

CAPÍTULO 3

El Sistema de Control

3.1 INTRODUCCIÓN.

El presente capítulo abarca el sistema de control implementado durante el proyecto. En él, podrá encontrarse una breve explicación referente al funcionamiento, análisis y características de cada una de las etapas que integran el sistema.

Dicho sistema es el encargado de controlar la velocidad del coche. Esto lo lleva a cabo de la siguiente manera: El sistema monitorea constantemente la velocidad a la que el conductor del vehículo desea viajar, cuando éste hace un cambio de velocidad, el sistema detecta dicho cambio y genera una señal PWM con un ciclo de trabajo dependiente de la velocidad deseada.

El vehículo consta de tres velocidades. La primera velocidad corresponde a la velocidad mínima a la que podrá desplazarse el vehículo, sin importar el área donde éste se encuentre, ya que la restricción de velocidad establecida dentro de un área determinada consiste en establecer un límite máximo, más no una velocidad única, por lo que de así desearlo el chofer podrá conducir a una velocidad inferior o igual a dicho límite, pero nunca a una velocidad superior.

La segunda velocidad se refiere a la velocidad máxima, la cual podrá ser alcanzada únicamente cuando el vehículo se encuentre fuera del área de control. Finalmente, existe una tercera velocidad, la cual a lo largo del proyecto se hará referencia a ella como la velocidad de control, la cual entrará en funcionamiento sólo dentro del área controlada. Dado que ésta únicamente podrá ocurrir en el área de interés, la velocidad de control corresponderá a la velocidad máxima a la que podrá viajar el vehículo dentro de esta región. La velocidad de control puede ser considerada como una velocidad intermedia entre la primera y la segunda.

3.2 ETAPAS DEL SISTEMA DE CONTROL.

Este sistema consta principalmente de tres etapas: *microcontrolador*, es el encargado de generar las señales de control que permitan reducir o aumentar la velocidad del vehículo; *circuito de disparo*, tiene el objetivo de disparar el MOSFET; y *circuito reductor-elevador*, cuya función es proporcionar el voltaje de alimentación de los motores.

A continuación se abarcará por separado cada una de las etapas, explicando su funcionamiento, análisis y características a considerar.

3.2.1 Microcontrolador.

La primera etapa del sistema de control, está basada en el microcontrolador PIC 16F877A, cuyas especificaciones pueden encontrarse en el apéndice B. La etapa del microcontrolador puede considerarse como un etapa de acoplamiento entre el transmisor-receptor y el circuito reductor-elevador.

La función del microcontrolador es generar tres señales PWM con distinto ciclo de trabajo, de acuerdo con la velocidad requerida para el automóvil. A continuación, se describen las partes más importantes del código con el cual fue programado el microcontrolador. El código completo se puede encontrar en el apéndice B.

Una vez declarados los puertos como entradas y salidas, el microcontrolador recibe como entrada analógica (pin 2), la señal obtenida por el receptor. Esta señal deberá ser convertida a una señal digital, dentro del mismo microcontrolador. En este caso se eligió una conversión justificada a la izquierda, el pin AN0 se configuró como la entrada analógica, RA3 como el voltaje de referencia positivo y RA2 como el voltaje de referencia negativo, además la frecuencia de conversión corresponde a $FOSC/8$. El código para definir estas características de la conversión es presentado en la figura 3.1.

```

MOV LW B'11111111'
MOV WF TRISA
MOV LW B'00001111'
MOV WF ADCON1
MOV LW B'01000001'
MOV WF ADCON0

CONVERSION

NOP
NOP
BSF      ADCON0, GO           ; ESPERA EL TIEMPO MÍNIMO DE ADQUISICIÓN
                                ; EMPIEZA LA CONVERSIÓN A/D

```

Figura 3.1: Características de la conversión.

El resultado de la conversión análogo/digital, es comparado con un valor digital predeterminado. Dicho valor predeterminado, es igual a un nivel de voltaje análogo equivalente a aproximadamente 3 V. Cuando el valor de la conversión es mayor al valor predeterminado, tenemos entonces, la señal de uno de nuestros transmisores; mientras que la conversión no sea mayor al valor predeterminado, sólo se trata de ruido que el microcontrolador ignora (figura 3.2).

```

BCF      STATUS, RP0         ; BANCO 0
MOV F    ADRESH, W
BSF      STATUS, C
SUBLW   B'01110110'         ; HACE LA RESTA DE VALOR - W
BTFS    STATUS, C           ; VERIFICA LA BANDERA DE CARRY
GOTO    CHECA

```

Figura 3.2: Validación de la conversión.

Cuando el microcontrolador recibe la indicación de que el vehículo viaja a 1ra. velocidad, genera una señal PWM1 con un ciclo de trabajo de 42.5% y una frecuencia de 100KHz. El código para dicha acción se presenta en la figura 3.3.

```

PWM1
BCF          STATUS, RP0
MOVLW       B'00000000'
MOVWF       CCP1CON          ; DESHABILITA EL PWM ANTERIOR
MOVWF       T2CON           ; INICIALIZA EL TMR2.
CLRF        PORTB           ; INICIALIZA EL PUERTO B.
BSF         STATUS, RP0
MOVLW       B'00001001'
MOVWF       PR2             ; CUANDO EL TMR2 = 9 TERMINA EL PERIODO
BCF         STATUS, RP0
MOVLW       B'00000100'
MOVWF       CCP1L
BCF         CCP1CON, CCP1X
BSF         CCP1CON, CCP1Y  ; ASIGNA LOS 2 BITS MENOS SIGNIFICATIVOS
                                     ; DEL CICLO DE TRABAJO AL CCP1X Y CCP1Y

BSF         STATUS, RP0          ; BANCO 1
MOVLW       B'00000000'          ; EL PIN 2 DEL TRIS C DEFINIDO COMO SALIDA
ANDWF       TRISC
BCF         STATUS, RP0          ; BANCO 0
MOVLW       B'00000100'
MOVWF       T2CON               ; PRESCALADOR DEL TMR2 = 1, SE ENCIENDE EL
                                     ; TMR2

MOVF        CCP1CON, W
ANDLW       B'00110000'          ; MÁSCARA PARA NO ALTERAR EL VALOR DEL
                                     ; CICLO DE TRABAJO

IORLW       B'00001111'
MOVWF       CCP1CON             ; SE HABILITA EL MODO PWM
    
```

Figura 3.3: Generación de PWM para la 1ra. velocidad.

Como lo demuestra la figura 3.4, la segunda señal PWM2 tiene un ciclo de trabajo de 60% con una frecuencia de 100KHz, la cual equivale a la 2da. velocidad del vehículo.

```

PWM2
BCF          STATUS, RP0          ; BANCO 0
MOVLW       B'00000000'          ;
MOVWF       CCP1CON          ; DESHABILITAMOS EL PWM ANTERIOR
MOVWF       T2CON           ; INICIALIZAMOS EL TMR2.
BSF         STATUS, RP0          ; BANCO 1
MOVLW       B'00001001'
MOVWF       PR2             ; CUANDO EL TMR2 = 9 TERMINA EL PERIODO
BCF         STATUS, RP0          ; BANCO 0
MOVLW       B'00000110'
MOVWF       CCP1L
BCF         CCP1CON, CCP1X
BCF         CCP1CON, CCP1Y

BSF         STATUS, RP0          ; BANCO 1
MOVLW       B'00000000'          ; EL TRIS C QUEDA DEFINIDO COMO SALIDA
ANDWF       TRISC
BCF         STATUS, RP0          ; BANCO 0
MOVLW       B'00000100'
MOVWF       T2CON           ; PRESCALADOR DEL TMR2 = 1, SE ENCIENDE EL TMR2
MOVF        CCP1CON, W
ANDLW       B'00110000'
IORLW       B'00001111'
MOVWF       CCP1CON          ; SE HABILITA EL MODO PWM
    
```

Figura 3.4: Generación de PWM para la 2da. velocidad.

Finalmente, la tercer señal PWM3 generada por el microcontrolador tiene un ciclo de trabajo de 47.5% con una frecuencia de 100KHZ. Dicha señal equivale a la velocidad de control aplicada al vehículo, y únicamente será activada cuando el vehículo pase por el primer transmisor y se cumpla la condición que indica que se encuentra fuera del área de control, lo cual indicaría que el vehículo está entrando en la zona de interés y que su velocidad debe reducirse. Lo anterior se ilustra en la figura 3.5.

```

PWM3
BCF          STATUS, RP0          ; BANCO 0
MOVLW       B'00000000'          ;
MOVWF       CCP1CON              ; DESHABILITAMOS EL PWM ANTERIOR
MOVWF       T2CON                ; INICIALIZAMOS EL TMR2.
BSF         STATUS, RP0          ; BANCO 1
MOVLW       B'00001001'
MOVWF       PR2                  ; CUANDO EL TMR2 = 9 TERMINA EL PERIODO
BCF         STATUS, RP0          ; BANCO 0
MOVLW       B'00000100'          ; COPIA EL NÚMERO BINARIO 00001001 AL WORK
MOVWF       CCP1L
BSF         CCP1CON, CCP1X
BSF         CCP1CON, CCP1Y

BSF         STATUS, RP0          ; BANCO 1
MOVLW       B'00000000'          ; EL TRIS C QUEDA DEFINIDO COMO SALIDA
ANDWF       TRISC
BCF         STATUS, RP0          ; BANCO 0
MOVLW       B'00000100'
MOVWF       T2CON                ; PRESCALADOR DEL TMR2 = 1, SE ENCIENDE EL TMR2
MOVF        CCP1CON, W
ANDLW      B'00110000'
IORLW      B'00001111'
MOVWF       CCP1CON              ; SE HABILITA EL MODO PWM
    
```

Figura 3.5: Generación de PWM para la velocidad controlada.

Mientras el automóvil se encuentre fuera del área de control, el conductor puede variar la velocidad como él lo desee. En este caso, puede variar de primera a segunda velocidad, o viceversa. El microcontrolador se encuentra programado para recibir en los pines 4 y 5 del puerto C, la indicación de cual es la velocidad a la cual el conductor quiere

moverse, para generar así la señal PWM1 si se tratase de la primer velocidad, o bien la señal PWM2 en caso de la segunda velocidad (figura 3.6).

```

VELOCIDAD

      BCF          STATUS, RP0          ; BANCO 0
      BTFSS       PORTC, 4             ; VERIFICA SI ESTA EN PRIMERA VELOCIDAD
      BTFSS       PORTC, 5             ; VERIFICA SI ESTA EN SEGUNDA VELOCIDAD
      GOTO        PWM1                 ; LLAMA A LA PRIMER VELOCIDAD
      GOTO        PWM2                 ; LLAMA A LA SEGUNDA VELOCIDAD
    
```

Figura 3.6: Velocidades del vehículo fuera del área de control.

En el momento en el que el automóvil entre a la zona de control, el conductor podrá ir a una velocidad lenta, en este caso la primer velocidad, pero la velocidad máxima que podrá alcanzar será la velocidad de control. El microcontrolador recibe de igual manera en el puerto C, la indicación de cual es la velocidad deseada por el conductor (figura 3.7).

```

CONTROL

      BCF          STATUS, RP0          ; BANCO 0
      BTFSS       PORTC, 4             ; VERIFICA SI ESTA EN PRIMERA VELOCIDAD
      BTFSS       PORTC, 5             ; VERIFICA SI ESTA EN SEGUNDA VELOCIDAD
      GOTO        PWM1                 ; LLAMA A LA PRIMER VELOCIDAD
      GOTO        PWM3                 ; LLAMA A LA VELOCIDAD DE CONTROL
    
```

Figura 3.7: Velocidades del vehículo en la zona de control.

3.2.2 Circuito de Disparo.

El circuito de disparo consta de un driver IR2113, cuya principal función es elevar el voltaje de la señal PWM recibida del microcontrolador, para lograr disparar al MOSFET del circuito reductor-elevador.

Como puede observarse en la figura 3.8, el driver recibe la señal PWM generada por el PIC, y la amplifica sin variar el valor del ciclo de trabajo de dicha señal. Por otra parte, para conectar dicha señal al MOSFET es necesario conectar la salida del driver a un transformador con una relación 1:1. La conexión del transformador se lleva a cabo con la finalidad de realizar un aislamiento eléctrico de los devanados primario y secundario, es decir, aislar la tierra de control de la tierra de potencia. El capacitor en el primer devanado del transformador sirve para convertir la señal de CD a una señal de CA para que el transformador funcione; por otro lado, en el segundo devanado del transformador el diodo zener se encarga de convertir la señal de CA, de nueva cuenta en una señal de CD con un valor fijo.

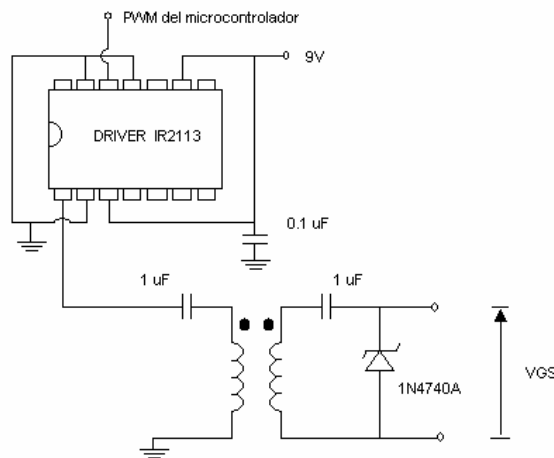


Figura 3.8: Conexión del driver.

De esta manera, se obtiene la señal PWM con una amplitud de aproximadamente 10V, cuya tierra se encuentra referenciada al transformador. Dicha señal se conecta entre las terminales de compuerta y fuente del MOSFET, y será la encargada de realizar la conmutación de este dispositivo.

3.2.3 Reductor - Elevador.

Un circuito convertidor CD a CD, puede considerarse como un equivalente a un transformador de CA con una relación de vueltas que varía en forma continua. Al igual que un transformador, dicho circuito puede utilizarse como una fuente reductora o elevadora de voltaje directo.

Los circuitos convertidores CD a CD, tienen un gran número de aplicaciones, por ejemplo, pueden utilizarse ampliamente en el control de motores de tracción de automóviles eléctricos, tranvías eléctricos, grúas marinas, montacargas y elevadores de minas, ya que son capaces de proporcionar control en aceleraciones continuas, una alta frecuencia y una respuesta rápida dinámica.

Un circuito reductor-elevador es un tipo de convertidor CD a CD. Este circuito puede proporcionar un voltaje de salida que puede ser menor o mayor que el voltaje de alimentación. Es importante mencionar que la polaridad del voltaje de salida es opuesta a la del voltaje de entrada, de ahí que también se le conozca como un circuito regulador inversor. En la figura 3.9 puede verse la configuración para este tipo de regulador.

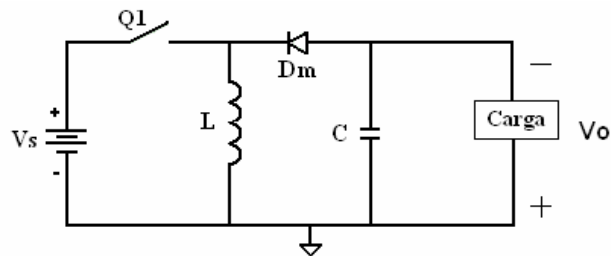


Figura 3.9: Diagrama del circuito reductor-elevador [11].

El funcionamiento del circuito puede analizarse en dos modos. Durante el modo 1 (figura 3.10), el transistor Q_1 está activo y el diodo D_m tiene polarización inversa. La corriente de entrada, que se eleva, fluye a través del inductor L y del transistor Q_1 .

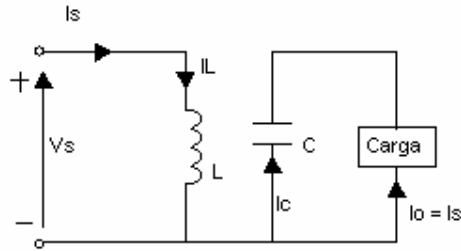


Figura 3.10: Modo 1 [11].

Durante el modo 2 (figura 3.11), el transistor Q_1 se abre y la corriente, que fluía a través del inductor L , fluirá a través de L , C , D_m y la carga. La energía almacenada en el inductor L se transferirá a la carga y la corriente del inductor se abatirá hasta que el transistor Q_1 vuelva a activarse en el siguiente ciclo.

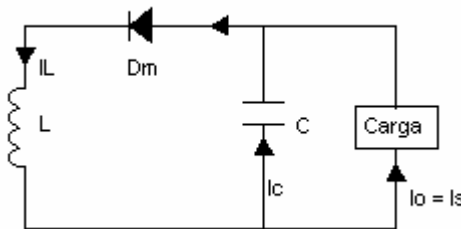


Figura 3.11: Modo 2 [11].

Para la implementación de este circuito, se utilizó el MOSFET IRFP260N, ya que cuenta con las características necesarias para el proyecto. Un MOSFET de potencia es un dispositivo controlado por voltaje, que requiere sólo de una pequeña corriente de entrada.

La velocidad de conmutación es muy alta siendo los tiempos de conmutación del orden de los nanosegundos.

Ya que los MOSFET son dispositivos controlados por voltaje, presentan una impedancia de entrada muy alta. La compuerta utiliza una corriente de fuga muy pequeña, del orden de los nanoamperes. La ganancia de corriente, que es la relación entre la corriente de drenaje (I_D) y la corriente de entrada de la compuerta (I_G), es típicamente del orden de 10^9 . Sin embargo, la ganancia de corriente no es un parámetro de importancia. La transconductancia, que es la relación de la corriente de drenaje al voltaje de compuerta, define las características de transferencia, siendo un parámetro muy importante [11].

Considerando el análisis del circuito reductor–elevador y tomando en cuenta que se tiene una fuente de alimentación de 12 V a 7.6 A, se decide diseñar el circuito para una variación en la corriente del inductor, ΔI_L , de 100 mA y una variación en el voltaje de salida, ΔV_C , de 0.5 V. Se decidió diseñar el circuito con estos valores, dado que para que el circuito sea un poco más estable la variación de la corriente en la bobina debe ser muy pequeña.

Por otra parte, se calcularán los parámetros restantes cuando se tiene un voltaje de salida, V_O , de 15V. Dicho valor se asigna para calcular los valores de los elementos que integran al circuito a un valor extremo. Por lo tanto, aún cuando el ciclo de trabajo sea variado y por consiguiente la salida sea mayor o mucho menor, el circuito seguirá

comportándose correctamente. Tomando en cuenta lo anterior, los parámetros restantes se calculan de acuerdo a lo indicado en [11] y se lleva a cabo de la siguiente manera:

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad (3.1)$$

donde α es el ciclo de trabajo del funcionamiento del MOSFET.

Despejando α de la ecuación 3.1, y sustituyendo los valores, obtenemos

$$\alpha = \frac{V_o}{V_s + V_o} = \frac{15}{12 + 15} = 0.55$$

Tomando en consideración que el valor de la frecuencia de conmutación guarda una relación inversa al valor del inductor, y que este último no puede ser muy grande por cuestiones de diseño y construcción, se decidió elegir un inductor $L = 680 \mu\text{H}$. Por lo tanto, para este inductor se tiene entonces,

$$\Delta I = \frac{V_s V_o}{f L (V_o + V_s)} \quad (3.2)$$

Despejando la frecuencia de conmutación, f , de la ecuación 3.2:

$$f = \frac{V_s V_o}{\Delta I_L (V_o + V_s)} = \frac{(15)(12)}{(100 \times 10^{-3})(680 \times 10^{-6})(15 + 12)} = 98.039 \text{ KHz}$$

Encontrando el valor del capacitor

$$I_o = \frac{(1 - \alpha) I_s}{\alpha} = \frac{(1 - 0.55)(7.6)}{0.55} = 6.08 \text{ A}$$

$$C = \frac{\alpha I_o}{f \Delta V_c} = \frac{(0.55)(6.08)}{(98 \times 10^3)(0.5)} = 68.934 \mu\text{F}$$

El circuito reductor-elevador resulta muy versátil, ya que el voltaje a su salida depende del ciclo de trabajo al que se encuentra funcionando: para un ciclo de trabajo menor al 50%, el circuito se comporta como reductor; para un ciclo de trabajo igual al 50%, el voltaje de salida es igual al voltaje de entrada y para un ciclo de trabajo mayor al 50%, el circuito se comporta como un elevador.

A continuación, en las figuras 3.12, 3.13 y 3.14, se presentan tanto el cálculo matemático como la simulación realizada con el programa PSIM 6.0, del comportamiento del circuito para cada una de las tres señales PWM generadas por el PIC.

- 1ra. velocidad, para un $\alpha = 0.43$:

$$V_o = \frac{\alpha}{(1-\alpha)} V_s = \frac{(0.43)(12)}{(1-0.43)} = 9.053 \text{ V}$$

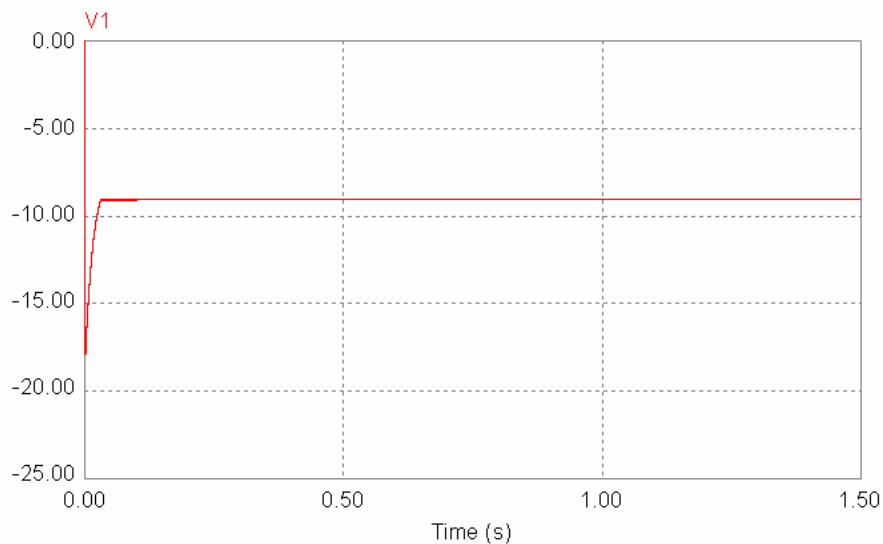


Figura 3.12: Voltaje de salida del reductor-elevador para un ciclo de trabajo de 43%.

- 2da. velocidad, para un $\alpha = 0.6$:

$$V_0 = \frac{\alpha}{(1-\alpha)} V_s = \frac{(0.6)(12)}{(1-0.6)} = 18 \text{ V}$$

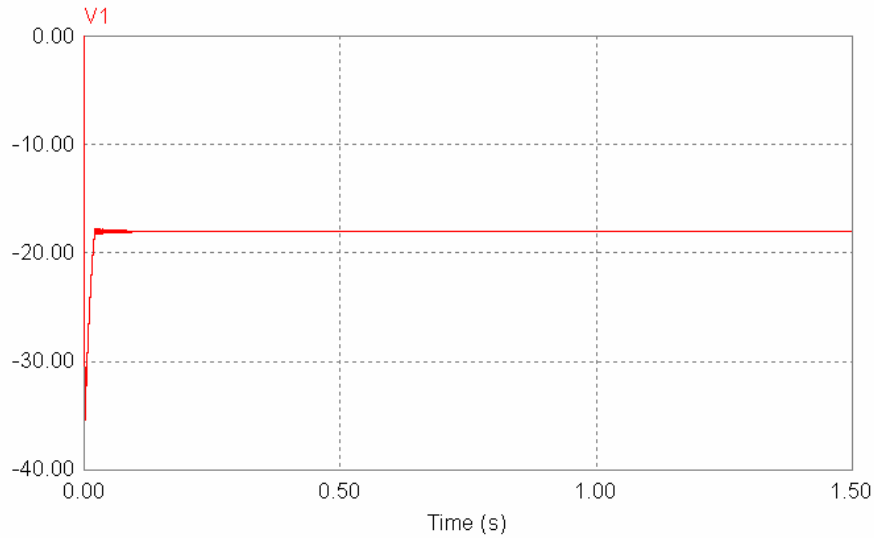


Figura 3.13: Voltaje de salida del reductor-elevador para un ciclo de trabajo de 60%.

- Velocidad de control, para un $\alpha = 0.48$:

$$V_0 = \frac{\alpha}{(1-\alpha)} V_s = \frac{(0.48)(12)}{(1-0.48)} = 11.077 \text{ V}$$

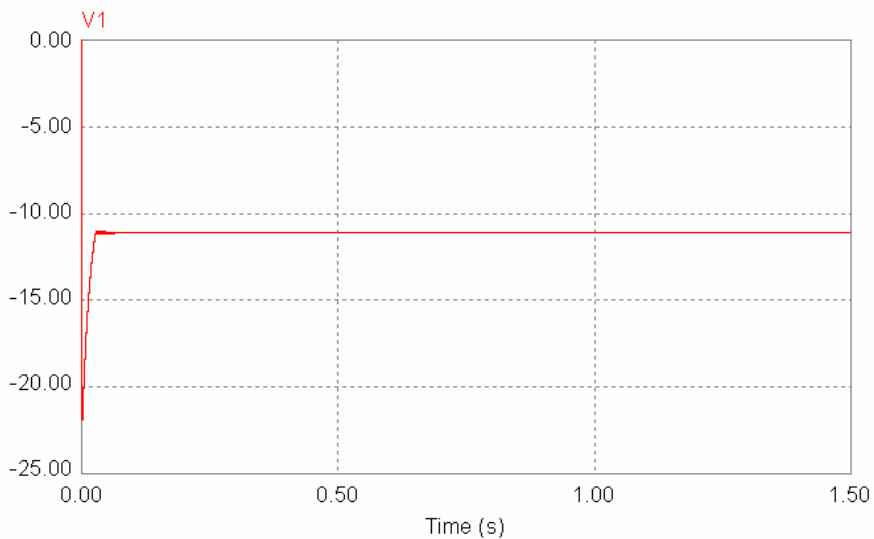


Figura 3.14: Voltaje de salida del reductor-elevador para un ciclo de trabajo de 48%.

Es necesario aclarar que debido a que en este circuito se están manejando corrientes muy altas, se deben utilizar componentes de potencia que puedan soportarlos, como el MOSFET IRFP260N y el diodo U1520, cuyas características más importantes pueden verse en el apéndice E y F, respectivamente.

Además, es importante armar el circuito con todas las conexiones al aire y con cable que soporte 10 A (categoría 14) y con mucho cuidado de que las patas y los disipadores de cada elemento no hagan contacto con alguna otra parte del circuito. En la figura 3.12 se muestra el circuito de potencia implementado de esta forma. Puede observarse que en lugar de un capacitor se tienen varios capacitores conectados en paralelo, esto se hizo con el fin de dividir la corriente de salida para que los capacitores soporten dicha cantidad de corriente. En este caso el valor de los capacitores en paralelo es muy cercano al calculado por lo que el circuito no presenta cambios en su comportamiento.

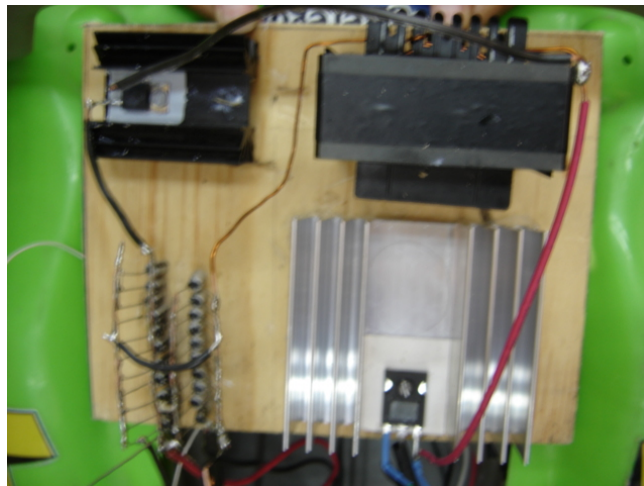


Figura 3.15: Circuito reductor-elevador construido.