

Capítulo 1

Características Generales

1.1 Sistema de Evaluación Experimental de Algoritmos de Control

En el desarrollo de un convertidor electrónico se pueden distinguir dos etapas:

- El diseño e implementación del circuito de potencia.
- Definir e implementar una estrategia de control de los interruptores electrónicos.

Esta tesis aborda la primera de ellas, proponiendo la construcción de un circuito de potencia, que forme parte de un banco de pruebas donde se puedan aplicar diferentes estrategias de control para la conmutación de los dispositivos semiconductores del convertidor (segunda etapa).

La estructura básica de dicho banco de pruebas, y al cual nos referiremos en adelante como *Sistema de Evaluación Experimental de Algoritmos de Control (SEE)* es la que se muestra en la Fig.1.1. Es básicamente un sistema de control compuesto por una etapa de control, un determinado proceso (planta) y un lazo de realimentación con el fin de autorregular su propia conducta.

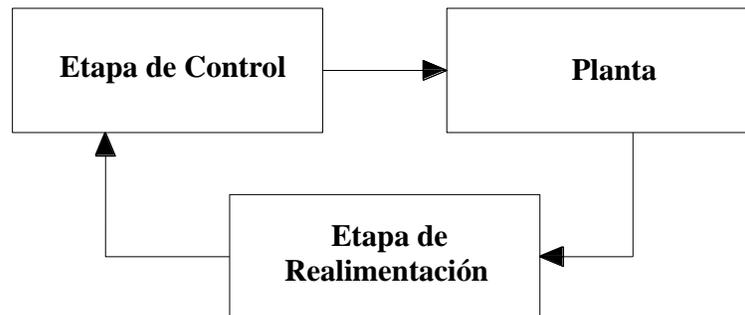


Figura 1.1 Diagrama a bloques del Sistema de Evaluación Experimental de Algoritmos de Control

La *etapa de control* tiene como fin mantener una relación preescrita entre variables de salida y entrada de todo el sistema. En nuestro caso dicha etapa controla al inversor propuesto. Actualmente domina la tendencia de implementar dicha etapa en sistemas basados en microprocesadores (tarjetas de adquisición de datos, procesadores digitales de señales, circuitos integrados de aplicación específica etc.), debido a la facilidad para desarrollar y procesar algoritmos de control en estos. Además de ofrecer una gran flexibilidad para futuras modificaciones (con un simple cambio en el programa se pueden obtener comportamientos totalmente diferentes).

La *etapa de realimentación*, envía información sobre variables de salida de la planta, a la etapa de control para que ésta, a su vez, realice medidas correctivas y mantenga las condiciones preestablecidas del sistema. Esta etapa se compone, generalmente, de sensores y circuitos de acondicionamiento de señales.

La *planta* es el proceso que se desea controlar y en nuestro caso está compuesta por un convertidor electrónico de potencia clasificado como inversor.

1.2 Características de diseño del inversor (planta)

Como se mencionó, en este trabajo de tesis sólo se aborda la construcción de la planta del SEE para lo cual se deben considerar las siguientes características de diseño.

- *El convertidor electrónico será un inversor monofásico.*
- *Los valores nominales del inversor serán: 300 [V], 10 [A] y frecuencia de 20 [kHz].*
- *La etapa de control del SEE estará constituida por alguna tarjeta de adquisición y procesamiento de datos, (señales de control de naturaleza digital).*
- *El inversor debe contar con un sistema de seguridad ante errores de operación.*

1.3 Propuestas de solución a las características de diseño

Para cumplir los requerimientos de diseño se proponen emprender las siguientes acciones:

- A) Elegir la topología adecuada del inversor.*
- B) Elegir el dispositivo semiconductor adecuado, esto es, que funcione como interruptor electrónico y cumpla con los límites de tensión, corriente y frecuencia requeridos.*
- C) Acondicionar las señales de control a los niveles de tensión y corriente requeridas por el interruptor electrónico seleccionado.*
- D) Con base en una revisión de posibles fuentes de error, diseñar e implementar un sistema de seguridad.*

1.3.1 Topología del inversor

La topología adoptada para la construcción del inversor en este trabajo es la que se muestra en la Fig. 1.2, se le conoce como la de puente completo o puente H y consiste en cuatro interruptores electrónicos que permiten el flujo de corriente de una fuente de tensión continua (VCD) a una carga (RL). Se le conocen como *ramas* del puente H al par de interruptores de un mismo lado del puente H siendo una rama el par de interruptores M1 y M2 y otra el par M3 y M4. La operación de dicha topología se puede explicar de manera simple como sigue:

En un primer instante de tiempo cuando el par de interruptores M1-M3 está cerrado y el par M2-M4 abierto, circula una corriente eléctrica a través de M1 a M3 pasando por la carga, lo que a su vez provoca una diferencia de potencial en la carga (RL) de magnitud igual a VCD. En un segundo instante de tiempo con el par M1-M3 abierto y el par M2-M4 cerrado, la corriente circula a través de M4 y M2 pasando por la carga, lo que también provoca una diferencia de potencial de magnitud igual a VCD en RL pero de signo contrario a la primera. La alternancia de esta configuración de estados de interruptores origina que en la carga se presente una tensión de naturaleza alterna de magnitud pico igual a VCD. Tal como se muestra en la Fig.1.2.

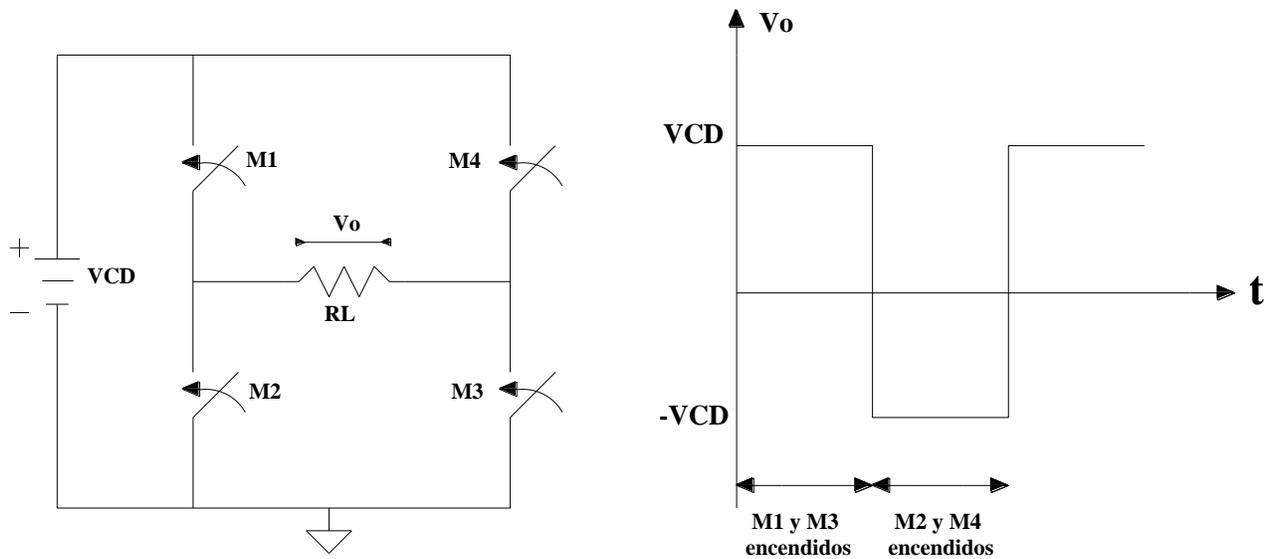


Figura 1.2 Inversor de puente completo

Si bien es cierto que con las secuencias de estado de interruptores anteriormente descritas se obtiene la tensión deseada en la carga, existen otras más que pueden ser útiles en aplicaciones específicas. En la Tabla 1.1 se presentan las 16 combinaciones posibles de los estados de los cuatro interruptores electrónicos de un puente H.

Numero	M4	M3	M2	M1
0	OFF	OFF	OFF	OFF
1	OFF	OFF	OFF	ON
2	OFF	OFF	ON	OFF
3	OFF	OFF	ON	ON
4	OFF	ON	OFF	OFF
5	OFF	ON	OFF	ON
6	OFF	ON	ON	OFF
7	OFF	ON	ON	ON
8	ON	OFF	OFF	OFF
9	ON	OFF	OFF	ON
10	ON	OFF	ON	OFF
11	ON	OFF	ON	ON
12	ON	ON	OFF	OFF
13	ON	ON	OFF	ON
14	ON	ON	ON	OFF
15	ON	ON	ON	ON

Tabla 1.1 Combinaciones de interruptores en un puente H

Las secuencias número 3, 7, 11-15 por ningún motivo deberían ser implementadas ya que representaría un corto circuito en el puente H. En el siguiente Capítulo se retoma el estudio de las combinaciones de un puente H y se establecen aquellas que puede manejar el inversor propuesto.

Otro aspecto importante de la topología puente H es el de los tiempos muertos. En un interruptor ideal como los mostrados en la Fig.1.2, los cambios de estado (encendido-apagado) son instantáneos, sin embargo los interruptores reales presentan tiempos de retraso de encendido ($t_{d(ON)}$) y apagado ($t_{d(OFF)}$), tiempos de subida (t_r) y caída (t_f), por ello durante el funcionamiento del puente H es necesario evitar que dos interruptores de una misma rama del puente H estén encendidos simultáneamente, ya que resultaría en un corto circuito que generaría un daño a la fuente VCD y/o interruptores. Por lo que, antes de encender los interruptores de una rama se debe esperar un intervalo de tiempo hasta que todos los interruptores que estaban encendidos alcancen su estado de apagado. A este intervalo de tiempo intermedio se le conoce como **tiempo muerto** (t_d) y su duración debe ser igual o mayor a $x = (t_{d(ON)} + t_r)$ ó $y = (t_{d(OFF)} + t_f)$ del dispositivo semiconductor. Por lo anterior es también necesario que en nuestro inversor se generen tales intervalos de tiempo (retardo) entre apagado y encendido de los interruptores.

1.3.2 Elección de los dispositivos semiconductores

Generalmente el comportamiento de un convertidor electrónico que maneja altos valores de tensión no se ve afectado por el tipo de dispositivo semiconductor usado como interruptor electrónico, ya que la caída de tensión entre sus terminales en estado de conducción es pequeña en comparación con otras caídas en el circuito de potencia [10].

Actualmente existe una amplia gama de dispositivos semiconductores capaces de manejar grandes cantidades de corriente y tensión, sin embargo la elección de un dispositivo de potencia no solo depende de los niveles de tensión y corriente requeridos sino también de sus características de conmutación, en este sentido es posible clasificar a los dispositivos semiconductores en dos grandes categorías: aquellos que requieren de una corriente en su terminal de disparo (dispositivos controlados por corriente) y los que necesitan de una tensión para cambiar su estado (dispositivos controlados por voltaje).

Un dispositivo controlado por corriente requiere de una corriente constante por un periodo de tiempo determinado para iniciar o mantener su estado de conducción. Dos tipos de este dispositivo son el rectificador controlado de silicio (SCR) y el transistor de unión bipolar (TBJ). Por otro lado los dispositivos controlados por voltaje requieren de una tensión constante en su terminal de disparo para mantener su estado de conducción. Los requerimientos físicos en la terminal de disparo de estos últimos son sustancialmente menores que los exigidos por los dispositivos controlados por corriente. Dos ejemplos de dispositivos controlados por tensión son el transistor bipolar de compuerta aislada (IGBT) y el transistor de efecto de campo metal oxido semiconductor (MOSFET) [9].

El dispositivo semiconductor a elegir debe ser capaz de:

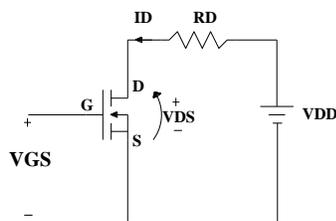
1. *Manejar los valores nominales de tensión y corriente de operación del convertidor, esto es 300 [V] y 10 [A] respectivamente.*
2. *Tener tiempos de encendido y apagado, que permitan una frecuencia de conmutación de 20 [kHz].*
3. *Exigir un nivel de complejidad simple en su encendido y apagado.*
4. *Disponibilidad en el mercado nacional.*
5. *Tener un bajo costo.*

En este sentido se opta por usar un transistor de efecto de campo MOSFET como interruptor electrónico del puente H.

Realizando una búsqueda en los catálogos electrónicos de varios fabricantes se elige al transistor MOSFET IRFP450⁴, debido a que sus características rebasan en sentido positivo a las establecidas como criterios de diseño. Sus principales características son:

- I. Un MOSFET es un dispositivo controlado por tensión de tres terminales fuente (S), compuerta (G) y drenador (D), basta aplicar pulsos de tensión entre su terminal compuerta y fuente (V_{GS}) para encenderlo (el IRFP450 requiere de una tensión de entre 10 y 20 [V]) y dejar de hacerlo para llevarlo a su estado de apagado.
- II. El IRFP450 es capaz de soportar una tensión de bloqueo de 500 [V] entre sus terminales S y D además de una corriente nominal de drenador (I_D) de 14 [A].
- III. Tiene los siguientes tiempos de encendido y apagado $t_{d(ON)}=27$ [ns], $t_{d(OFF)}=100$ [ns], $t_r=66$ [ns], $t_f=60$ [ns].

En la Tabla 1.2 se presentan las características más importantes del MOSFET seleccionado y en la Fig. 1.3 el símbolo del MOSFET polarizado.



$V_{DS}=500[V]$
$I_D=14[A]$
$V_{GSmax}=20[V]$
$V_{GS(th)}=2 \text{ a } 4[V]$
$t_r=66[ns]$
$t_f=60[ns]$

Figura 1.3 MOSFET polarizado Tabla 1.2 Características principales del MOSFET IRFP450

1.3.3 Acondicionamiento de señales de control del circuito de potencia.

Debido a que las señales que controlan el estado de los MOSFET del puente H son de naturaleza digital, debe haber una etapa intermedia que acondicione tales señales de tal forma que sean compatibles con los requisitos establecidos por el funcionamiento del interruptor elegido. A esta etapa de acondicionamiento la podemos dividir en tres procesos diferentes; aislamiento, referenciado y acondicionado. Cada una de ellas es tratada a continuación.

Aislamiento

Generalmente en un convertidor electrónico conmutado existe una diferencia considerable de tensiones y corrientes entre el circuito de potencia (etapa de potencia) y el circuito que controla el estado de los interruptores electrónicos (etapa de control). Mientras que en la etapa de potencia se manejan tensiones y corrientes en el orden de los cientos, en la etapa de control suele utilizarse señales digitales de bajo nivel. Con el fin de evitar que haya algún tipo de influencia eléctrica sobre la etapa de control (ruido eléctrico o lazos de corriente) y que afecte

⁴ De International Rectifier, la hoja de datos se presenta en la sección de apéndices

el funcionamiento del convertidor es necesario aislar eléctricamente a las dos etapas. Existen varias formas tales como por medio de transformadores (acoplamiento magnético) o por medio de optoacopladores (acoplamiento óptico). En éste trabajo de tesis se utilizó acoplamiento óptico (véase sección 2.7).

Referenciado

Generalmente los convertidores electrónicos de potencia están constituidos por más de un interruptor electrónico, en nuestro caso el puente H se compone de cuatro MOSFET, los cuales deben ser excitados con una tensión entre compuerta y fuente (V_{GS}) individualmente por un sistema de control.

En la Fig. 1.4 se muestra un puente H controlado por un sistema llamado *Generador de lógica*, el cual genera cuatro pulsos de disparo (desplazados en el tiempo) referenciados al punto C, donde C puede ser conectado a la terminal de referencia G de VCD. Tanto el pulso V_{g2} y V_{g3} tienen como punto de referencia el mismo que la terminal fuente de los MOSFET M2 y M3- Sin embargo, los pulsos V_{g1} y V_{g4} deben tener el mismo punto de referencia que la terminal fuente del MOSFET que controlan (punto A y B) por lo que, es necesario contar con un circuito que cambie el nivel de referencia de los disparos V_{g1} y V_{g4} de tal manera que permita controlar el estado de los MOSFET. A este tipo de circuito se le conoce como cambiador de nivel. En la sección 2.7 se detalla la manera en cómo se llevó a cabo tal cambio de nivel.

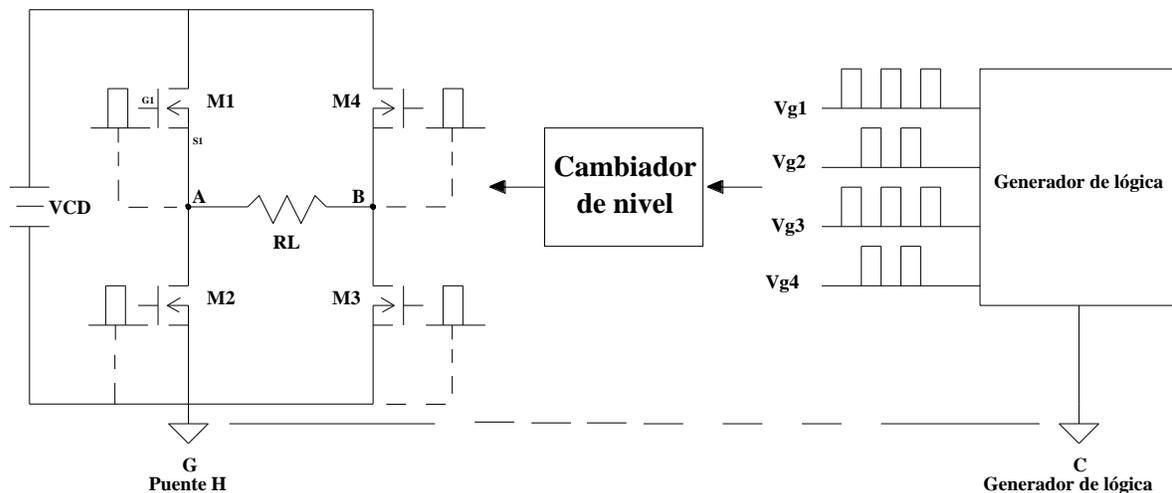


Figura 1.4 Inversor monofásico y señales de disparo.

Acondicionamiento

Para operar el MOSFET como interruptor electrónico debe aplicarse entre sus terminales de compuerta y fuente una tensión (V_{GS}) y una corriente (I_G) apropiadas determinadas por las características de excitación del MOSFET. Acondicionar implica brindar una potencia mayor a las señales de control, para ello se requiere aumentar la tensión y corriente, en nuestro caso las señales digitales de control deben ser amplificadas a magnitudes adecuadas que puedan encender a los MOSFET.

Actualmente existen muchos dispositivos que son fabricados específicamente para el manejo de MOSFET los cuales son nombrados como “drivers”, muchos de los cuales ofrecen al usuario en un solo circuito integrado las tres funciones comentadas anteriormente (aislamiento, cambio de nivel y acondicionamiento). En este trabajo de tesis se optó por hacer uso de uno de estos dispositivos, en el siguiente Capítulo se abordan las características del “driver” seleccionado.

1.3.4 Fuentes potenciales de errores

La seguridad juega un papel importante en el diseño de sistemas electrónicos. Nuestro inversor debe de contar con un sistema de seguridad que lo proteja y en consecuencia proteja a los otros componentes que integran al SEE. Entre las causas que pueden provocar una mala operación y/o daño en el SEE se pueden mencionar:

- I. Secuencias invalidas de encendido/apagado de los MOSFET.
- II. Magnitud de corriente superior a la nominal de los MOSFET.

Con respecto al primer punto se puede decir que: el orden con el cual los transistores son manejados es determinado por una secuencia (definida por la ley de control) de datos binarios provenientes de la etapa de control del SEE (sobre la cual no se tiene control alguno por parte nuestra), existe el riesgo de que tal secuencia obligue a encender dos MOSFET de la misma rama simultáneamente, provocando daño al SEE. Por lo tanto, debe existir un sistema intermedio entre la etapa de control y el puente H que evite la llegada de una secuencia inválida a las terminales de disparo de los transistores. A dicho sistema nos referiremos de ahora en adelante como *Sistema de Seguridad (SS)*.

Con respecto al segundo punto se puede decir que también es necesario mantener un monitoreo continuo de la corriente que circula por el inversor para evitar algún daño a los MOSFET, y al SEE. Por lo que, es necesario un sistema de monitoreo de corriente que pueda detectar una situación de sobrecorriente en el inversor y que llamaremos como *Sistema de Medición (SM)*.

1.4 Propuesta de diseño

Con base en el estudio anterior se propone que el diseño e implementación del inversor se lleve a cabo desarrollando los bloques internos de la planta mostrados en la Fig. 1.5.

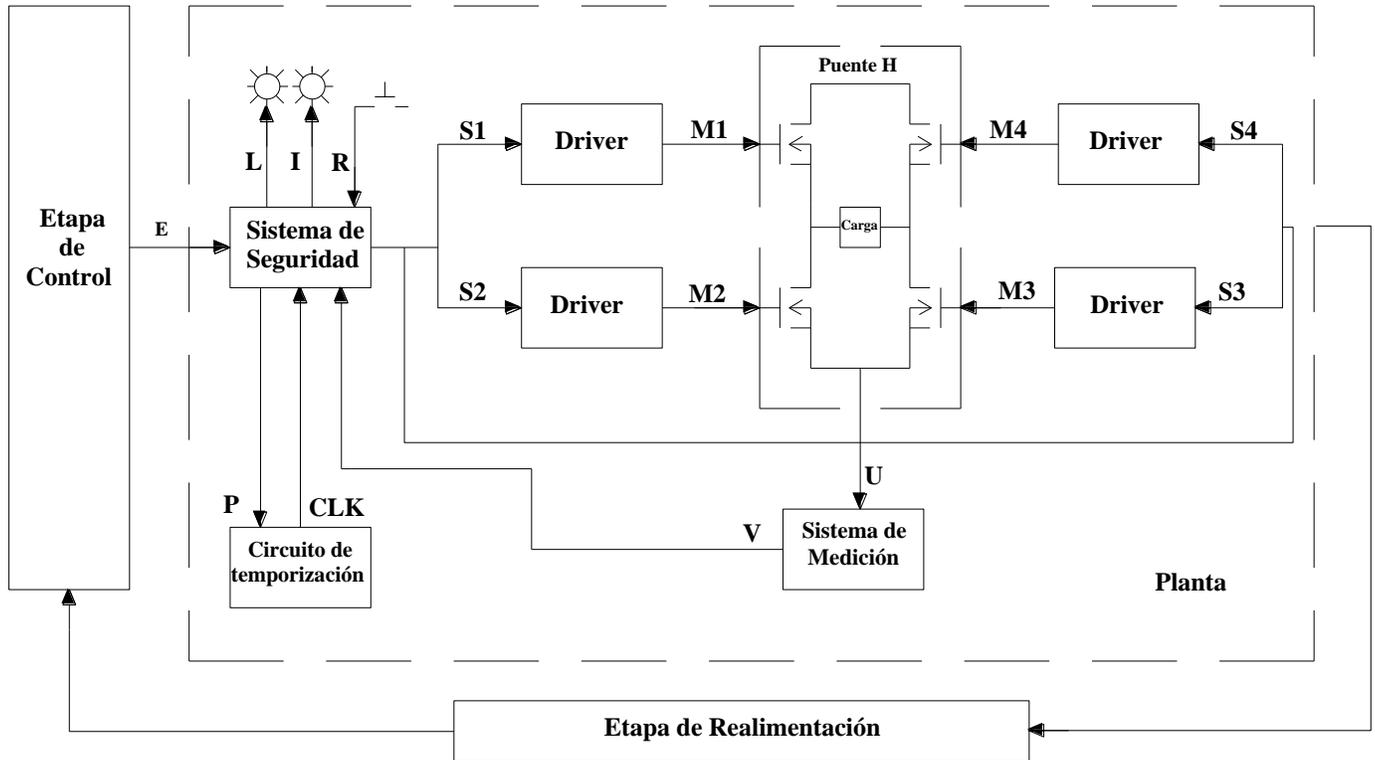


Figura 1.5 Propuesta de diseño

En la Fig. 1.4, como resultado de alguna ley de control programada el bloque Etapa de Control genera una secuencia binaria compuesta de cuatro bits (E) que determinan el estado de cada MOSFET.

Como siguiente paso el Sistema de Seguridad establece a su salida una secuencia binaria de cuatro bits (S1...S4), donde el valor de S depende del valor de cada componente de E a la entrada.

Posteriormente dicha señal es modificada por el Driver con el fin de acondicionarla (suministrar la tensión y corriente necesaria) para que sea capaz de controlar al MOSFET correspondiente, como resultado de su paso por el Driver se tiene la señal M que finalmente controla el estado del MOSFET.

Durante la operación del puente H, la señal U contiene información sobre la corriente que demanda la carga conectada al puente H, mientras que el Sistema de Medición acondiciona tal información (señal V) con el fin de hacerla compatible con el Sistema de Seguridad.

La señal CLK es una señal de temporización, mientras que P controla el funcionamiento de Circuito de Temporización. La señal L e I son señales de alarma generadas por el Sistema de Seguridad y se conectan a una fuente luminosa, mientras que R es una señal de reinicio la cual se genera por medio de un botón. En el Capítulo siguiente se describe en detalle cada uno de los bloques, su función dentro de la planta y las señales de entrada y salida que manejan.