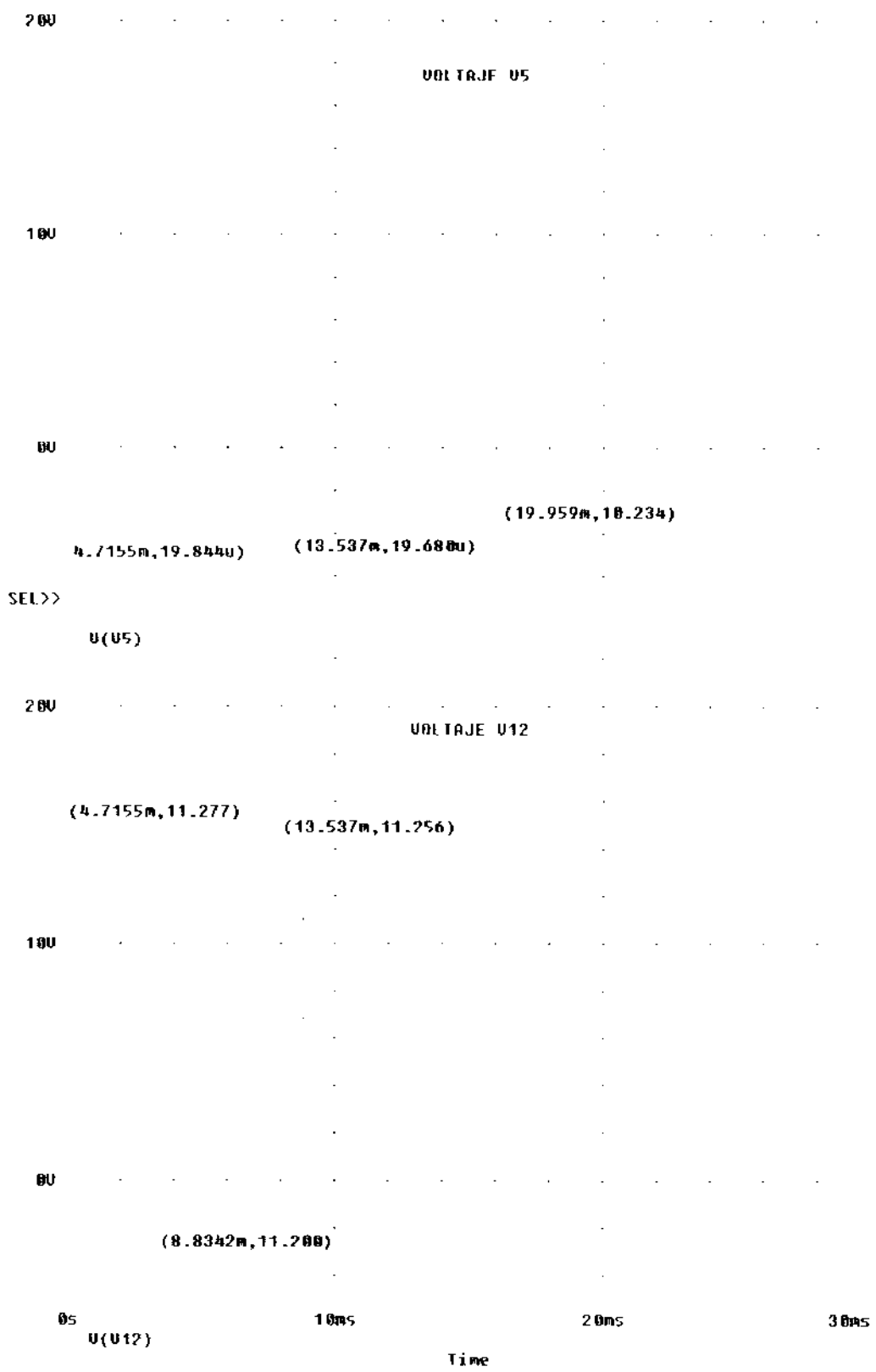
20ms

30ms

Time

Temperature: 27.0

(A) CIRCUITO COMPARADOR



3.2.4 SIMULACIÓN DEL CIRCUITO GENERADOR DEL PULSO PRINCIPAL VG1.

En el circuito generador del pulso principal VG1 se usaron los valores de los componentes que se obtuvieron teóricamente en el diseño y que posteriormente se usaron en la construcción del circuito. Se usó también el LM555 que se encuentra en la librería del programa. La figura 3.21 nos muestra el circuito, en donde se inyectaron V5 y V14, que corresponden a fuentes de pulsos, y simulan lo siguiente: V5 que es la salida del segundo inversor y V14 que es la señal de voltaje que se obtiene del circuito generador del segundo tiempo de separación.

La señal V5 tenía su valor en bajo en 0V tal como era la forma de onda luego de los 2 inversores CMOS.

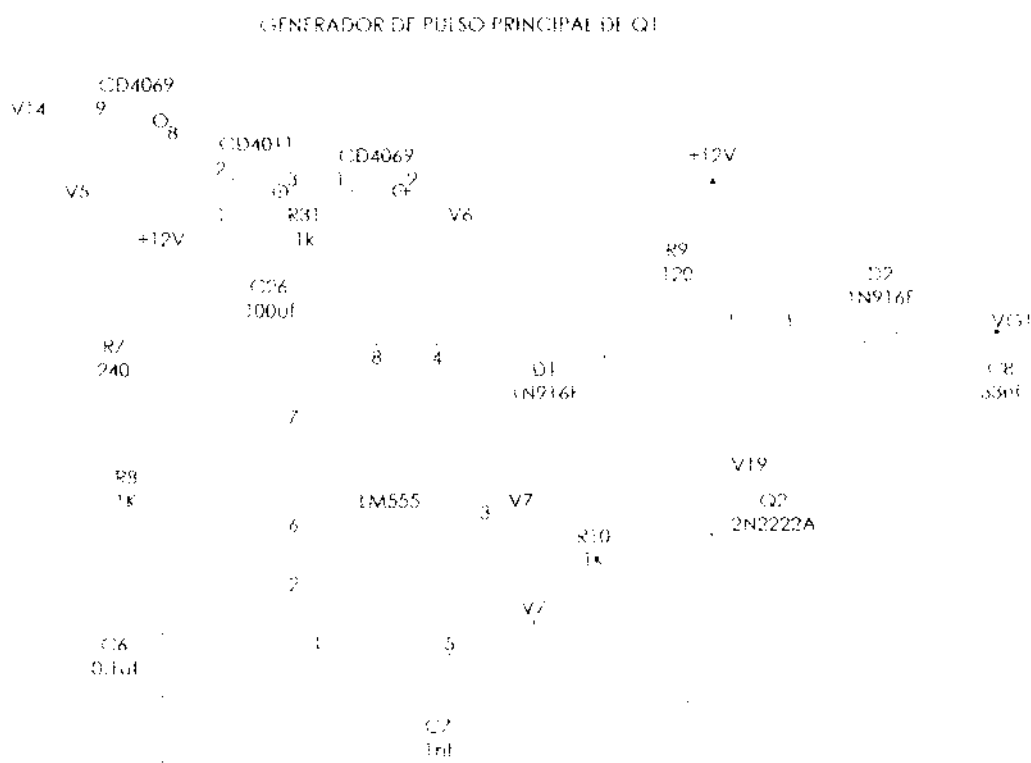
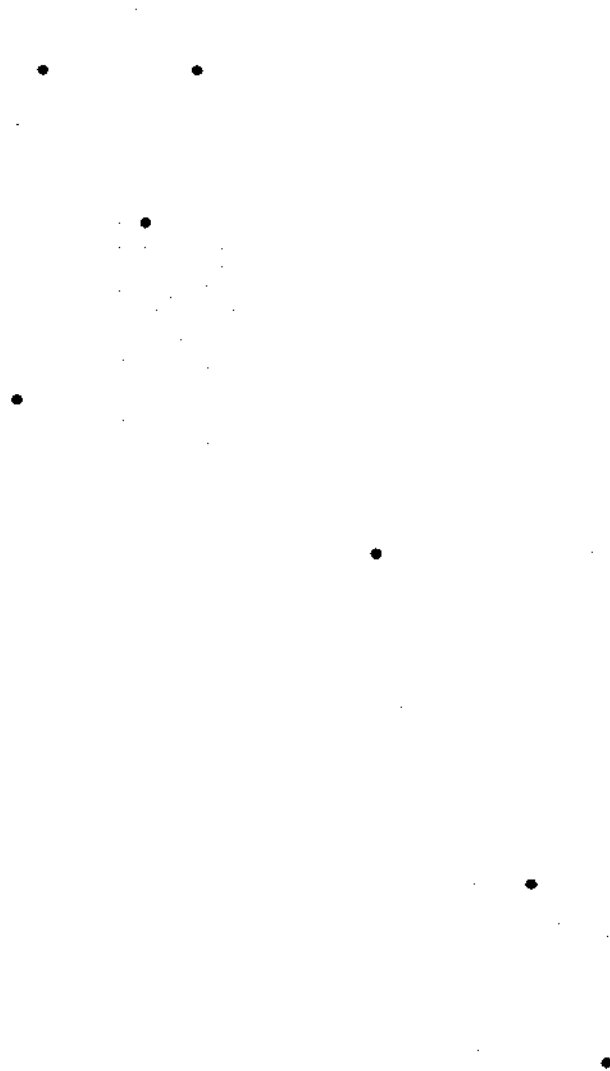


fig. 3.21

La salida de este circuito corresponde a una ráfaga de pulsos de 6.4Khz que posteriormente se inyectará a un amplificador de corriente. Las formas de onda de salida de la simulación, V6 y V7 se muestran en la figura 3.25, y V19, VG1 se muestra en la figura 3.26.



1945
1946
1947
1948
1949

1950
1951
1952
1953
1954
1955
1956
1957
1958
1959
1960
1961
1962
1963
1964
1965
1966
1967
1968
1969
1970
1971
1972
1973
1974
1975
1976
1977
1978
1979
1980
1981
1982
1983
1984
1985
1986
1987
1988
1989
1990
1991
1992
1993
1994
1995
1996
1997
1998
1999
2000
2001
2002
2003
2004
2005
2006
2007
2008
2009
2010
2011
2012
2013
2014
2015
2016
2017
2018
2019
2020
2021

Temperature: 27.0

(C) GENERADOR DEL PULSO UG1

150

VOLTAJES CONTROLADORES DEL CIRCUITO GENERADOR
DEL PULSO UG1

VOLTAJE U16

VOLTAJE U5

(8.9116m, 11.819)

(19.834m, 18.000)

100

(9.1302m, 4.1600)

50

(8.8020m, 666.667m)

(4.6636m, 666.667m)

(13.466m, 666.667m)

00

0s

U(U16)

U(U5)

5ms

10ms

15ms

20ms

25ms

Time

Temperature: 27.0

(C) GENERADOR DEL PULSO UC1

VOLTAJE U6

10U

(20.954m, 10.245)

5U

(9.1302m, 1.0286)

4.6636m, 1.0286)

(13.466m, 1.0286)

0U

U(U6)

12U

VOLTAJE U7

8U

(4.6636m, 2.1571)

(20.442m, 5.7426)

(9.1302m, 2.1571)

(13.424m, 2.1571)

4U

SEL 0

05

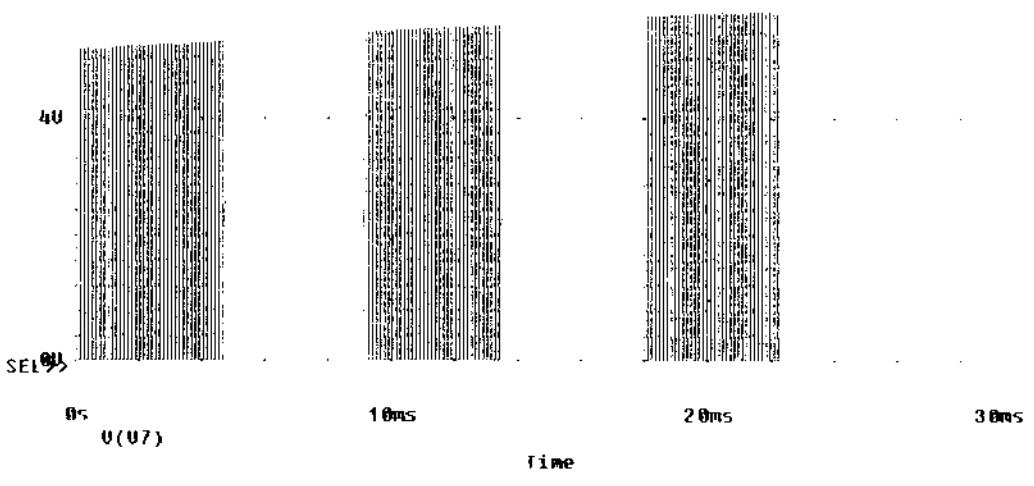
U(U7)

10ms

20ms

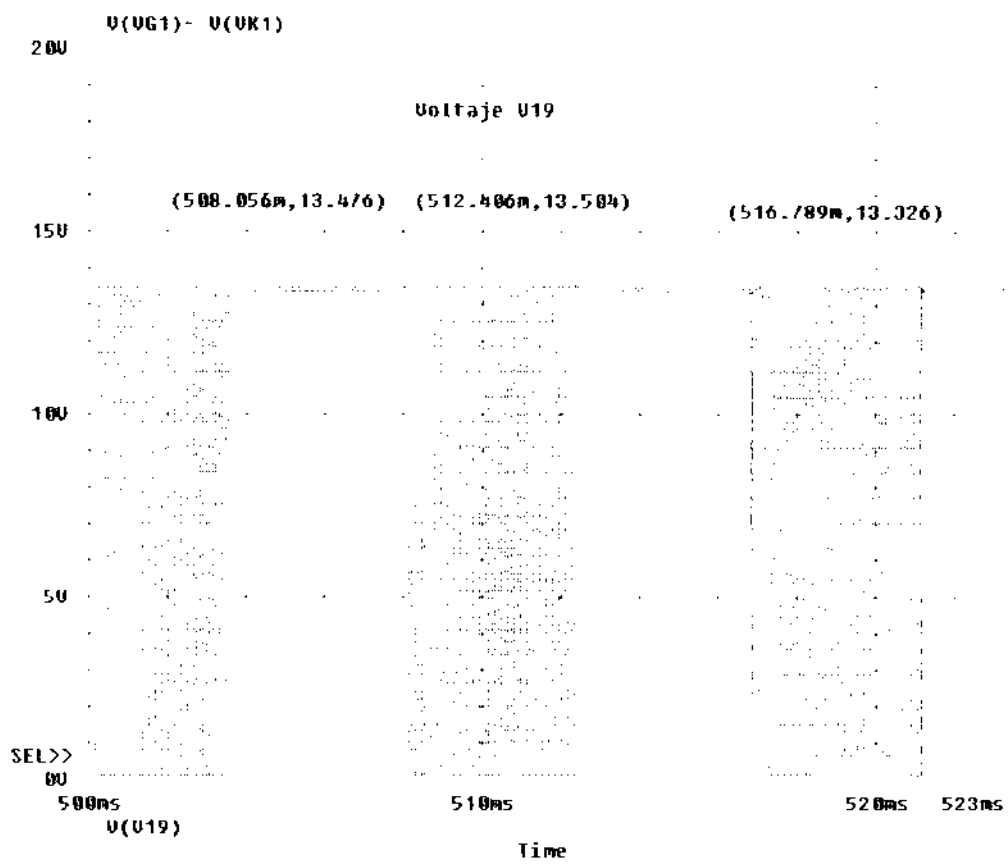
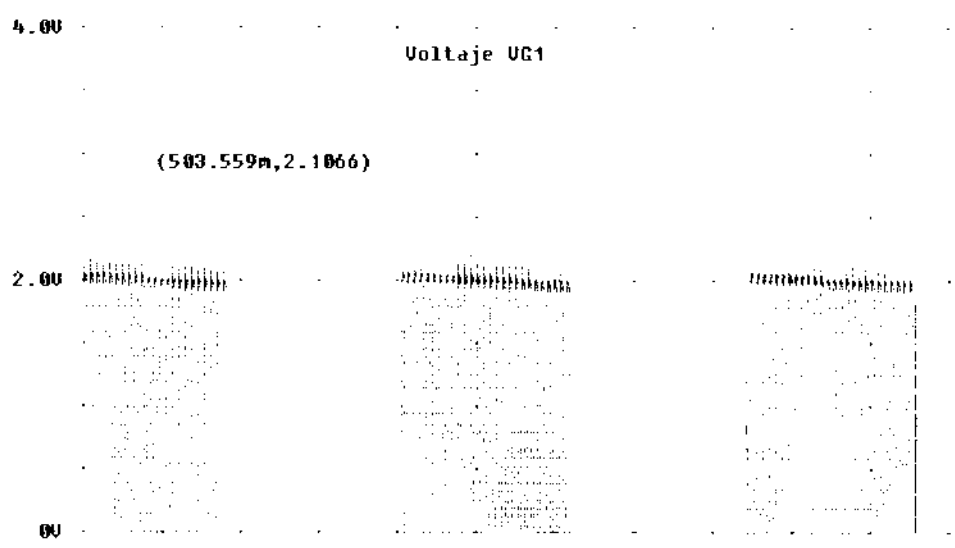
30ms

Time



Temperature: 27.0

(A) C:\PSPICE\M\MSIMEU60\ACOPLA1.DAT



Time: 17:54:50

3.2.5 SIMULACIÓN DEL CIRCUITO GENERADOR DEL PULSO DE CONMUTACION VG11.

El circuito generador del pulso de conmutación está formado por un diferenciador que crea pulsos en 2 instantes: cuando el tiristor principal se enciende y cuando se apaga. Es por este motivo que se ha colocado un diodo, el 1N916F, para dejar pasar solo la señal que apagará al tiristor. El mencionado diodo no existe en la librería del programa pero se usó el diodo 1N4148 que si existe en el programa. También se usó el Integrado LM555 existente en la librería del programa. La forma de onda de V5 y de V8 se muestran en la fig. 3.29.

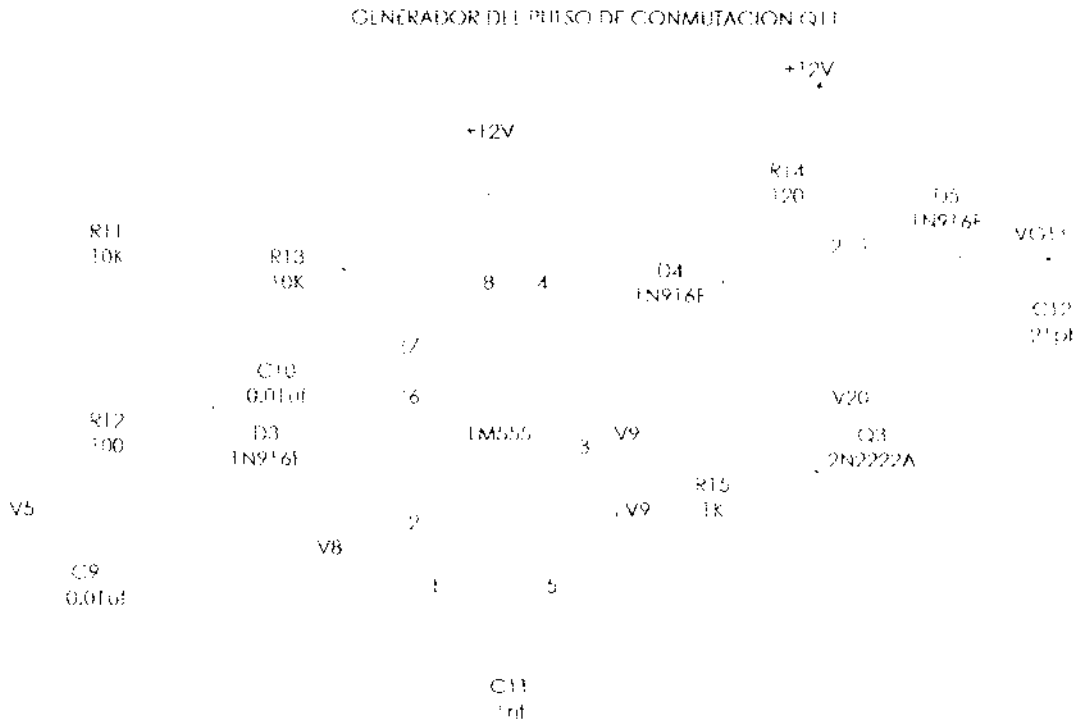


Fig. 3.27.

La señal V5 es una onda cuadrada que se diferencia. Esta se denomina V8 y alimenta al monoestable en el pin 4 del LM555 y es el que activará a dicho integrado para que genere un pulso de duración de 60 useg. en su pin de salida 3, V9 que se muestra en la figura 3.30. Esta señal es la que se inyectará en la resistencia de base del transistor Q3, cuyo colector activa el transformador de pulsos para producir la forma de onda VG11 en el gate del tiristor Q11.

• •

• •

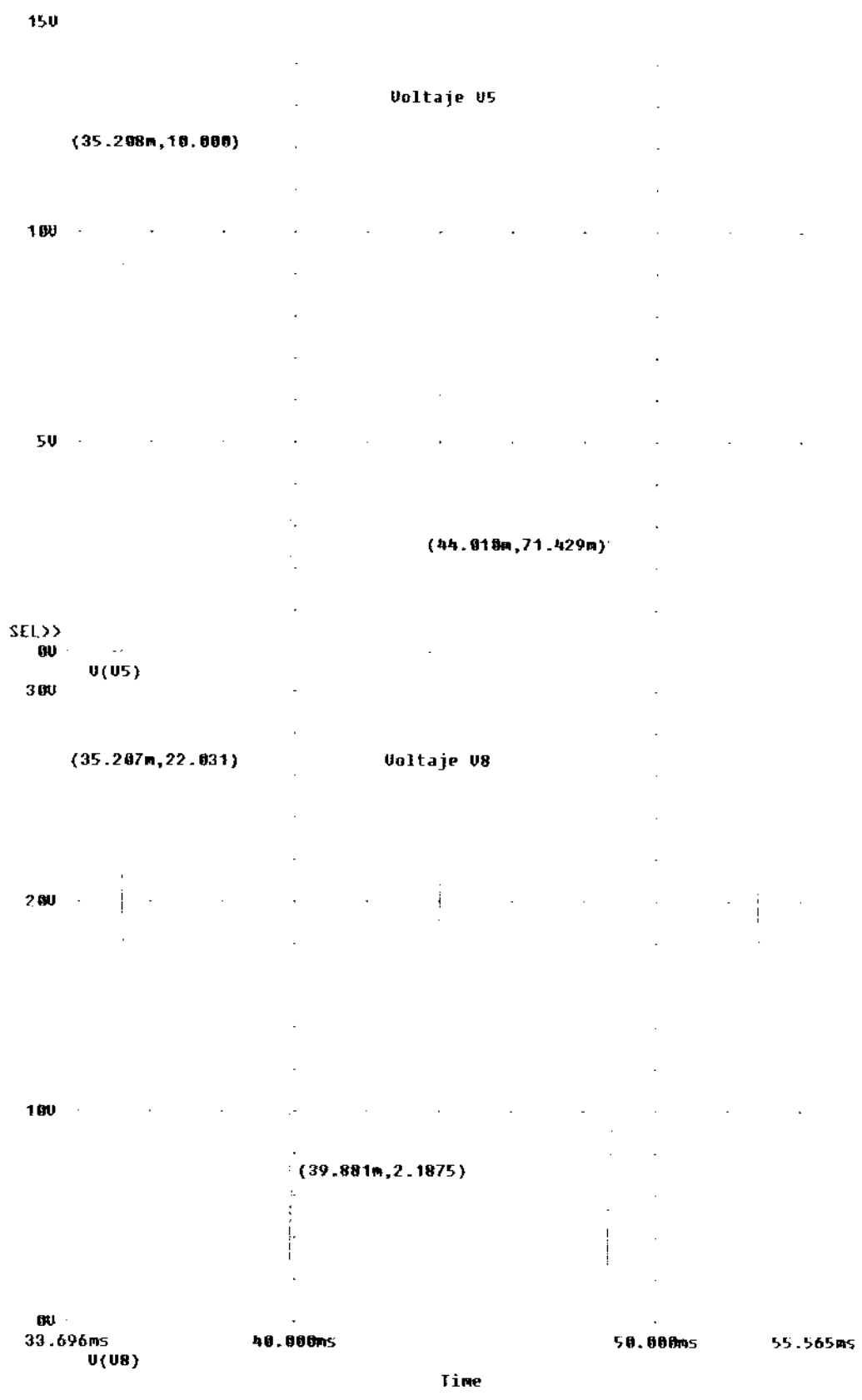
• • •

• • •

• •

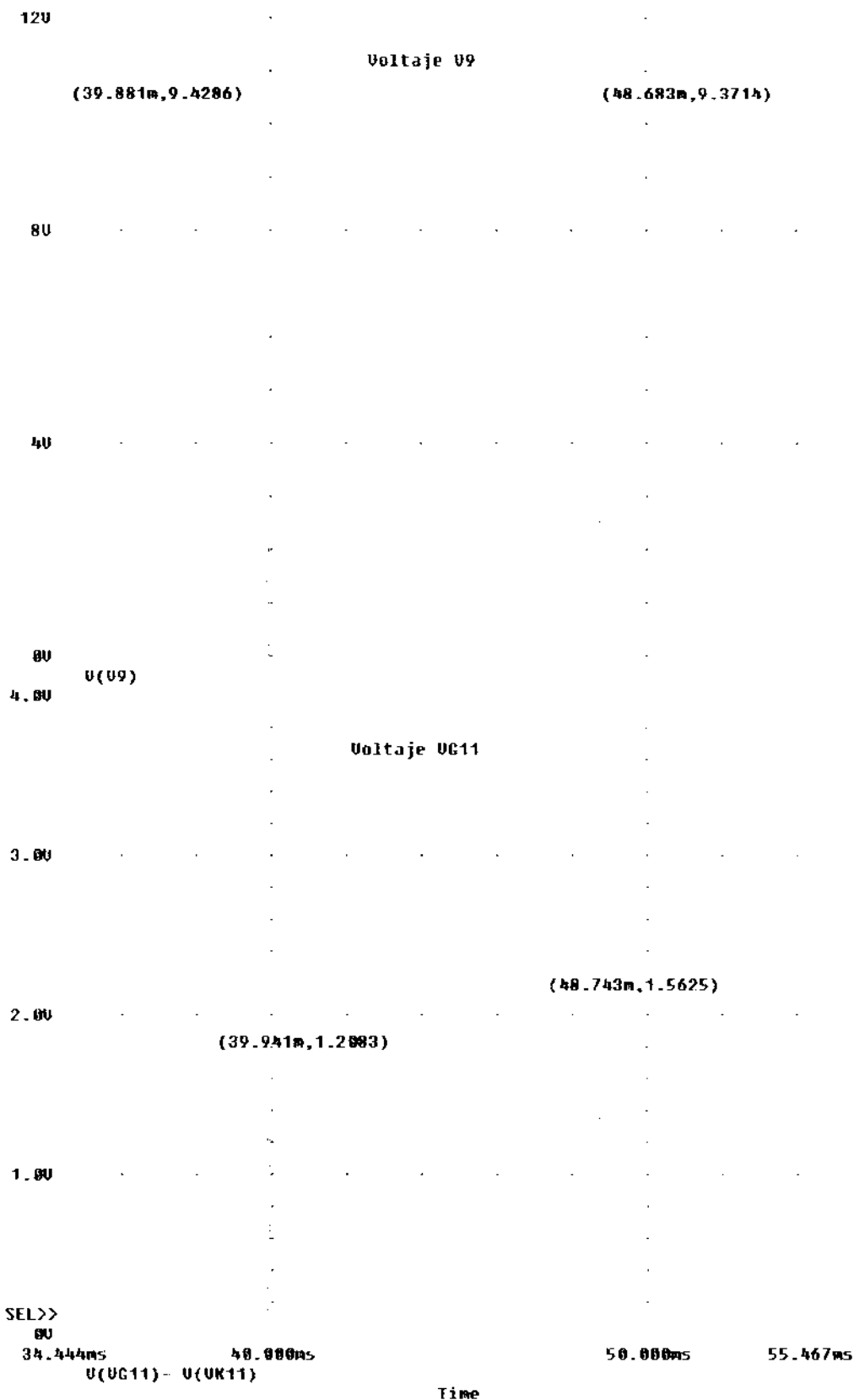
Temperature: 27.8

(A) C:\PSPICE\MSIMEU60\UG11.DAT



Temperature: 27.0

(A) C:\PSPICEW\MSIMEU60\UG11.DAT



3.2.6 SIMULACION DEL CIRCUITO GENERADOR DEL PRIMER TIEMPO DE SEPARACION.

En la figura 3.31 se muestra el circuito generador del primer tiempo de separación. La entrada de dicho circuito es la señal de voltaje V5 y luego de pasar por un diferenciador tenemos flancos, V10 siendo esta señal la que activa al monoestable, tal como ocurría con la etapa generadora del pulso de conmutación VG11, el tiempo de separación es dado por la resistencia R18 y el capacitor C14, tiempo que debe ser suficiente para que el disparo del tiristor Q11 no interfiera con el disparo de Q2.

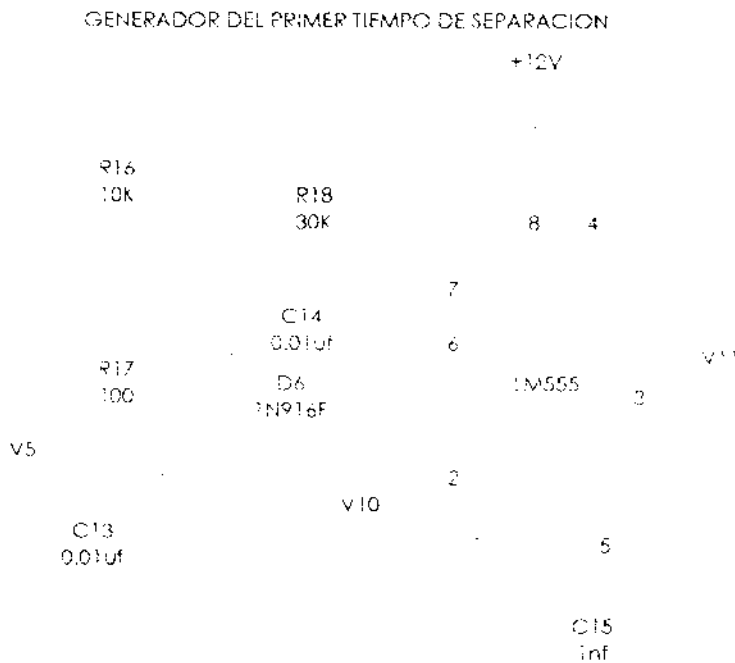
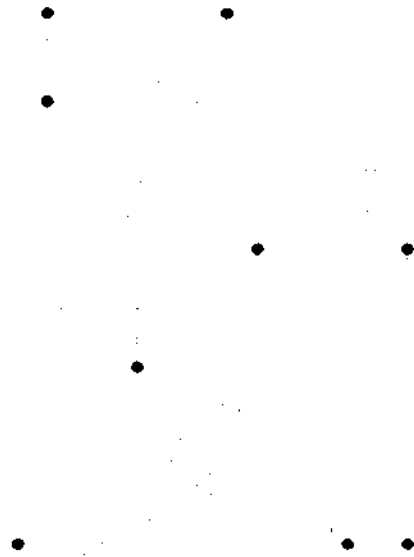


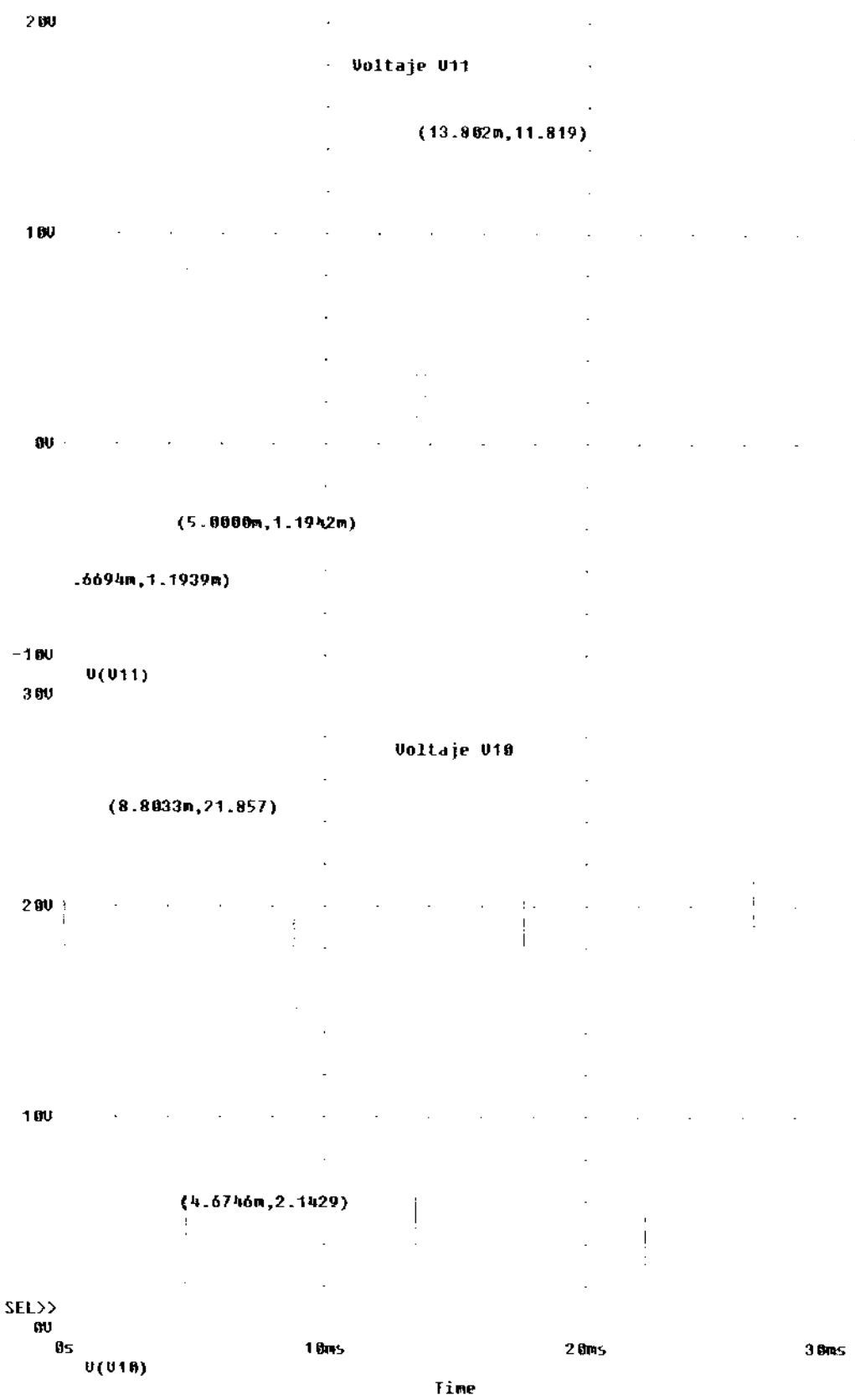
Fig 3.31

La señal simulada se muestra en la figura 3.33 y podemos ver la magnitud del tiempo de separación t_c que es del orden de los 300useg. También podemos ver la forma de onda de V10.



Temperature: 27.0

(A) C:\PSPICE\M\SINEU68\RETARD1.DAT



SEL>>
00

05

U(U10)

10ms

20ms

30ms

Time

3.2.7 SIMULACION DEL CIRCUITO GENERADOR DEL PULSO PRINCIPAL VG2.

En el circuito generador del pulso principal VG2 se usaron los valores de los componentes que se obtuvieron teóricamente en el diseño y que posteriormente se usaron en la construcción del circuito. Se usó también el LM555 que se encuentra en la librería del programa. La figura 3.34 nos muestra el circuito, en donde se inyectaron V11 y V12, que corresponden a fuentes de pulsos, y simulan lo siguiente: V12 que es la salida del circuito RC que corresponde a V4 pero con un retardo de 1 useg. segundo y V11 que es la señal de voltaje que se obtiene del circuito generador del primer tiempo de separación. Luego el producto V13 se inyecta al pin 4 del LM555, cuya salida V14 se inyecta a una segunda etapa simulada (fig. 3.36)

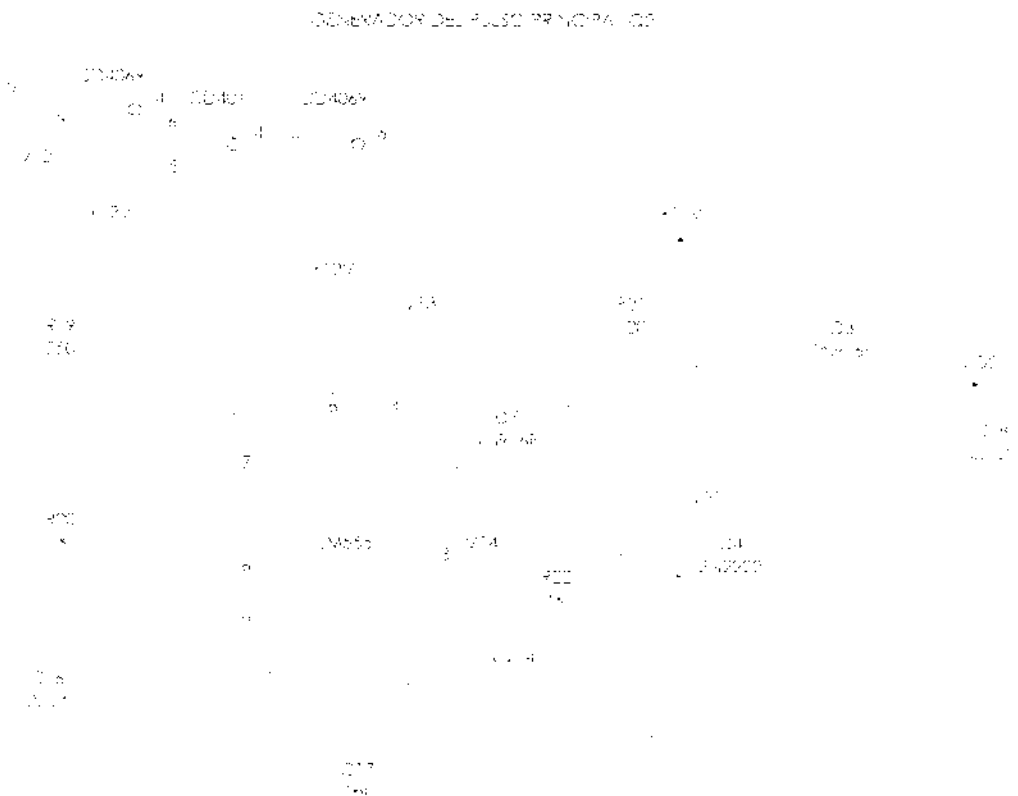


fig. 3.34

La salida de este circuito corresponde a una ráfaga de pulsos de 6,4Khz que posteriormente se inyectará a un amplificador de corriente. Las formas de onda de salida de la simulación, V13, V11 y V12 se muestran en la figura 3.37 y V21, VG2 se muestran en la figura 3.39.

..... ● ●

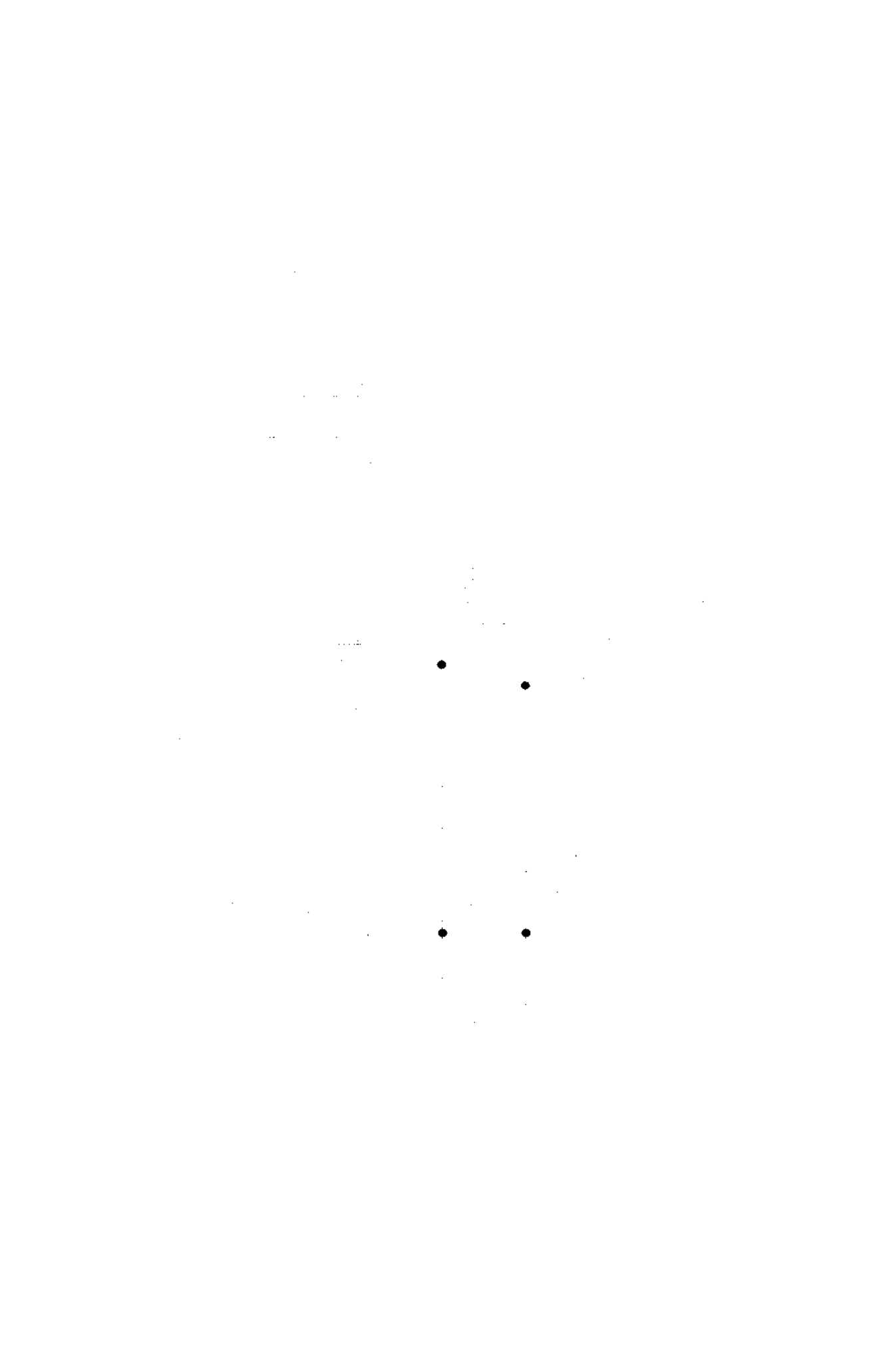
..... ● ●

..... ●

..... ●

..... ●

..... ●



Temperature: 27.0

(A) C:\PSPICE\M\SIMEU60\UG2A.DAT

120

Voltaje U13

80

40

1118n, 57.143m)

(8.9456n, 20.375u)

SEL>>

00

U(U13)

150

Voltajes U11 y U12

U11

100

U12

50

619n, 10.634m)

00

05

U(U11)

U(U12)

10ms

20ms

30ms

Time

Temperature: 27.8

(A) C:\PSPICEW\MSIMEU68\UG2A.DAT

12U

Voltaje en el Capacitor C16

(14.844m,7.9524)

8U

15.70m,3.9524)

4U

8U

U(2)

Voltaje U14

5.1820m,9.2242)

(8.9223m,9.2286)

18U

5U

0U

SEL>>

-5U

0s

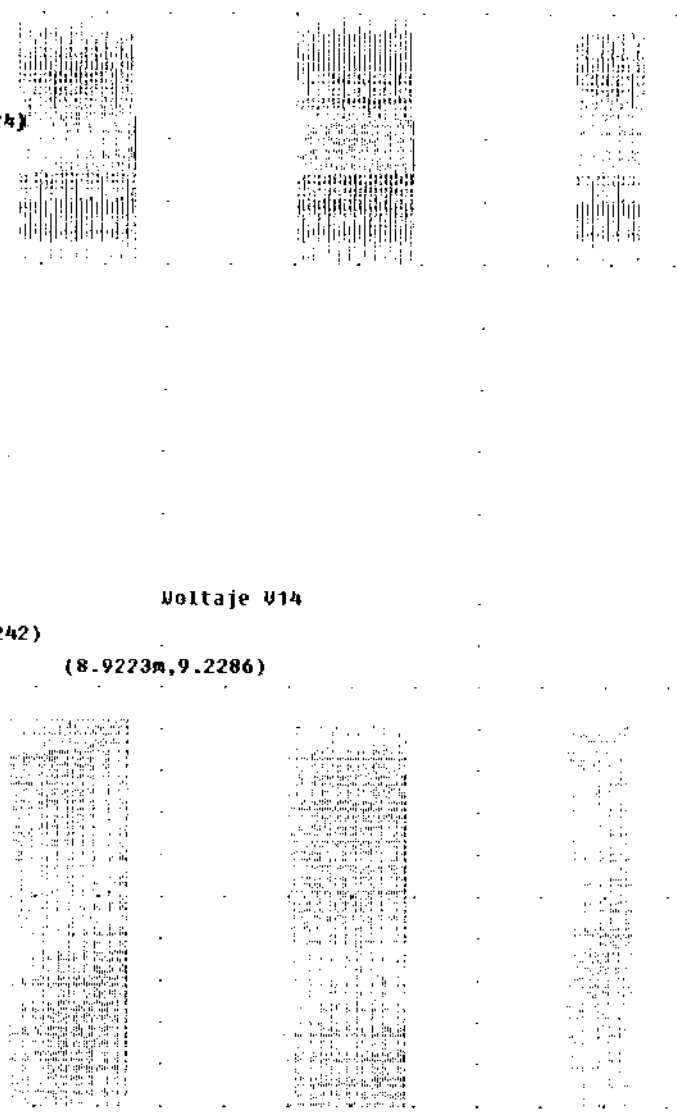
U(U14)

10ms

20ms

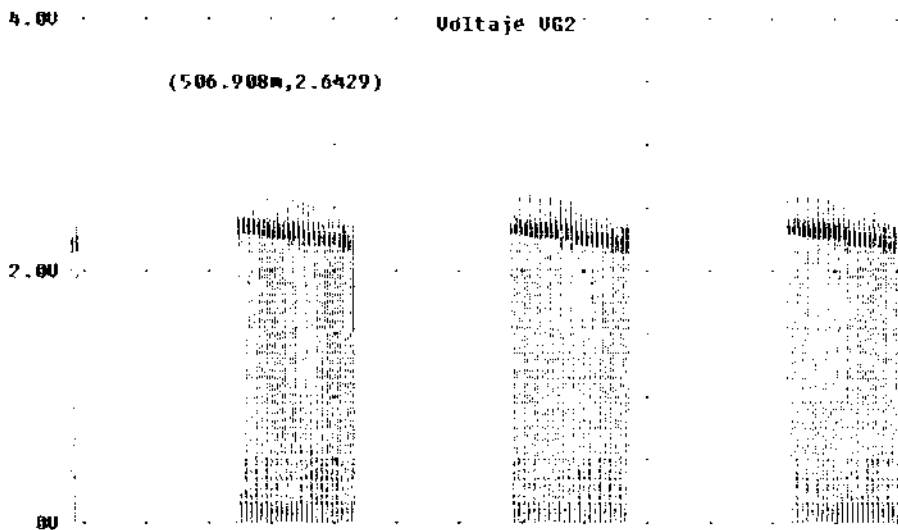
30ms

Time

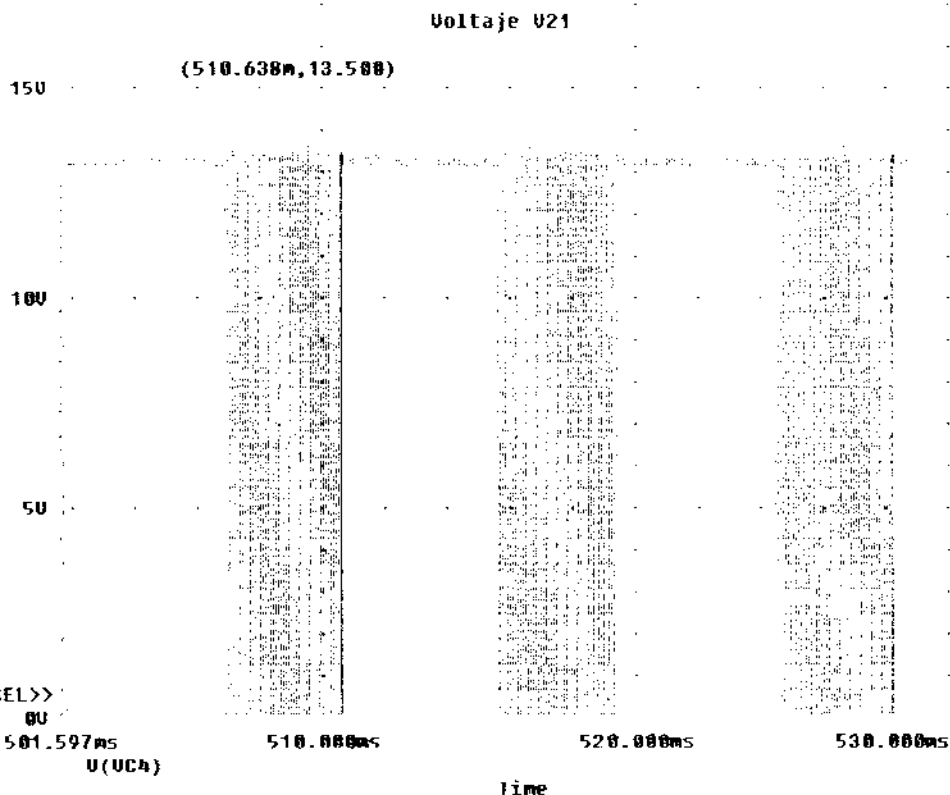


Temperature: 27.8

(A) C:\PSPICEW\MSIMEU68\ACOPLA2.DAT



U(UG2) - U(UK2)



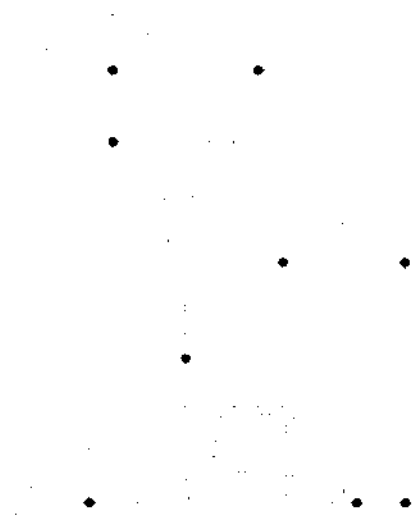
3.2.8 SIMULACION DEL CIRCUITO GENERADOR DEL PULSO DE CONMUTACION VG22.

El circuito generador del pulso de conmutación está formado por un diferenciador que crea pulsos en 2 instantes: cuando el tiristor principal se enciende y cuando se apaga. Es por este motivo que se ha colocado un diodo, el 1N916F, para dejar pasar solo la señal que apagará al tiristor. El mencionado diodo no existe en la librería del programa pero se usó el diodo 1N4148 que si existe en el programa. También se usó el Integrado LM555 existente en la librería del programa. La forma de onda de V12 y de V17 se muestran en la fig. 3.42.



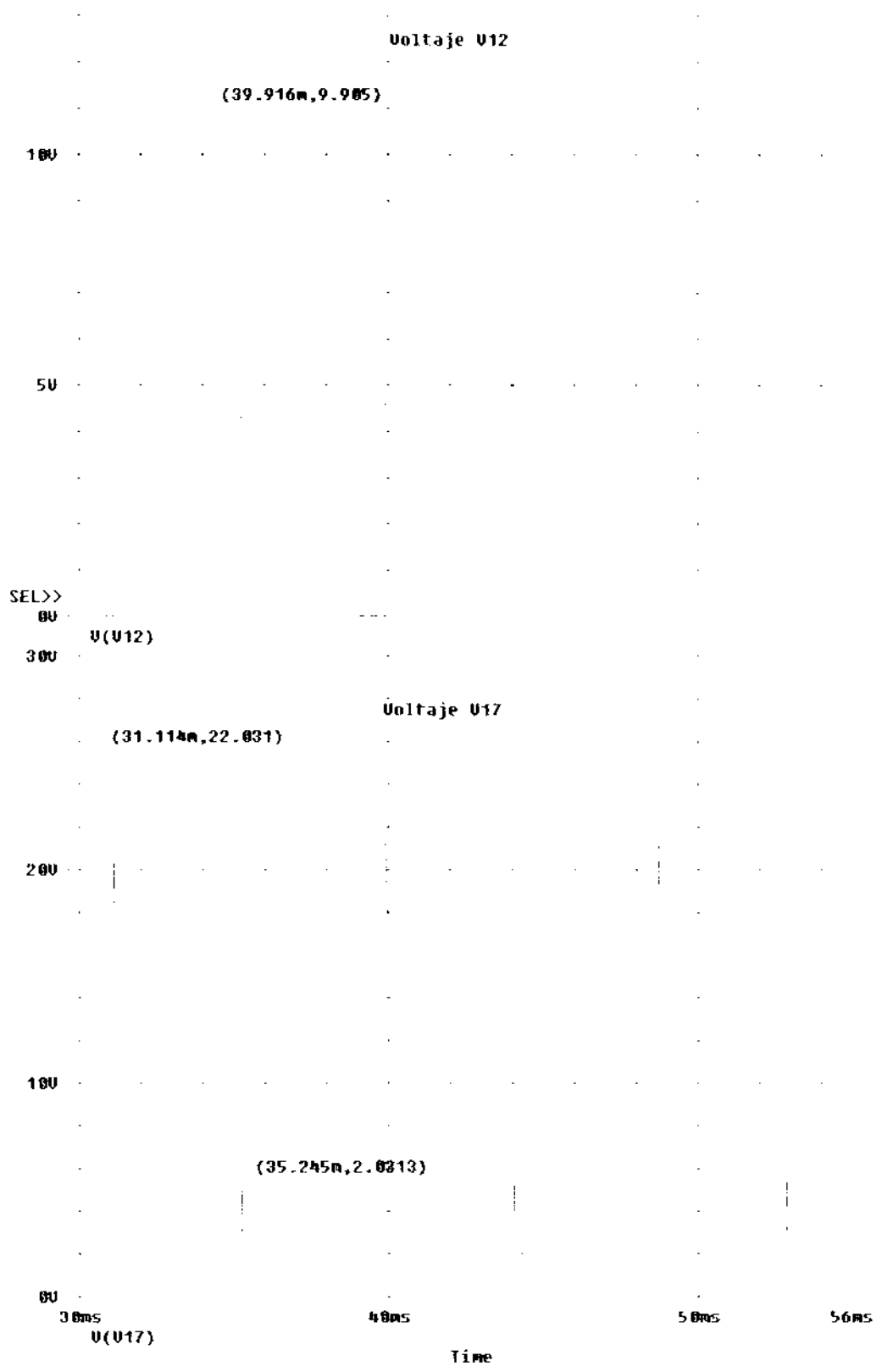
fig. 3.40

La señal V12 es una onda cuadrada que se diferencia. Esta se denomina V17 y alimenta al monoestable en el pin 2 del LM555 y es el que activará a dicho integrado para que genere un pulso de duración aproximada a los 60 useg. Estos pulsos de salida, V18, que se muestra en la figura 3.43. Esta señal es la que se inyectará en la resistencia de base del transistor Q3, cuyo colector activa el transformador de pulsos para producir la forma de onda VG22 en el gate del tiristor Q22.



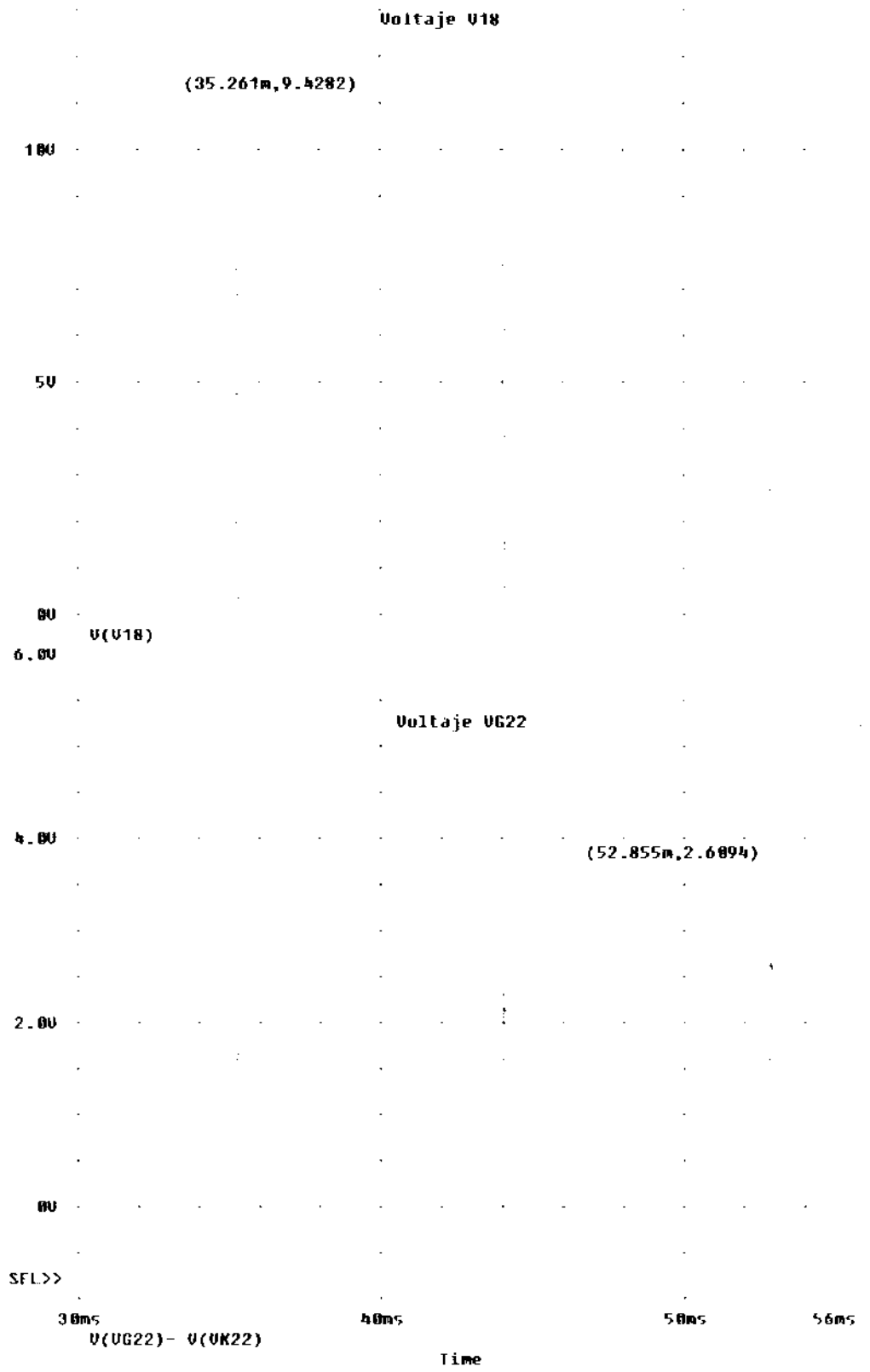
Temperature: 27.8

(A) C:\PSPICE\MSINEU68\UG22.DAT



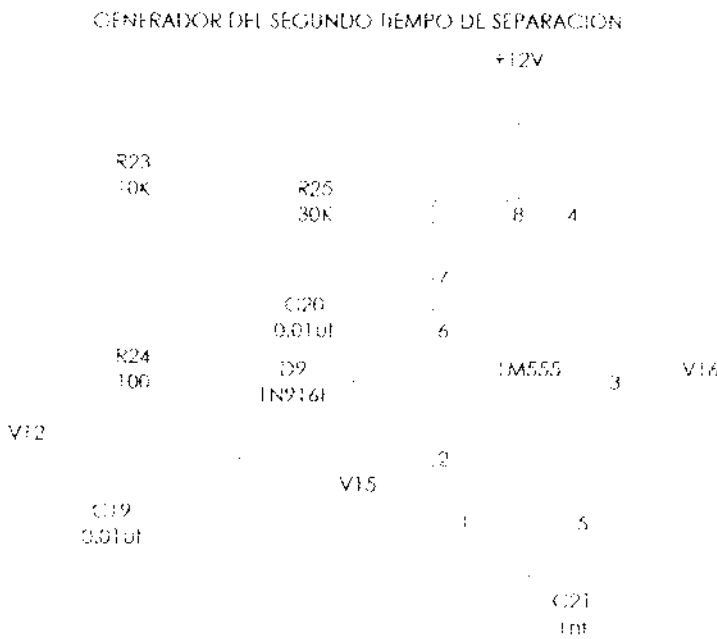
Temperature: 27.0

(A) C:\PSPICEW\MSIME U60\UG22.DAT

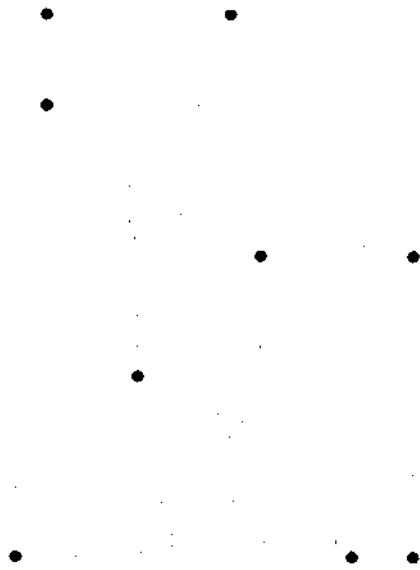


3.2.9 SIMULACION DEL CIRCUITO GENERADOR DEL SEGUNDO TIEMPO DE SEPARACION

En la figura 3.44 se muestra el circuito generador del segundo tiempo de separación. La entrada de dicho circuito es la señal de voltaje V12 y luego de pasar por un diferenciador tenemos flancos, V15 siendo esta señal la que activa al monoestable, tal como ocurría con la etapa generadora del pulso de conmutación VG22, el tiempo de separación es dado por la resistencia R25 y el capacitor C20, tiempo que debe ser suficiente para que el disparo del tiristor Q22 no interfiera con el disparo de Q1.

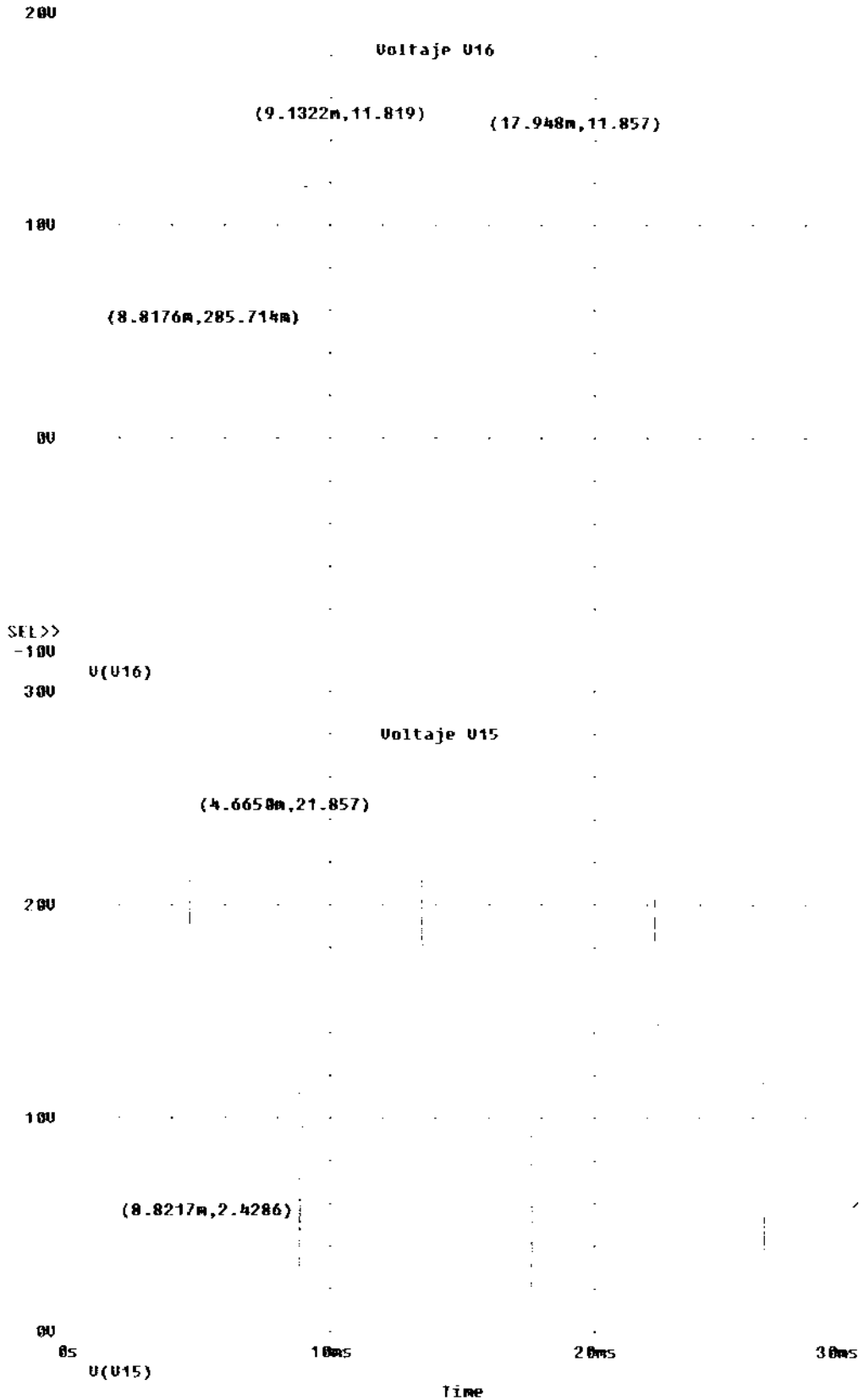


La señal simulada V16 se muestra en la figura 3.46 y podemos ver la magnitud del tiempo de separación t_c que es del orden de los 300useg. También podemos ver la forma de onda de V15.



Temperature: 27.0

(A) C:\PSPICE\WMSIMEV60\RETARD2.DAT



C A P I T U L O I V

RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.1. RESPUESTAS DEL CIRCUITO DE FUERZA DEL TROCEADOR.

Los resultados experimentales finales que se obtuvieron luego de realizadas las diferentes pruebas correspondientes es decir antes de calibrar adecuadamente las bobinas se muestran en las figuras que mas adelante seran mostradas, cabe señalar que las formas de onda observadas en el osciloscopio son dibujadas en el presente informe por tal motivo las escalas en muchos gráficos son un tanto exageradas con en el fin de que se aprecien todos los valores importantes para el desarrollo de este proyecto es por esto que se pide al lector tener en cuenta lo antes mencionado.

En la figura 4.1 se muestran el voltaje de salida (V_o), el voltaje del capacitor C1 (V_{C1}), voltaje del capacitor C2 (V_{C2}) y la corriente en la carga (I_o).

Al analizar estas formas de onda podemos notar lo siguiente: el voltaje V_o corresponde a un voltaje troceado como se esperaba, aunque su forma de onda no es ideal, además de esto se observa que el voltaje de salida tiene valores negativos (-0.8 volts) esto se debe a la naturaleza de los elementos ya que en la parte teórica se asume elementos ideales, pero en realidad sus parámetros tales como voltajes en conducción directa afectan el resultado de la forma de onda esperada.

En cuanto al voltaje del capacitor C1 podemos ver que los valores que posee se encuentra en un rango $-7 \leq V_{C1} \leq 12$ voltios la caída de 12 V, a

-7 V, se justamente en el periodo de conmutación es mas la forma de onda V_{A2} es de idéntica forma que V_{A1} con la diferencia que se dan en tiempos diferentes porque cada uno cumple la función de apagar su tiristor respectivo.

La corriente de salida I_s es de forma continua con un valor máximo positivo, valor mínimo negativo, obteniéndose un valor promedio de I_s positivo.

En la fig. 4.2 se muestran las formas de onda de: Voltaje ánodo cátodo del tiristor principal (V_{AK1}), V_{AK2} , V_{D2} , V_{AK11} .

En el voltaje V_{AK1} existen picos negativos de -0.7V, en el periodo de conducción se mantiene en 1V en el instante $t_{D1} = 7.2\text{ms}$ cae a -0.7V y sube a 13V se mantiene en este aproximadamente 300 microsegundos hasta estabilizarse en 11V, hay que tener en cuenta que en el momento que V_{AK1} cae de 11V a -0.7V es justamente en el instante ($t_{D1} = 7.2\text{ms}$) en el cual el tiristor deja el periodo de conducción para dar paso al periodo de conducción del tiristor Q_2 . La explicación de la forma de onda del V_{AK2} es similar a la del tiristor Q_1 .

Por otra parte vale indicar que estos gráficos se tomaron para un valor intermedio del rango de velocidad, dicho valor de velocidad nos da un promedio de corriente del troceador tal que el funcionamiento del mismo se realiza en el primer cuadrante.

Los gráficos para el troceador en el segundo cuadrante no se los pudo tomar, pero se pudo visualizar que la tendencia del circuito de control para llevar a éste hacia el segundo cuadrante si se daba. Es más se pudo visualizar que la forma de onda de corriente de salida tiene picos negativos. Este problema se debe a que los parámetros del motor hacen que la f.c.e.m. del mismo no sea mayor que el promedio del voltaje troceado, lo cual es lo fundamental para el funcionamiento del troceador clase B.

FORMAS DE ONDA EXPERIMENTALES DEL CIRCUITO DE FUERZA

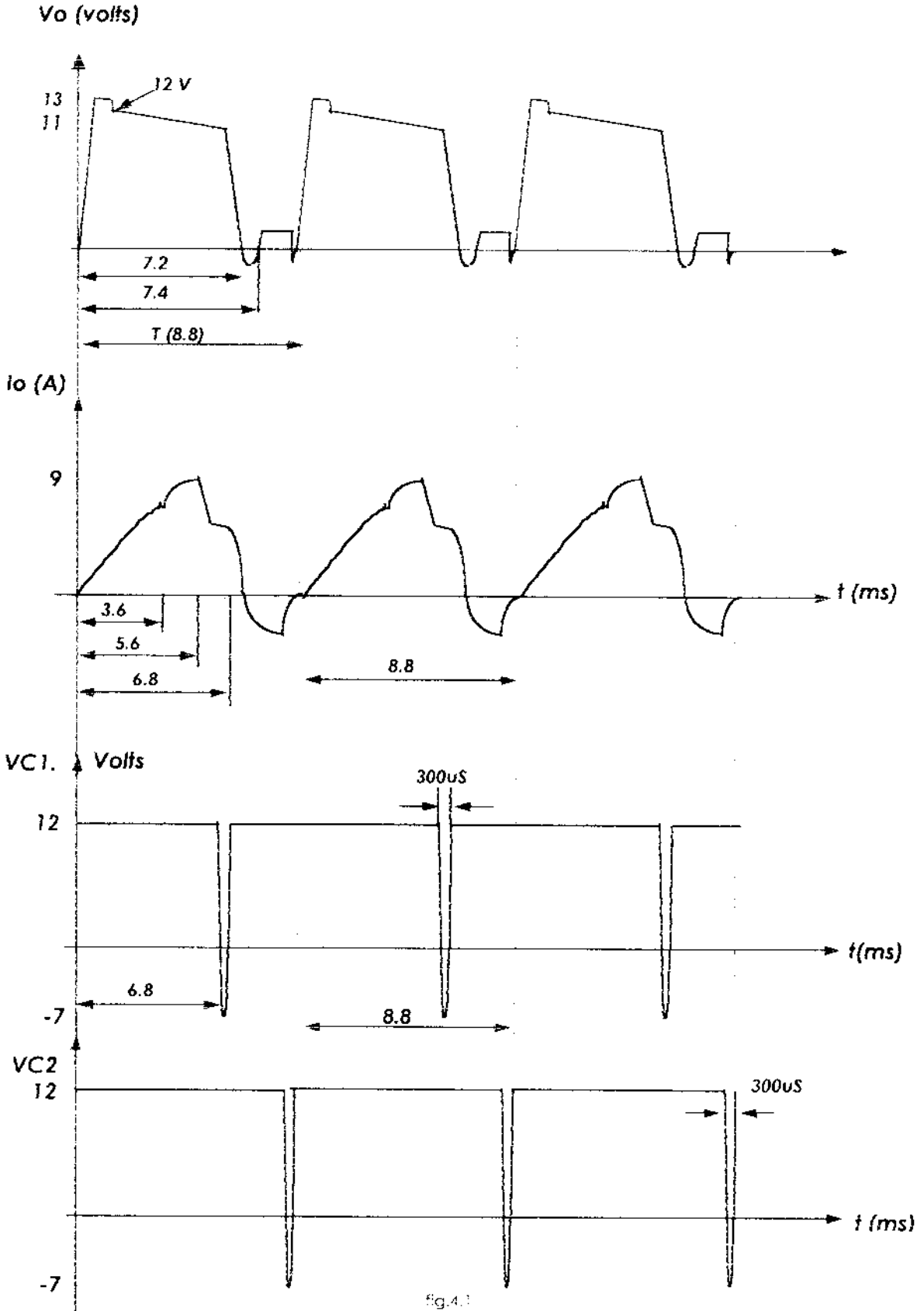


fig.4.1

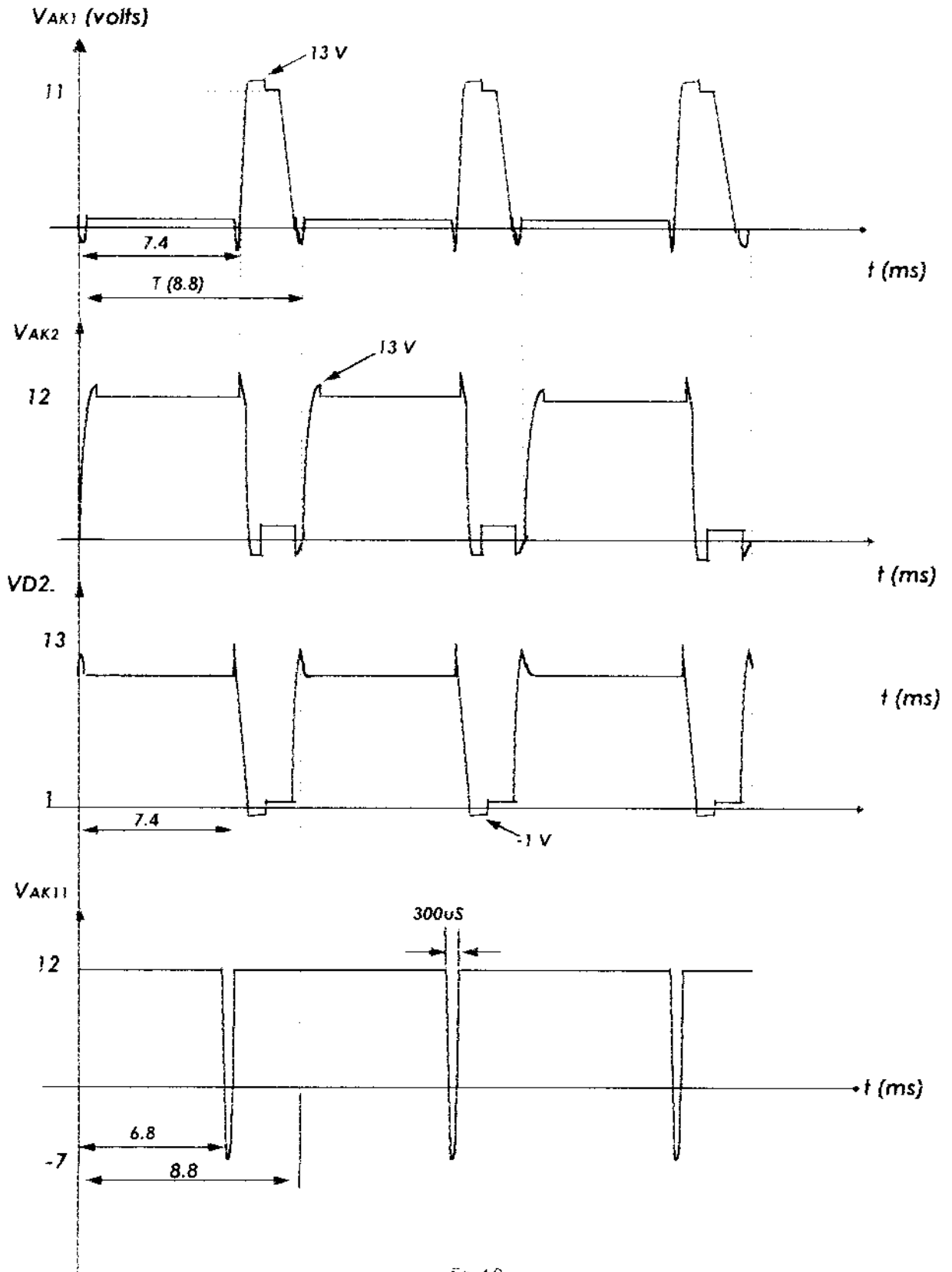


Fig. 4.2

4.2. RESPUESTAS DEL CIRCUITO DE CONTROL DEL TROCEADOR.

Con el circuito Regulador de frecuencia se fija 115 Hz de frecuencia de troceo es decir un período de 8,8ms. Tanto en el diseño, como en la parte experimental y simulada se obtienen las mismas formas de onda para la salida V1. Luego en el generador de rampa la salida V2 obtenida del diseño es la misma que para la simulación con un máximo de voltaje en 7V mientras que para la salida experimental el máximo voltaje es de 6.5V.

La siguiente etapa es el comparador cuya salida experimental V3 se toma después de 2 inversores CMOS. La salida experimental se comporta según lo esperado con un voltaje en bajo de 0V y un máximo de 11.5V. La salida simulada se tomó antes de los inversores, es decir a la salida del UA741, y si comparamos ésta con la salida simulada de todos modos son iguales hasta ese nodo.

Las salidas de las ondas descritas anteriormente las podemos observar en la figura 4.3

La señal V3 se inyecta al pin 4 del 1M555 en configuración astable que opera como generador de alta frecuencia (20khz). Pero esta señal se inyecta a dicho pin luego de pasar por una lógica digital que toma una señal que retardará el disparo del tiristor 1 con respecto al tiristor 22. La salida de este generador se denomina V4 y es una ráfaga de pulsos según lo esperado por los datos del diseño. Las salidas tanto simulada como experimental son de formas parecidas: un voltaje en alto de 11.5V y un bajo en 0V tal como se aprecia en la fig. 4.4.

La señal V4 se inyecta a un amplificador de corriente que tiene acoplado un transformador de pulsos de cuyo secundario obtenemos la señal VG1 que es la que dispara al tiristor principal Q1. La salida experimental de la forma de onda de VG1 se muestra en la figura 4.7 y se asemeja a la señal simulada la cual tiene un pico de 4V y un valor estable



de 1V. La salida experimental tiene un pico de 4V y un valor estable de 1.1V.

Para generar el pulso de conmutación usamos el integrado LM555 en configuración monoestable, pero dicha configuración es disparada por una red diferenciadora y por un diodo. Las formas de onda para esta parte del circuito de control son mostradas en V8 y V9 de la figura 4.4 y 4.5 respectivamente. Si comparamos las salidas simuladas con las experimentales notamos que estas tienen formas similares, así tenemos que el voltaje V8 simulado tiene un pico positivo de 22V y otro de 0.2V, en la salida experimental tenemos que V8 tiene un pico positivo de 24V y uno de 0V, lo cual nos verifica las formas de onda requeridas. De la misma manera para la señal del pulso de conmutación, en la salida del LM555 se tiene en la simulación un ancho de pulso se aproximadamente 100us y para la experimental 70us.

Valo indicar que la circuitería electrónica para los tiempos de retardo son similares a la de los pulsos de conmutación, por lo que su forma de onda son similares, esto se comprueba al comparar las ondas simuladas con las experimentales, es decir comparando la forma de onda de V10 y V15 encontraremos las similitudes mencionadas, la señal V10 la podemos apreciar en la figura 4.4 y la de V15 la podemos ver en la figura 4.6.

De la misma manera que la señal V9, la señal V18 que da el pulso de conmutación para el tiristor Q22 es de las mismas características, tanto en la parte simulada que en la experimental, la forma de onda de la parte experimental para esta señal la podemos apreciar en figura 4.6

La forma de onda experimental de los gates de los tiristores es decir VG1, VG2, VG11 y VG22 son mostradas en la figura 4.7 y nos demuestra el buen funcionamiento del circuito de control en cuanto a los disparos de los tiristores se refiere, la misma que es la parte fundamental del funcionamiento del troceador.

VOLTAJES DEL CIRCUITO DE CONTROL

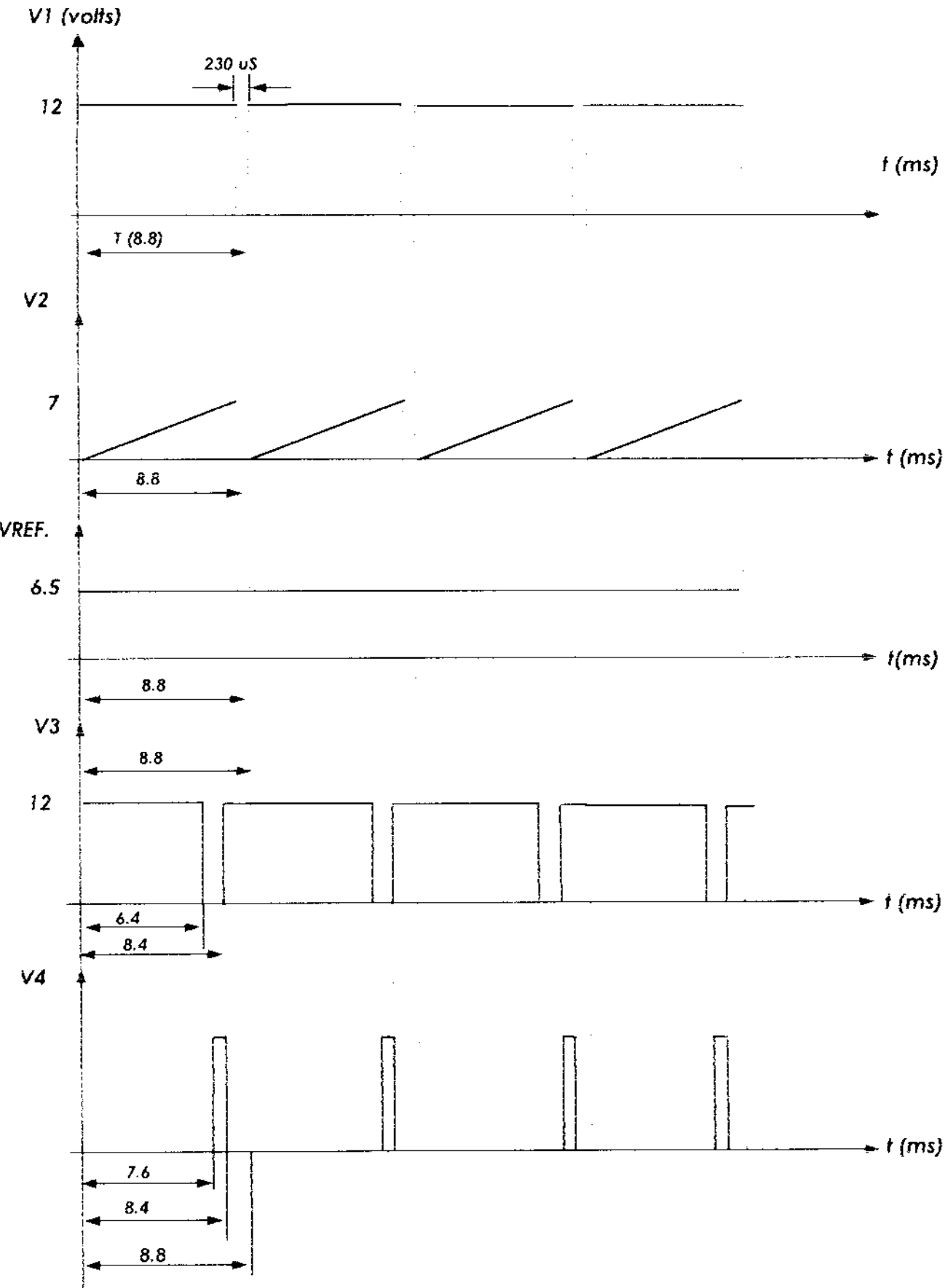


fig 4.3

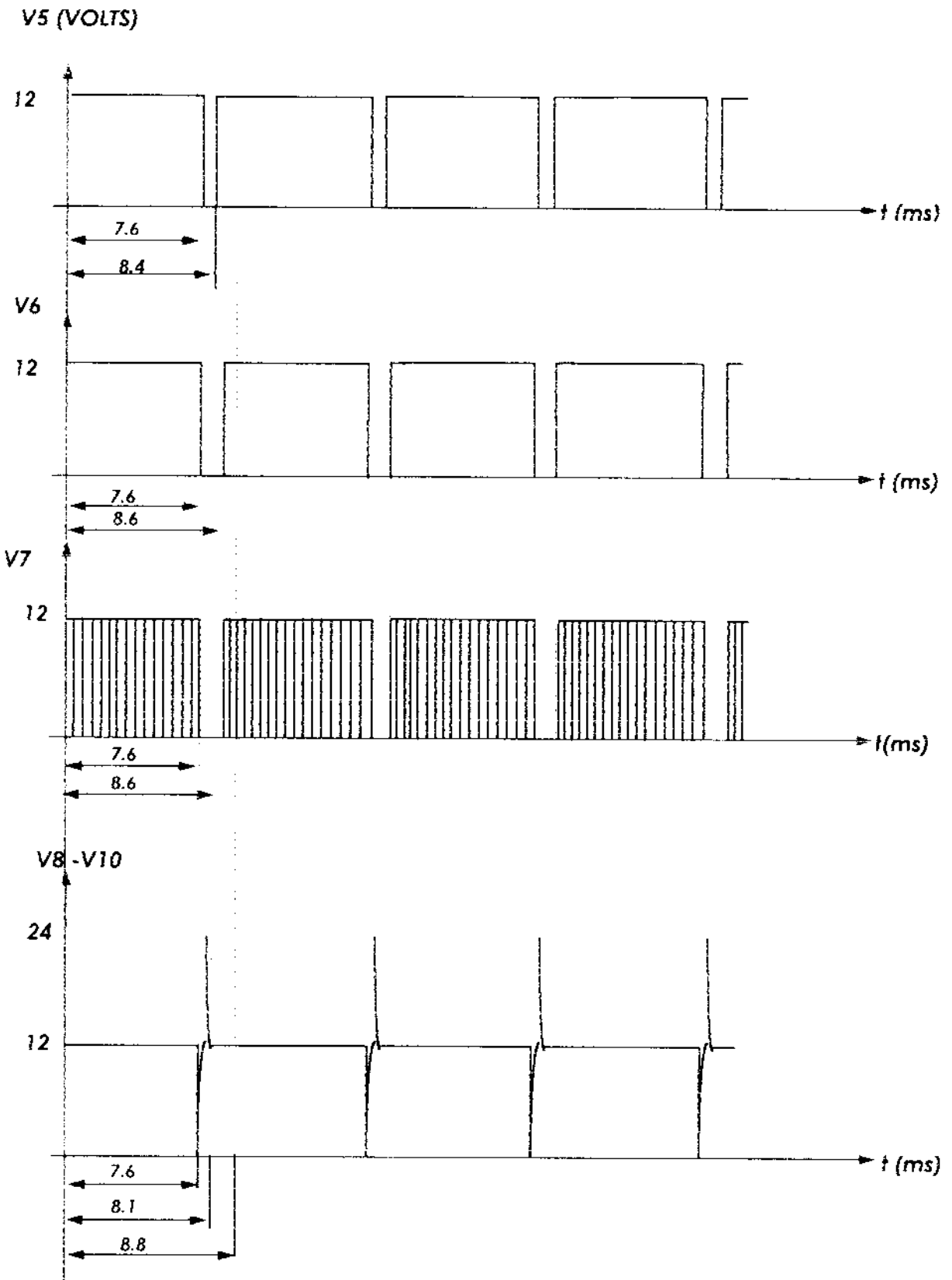


Fig. 4.4

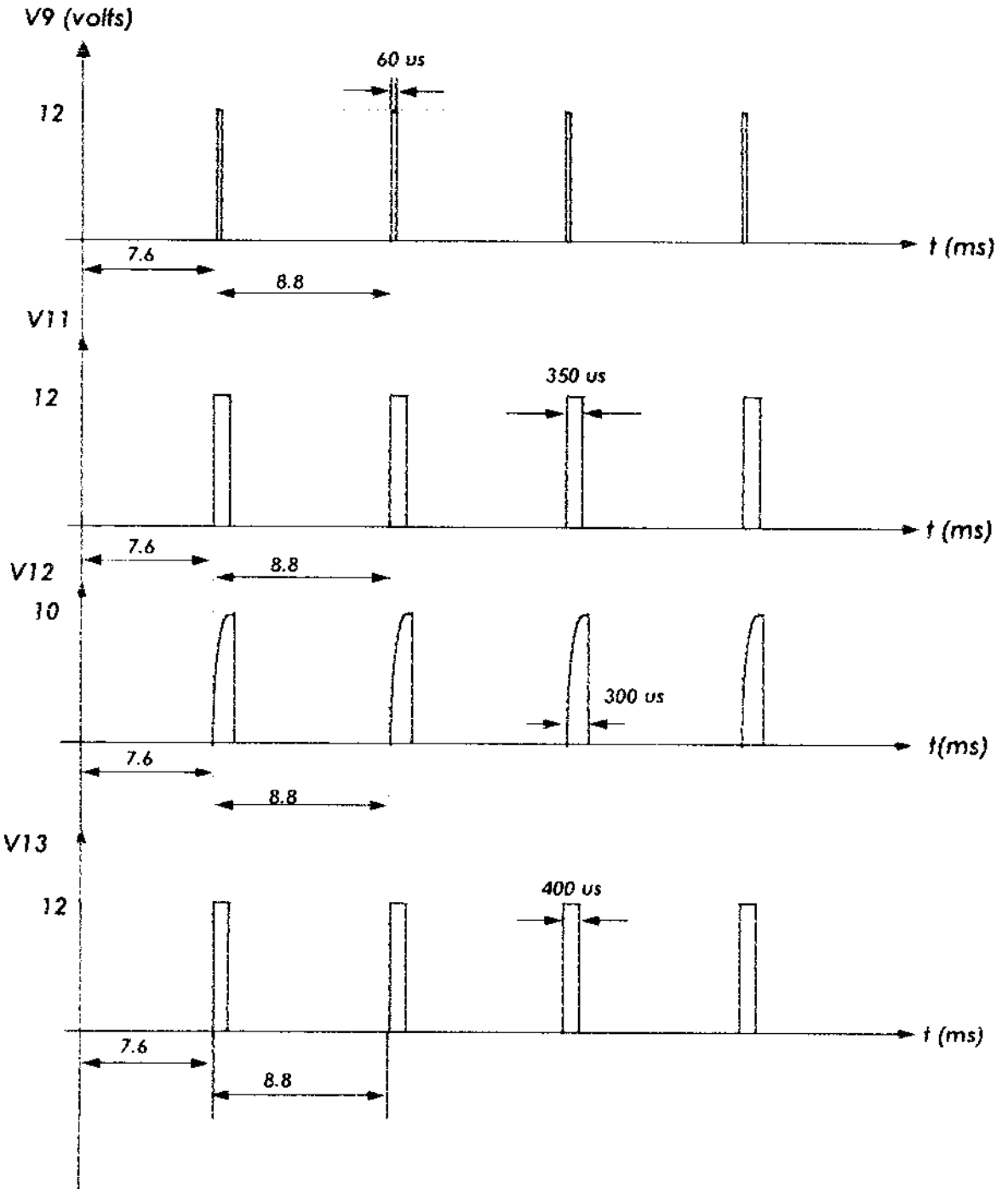


Fig. 4.5

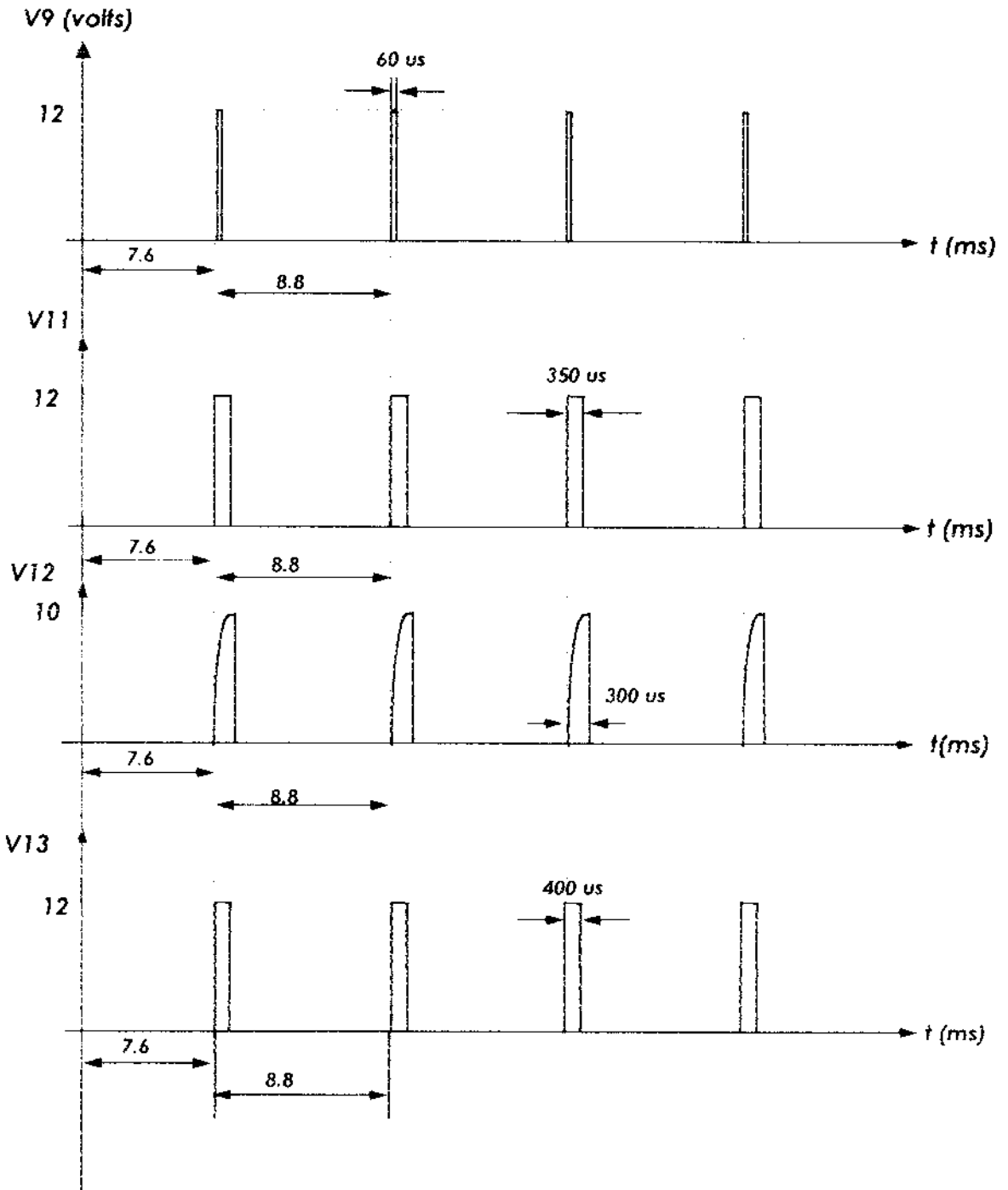


fig. 4.5

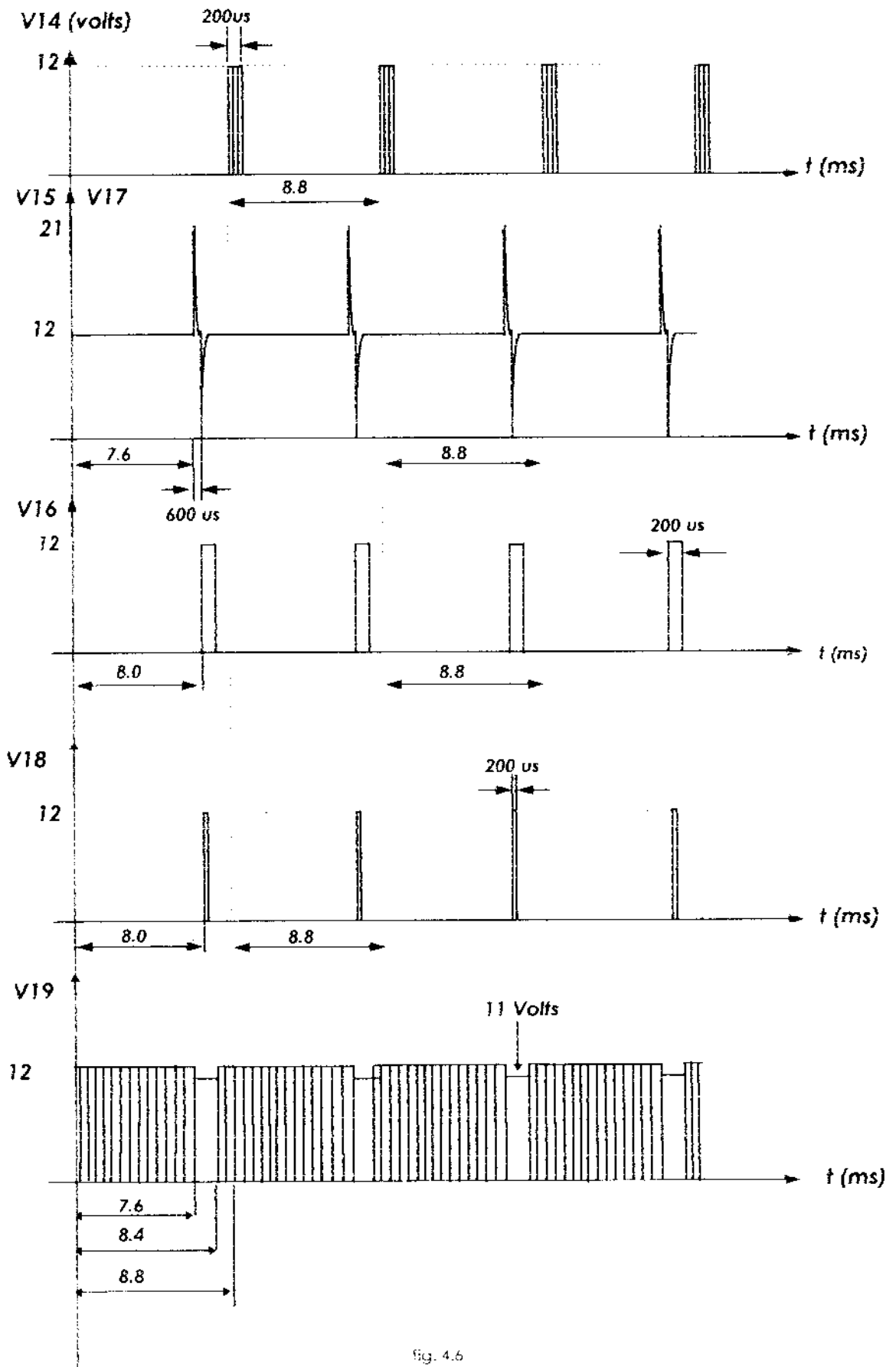


fig. 4.6

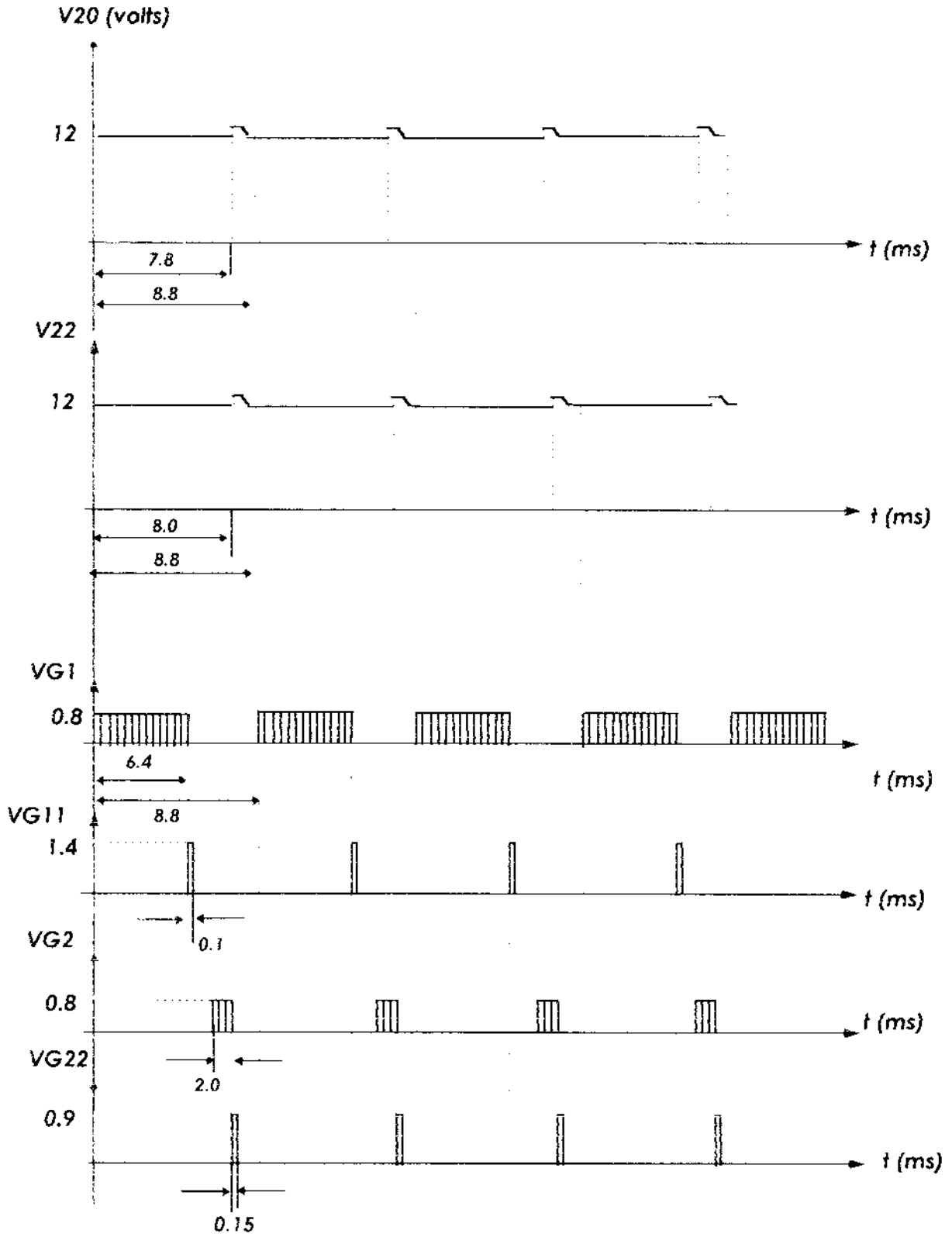


fig. 4.7

4.3. LISTADOS DE COMPONENTES

LISTA DE COMPONENTES USADOS
EN EL CIRCUITO DE CONTROL

COMPONENTE	VALOR	VALOR MEDIDO
RA1	36 K	36.7 K
RB1	1 K	0.96 K
R1	47 K	46.7 K
R2	4.7K	4.6 K
R3	20 K	19.9 K
R4	7.6 K	8 K
R5	1 K	1.02 K
R6	1 K	0.99 K
R7	240 Ω	246.5 Ω
R8	1K	0.99 K
R9	120 Ω	119.3 Ω
R10	1K	1 K
R11	10 K	9.93 K
R12	100 Ω	99.3 Ω
R13	10 K	9.93 K
R14	120 Ω	119.2 Ω
R15	1 K	0.99 K
R16	10 K	9.93 K
R17	100 K	98.8 K
R18	30 K	30 K
R19	250 Ω	246.2 Ω
R20	1 K	1 K
R21	120 Ω	60 Ω
R22	1 K	1 K
R23	10 K	9.99 K
R24	100 K	98.8 Ω
R25	30 K	30 K
R26	10 K	10 K
R27	100 Ω	99.4 Ω
R28	10 K	9.97 K
R29	120 Ω	119.4 Ω
R30	1 K	0.99 K
R31	1 K	0.997 K
C1	0.33 μ F	0.33 μ F
C2	1 nF	99 nF
C3	41.3 nF	40 nF
C4	0.1 μ F	895 μ F
C5	1.8 nF	1.79 nF
C6	0.1 μ F	0.11 μ F
C7	1 nF	9.37 nF
C8	1 nF	34.4 nF
C9	0.01 μ F	9.47 nF
C10	0.01 μ F	10.74 nF
C11	1 nF	0.89nF

**LISTA DE COMPONENTES USADOS
EN EL CIRCUITO DE CONTROL
(CONTINUACION)**

COMPONENTE	VALOR	VALOR MEDIDO
C12	10 pF	34.2 pF
C13	10 nF	9.99 nF
C14	0.01 μ F	9.99 nF
C15	1 nF	1.0 nF
C16	0.1 μ F	0.102 μ F
C17	1 nF	10.7 nF
C18	1 pF	0.1 μ F
C19	0.01 μ F	9.99 nF
C20	0.01 μ F	9.82 nF
C21	1 nF	0.98 nF
C22	0.01 μ F	9.6 nF
C23	0.01 μ F	10.2 nF
C24	1 nF	97.6 nF
C25	10 pF	0.96 nF
C26	100 μ F	94.75 μ F

ELEMENTOS ADICIONALES

U1 - U5 Integrado	LM555	
U6 Operacional	LM741	
U7 Integrado CMOS	CD4069	(Inversores)
U8 Integrado CMOS	CD4011	(Puertas NAND)
D1 - D13	1N4148	(Diodos)

**LISTA DE COMPONENTES USADOS
EN EL CIRCUITO DE FUERZA**

COMPONENTE	VALOR CALCULADO	VALOR USADO
CAPACITOR C	50 μ F	42 μ F
C ₂	50 μ F	48 μ F
INDUCTOR L	6.62 μ H	8 μ H
L ₂	6.62 μ H	8 μ H
RESISTENCIA R ₂	58.66 Ω max	20 Ω
R ₂₂	58.66 Ω max	20 Ω

ELEMENTOS ADICIONALES

Q1 - Q2 - Q11 - Q22	SCR de potencia FCG5543
D1 - D2 - D11 - D22	Diodo de potencia FCG5994

4.3.1. DATOS DEL MOTOR USADO EN LA PARTE EXPERIMENTAL

Los siguientes parámetros corresponden al Motor de Magneto Permanente usado para las pruebas del troceador.

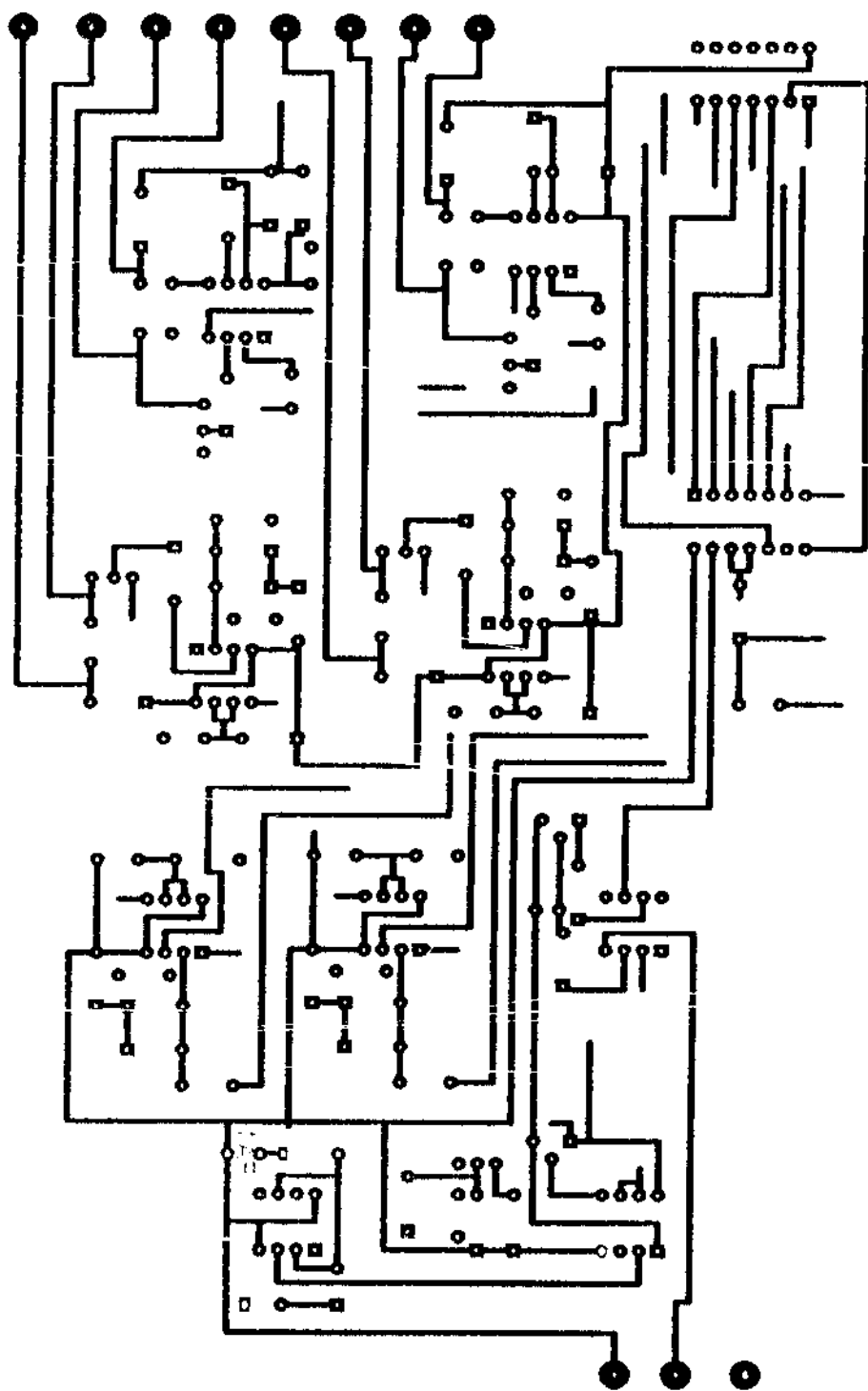
Voltaje de alimentación	12 Volts DC
Corriente Máxima	15 A.
Inductancia interna	1.7 mH
Resistencia Interna	1 Ω .

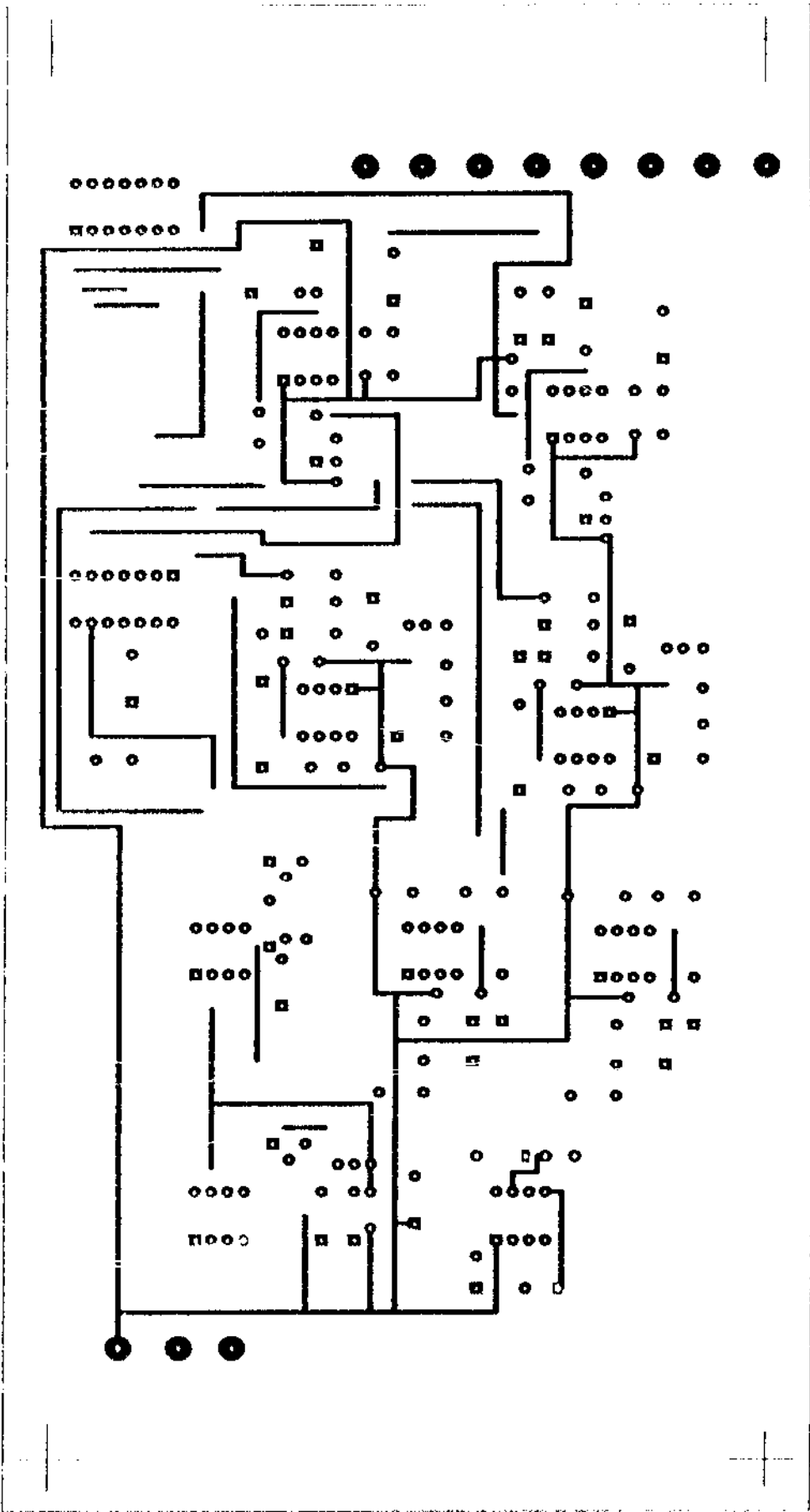
4.4. DISEÑO DEL CIRCUITO IMPRESO Y CONSTRUCCIÓN DE LA TARJETA.

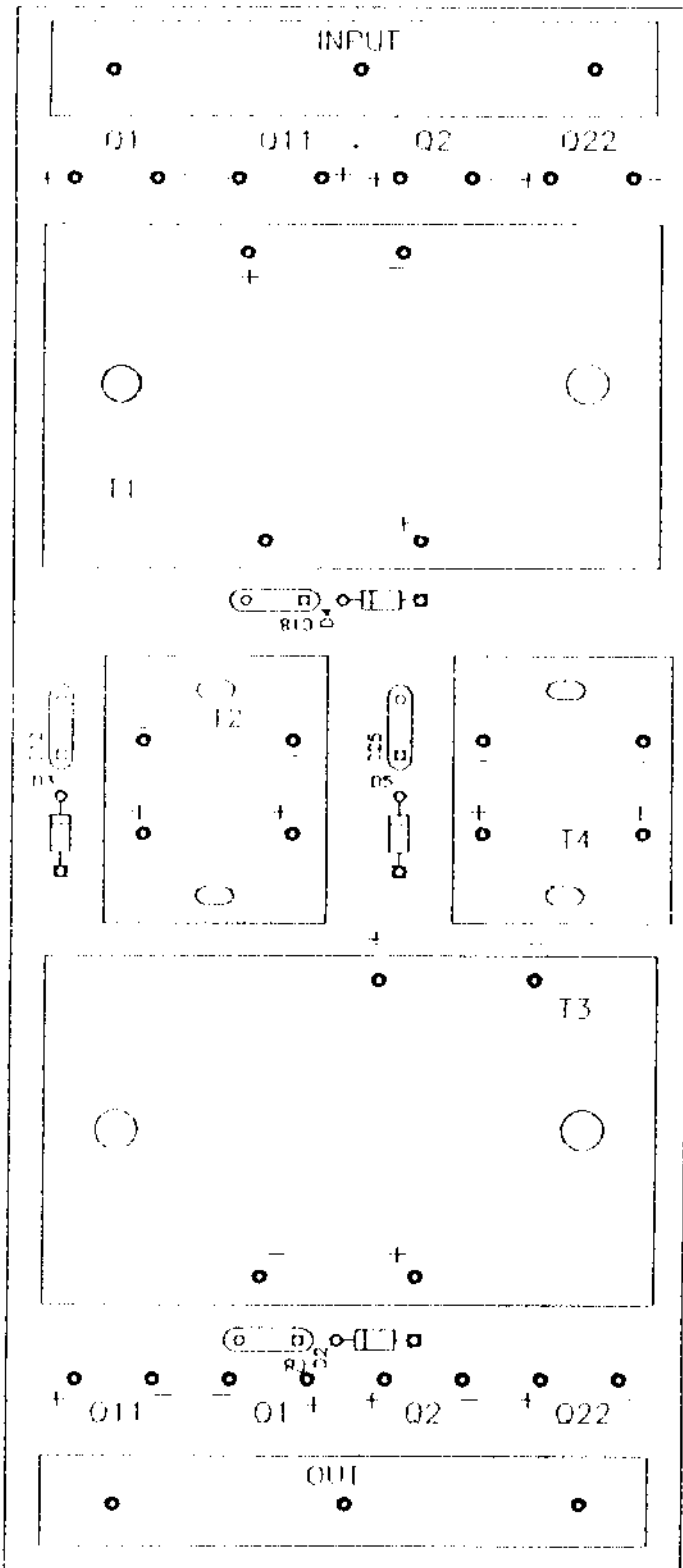
El circuito impreso correspondiente al circuito de control fue diseñado con la ayuda del computador usando el software TANGO PCB. Para tal efecto el circuito de control fue dividido en 9 etapas, de las cuales 3 son repetidas, lo cual facilitó el diseño. Además se instalaron los transformadores de pulsos en otra tarjeta, debido al tamaño y al peso de los mismos.

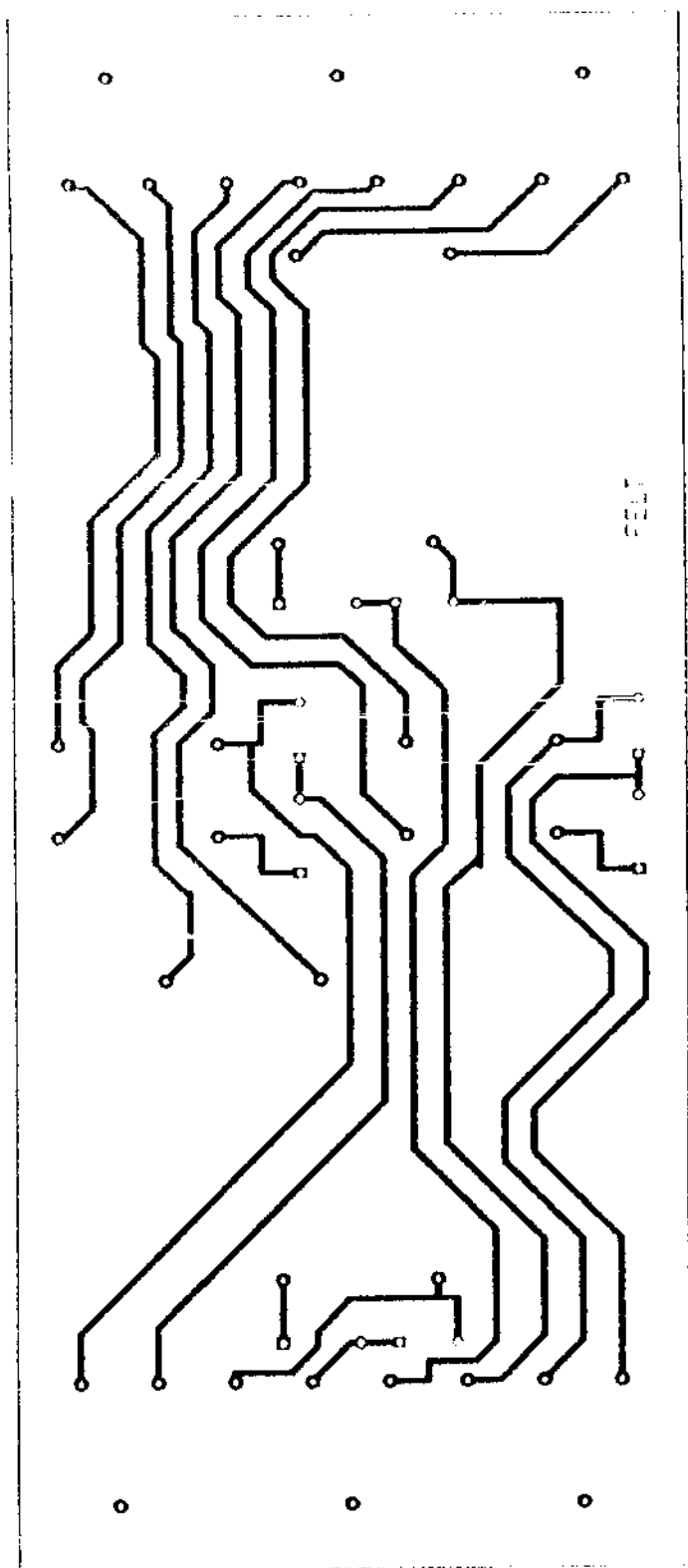
Debido a lo complicado de la realización de las conexiones, se trabajó el diseño del impreso en doble capa. Esto ayudó a reducir el tamaño final de la tarjeta. Además, dado que esta tarjeta se instalará en el carro eléctrico, se tuvo la precaución de recubrir las pistas con estaño.

En las páginas siguientes se adjuntan los impresos del Programa TANGO PCB, los cuales incluyen el trazado de las pistas de la capa superior e inferior de la Tarjeta 1, y la capa inferior de la Tarjeta 2. Nótese que la capa inferior debe ser impresa realizando un espejo de la misma.









135

C A P Í T U L O V

CONSIDERACIONES ECONÓMICAS

5.1. COSTO DE LOS DIFERENTES COMPONENTES.

En el presente capítulo se analizarán los precios de los diversos componentes que conforman el Troceador Clase A conmutado por corriente y su control. A continuación se listan los componentes con su referencia al circuito y su precio unitario.

Circuito de Control

RA1	Potenciometro de 50K	S/. 5000
RB1	Resistencia de 1k, 1/2W	" 100
C1	Capacitor cerámico de 0.33 μ F	" 300
C2	Capacitor cerámico de 1nF	" 300
IC1-IC8	LM555	" 2000
R1	Resistencia de 47K, 1/2W	" 100
R2	Resistencia de 4.7K, 1/2W	" 100
R3	Resistencia de 20K, 1/2 W	" 100
C3	Capacitor cerámico de 42nF	" 500
POT 1	Potenciómetro de 10K	" 5000
Q1	2N3906	" 3000
R4	Resistencia de 7.6K, 1/2W	" 100
R5	Resistencia de 1K, 1/2W	" 100
R6	Resistencia de 1k, 1/2W	" 100
C5	Capacitor cerámico de 1.8nF	" 600

IC9	CD4069	"	3000
IC10	CD4011	"	3000
R7	Resistencia de 240, 1/2W	"	100
R8	Resistencia de 1k, 1/2W	"	100
R9	Resistencia de 120, 1/2W	"	100
R10	Resistencia de 1k, 1/2W	"	100
C6	Capacitor cerámico de 0.1uf	"	600
R31	Resistencia de 1k, 1/2W	"	100
C7	Capacitor cerámico de 1nf	"	600
C8	Capacitor cerámico de 33nf	"	600
C26	Capacitor electrolítico de 100uf	"	600
D1-D13	Diodo 1n4148	"	1000
Q2-Q5	2N2222	"	2000
POT2	Potenciómetro de 10K.	"	5000
R11	Resistencia de 10K, 1/2W	"	100
R12	Resistencia de 100, 1/2W	"	100
R13	Resistencia de 10K, 1/2W	"	100
R14	Resistencia de 120, 1/2W	"	100
R15	Resistencia de 1K, 1/2W	"	100
C9	Capacitor cerámico de 0.01uf	"	600
C10	Capacitor cerámico de 0.01uf	"	600
C11	Capacitor cerámico de 1nf	"	600
C12	Capacitor cerámico de 21pf	"	600
C13	Capacitor cerámico de 0.01uf	"	600
C14	Capacitor cerámico de 0.01uf	"	600
C15	Capacitor cerámico de 1nf	"	600
R16	Resistencia de 10K, 1/2W	"	100
R17	Resistencia de 100, 1/2W	"	100
R18	Resistencia de 30K, 1/2W	"	100
R19	Resistencia de 250, 1/2W	"	100
R20	Resistencia de 1K, 1/2W	"	100
R21	Resistencia de 120, 1/2W	"	100
R22	Resistencia de 1K, 1/2W	"	100

C16	Capacitor cerámico de 0.1uf	"	600
C17	Capacitor cerámico de 1nf	"	600
C18	Capacitor cerámico de 0.1uf	"	600
R26	Resistencia de 10K, 1/2W	"	100
R27	Resistencia de 100, 1/2W	"	100
R28	Resistencia de 10K, 1/2W	"	100
R29	Resistencia de 120, 1/2W	"	100
R30	Resistencia de 1K, 1/2W	"	100
C22	Capacitor cerámico de 0.01uF	"	400
C23	Capacitor cerámico de 0.01uF	"	400
C24	Capacitor cerámico de 1nF	"	400
C25	Capacitor cerámico de 1nf	"	300
R23	Resistencia de 10K, 1/2W	"	100
R24	Resistencia de 100, 1/2W	"	100
R25	Resistencia de 30K, 1/2W	"	100
C19	Capacitor cerámico de 0.01uf	"	400
C20	Capacitor cerámico de 0.01uf	"	400
C21	Capacitor cerámico de 1nF	"	400
IC11	LM741	"	2000

Circuito de fuerza

Q1 Q11 Q2 Q22	SCR de potencia ECG5543	"	100000
D1-D11-D2-D22	Diodo de potencia ECG5994	"	40000
C1	Capacitor de 42uf	"	20000
C2	Capacitor de 47uf	"	20000
L1-L2	Inductor de 6.7uH	"	6000
R1 R2	Resistencia de 20Ω , 5W	"	4000

5.2. ANÁLISIS DE COSTOS

Luego de realizado el listado de componentes con sus respectivos precios podemos decir que el valor aproximado de construcción del Troceador Clase A conmutado por Corriente, tanto en su parte de Fuerza como de Control, es de S/. 682.000.

La parte de Fuerza tiene un costo total de S/. 620.000 y la de Control de S/. 62.000.

Los componentes de la parte de Fuerza tienen costos elevados por la capacidad de corriente que son capaces de manejar.

Dado que los componentes usados son fáciles de conseguir en el mercado esto hace que a pesar del costo sea un control de velocidad rentable.

CONCLUSIONES

Queda demostrado el funcionamiento básico de un troceador clase B con conmutación de corriente, con sus ventajas y desventajas.

Dentro de las ventajas podemos considerar que su diseño no es muy complicado, y tampoco se utilizan elementos sofisticados. Quizá una desventaja es el diseño del circuito de conmutación, ya que dependiendo del diseño que se esté haciendo, se obtendrán valores de capacitancia, inductancia y resistencia que probablemente sean difíciles de hallar en el mercado. Esto a la larga puede afectar la estabilidad del circuito, (ya que por lo general se usan valores aproximados a los necesarios) si se usan elementos cuyos valores no se aproximen tanto a los deseados.

Se comprobó también la facilidad con la cual se lleva a cabo el control de velocidad de los motores DC; no se interviene en el circuito de fuerza, el cambio de velocidad es de tipo continuo, es decir que no se tienen cambios bruscos de velocidad, lo cual evita muchos problemas como sobrecorrientes súbitas, cambios bruscos de voltaje, y de más problemas que generalmente conllevan los métodos eléctricos.

Comprobamos también la facilidad de uso y la alta confiabilidad que prestan los semiconductores de potencia de estado sólido y los elementos electrónicos utilizados en el circuito de control. Estos elementos tienen una larga vida útil; lo que representa una ventaja, pues no se esperará tener problemas con el controlador hasta después de cierto tiempo.

El diseñar el control de Velocidad para un Motor DC, basándose en el disparo de cuatro tiristores, a saber, dos principales y dos de conmutación, reviste cierta complejidad ya que si un tiristor todavía está

prendido cuando se dispara el próximo se produce un cortocircuito entre los terminales de la batería y con ello el daño permanente de los tiristores.

Por otro lado, en el circuito que hemos descrito ya consideramos el anterior problema y para el diseño recurrimos a elementos de uso común en el mercado y que habíamos estudiado previamente, como el UA741, el NE555N, capacitores, resistores, transistores, etc, que se consiguen con facilidad y que pueden ser reemplazados en cualquier momento al ocurrir alguna contingencia, cabe indicar además que el circuito de control fue minimizado de tal forma que los elementos que lo componen son los estrictamente necesarios.

Controlar un motor de esta manera proporciona grandes ventajas, como, un buen arranque del motor limitando su corriente de armadura y al mismo tiempo protegiéndolo de las corrientes elevadas producto de un arranque directo (5 a 6 veces la corriente nominal).

El circuito de fuerza al igual que el de control es muy sencillo y de fácil montaje de sus elementos, aunque los tiristores no son muy comunes en el mercado y su adquisición muy limitada, no obstante muy eficiente y la elaboración de la inductancia para el circuito que resultó algo tediosa complicaron en parte la construcción de este circuito.

En la elaboración de las tarjetas se usó el programa TANGO PCB, lo cual facilitó el diseño de las pistas y se trabajó en una y dos capas para la tarjeta 2 y 1 respectivamente. Luego se usó el método de serigrafía para la elaboración de las tarjetas y finalmente el montaje que se lo realizó recubriendo las pistas con estaño para protección y soldando los componentes en el orden establecido.

Finalmente luego de realizarse las pruebas con el motor se estableció que desde la velocidad máxima, de 1950 rpm hasta la mínima de 0 el motor demora 2.14 seg.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- DEWAN, STRAUGHEN, Power Semiconductor Circuits, Wiley Interscience Publication, USA, 1984
- 2.- RASHID MUHAMMAD, Power Electronics, USA, 1992.
- 3.- BOYLESTAD ROBERT, Electrónica Teoría de Circuitos, México, 1989.
- 4.- JACOB MICHAEL, Applications and Design With Analog Integrated Circuits

