



PONTIFICIA **UNIVERSIDAD CATÓLICA** DEL PERÚ

Esta obra ha sido publicada bajo la licencia Creative Commons  
Reconocimiento-No comercial-Compartir bajo la misma licencia 2.5 Perú.

Para ver una copia de dicha licencia, visite  
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/pe/>



**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**  
**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



PONTIFICIA  
**UNIVERSIDAD**  
**CATÓLICA**  
DEL PERÚ

DISEÑO DE SUBSISTEMAS DE ALIMENTACIÓN Y CONTROL  
DE UN SISTEMA DE ILUMINACIÓN EXTERIOR BASADO  
EN TECNOLOGÍA DE LEDS DE POTENCIA DEL LOGO  
PUCP EN EL EDIFICIO MCGREGOR

Tesis para optar el Título de Ingeniero Electrónico, que presenta el bachiller:

**Sergio Eduardo Román Dueñas**

ASESOR: Ing. Willy Carrera Soria

**Lima, agosto del 2010**

## RESUMEN

Actualmente existen diversas tecnologías de iluminación, pero ninguna tan versátil y eficiente como la de estado sólido, o LED (Diodo Emisor de Luz). Aparte de esto, los LEDs poseen un largo tiempo de vida y pueden ser controlados fácilmente con la finalidad de crear efectos de iluminación. En los países denominados del primer mundo esta tecnología se encuentra ampliamente difundida, en el nuestro, aún no es muy conocida, ni tomada en cuenta para las distintas aplicaciones que se puedan encontrar.

Es por ello que se plantea el diseño de un sistema de iluminación con LEDs para el edificio McGregor, ubicado en la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP). Con la finalidad de que éste asegure características tales como: alta eficiencia, ahorro de energía, largo tiempo de vida y la posibilidad de crear efectos de iluminación.

Luego de un análisis, se ha pensado en distribuir este sistema de iluminación en cuatro subsistemas, los cuales son: subsistema de alimentación, subsistema de control (Incluye programación y comunicación), subsistema de circuitos de excitación de LEDs y subsistema de luminarias para LEDs. Los dos últimos subsistemas fueron diseñados y validados en una tesis previa, por lo tanto esta tesis abarcará el diseño de los dos primeros subsistemas: alimentación y control.

Queda en evidencia que los objetivos de esta tesis serán el diseño de una fuente de alimentación y el diseño de un protocolo de comunicación y control que permita crear efectos de iluminación.

En el capítulo 1 se encontrará información general e introductoria a la tecnología LED, así como un resumen de lo alcanzado en la tesis previa en la cual se desarrollaron los subsistemas de luminarias y circuitos de excitación.

En el capítulo 2 se encontrará información más concisa y relevante de acuerdo a los objetivos de esta tesis, ya que en éste se tratarán los temas de fuentes de alimentación, protocolos de comunicación y microcontroladores.

En el capítulo 3 se podrá apreciar el diseño realizado tanto para el subsistema de alimentación como para el subsistema de control y comunicación.

Finalmente en el capítulo 4 se encontrará el resultado de las simulaciones para el subsistema de control y comunicación mediante software y la implementación de un pequeño módulo de comunicación.

## ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
 <b><u>CAPITULO 1:</u></b>	
<b><u>SISTEMAS DE ILUMINACIÓN CON LEDS.....</u></b>	<b>2</b>
1.1 Introducción a la Tecnología LED.....	2
1.1.1 LEDs de potencia.....	3
1.1.2 Ventajas de la tecnología.....	3
1.1.3 Áreas de aplicación.....	3
1.2 Avances previos en el diseño del sistema de iluminación con LEDs.....	4
1.2.1 Resultados del Diseño del Subsistema de Luminarias.....	4
1.2.2 Resultados del Diseño de los Circuitos de Excitación.....	6
 <b><u>CAPÍTULO 2:</u></b>	
<b><u>FUENTES DE ALIMENTACIÓN Y SISTEMAS DE CONTROL PARA LEDS DE POTENCIA.....</u></b>	<b>9</b>
2.1 Fuentes de Alimentación.....	9
2.1.1 Fuentes Lineales.....	9
2.1.2 Fuentes Conmutadas .....	11
2.2 Sistemas de Control.....	14
2.2.1 Microcontroladores.....	15
2.2.2 Interfaces de Comunicación.....	15
2.2.2 Protocolos de Comunicación.....	17

### **CAPÍTULO 3:**

#### **DISEÑO DE UN SUBSISTEMA DE ALIMENTACIÓN Y CONTROL DE LEDS DE**

<b><u>POTENCIA</u></b> .....	<b>20</b>
3.1 Hipótesis.....	20
3.1.1 Hipótesis principal.....	20
3.1.2 Hipótesis secundarias.....	20
3.2 Objetivos.....	21
3.2.1 Objetivo principal.....	21
3.2.2 Objetivos secundarios.....	21
3.3 Diagrama de bloques del sistema de iluminación.....	21
3.3.1 Diagrama de bloques del sistema completo.....	21
3.3.2 Diagrama de bloques del sistema electrónico.....	22
3.4 Diseño del subsistema de alimentación.....	23
3.4.1 Condiciones generales.....	23
3.4.2 Requerimientos del subsistema de alimentación.....	24
3.4.3 Diseño de la fuente de alimentación.....	25
3.5 Diseño del subsistema de comunicación.....	30
3.5.1 Condiciones generales.....	30
3.5.2 Requerimientos del protocolo de comunicación.....	30
3.5.3 Diseño del protocolo de comunicación.....	31

### **CAPÍTULO 4:**

#### **PRESENTACIÓN DE SIMULACIONES**

4.1 Introducción.....	37
4.2 Descripción del programa.....	37

4.3 Descripción del circuito.....38

4.4 Resultados de simulación por software.....39

4.5 Resultados del circuito implementado.....41

**CONCLUSIONES.....45**

**RECOMENDACIONES.....46**

**BIBLIOGRAFÍA.....47**

**ANEXOS**



## INTRODUCCIÓN

Los sistemas de iluminación exterior son utilizados cada vez más en distintos edificios a nivel mundial, debido a las nuevas tecnologías que se vienen desarrollando, que brindan una excelente relación costo-beneficio.

Entre estas tecnologías destaca la tecnología LED, que viene siendo usada hace varios años. Ésta tecnología se basa en diodos emisores de luz (Light Emisor Diode), y últimamente, su desarrollo ha llegado a tal punto que está siendo utilizada en un gran número de aplicaciones y productos tales como: Iluminación exterior e interior, automóviles, dispositivos electrónicos, etc. [5].

La tecnología LED ofrece muchas ventajas respecto a otras tecnologías convencionales de iluminación (Fluorescentes, lámparas Incandescentes, etc), entre las cuales destacan su bajo consumo de energía, su eficiencia lumínica y su durabilidad de aproximadamente 50000 – 60000 horas [12].

Otra ventaja de esta tecnología es su tiempo de respuesta, dando lugar a la posibilidad de crear efectos y/o secuencias de encendido mediante una computadora o microcontroladores. Esto es aprovechado en numerosos edificios modernos como medio de publicidad al crear sistemas de iluminación exterior que llaman la atención al poseer efectos visuales.

En la presente tesis se desarrollará el diseño de los subsistemas de alimentación y control de un sistema de iluminación del logo PUCP para el edificio McGregor, utilizando la tecnología de LEDs de potencia. Cabe decir que el diseño de luminarias y circuitos de excitación se desarrolló en una tesis previa, por tanto se considerarán los requerimientos y diseños realizados en dicha tesis.

**CAPÍTULO 1**

**SISTEMAS DE ILUMINACIÓN CON LEDS DE POTENCIA**

**1.1. Introducción a la Tecnología LED**

Los diodos emisores de luz (LEDs) representan una tecnología antigua, que en los últimos años ha evolucionado de una forma notable, permitiéndole entrar en aplicaciones nunca antes pensadas para esta tecnología. Los LEDs están hechos de materiales semiconductores que emiten luz al ser polarizados con un voltaje continuo y al circular por ellos una corriente eléctrica [5, 10].

Inicialmente su uso se centraba en productos electrónicos de baja potencia; sin embargo, actualmente se llega a usar en iluminación de exteriores, ya sea con fines concretos de iluminación o también con fines decorativos. El principal avance de los LEDs se refleja en la corriente que pueden manejar, permitiendo generar altos índices de lúmenes, que los ponen muy cerca de las lámparas convencionales (fluorescentes, focos incandescentes, etc) en la cantidad de lúmenes que pueden generar. Éstos son llamados LEDs de potencia [16].

A continuación se presenta la figura 1.1 que muestra la evolución de los LEDs a lo largo del tiempo:

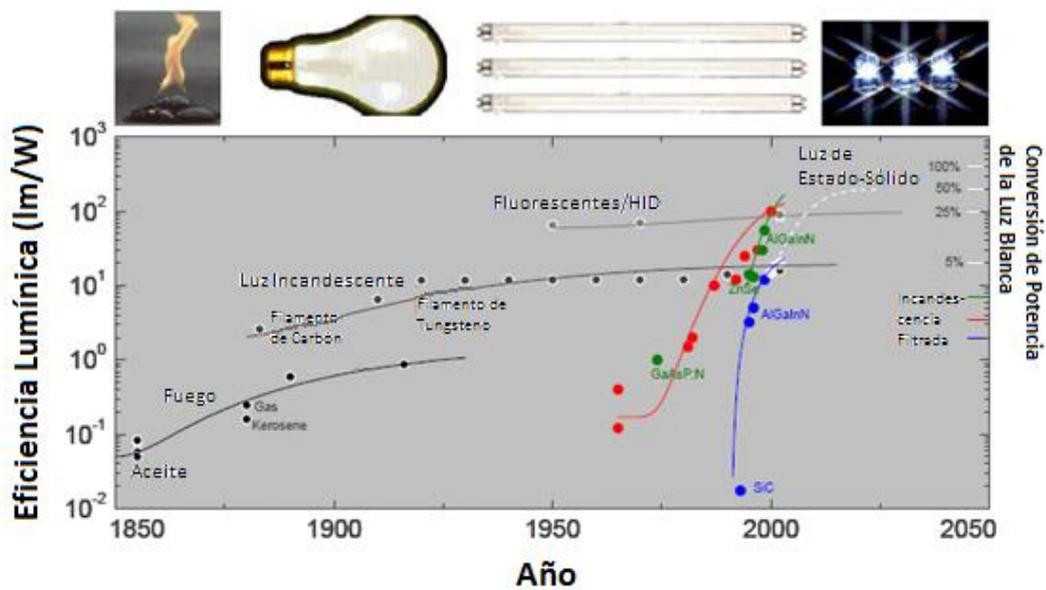


Figura 1.1 Evolución de la eficiencia lumínica de distintas lámparas [14]

### 1.1.1 LED de potencia

Los LEDs de potencia son una clara muestra del avance de esta tecnología y están conformados principalmente por un disipador, un lente y el chip LED que emite la luz. Estos LEDs pueden manejar típicamente corrientes entre 250mA-1.5A, y como se encuentran polarizadas a un bajo voltaje (3-4 voltios), la potencia disipada es baja, siendo muy eficientes [16, 17, 18].

### 1.1.2 Ventajas de la tecnología LED

Esta tecnología ofrece muchas ventajas que hacen posible su uso en una gran variedad de aplicaciones, entre ellas destacan [10, 5, 3]:

- a) Durabilidad: Oscila entre 50 000 y 60 000 horas.
- b) Eficiencia: Poseen un buen rendimiento de lúmenes por watt, de aproximadamente 70-100lm/W.
- c) Brillo y Colores: Buenos circuitos de excitación permiten generar altos índices de brillo en los LEDs, a su vez en el mercado se encuentra gran variedad de colores para distintas aplicaciones.
- d) Temperatura de operación: Presentan una baja temperatura de operación al estar hechos de materiales semiconductores, llamados también de estado sólido.
- e) Mayor rapidez de respuesta: Su respuesta se encuentra en el orden de los micro segundos, permitiendo así su programación para diversos fines. Normalmente se utilizan ondas PWM (Ondas de pulso modulado) para controlar su intensidad.

### 1.3.3 Áreas de aplicación

En los últimos años, el uso de LEDs se ha ido incrementando, debido a su versatilidad y ventajas con respecto a otras lámparas. A continuación se muestran sus principales aplicaciones [5]:

- Iluminación exterior
- Iluminación interior
- Industria automotriz
- Productos electrónicos (Cámaras, PDAs, etc)
- Señales de tránsito
- Televisores y pantallas LED

## 1.2 Avances previos en el diseño del sistema de iluminación

Como se ha mencionado, esta tesis cubre el diseño de la fuente de alimentación y el sistema de control para el sistema de iluminación con LEDs de potencia. Sin embargo, una tesis previa ha cubierto los diseños de luminarias y circuitos de excitación. En esta sección se hará un breve resumen de lo alcanzado en dicha tesis, cuyo título es el siguiente: *Diseño de los Subsistemas de Luminarias y Circuitos de Excitación de un Sistema de Iluminación exterior basado en tecnología de LEDs de potencia para el logo PUCP en el edificio Mac Gregor* [15].

### 1.2.1 Resultados del Diseño del Subsistema de Luminarias

El subsistema de luminarias consta de 3 elementos básicos:

#### A. Modelo de Iluminación:

Conforma al conjunto de técnicas y estrategias de iluminación utilizadas para las distintas partes del logo PUCP. La figura 1.2 representa dicho modelo [15]:

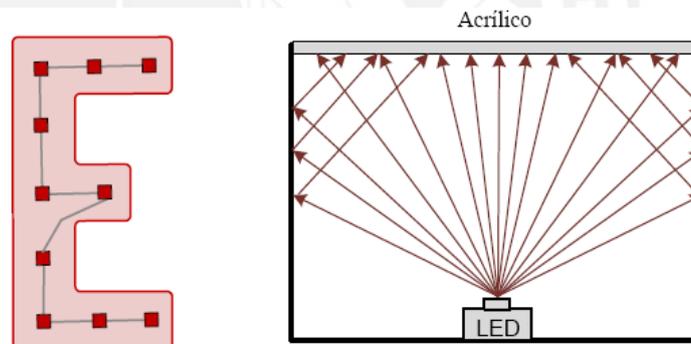


Figura 1.2 Vista superior y transversal del modelo de iluminación [15]

#### B. Estructura mecánica de las luminarias:

Involucra la forma y materiales de cada estructura, la cantidad y tipo de LEDs a utilizar, los materiales de difuminación, etc. Para la elección de estos materiales y componentes, se ha tomado en cuenta los sistemas integrados de compañías internacionales como son: Philips Lumileds y Osram Semiconductors. Estas compañías desarrollan sistemas a lo largo del mundo, iluminando edificios con LEDs de potencia cumpliendo con distintos requerimientos que se puedan presentar [15].

Consideraciones finales:

- ✓ Se usarán 718 LEDs de la marca OSRAM, modelo Golden Dragon en colores rojo, blanco y ámbar.
- ✓ Para alcanzar una óptima difuminación en los tramos largos, se usará acrílico Opal colocado a una distancia de 10cm por encima de los LEDs.
- ✓ Para la estructura metálica de la luminaria, se utilizará metal platina por ser liviano y económico.
- ✓ Se utilizarán barras de aluminio en la base de las estructuras con la finalidad de disipar calor.

A continuación se muestra la figura 1.3 que representa el diseño final del logo PUCP, donde cada punto negro representa un LED:

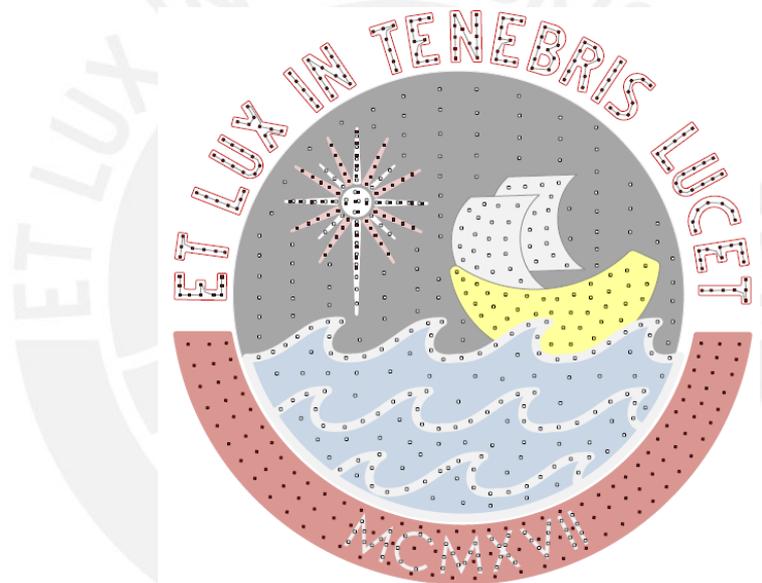


Figura 1.3 Logo PUCP con la distribución de LEDs [15]

C. Acceso a la estructura mecánica:

El objetivo de este acceso es poder realizar mantenimiento al sistema diseñado por parte de una persona, tanto a nivel eléctrico como mecánico. Por tanto se consideró que el logo tenga una separación de aprox. 1 metro de la pared del edificio. El acceso del personal de mantenimiento se dará por medio de escalones y pisos ubicados en la pared del edificio, justo detrás del logo PUCP [15].

### 1.2.1 Resultados del Diseño del Subsistema de Excitación

El subsistema de excitación consiste básicamente en un circuito electrónico que sea capaz de proveer la corriente necesaria para energizar los LEDs de potencia, este circuito es conocido también como driver de potencia. Es necesario considerar también que la intensidad de luz de los LEDs deberá ser controlada por medio de señales PWM, para esto un microcontrolador sería ideal.

De acuerdo a los LEDs seleccionados y lo mencionado previamente, los drivers de potencia deberán cumplir principalmente con los siguientes requisitos [15]:

- ✓ Corriente de trabajo: 350mA-400mA.
- ✓ Manejar de 5 LEDs a más.
- ✓ Alta eficiencia
- ✓ Capaz de controlar la intensidad de luz mediante ondas PWM.

Luego de una comparación con distintos drivers, se seleccionó el driver Bucktoot 7027 (figura 1.3), porque cumple con los requisitos y posee un buen precio.

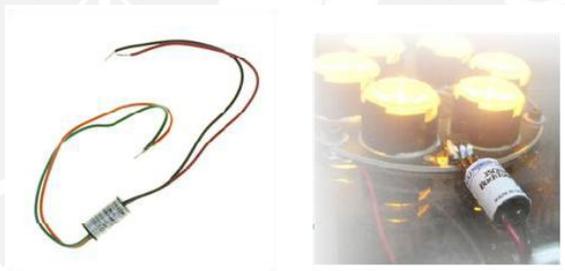


Figura 1.3 Driver Bucktoot [15]

Sin embargo, es necesario colocar un transistor MOSFET para controlar la intensidad de luz, por medio de señales PWM en la puerta de dicho transistor. Las ondas PWM serán generadas por un microcontrolador. En la figura 1.4 se presenta un esquemático básico del subsistema de excitación.

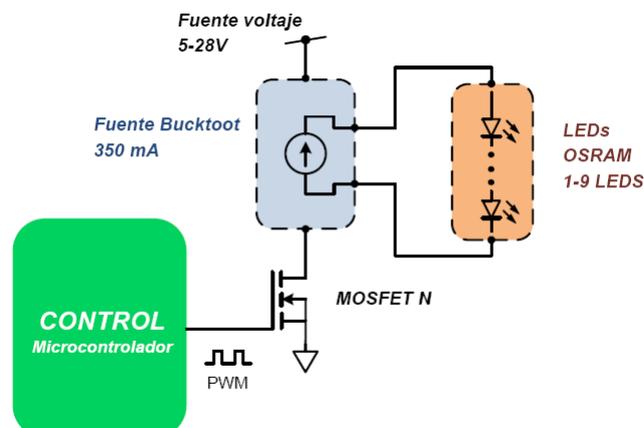


Figura 1.4 Esquemático del subsistema de excitación [15]

Para energizar eficientemente la gran cantidad de LEDs que maneja el sistema, se necesitará una gran cantidad de los drivers mencionados, microcontroladores, etc. Es por esto que una red de comunicaciones sería la solución, donde un microcontrolador maestro administra y controla distintos módulos esclavos que controlan la intensidad de luz de los LEDs. La figura 1.5 muestra una topología de la conexión entre el módulo maestro y los esclavos:

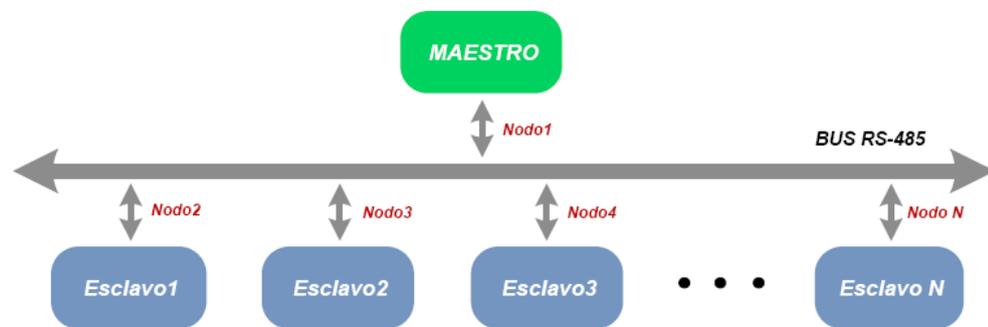


Figura 1.5 Topología de conexión entre el módulo maestro y los esclavos [15]

Como se observa en la figura, estos módulos se encuentran conectados por una interfaz serial RS-485. Se seleccionó esta interfaz porque es compatible con protocolos maestro-esclavos y además, la señal es inmune a largos cableados, que se presentan en este sistema de iluminación. En los siguientes capítulos se hará hincapié en esta interfaz, así como en el protocolo a utilizar [15].

Para la interfaz RS-485 se utilizará el integrado MAX485, de la marca MAXIM, debido a su buen precio y disponibilidad en el mercado nacional.

Los microcontroladores serán de la marca Atmel, debido a la experiencia que se tiene en la programación de dichos integrados, su buen precio y disponibilidad en el mercado. Los modelos exactos a utilizar se detallarán en los siguientes capítulos donde se detalla la programación y los protocolos de comunicación.

Como se mencionó existen dos tipos de módulos en el sistema:

- Módulo maestro: Encargado de controlar a los esclavos, enviándoles órdenes con la finalidad de generar distintos efectos de iluminación. Este módulo está conformado básicamente por un microcontrolador y un transceiver RS-485.
- Módulo esclavo: Este módulo contiene los drivers, y un microcontrolador que recibe órdenes del maestro y genera señales PWM, que terminan generando los efectos de iluminación deseados.

La figura 1.6 muestra un diagrama referencial para el módulo esclavo:

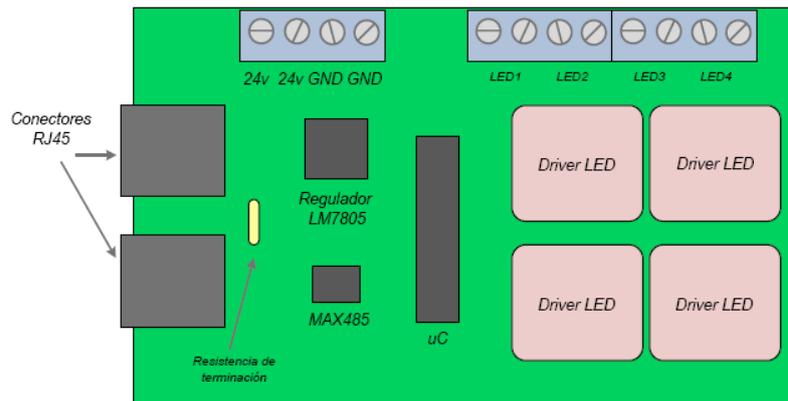


Figura 1.6 Diagrama de componentes del módulo esclavo [15]

Para este diagrama se tomaron las siguientes consideraciones:

- ✓ La señal llegará por un bus UTP de 8 hilos conectada a las bornas RJ45, por donde viajan las señales de control, la señal de voltaje de 12V y tierra.
- ✓ Por los bornes de 24V llegará la señal de la fuente de alimentación encargada de energizar los drivers, que posteriormente encenderán los LEDs.

Finalmente, en la figura 1.7 se presenta un diagrama de bloques del sistema de comunicación entre módulos maestro y esclavos:



Figura 1.7 Diagrama de bloques del sistema de comunicación [15]

## CAPÍTULO 2

### FUENTES DE ALIMENTACIÓN Y SISTEMAS DE CONTROL PARA LEDS DE POTENCIA

#### 2.1 Fuentes de alimentación

Las fuentes de alimentación son utilizadas en equipos eléctricos y electrónicos debido a su gran espectro de aplicaciones. Éstas van desde aplicaciones domésticas a industriales, miliwatts a megawatts, herramientas manuales a comunicación satelital [9].

Por definición, una fuente de alimentación es un dispositivo que convierte un voltaje de línea AC en una salida estable DC o múltiples salidas DC. Actualmente existen dos tipos de fuente que son ampliamente utilizadas: la lineal y la conmutada. La utilización de una u otra fuente va a depender de la aplicación a desarrollar [9].

##### 2.1.1. Fuentes Lineales

Esta fuente es ampliamente utilizada debido a su bajo costo y baja complejidad. La primera etapa de esta fuente consiste en el rectificado, en donde la señal alterna es convertida en una señal pulsante. Luego, la señal es filtrada generando una salida estable, pero con un pequeño rizado. Finalmente, el rizado es eliminado en la etapa de regulación, permitiendo generar una señal DC constante, ésta permanecerá constante a pesar de las posibles variaciones en el voltaje de línea o en la carga del circuito. La figura 2.1 muestra un diagrama básico de la fuente en mención [9]:

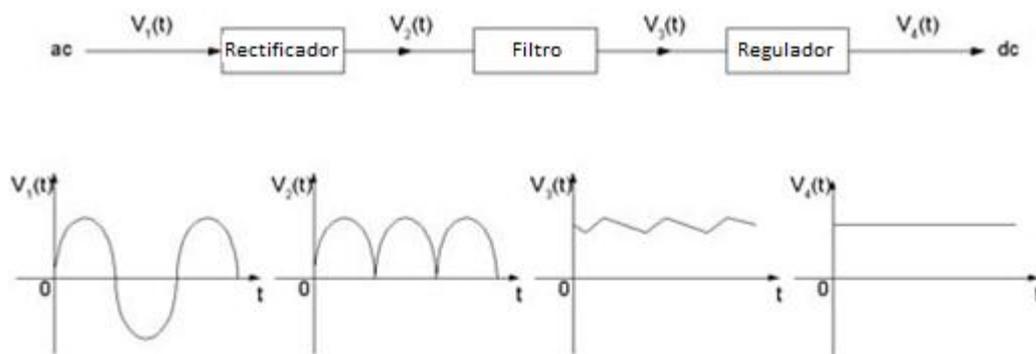


Figura 2.1. Diagrama de bloques de una fuente de alimentación AC-DC [9]

A. Etapa de rectificación:

La etapa de rectificación tiene como entrada la señal de línea AC, y genera a su salida una señal pulsante de una sola polaridad. Entre los tipos de rectificación existe la de media onda y la de onda completa. La primera deja pasar sólo una onda, ya sea la positiva o negativa, bloqueando la otra; en cambio, la segunda convierte la onda positiva y negativa en una onda de una sola polaridad. Es por ello que el rectificador de onda completa es el más utilizado. La figura 2.2 muestra una señal alterna antes y después de ser rectificada [9]:

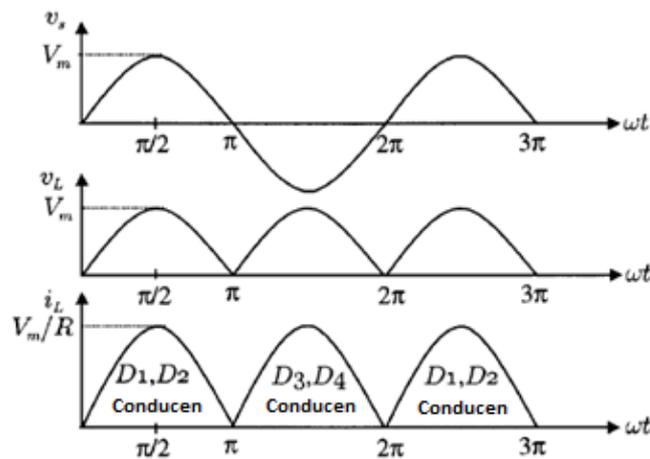


Figura 2.2 Señales de voltaje antes y después de una rectificación [9]

B. Etapa de filtrado:

Esta etapa es comúnmente utilizada para generar una salida DC estable, aunque un pequeño rizado va a estar siempre presente. La primera opción para desarrollar un filtro sería el uso de capacitores, que son ideales para bajas potencias, siendo ésta la opción más utilizada. La otra opción sería la de utilizar inductancias, que permiten almacenar corriente y disminuir aún más el rizado de voltaje en la salida, siendo muy utilizadas para aplicaciones de alta potencia. La figura 2.3 muestra dos tipos de filtros muy utilizados en fuentes de alimentación [9]:

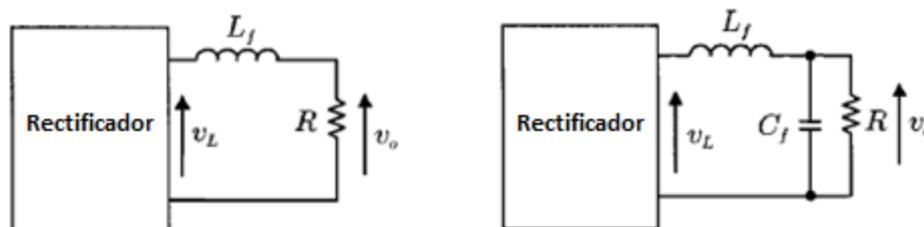


Figura 2.3 Filtro L y Filtro L-C [9]

### C. Etapa de regulación:

Esta etapa es una de las más importantes, ya que genera la salida de la fuente de alimentación. En ésta, el voltaje de rizado es suprimido para generar una salida DC constante. Normalmente la regulación se alcanza utilizando circuitos integrados como el LM7824 para fuentes lineales, que se encarga directamente de generar una salida DC constante a su salida, en este caso 24V, como lo define el último número del código del producto [9, 19].

Para el caso de fuentes de alta corriente se utiliza transistores de potencia colocados en su región activa, colocados en paralelo con el regulador (en este caso el LM7824), con la finalidad que la corriente de salida circule por estos transistores, mas no por el integrado.

#### 2.1.2. Fuentes Conmutadas

A diferencia de las fuentes lineales que trabajan con transistores en su región activa, las fuentes conmutadas regulan su voltaje por medio de transistores en corte o saturación. Es por esto que las fuentes conmutadas no disipan tanta potencia como las fuentes lineales [9, 7].

Estas fuentes son mucho más complejas que las lineales, debido principalmente a la variedad de componentes empleados y a una compleja etapa de regulación que requiere un control avanzado para mantener la salida en un nivel constante. Pese a su complejidad se pueden diferenciar 4 etapas constructivas básicas, como se puede apreciar en la figura 2.4 [7]:

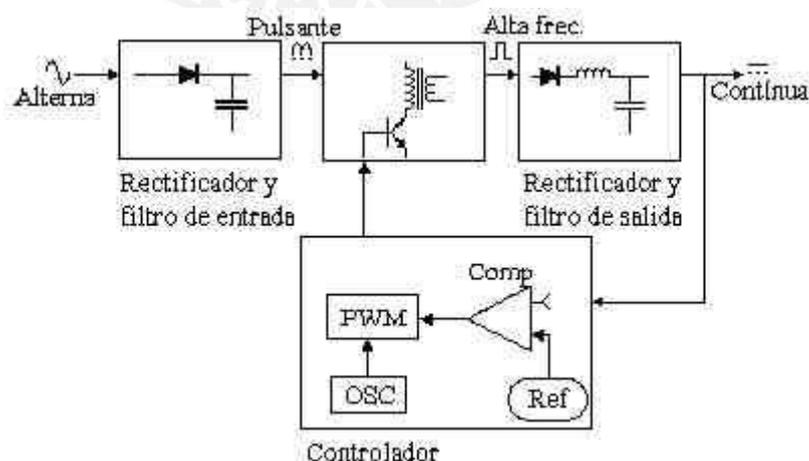


Figura 2.4 Etapas de una fuente conmutada [7]

La primera etapa consiste en la transformación de una señal alterna en una señal continua pulsante, por medio de un rectificador y filtro de entrada. El segundo y tercer bloque vienen a ser el convertidor CC-CC, conformado por transistores (en modo ON/OFF), un transformador (en el caso para fuentes conmutadas aisladas), y un filtro de salida. En esta etapa se genera una onda cuadrada de alta frecuencia, que luego es filtrada, permitiendo generar una salida DC constante [2, 7].

El cuarto bloque es uno de las partes más importantes de la fuente, ya que es la etapa de control. En este bloque se toma como referencia la salida DC generada, con la finalidad de generar un lazo de retroalimentación que permita mantener la salida en un valor deseado. Esto se alcanza variando el ciclo de trabajo de los transistores mediante señales PWM (Modulación por ancho de pulso). En esta etapa, se utiliza comúnmente el integrado TL494, éste es muy versátil y posee diferentes características que hacen el control más preciso, como amplificadores de error, control de tiempo muerto ajustable, etc. [9, 7, 8].

Normalmente, la primera y tercera etapa descritas permanecen igual para la mayoría de aplicaciones. Sin embargo, la etapa del convertidor CC-CC posee diversas variantes de acuerdo a la aplicación requerida. Básicamente existen tres tipos de convertidores: directo, inverso y de retroceso [8].

#### A. Convertidor directo (Buck converter):

Este convertidor proporciona una salida igual o menor al valor de su entrada, y funciona muy bien para altas potencias (0-1000W) [7].

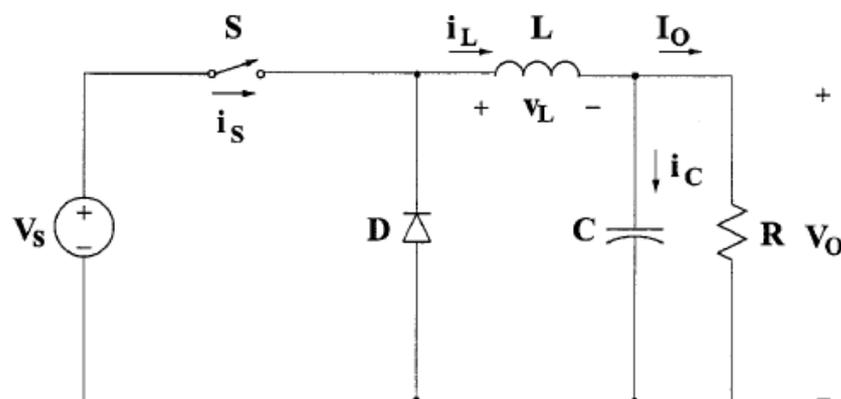


Figura 2.5. Convertidor directo [9]

Su funcionamiento se basa en la saturación del conmutador (transistor). Cuando éste se encuentra en zona de saturación (cerrado), el diodo se polariza

inversamente permitiendo que la energía se transfiera directamente de la entrada hacia la salida por medio de la bobina. Cuando el conmutador entra en zona de corte (abierto), el diodo se polariza creando un cortocircuito y la salida se aísla de la entrada, en este momento la bobina tiende a mantener las condiciones de corriente por el circuito. La función del condensador es cargarse en la etapa de saturación para mantener el nivel de voltaje en la etapa de corte [7].

B. Convertidor Inverso (Boost converter):

Este convertidor proporciona una salida mayor o igual al valor de su entrada, normalmente se utiliza para potencias entre 0-150W [7].

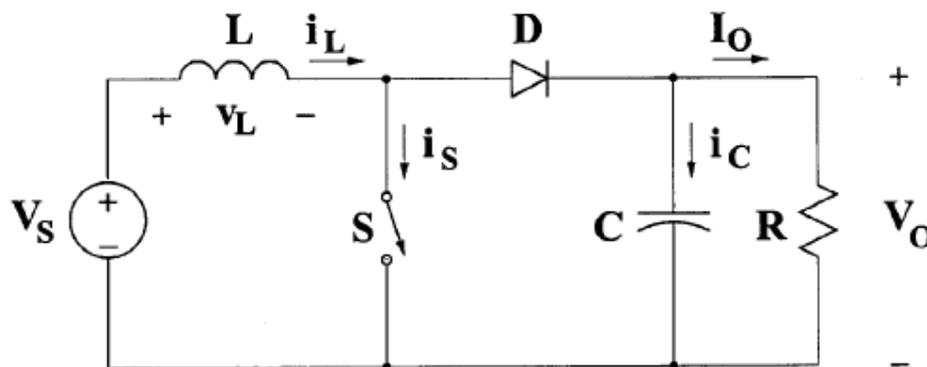


Figura 2.5 Convertidor Inverso [9]

Para este caso, en la zona de saturación del elemento conmutador, el ánodo del diodo se va a tierra, polarizándose inversamente, por lo que el circuito se aísla, dejando a un lado la fuente con la bobina y al otro, el condensador y la carga. En este periodo la bobina se carga directamente por la entrada. Cuando el conmutador se abre, el diodo conducirá, y la bobina al tratar de mantener la corriente del circuito generará un potencial de signo contrario al periodo anterior. De esta forma la tensión de salida será:  $V_S = V_L + V_E$ . Con esto se verifica lo dicho anteriormente, en que la tensión de salida será mayor que la tensión de entrada [7].

C. Convertidor de Retroceso (Buck-Boost Converter):

Este convertidor puede generar una salida mayor, igual o menor a su voltaje de entrada, pero con polaridad contraria con respecto a la entrada. Es muy popular y utilizado en fuentes que necesitan distintos voltajes de salida. (Arreglo Flyback aislado) [9, 7].

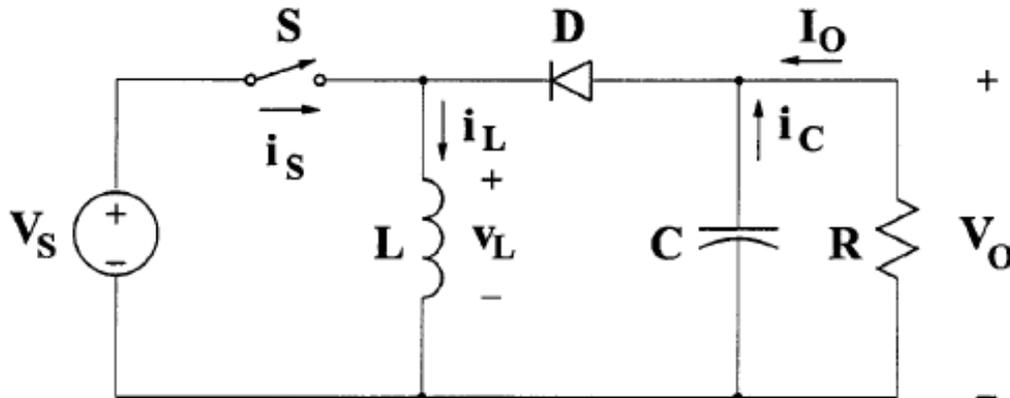


Figura 2.6 Convertidor de retroceso [9]

En este último caso, cuando el conmutador está en saturación, el diodo se polariza inversamente, permitiendo que la bobina se cargue directamente de la entrada y aislando la etapa del condensador y la carga. En la etapa de corte, el diodo se polariza directamente, y la bobina al tratar de mantener el nivel de corriente se polarizará inversamente, y al estar en paralelo con el condensador, el voltaje de salida será de polaridad contraria al de entrada [7].

## 2.2. Sistemas de Control

Actualmente, la gran mayoría de equipos modernos poseen al menos algún bloque de electrónica digital. Estos bloques pueden estar compuestos por integrados discretos, FPGAs (Field Programmable Gate Array), PLDs (Dispositivo Lógico Programable), microprocesadores o microcontroladores. Sin embargo, son estos últimos los que se han afianzado más en la electrónica digital, con aplicaciones que abarcan desde el uso doméstico hasta el industrial [6].

Para desarrollar un sistema de control, que es lo que se requiere en esta tesis, es necesario resaltar la importancia de una interfaz de comunicación y su respectivo protocolo, ya que sólo de esta forma se podrá realizar un control eficaz entre todos los microcontroladores que el sistema necesita para su correcto funcionamiento.

### 2.2.1. Microcontroladores

Un Microcontrolador es un circuito integrado que posee como mínimo: un CPU (Unidad Central de Procesamiento), memoria e interfaces de entrada y salida. Hoy en día los microcontroladores poseen de forma embebida: memoria RAM (Volátil) y ROM (No Volátil), temporizadores, contadores, comunicación serial, generadores de onda (PWM), convertidores análogo-digitales, etc. Esto hace que sean muy populares para distintas aplicaciones [6, 4].

En comparación con otras alternativas de control, los microcontroladores ofrecen las siguientes ventajas [6]:

- Bajo Costo: Su precio puede empezar por debajo de los 5 dólares.
- Hardware Simple: Un microcontrolador no necesita de muchos elementos externo para funcionar correctamente.
- Facilidad de aprendizaje: Programar un microcontrolador es mucho más sencillo y accesible que otras opciones de control.
- Gran cantidad de marcas y arquitecturas disponibles: Lo que permite seleccionar el microcontrolador adecuado para la aplicación que se requiera.

Para esta tesis se hará uso de microcontroladores ATMEL de 8bits (Atmega), debido a la disponibilidad de software para hacer simulaciones, y también a la experiencia en la programación de estos integrados.

### 2.2.2. Interfaces de Comunicación

Tanto la comunicación, como el control de sistemas implican la transferencia de información de un punto a otro. Para el subsistema de comunicación y control de esta tesis, nos concentraremos en la comunicación digital de datos, en la cual la denominación de “dato” se refiere a información representada por secuencias de ceros y unos [11].

Cada sistema de comunicación requiere tanto de un transmisor como de un receptor, para transmitir y recibir datos respectivamente. Además, necesita de una conexión entre ambos, ya sea por un cable de cobre, fibra óptica o inalámbricamente [11].

En 1984, la Organización Internacional de la Estandarización lanzó el modelo OSI (Open Systems Interconnection), que simplifica y reduce cada problema de diseño y comunicación en un número de capas, como se muestra en la figura 2.7. Por ejemplo, la interfaz de comunicación serial EIA-232 estaría ubicada en la primera capa, mientras que las otras se refieren al protocolo de comunicación [11].

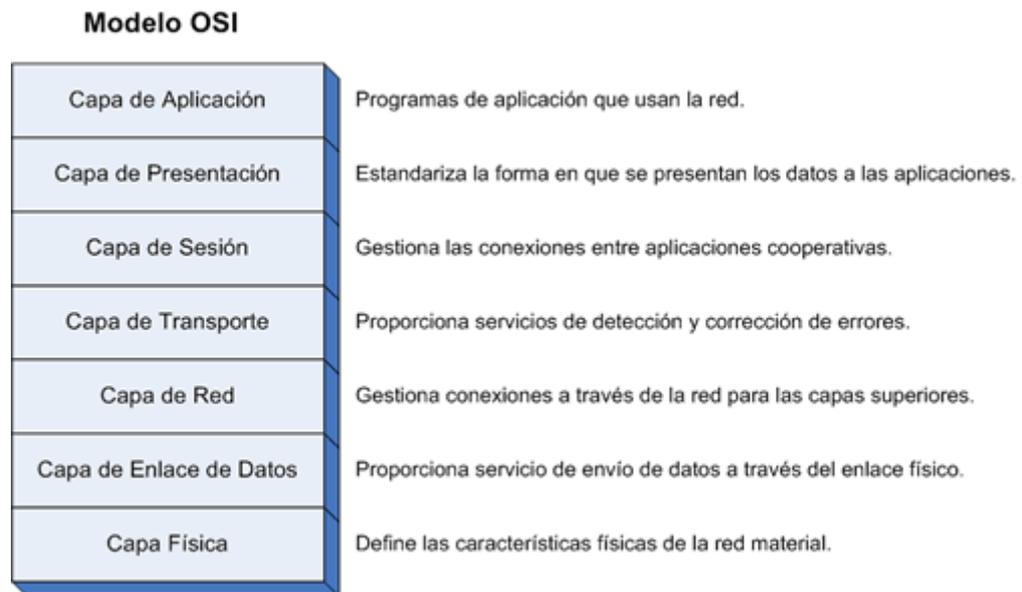


Figura 2.7 El modelo OSI [11]

Debido a que la mayoría de microcontroladores poseen comunicación serial, es lógico centrarnos en las posibles interfaces de comunicación serial, entre las cuales destacan: EIA-232 Y EIA-485. A continuación se muestra la tabla 2.1 comparativa con las características principales de cada interfaz [1]:

Tabla 2.1 Interfaces de comunicación serial

	EIA-232	EIA-485
<b>Tipo</b>	Serial Asíncrona	Serial Asíncrona
<b>Número de dispositivos (máximo)</b>	2	32
<b>Distancia máxima de cableado</b>	15-30 metros	1200 metros
<b>Velocidad máxima de comunicación</b>	20Kbps	10Mbps
<b>Rango voltaje "1" lógico</b>	-3 a -25V	-1.5 a -6V
<b>Rango voltaje "0" lógico</b>	3 a 25V	1.5 a 6V

De la tabla 2.1 se puede observar que el protocolo EIA-485 es mucho más rápido, admite mayor cantidad de dispositivos y trabaja a una mayor velocidad, siendo óptimo para una comunicación de tramos largos. Mientras que el protocolo de comunicación EIA-232 es una buena opción para comunicación en tramos cortos punto a punto.

En el capítulo 1 se mencionó que la interfaz EIA-485 (RS-485) fue seleccionada en la tesis previa. De todas formas en el capítulo 3 se realizará el análisis y se determinará si esta interfaz es la más adecuada para el sistema de iluminación.

Finalmente, con respecto al sistema de comunicación, esta tesis se centrará en el protocolo de comunicación (programación) por lo que se le dará mayor énfasis.

### 2.2.3. Protocolos de Comunicación

En un sistema de comunicación, los datos son enviados por medio de paquetes y es el protocolo el que define las características y longitud de este paquete. Es decir, determina el lenguaje con el que se van a comunicar los distintos dispositivos del sistema. Según el modelo OSI, un paquete comienza en la última capa, la de aplicación y va bajando hasta llegar a la capa física (Interfaz) [11].

#### A. Protocolo Modbus RTU:

El protocolo Modbus RTU Maestro-Esclavo es un protocolo de transmisión de datos del tipo serial, admite más de 200 esclavos, es de fácil implementación, y es público. Este protocolo está orientado a al trabajo con PLCs (Controladores Lógico Programables) industriales y computadores [20].

Entre sus principios básicos de funcionamiento destacan [20]:

- Existe sólo un maestro y hasta 247 esclavos. La comunicación es siempre iniciada por el maestro.
- Los esclavos nunca transmiten datos si es que no reciben algún pedido del maestro. Los esclavos nunca se comunicarán entre ellos.
- Tramas de datos de hasta 255 bytes, con bytes de revisión de error (CRC).
- Los pedidos del maestro pueden ser de dos tipos:
  - ✓ Pedido unitario: Se direcciona a un solo esclavo, el cual procesará el pedido y generará una respuesta hacia el maestro.

- ✓ Pedido global: Se direcciona a todos los esclavos en simultáneo. No se generan respuestas.

Para entender mejor como se arma la trama de datos de este protocolo, la figura 2.8 muestra el contenido de cada byte de la misma:

Dirección Esclavo	Función	Dato	CRC
1 byte	1 byte	0 up to 252 byte(s)	2 bytes LSB   MSB

Figura 2.8 Trama de datos [20]

Como se observa en la figura, el primer bloque (1 byte) es la dirección del esclavo, el segundo (1 byte) es la función que se solicita realizar, el tercero es el dato enviado (0-252 bytes), y el último es el bloque de detección de errores (2 bytes).

Se ha mencionado anteriormente que el protocolo Modbus RTU posee dos clases de pedidos: unitario y global. La figura 2.9 muestra como se realizan estos pedidos en un diagrama de tiempo:

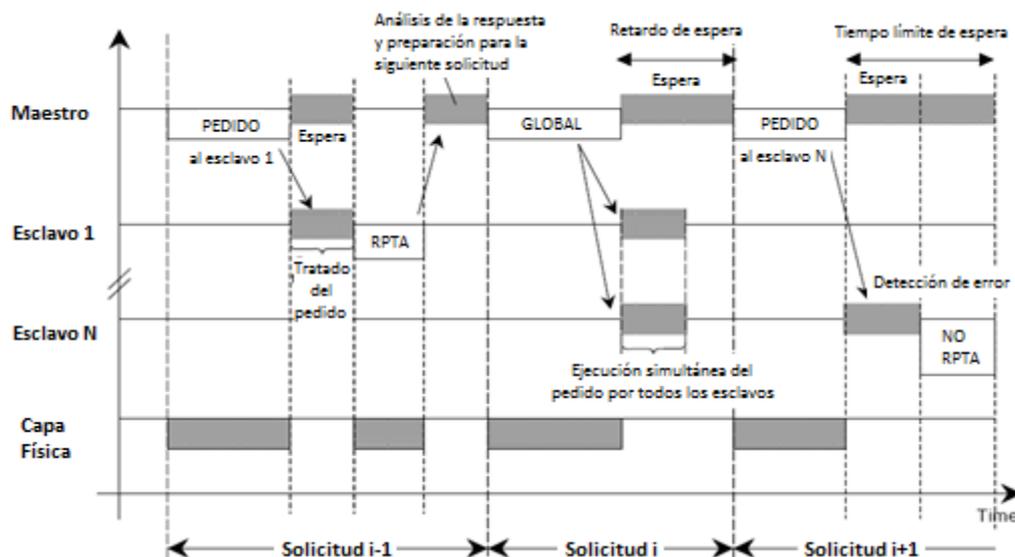


Figura 2.9 Diagrama de Tiempo [20]

En este diagrama se puede apreciar la forma en que este protocolo direcciona los paquetes de datos. En primer lugar se tiene una instrucción simple (Request) que se envía desde el maestro hacia un único esclavo, éste necesita enviar una confirmación una vez cumplida la tarea asignada. Luego se tiene la instrucción global (Broadcast), en la cual el maestro envía un requerimiento para todos los esclavos, esta vez no es necesaria la respuesta por parte de los esclavos,

simplemente bastará que el maestro espere un tiempo, mientras los esclavos ejecutan lo solicitado [20].

B. DMX:

Existen en el mercado diversos protocolos orientados específicamente a la iluminación, siendo el protocolo DMX (Digital Multiplex) el más popular. Este protocolo fue creado inicialmente como un regulador de intensidad de voltaje (dimmer), sin embargo actualmente ha ganado aceptación mundial [13].

Entre sus ventajas se destacan las siguientes:

- La capacidad de manejar hasta 512 equipos (canales).
- Su compatibilidad con la interfaz EIA-485.
- Trama pequeña de aproximadamente 2 bytes
- La independencia a la hora de direccionar, ya que los hace por canales separados.

Sin embargo posee varias limitaciones como [13]:

- Comunicación unidireccional.
- Incapacidad de detectar errores.
- Difícil direccionamiento.
- Sensibilidad al ruido en tramos largos.

## CAPÍTULO 3

### DISEÑO DE UN SUBSISTEMA DE ALIMENTACIÓN Y CONTROL DE LEDS DE POTENCIA

#### **3.1 Hipótesis**

##### **3.1.1 Hipótesis principal**

Dado que la mayoría de sistemas de iluminación en el Perú no poseen una buena eficiencia energética, ni lumínica, ya que utilizan componentes que consumen mucha potencia disipada en calor; entonces, un sistema de iluminación con power LEDs que permita optimizar la eficiencia lumínica y el consumo energético, además que brinde la posibilidad de ser programable, dará como resultado un sistema de iluminación que permitirá el aprovechamiento de los recursos energéticos al máximo, reproducir una gran variedad de colores, y el uso de diferentes funciones de visualización al programarlo.

##### **3.1.2 Hipótesis secundarias**

- a) Un sistema de iluminación con power LEDs que permita la visualización de una amplia gama de colores, altos valores de lúmenes y un consumo bajo de potencia.
- b) Compactas fuentes de alimentación que proveerán de energía al sistema de iluminación, brindando confiabilidad y seguridad en la potencia requerida.
- c) El uso de microcontroladores maestro y esclavos con la finalidad de realizar un adecuado control de los drivers de potencia, permitiendo generar efectos visuales en el sistema de iluminación.
- d) Protocolos de comunicación que permitan realizar una eficiente transferencia de datos entre los microcontroladores maestro y esclavos del sistema.

### 3.2 Objetivos

#### 3.2.1 Objetivo general

Diseñar los subsistemas de alimentación y control de un sistema de iluminación exterior del logo de la PUCP para el edificio McGregor, utilizando la tecnología de LEDs de potencia.

#### 3.2.2 Objetivos específicos

- 1) Diseñar o seleccionar una fuente de alimentación que cumpla con los requerimientos del sistema.
- 2) Diseñar algún protocolo de comunicación que permita conectar los distintos microcontroladores del sistema.
- 3) Diseñar un programa para los microcontroladores maestro y esclavos, que permita brindar efectos de visualización del sistema de iluminación.

### 3.3 Diagrama de bloques del sistema de iluminación

Para tener una mejor visión de lo requerido, es necesario establecer un diagrama de bloques básico que permita solucionar el problema planteado para esta tesis.

#### 3.3.1 Diagrama de bloques del sistema completo

El sistema de iluminación posee dos grandes bloques que dependen uno del otro para su correcto funcionamiento, como se observa en la figura 3.1:

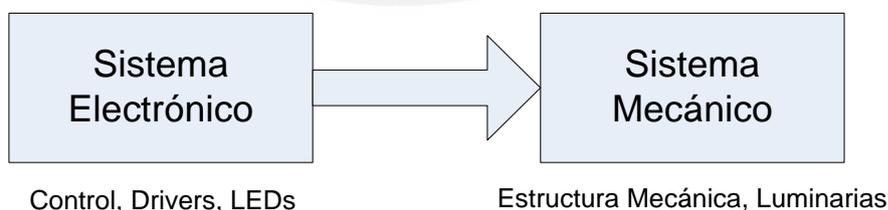


Figura 3.1 Diagrama de Bloques Sistema de Iluminación

Primero, se tiene el sistema electrónico, encargado controlar los LEDs de potencia con la finalidad de generar efectos de iluminación.

Segundo, el sistema mecánico, conformado por la estructura mecánica, luminarias y LEDs. Este sistema determinará la apariencia final del sistema de iluminación, para este caso será la del logo PUCP.

### 3.3.2 Diagrama de bloques del Sistema Electrónico:

En esta tesis, se trabajará sólo la parte electrónica del sistema de iluminación, ya que la parte mecánica ya se ha diseñado en una tesis previa. La figura 3.2 representa el diagrama de bloques detallado del Sistema Electrónico:

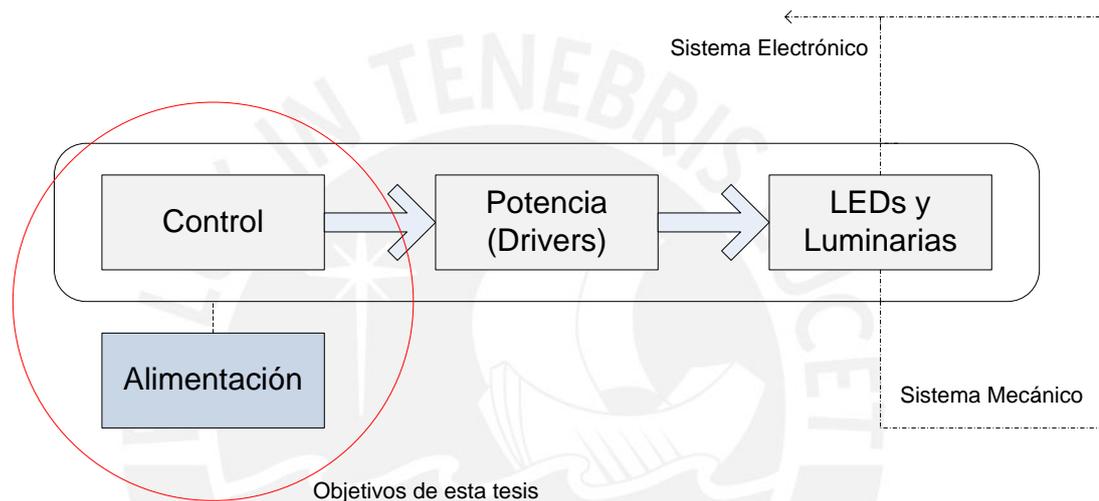


Figura 3.2 Diagrama de bloques Sistema Electrónico

- **Alimentación:** Proveerá de energía a todo el sistema de iluminación a través de una fuente de alimentación que cumpla con los requerimientos de dicho sistema. Está dentro de los alcances de esta tesis.
- **Control:** Etapa encargada de generar órdenes de control hacia los drivers, así como señales PWM, con la finalidad de generar efectos de iluminación. Este control se dará por medio de microcontroladores, que tienen la capacidad de generar las mencionadas señales PWM y comunicarse serialmente con otros microcontroladores. Esta etapa se encuentra también dentro de los alcances de esta tesis.
- **Potencia:** Este bloque contiene los drivers y transistores encargados directamente de energizar a los LEDs de potencia, al suministrarles una corriente variable, regulada por las ondas PWM emitidas por la etapa de control. Esta etapa se diseñó en una tesis previa.

- LEDs y Luminarias: Este último bloque forma parte tanto del sistema electrónico como del mecánico, ya que está compuesto por LEDs que forman parte del sistema electrónico así como las luminarias que vienen a ser parte del sistema mecánico.

### 3.4 Diseño del subsistema de alimentación

El sistema de alimentación proveerá un voltaje DC constante a todo el sistema de iluminación, siendo de esta forma la base de su funcionamiento, brindándole de forma segura y eficiente la potencia que requiere.

#### 3.4.1 Consideraciones generales

- Actualmente se utilizan fuentes lineales o conmutadas para alimentar distintos dispositivos, cada una de estas fuentes presenta tanto ventajas como desventajas según la aplicación en la cual se trabaje.
- El sistema de alimentación debe brindar, principalmente, una buena relación costo/beneficio y una alta eficiencia energética, ya que al manejarse grandes cantidades de LEDs, la disipación en potencia será considerable.
- Otros factores que se deben considerar para el diseño de la fuente serían los siguientes:
  1. Tamaño y peso.
  2. Complejidad.
  3. Velocidad de respuesta.
  4. Emisión de ruido.
- Tomando en cuenta el diseño de la anterior tesis, el sistema de iluminación consta de 718 LEDs OSRAM, 394 de ellos consumen  $0.88W@2.2V$  y los restantes 324 consumen  $1.12W@3.2V$ . Por tanto, al enviar una señal de PWM de 100% duty cycle (peor caso) se disipará una potencia de 709.6W sólo en LEDs, que para este sistema vienen a ser el principal elemento de disipación de potencia [15].
- Finalmente, tenemos el área de control que incluye los microcontroladores, transceivers y reguladores, cuya alimentación deberá estar aislada de la parte de potencia. Esto por protección, ya que corrientes de fuga pueden descargarse directamente en el área de control, provenientes de los circuitos de excitación (potencia). Dichas corrientes podrían alterar el

correcto funcionamiento del área señalada o incluso destruir definitivamente sus componentes.

La figura 3.1 muestra la potencia máxima disipada en los módulos esclavos, como se mencionó previamente, el mayor consumo se concentra en los LEDs. El módulo maestro, al ser un elemento de control al 100% no representa gran consumo energético, pero de todas maneras se está considerando en el cálculo final de potencia de la etapa de control. Acorde con la figura 3.1, la potencia total del sistema sería de 795W, sumadas las etapas de control y potencia. El cálculo detallado del consumo del sistema se encuentra en el Anexo 1.

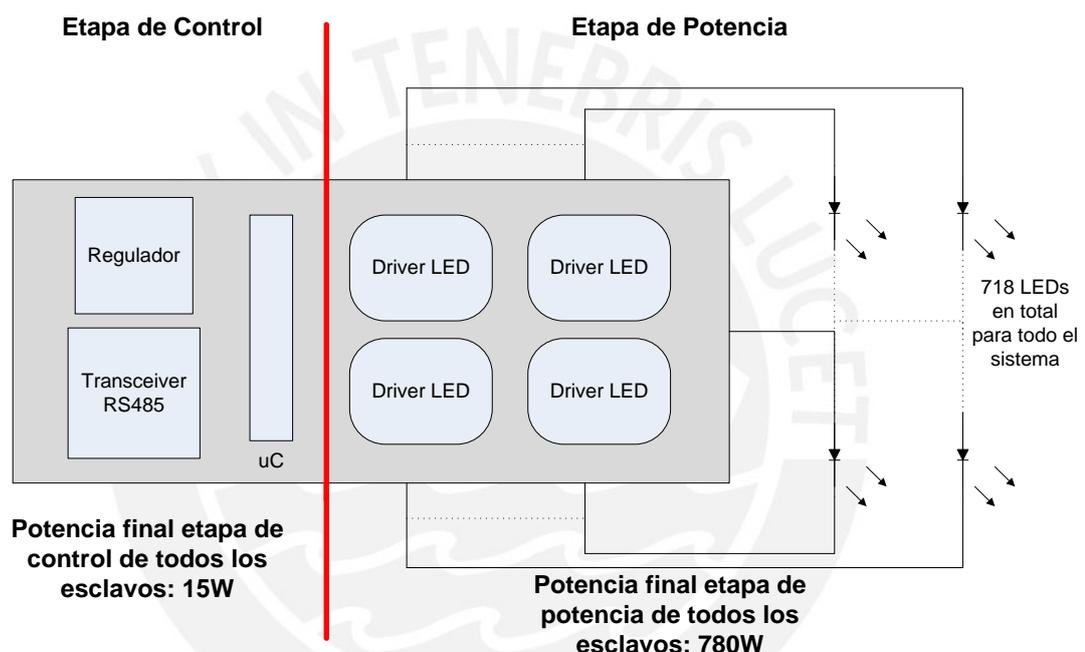


Figura 3.1 Potencia disipada módulos esclavos

### 3.4.2 Requerimientos del subsistema de alimentación

- Potencia mínima: 795W.
- Voltaje de entrada: 220VAC Monofásico. Voltaje de salida: 24VDC.
- Buena relación costo/beneficio.
- Salida invariante ante cambios en la carga.
- Alta eficiencia energética.
- Protección contra corto-circuitos.
- En lo posible, debería ser compacta y no muy pesada.

- Considerar el caso de fuentes modulares (colocadas en paralelo)
- Debería presentar protección ante condiciones ambientales

### 3.4.3 Diseño de la fuente de alimentación

#### A. Diseño Fuente de Alimentación Lineal:

Con los requerimientos que se tienen, se procede a diseñar una fuente lineal de 900W, sobredimensionada para evitar que ésta trabaje a su máxima potencia. Se utilizó un manual de Motorola para el diseño de dicha fuente, en donde se detallan distintas gráficas y ecuaciones que ayudan a determinar el valor de los componentes necesarios. Este manual se encuentra en el Anexo 2.

Para esta fuente se necesitará de un transformador de alta potencia a 60Hz, diodos rectificadores de alta corriente, filtros de entrada en base a capacitores, transistores de potencia y un regulador de voltaje. El circuito esquemático detallado se encuentra en el Anexo 3.

La figura 3.2 muestra un esquema de la fuente diseñada:

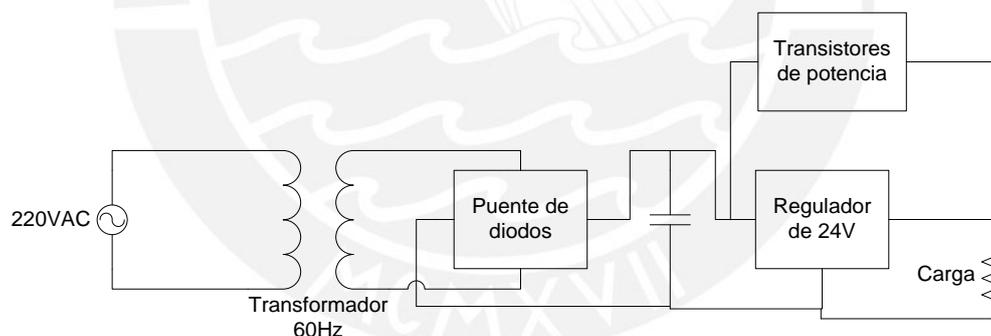


Figura 3.2 Esquema básico de la fuente lineal diseñada

Como se puede observar en la figura 3.2, esta fuente consta de un transformador de entrada encargado de reducir el voltaje de entrada, éste es de un peso y tamaño considerable al ser una fuente de alta potencia. Luego se tienen diodos de alta corriente (100A) que rectifican la señal. La siguiente etapa es de filtrado a cargo de un condensador de aproximadamente 42000uF. Finalmente se tiene un regulador que fija el voltaje de salida, cuya corriente es suministrada a través de los transistores de potencia. El cálculo de los componentes se detalla en el Anexo 4.

Esta fuente es relativamente sencilla de implementar, posee una rápida respuesta y no genera ruido en la línea. En el mercado peruano se pueden conseguir los transistores de potencia, el regulador y el transformador; sin embargo tanto los condensadores como los diodos deben ser importados, ya que en nuestro mercado sólo se encuentran estos productos de segunda mano.

La tabla 3.1 detalla los componentes básicos de la fuente y su costo:

Tabla 3.1 Costo fuente lineal [21]

Cantidad	Componente	Características	Precio Unitario (S/.)	Precio Total (S/.)
1	Transformador	$V_p=220V$ , $V_s=30V$ , $I_s=53A$	300	300
3	Condensador	$C=15000\mu F$ , 50V	80	240
2	Diodo rectificador	$I_f=100A$	60	120
6	Transistor	PNP, $I_c=15A$	3	18
1	Regulador	$V_o=24V$	1.2	1.2
6	Resistencia	$R=0.1\Omega$ , 10W	1	6
1	Resistencia	$R=100\Omega$ , 0.5W	0.2	0.2
2	Fusibles	$I=1A$ , $I=30A$	0.2	0.4
1	Circuito Impreso		50	50
1	Cable eléctrico 10AWG y 7AWG	$I=15A$ y $I=30A$	3-5xm	20
1	Caja metálica	40x30x30cm	100	100
1	Mano de obra		600	600
<b>TOTAL</b>				<b>1455.8</b>

*Elaboración propia*

#### B. Selección Fuentes Comerciales:

Para esta tesis no se ha considerado el diseño de una fuente conmutada por las siguientes razones:

- Por la complejidad en el diseño de estas fuentes, y por la dificultad en conseguir los componentes, ya que la mayoría sería para importar lo que la hace también costosa para implementar.

- Por la alta potencia de la fuente, haciendo aún más complejo su diseño, esto debido a la necesidad de usar arreglos de transformadores (de alta frecuencia) para manejar la alta corriente de salida.
- Por el ruido que generan las fuentes conmutadas, al realizar el “switching” (Conmutación de transistores de potencia) se introduce ruido en la red, por lo que es necesario un diseño de filtros para controlar dichos ruidos.

En la industria, las fuentes conmutadas son muy populares por su alta eficiencia, su compacto tamaño y su funcionamiento en paralelo. Las potencias más populares en el mercado oscilan entre 100 y 1000W, entre fuentes monofásicas y trifásicas. Entre las marcas más conocidas en el mercado figuran Allen-Bradley, Siemens, ABB, etc. [22, 23, 24].

Para la selección de la fuente más adecuada para el sistema de alimentación se muestra la tabla 3.2, donde se comparan fuentes Allen Bradley y Siemens [22, 23]:

Tabla 3.2 Comparación Fuentes Siemens y Allen-Bradley

Fuente	Siemens	Allen-Bradley
<b>Cantidad</b>	2	2
<b>Potencia total</b>	960W – modular (480W c/u)	960W – modular (480W c/u)
<b>Eficiencia</b>	89%	91%
<b>Conexión paralelo</b>	Sí	Sí
<b>Peso</b>	2.2Kg c/u	1.8Kg c/u
<b>Volumen</b>	No especifica	220mmx124mmx102mm
<b>Ruido</b>	Controlado a un nivel bajo	Controlado a un nivel bajo
<b>Estándares Internacionales</b>	VDE, EN	CE, UL, CUS
<b>Costo Unitario (\$)</b>	550	581.4

*Elaboración propia*

Luego de la comparación se opta por utilizar las fuentes Allen-Bradley debido a su mayor eficiencia y menor peso. Además cabe resaltar que esta marca posee un distribuidor autorizado en nuestro país por lo que la adquisición del producto no será problema.

Las fuentes Allen-Bradley son ideales para trabajo en paralelo, lo que permite usar 2 o más fuentes para llegar a suministrar la potencia deseada. Cabe decir que estas fuentes están diseñadas para distribuir la potencia de forma equitativa entre cada una de ellas [22, 25].

Las fuentes conmutadas Allen-Bradley tienen las siguientes características [25]:

- Cuenta con certificados internacionales para su uso industrial.
- Voltaje de entrada: 220VAC, Voltaje de salida: 24VDC
- Eficiencia: 91%
- Ideales para uso en paralelo
- Tamaño compacto: 220mm x 124mm x 102mm (Fuente de 480W).
- 1800g de peso (Fuente de 480W)
- Buena supresión de ruido.
- Fácil acceso a los terminales de salida
- Largo ciclo de vida, al usar componentes que soportan temperaturas hasta de 105°C.



Figura 3.3. Fuente de Alimentación Conmutada de 480W [25]

Las potencias que ofrece esta marca son las siguientes: 120W, 240W, 480W, 720W y 960W. Lo más conveniente en este caso sería adquirir 2 fuentes de 480W, ya que adquirir varias fuentes de 120W o 240W resulta extremadamente caro. Por otro lado, quedan descartadas las fuentes de 720W y 960W al ser trifásicas [22].

Entonces, al utilizar las dos fuentes mencionadas tendríamos un sistema de alimentación modular, el cual distribuirá la potencia consumida entre ambas fuentes

y además, en caso de falla, brindará la posibilidad de reemplazar individualmente la fuente defectuosa, lo que significará un ahorro considerable a futuro.

La tabla 3.3 muestra los precios de cada una de las fuentes mencionadas:

Tabla 3.3 Costo Fuentes Comerciales [22]

Modelo	Marca	Potencia (W) Salida (V)	Precio (\$)
1606-XL120D	Allen-Bradley	120W, 24VDC	294.1
1606-XL240E	Allen-Bradley	240W, 24VDC	428.4
1606-XL480E	Allen-Bradley	480W, 24VDC	581.4

*Elaboración propia*

Al comparar precios, la mejor opción sería elegir 2 fuentes de 480W, lo que nos permitiría llegar a un máximo de 960W, potencia que cubre los requerimientos planteados.

C. Comparación entre fuente lineal diseñada y fuente conmutada comercial:

A continuación se presenta la tabla 3.4, que compara las características principales de ambas fuentes:

Tabla 3.4 Comparación Fuentes

	Fuente Lineal	Fuente Conmutada
<b>Cantidad</b>	1	2
<b>Potencia</b>	900W	960W – modular (480W c/u)
<b>Eficiencia</b>	40% (máx)	91%
<b>Peso</b>	20Kg	3.6Kg
<b>Volumen</b>	400mmx150mmx150mm	220mmx124mmx102mm
<b>Ruido</b>	No	Controlado a un nivel bajo
<b>Estándares Internacionales</b>	No	CE, UL, CUS
<b>Costo Total (S/.)</b>	1455.8	3255.8

*Elaboración propia*

Al comparar ambas fuentes dentro de sus principales características, se puede concluir que para esta tesis una fuente conmutada con las características descritas se adecúa mejor a los requerimientos planteados, porque es eficiente, compacta y, a pesar de ser más cara, este sobrepeso se recuperará al ahorrar energía debido a su alta eficiencia.

### **3.5 Diseño del Subsistema de Control y Comunicación**

El subsistema de comunicación permitirá la transferencia de datos y/o comandos entre un módulo maestro y módulos esclavos con la finalidad de realizar un control sobre el sistema de iluminación. Como se ha mencionado esta tesis se centrará en el diseño del protocolo de comunicación, ya que la interfaz ya se diseñó en una tesis previa [15].

#### **3.5.1 Condiciones generales**

- Para el control de iluminación, existen protocolos que controlan lámparas de forma eficiente y dan facilidad para la creación de efectos visuales. Para esta tesis, se diseñará un protocolo propio, sin embargo se tomarán en cuenta protocolos ya diseñados.
- Se tiene diseñada una interfaz de comunicación RS-485, debido a su inmunidad al ruido en largos cableados y a su compatibilidad con protocolos maestro-esclavo, necesarios para el sistema de iluminación planteado.

#### **3.5.2 Requerimientos del Protocolo de Comunicación**

- Debe permitir la comunicación maestro-esclavo.
- Capacidad de direccionamiento unitario, es decir enviar alguna trama de datos procesada sólo por un microcontrolador esclavo, e ignorada por los demás.
- Capacidad de direccionamiento global, es decir enviar alguna trama de datos que sea procesada por todos los microcontroladores esclavos a la vez.
- Capacidad de verificación de errores de transmisión.

### 3.5.3 Diseño del Protocolo de Comunicación

Entre los protocolos descritos en el capítulo 2, se descarta el protocolo DMX, debido a su sensibilidad al ruido para tramos largos, su direccionamiento unitario que no permite ningún tipo de detección de errores de transmisión y la escasa información para el diseño e implementación de este protocolo.

Modbus RTU es una mejor opción a tomar en cuenta, éste es un protocolo serial maestro-esclavo, compatible con la interfaz RS-485 planteada y permite direccionar de forma global y unitaria a cada uno de los esclavos. Sin embargo, la implementación total de Modbus RTU para esta tesis sería un tanto insulsa, ya que se desperdiciarían recursos y tiempo de los microcontroladores por las siguientes razones [20]:

- Longitud de la trama de datos: Mínima de 5 bytes, puede llegar a 256 bytes de requerirse. Esto sería muy útil en una industria donde se tienen numerosos sensores que actualizan sus valores a cada momento. Sin embargo, para el sistema de iluminación una trama más pequeña sería suficiente y permitiría aprovechar mejor los recursos del microcontrolador.
- Respuesta por parte de esclavos: Acorde con el protocolo Modbus, cada esclavo deberá responder una vez finalizado el requerimiento solicitado. Esto funciona muy bien en el plano industrial, ya que los requerimientos normalmente son para activar/desactivar los puertos de salida digitales (inmediato) o para solicitar valores de sensores (inmediato). No obstante, para el sistema de iluminación planteado, esperar que el esclavo finalice con el requerimiento sería absurdo, ya que éstos demorarán varios segundos en reproducir los efectos.
- Trama de respuesta: En Modbus, la trama de respuesta es tan compleja como el requerimiento mismo, ya que en la respuesta se debe brindar la información requerida por el maestro. Para el sistema de iluminación, una trama de confirmación sería suficiente, ya que los esclavos no procesan datos, ni sensan valores que puedan ser requeridos por el maestro, es más este no va a requerir ningún tipo de mensaje, salvo uno de confirmación para saber que el sistema está funcionando correctamente.

Teniendo en cuenta lo descrito y a su vez teniendo como base al protocolo Modbus RTU, se procederá a definir un protocolo propietario acorde a los requerimientos del sistema:

A. Descripción del Protocolo:

Este protocolo es del tipo serial, es decir la trama de datos es enviada una tras otra, y es compatible con la interfaz RS-485. Está orientado para un control maestro-esclavo en base a microcontroladores. Posee únicamente un control maestro, y puede aceptar desde 1 hasta varios esclavos (255 como máximo). Para este caso, se diseñó un protocolo para 20 esclavos, acorde con los requerimientos.

La comunicación es siempre iniciada por el microcontrolador maestro, los esclavos nunca se comunicarán entre ellos, y sólo enviarán datos de confirmación al maestro cuando éste lo solicite. La transmisión de datos se dará ordenadamente, y nunca se enviarán datos al mismo tiempo desde distintos microcontroladores, esto porque se cuenta solo con un bus de datos, y enviar datos al mismo tiempo causaría conflictos.

B. Direccionamiento:

Los requerimientos que hace el maestro pueden ser de dos tipos:

- Modo Unitario: El maestro direcciona a un solo esclavo, éste inmediatamente responde y procesa lo solicitado, por tanto en este modo se transmiten dos mensajes. Para su correcto funcionamiento, cada esclavo debe tener una única dirección. En caso de haber un error, el esclavo no emitirá señal de respuesta, y el maestro, al no recibir la confirmación esperará un tiempo, luego notificará el error, y pasará a procesa el siguiente requerimiento.
- Modo Global: El maestro direcciona un requerimiento que es procesado por todos los esclavos. En este caso, no hay respuesta por parte de los esclavos. Para este modo se configura una dirección que es aceptada e identificada como global por todos los esclavos.

La figura 3.4 muestra un diagrama de tiempo que representa los modos de direccionamiento descritos previamente

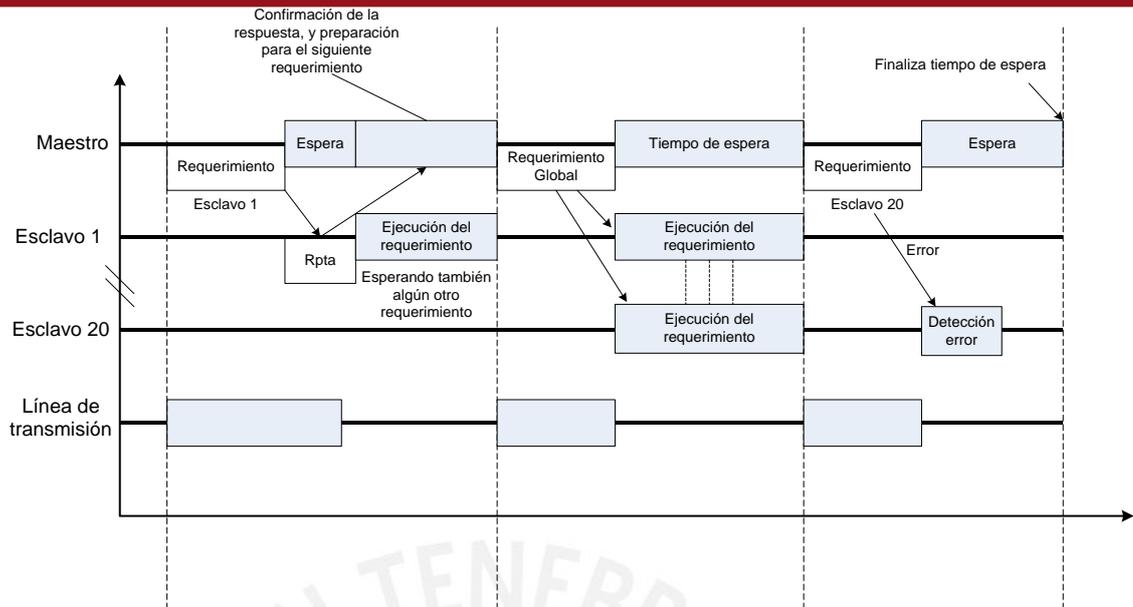


Figura 3.4 Diagrama de tiempo Maestro-Esclavo

C. Trama de datos:

La trama de datos es de 4 bytes, el primer byte es un encabezado que da inicio a la transmisión. El segundo contiene la dirección de los microcontroladores esclavos, con la finalidad de que el maestro pueda direccionar correctamente los requerimientos. El tercero contiene el dato o función que se desea poner en marcha, para el sistema de iluminación este byte contiene el efecto que se desea plasmar. El cuarto y último byte viene a ser un detector de errores, y funciona de la siguiente forma: El maestro envía un requerimiento y en el último byte se guarda el resultado de pasar la compuerta lógica XOR por los tres primeros bytes; luego, al recibir la trama, el esclavo hará lo mismo con sus 3 primeros bytes, y finalmente comparará el valor obtenido con el valor que llegó en la trama y si es que son iguales la transmisión se dio correctamente. La figura 3.5 muestra la distribución de la trama diseñada para el protocolo de comunicación:



Figura 3.5 Trama de datos

D. Diagrama de conexión básica:

Para el correcto funcionamiento del protocolo especificado, es necesario realizar las siguientes conexiones entre el maestro y los esclavos. El siguiente diagrama, mostrado en la figura 3.6, es compatible con la interfaz RS-485, y se usa típicamente con Modbus, es llamado también conexión Modbus de dos puntos, donde sólo un microcontrolador puede transmitir a la vez.

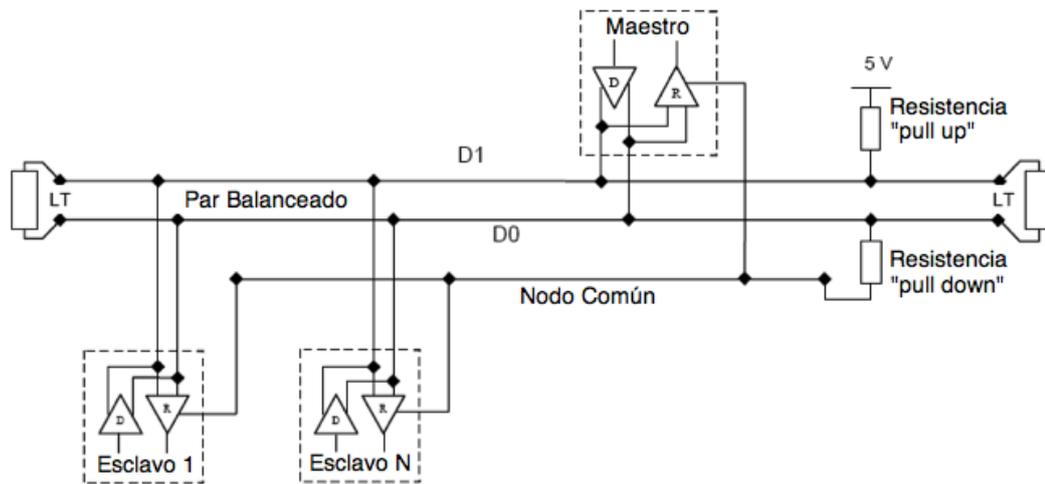


Figura 3.6 Topología Modbus dos puntos [20]

Esta topología cuenta con resistencia terminadoras (LT), normalmente de 120ohms. Estrictamente se utilizan cuando el cableado es muy largo, y deben tener el mismo valor de la resistencia total del cableado. Esta topología ya se mencionó en la tesis previa, sin embargo, no se consideraron las resistencias pull-up y pull-down que son muy necesarias para mantener las señales a un nivel lógico cuando no se transmite. Estas resistencias son de alto valor, normalmente de 10Kohms [20].

Existe también la conexión Modbus de cuatro puntos, donde se tienen dos puntos para la transmisión y 2 para la recepción. Sin embargo, para el sistema planteado en esta tesis bastará con la topología de dos puntos [20].

**Selección de microcontroladores:**

Teniendo diseñado el protocolo de comunicación, se debe seleccionar los microcontroladores maestro y esclavos que permitan controlar de una forma óptima el sistema de iluminación.

Los requerimientos básicos para un microcontrolador esclavo son los siguientes:

- 4 puertos PWM para variar la intensidad de luz de los LEDs de potencia a través de los drivers.
- Pines de transmisión serial y/o USART para la comunicación con el maestro.
- Capacidad de memoria de programa de 1Kbyte del tipo flash. Esto ha sido determinado por medio de los programas realizados para los esclavos.
- Velocidad mínima de 1Mhz con la finalidad de aprovechar al máximo la velocidad que se tiene en la interfaz RS-485

Dados los requerimientos, se tienen distintas opciones, entre las que destacan los PIC de la marca Microchip y los Atmega de la marca Atmel. La tabla 3.5 muestra una comparación entre ambas marcas:

Tabla 3.5 Opciones en Microcontroladores [21, 26, 29]

Marca	Modelo	Velocidad	Puertos PWM	Transmisión serial	Memoria de programa	Precio (USD)
ATMEL	Atmega48	1-20Mhz	6	1 USART	4KB	2.73
Microchip	PIC16F873	1-32Mhz	4	1 USART	7KB	5.73

*Elaboración propia*

Debido al precio y la experiencia que se tiene trabajando con los microcontroladores Atmel, se opta por elegir el Atmega48. Por tanto se descarta también el uso de PICs para el módulo maestro por las razones ya expuestas.

Por otro lado, los requerimientos básicos para el microcontrolador maestro son los siguientes:

- Puerto de transmisión serial y/o USART para transmitir los requerimientos hacia los esclavos.
- No requiere puertos PWM, debido a que no cuenta con LEDs al ser el maestro.
- Capacidad de memoria de programa de 1Kbyte. Esto se ha calculado según los programas realizados.

- Velocidad mínima de 1 Mhz con la finalidad de estar sincronizado con los esclavos que poseen ésta como velocidad mínima también.

Dados los requerimientos, se escoge el microcontrolador Atmega8 debido también a la experiencia que se tiene trabajando con éste, su bajo costo y su disponibilidad en el mercado peruano. Las características de dicho microcontrolador se pueden apreciar en la tabla 3.6. Como se observa, este microcontrolador cumple con los requisitos planteados previamente. Por otro lado, si más adelante se deseara implementar una interfaz por medio de una computadora, el maestro necesitaría 2 módulos USART, uno para comunicarse con los esclavos y otro para hacerlo con la computadora. El microcontrolador Atmega164 sería el elegido, ya que posee 2 módulos USART.

Tabla 3.6 Características Microcontrolador Atmel [21, 27]

Marca	Modelo	Velocidad	Puertos PWM	Transmisión serial	Memoria	Precio (USD)
ATMEL	Atmega8	1-16Mhz	3	1 USART	1KB	2.00

*Elaboración propia*

Como se ha mencionado estos microcontroladores poseen transmisión serial, sin embargo no están aptos para transmitir datos usando una interfaz RS-485, es por ello que es necesario usar un transceptor que se encarga de transformar la señal de transmisión emitida por el microcontrolador en una señal apta para la interfaz RS-485. Estos transceivers funcionan tanto para transmisión como para recepción de datos. El transceptor MAX485 sería ideal para este trabajo y sus características se detallan en la tabla 3.7. El diagrama de conexiones de los módulos de prueba maestro-esclavo (que incluyen los transceptores MAX485 se encuentran en el Anexo5).

Tabla 3.7 Características Transceptor RS-485 [21, 28]

Marca	Modelo	Tipo	Velocidad	Alimentación	Precio (Soles)
MAXIM	Max-485	Transceiver Half Duplex	2.5Mbps	4.75-5.25V	6

*Elaboración propia*

## CAPÍTULO 4

### PRESENTACIÓN DE SIMULACIONES

#### 4.1 Introducción

Para probar el protocolo de comunicación diseñado en el capítulo previo, se han creado dos programas utilizando el software VMLAB, uno para el microcontrolador maestro y otro para el esclavo. Las simulaciones que se presentarán más adelante se han puesto a prueba mediante software, utilizando VMLAB, y mediante la implementación de un circuito que permite la comunicación y control entre tres microcontroladores Atmega8, de la marca Atmel.

Dicho circuito está conformado por un módulo maestro (microcontrolador 1) conectado por medio de una interfaz RS-485 a dos módulos esclavos (microcontrolador 2 y 3). Cabe decir que estos módulos sólo poseen la parte de control, es decir no cuentan con los drivers, ni LEDs de potencia.

#### 4.2 Descripción del programa

El programa desarrollado permite comunicar 2 microcontroladores: un maestro y un esclavo. Como se mencionó se utiliza VMLAB para las simulaciones, principalmente porque cuenta con el modo multiprocesamiento que permite comunicar dos microcontroladores. El diagrama de flujo de dicho programa, así como el código en Assembler se encuentra en los Anexos 6, 7 y 8.

Este programa está basado en el protocolo de comunicación desarrollado en el capítulo 3, y permite que el microcontrolador maestro ejerza un control sobre los microcontroladores esclavos para generar efectos de iluminación.

Se ha diseñado dos efectos de iluminación, controlados por el maestro:

- Efecto global: El maestro direcciona a todos los esclavos del sistema simultáneamente para que incrementen y reduzcan gradualmente la intensidad de luz de los LEDs por medio de ondas PWM, este ciclo es repetitivo y oscila entre 0 y el 85% del ciclo de trabajo de la onda PWM.
- Efecto direccionado: El maestro direcciona de forma individual a cada esclavo que incrementan las ondas PWM para aumentar lentamente la

intensidad de luz de los LEDs. Este efecto empieza con el primer esclavo, y con retardos de un segundo, continua con el segundo, y así sucesivamente hasta llegar al vigésimo y último esclavo. El efecto final permite visualizar un sistema de iluminación que se enciende por partes de forma gradual.

El objetivo de este programa es el siguiente:

- Demostrar que un microcontrolador maestro puede controlar al sistema de iluminación, direccionando de forma global o independiente a cada uno de los esclavos del sistema con la finalidad de generar distintos efectos de iluminación.

### 4.3 Descripción del circuito

El circuito implementado representa la etapa de control de un módulo maestro y dos esclavos. Se compone básicamente de 3 microcontroladores Atmega8, 3 transceptores MAX485 y un regulador de voltaje de 5V. El diagrama de conexiones detallado se encuentra en el Anexo5.

La figura 4.1 muestra el diagrama de bloques del circuito implementado, así como una imagen del mismo:

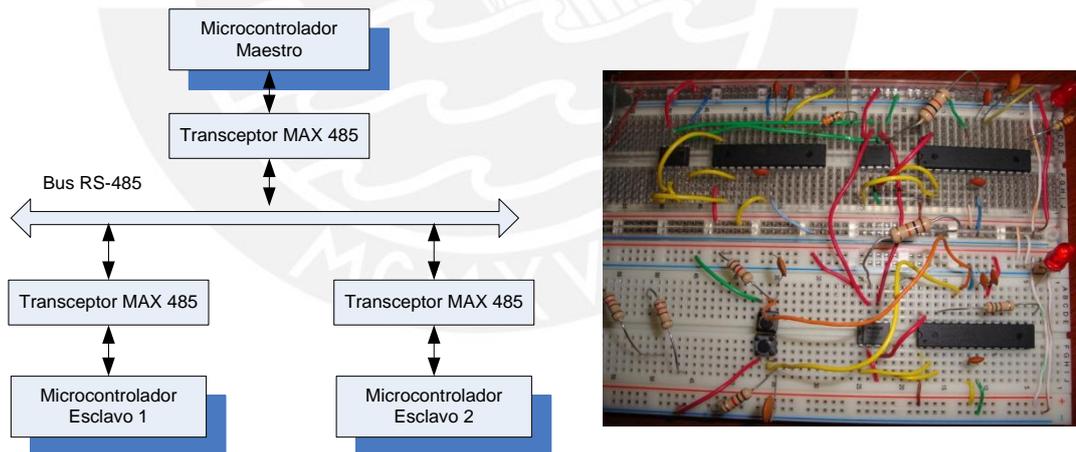


Figura 4.1 Diagrama de bloques del circuito implementado (Izq.), Circuito Implementado (Der.)

Los objetivos de este circuito son:

- Demostrar el correcto funcionamiento de una interfaz RS-485 por medio de los integrados MAX-485 para el sistema de iluminación.
- Verificar que los esclavos obedecen al control, generando ondas PWM.

#### 4.4 Resultados de simulación por software

En base al programa escrito, se pudieron hacer simulaciones en VMLAB, el cual simula la comunicación de dos microcontroladores via serial, utilizando el USART (Transmisor y receptor serial universal síncrono y asíncrono) de ambos Atmega8s.

Para comprobar el correcto funcionamiento del protocolo de comunicación, es necesaria comprobar las 2 características más importantes del mismo: la correcta lectura de la trama de datos y la capacidad de direccionamiento del protocolo.

- a) **Correcto envío y lectura de la trama de datos:** Se comprobó que la trama de datos de 4 bytes enviada es correctamente y a la vez, procesada por los receptores. En la siguiente figura se puede apreciar la trama enviada (PD1) por el primer microcontrolador y la trama recibida (PD0) por el segundo. También se puede apreciar que la señal PC5 cambia a “1” lógico, esta señal es la que habilita la transmisión, ya que los microcontroladores normalmente están en estado de recepción.

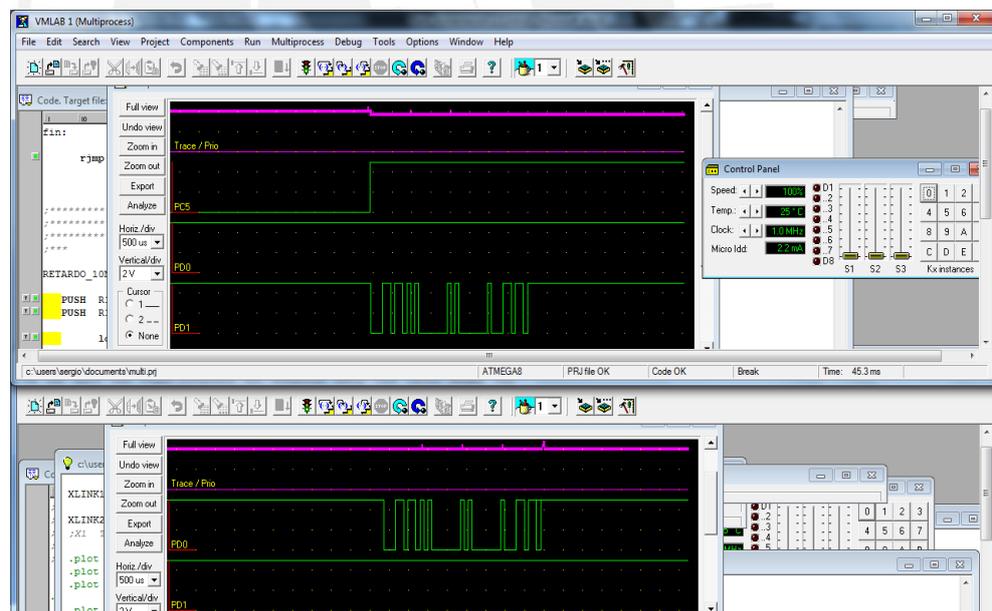


Figura 4.2 Simulaciones de transmisión y recepción de datos

- b) **Correcto direccionamiento:** Cada microcontrolador del sistema tiene una única dirección, por tanto se puede direccionar órdenes de forma unitaria a cada uno de los microcontroladores. Dado que el software sólo admite 2 microcontroladores, se cambia la dirección de el receptor (esclavo) y se comprueba que éste ya no procese la trama de datos, ya

que el mensaje es para su dirección previa, y no para la que tiene actualmente.

En la siguientes figuras se puede apreciar un microcontrolador con dirección 5 y otro con dirección 1. Se envía una trama para la dirección 1, se puede apreciar que el esclavo con dirección 5 no responde, mientras que el esclavo 1 procesa la trama y empieza a modificar la PWM con la finalidad de generar algún efecto.

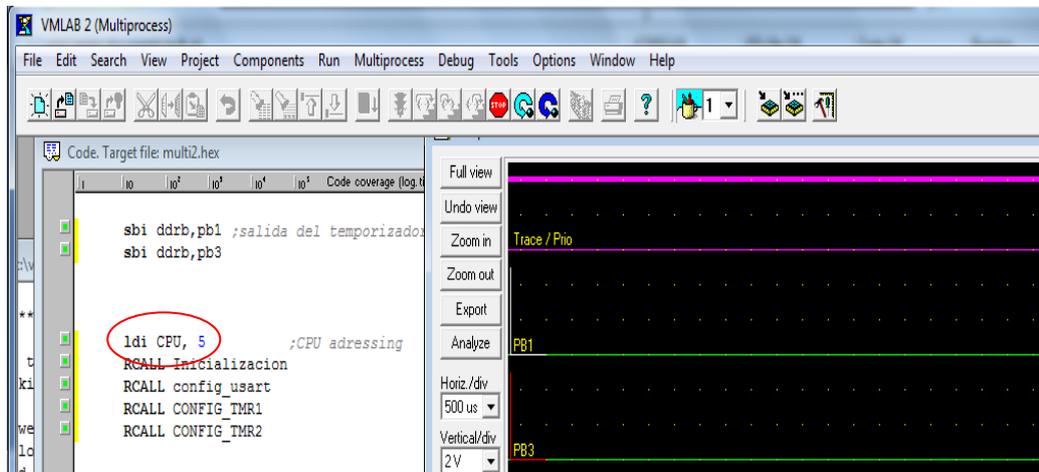


Figura 4.3 Microcontrolador esclavo 5 (sin respuesta)

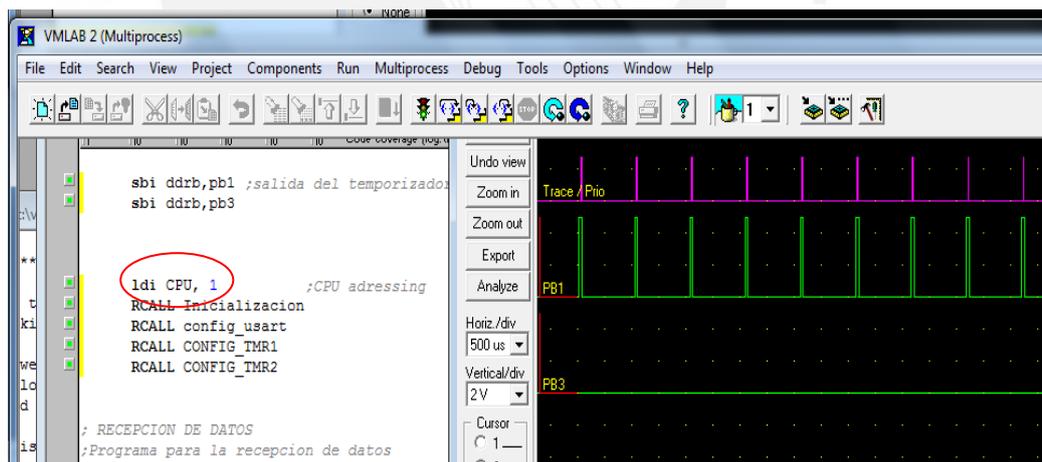


Figura 4.4 Microcontrolador esclavo 1 (Genera una onda PWM que se va incrementando)

- c) **Demostración de un efecto:** Para este caso se ha optado por demostrar un efecto global, el cual incrementa y decremente gradualmente el duty cycle (aprox. 5% por segundo) de una señal PWM de 500Hz con la finalidad de variar la intensidad de luz emitida por todos los LEDs generando un efecto que llama mucho la atención.

Para este caso, los 20 esclavos procesarán de la misma forma la trama enviada por el maestro, a continuación se muestran algunas gráficas con los resultados de estas simulaciones:

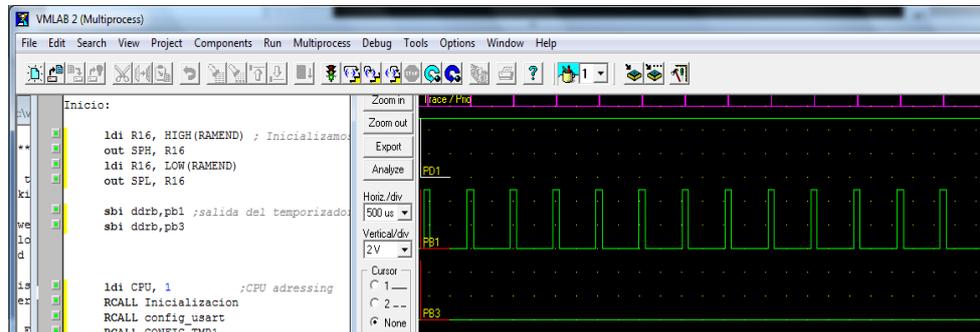


Figura 4.5 Señal PWM de 15% de ciclo de trabajo

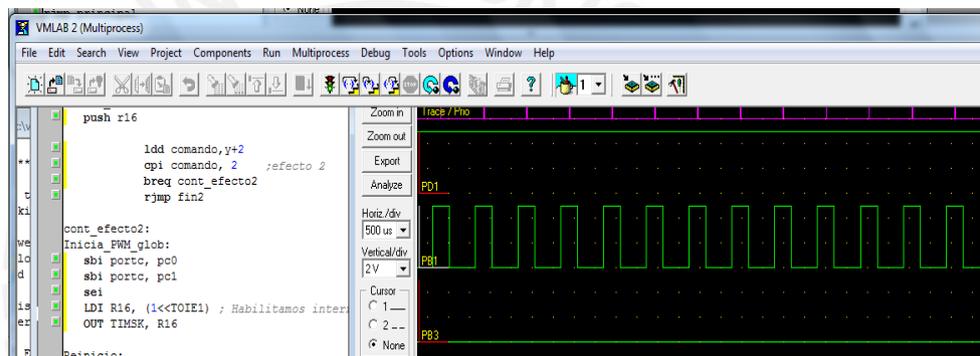


Figura 4.6 Señal PWM de 40% de ciclo de trabajo

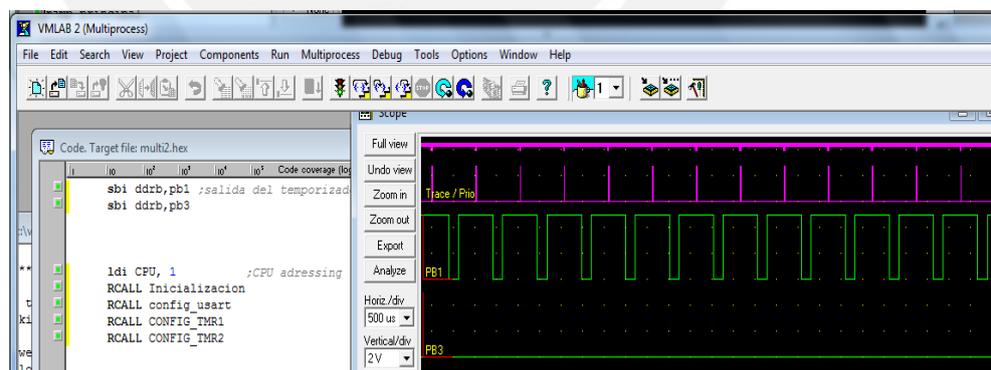


Figura 4.7 Señal PWM de 85% de ciclo de trabajo

#### 4.5 Resultados del circuito implementado

El circuito implementado permite comprobar lo realizado en las simulaciones, además es necesario para hacer pruebas con la interfaz de comunicación RS-485, ya que el software no la puede simular.

A continuación se detallarán las pruebas realizadas, pero primero es necesario mencionar que éstas se dieron utilizando un cableado de 10m entre módulos, con lo que se comprueba que la interfaz RS-485 funciona muy bien para largos cableados necesarios para el sistema de iluminación planteado.

#### Demostración de los efectos:

Para este caso se pone a prueba el efecto direccionado mencionado previamente, a continuación se muestran las ondas PWM generadas (figuras 4.8 y 4.9), éstas van incrementando su ciclo de trabajo en 5% por segundo:

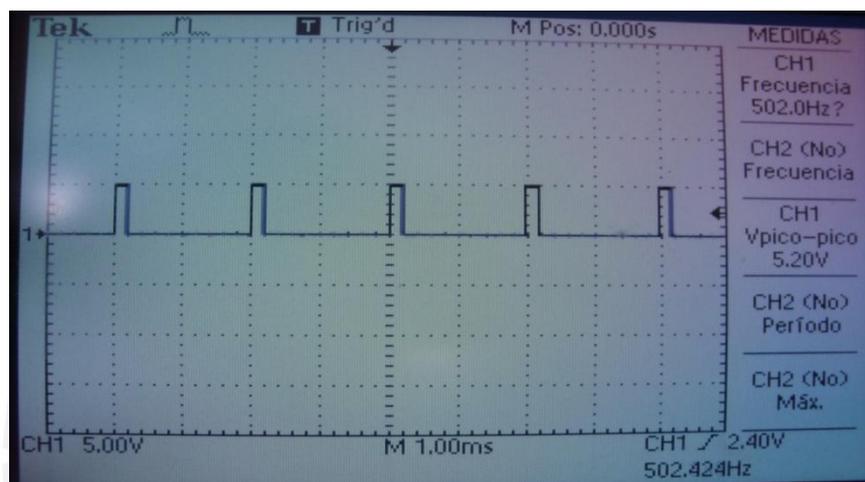


Figura 4.8 Señal PWM de 10% de ciclo de trabajo

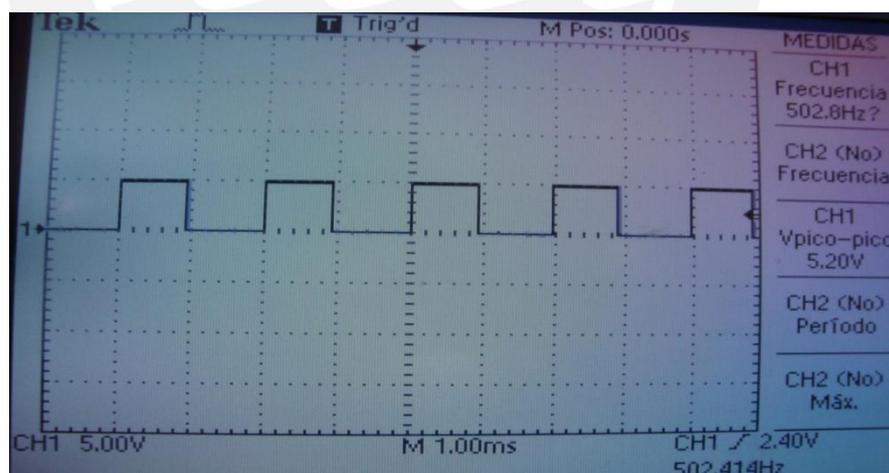


Figura 4.9 Señal PWM de 45% de ciclo de trabajo

Este efecto direccionado es comandado por el maestro que va direccionando a cada esclavo (del 1 al 20) con intervalos de 1 segundo, es decir comienza a incrementar la intensidad de luz del primer módulo, un segundo después hace lo mismo con el segundo y así sucesivamente. Finalmente la intensidad de luz se queda en un 90%, esto con la finalidad de no exigir demasiado al sistema de alimentación, como se puede apreciar en la figura 4.10:

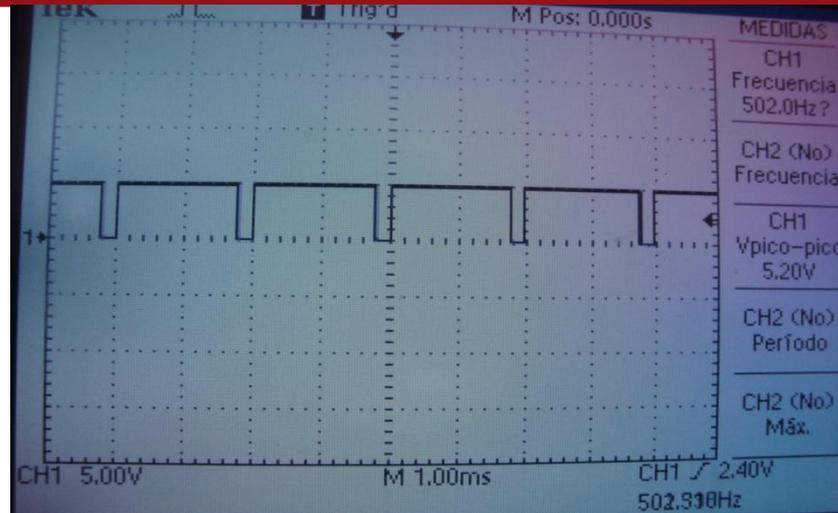


Figura 4.10 Señal PWM de 90% de ciclo de trabajo

Las figuras 4.11, 4.12 y 4.13 representan este efecto el cual incrementa la señal PWM del primer microcontrolador, luego de un tiempo se pasa al siguiente. Para visualizar el incremento de la intensidad de luz se utilizaron LEDs en los puertos PWM de los microcontroladores esclavos.

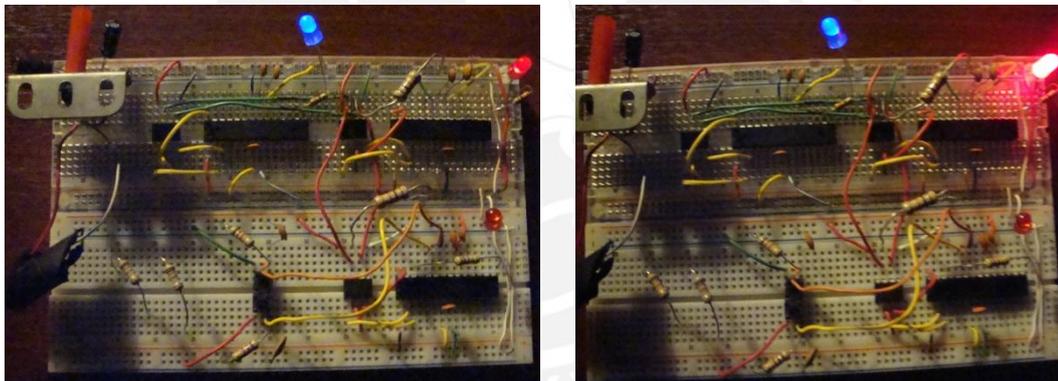


Figura 4.11 Secuencia de encendido parte 1

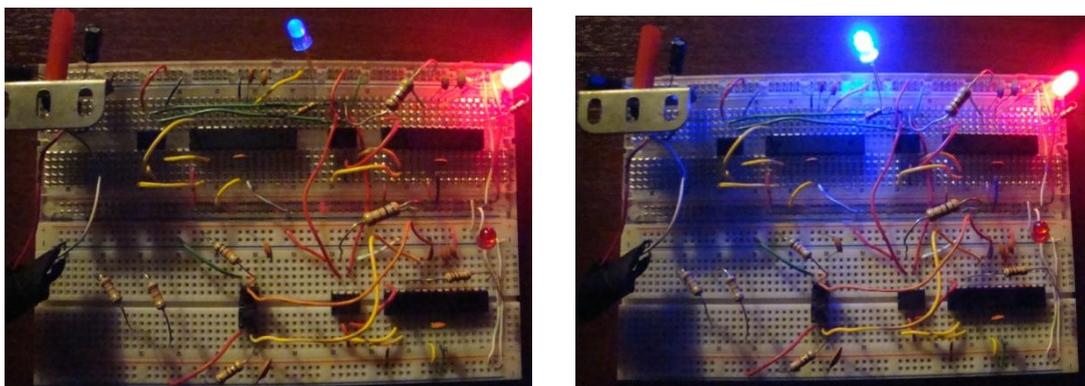


Figura 4.12 Secuencia de encendido parte 2

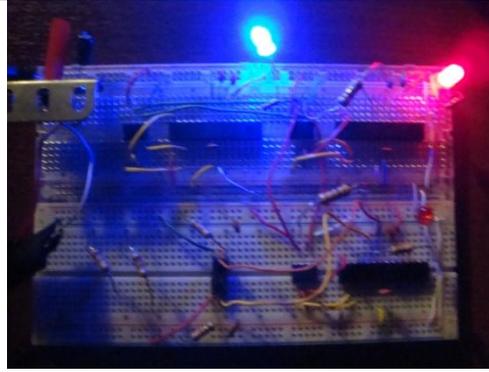


Figura 4.13 Secuencia de encendido parte 3

Finalmente se muestra un segundo efecto (figuras 4.14 y 4.15), llamado efecto global, el cual incrementa y decrementa la señal PWM de todos los esclavos, teniendo como resultado que todos los LEDs del sistema aumenten y disminuyan su intensidad luminosa de una forma repetitiva (oscilando entre 0 y 85% de su ciclo de trabajo).

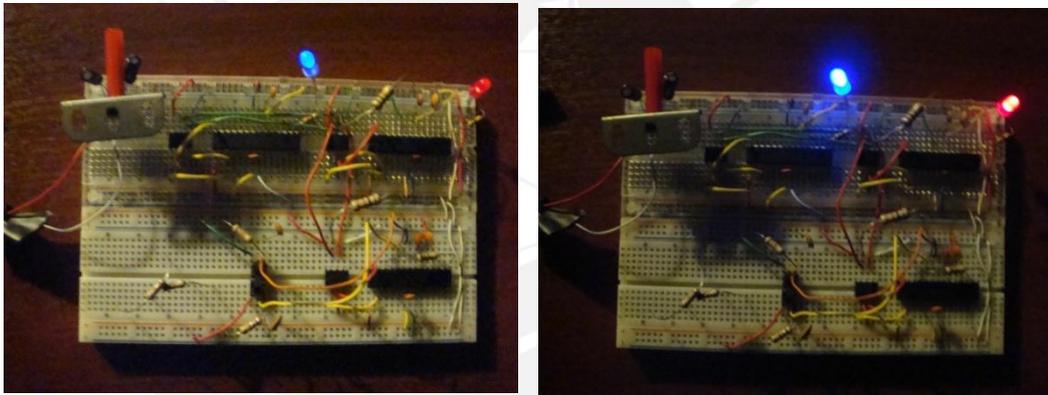


Figura 4.14 Secuencia de encendido parte 1 y 2

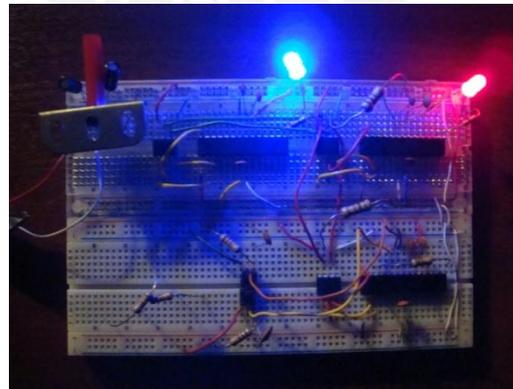


Figura 4.15 Secuencia de encendido parte 3

## CONCLUSIONES

- Con respecto a la alimentación del sistema, y de acuerdo a los cálculos de potencia consumida realizados en esta tesis y la tesis previa, queda demostrada la validez técnica de la fuente de alimentación seleccionada. La fuente conmutada Allen-Bradley de 960W (dos de 480W colocadas en paralelo) podrá mantener energizado todo el sistema sin ningún problema y a una alta eficiencia, incluso en las situaciones más críticas (Pág. 29,30).
- Con respecto al protocolo de comunicación diseñado, quedó demostrado su correcto funcionamiento para el sistema de iluminación que cuenta con una interfaz RS-485 maestro-esclavo. Esto se dio mediante el uso de software y con la implementación de un módulo maestro y dos esclavos (Pág. 39,40,41,42,43).
- Queda demostrado que un sistema de control en base a microcontroladores es idóneo para este sistema de iluminación con LEDs de potencia debido a su simple programación, variedad de funciones y bajo costo. Por ello brinda la posibilidad de crear efectos de iluminación controlados desde un microcontrolador maestro.
- El sistema de iluminación diseñado es una muestra clara de las tendencias actuales en iluminación que tienen como principal objetivo la eficiencia energética; esto se alcanza con el uso de LEDs de potencia. En esta tesis no se ha trabajado directamente con LEDs de potencia, sin embargo se ha tratado de mantener la eficiencia energética del sistema en un nivel alto al seleccionar la fuente de alimentación que supera el 90% de eficiencia.

## RECOMENDACIONES

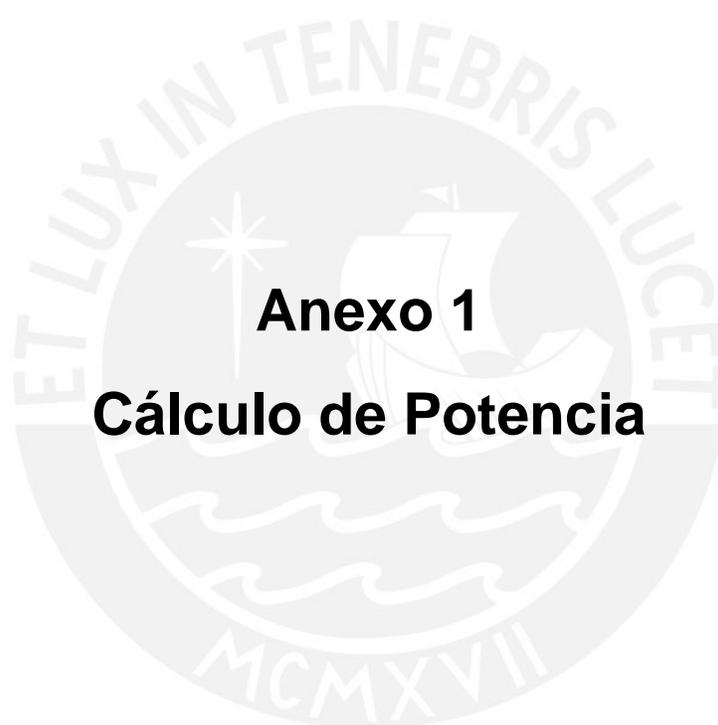
- Para la parte de control, está aún pendiente el diseño de una interfaz con el usuario, de forma que éste puede controlar el sistema y/o los efectos del sistema por medio de una computadora. Esto simplificaría mucho la tarea del usuario y a la vez permitiría que nuevos usuarios se adapten con mayor facilidad y rapidez al uso del sistema.
- Para el sistema de comunicación, sería recomendable hacer pruebas con algún otro protocolo de comunicación, uno muy usado en iluminación es el DMX, que a pesar de tener problemas con el ruido para tramos largos, puede ser una interesante opción alternativa, cuya validez deberá ser validada mediante pruebas y/o simulaciones. Por otro lado, protocolos de comunicación inalámbricos quedan descartados por su alto precio que, a fin de cuentas, resultaría mucho más costoso que realizar el cableado planteado para este sistema de iluminación.
- Tener siempre en cuenta las recomendaciones y normas técnicas peruanas para la instalación de las fuentes de alimentación y cableado eléctrico en general, ya que, de no hacerlo así, se podrían generar accidentes fatales, debido a las grandes corrientes que se manejan; y por otro lado, se podría perder mucho dinero en multas y procesos de regulación.
- El uso de LEDs RGB podría ser una opción interesante con la finalidad de crear nuevos efectos de iluminación, ya que éstos pueden generar casi cualquier color. Sin embargo, esto implicaría mayor inversión en este tipo de LEDs, así como mayor consumo del sistema y una programación mucho más extensa y compleja.
- Finalmente, trabajar con la tecnología LED puede generar nuevas oportunidades y/o posibilidades de proyectos en nuestro país, ya que esta tecnología no se encuentra muy difundida y como se ha mencionado a lo largo de esta tesis, posee muchas ventajas con respecto a otras tecnologías convencionales de iluminación.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Jan Axelson. *Serial Port Complete: Programming and Circuits for RS-232 and RS-485 Links and Networks*, 1ra ed., Madison: Lake View Research, 2009.
- [2] M. Brown. *Practical Switching Power Supply Design*, 2da ed., New York: McGraw-Hill, 1999.
- [3] Y.K. Cheng y K.W.E.Cheng. *General study for using led to replace traditional lighting devices*, Hong Kong: The Hong Kong Polytechnic University, 2006.
- [4] D. Grade. *Programming and Customizing the AVR Microcontroller*, 1ra ed., New York: McGraw-Hill, 2001.
- [5] Gilbert Held. *Introduction to Light Emitting Diode Technology and Applications*, 1ra ed., Boca Raton: CRC Press, 2009.
- [6] Asdrúbal Lopez. *AVR Microcontroladores*, 1ra ed., Estado de México: Universidad Autónoma del Estado de México, 2006.
- [7] J.L Muñoz y S. Hernandez. *Sistemas de Alimentación Conmutados*, 1ra ed., Madrid: Paraninfo, 1997.
- [8] A. I. Pressman. *Switching Power Supply Design*, 2da ed., New York: McGraw-Hill, 1999.
- [9] Muhammad H. Rashid. *Power electronics handbook*, 1ra ed., San Diego: Academic Press, 2001.
- [10] Arturas Zukauskas, Remis Gaska y Michael Shur. *Introduction to Solid-state Lighting*, 1ra ed., New York: Wiley, 2002.
- [11] D. Reynders, J. Park, S. Mackay y E. Wright. *Industrial Data Networks*, 1ra ed., Oxford: Elsevier, 2004.
- [12] E. Fred Schubert. *Light-Emitting Diodes*, 2da ed., Cambridge: Cambridge University, 2006.
- [13] Robert Simpson. *Lighting Control*, 1ra ed., Oxford: Focal Press, 2003.

- [14] Jeff Y. Tsao. "Solid State Lighting: Lamps, Chips and Materials for Tomorrow". *IEEE Circuits & Devices Vol 20 N°3*, pages 28–37, Albuquerque: Sandia National Laboratories, 2004.
- [15] Juan Pablo Zeballos. *Diseño de los subsistemas de luminarias y circuitos de excitación de un sistema de iluminación exterior basado en tecnología de leds de potencia para el logo pucp en el edificio Mac Gregor*. Tesis de grado en Ciencias e Ingeniería con mención en Ingeniería Electrónica. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, 2009.
- [16] Philips Lumileds. <[www.philipslumileds.com](http://www.philipslumileds.com)>
- [17] OSRAM Opto Semiconductors. <[www.osram-os.com](http://www.osram-os.com)>
- [18] Cree. <[www.creeledlighting.com](http://www.creeledlighting.com)>
- [19] Fairchild Semiconductors. Hoja de datos del LM7824.
- [20] Modbus over serial line. Specification and Implementation guide. V1.02. <[www.modbus.org](http://www.modbus.org)>
- [21] Digikey Corporation. <[www.digikey.com](http://www.digikey.com)>
- [22] Allen Bradley. <[www.ab.com](http://www.ab.com)>
- [23] Siemens. <[www.siemens.com](http://www.siemens.com)>
- [24] ABB. <[www.abb.com](http://www.abb.com)>
- [25] Allen Bradley. Hoja de aplicaciones 1606-XL480EP.
- [26] Atmel. Hoja de datos del Atmega 48.
- [27] Atmel. Hoja de datos del Atmega 8.
- [28] Maxim. Hoja de datos del MAX485.
- [29] Microchip Technology Inc. <[www.microchip.com](http://www.microchip.com)>





# Anexo 1

## Cálculo de Potencia

En el sistema de iluminación con LEDs de potencia se cuentan con 20 módulos esclavos y 1 módulo maestro, a continuación se presenta el cálculo de potencia del sistema mencionado en el peor caso (Todos los LEDs encendidos al 100 de su ciclo de trabajo):

#### Módulos esclavos:

- ✓ Número total de LEDs: 718 (Número de LEDs calculado en la tesis previa).  
Teniendo 394 LEDs de 400mA@2.2V y 324 LEDs de 350mA@3.2V.

$$Potencia\ total\ LEDs = 394 \times 0.4 \times 2.2 + 324 \times 0.35 \times 3.2 = 709.6W$$

- ✓ Considerando una eficiencia del 90% de los Drivers, tenemos el siguiente consumo en drivers:

$$Potencia\ disipada\ Drivers = 0.1 \times 709.6 = 70.96W$$

- ✓ Microcontroladores: Se tienen microcontroladores Atmega48, los cuales consumen aprox. 0.45mW c/u. Lo que nos da un consumo de 9mW en los 20 módulos esclavos.
- ✓ Transceivers de la marca MAXIM, modelo MAX485, consumen 727mW c/u. Lo que nos brinda un total de 14.54W en los 20 módulos esclavos.

Habiendo realizado los cálculos correspondientes, se tiene finalmente que la potencia total de los módulos esclavos es de 795.1W.

#### Módulo maestro:

- ✓ No posee LEDs de potencia, ni drivers.
- ✓ Microcontrolador Atmega164 consume aproximadamente 0.432mW.
- ✓ Transceiver de la marca MAXIM, modelo MAX 485 consume 727mW.

Habiendo realizado este cálculo se tiene que la potencia consumida por el módulo maestro es de 727.432mW. Lo cual es insignificante al lado de los módulos esclavos.

Por tanto se concluye que la potencia total requerida en el sistema es de 795.8W, se redondea a un valor de 800W.

## Anexo 2

# Diseño de una fuente de Alimentación

## Motorola Analog IC Device Data

## SECTION 8 DESIGNING THE INPUT SUPPLY

Most input supplies used to power series pass regulator circuits consist of a 60 Hz, single phase step-down transformer followed by a rectifier circuit whose output is smoothed by a choke or capacitor input filter. The type of rectifier circuit used can be either a half-wave, full-wave, or full-wave bridge type, as shown in Figure 8-1. The half-wave circuit is used in low current applications, while the full-wave is preferable in high-current, low output voltage cases. The full-wave bridge is usually used in all other high-current applications.

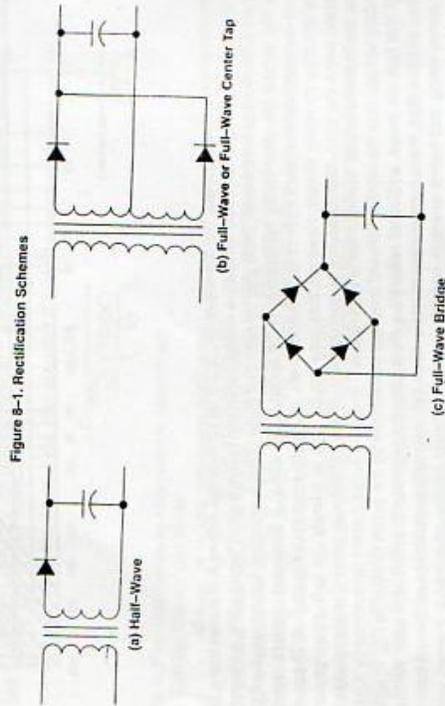


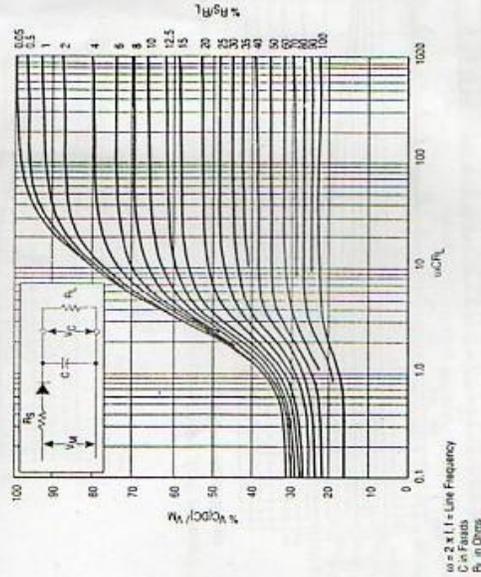
Figure 8-1. Rectification Schemes

In this section, specification of the filter capacitor, rectifier and transformer ratings will be discussed. The specifications for the choke input filter will not be considered since the simpler capacitor input type is more commonly used in series regulated circuits. A detailed description of this type of filter can be found in the reference listed at the end of this section.

### 1. Design of Capacitor-Input Filters

The best practical procedure for the design of capacitor-input filters still remains based on the graphical data presented by Schade(1) in 1943. The curves shown in Figures 8-2 through 8-5 give all the required design information for half-wave and full-wave rectifier circuits. Whereas Schade originally also gave curves for the impedance of vacuum-tube rectifiers, the equivalent values for semiconductor diodes must be substituted. However, the rectifier forward drop often assumes more significance than the dynamic resistance in low-voltage supply applications, as the dynamic resistance can generally be neglected when compared with the sum of the transformer secondary-winding resistance plus the reflected primary-winding resistance. The forward drop may be of considerable importance, however, since it is about 1.0 V, which clearly cannot be ignored in supplies of 12 V or less.

Figure 8-2. Relation of Applied Alternating Peak Voltage to Direct Output Voltage in Half-Wave Capacitor-Input Circuits



(1) From O. H. Schade, Proc. IRE, Vol. 31, p. 356, 1943.

Figure 8-3. Relation of Applied Alternating Peak Voltage  $V_p$  to Direct Output Voltage in Full-Wave Capacitor-Input.

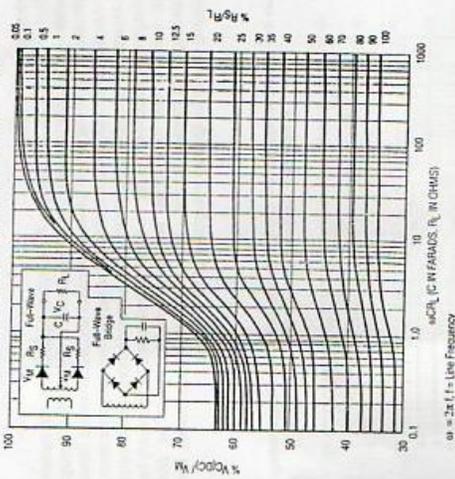


Figure 8-4. Relation of RMS and Peak-to-Average Diode Current in Capacitor-Input Circuits

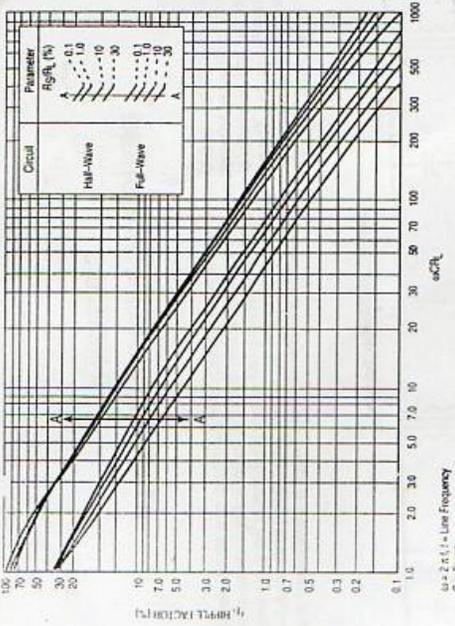
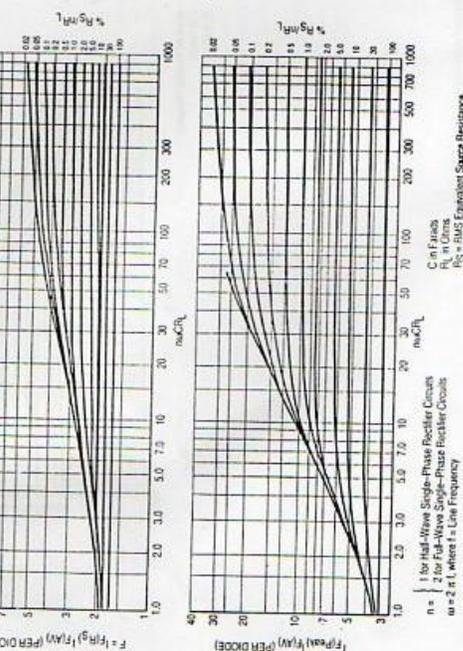


Figure 8-5. Relation of RMS and Peak-to-Average Diode Current in Capacitor-Input Circuits



Returning to the above curves, the full-wave circuit will be considered. Figure 8-3 shows that a circuit must operate with  $\omega CR_L \geq 10$  in order to hold the voltage reduction to less than 10% and  $\omega CR_L \geq 40$  to obtain less than 2.0% reduction. However, it will also be seen that these voltage reduction figures require  $R_S/R_L$ , where  $R_S$  is now the total series resistance, to be about 0.1%, which, if attainable, causes repetitive peak-to-average current ratios from 10 to 17 respectively, as can be seen from Figure 8-4. These ratios can be satisfied by many diodes; however, they may not be able to tolerate the turn-on surge current generated when the input-filter capacitor is discharged and the transformer primary is energized at the peak of the input waveform. The rectifier is then required to pass a surge current determined by the peak secondary voltage less the rectifier forward drop and limited only by the series resistance  $R_S$ . In order to control this turn-on surge, additional resistance must often be provided in series with each rectifier. It becomes evident, then, that a compromise must be made between voltage reduction on the one hand and diode surge rating and hence average current-carrying capacity on the other hand. If small voltage reduction, that is good voltage regulation, is required, a much larger diode is necessary than that demanded by the average current rating.

Surge Current

The capacitor-input filter allows a large surge to develop, because the reactance of the transformer leakage inductance is rather small. The maximum instantaneous surge current is approximately  $V_M/R_S$  and the capacitor charges with a time constant  $\tau = R_S C_1$ . As a rough — but conservative — check, the surge will not damage the diode if  $V_M/R_S$  is less than the diode IFSM rating and  $\tau$  is less than 8.3 ms. It is wise to make  $R_S$  as large as possible and not pursue tight voltage regulation; therefore, not only will the surge be reduced but rectifier and transformer ratings will more nearly approach the DC power requirements of the supply.

**Design Procedure**

From the regulator circuit design (see Section 6), we know:  
 $V_C(\text{DC})$  = the required full load average dc output voltage of the capacitor input filter  
 $V_{\text{Ripple}}(\text{pp})$  = the maximum no load peak-to-peak ripple voltage  
 $V_M$  = the maximum no load output voltage  
 $I_O$  = the full-load filter output current  
 $f$  = the input ac line frequency

B) From Figure 8-5, we can determine a range of minimum capacitor values to obtain sufficient ripple attenuation. First determine  $\eta$ :

$$\eta = \frac{V_{\text{Ripple}}(\text{pp})}{2 \sqrt{2} V_C(\text{DC})} \times 100\% \quad (8.1)$$

A range for  $\omega C R_L$  can now be found from Figure 8-5.

C) Next, determine the range of  $R_S/R_L$  from Figure 8-2 or 8-3 using  $V_C(\text{DC})$  and the values for  $\omega C R_L$  found in part B. If the range of  $\omega C R_L$  values initially determined from Figure 8-5 is above  $\approx 10$ ,  $R_S/R_L$  can be found from Figures 8-2 and 8-3 using the lowest  $\omega C R_L$  value. Otherwise, several iterations between Figures 8-2 or 8-3 and 8-5 may be necessary before an exact solution for  $R_S/R_L$  and  $\omega C R_L$  for a given  $\eta$  and  $V_C(\text{DC})/V_M$  can be found.

D) Once  $\omega C R_L$  is found, the value of the filter capacitor (C) can be determined from:

$$C = \frac{\omega C R_L}{2\pi f \left( \frac{V_C(\text{DC})}{I_O} \right)} \quad (8.2)$$

E) The rectifier requirements may now be determined:

1. Average current per diode:  
 $I_f(\text{avg}) = I_O$  for half-wave rectification  
 $I_f(\text{avg}) = I_O/2$  for full-wave rectification
2. RMS and Peak repetitive rectifier current ratings can be determined from Figure 8-4.
3. The rectifier PIV rating is  $2 V_M$  for the half-wave and full-wave circuits.  $V_M$  for the full wave bridge circuit. In addition, a minimum safety margin of 20% to 50% is advisable due to the possibility of line transients.
4. Maximum surge current,  $I_{\text{surge}} = V_M/(R_S + \text{ESR})$   
 where, ESR = minimum equivalent series resistance of filter capacitor from its data sheet.

F) Transformer Specification

1. Secondary leg RMS voltage,  $V_S = (V_M + (n) 1.0)/\sqrt{2}$   
 where:  $n = 1$  for half-wave and full-wave  
 $n = 2$  for full-wave bridge
2. Total resistance of secondary and any external resistors to be equal to  $R_S$  found from Figures 8-2, 8-3, and 8-4 (see Part C).
3. Secondary RMS current:  
 half-wave =  $I_{\text{rms}}^*$   
 full-wave =  $I_{\text{rms}}$   
 full-wave bridge =  $\sqrt{2} I_{\text{rms}}$   
 where,  $I_{\text{rms}}$  = rms rectifier current (from part E.1 and E.2).
4. Transformer VA rating:  
 half-wave =  $V_S I_{\text{rms}}$   
 full-wave =  $2 V_S I_{\text{rms}}$   
 full-wave bridge =  $V_S I_{\text{rms}} (\sqrt{2})$   
 where,  $I_{\text{rms}}$  = rms rectifier current (from part E.1 and E.2) and,  
 $V_S$  = secondary leg RMS voltage.

**3. Design Example**

A) Find the values for the filter capacitor, transformer rectifier ratings, given Full-Wave Bridge Rectification:

- $V_C(\text{DC}) = 16 \text{ V}$
- $V_{\text{Ripple}}(\text{pp}) = 3.0 \text{ V}$
- $V_M = 25 \text{ V}$
- $I_O = 1.0 \text{ A}$
- $f = 60 \text{ Hz}$

B) Using Equation (8.1),

$$\eta = \frac{3}{2 \sqrt{2} (16)} \times 100\% = 6.6\%$$

from Figure 8.5,  $\omega C R_L = 7$  to 15

C) Using  $\omega C R_L = 10$ ,  $R_S/R_L$  is found from Figure 8-3 using,

$$\frac{V_C(\text{DC})}{V_M} = \frac{16}{25} = 0.64 = 64\%$$

$$R_S/R_L = 20\% \text{ or } R_S = 0.2 \times R_L = 0.2 \left( \frac{V_C(\text{DC})}{I_O} \right) = 0.2 (16)$$

$$R_S = 3.2 \Omega$$

D) From Equation (8.2), the filter capacitor size is found:

$$C = \frac{\omega C R_L}{2\pi f \left( \frac{V_C(\text{DC})}{I_O} \right)} = \frac{10}{2\pi f (60) (16)} = 1658 \mu\text{F}$$

E) The rectifier ratings are now specified:

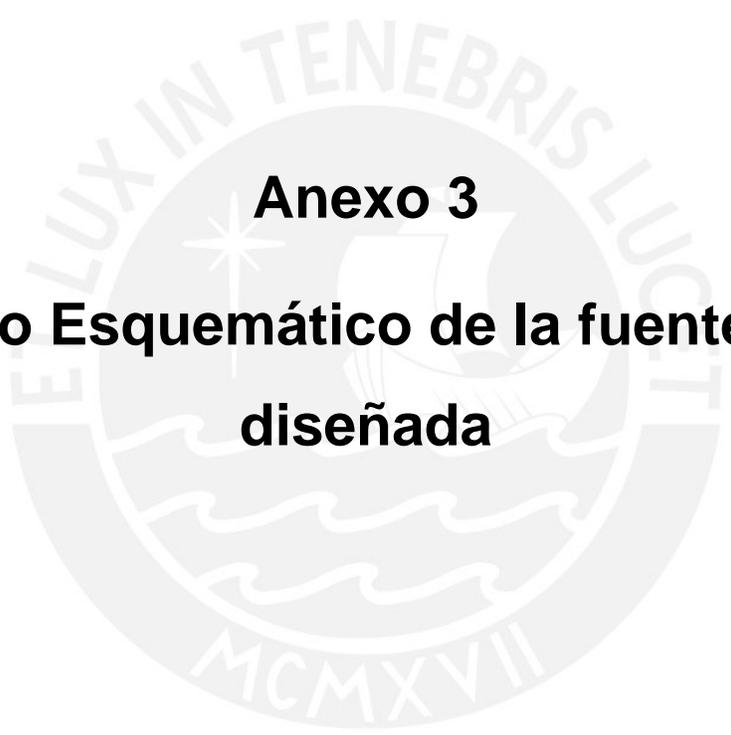
1.  $I_f(\text{avg}) = I_O/2 = 0.5 \text{ A}$  from Equation (8.3)
2.  $I_f(\text{rms}) = 2 \times I_f(\text{AVG}) = 1.0 \text{ A}$  from Figure 8-4
3.  $I_f(\text{Peak}) = 5.2 \times I_f(\text{AVG}) = 2.6 \text{ A}$  from Figure 8-4
4. PIV =  $V_M = 25 \text{ V}$  (use 50 V for safety margin)
5.  $I_{\text{surge}} = V_M/(R_S + \text{ESR}) = 25/3.2 = 7.8 \text{ A}$  from Equation (8.4), neglecting capacitor ESR.

F) The transformer should have the following ratings:

1.  $V_S = (V_M + n(1.0))/\sqrt{2} = (25 + 2)/\sqrt{2} = 19 \text{ VRMS}$  (from Equation (8.5))
2. Secondary Resistance should be  $3.2 \Omega$
3. Secondary RMS current rating should be 1.4 A, (from Equation (8.6)).
4. From Equation (8.7), the transformer should have a 27 VA rating.

It should be noted that, in order to simplify the procedure, the above design does not allow for line voltage variations or component tolerances. The designer should take these factors into account when designing his input supply. Typical tolerances would be: line voltage = +10% to -15% and filter capacitors = +75% to -10%.

REFERENCES  
 1. O. H. Schick, Proc. IRE, Vol. 31, 1943.  
 2. Motorola Silicon Rectifier Manual, 1980.

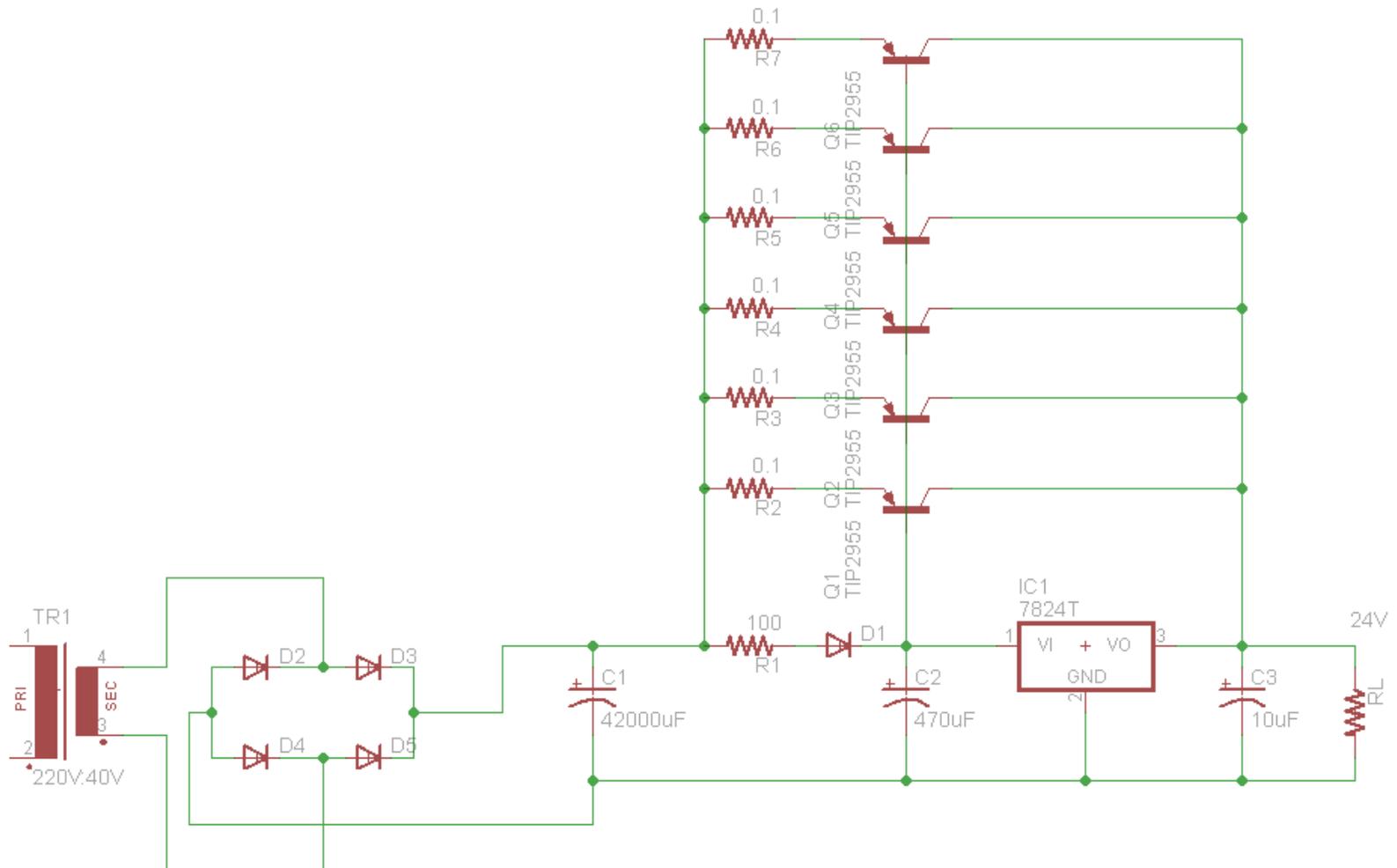


**Anexo 3**

**Circuito Esquemático de la fuente lineal  
diseñada**

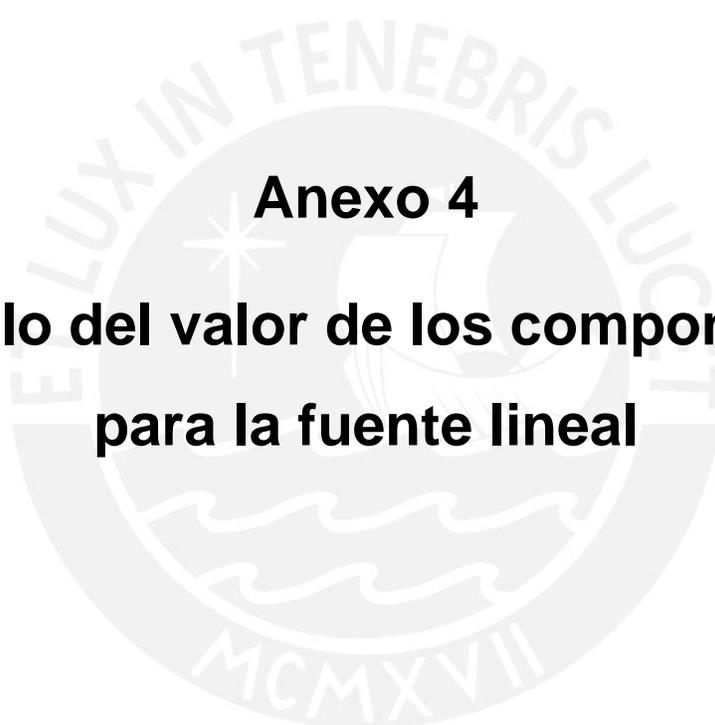


FUENTE LINEAL 900w:



## Anexo 4

# Cálculo del valor de los componentes para la fuente lineal



Los cálculos se han realizado siguiendo el manual adjunto en el anexo 1.

Requerimientos de a fuente:

$$V_{cdc} = 24 \text{ v}$$

$$V_{rip} = 4 \text{ v}$$

$$V_m = 40 \text{ v}$$

$$I_o = 37.5 \text{ A}$$

$$f = 60 \text{ Hz}$$

Cálculos:

Capacitor de entrada:

$$C = \frac{10}{2\pi \frac{24}{37.5} \cdot 60} = 41\,447 \mu\text{F}$$

Diodos:

$$I_{F(av)} = \frac{I_o}{2} = 18.75 \text{ A}$$

$$I_{F(rms)} = 2 \times 18.75 \text{ A} = 37.5 \text{ A}$$

$$I_{Fpeak} = 5 \times 18.75 \text{ A} = 93.75 \text{ A}$$

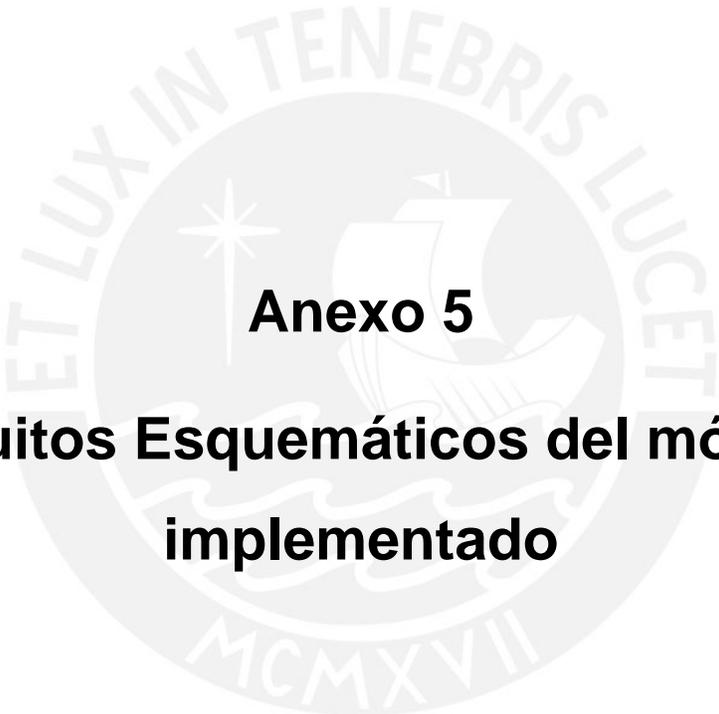
$$PIV = V_m = 40 \text{ v} \text{ (Usar por seguridad)}$$

Transformador:

$$V_s = \frac{(40 + 2)}{\sqrt{2}} = 29.79 \text{ V}_{rms} \cong 30 \text{ V}_{rms}$$

$$I_{rms(s)} = \sqrt{2}(37.5) = 53 \text{ A}$$

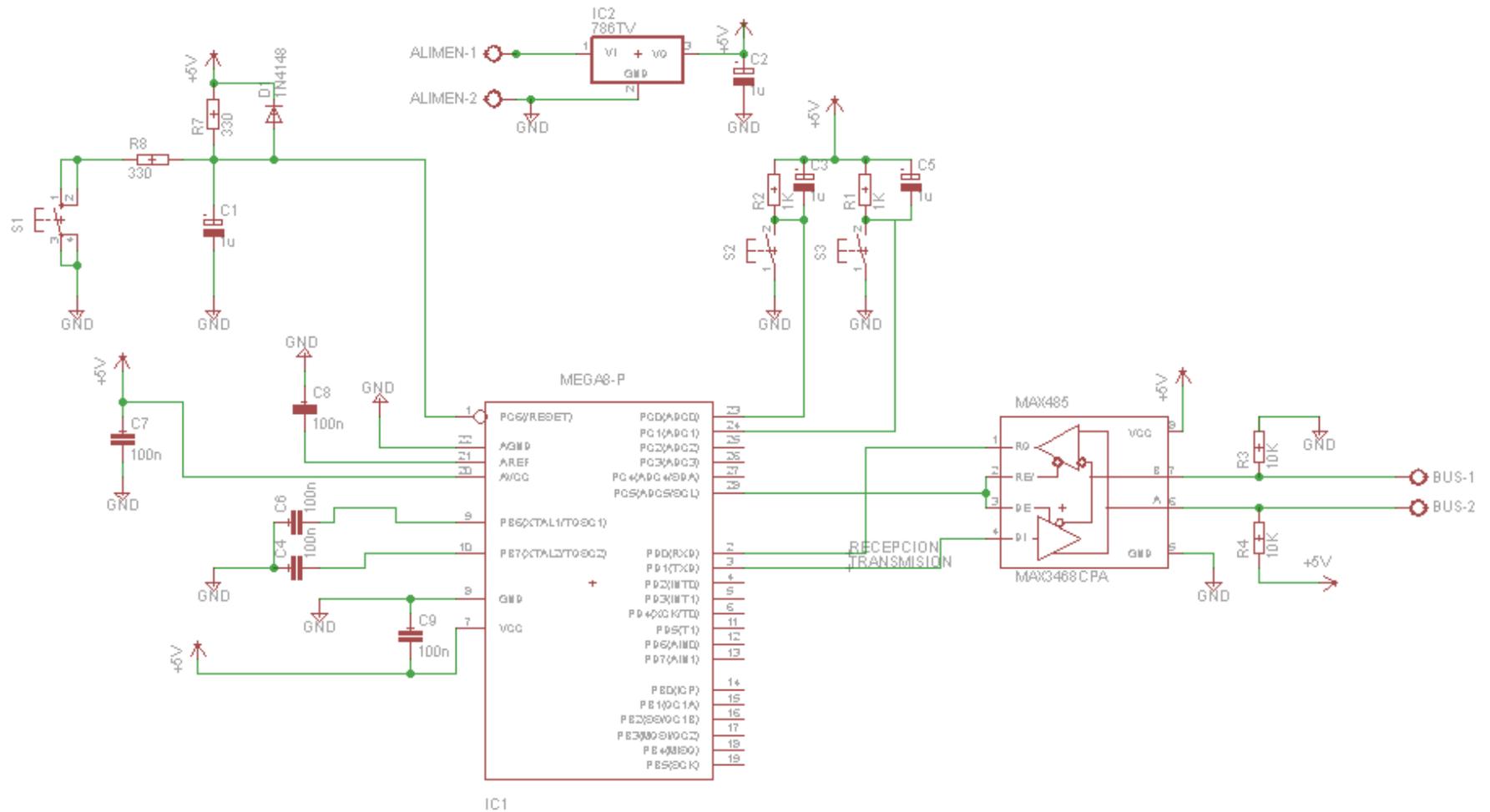
$$S = V_s \times I_{rms} \times \sqrt{2} = 1.58 \text{ KVA}$$

A large, faint watermark of the university logo is centered in the background, featuring the same emblem and Latin motto as the header logo.

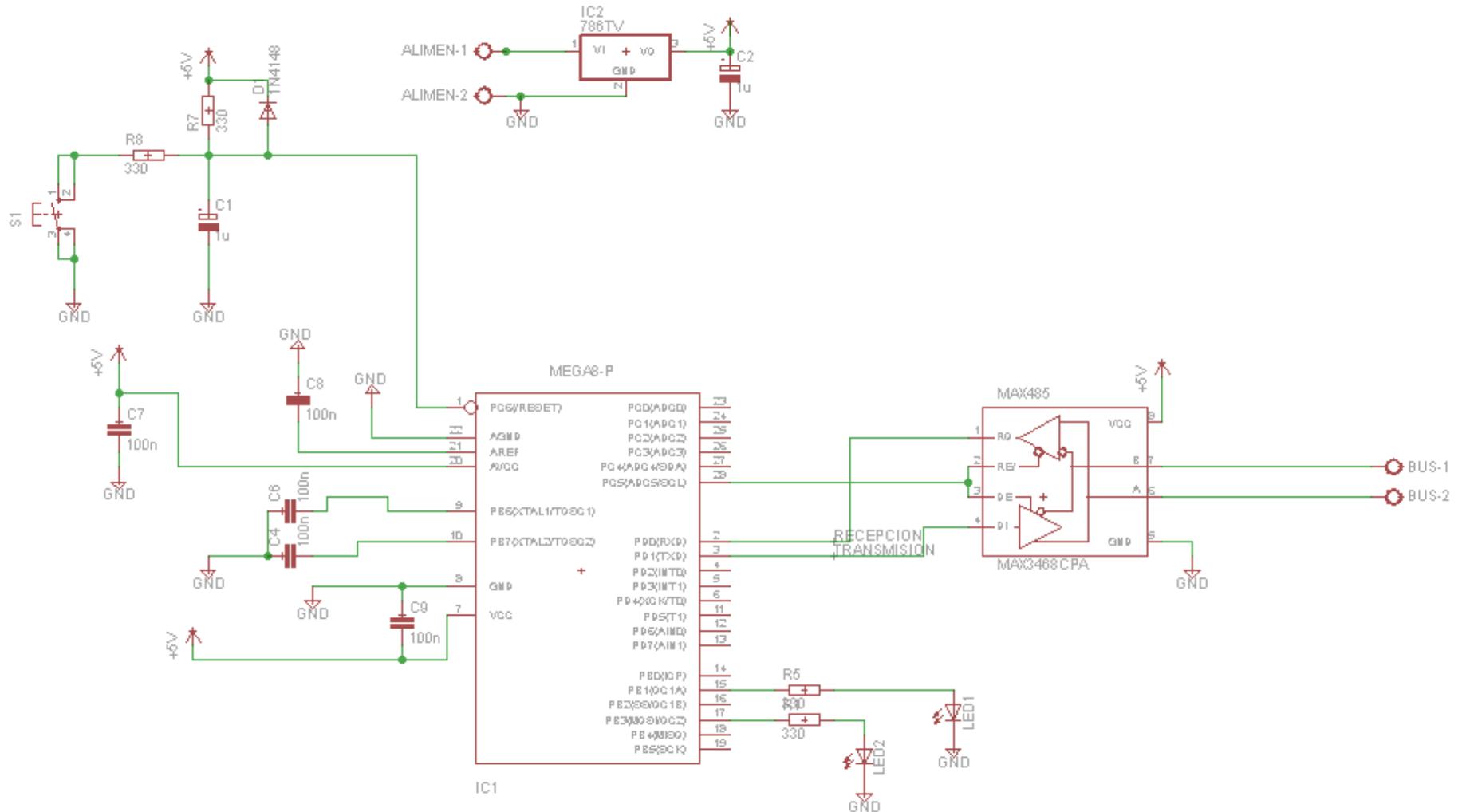
**Anexo 5**

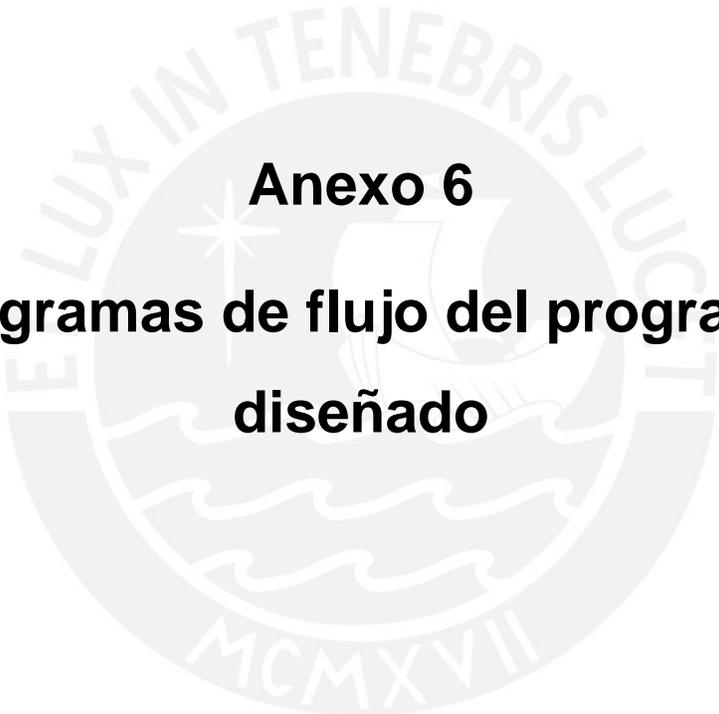
**Circuitos Esquemáticos del módulo  
implementado**

Circuito Esquemático de la etapa de control del módulo maestro:



Circuito Esquemático de la etapa de Control del módulo Esclavo:



A large, faint watermark of the university seal is centered on the page. It contains the Latin motto "ET LUX IN TENEBRIS LUCEAT" at the top and "MCMXVII" at the bottom, with a central emblem of a ship and a star.

**Anexo 6**  
**Diagramas de flujo del programa**  
**diseñado**

### 1) EFECTO DIRECCIONADO (Modo unitario):

A continuación se presentan los diagramas de flujo del programa del microcontrolador maestro y esclavo que permiten generar un efecto direccionado en el sistema de iluminación, para lograr este efecto se direcciona individualmente a cada microcontrolador.

#### Microcontrolador Maestro:

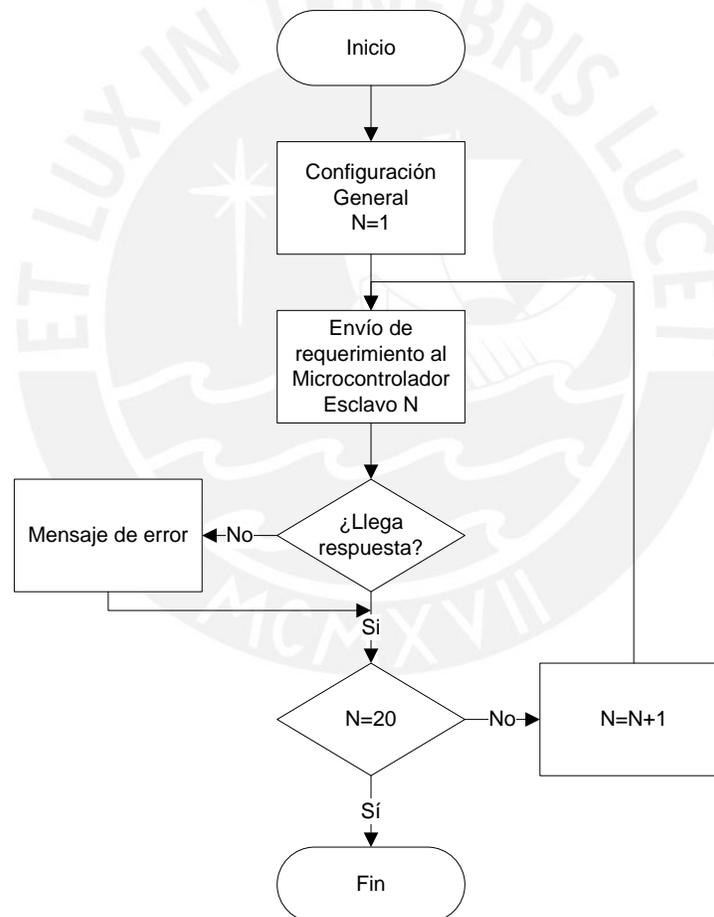


Figura 4.1 Diagrama de flujo Microcontrolador maestro

**Microcontrolador Esclavo:**

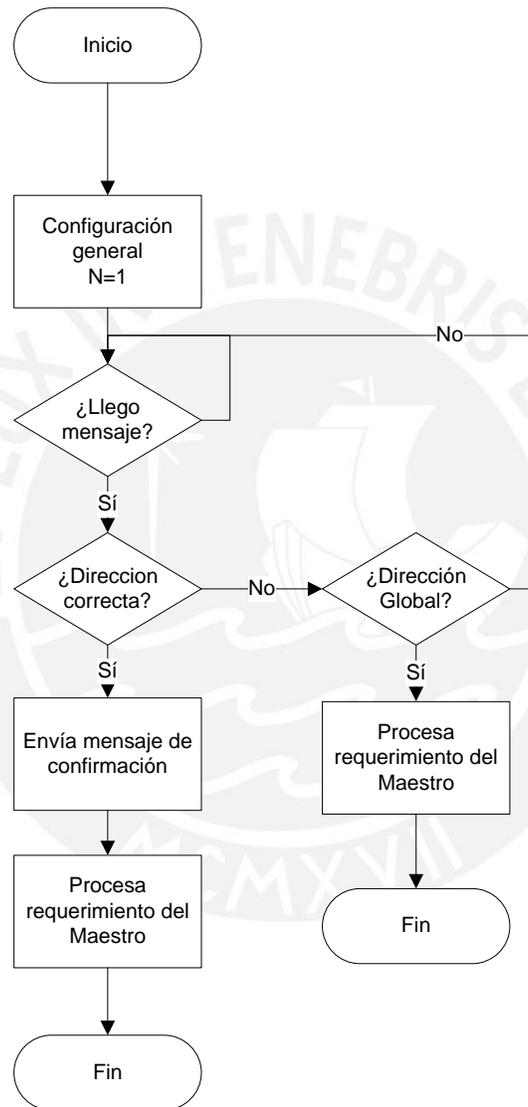


Figura 4.2 Diagrama de Flujo Microcontrolador Esclavo 1

## 2) EFECTO GLOBAL (Modo global):

Se presentan los diagramas de flujo del programa del microcontrolador maestro y esclavo que permiten generar un efecto global en el sistema de iluminación.

### Microcontrolador Maestro:

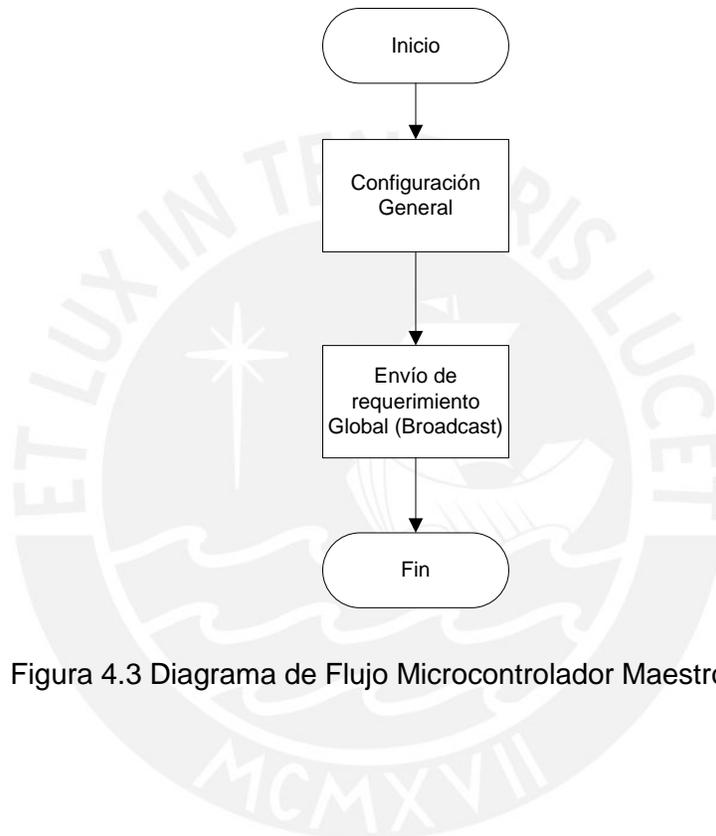


Figura 4.3 Diagrama de Flujo Microcontrolador Maestro

**Microcontrolador Esclavo:**

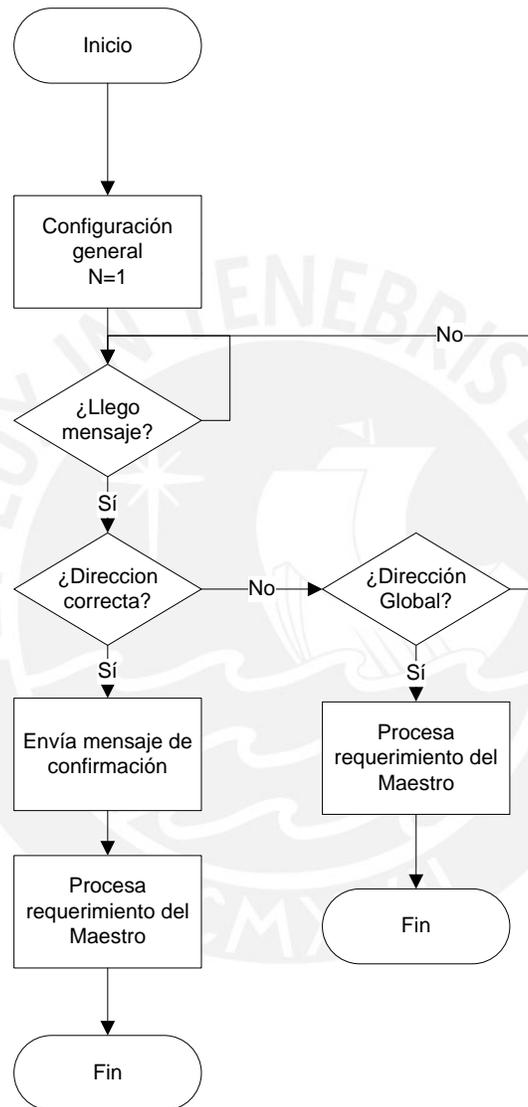


Figura 4.4 Diagrama de Flujo Microcontrolador Esclavo 1



**Anexo 7**  
**Programa diseñado Microcontrolador**  
**Maestro**

El siguiente programa ha sido probado con el microcontrolador Atmega8, sin embargo, puede ser usado con el microcontrolador Atmega48. Esto debido a la disponibilidad de el primer microcontrolador mencionado en el mercado peruano.

A continuación se presenta el programa diseñado en lenguaje Assembler:

```

; *****
; TESIS: CONTROL MAESTRO-ESCLAVO PARA SISTEMA DE ILUMINACION CON
POWER LEDS.
; CONTROL MAESTRO
; AUTHOR: Sergio Roman
.include "C:\VMLAB\include\m8def.inc"
.def rx=r17      ;Variable que indica cuando se recibe un dato
.def direccion=r18
.def comando=r19
.def tem=r20
.def tem2=r21
.def dato = r22
.def check =r23  ;Variable que verifica errores de transmision
.def error=r24   ;Cuando la variable esta en cero no hay error, cuando es $FF lo hay
.def cont=r25
.dseg
.org $60
trama: .byte 4      ;Trama a enviar
tramaR: .byte 4    ;Trama recibida
.CSEG
.org $0

```

rjmp Inicio

.org \$8

rjmp Tov

.org \$B

rjmp RXS

encabezado:

.db 'l',0

```

*****
;
*
;*
; Interrupción TOV
;* Interrumpe cada 0.6 segundo aproximadamente
*****
;

```

TOV:

push R16

in R16,SREG

push R16

inc cont

pop R16

out SREG,R16

pop R16

RETI

```

*****
;
;*
;* Interrupción Recepción
;* Interrumpe cada vez que recibe un dato por el puesto serial
*****
;

```

RXS:

```

push R16
in R16,SREG
push R16

ldi rx, $ff

pop R16
out SREG,R16

pop R16

```



RETI

```

*****          INCIO          *****
;
*****
;

```

inicio:

```

ldi R16, HIGH(RAMEND) ; Inicializamos la pila
out SPH, R16

ldi R16, LOW(RAMEND)

```

out SPL, R16

CBI DDRC, PC0 ;pulsadores de entrada

CBI DDRC, PC1

SBI DDRC, PC2 ;Salida led error

CBI PORTC, PC2

SBI DDRC, PC5 ;Salida ENABLE para la transmisión

CBI PORTC, PC5

rcall config\_usart

rcall config\_tmr1

clr rx ;Permite ver si llego un mensaje

clr cont ;Contador que permite que la recepción del  
;maestro dure 0.5sec como máximo

clr check ;para error de transmisión

clr error ;

```

.*****
,
.*****
,          PROGRAMA PRINCIPAL          *****
.*****
,
    
```

PRINCIPAL:

PULSADOR1SUELTO: Se inicia presionando el pulsador de envío

SBIS PINC, 0

RJMP PULSADOR2SUELTO ;Envío con direccionamiento

PULSADOR1PRESIONADO:

SBIC PINC ,0

RJMP PULSADOR1PRESIONADO

Idi comando, 1 ;Efecto 1: Prender zonas gradualmente

Idi direccion, 1 ;Apunta al primer CPU, del 1..20 se direcciona a todos los CPUs

rcall efecto\_dir

rjmp principal

PULSADOR2SUELTO: Se inicia presionando el pulsador de envío

SBIS PINC, 1

RJMP PULSADOR1SUELTO ;Envío con direccionamiento

PULSADOR2PRESIONADO:

SBIC PINC, 1

RJMP PULSADOR2PRESIONADO

Idi comando, 2 ;Efecto 2: Prende todas las zonas de forma simultanea

Idi direccion, \$FF ;Dirección es aceptada por todos los microcontroladores

rcall Efecto\_global

rjmp principal

fin:

rjmp fin

```

,*****
,
,*****      RETARDO      *****
,
,***** duración de aproximadamente de 11ms
,
,***
,

```

RETARDO\_10MS:

```

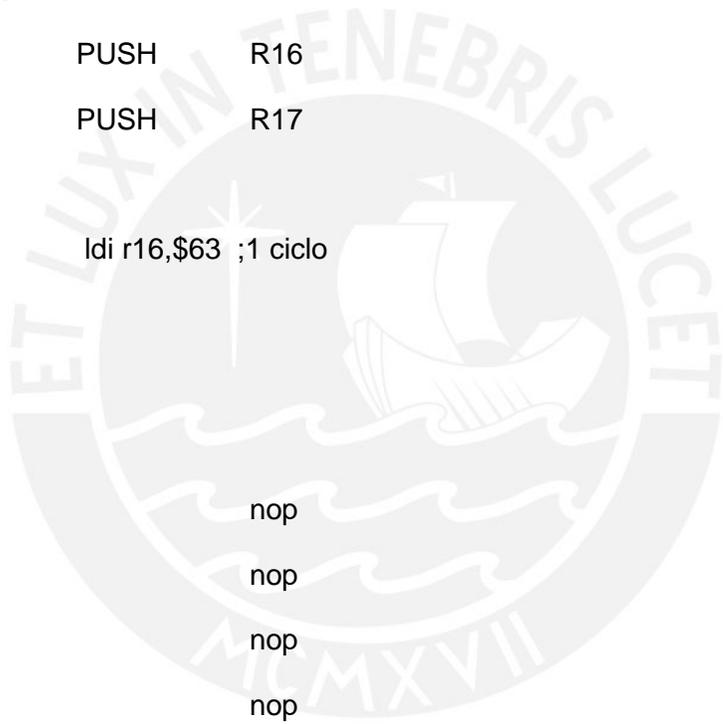
          PUSH      R16
          PUSH      R17

          ldi r16,$63 ;1 ciclo

lazo01:
          ldi R17,$A

lazo02:
          nop
          nop
          nop
          nop
          nop
          nop
          dec r17
          cpi r17,0
          brne lazo02
          nop
          nop

```



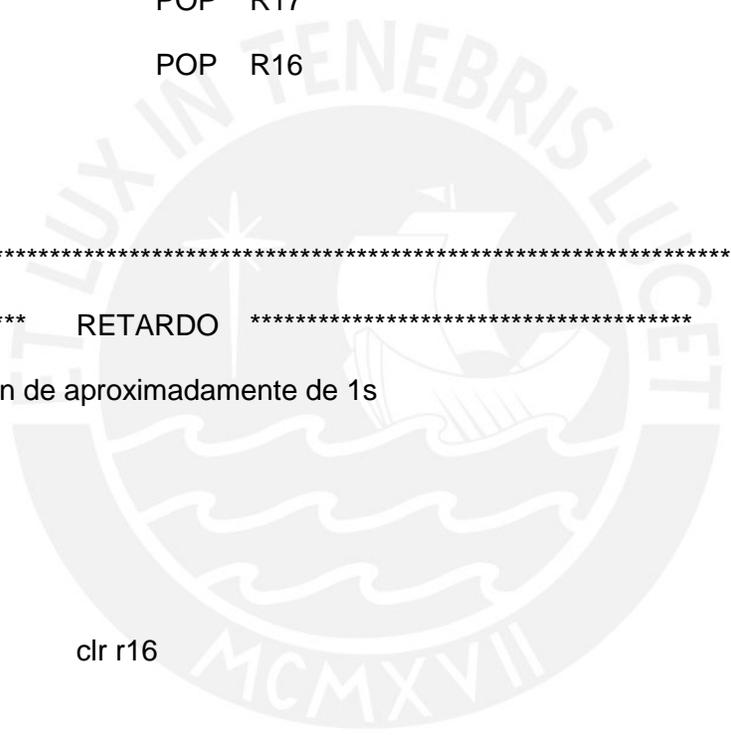
```

nop
nop
nop
nop
dec r16
cpi r16,0
brne lazo01
POP R17
POP R16
ret

;
;*****
;***** RETARDO *****
;***** Duración de aproximadamente de 1s
;***
;
RETARDO_1S:
push r16
clr r16
ciclo_retardo:
cpi r16, 100
breq acaba_retardo
rcall retardo_10ms
inc r16
rjmp ciclo_retardo

acaba_retardo:
pop r16

```



ret

```

;*****
;
;
; CONFIGURACIÓN DEL USART *****
;
;
; *
;
; *Subrutina que sirve para configurar el Usart MAESTRO (MPCM deshabilitado)
;
; *****
;

```

CONFIG\_USART:

```

        ldi r16,high(12)      ; frecuencia 8MHZ , velocidad 9600
        out UBRRH,r16
        ldi r16,low(12)
        out UBRL,r16        ; velocidad doble,
        ldi R16,(1<<U2X) ; U2X=1.
        out UCSRA,R16

;Comunicación asíncrona, paridad par, 2 bit de parada, 8 bits
ldi R16,(1<<URSEL | 0<<UMSEL | 0<<UPM1 | 0<<UPM0 | 0<<USBS | 1<<UCSZ1 |
1<<UCSZ0)

        out UCSRC,R16

;interrupción de comunicación habilitada en recepción, Rx habilitado,TX habilitado

ldi R16,(1<<RXEN|0<<UCSZ2|1<<TXEN|1<<RXCIE)

        out UCSRB,R16

ret

```

;-----

```

.*****
;
.*****      ENVIA_DATO      *****
;
.*
;

```

;\*Subrutina que envía un dato por el puerto serial

```

.*****
;

```

ENVIA\_DATO:

sbis UCSRA,UDRE

rjmp envia\_dato

out UDR, dato

ret

```

;-----

```

```

.*****      RECIBE_DATO      *****
;

```

```

.*
;

```

;\*Subrutina que recibe un dato por el puerto serial

```

.*****
;

```

RECIBE\_DATO:

sbis UCSRA,RXC

rjmp recibe\_dato

in dato, UDR

ret

```

;-----

```



```

;*****
;
;****      SUBROUTINA QUE ENVIA UNA TRAMA DE 6 BYTES      *****;
;
;Envía trama desde memoria RAM, con verificación de error
;
;*****
;

```

ENVIA\_TRAMA:

```

push tem
push tem2
push check
push dirección

```

```

ldi YH, high(trama)
ldi YL, low(trama)

```

```

ldi ZL,low(encabezado*2)
ldi Zh,high(encabezado*2)

```

sigue:

```

lpm dato,Z+
cpi dato,0

```

```
breq fin_cabecera
```

```
st y+, dato
```

```
rjmp sigue
```

fin\_cabecera:

Dirección:

```
st y+, dirección
```

```
st y+, comando
```

Analisis\_error: ;Se procede a hacer un XOR de toda la trama

```
ldi YH, high(trama)
```

```
ldi YL, low(trama)
```

```
clr tem2
```

```
ld tem,y+
```

```
ld check,y+
```

```
eor check,tem
```

```
ld tem,y+
```

```
eor check,tem
```

```
st y,check
```

Envio\_trama:

```
ldi YH, high(trama)
```

ldi YL, low(trama)

clr tem2

SBI PORTC, PC5

ENABLE TRANSMISION

sigue\_enviando:

ld dato, y+

rcll envia\_dato

inc tem2

cpi tem2, 4

brne sigue\_enviando

rcll retardo\_10ms ;DESHABILITA LA TRANSMISION

CBI PORTC, PC5

pop dirección

pop check

pop tem2

pop tem

ret

-----

\*\*\*\*\*

\*\*\*\* SUBROUTINA QUE RECIBE UNA TRAMA DE 6 BYTES \*\*\*\*\*

;

;Envía trama desde memoria RAM, con verificación de error

;

\*\*\*\*\*

RECIBE\_TRAMA:

```
push tem
```

```
push tem2
```

recepción:

```
ldi YH, high(tramaR)
```

```
ldi YL, low(tramaR)
```

```
clr tem
```

```
;Recibe primer dato
```

```
cli
```

```
recibir:
```

```
rcall recibe_dato
```

```
st y+, dato
```

```
inc tem
```

```
cpi tem, 4
```

```
brne recibir
```

Analisis\_cabecera:

```
ldi YH, high(tramaR)
```

```
ldi YL, low(tramaR)
```

```
ld tem2, y+
```

```
cpi tem2, 'l'
```

```
brne error_recepcion
```

Verifica\_error:

```
ld tem, y
```

```

cpi tem, $80          ;Compara con su dirección para
                      ;verificar que el mensaje es
                      ;para el maestro

```

```
brne error
```

Cabezera\_correcta:

```
ldi YH, high(tramaR)
```

```
ldi YL, low(tramaR)
```

```
ld tem2,y+
```

```
ld tem,y+
```

```
eor tem,tem2
```

```
ld tem2,y+
```

```
eor tem,tem2
```

```
ld tem2, y
```

```
cp tem2, tem
```

```
breq buena_recepción
```

```
;check=1 significa mala recepción
```

error\_recepcion:

```
ldi error, 1          ;Hubo error en la recepción
```

buena\_recepción:

fin\_recibe:

```
clr cont
```

```
pop tem2
```

pop tem

ret

```

.*****
;
;*****          Efecto Direccionado          *****;
;
; **Subrutina que manda instrucciones para cualquier efecto
; **del tipo direccionado.
.*****
;

```

EFFECTO\_DIR: ;Efecto basado en direccionamiento de CPUs

push r16

ldi direccion, 1 ;Apunta al primer CPU, del 1..20

rcall retardo\_10ms

envio\_efecto:

rcall retardo\_10ms

rcall envia\_trama

sei

espera\_recibir:

cpi cont, 8

breq no\_responden

cpi rx, \$ff

breq recibir\_trama

rjmp espera\_recibir

recibir\_trama:

```
cli
clr rx

rcall recibe_trama
cpi error,0 ;Verifica si se ha producido algún error
breq siguiente_CPU
rjmp fin_efecto
```

no\_responden:

```
SBI PORTC, PC2
clr cont

siguiente_CPU:
inc direccion ;Se direcciona a todos los CPU
cpi direccion, 20
breq fin_efecto
rcall retardo_1s
rjmp envio_efecto
fin_efecto:
```

```
pop r16
```

ret

```
.*****
,
*****
,***** EFECTO GLOBAL *****
,
,**Subrutina que manda instrucciones para cualquier efecto
```

;\*\*del tipo Global, es decir envia a todos los CPUs.

.\*\*\*\*\*  
;

EFFECTO\_GLOBAL:

Idi dirección, \$FF ;Esta dirección es recibida por todos los CPU esclavos del sistema (dirección global)

Enviar\_efecto:

```
sbi portc, pc5
rcall envia_trama

rcall retardo_10ms
cbi portc,pc5
```

ret

.\*\*\*\*\*  
;

.\* CONFIG-TMR1  
;

.\* \*  
;

.\* Configura el TIMER1 en el modo 1 Normal

.\* Timer funciona como un contador hasta \$FFFF

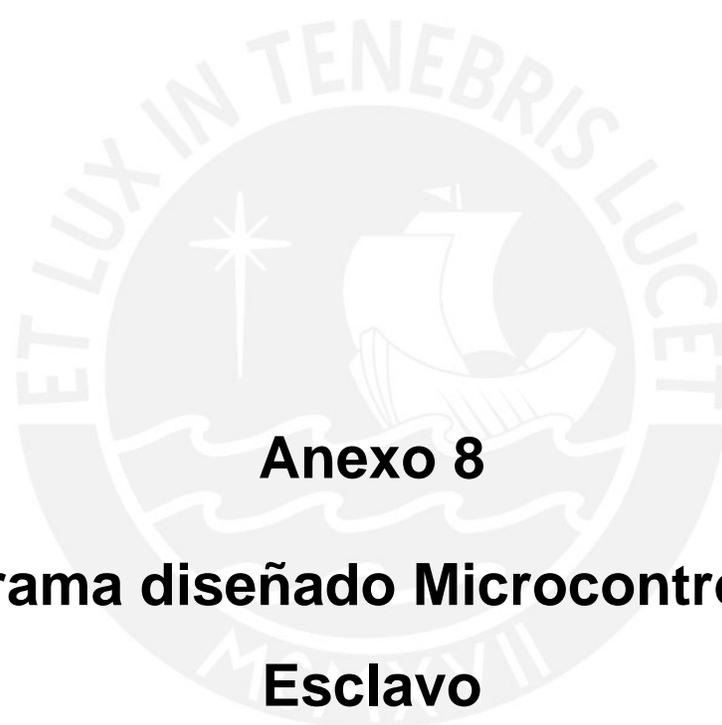
.\*\*\*\*\*  
;

CONFIG\_TMR1:

;Temporizador un modo normal

```
push r16
ldi R16,(1 << COM1A1) | (0 << WGM11) | (0<<WGM10) ;
out TCCR1A,R16
;pre-escalador módulo 1, modo normal
ldi R16,(0 << WGM13) | (0<<WGM12) | (1<<CS10)
out TCCR1B,R16
ldi R16,high($FFFF)
out ICR1H,R16
ldi R16,low($FFFF)
out ICR1L,R16 ;
ldi R16,$FF ; pin PB1 (OC1A) salida
out DDRB,R16
LDI R16, (1<<TOIE1) ; Habilitamos interrupción TIMER1 TOV1
OUT TIMSK, R16
pop r16
```

ret



## **Anexo 8**

# **Programa diseñado Microcontrolador Esclavo**

A continuación se presenta el programa diseñado en lenguaje Assembler:

```
; TESIS: CONTROL MAESTRO-ESCLAVO PARA SISTEMA DE ILUMINACION CON  
POWER LEDS
```

```
; CONTROL ESCLAVO - CPU #1 (1/20)
```

```
;AUTHOR: Sergio Román
```

```
.include "C:\VMLAB\include\m8def.inc"
```

```
.def rx=r17
```

```
.def check=r18
```

```
.def temp2=r19
```

```
.def temp=r20
```

```
.def dato= r21
```

```
.def cont=r22
```

```
.def dirección=r23
```

```
.def comando=r24
```

```
.def CPU=r25
```

```
.dseg
```

```
.org $60
```

```
trama: .byte 4 ;Trama a enviar
```

```
tramaR: .byte 4 ;Trama recibida
```

```
.CSEG
```

```
.org $0
```

```
rjmp Inicio
```



.org \$8

rjmp Tov

.org \$B

rjmp RXS

encabezado:

.db 'l',0

```

*****
*
.*
; Interrupción TOV *
.* Interrumpe cada 28ms aproximadamente *
*****
;
    
```

TOV:

push R16 ; Se salva en pila R16 y SREG.

in R16,SREG

push R16

inc cont

pop R16

out SREG,R16

pop R16 ; Se recupera de pila SREG y R16.

RETI

```

.*****
,
;*
,           Interrupción Recepción
;* Interrumpe cada vez que recibe un dato por el puesto serial
.*****
,
    
```

RXS:

push R16 ; Se salva en pila R16 y SREG.

in R16,SREG

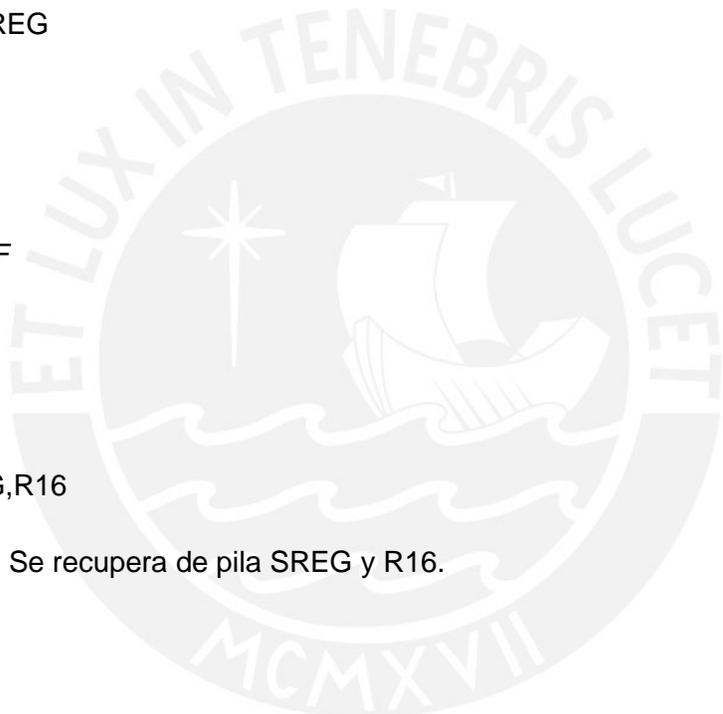
push R16

Idi rx, \$FF

pop R16

out SREG,R16

pop R16 ; Se recupera de pila SREG y R16.



RETI

```

.*****          PROGRAMA PRINCIPAL          *****
,
.*****
,
    
```

Inicio:

Idi R16, HIGH(RAMEND) ; Inicializamos la pila

out SPH, R16

Idi R16, LOW(RAMEND)

out SPL, R16

sbi ddrb,pb1 ;salida del temporizador 1 (pwm no invertida)

sbi ddrb,pb3

ldi CPU, 1 ;CPU addressing

RCALL Inicializacion

RCALL config\_usart

RCALL CONFIG\_TMR1

RCALL CONFIG\_TMR2

Principal:

clr check

rcall recepción

cpi check, 'e' ;Error cuando check=e

breq Principal

Analisis\_direccion:

ldi YH, high(tramaR)

ldi YL, low(tramaR)

ldd direccion,y+1

cp direccion, CPU

breq efecto\_direccionado

cpi direccion, \$FF

breq efecto\_global

rjmp principal

efecto\_direccionado:

rcall cero\_duty

sbi portc, pc0

ldi dirección, \$80 ;Dirección del maestro

ldi comando, \$FF ;Mensaje de confirmación

rcall mensaje\_correcto ;subrutina que indica que el código  
enviado esta correcto

sbi portc, pc1

rcall efecto\_dir

rjmp principal

efecto\_global:

rcall cero\_duty

rcall efecto\_glob

cli

clr rx

rcall cero\_duty

fin:

rjmp Principal

```

.*****
,
.*****          INICIALIZACION          *****
,
;* Configura la pila, las E/S, inicializa variables  *
.*****
,

```

Inicializacion:

SBI DDRC, PC0

SBI DDRC, PC1

sbi ddr, pc2

sbi ddr, pc3

sbi ddr,pc4

SBI DDRB, PB3 ;salida del temporizador 2 (pwm no invertida), como salida

SBI DDRB, PB1 ;salida del temporizador 1 (pwm no invertida)

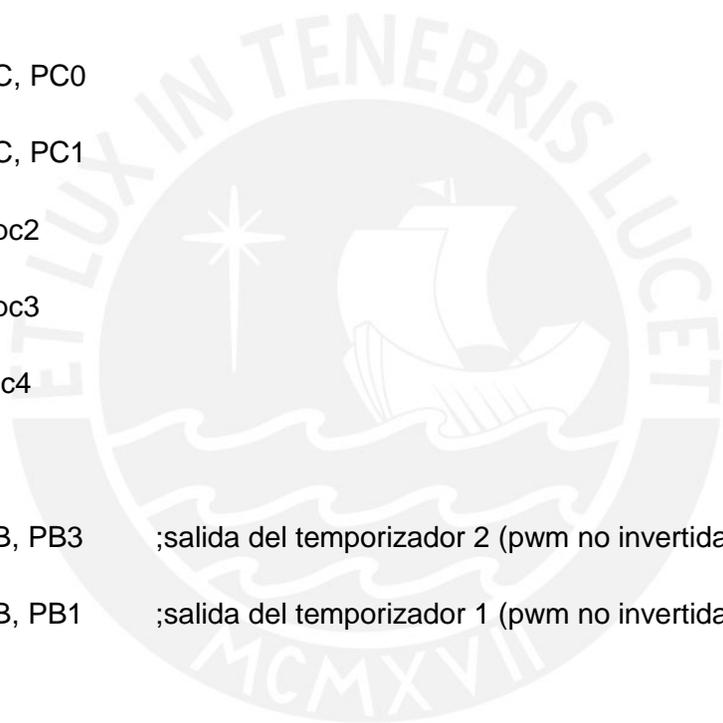
SBI DDRC, PC5 ;Salida enable

CBI PORTC, PC5 ;Configurado como recepción

CLR temp

CLR rx

CLR cont



RET

```

*****
;
;
;*
;
;*Subrutina que sirve para configurar el Usart ESCLAVO (MPCM deshabilitado)
*****
;
config_usart:

    push r16

    ldi r16,high(12)    ; frecuencia 8MHZ , velocidad 9600

    out UBRRH,r16

    ldi r16,low(12)

    out UBRRL,r16

    ;velocidad doble,

    ldi R16,(1<<U2X) ; U2X=1.

    out UCSRA,R16

    ;Comunicación asíncrona, paridad par, 2 bit de parada, 8 bits

    ldi R16,(1<<URSEL | 0<<UMSEL | 0<<UPM1 | 0<<UPM0 | 0<<USBS | 1<<UCSZ1
    | 1<<UCSZ0)

    out UCSRC,R16

    ;interrupciones de comunicación deshabilitadas, Rx habilitado,TX habilitado

    ldi R16,(1<<RXEN|0<<UCSZ2|1<<TXEN|1<<RXCIE)

    out UCSRB,R16

    pop r16
  
```

RET

```
.*****
, RECIBE_DATO *****
```

```
.*
,
```

```
;*Subrutina que recibe un dato por el puerto serial
```

```
.*****
,
```

```
recibe_dato:
```

```
sbis UCSRA,RXC
```

```
rjmp recibe_dato
```

```
in dato, UDR
```

```
ret
```

```
.***** ENVIA_DATO *****
```

```
.*
,
```

```
;*Subrutina que envía un dato por el puerto serial
```

```
.*****
,
```

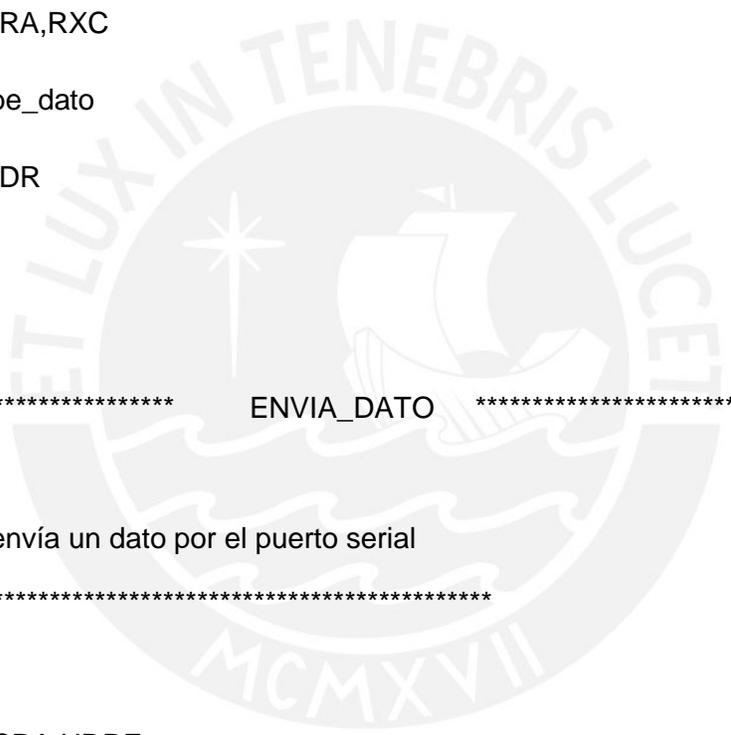
```
envia_dato:
```

```
sbis UCSRA,UDRE
```

```
rjmp envia_dato
```

```
out UDR, dato
```

```
ret
```



```
*****
;
```

```
***** CONFIG-TMR1 *****
```

```
.*
;
```

```
.* Configura el TIMER1 para PWM a 500Hz
```

```
.* Preescalamiento: 1
```

```
.* Periodo definido por ICR1A, Y dUTY CYCLE POR OCR1A
```

```
*****
```

```
CONFIG_TMR1:
```

```
    ;Temporizador uno modo PWM rápido
```

```
    push r16
```

```
    ;Clear OC1A on compare match / FAST PWM modo 14
```

```
    ldi R16,(1 << COM1A1) | (1 << WGM11) | (0<<WGM10) ;
```

```
    out TCCR1A,R16
```

```
    ;pre-escalador módulo 1
```

```
    ldi R16,(1 << WGM13) | (1<<WGM12) | (1<<CS10)
```

```
    out TCCR1B,R16
```

```
    ldi R16,high($0) ;Permite variar el duty cycle
```

```
    out OCR1AH,R16
```

```
    ldi R16,low($0) ;Empieza en 0
```

```
    out OCR1AL,R16
```

```
    ldi R16,high($7D0)
```

```

out ICR1H,R16

ldi R16,low($7D0)

out ICR1L,R16 ;$7D0 = 2000

ldi R16,$FF ; pin PB1 (OC1A) salida

out DDRB,R16

LDI R16, (1<<TOIE1) ; Habilitamos interrupción TIMER1 TOV1

OUT TIMSK, R16

pop r16

ret

;*****
;
;***** CONFIG-TMR2 *****
;
; *
;
;* Configura el TIMER2 para una frecuencia de 500Hz *
;
;* Preescalamiento: 8 *
;*****
;
config_tmr2:

push r16

ldi r16, (1<<WGM20)|(1<<COM21)|(1<<WGM21)|(1<<CS21) | (0<<CS20)

out tccr2,r16

ldi r16,($0) ;El valor de OCR2 permite variar el duty cycle, 0%

out ocr2,r16

pop r16

```

ret

```
*****
;
```

```
***** AUMENTA DUTY CYCLE *****
;
```

```
.*
;
```

; Subrutina que permite incrementar el duty cycle de las ondas PWM en 5%

```
*****
;
```

Aumenta\_duty:

push r16

push r17

push r18

IN R17, OCR1AL

IN R18, OCR1AH

CPI R18, \$7

BRSB no\_aumenta

ldi r16,low(\$c8)

add r17,r16

ldi r16,high(\$c8)

adc r18,r16

OUT OCR1AH, R18

OUT OCR1AL,R17

clr cont

rjmp fin\_aumentaduty



no\_aumenta:

ldi cont,255

ldi temp,50

fin\_aumentaduty:

pop r16

pop r17

pop r18

RET

```

*****
,
***** REDUCE DUTY CYCLE *****
,
.*
,
; Subrutina que permite reducir el duty cycle de las ondas PWM en 5%
*****
,
    
```

Reduce\_duty:

push r16

push r17

push r18

IN R17, OCR1AL

IN R18, OCR1AH

CPI R18,0

;Se limita el duty cycle

BREQ no\_baja

Sigue\_bajando:

ldi r16,low(\$19)

sub r17,r16

ldi r16,high(\$19)

sbc r18,r16

OUT OCR1AH, R18

OUT OCR1AL,R17

clr cont

rjmp fin\_reduceduty

no\_baja:

cpi r17, 0

breq nobaja2

rjmp sigue\_bajando

nobaja2:

ldi cont,254

fin\_reduceduty:

pop r16

pop r17

pop r18

ret

```

;*****
;
;***** RECEPCIÓN *****
;
;.*
;
;.*Subrutina que recibe un dato y verifica que sea correcto
;
;.*
;*****
;

```

Recepción:

```

push temp
push temp2

Idi YH, high(tramaR)
Idi YL, low(tramaR)

clr temp

```

Recibir:

```

rcall recibe_dato

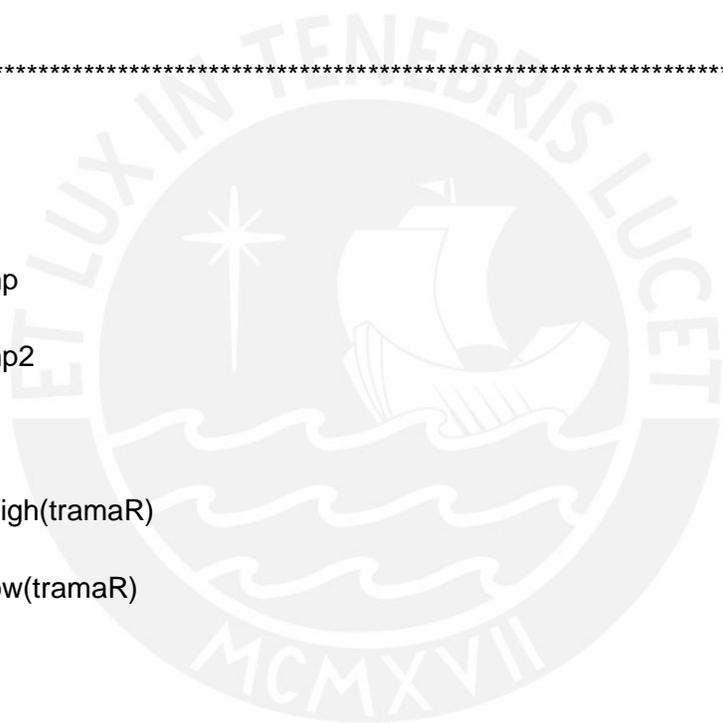
st y+, dato

inc temp

cpi temp, 4

brne recibir

```



Analisis\_cabecera:

Idi YH, high(tramaR)

Idi YL, low(tramaR)

Id temp2, y+

cpi temp2, 'l'

brne error\_recepcion

Cabezera\_correcta:

Idi YH, high(tramaR)

Idi YL, low(tramaR)

Id temp2,y+

Id temp,y+

eor temp,temp2

Id temp2,y+

eor temp,temp2

Id temp2, y

cp temp2, temp

brne error\_recepcion

rjmp buena\_recepcion



error\_recepcion:

    ldi check, 'e'        ;check se carga con la 'e' de error

buena\_recepcion:

    pop temp2

    pop temp

ret

```

;*****
;
;***** EFECTO 1 DIRECCIONADO *****
;
;
;Subrutina que reproduce un efecto direccionado, en este caso es
;el efecto 1. Se emite una señal de respuesta para verificación
;*****
;

```

efecto\_dir:

    push r16

    clr cont

    ldd comando,y+2

    cpi comando, 1

    breq cont\_efecto

    rjmp otro\_ef

cont\_efecto:

Inicia\_PWM:

Continua\_compara:

clr check

sei

Compara:

sei

cpi rx, \$FF

breq llego\_msj

cpi cont, 200

brne Esperar ;por timer TOV, cada 0.5sec aumenta en un 5%  
;Cuando contador llega a 255 acaba el ciclo

rcall Aumenta\_duty

Esperar:

cpi temp, 50 ;Cuando rx=50, el duty cycle esta al máximo

breq fin\_efectodir

rjmp compara

llego\_mensaje:

cli

rcall recepción

cpi check, 'e'

breq continua\_compara

ldi YH, high(tramaR)

ldi YL, low(tramaR)

ldd direccion,y+1

cp direccion, CPU

breq nuevo\_ef

cpi direccion, \$FF

breq nuevo\_ef

clr rx

sbi portc, pc3

rjmp continua\_compara

otro\_ef:

;Queda disponible para agregar nuevos efectos

nuevo\_ef:

sbi portc,pc4

clr check

fin\_efectodir:

sbi portc,pc2

clr cont

cli

pop r16

ret

```

.*****
,

```

```

.***** EFECTO GLOBAL *****
,

```

```
;
```

;Subrutina que reproduce un efecto global , en este caso

; todos los CPUs son activados, y no emiten una señal de respuesta

```

.*****
,

```

Efecto\_glob:

```
push r16
```

```
ldd comando,y+2
```

```
cpi comando, 2 ;efecto 2
```

```
breq cont_efecto2
```

```
rjmp fin2
```

cont\_efecto2:

Inicia\_PWM\_glob:

```
sbi portc, pc0
```

```
sbi portc, pc1
```

```
sei
```

```
LDI R16, (1<<TOIE1) ; Habilitamos interrupción TIMER1 TOV1
```

```
OUT TIMSK, R16
```

Reinicio:

```
clr cont
```

Compara2:

```
sei  
  
cpi rx, $ff  
  
breq fin2  
  
cpi cont, 200  
  
brne Esperar2 ;por timer TOV  
  
rcall Aumenta_duty
```

Esperar2:

```
cpi cont, 255 ;Cuando contador llega a 255 acaba el ciclo  
  
breq reducir2  
  
rjmp compara2
```

Reducir2

```
cpi rx, $ff  
  
breq fin2  
  
cpi cont, 200  
  
brne Reducir2  
  
rcall reduce_duty
```

Esperar3:

```
cpi cont,254  
  
breq Reinicio  
  
rjmp Reducir2
```

fin2:

clr cont

cli

pop r16

RET

```

*****
;
;***** MENSAJE CORRECTO *****
;
;
;Subrutina que envia una trama al maestro, indicandole que es
;correcta la trama enviada, y que la está procesando.
*****
;

```

Mensaje\_correcto:

push temp

push temp2

push check

ldi YH, high(trama)

ldi YL, low(trama)

ldi ZL,low(encabezado\*2)

ldi Zh,high(encabezado\*2)

sigue:

lpm dato,Z+

```
    cpi dato,0  
  
    breq fin_cabecera  
  
    st y+, dato  
  
    rjmp sigue
```

fin\_cabecera:

Direccion:

```
    st y+, direccion  
    st y+, comando
```

Analisis\_error: ;Se procede a hacer un XOR de toda la trama

```
    ldi YH, high(trama)  
    ldi YL, low(trama)
```

```
    clr temp2  
  
    ld temp,y+  
  
    ld check,y+  
  
    eor check,temp  
  
    ld temp,y+  
  
    eor check,temp  
  
    st y,check
```

Envio\_trama:

ldi YH, high(trama)

ldi YL, low(trama)

clr temp2

rcall retardo\_10ms

SBI PORTC, PC5 ;Habilita transmisión

sigue\_enviando:

ld dato, y+

rcall envia\_dato

inc temp2

cpi temp2, 4

brne sigue\_enviando

rcall retardo\_10ms

CBI PORTC, PC5 ;Habilita recepción

pop check

pop temp2

pop temp

RET

.\*\*\*\*\*  
;

.\*\*\*\*\* RETARDO \*\*\*\*\*

.\*\*\*\*\* Duracion de aproximadamente de 11ms

.\*\*\*\*\*  
;

RETARDO\_10MS:

PUSH R16

PUSH R17

ldi r16,\$63 ;1 ciclo

lazo01: ldi R17,\$A

lazo02:

nop

nop

nop

nop

nop

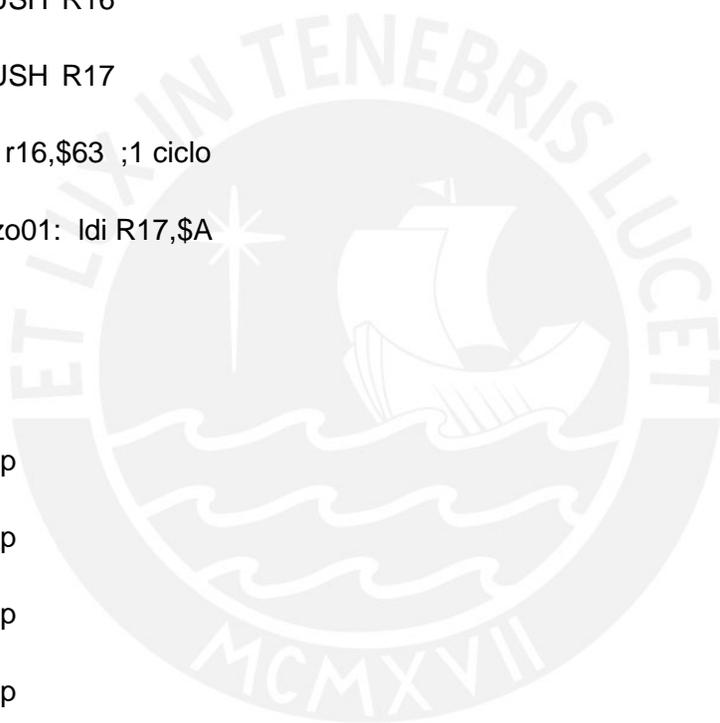
nop

dec r17

cpi r17,0

brne lazo02

nop



nop

nop

nop

nop

nop

dec r16

cpi r16,0

brne lazo01

POP R17

POP R16

RET

```

;*****
;
;***** CER0 DUTY CYCLE *****
;
;

```

;Subrutina que pone en cero el duty cycle de la onda PWM de salida.

```

;*****
;

```

cero\_duty:

push r16

push r17

clr r16

clr r17

OUT OCR1AH, R18

OUT OCR1AL,R17

pop r17

pop r16

RET

