



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 UN SISTEMA DE ILUMINACIÓN
PARA ESPACIOS PUBLICITARIOS PEQUEÑOS USANDO
LEDS DE POTENCIA RGB**

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

Carlo Manuel Lara Alvarado

ASESOR: Willy Eduardo Carrera Soria

Lima, Mayo del 2009

RESUMEN

Debido al acelerado desarrollo de los semiconductores, en los últimos 15 años, se ha logrado dejar de usar a los LEDs como simplemente fuentes de señalización en diversas aplicaciones minúsculas, por ejemplo en los muy conocidos displays de 7 segmentos o como puntos brillantes en los teclados y circuitos electrónicos, para pasar con fuerza al ámbito de la iluminación. Es así, como grandes empresas internacionales han fijado su interés en el desarrollo y afianzamiento en el mercado de los llamados LEDs de potencia o alto brillo, dado que, como su nombre lo indica, han llegado a multiplicar su capacidad de generar luz y mejorar su eficiencia luminosa hasta el punto de competir y superar otros tipos tradicionales de fuentes de iluminación.

Es por estas razones, que el objetivo de este trabajo de tesis es diseñar un sistema de iluminación usando LEDs de potencia RGB para espacios publicitarios de tamaño pequeño, ya que el ámbito de la publicidad es un mercado donde se permite aplicar todo el potencial de una nueva tecnología de iluminación multicolor.

La presente tesis incluye el diseño electrónico de un sistema de iluminación que permite la interacción con un usuario que puede elegir diferentes colores e intensidades luminosas para un espacio publicitario, la verificación de la propuesta se comprueba mediante simulaciones realizadas sobre los circuitos de potencia y el programa de control.

INTRODUCCIÓN

Durante muchos años, la luminotecnia estuvo centrada en el estudio de la visión, es decir, determinar cuanta luz se necesita para cada tarea y los métodos o medios para lograr esos niveles de iluminación. El creciente costo de la energía lleva a los fabricantes de luminarias y equipos auxiliares a dar soluciones cada vez más económicas y eficientes. La función de la luz va mucho más allá de simplemente ver, genera actitudes en la gente y transmite mensajes subliminales; un claro ejemplo lo tenemos en una tienda moderna y bien iluminada: no sólo la mercadería se aprecia en toda su calidad, sino que se generan espacios que atrapan al visitante para que se sienta a gusto y pueda elegir sin apuros, comunicándole una imagen de alta jerarquía al tiempo que detalles decorativos le dan "movimiento" al ambiente.

Desde la última década del siglo pasado se vienen realizando grandes avances en la tecnología de iluminación basada en semiconductores de estado sólido como el LED (acrónimo del inglés Light-Emitting Diode), se ha logrado aumentar su eficiencia luminosa y prolongar el tiempo de vida útil promedio a niveles comparables con tipos de iluminación tradicionales. Es por estas razones que la iluminación basada en LEDs se perfila en convertirse el reemplazo de una amplia gama de lámparas convencionales

Por los motivos antes expuestos, es que la presente tesis tiene como objetivo el diseño de un sistema de iluminación usando LEDs de potencia RGB para avisos publicitarios de tamaño pequeño. Tomando como punto de partida, la necesidad del ámbito comercial de estar siempre innovando, se aprovecha la iluminación de un espacio publicitario para tener el requerimiento de obtener los colores primarios de la luz (rojo, verde, azul), así como la variación de intensidad luminosa de cada uno de estos, también, la generación de los colores secundarios (amarillo, magenta, cian) y por último, conseguir el blanco.

El siguiente documento se divide en cuatro capítulos. El primero de ellos hace una breve introducción al concepto de iluminación publicitaria, haciendo hincapié en el proceso del desarrollo un sistema de iluminación para un espacio publicitario, y concluye con la declaración del marco problemático que se afronta en esta tesis.

En el segundo capítulo se presentan los distintos tipos de iluminación que se usan frecuentemente, así como el estado actual de la tecnología LED; también se menciona los diferentes conceptos básicos alrededor de la luminotecnica y se definen los objetivos puntuales de esta tesis.

El tercer capítulo muestra el diseño del sistema de iluminación, tanto la parte electrónica como la programación que se proponen para dar solución al desarrollo del mismo.

En el último capítulo se hace la simulación de las diferentes partes del sistema de iluminación, luego se presenta un análisis de los resultados y el costo total del proyecto.

Al final de la propuesta se encuentran las conclusiones y recomendaciones que se obtienen del trabajo realizado, también se presentan las referencias citadas y en los anexos se adjuntan las hojas de datos de los componentes elegidos y explicaciones complementarias del proceso de diseño.

CAPÍTULO 1

ILUMINACIÓN PUBLICITARIA

La iluminación orientada a la publicidad se basa en un punto de vista subjetivo, siempre tomando en cuenta que es parte de un proceso en el cual se ve involucrada toda una campaña comercial o publicitaria de determinado producto o marca. En el presente capítulo se presenta una breve visión de la iluminación publicitaria a nivel local y externa, así como un modelo del desarrollo de un espacio comercial y por último la declaración del contexto problemático, sobre la cual se desarrolla esta tesis.

1.1 Características de contexto general para el desarrollo de la actividad a nivel global y local

El uso de displays¹ en la actividad comercial, se remonta a épocas antiguas en las cuales se basaba en una simple exposición de los productos a ofrecer, esto hoy en día no ha variado mucho en su concepto de fondo, pero sí se observa un cambio en los medios que se utilizan para llegar a conectar un producto o marca con el público destinatario. El objetivo fundamental de la publicidad es siempre presentar un mensaje o idea con el cual persuadir al potencial usuario o comprador a adquirir un producto.

La iluminación publicitaria a nivel mundial sigue una línea similar a la iluminación residencial, con la excepción que es muy común el uso de las lámparas halógenas al igual que los fluorescentes e incandescentes. En la actualidad, la competencia dentro de los mercados comerciales lleva a la necesidad de innovar constantemente para poder publicitar un determinado producto, esta es una de las

¹ Soporte en que se exhibe un producto con fines publicitarios. Diccionario de la Lengua Española - Vigésima segunda edición, 2001.

razones por la cual se está tomando como una nueva herramienta de iluminación publicitaria al LED de potencia.

En Lima se experimentó desde la década pasada una revitalización notoria en el sector de publicidad y marketing, esto debido a que nuevos comercios y empresas de servicios se instalaron, aparecieron entidades nacionales y llegaron cadenas extranjeras, se desarrollaron rubros inéditos y unos cuantos antiguos resurgieron y evolucionaron para adaptarse a las demandas de un público diferente; la actividad comercial y la consecuente actividad proyectiva generada a partir de ella han permitido que en el campo del diseño publicitario se refinen soluciones funcionales, constructivas y se tienda a experimentar e innovar; ya que la mayor parte de estos encargos deben concluirse en corto tiempo, lo que ofrece la oportunidad de evaluar los resultados prontamente y contrastar los logros con las intenciones. [1]

1.2 Proceso de iluminación de espacios publicitarios pequeños.

Los proyectos en el campo comercial suelen realizarse dentro de estructuras ya existentes, además muchos de ellos se generan o derivan de una imagen corporativa, también pueden responder a una temática determinada orientada a un usuario específico; todas estas exigencias se sobreponen a principios fundamentales del diseño como la iluminación, la escala, la proporción, la funcionalidad, y aspectos constructivos. [1]

En el procedimiento del diseño de un display, se tiene que seguir el esquema presentado en la figura 1.1 (visualizar la siguiente página), en este se expone el planteamiento de la iluminación de un objeto pequeño, así como las consideraciones que se debe tomar en cuenta conforme se va desarrollando un proyecto de iluminación publicitario cualquiera.

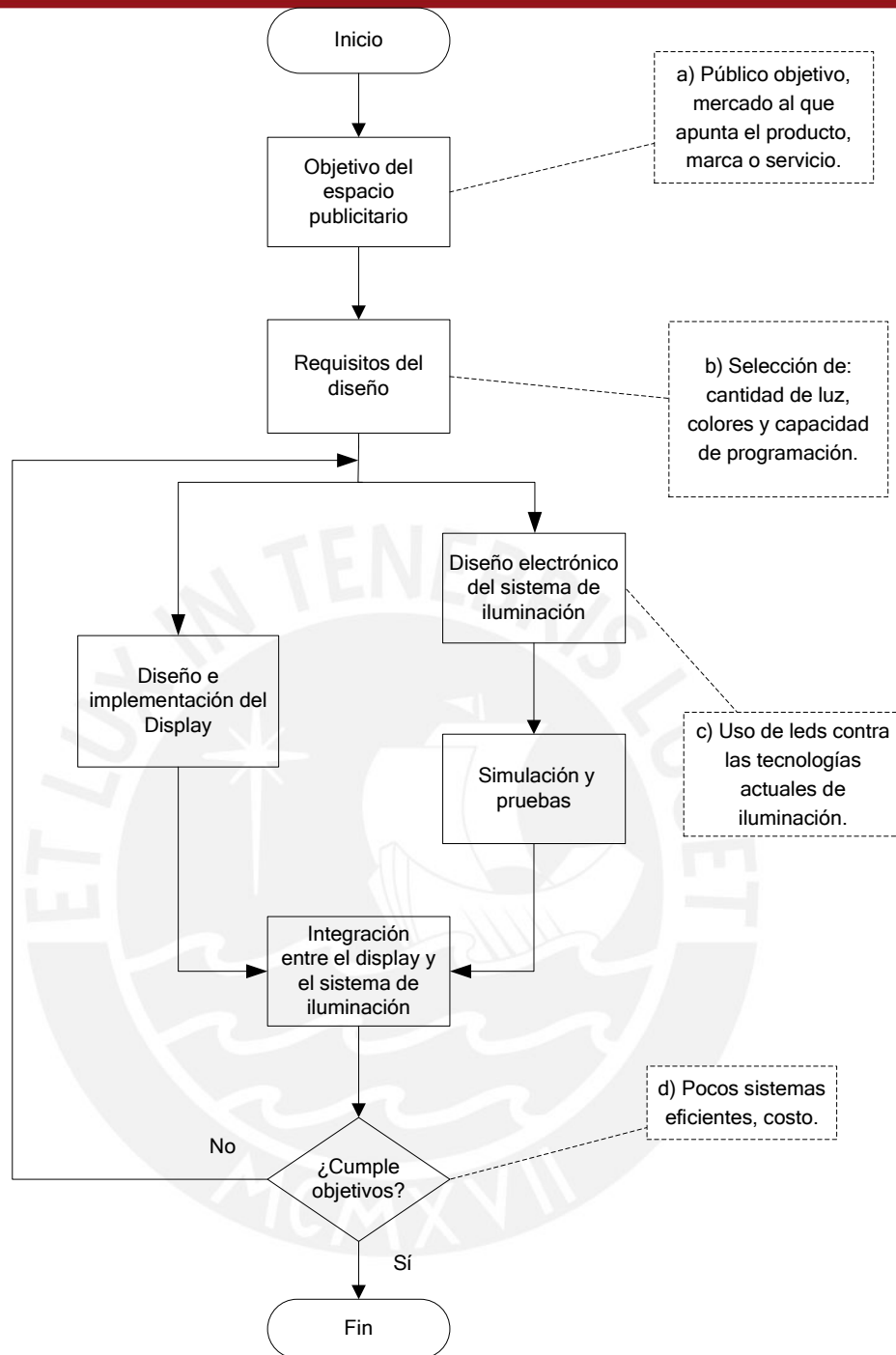


Figura 1.1 Diagrama de flujo de la elaboración de un display publicitario

Los puntos más resaltantes que se observan en el diagrama de flujo son:

- a) El esquema empieza con la identificación del objetivo del espacio publicitario; para lograr esto, se toma en cuenta si el producto es de primera necesidad o de lujo, con lo cual se analiza el público al que va dirigido y el mensaje que se desea transmitir; también, se toma en cuenta la ubicación del display, toda vez

que la publicidad puede estar situada en la parte interna o externa de un local comercial.

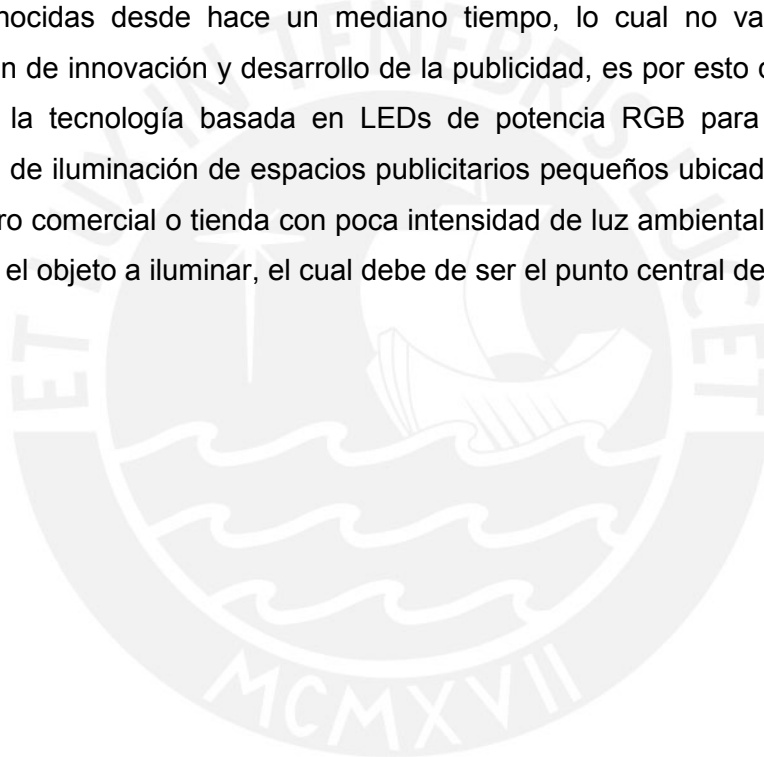
- b) En este paso del proceso, se definen las condiciones necesarias para la elaboración de cualquier espacio publicitario, se consideran las dimensiones del lugar donde se situará el display, la altura del recinto (tienda o centro comercial) y la cantidad de luz ambiental presente en el lugar. Al tener presente todos estos requisitos, se diseña el display y se toma la decisión de un adecuado sistema de iluminación, tanto en los aspectos de distribución, intensidad y difusión de la luz. Esta labor recae en un especialista en la materia, ya que de esto depende el aspecto visual del producto a iluminar, de acá también se desprende la labor de elegir el tipo de luminaria adecuada al diseño planteado. [2]
- c) En esta etapa se realiza el diseño electrónico del sistema de iluminación. En la presente tesis se propone el uso de LEDs de potencia como fuente de luz de espacios publicitarios; la consecuencia de la poca difusión en nuestro país del uso de los LEDs en el ámbito de iluminación, produce una falta de conocimiento acerca de los beneficios que tienen frente a otros dispositivos convencionales; una de las características más importantes es la flexibilidad, la cual se refleja en la posibilidad de cambios programables de color de los LEDs RGB, con lo cual se cubrirían los variados colores que demandan la iluminación de un display.
- d) Luego de la integración del display con la iluminación diseñada para este, se debe de analizar si el objetivo del diseñador o escaparartista² que propuso el diseño final del mismo cumple sus requisitos. Otros aspectos que se debe tomar en cuenta, es la clase de lámparas que se usa, con lo cual se tiene que considerar la eficiencia energética que posee la fuente de luz; en la actualidad se puede llegar a tener un precio relativamente alto considerando la capacidad de iluminación en espacios publicitarios, para esto se tiene que considerar el funcionamiento durante las 24 horas o solo fracciones de esta; en el siguiente trabajo, al considerarse displays publicitarios de tamaño pequeño, el consumo

² Persona encargada de disponer artísticamente los objetos que se muestran en los escaparates. Diccionario de la Lengua Española - Vigésima segunda edición, 2001.

de energía eléctrica disminuye enormemente debido a la limitación del espacio sobre el cual se va enfocar la iluminación.

1.3 Declaración del Marco Problemático

En la iluminación publicitaria se usa principalmente lámparas halógenas, dado que el nivel de reproducción del color debe ser alto debido al interés de resaltar los colores de un determinado producto o marca, también se usan las lámparas incandescentes y fluorescentes dependiendo del diseño que se tiene del display. En general las características y la eficiencia de las actuales lámparas para este uso son conocidas desde hace un mediano tiempo, lo cual no va a la par con la intención de innovación y desarrollo de la publicidad, es por esto que se propone el uso de la tecnología basada en LEDs de potencia RGB para el diseño de un sistema de iluminación de espacios publicitarios pequeños ubicado en el interior de un centro comercial o tienda con poca intensidad de luz ambiental, esto, para poder resaltar el objeto a iluminar, el cual debe de ser el punto central de todo el diseño.



CAPÍTULO 2

TECNOLOGÍAS DE ILUMINACIÓN

Las actuales tecnologías de iluminación están sufriendo una revolución debido a la introducción de los semiconductores LED a este ámbito, proponiendo una nueva opción que comparada con las lámparas actuales ofrece ventajas en varios aspectos. En el siguiente capítulo se presenta una pequeña reseña acerca de los tipos de lámparas existentes, así como conceptos relacionados con la iluminación, el modelo teórico, las hipótesis y objetivos de este trabajo.

2.1 Estado del arte

Las lámparas con mayor uso en la iluminación publicitaria de interiores son: las lámparas incandescentes halógenas y los fluorescentes. En el presente subcapítulo se hace una breve reseña de las características más importantes de cada uno de estos tipos de luminaria, así como de las lámparas de descarga y por último de los LEDs de potencia.

2.1.1 Lámparas fluorescentes

Se conocen bajo la designación de lámparas fluorescentes a aquellas lámparas de descarga en atmósfera de mercurio a baja presión en las que la generación de luz se debe, principalmente, al fenómeno de fotoluminiscencia; la descarga en vapor de mercurio a baja presión origina radiación UV ($\lambda = 253.7$ nm), causante de la excitación de la sustancia fluorescente (cesa la luminiscencia cuando cesa el agente excitador) situada en la pared interna del tubo de descarga, emitiendo radiaciones con mayores longitudes de onda.

Los componentes esenciales de toda lámpara fluorescente son los que se citan a continuación:

- Tubo de descarga, hecha de vidrio, opalizada por la sustancia fotoluminiscente, su forma más común es la cilíndrica rectilínea, aunque también se comercializan para ciertas aplicaciones en formas circulares y en forma de U, los diámetros comunes son de 16 mm para tubos de pequeña potencia y 26 mm para los convencionales, trifósforos y alta frecuencia.
- Electrodo, son los conectores a los extremos del tubo de descarga.
- Gas de relleno, los gases habitualmente usados en los tubos de descarga son: una mezcla de argón y neón, criptón en las lámparas trifósforos y una generosa dosis de mercurio por parte de las sustancias fluorescentes empleadas, las cuales pueden ser: halofosfatos de calcio, usada en lámparas que persiguen una buena eficacia luminosa, sin importar mucho el rendimiento del color; fluogermanato de magnesio o silicato de calcio para lámparas con objetivos opuestos al anterior; aluminatos de magnesio y bario activado con europio (emisión azul); aluminatos de magnesio y cerio activado con terbio para la emisión verde y por último óxido de itrio activado con europio para una emisión roja.



Figura 2.1 Lámparas fluorescentes tubulares y compactas
(Modificado de Catálogo de Productos de Iluminación Philips, 2002)

2.1.1.1 Características

El correcto funcionamiento de los tubos fluorescentes depende de los siguientes factores:

- Temperatura de funcionamiento, la máxima emisión se produce cuando la presión del vapor dentro del tubo es de aproximadamente 0.8 pascal, esto

ocurre a una temperatura de funcionamiento de 40°C, en estas condiciones la máxima proporción de radiación emitida es de 96% y se encuentra en una longitud de onda de 253 nm; con mayores temperaturas, la presión del vapor se incrementa, lo cual aumenta las radiaciones de las longitudes de onda y con temperaturas de funcionamiento menores a 40°C, parte del mercurio se condensa, lo cual disminuye las radiaciones emitidas. Existen lámparas fluorescentes con un recubrimiento de indio-mercurio, la cual evita la drástica influencia de la temperatura de funcionamiento, permitiendo emisiones de flujo más estables en un amplio margen de temperaturas.

- Tiempo de vida útil, en una lámpara fluorescente puede llegar a ser de 10 000 horas, esta se acaba cuando se agotan sus electrodos.
- Temperatura de color, abarca desde las tonalidades cálidas (2700– 3100 K), intermedias (380-4500 –K) hasta frías (6500-7500 K), el rendimiento de color va desde un IRC 50 hasta aproximadamente 90, en las lámparas estándar, a medida que aumente este número, disminuye su eficiencia.

La principal limitación que tiene las lámparas fluorescentes es su gran volumen (para ser lámparas a baja presión), lo cual limita su altura de montaje en aplicaciones de iluminación exterior. [3]

2.1.1.2 Tipos de lámparas fluorescentes

- a) **Lámparas fluorescentes compactas**, existen dos tipos de estas, las llamadas “electrónicas” ya que poseen un balasto y arrancador, o también llamado cebador incorporado, concebidas para la sustitución directa de las lámparas incandescentes, sus potencias usuales son 8, 11, 15, 20 y 25 W. El otro tipo posee el arrancador pero no balasto, lo cual exige luminarias especialmente diseñadas, se encuentran en una gama de potencias desde 5 a 26 W y poseen una vida media estimada de 10 000 horas.
- b) **Lámparas fluorescentes estándar**, se usa en lugares con necesidades de reproducción cromática no muy exigentes, las potencias nominales pueden ser de 18, 36, 58 y 70 W con rendimientos en color menores a 75.
- c) **Lámparas trifósforos**, poseen una alta eficacia luminosa y buena reproducción cromática (IRC superior a 80), gama de potencia igual a las anteriores.
- d) **Lámparas pentafósforas**, poseen un IRC mayor a 90, de potencias igual a las estándar.

- e) **Lámparas miniatura**, tienen un diámetro de 16 mm, su gama de potencias es de 4, 6, 8 y 13 W, tienen una vida media de 5000 horas.

2.1.2 Lámparas incandescentes

Las lámparas incandescentes generan luz cuando pasa una corriente eléctrica por una bobina de alambre montada en un bulbo de vidrio relleno de gas o al vacío, este tipo de lámparas tienen valores muy bajos de rendimiento luminoso, transformándose la mayor parte de energía eléctrica consumida en calor, pero cabe resaltar la excelente reproducción cromática que poseen.

Los principales elementos de toda lámpara incandescente son el filamento, la ampolla y el casquillo.

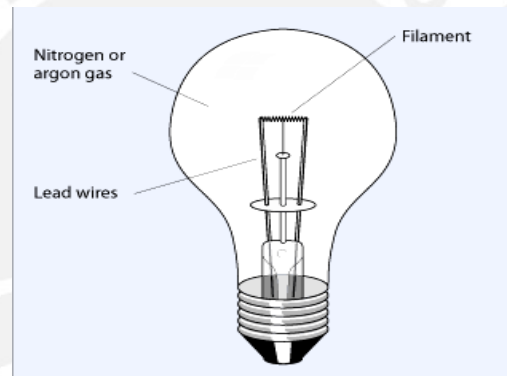


Figura 2.2 Partes de una lámpara incandescente (Biblioteca Digital, 2004)

2.1.2.1 Características

- Vida media, se puede considerar que para este tipo de lámparas no sobrepasa las 3000 horas.
- Depreciación luminosa, el flujo luminoso emitido por una lámpara incandescente no es constante en toda su vida, esto debido al efecto de evaporación; las partículas que se desprenden del filamento se depositan sobre la pared de la ampolla, ennegreciéndola, es por este adelgazamiento progresivo que aumenta la resistencia eléctrica de la lámpara, dificultando el paso de la corriente eléctrica y aumentando la potencia absorbida, lo cual lleva a una baja eficiencia luminosa.
- Influencia de las variaciones de tensión de alimentación, aumentos de la tensión de alimentación con respecto a la nominal ocasionan incrementos en el flujo luminoso emitido, por encima de la potencia consumida, y por tanto aumentos

de eficacia luminosa; pero a costa de una drástica reducción de la vida media estimada de la lámpara; “así por ejemplo, aumentos de un 6% de tensión respecto a la nominal incrementan alrededor de un 20% de su flujo, pero reduciendo la vida del filamento a casi la mitad de la estimada” [3]

2.1.2.2 Tipos de lámparas incandescentes

Algunas características pueden variar de un fabricante a otro.

- a) **Lámparas estándar**, se usa en servicios generales y domésticos, según el casquillo pueden ser tipo E27 y B22 con 15, 25, 40, 50, 75, 100, 150, 200 Y 300 W con flujos luminosos nominales que van desde 90 hasta 4850 lm, también se pueden encontrar otro tipos de casquillos en el mercado, como por ejemplo la E40, menos usados.
- b) **Lámparas estándar opalizadas**, se encuentran en tonos blancos o pastel, presentan un menor deslumbramiento que las anteriores, se encuentran en casquillos E27 y B22 desde 25 hasta 100 W y flujos de 200 hasta 1220 lm respectivamente.
- c) **Lámparas criptón**, llamadas así por el gas con el cual está rellena, lo cual permite un rendimiento luminoso mayor en 10% a las estándar, también se pueden encontrar en los casquillos E27 y B22 con potencias de 25, 40, 60, 75, 100 W y 225, 450, 770, 1000, 1460 lm de flujo luminoso respectivamente.
- d) **Lámparas reflectoras**, la características de estas, son que tienen una ampolla de vidrio soplado de acabado interno reflectante, lo que permite un mayor control del flujo luminoso, pudiendo concentrar el ancho del haz luminoso en un solo sentido; por esta razón se usa mucho en aplicaciones de iluminación por proyección. Se encuentran en casquillos E27 y B22 con un ancho de haz de luz de 35° y 80°, con potencias entre 40 y 150 W.
- e) **Lámparas reflectoras PAR**, compuesta por un reflector aluminizado y por el lente, el cual permite más control luminoso que las lámparas reflectoras normales, los ángulos de concentración del haz de luz son: 12, 15 y 30°, se encuentran en casquillos E27 con potencias de 60, 75, 100 y 150 W.
- f) **Lámparas reflectoras PAR de bajo voltaje**, se alimentan con tensiones de 6, 12 ó 24 V, por lo cual se necesita un transformador individual o por grupo de lámparas. Al estar alimentado por baja tensión aumenta la intensidad de corriente a través del filamento y por tanto mayor eficiencia luminosa, es decir proyecta más luz por vatio sobre los objetos que ilumina, es por esto que su

mayor uso es en alumbrado decorativo de resalte, así como en iluminación de piscinas. Se encuentran en potencias desde 25 hasta 100 W.

- g) **Lámparas halógenas lineales**, al aumentarle yodo al gas de relleno se obtiene un equilibrio en el ciclo de evaporación del filamento de la lámpara, alargando el tiempo de vida de esta. La conexión es directa a la línea de alimentación, sus ampollas son claras y están diseñadas para alumbrado por proyección o iluminación indirecta decorativa. Debido a la condición de una alta temperatura dentro del bulbo, se usa una doble envoltura de cuarzo y vidrio. Se encuentran en potencias desde 70 W hasta 2000W con flujos luminosos de 1350 a 4400 lm respectivamente.
- h) **Lámparas halógenas de bajo voltaje**. Existen en voltajes de 6, 12 y 24 V, el reflector incorporado puede ser metálico o dicróico (refleja la luz y transmite hasta las dos terceras partes de la radiación infrarroja hacia la parte posterior de la lámpara), los ángulos de concentración van desde los 7° hasta los 60° con potencias más usuales de 35, 50 y 75 W; las lámparas de halógeno de tungsteno de bajo voltaje tienen excelente reproducción del color, son pequeñas y son indicadas para iluminar resaltando objetos, iluminaciones decorativas, vitrinas y sobretodo para iluminar objetos que son sensibles al calor (alimentos) u objetos que son sensibles a la acción de los rayos infrarrojos, como por ejemplo telas oscuras exhibidas en los museos. [4]



Figura 2.3 Lámparas incandescentes.
DuraMax 85W Philips y 150PAR General Electric.

2.1.3 Lámparas de descarga

En esta sección se tiene dos tipos de lámparas de descarga, una de vapor de mercurio y otra de sodio.

2.1.3.1 Lámparas de vapor de mercurio

Son lámparas en las que la emisión de radiaciones luminosas se debe a la excitación de mercurio contenidos en tubos de descarga. Existen lámparas de vapor de mercurio de alta presión, de mezcla de halógenos metálicos y de inducción.

1. **Lámparas de mercurio de alta presión**, sus componentes fundamentales son: el tubo de descarga, los electrodos, el gas de relleno y el casquillo. El tiempo de encendido es del orden de los cuatro-cinco minutos y su corriente de arranque puede ser 1.5 a 1.9 veces su corriente nominal. Sus principales ventajas son :

- Eficacia superior a las lámparas incandescentes halógenas, su eficiencia luminosa es de 60 lm/W frente a 20 lm/W de las primarias, para una misma potencia de lámpara. [3]
- Vida útil de aproximadamente 8000 horas, este dato varía dependiendo del fabricante.
- Tiene una buena reproducción de las tonalidades verde, ideal para jardines y áreas verdes.

Como limitaciones se tiene:

- Encendido y reencendido no inmediato.
- Necesidad de sobredimensionar el circuito de alimentación.
- Menor eficacia luminosa frente a otras lámparas de descarga.

2. **Lámparas de luz mezcla**, es una lámpara de vapor de mercurio de alta presión con balasto incluido, sus principales ventajas son:

- Vida útil de 6000 horas.
- Acoplo directo a la red.

Sus principales desventajas son:

- Eficacia luminosa frente a otras lámparas de descarga, 30 lm/W.
- Alta influencia de las variaciones de la tensión de la red.
- Encendido y reencendido no inmediato.

3. **Lámparas de halogenuros metálicos**, la diferencia con las otras de la misma familia es que el tubo de descarga tiene diversos aditivos metálicos, en forma de halógenos; son usadas en interiores, como por ejemplo en salas de venta, escaparates, hoteles, galerías de arte, ferias, etc. En exteriores es recomendable en campos deportivos (sobre todo en aquellos donde se va

transmitir por televisión), calles, edificios y monumentos [5]. Sus principales ventajas son:

- Amplia gama de temperaturas de color (3000 a 6500 K), que permiten su adaptación a diferentes ambientes cromáticos.
- Dimensiones reducidas (tubo de descarga) en las lámparas que no tienen la envolvente de vidrio.
- Alta eficiencia luminosa, hasta 95 lm/W.

Su mayor limitación es:

- Poca vida útil, 2000 a 6000 horas aproximadamente.

2.1.3.2 Lámparas de vapor de sodio

La producción de luz se efectúa como consecuencia de la excitación de átomos de sodio contenidos en el tubo de descarga, existen lámparas de baja y alta presión.

1. **Lámparas de vapor de sodio de baja presión**, su principal empleo es en iluminación de vigilancia de grandes espacios exteriores, también se encuentra en autopistas y carreteras fuera de la zona urbana; sus principal ventaja es:

- Alta eficacia luminosa (200 lm/W).

Entre sus principales desventajas se tienen:

- Rendimiento nulo en color.
- Excesivo volumen de lámpara, lo que dificulta su empleo.
- Apariencia de color cálida.

2. **Lámparas de vapor de sodio de alta presión**, su campo de aplicación es muy amplio, con introducción elevada en las aplicaciones del sodio de baja presión y mercurio de alta presión, sustituyendo a éstas normalmente, también se le usa en interiores en los que se requieran lámparas de descarga de alta intensidad.

Sus principales ventajas son:

- Tiene un mejor rendimiento del color respecto a las lámparas de baja presión.
- Prolongado tiempo de vida útil, desde 8000 hasta 12000 horas aproximadamente.
- Eficiencia luminosa hasta 125 lm/W.

Sus principales limitaciones son:

- Los valores de IRC no se acercan a los conseguidos por las lámparas de halogenuro metálico.

- Apariencia de color cálida, con una temperatura del color desde 1900 hasta 2200 K aproximadamente, que ofrece una cierta sensación de rechazo psicológico cuando se trata de ofrecer altos valores de iluminancia.

2.1.4 LEDs

Con un tamaño de pocos milímetros, los LEDs ofrecen decisivas ventajas gracias a su avanzada tecnología, que los convierte en una alternativa real a las lámparas convencionales en muchas aplicaciones. Los LEDs son semiconductores compuestos que convierten la corriente eléctrica directamente en luz, lo cual permite crear diseños creativos para conseguir soluciones luminosas innovadoras con la variedad de colores que irradian y su reducido tamaño. [6]

El efecto de producir luz con un diodo semiconductor se observó por primera vez en 1907, pero como la luz que proporcionaba era muy pequeña nadie le dio ninguna importancia. Se tuvo que esperar hasta 1962 a que Nick Holonyak, en aquel momento investigador de General Electric redescubriera que los cristales semiconductores podían emitir luz roja (se consiguió una frecuencia de emisión de unos 650 nm con una intensidad relativamente baja, aproximadamente 10mcd a 20mA). Los siguientes desarrollos, ya entrada la década del 70, introdujeron nuevos colores al espectro, así se consiguieron colores verde, ámbar y naranja. También se desarrollaron LEDs infrarrojos, los cuales se hicieron rápidamente populares en los controles remotos de los televisores y otros artefactos del hogar. Ya a mediados de la década de los 90 se usaron nuevos materiales para producir los llamados LEDs de potencia o alto brillo (como por ejemplo: AlInGaP, mezcla de Aluminio, Indio, Galio, Fósforo y también InGaN, mezcla de Galio y Nitrógeno) y así se pudo conseguir una gran gama de colores del espectro visible cambiando la proporción de los materiales que lo componen; su vida útil también aumentó hasta alrededor de 100 000 horas. [7]

Los LEDs son una alternativa válida a las fuentes convencionales de luz en muchas áreas de la iluminación general – y están abiertos también a oportunidades y perspectivas desconocidas hasta ahora. En la actualidad las prestaciones de los LEDs son amplias, poseen una gama de dispositivos que varían de acuerdo a los colores que producen, distribuciones angulares, geometrías y potencia consumidas. Es una revolución que cambia día tras día a un ritmo casi imposible de imaginar, en

países más desarrollados permanentemente se producen lanzamientos y los especialistas van logrando aplicaciones que eran inimaginables poco tiempo atrás. Como menciona el gerente de marketing de OSRAM Argentina, Luis Schmid, “No se puede hablar de un ‘estado del arte’ en la tecnología LED, porque es una revolución que cambia día tras día a un ritmo casi imposible de imaginar” [8]. Como se mencionó antes, intentar explicar todos los tipos de LED, sus configuraciones y características es una labor que quedaría inconclusa, ya que el mercado actual impulsa el constante desarrollo de esta industria, solo se apuntará a mencionar los LEDs que más guardan relación con la presente tesis.

SSL es una nueva forma de llamar a todos los tipos de iluminación basado en LEDs, las siglas provienen de las palabras en inglés “Solid State Lighting” que significa Iluminación en Estado Sólido, el término “sólido” hace referencia al semiconductor del que todo LED esta formado y abarca tanto los LEDs inorgánicos como los oLEDs. [9]



Figura 2.4 LEDs de diferentes colores
(Modificado de LED Professional Review, 2007)

2.1.4.1 Funcionamiento

La estructura básica de un LED es una unión $p-n$ funcionando con corriente directa. Bajo esta corriente los portadores de carga mayoritarios a ambos lados de la unión (electrones o huecos) son capaces de superar la barrera energética debida a la unión y se produce la inyección de portadores. Los portadores mayoritarios son minoritarios al otro lado de la unión y se recombinan con los portadores mayoritarios en procesos radiactivos generando la emisión de luz, en los semiconductores, estos se producen principalmente por tres mecanismos diferentes: transiciones entre bandas, recombinación vía impurezas y recombinaciones por excitaciones (niveles energéticos formados por debajo de la

banda de valencia debidos a la atracción entre un electrón y un hueco en el semiconductor). Para las transiciones entre bandas la longitud de onda de la emisión λ viene dado por:

$$\lambda = \frac{hc}{E_g} \quad (\text{ec 2.1})$$

Donde h es la constante de Planck, c es la velocidad de la luz y E_g es la energía del gap o también llamada “energía de banda prohibida”, es la diferencia entre la banda de valencia y la de conducción del semiconductor. Para obtener radiación en el espectro visible, son necesarias energías del gap iguales o superiores a 2eV. Compuestos inorgánicos de InGaN y SiC son comercialmente empleados para obtener radiación azul, compuestos ternarios como GaAlAs o GaAsP y cuaternarios como el InGaAlP son empleados en la producción de LEDs de diferentes colores con altas eficiencias. Es así como existen dos formas de generar el color blanco, la primera se basa en el concepto de fluorescencia, en la cual a partir de un LED azul se rellena la cubeta donde se encuentra el componente semiconductor con un compuesto de fósforo y la segunda es por integración de los tres colores primarios de la luz.

Cuando no se aplica voltaje al diodo, los electrones libres del semiconductor tipo-n se insertan en los agujeros del semiconductor tipo-p, lo cual forma una zona llamada “zona de agotamiento” por la cual no puede fluir la corriente eléctrica, esta región recibe su nombre derivado del hecho que en ella, básicamente se han agotado todos transportadores de carga, es decir, electrones libres (-) o agujeros (+). Para hacer que la corriente fluya nuevamente es necesario conectar el lado tipo-n del diodo a la terminal negativa de un circuito eléctrico y el lado tipo-p a la terminal positiva, los electrones que vienen del lado negativo repelen a los electrones que se encuentran en los agujeros de la zona de agotamiento lo cual los pone en movimiento hacia el lado tipo-p y a la vez pone a los agujeros en movimiento hacia el lado tipo-n, reestableciendo el flujo de carga. Si se conecta el diodo de forma inversa, es decir, el electrodo del lado tipo-n a la terminal positiva del circuito, los electrones (cargados negativamente) son atraídos hacia la positiva del circuito y los agujeros (cargados positivamente) son atraídos hacia la terminal negativa del circuito, haciendo la zona de agotamiento aun mayor, impidiendo el flujo de carga. [10]

2.1.4.2 Tipos de LED

El desarrollo de los LED blancos abrió la puerta de la iluminación a los LEDs, con lo cual se impulsó el desarrollo de LEDs que puedan satisfacer necesidades como la alta eficiencia luminosa, alto IRC y variación de colores usando LEDs RGB.

Los LEDs de potencia o alto brillo HB (por sus siglas en inglés High Bright) básicamente están compuestos por AlInGaP e InGaN, como su nombre lo indica se caracterizan por el mayor consumo de potencia comparado con los LEDs comunes, que en su mayoría tienen una caída de voltaje de 1.5V y corriente de 20 a 40 mA para consumir aproximadamente 50mW, llegando los LEDs de alto brillo a tener un consumo hasta de 12W y una eficiencia luminosa de 100lm/W. En la actualidad, la mayor parte del mercado de los LEDs de potencia se encuentra en las diversas aplicaciones de telefonía móvil y en menor porcentaje en iluminación arquitectónica, publicitaria y automotriz. La mayoría de LEDs convencionales están hechos de una variedad de materiales semiconductores inorgánicos, los más importantes son:

Tabla 2.1 Compuestos empleados en la construcción de LEDs

Color Asociado	Longitud de Onda [nm]	Compuestos
Infrarrojo	$760 < \lambda < 980$	GaAs, AlGaAs
Rojo	$610 < \lambda < 760$	AlGaAs, GaAsP, AlGaInP
Naranja	$590 < \lambda < 610$	GaAsP, AlGaInP, GaP
Amarillo	$570 < \lambda < 590$	GaAsP, AlGaInP, GaP
Verde	$500 < \lambda < 570$	InGaN, GaP, GaN, AlGaInP
Azul	$450 < \lambda < 500$	ZnSe, InGaN, SiC
Violeta	$400 < \lambda < 450$	InGaN
Ultravioleta	$250 < \lambda < 400$	C, AlN, AlGaN, AlGaInN
Blanco		Diodo azul o UV con capa de fósforo

El tipo de LED que se cubre con una capa electroluminiscente formada por una película de componentes orgánicos, son conocidos como oLED, estos existen en gran diversidad de estructuras y materiales que se han podido idear e implementar para contener y mantener la capa electroluminiscente, también se subdividen según el tipo de componentes orgánicos que utilizan. Las principales ventajas de los oLED son: menor costo, mayor rango de colores, más contrastes y brillos, mayor ángulo de visión, menor consumo y, en algunas tecnologías, flexibilidad. Pero la degradación de los materiales oLED han limitado su uso por el momento. Actualmente se está investigando para dar solución a los problemas derivados, hecho que hará de los oLEDs sea una tecnología que puede reemplazar por

ejemplo, la actual hegemonía de las pantallas LCD (TFT) y de las pantallas de plasma. Los oLED se pueden clasificar de la siguiente forma:

- **Sm-LED** (Small-molecule oLED), se basan en una tecnología desarrollada por la compañía Kodak. La producción de LEDs con pequeñas moléculas requiere una deposición en el vacío de las moléculas que se consigue con un proceso de producción mucho más caro que con otras técnicas.
- **PLED** (Polymer Light-Emitting Diodes) o LEPS (Light-Emitting Polymers) han sido desarrollados por la empresa Cambridge Display Technology, estos se basan en un polímero conductor electroluminiscente que emite luz cuando le recorre una corriente eléctrica, se usa una película de sustrato muy delgada para el recubrimiento y así se obtiene una pantalla de gran intensidad de color que requiere relativamente muy poca energía en comparación con la luz emitida. No es necesario que se produzca en un encapsulado al vacío, es así como los polímeros pueden aplicarse sobre el sustrato mediante una técnica derivada de la “impresión de rayo comercial” (llamada “inkjet” en inglés). El sustrato usado puede ser flexible, como un plástico PET, por ejemplo. Es por esto que los pLEDs pueden ser producidos de manera económica.
- **ToLED** (Transparent oLED), usan un terminal transparente para crear pantallas de televisión que pueden emitir en su cara de adelante, en la de atrás, o en ambas consiguiendo ser transparentes, estos pueden mejorar enormemente el contraste con el entorno, haciendo mucho más fácil el poder ver las pantallas con la luz del sol.
- **SoLED** (Stacked oLED) utilizan una arquitectura de píxeles novedosa que se basa en almacenar subpíxeles rojos, verdes y azules, unos encima de otros en vez de disponerlos a los lados como sucede de manera normal en las pantallas lcd, con esto se mejora la resolución de las pantallas y realizando por completo la calidad del color.

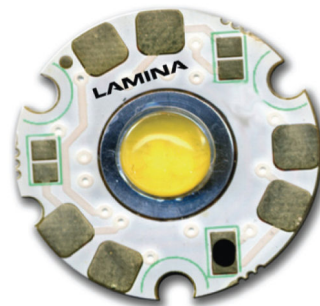


Figura 2.5 LED de potencia de la Serie Atlas I de Lamina Light.
(Modificado de la Hoja de datos de Lamina Lighting Incorporated, 2008)

2.1.4.3 Ventajas

Las principales ventajas de los LEDs son [6]:

- Producen más lúmenes por watt que las lámparas incandescentes, esto es especialmente útil en dispositivos operados a baterías, su eficiencia luminosa llega a 100 lm/W.
- Los LEDs pueden producir luz de un color específico, sin la necesidad de utilizar filtros adicionales, lo que ahorra peso y los hace más eficientes, así como la actual variación y generación de múltiples colores, basado esto en la tecnología RGB lo cual crea posibilidad de diseños creativos gracias a la gran variedad de colores, medidas compactas y flexibilidad de los módulos.
- Cuando se utilizan en aplicaciones donde se requiere disminuir su potencia, es decir donde se necesite menos intensidad de iluminación, los LEDs no cambian su color, a diferencia de las luces incandescentes que tienden a tornarse amarillas.
- Los LEDs no se ven afectados por ciclos rápidos de encendido y apagado, a diferencia de las lámparas fluorescentes o de descarga, además no emiten luz ultravioleta ni infrarroja. [11]
- Siendo dispositivos de estado sólido, son muy resistentes a impactos.
- Tienen extremadamente larga vida útil, algunos fabricantes aseguran hasta una caída de 70% de flujo luminoso en 100 000 horas. [12]
- Se iluminan rápidamente, un LED típico puede alcanzar su máximo brillo en algunos microsegundos.
- Pueden ser muy pequeños y las lámparas pueden tener una dirección lo cual facilita su uso en lugares donde el espacio de trabajo es reducido.
- A diferencia de las lámparas fluorescentes, los LEDs no contienen mercurio.

2.1.4.4 Aplicaciones

Hoy en día se puede encontrar LEDs en una gran cantidad de aplicaciones como por ejemplo en la iluminación de efectos, de fondos, de acento, en luminarias de seguridad y en displays. Al contrario que otras lámparas, los LED irradian una luz colorida sin que sea necesario el uso de filtros y están disponibles siempre con la última tecnología; su eficiencia luminosa evoluciona en forma positiva, de tal forma que cada vez son más aptos para la iluminación en general. Están disponibles en todos los colores y se dejan acoplar fácilmente a diferentes exigencias luminosas.

Su larga duración, que sobrepasa a muchas fuentes de luz con creces, puede reducir de manera drástica los costes de mantenimiento de instalaciones luminosas y el funcionamiento a bajo voltaje permite un uso sin peligro. Sus aplicaciones de iluminación abarcan: [13] y [14]

- Iluminación publicitaria.
- Creación de ambientes e iluminación general.
- Señalización del tráfico.
- Iluminación de orientación en edificios.
- Señalización de salidas de emergencia.
- Luminarias de diseño y empotradas.
- Luminarias indicadoras.
- Escenificación arquitectónica.



Figura 2.6 Ejemplo de iluminación arquitectónica con los LEDs RGB LM01M (Catálogo Osram, 2008)

2.1.4.5 Mercado mundial

En este subcapítulo se presenta una breve vista del panorama económico mundial de los LEDs como fuente de luz en general.

Se tiene previsto que el mercado de los LEDs de alto brillo crezca en un 12% este año 2008, de acuerdo a lo mencionado por Robert Steele (director de estudios del área de opto electrónica de la empresa Strategies Unlimited) en la conferencia de apertura de la convención Strategies in Light (18 y 19 de Febrero del 2008, Santa Clara, California), también se recalcó el aumento del 9.5% el año 2007, llegando a un total de 4.6 billones de dólares a nivel mundial, lo cual muestra un crecimiento en comparación al 6% registrado el 2006. [15]

“Todos estos números indican que el mercado está en un crecimiento continuo debido a la inversión mundial puesta en el desarrollo de la tecnología LED, el objetivo de esto es disminuir, lo más rápido posible, los costos e incrementar la eficiencia para poder reemplazar a las luminarias tradicionales”

Fue el comentario que mencionó el vicepresidente de Philips Lighting, Bas Van de Kieft, en una entrevista luego de la citada convención [16]. Más detalle se muestra en el Anexo 6.

2.2 Generalidades

Los principales conceptos que se tienen presente para el entendimiento de la presenta tesis son los siguientes:

2.2.1 Aspectos físicos de la luz

La luz es cualquier tipo de radiación visible, apreciada de acuerdo con la sensibilidad del ojo humano, a su vez la radiación es energía que no necesita de un medio material para su propagación, cuya velocidad en el vacío es una constante universal (aproximadamente 300 000 Km/s). Cuando la luz entra en el ojo humano y alcanza la retina, activa procesos fotoquímicos y neurológicos que producen la visión. Las ondas de radio, las transmisiones televisivas, las microondas, la luz ultravioleta y los rayos X son formas de ondas electromagnéticas al igual que la luz, pero con una longitud de onda distinta. El ojo humano no puede percibir estas longitudes de onda, pero ciertos instrumentos sí. [17]

Cuando un sujeto se encuentra en un ambiente iluminado percibe una serie de sensaciones que le permiten distinguir y reconocer lo objetos que le rodean,

mientras que si se encuentra en un ambiente privado de luz, dichas sensaciones dejan de producirse. Más del 50% de las informaciones sensoriales recibidas por el hombre son del tipo visual y tienen como origen primario la acción de la luz.

La longitud de onda se define como la distancia entre dos ondas consecutivas, su unidad más frecuente es en nanómetro (nm), no es una característica invariable, sino que va a depender de la naturaleza del medio a través del que se propaga, tal y como se expresa en la relación:

$$f = c/\lambda \quad (\text{ec } 2.2)$$

Siendo f la frecuencia, c la velocidad de propagación en el medio considerado y λ la longitud de onda de dicha radiación. Teniendo en cuenta que f es una característica invariable de la radiación y que las variaciones en la velocidad de propagación son relativamente pequeñas, la clasificación más usual de las radiaciones electromagnéticas es la que se basa en las longitudes de onda, las radiaciones visibles ocupan una franja muy estrecha, comprendida aproximadamente entre los 380 y 760 nm del espectro electromagnético, fuera de esta banda visible el órgano visual aunque quede expuesto a energía radiante de diversas longitudes de onda, no es capaz de provocar ninguna respuesta de carácter visual. Otra característica física de la radiación luminosa es su propagación en línea recta, como consecuencia de esta cualidad, la sombra arrojada por un cuerpo va ser función de la fuente luminosa elegida para su iluminación; una fuente puntual ocasionará sombras muy contrastadas entre la zona de luz y la oscuridad, mientras que una fuente de luz lineal añadirá una tercera zona, llamada penumbra, que atenuará el contraste entre la sombra y el área de luz alrededor.

A continuación se definen magnitudes y unidades para poder evaluar los fenómenos luminosos: [18]

- a) **Flujo luminoso:** Se define como la potencia (W) emitida en forma de radiación luminosa a la que el ojo humano es sensible. Su símbolo es Φ y su unidad es el lumen (lm). A la relación entre watts y lúmenes se le llama equivalente luminoso de la energía y equivale a: 1watt-luz a 555nm = 683lm. El flujo luminoso se puede entender como la cantidad de luz que emite una fuente de luz en todas las direcciones del espacio.

- b) **Intensidad luminosa:** Es el flujo luminoso emitido por unidad de ángulo sólido en una dirección concreta. Su símbolo es I y su unidad la candela (cd).
- c) **Illuminancia:** Se define como el flujo luminoso recibido por una superficie. Su símbolo es E y su unidad es el lux (lx) que equivale a un lm/m^2 . Existe también otra unidad, el foot-candle (fc), utilizada en países de habla inglesa cuya relación con el lux es la siguiente: $1\text{fc} \approx 10\text{lx}$
- d) **Luminancia:** Es la relación entre la intensidad luminosa y la superficie aparente vista por el ojo en una dirección determinada. Su símbolo es L y su unidad es la cd/m^2 . También es posible encontrar otras unidades como el stilb ($1\text{sb} = 1\text{cd}/\text{cm}^2$) o el nit ($1\text{nt} = 1\text{cd}/\text{m}^2$).

2.2.2 Propiedades ópticas de los cuerpos

Cuando incide una radiación luminosa sobre un cuerpo se generan tres fenómenos diferenciados por su comportamiento frente a la luz, que son: la reflexión, transmisión y absorción.

- a) **Reflexión:** Es el rechazo sufrido por la radiación al incidir sobre una superficie reflectante, se diferencian por las características de la superficie en la que incide la radiación; si la textura es lisa y brillante, el ángulo de incidencia es igual al reflejado, en superficies rugosas y brillantes, la radiación es reflejada en varias direcciones pero hay una con mayor intensidad; y si las superficies son blancas y esmaltadas, los rayos incidentes se reflejan en todas las direcciones espaciales, existiendo una mayor proporción en determinadas zonas.
- b) **Transmisión:** Se conoce como transmisión a la propagación de las radiaciones a través de los cuerpos transparentes o traslúcidos, si durante esta transmisión se produce un cambio en la densidad del medio, los rayos luminosos cambian su dirección, este es el fenómeno de refracción.
- c) **Absorción:** Una fracción de la energía radiante incidente sobre el cuerpo real es reflejada, otra parte es transmitida a través de él y por último, una parte de dicha energía es absorbida por el cuerpo, aumentando su energía interna

2.2.3 El color

Dentro del rango del espectro visible, existen intervalos que generan una u otra sensación de color, en función de la longitud de onda de dichas radiaciones.

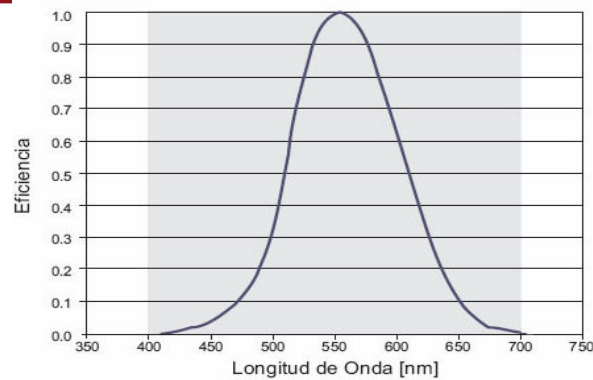


Figura 2.7 Sensibilidad del ojo humano a luz brillante (Kaufman, 2003)

Con la misma potencia de salida en cada longitud de onda, el sistema visual ve la región amarilla-verde (alrededor de 550nm) como la más intensa y las regiones roja y azul como las más amortiguadas, esto se observa en la curva de la figura 2.7; por este motivo, entre fuentes de luz de igual eficiencia, una con más intensidad en el área amarilla-verde tendrá mayor eficacia visual, es decir, mayor número de lúmenes por vatio. No obstante, sin una proporción razonable de rojo o azul, una fuente de luz no podrá reproducir los colores satisfactoriamente.

Las siguientes zonas del espectro representan los siguientes colores:

- 380 – 436nm violeta
- 436 – 495nm azul
- 495 – 566nm verde
- 566 – 589nm amarillo
- 589 – 627nm naranja
- 627 – 760nm rojo

Estos límites en las longitudes de onda, para pasar de un color a otro, no tienen un carácter absoluto, por cuanto dicho paso se efectúa de forma progresiva; el color se puede definir como una interpretación psicofisiológica del espectro electromagnético visible, no es una propiedad única de los cuerpos, ya que además de depender de sus propiedades ópticas, también va a depender de la composición espectral de la luz que reciben; el concepto de color tiene su origen en tres tipos de percepciones visuales:

- a) **Tono:** es el definido por una frecuencia del espectro visible, es decir al referirse de rojos, amarillos, verdes, etc, se está haciendo alusión a los diversos tonos

- b) **Luminancia:** es la cantidad de intensidad luminosa que percibimos cuando se observa un objeto desde un cierto ángulo; la luminancia máxima equivale al blanco, ya que se pierde la sensación de color, mientras que una luminancia mínima corresponde al negro.
- c) **Saturación:** refleja la predominancia de una longitud de onda determinada (tono) frente a una mezcla de diversas longitudes de onda, es decir, determina la concentración de un color con respecto a un gris cuando ambos son vistos con el mismo grado de luminancia.

Cualquier color visible se obtiene variando proporciones de luminancias de los colores primarios (rojo-verde-azul), los resultantes poseen mayor luminancia que los primarios, ya que se trata de adición de radiaciones luminosas.

El espacio propuesto por la C.I.E. (Comisión Internacional de l'Eclairage) en 1931 es una representación de los colores existentes divididos en coordenadas cromáticas. En la figura 2.8, la línea perimetral del espacio representa los diferentes tonos, ambos extremos (380 y 700 nm) se unen por la llamada línea púrpura, conformando el designado "triángulo cromático CIE". En el centro se encuentra el punto al cual le corresponde una saturación nula (no hay predominancia de ninguna longitud de onda sobre otras) y una luminancia máxima (asociada al blanco por excesiva claridad). Un concepto importante para definir las características de una lámpara es la temperatura de color.

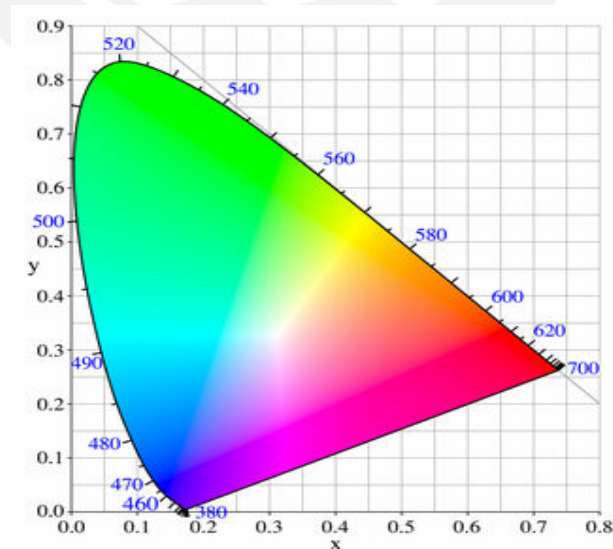


Figura 2.8 Diagrama de color CIE 1931
(Modificado de CIE Color Space. Hoffman, 2006)

Nuestra concepción del color de un objeto es un proceso dinámico, en cambio constante. Depende de los colores que rodean al objeto, del tiempo en que nuestra visión está expuesta a la escena, de lo que hemos mirado antes, de lo que esperamos ver y quizá de lo que desearíamos ver. A esto hay que añadirle el hecho de que aproximadamente el 8% de la población masculina y el 0,4% de la femenina tienen algún tipo de deficiencia de percepción del color. [17]

2.2.3.1 Temperatura de color

La luz blanca amarillenta, similar a la del fuego de una chimenea, se denomina cálida, y la luz blanca azulada, azul. Esto se basa en asociaciones con colores similares; así como, luz diurna, es la que imita a la que entra por una ventana. Son clasificaciones básicas, pero útiles. No obstante, puede haber distintos grados de frialdad y calidez, por lo que se necesita una medida cuantitativa, para esto se utiliza la temperatura del color.

Es la temperatura que debe alcanzar un cuerpo negro ideal para que la tonalidad de la luz sea igual a la de la lámpara que emite la luz, es medida con un colorímetro y expresada en grados Kelvin (K), se relaciona con la apariencia del color como vemos en la tabla 2.2.

Tabla 2.2 Temperatura del color correlacionada

Temperatura del Color – Tc (K)	Apariencia del color
$T_c < 3300$	Cálida
$3300 < T_c < 5000$	Intermedia
$T_c > 5000$	Fría

La luz cálida se inclina hacia el amarillo-rojo, la luz fría hacia el azul-violeta; la luz emitida por el sol en cielo despejado tiene una temperatura de color aproximada de 5800 K cuando se encuentra en el cenit, y de 2000 K cuando está sobre el horizonte. Este parámetro es válido, por su propia definición para lámparas incandescentes o termoradiadoras, que se rigen por la ley de Planck, en las lámparas de descarga, los puntos de color no coinciden con los de la curva del cuerpo negro, se acepta como valor de temperatura, la del cuerpo negro más parecida a la del color de luz analizado.

2.2.4 Índice de reproducción cromática

Es la relación entre el aspecto cromático que representa un determinado cuerpo iluminado con su fuente de luz y el aspecto que representaría bajo una luz de referencia, en otras palabras, es la capacidad de una fuente luminosa para reproducir los colores naturales de los objetos observados; se cuantifica a través del índice de reproducción cromática, IRC o Ra, que oscila en una escala graduada de 0 a 100. La fuente de referencia es la luz natural normalizada de un cuerpo negro cuando la T_c de la fuente luminosa que va a ser analizada es menor o igual a 5000 K y es la luz de día, cuando la T_c esta por encima de 5000 K, es decir no se puede comparar el IRC de una lámpara con un T_c de 3000 K con el de otra cuya T_c es de 5500 K, ya que la primera se ha calculado su IRC usando como luz de referencia la emitida por un cuerpo negro a una temperatura de 3000 K, y en la segunda su IRC se ha calculado usando luz de día, con una temperatura de 5500 K; a continuación observamos valores comunes de IRC para ciertos tipo de lámparas artificiales. [2]

Tabla 2.3 Índice de reproducción cromática comunes

Lámparas	IRC
Incandescentes/halógenas	100
Fluorescentes compactas	85
Vapor de mercurio	49-55
Vapor de sodio baja presión	0

2.2.5 Iluminación publicitaria – displays

El termino display designa tanto eventos como objetos y acciones tratándose específicamente de la acción de manipular objetos dentro de un espacio con miras a las acciones de venta de productos, almacenamiento y ostentación, ya sean estos comunes, de primera necesidad o de lujo. Es una forma de comunicación visual intencional, el cual crea una interacción entre el objeto presentado y el público destinatario. El display puede clasificarse en: display–espacio o como display–objeto. Una pequeña descripción y clasificación de cada uno se presenta a continuación. [19]

- a) **Display – Objeto**, es la representación física, gráfica o zoográfica de un producto; se puede subdividir en distribuidores o no distribuidores. En la primera se hace referencia al display que facilita los productos al alcance de la mano del

cliente, puede ser un mostrador o mural. La segunda consiste en un objeto que sólo presenta al producto, pueden subclasificarse en: paneles (recuerda el slogan o argumento de la marca o producto), móviles (elementos pequeños bidimensionales o tridimensionales suspendidos del techo o en alguna plataforma), material animado (elementos tridimensionales que poseen movimiento total o parcial debido a algún mecanismo eléctrico-físico), también se incluye el formato de video como medio de comunicación con el público.

b) **Display – Espacio**, se clasifica en escaparates y stands.

Escaparates: si se encuentra al exterior del recinto de venta, su función será la de atraer a los posibles clientes que circulan por las calles, constituyen la fachada más importante de la tienda. Si el escaparate se encuentra al interior del centro comercial, posee dimensiones y profundidad reducidas, lo que permite representaciones no muy amplias. Los stands son espacios donde se expone y vende los productos a la vez, es usado con más frecuencia en ferias.

2.3 Modelo Teórico

En todo diseño es necesario evaluar al usuario al que se quiere llegar para poder delimitar las características del producto final, sin esto, se estaría siguiendo cualquier camino para el desarrollo global de un display. En la figura 2.9 se presenta la gráfica del modelo teórico planteado en la presente tesis. Como se observa en dicha imagen, el sistema de iluminación es parte de un sistema en el cual se ven involucrados varios factores y procesos.

Todo empieza al seleccionar la fuente luminosa más apropiada para una parte o la totalidad de un proyecto de iluminación, para esto se necesita considerar determinados aspectos básicos. La capacidad de variación de color da por si mismo un valioso valor agregado al producto y en especial a lo que publicidad concierne, introduciendo un dinamismo a la iluminación que al usuario final le dará la impresión de interacción con el entorno iluminado. Algunos aspectos se relacionan con la parte práctica, como producción, eficiencia y costo; la relación de este último con el beneficio se da en las actuales luminarias en una medida razonablemente aceptable, pero ésta mejora al usarse la tecnología LED, ya que disminuye el consumo de energía eléctrica para una misma emisión de iluminación o inclusive mayor, en el diseño de la iluminación con LEDs de potencia RGB se tomaran en cuenta todos estos factores.

Otros aspectos que también se consideran están relacionados con el aspecto estético del espacio iluminado, como distribución, intensidad y difusión de la luz. En estos factores el uso de LEDs de potencia es beneficioso, debido a su pequeño tamaño permite un control sobre la luz superior a otros tipos de luminarias usadas, a la vez que permite su integración en espacios pequeños, lo cual lleva a la disminución de luz malgastada.

Para el diseño de esta tesis, usaré programas de simulación de circuitos electrónicos y de programación en bajo nivel para el desarrollo del software que controla los colores y el entorno con el usuario final del sistema.

Al escoger la iluminación de espacios publicitarios de pequeño tamaño, limitamos el uso de potencia que se ha de consumir, así como el número de LEDs y por consiguiente la economía de una implementación a nivel comercial, lo cual va orientado el producto de este estudio.

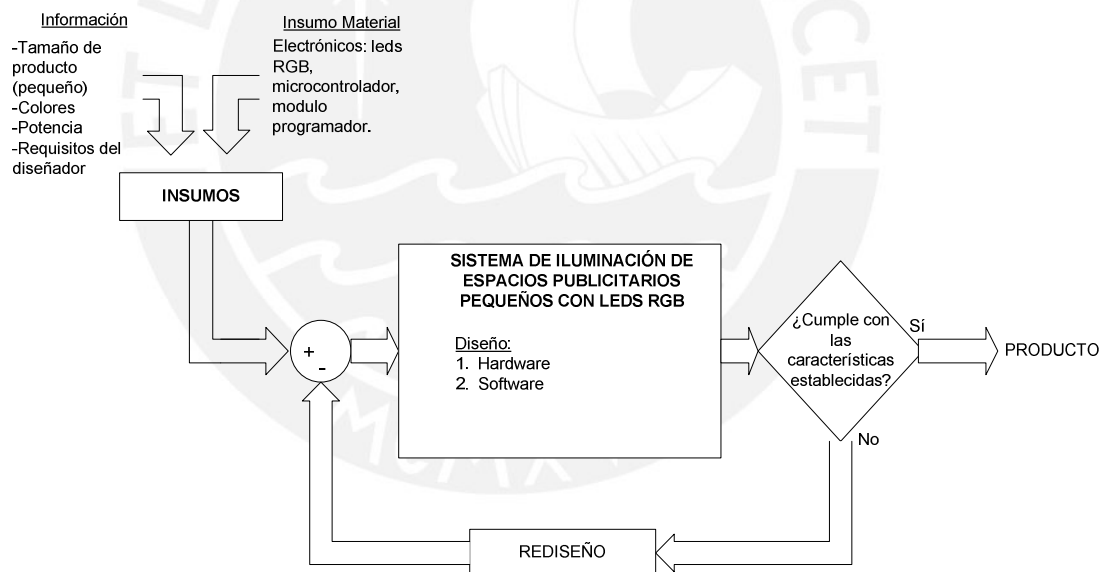


Figura 2.9 Modelo teórico

2.4 Hipótesis

2.4.1 Hipótesis principal

Dada la demanda de espacios comerciales, donde la publicidad es la que se encarga del diseño, se presenta el problema de la iluminación de un espacio

ubicado en el interior de un recinto por lo que se plantea el diseño de un sistema de iluminación con LEDs de potencia RGB con el objetivo de aprovechar las características que esta nueva tecnología posee.

2.4.2 Hipótesis secundarias

- a) El efecto en las ventas es el resultado de un conjunto de factores como la publicidad, imagen, marca, precio y distribución. La publicidad informa al consumidor sobre los beneficios de un determinado producto o servicio, resaltando una diferencia sobre otras marcas, creando o modificando las tendencias de esta, es así como el diseño de un espacio comercial debe de tener la capacidad de crear un ambiente que induzca a la persona a preferir una determinada marca o producto, es por esto que se toma como punto de partida los requerimientos del diseño de la iluminación (color, intensidad de luz, cambio de tono de colores).
- b) El diseño de la luminotecnía basada en LEDs es un área aún en vías de desarrollo debido a los constantes avances que se dan en esta rama, es por esta razón que se presenta un ejemplo de iluminación publicitaria utilizando esta nueva tecnología.

2.5 Objetivos

2.5.1 Objetivo general

Diseñar un sistema de iluminación para espacios publicitarios de tamaño pequeño usando un solo LED de potencia RGB.

2.5.2 Objetivos específicos

- a) Diseñar un sistema que muestre los colores primarios de la luz (rojo, verde, azul), así como los secundarios (magenta, amarillo, cian) y el color blanco.
- b) Diseñar un sistema que varíe la intensidad luminosa en cada uno de los colores primarios por separado.

CAPÍTULO 3

DISEÑO DEL SISTEMA DE ILUMINACIÓN

3.1 Introducción

En este capítulo se presenta el diseño de los distintos circuitos y el algoritmo que maneja el sistema de iluminación basado en LEDs de potencia RGB que se proponen en este documento de tesis. Se toma como fundamento básico una propiedad del ojo humano, el cual consiste en que este órgano no percibe variación de movimiento o cambio alguno de un objeto observado a una frecuencia mayor a los 30 Hz. [20]

Para iniciar el diseño de cualquier sistema de iluminación publicitario se necesita la opinión del diseñador del mismo, ya que esta persona es quien posee la idea definida de la forma final del display y su connotación entre el público, es en esta etapa donde se definen variables críticas, como la luz del ambiente donde se ubica el display, la cantidad de luz focalizada sobre uno o varios puntos dentro de este y los colores que se desean resaltar. Para el caso del presente trabajo, se propone iluminar un display pequeño (se puede asumir un área no mayor a 20x20 cm²) ubicado en un espacio cerrado, con poco flujo luminoso en el ambiente, para lo cual basta usar un LED de potencia que sea capaz de reproducir los tres colores primarios de la luz, es decir un LED de alto brillo RGB.

3.2 Diagrama de bloques

En la figura 3.1 se presenta el diagrama de bloques del sistema de iluminación; como se observa, la interfase de diálogo hombre-máquina se realiza mediante un teclado, compuesto por pulsadores y displays de 7 segmentos, luego se encuentra el bloque del microcontrolador, donde se encuentra almacenado el programa que

hace posible la variación de colores del LED RGB mediante la interfase de potencia.

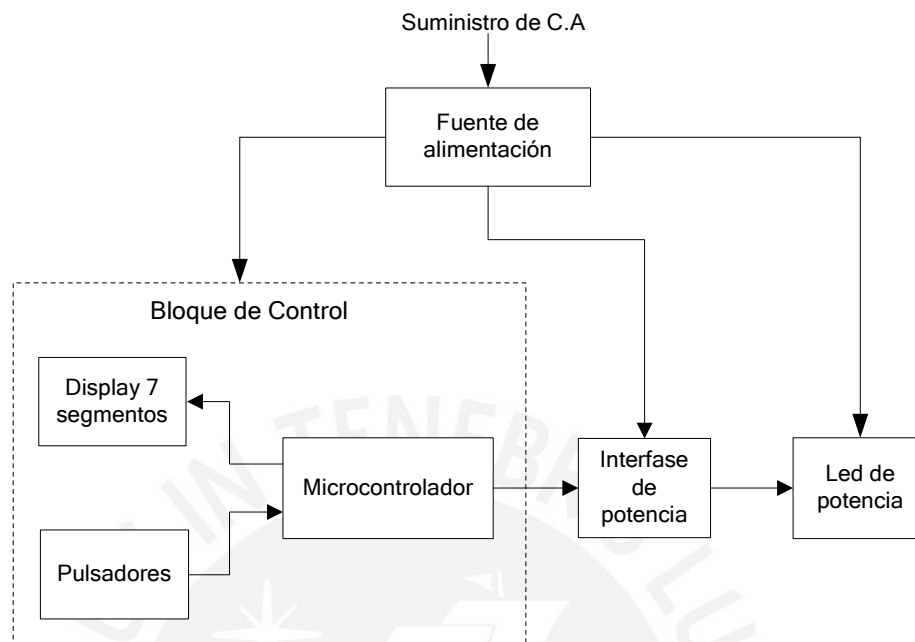


Figura 3.1 Diagrama de bloques del sistema de iluminación.

El desarrollo del diseño se divide en dos etapas, estas son presentadas en el siguiente orden: primero el diseño del hardware y a continuación la programación del software.

3.3 Hardware

El diagrama de bloques que se aprecia en la figura 3.1 se divide en cuatro partes al momento de realizar el diseño del hardware, primero el LED de potencia RGB, luego la interfase de potencia, donde se encuentra los circuitos de conmutación y excitación que hacen posible el encendido y apagado del LED. Tercero, un bloque de control que integra el microcontrolador elegido, así como de la interfase hombre-máquina compuesta por pulsadores y displays de 7 segmentos; y por último la fuente de alimentación de todo el sistema.

Partiendo de los requerimientos de iluminación se escoge el tipo de LED de alto brillo que se necesita, luego de esto se procede al diseño de la interfase de potencia, en esta se encuentra el control sobre la intensidad luminosa de los LEDs, lo cual se logra usando señales con variaciones en el ancho del pulso (PWM) de

salida del microcontrolador, y esta, es elegida dependiendo de las características del LED de potencia que se escoja, así como, requerimientos de velocidad de procesamiento, cantidad de memoria necesitada y número de puertos.

3.3.1 LED de Potencia

Los LEDs llamados de alto brillo o de potencia se caracterizan por la elevada cantidad de corriente que soportan cuando se encuentran polarizados directamente (se le nombra " I_d "), que según la marca y modelo puede ser entre 100 y 1500 mA, así como el voltaje entre ánodo y cátodo o " V_f " por sus siglas en inglés (Forward Voltage) que suele ser entre 3 y 10 voltios, llegando a consumir en algunos casos 12W y obteniendo una eficiencia luminosa de 100lm/W.

Para la elección del LED adecuado de un sistema de iluminación, se extraen los datos y parámetros de trabajo de las fichas técnicas de distintos modelos y marcas que se encuentran en la internet. En la tabla 3.1 se presenta dos LEDs, uno de la empresa Lamina Lighting y el otro de Optek Electronics junto a los valores máximos soportados por cada LED.

Tabla 3.1 Valores máximos de dos LEDs de potencia RGB a $T_j=25^\circ\text{C}$

LED		V_f (VDC)	I_d (A)	Potencia (W)	Flujo luminoso (lm)	Costo [25] \$USD
NT-43F0-0424 RGB - ATLAS Lamina Lighting [23]	R	5	0.7	3.5	100	24.00
	G	7.7	0.7	5.4	155	
	B	8.2	0.7	5.8	40	
OVTL09LG3M Optek Electronics [24]	R	6.8	1.05	7.2	Total: 300	46.53
	G	9.4	1.05	9.8		
	B	9.6	1.05	10		

Para la elección del LED se consideran distintos aspectos, uno de ellos es el consumo de potencia, en el LED de Lamina Lighting es 14.7W mientras que en el de Optek Electronics llega a 27W, otra característica es el flujo luminoso total emitido por los LEDs, en el LED NT-43F0-0424 RGB ATLAS se obtiene 290lm y en el OVTL09LG3M es 300lm. En este aspecto cabe mencionar que en la actualidad

los LEDs azules emiten una menor cantidad de flujo luminoso que los LEDs rojos y verdes ya sea en encapsulados independientes o LEDs RGB, esto es debido al material inorgánico del cual están compuestas (InGaN y AlInGaN), este aspecto es negativo al momento de iluminar con este color en particular, pero si la intención es producir el color blanco con un LED RGB, el “extra” de color verde que se tiene ayuda a obtener diferentes temperaturas de color alrededor del blanco [21]. Considerando esta baja eficiencia luminosa por parte del color azul se puede obtener la eficiencia luminosa total de cada LED que en el caso del NT-43F0-0424 es de 20lm/W a I_d de 700mA mientras que en el de Optek Electronics es 11lm/W a I_d de 1.05A. Por el menor precio, bajo consumo de energía y mayor eficiencia luminosa se elige el LED NT-43F0-0424 RGB ATLAS de Lamina Lighting para desarrollar el siguiente trabajo.

En la figura 3.2 se observa el diagrama de conexión del LED NT-43F0-0424 RGB ATLAS, como se observa cada uno de los LEDs internos (rojo, verde y azul) son independientes entre si, es decir, se pueden controlar por líneas separadas. Desde este punto en adelante se referirá al LED NT-43F0-0424 RGB ATLAS simplemente como LED Atlas. En el Anexo 1 se observan las curvas características y especificaciones técnicas de este LED de potencia.

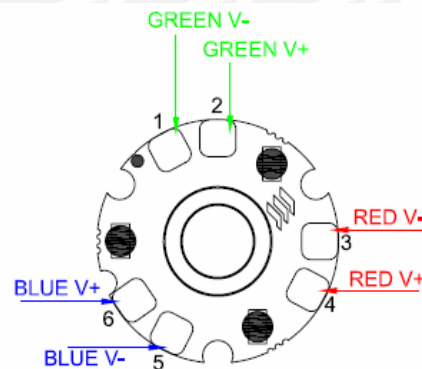


Figura 3.2 Conexión eléctrica del LED Atlas
(Modificado de la Hoja de datos de Lamina Lighting Incorporated, 2008)

En el Anexo 2 se presenta una curva extrapolada de los datos de luminancia en función de la distancia de alejamiento al LED Atlas (extraída de su hoja técnica) a una corriente de polarización en directa (I_d) de 550mA; en esta gráfica se obtiene una aproximación del número de lux para una distancia de 20 cm. del LED Atlas, para el LED azul el nivel de iluminancia es 12 lux, para el rojo 50 lux y el verde es

de 72 lux. En el diseño de la presente tesis, los tres LEDs independientes del LED Atlas van a trabajar a la máxima corriente de trabajo, para así tener la mayor capacidad de flujo luminoso posible por una sola fuente de luz dentro del espacio publicitario. El disipador de calor adecuado para el LED Atlas se elige dependiendo de las condiciones de trabajo a las que se exponga, para no adelantar estos parámetros, la elección se presenta al final del subcapítulo 3.3.4.

3.3.2 Interfase de Potencia

La mayoría de tipos de fuentes de alimentación de LEDs se pueden dividir en dos categorías principales: lineales y conmutadas (SMPS - Switch Mode Power Supply), estas últimas están diseñadas para transferir energía de la fuente a la carga a través de elementos de almacenamiento (inductores, capacitores) [22]. En esta tesis se ha optado por usar una fuente de voltaje lineal configurada como fuente de corriente constante y una señal PWM que varíe los tiempos de encendido y apagado del LED, la frecuencia de conmutación debe ser mayor a 30 Hz (frecuencia mínima a la que el ojo humano perciba cambios de estado abruptos) [20] y por consiguiente al variar el ciclo de trabajo dará la impresión al ojo que el LED está aumentando o disminuyendo su intensidad luminosa.

Según la hoja de datos del LED Atlas la máxima corriente que soporta es 700 mA, tomando sólo el 80% se tiene que la máxima corriente de trabajo es 550mA, para lo cual se extraen los siguientes datos:

Tabla 3.2 Valores máximos de trabajo ($I_d=550\text{mA}$)

	V_f (VDC)	I_d (mA)	Potencia (W)	Flujo luminoso (lm)
R	4.8	550	2.7	90
G	7.4	550	4.1	135
B	7.9	550	4.4	28

Como se observa en el diagrama de bloques de la figura 3.3 las líneas de alimentación y control por PWM son independientes para cada uno de los tres LEDs que componen el LED Atlas RGB.

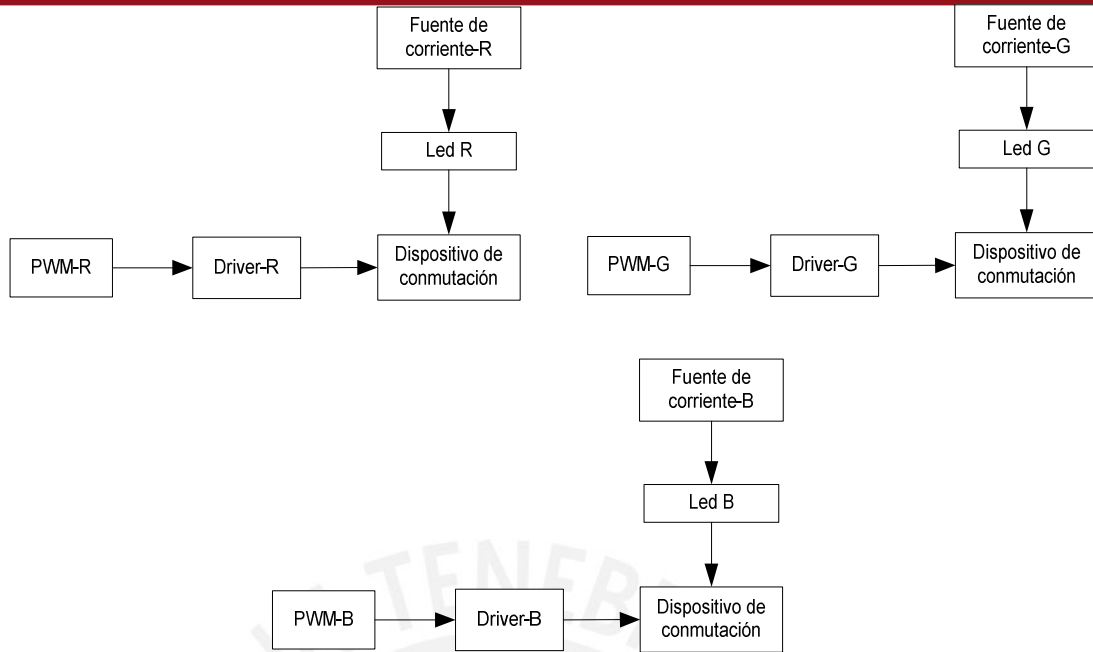


Figura 3.3 Diagrama de bloques de la interfase de potencia

La fuente de corriente en base a un regulador de voltaje se eligió basándose en los requisitos establecidos en la tabla 3.2, a continuación se presentan 2 opciones:

Tabla 3.3 Valores máximos para reguladores de voltaje lineal en empaque TO-220

Regulador Ajustable	V _{in Max} (VDC)	V _{out Max} (VDC)	I _{Max} (A)	Costo \$USD
LM317HV	60.0	57.0	1.5 (V _{in} -V _{out} ≤ 15V)	3.04
LM2941	26.0	23.0	1.0	2.28

Se elige el LM317HV en su empaque TO-220 debido a la mayor capacidad de manejo de corriente y voltaje de salida. Según la hoja de datos de este regulador (Anexo 4 – Nota2) la potencia máxima de disipación es de 20W, y como ya se estableció, se va a extraer del LM317HV una corriente de 550mA, lo cual es prácticamente la tercera parte de la I_{Max} y agregándole un disipador de calor no generará sobrecalentamientos, evitando la disminución de su desempeño al momento de trabajar.

Este regulador de voltaje lineal se aplica en su topología de fuente de corriente constante, la cual es fijada por la R_{sense}, siguiendo la siguiente formula:

$$I_{out} = \frac{V_{out} - V_{adj}}{R_{sense}} \quad (\text{ec 3.1})$$

Un esquema de la fuente de corriente se muestra en la figura a continuación:

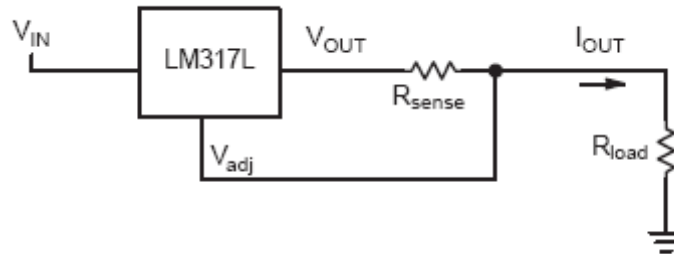


Figura 3.4 Regulador de voltaje lineal LM317HV en topología de fuente de corriente. (Modificado de Hoja de datos, 2000)

Como se observa en la figura 3.4 se toma como carga (R_{load}) a uno de los tres LEDs independientes en el interior del Atlas más el componente de conmutación. El voltaje de entrada del regulador (V_{in}) debe ser mayor en por lo menos 1.5V a la tensión V_{out} , que viene a ser la suma de la diferencia de tensión en R_{sense} más R_{load} , esta última resistencia es virtual, ya que en realidad representa la adición de la caída de voltaje de uno de los tres LEDs Atlas (V_f) más la diferencia de tensión en el componente activo encargado de la conmutación del LED. Por dato en la hoja de especificaciones del regulador LM317HV, el voltaje en R_{sense} es 1.25V.

El dispositivo de conmutación es un mosfet de enriquecimiento de canal N, el cual estará conmutando la línea de flujo de corriente a través del LED. En la tabla 3.4 se presentan dos opciones que cumplen con los requisitos mínimos del diseño planteados hasta este punto ($I_d=550\text{mA}$).

Tabla 3.4 Mosfets de enriquecimiento canal N (Motorola)

Mosfet	V_{ds} Max (VDC)	V_{gs} Max (VDC)	I_d Max (A)	$R_{ds\ on}$ MAX @ $V_{gs}10V$ (ohm)	$V_{ds\ on}$ MAX @ $V_{gs}10V$ (VDC)
2N6651	90.0	± 30.0	2.0	4	4
2N6659	35.0	± 30.0	2.0	1.8	1.8

Se elige el mosfet 2N6659, debido a que posee una menor resistencia dinámica y una menor caída de tensión entre drenador-surtidor en el encendido. La hoja de especificaciones de este mosfet se encuentra en el Anexo 5.

Un LED interno (rojo, verde o azul) del LED Atlas junto a su circuito de interfase de potencia se presenta en la figura 3.5; este circuito es el mismo para las tres líneas de LEDs del Atlas RGB.

El valor de la resistencia R_{sense} (figura 3.4) es calculada por la ecuación 3.1, es así como tomando una corriente a través del LED (I_d) de 0.55A, da como resultado 2.26Ω con una potencia disipada de 0.68W, es por esto que la resistencia debe de ser por lo menos de 1W, además se usa un diodo schottky BAT86 para evitar sobre picos de tensión en la carga de la red, debido al condensador interno entre el drenador y surtidor (C_{ds}) del mosfet.

En el presente documento se llama “driver” a todo el circuito de disparo o circuito excitador de compuerta para mosfet [26] encargado de conmutar este dispositivo, el cual recibe una señal PWM del microcontrolador a través de dos buffers inversores de colector abierto SN7416, se usan dos compuertas en serie para trabajar con una lógica positiva con respecto al nivel de voltaje de salida del microcontrolador. Ya que las compuertas SN7416 son compuertas TTL, se usa un regulador de voltaje LM7805 para alimentarlas con 5V y para obtener una salida en alta del primer buffer (U3A) y en la entrada del segundo (U3B) mediante la resistencia de pull-up (R_4).

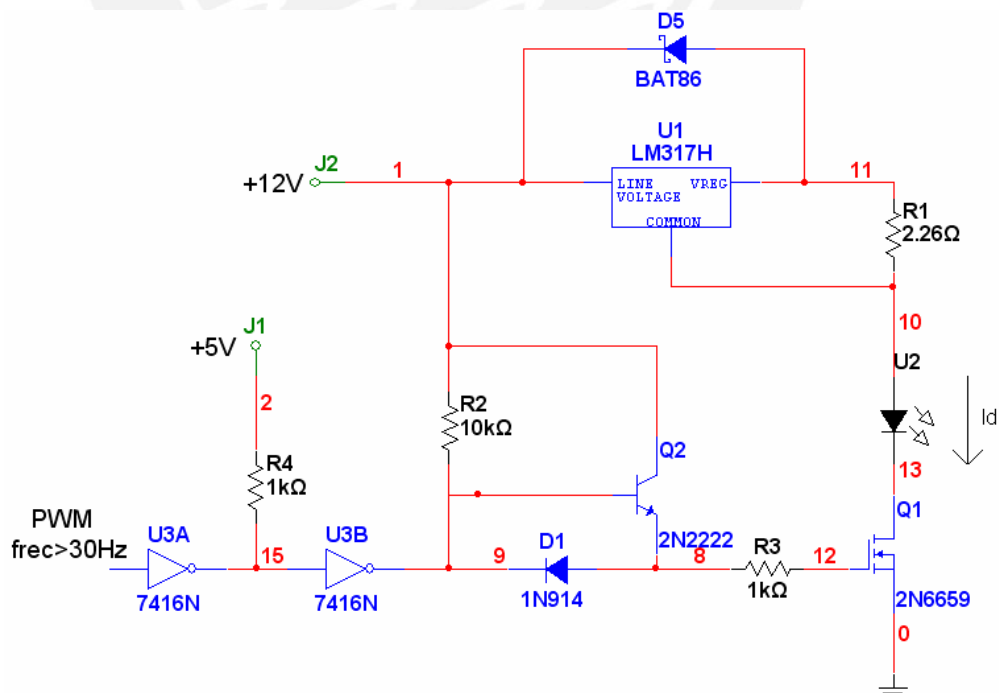


Figura 3.5 Circuito de Potencia de una sola línea del LED Atlas [27]

El comportamiento del mosfet aplicado como interruptor se detalla en el Anexo 3 y en el Anexo 7 se encuentra las hojas de datos del buffer SN7416, del diodo rápido 1N914 y del transistor 2N2222.

Ahora se analizará el circuito en sus 2 momentos de conmutación:

a) Cuando la señal PWM del microcontrolador se encuentra en “alta” ó ‘1’ lógico.

En la figura 3.6 se encuentra el circuito esquemático en este estado. Cuando el pin de entrada del primer buffer inversor 7416 de colector abierto U3A recibe 5V, satura su transistor de salida, poniendo el voltaje en el punto 15 hasta un máximo de 0.4V (según hoja de datos) produciendo un ‘0’ lógico en el siguiente buffer U3B, con lo cual este genera una I_{IL} máxima de -1.6mA, que al ser sumado con la corriente proveniente de la resistencia R4 de $1K\Omega$ da como resultado una corriente I_{OL} en U3A de 6.2mA, menor a 40mA que es la máxima permitida.

El voltaje de alimentación para la parte del driver compuesto por R2, Q2 (2N2222), R3 y el diodo rápido 1N914 es 12V, ya que se desea que la caída de tensión entre la compuerta y el surtidor (V_{gs}) del mosfet sea este valor, con lo cual se disminuye la resistencia dinámica de encendido del mismo. El modelo del mosfet en su compuerta es la de un condensador muy pequeño (para el 2N6659 su valor máximo es 50pf), por lo cual el voltaje V_{gs} se carga exponencialmente y la corriente a través de él se extingue de la misma forma.

Inicialmente el voltaje V_{gs} es 0V y el transistor de salida del buffer U3B, del circuito esquemático de la figura 3.6, se encuentra en corte, con lo cual el voltaje entre la base y emisor del transistor Q2 se eleva hasta 0.7V llevándolo a la región activa, permitiendo conducir corriente a través de la base y el colector, la cual se descarga en forma exponencial al formarse la malla R2-R3- C_{gs} (condensador interno entre la compuerta y surtidor del mosfet 2N6659) y al mismo tiempo elevando el voltaje V_{gs} hasta 12V, asegurando el mosfet en la región óhmica, ya que V_{gs} es mayor que la tensión de mantenimiento V_{th} (2V) y la tensión entre el drenador y surtidor V_{ds} (0.6V a $I_d=0.55A$) es menor que la diferencia entre 12V y V_{th} . Mientras todo esto ocurre, el voltaje en la base y el emisor del transistor Q2 se eleva hasta 12V (siguiendo la carga de C_{gs}) con lo cual este transistor queda en estado de corte, manteniéndose

así hasta el cambio de señal de PWM. El diodo 1N914 permanece en corte durante todo este ciclo de trabajo, evitando la descarga del voltaje almacenado en C_{gs} .

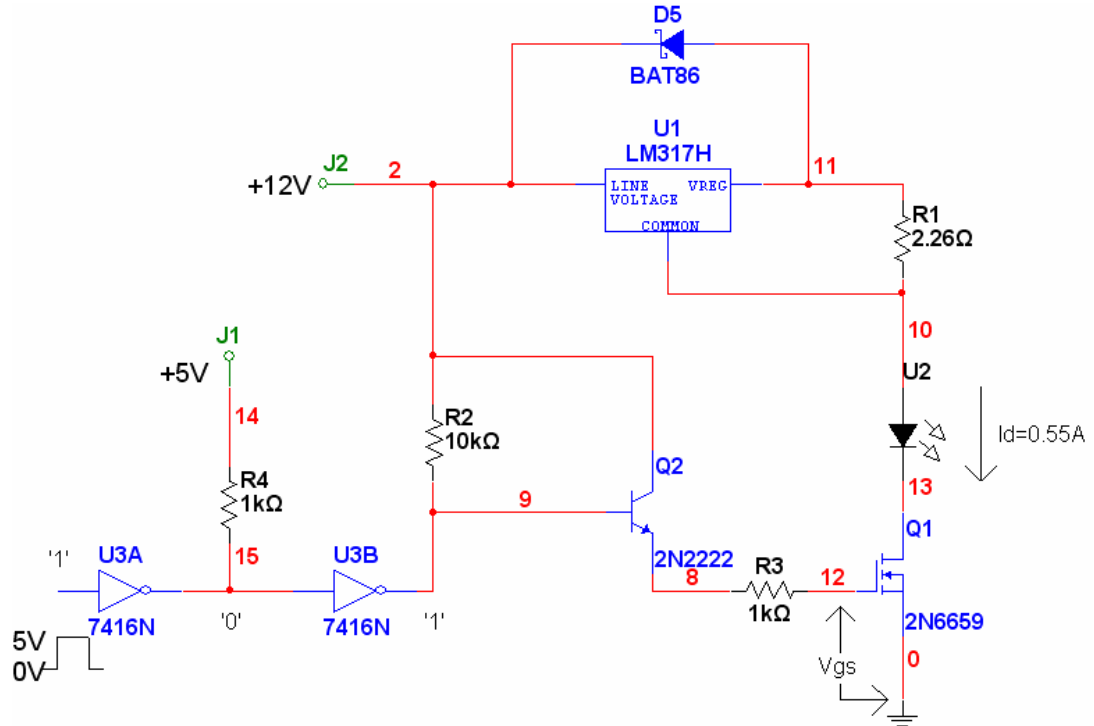


Figura 3.6 Señal de PWM en “alta”

Tomando en cuenta el valor máximo de C_{gs} del mosfet 2N6659 (50pf), $R2$ igual a $10K\Omega$ y $R3$ ($1K\Omega$) la carga de este condensador se da en un tiempo t_{ON} segundos ($t_{ON} = (R2 + R3)C_{GS} \times \ln[12/(12 - 11.9)] = 2.6 \times 10^{-6} seg$); durante el cual también se descarga la corriente I_{gs} . Luego de este proceso de encendido del mosfet, el voltaje drenador-surtidor cae a aproximadamente 0.6V, lográndose cerrar el lazo principal a través del LED y así conducir la corriente drenador-surtidor (I_d) de 550mA. [28]

b) Cuando la señal PWM del microcontrolador se encuentra en “baja”- ‘0’ lógico.

Se observa en la figura 3.7 el circuito esquemático del driver en este estado de conmutación. El primer inversor U3A recibe la señal de cero lógico en su puerto de entrada, la corriente de entrada (I_{IL}) máxima de este buffer es -1.6mA, lo cual es soportado por el microcontrolador Atmega8 (la elección de este componente se discute el subcapítulo 3.3.3), en consecuencia su transistor de salida pasa a corte

dejando caer una tensión de 5V en la entrada del siguiente buffer inversor SN7416, lo cual genera un estado de '0' lógico en la salida de esta segunda compuerta.

Si asumimos que en el estado inmediato anterior el mosfet 2N6659 estuvo en la región óhmica, con lo que un LED independiente del LED Atlas estuvo encendido, el condensador C_{gs} está cargado con 12V y el transistor Q2 se encuentra en corte.

La compuerta U3B establece un '0' lógico en su salida, para lo cual satura su transistor interno, estableciendo un voltaje (V_{OL}) de 0.4V como máximo en el punto 9 del circuito, manteniendo en corte el transistor 2N2222. Luego de esto, se genera la descarga de tensión almacenada en C_{gs} en un tiempo t_{off} , diferente al de la etapa anterior, al mismo tiempo se genera una descarga de corriente a través de la malla formada por la resistencia R3, el diodo rápido 1N914 y el transistor interno de salida de la compuerta 7416; luego, el diodo deja de conducir y el voltaje entre la puerta y el surtidor del mosfet (V_{gs}) cae y permanece en 0V, produciendo el corte de flujo de corriente entre el drenador y surtidor de este, es decir pasa a corte el 2N6659 y por lo tanto se apaga uno de los tres LEDs internos del LED Atlas.

La máxima corriente que entra por el puerto de salida del buffer U3B (I_{OL}) es la suma de la corriente que proviene por R2 con la máxima corriente de descarga del condensador (i_{g-max}), este valor se extrae de la malla compuesta por V_{gs} , la caída de tensión en R3, en el diodo 1N914 y V_{OL} (0.4V):

$$12 - i_{g-max} \times R3 - V_{f_{diodo}} - 0.4 = 0 \quad (\text{ec } 3.2)$$

Considerando $V_{f_{diodo}}=0.7V$ y $R3=1K\Omega$ la i_{g-max} es igual a 10.9mA, esto sumado con la corriente proveniente por R2 (1.16mA) nos da 12.06mA, lo cual es menor que la máxima corriente de salida en "baja" (I_{OL}) que soporta el buffer SN7416 (40mA).

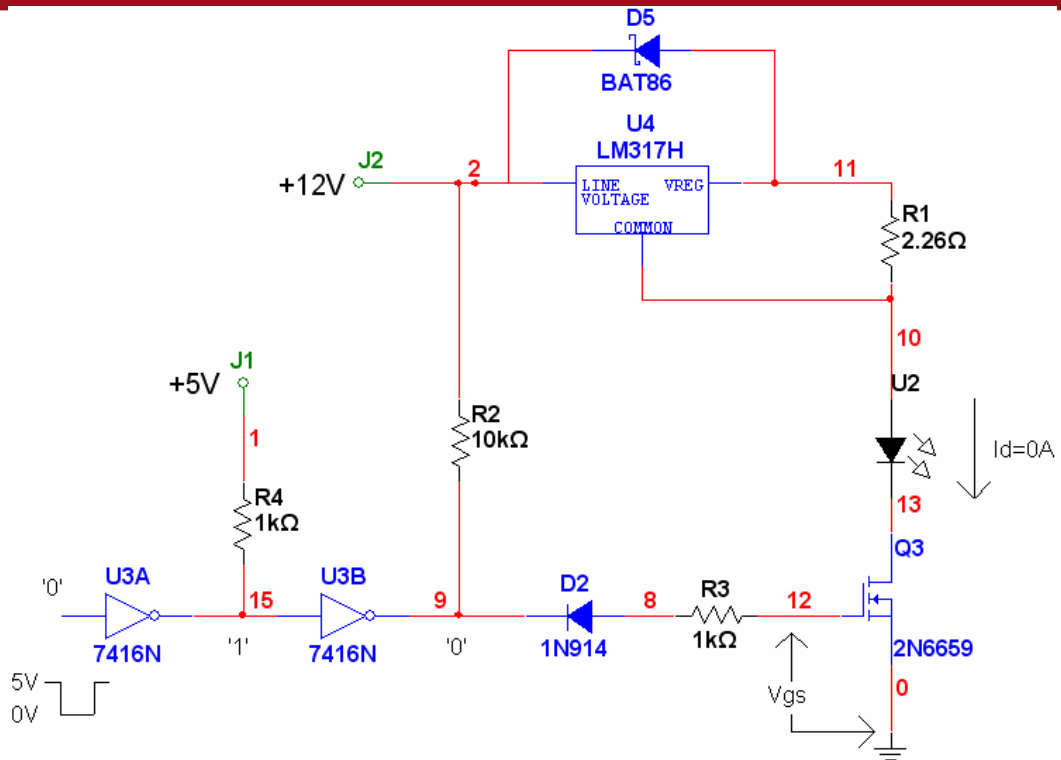


Figura 3.7 Señal de PWM está en “baja”

El tiempo de descarga (t_{off}) de C_{gs} es 0.35×10^{-6} segundos.

En la figura 3.8 se presenta el diseño total de la interfase de potencia para los tres LEDs internos (R-rojo, G-verde y B-azul) de un LED Atlas; como se observa, las 3 señales de PWM (PWM-R, PWM-G y PWM-B) que provienen del microcontrolador son independientes, es así como la intensidad luminosa de cada color primario de la luz es manejada individualmente por el usuario.

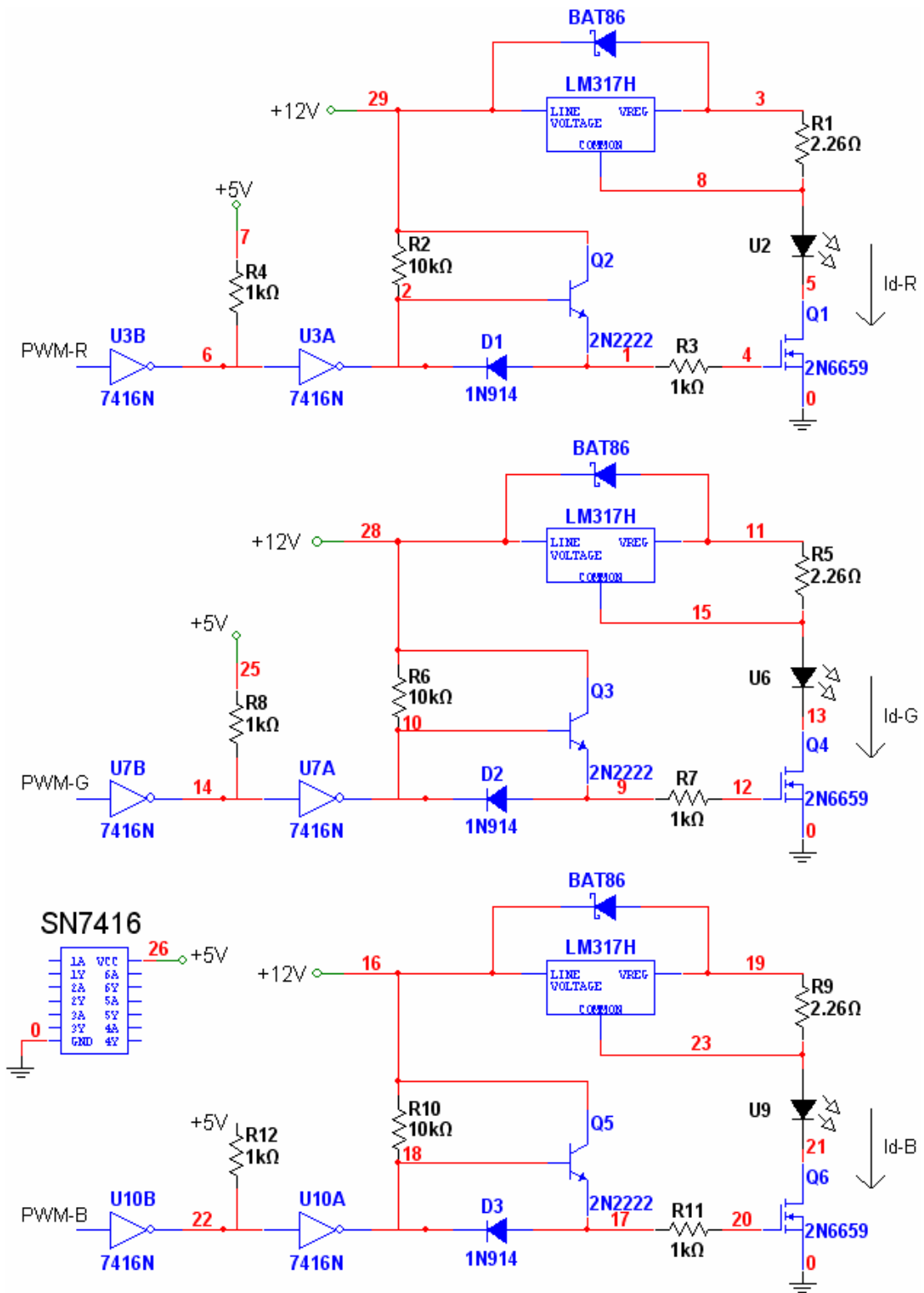


Figura 3.8 Interfase de potencia

3.3.3 Bloque de Control

El manejo del dispositivo de conmutación se realiza a través del driver expuesto en el subcapítulo anterior, el cual recibe señales de ancho de pulso variable (PWM) de un microcontrolador para controlar los tiempos de encendido y apagado del LED Atlas, con lo que se logra variar la intensidad luminosa percibida por el ojo humano; el dispositivo programable también realiza las funciones de adquisición de datos de los pulsadores y manejo de los displays de siete segmentos que muestran los dos modos de trabajo que se plantean en el sistema de iluminación. La elección del microcontrolador adecuado y los componentes de la interfase entre el usuario y el sistema de iluminación se presentan a continuación.

- a) Microcontrolador, en la tabla 3.5 se presentan dos opciones:

Tabla 3.5 Cuadro comparativo de dos microcontroladores.

	Pines	Puertos I/O	Velocidad de operación	Memoria Flash (Kbytes)	EEPROM (bytes)	RAM (bytes)	PWM	Timer: 8 y 16 bit
Pic16F785	28	18	0-16Mhz	8	512	128	3	2 y 1
Atmega8	28	23	0-8Mhz	8	512	1K	3	2 y 1

Dado que el programa desarrollado no es extenso (554 words \approx 1Kbyte), la velocidad de operación del microcontrolador no es un punto crítico en la elección, además, debido a la experiencia y familiaridad que se tiene trabajando con el microcontrolador Atmega8, es el que se elige para desarrollar la presente tesis. Como adelanto, se observa en la figura 3.9, los 22 puertos utilizados por el microcontrolador en el desarrollo del sistema de iluminación.

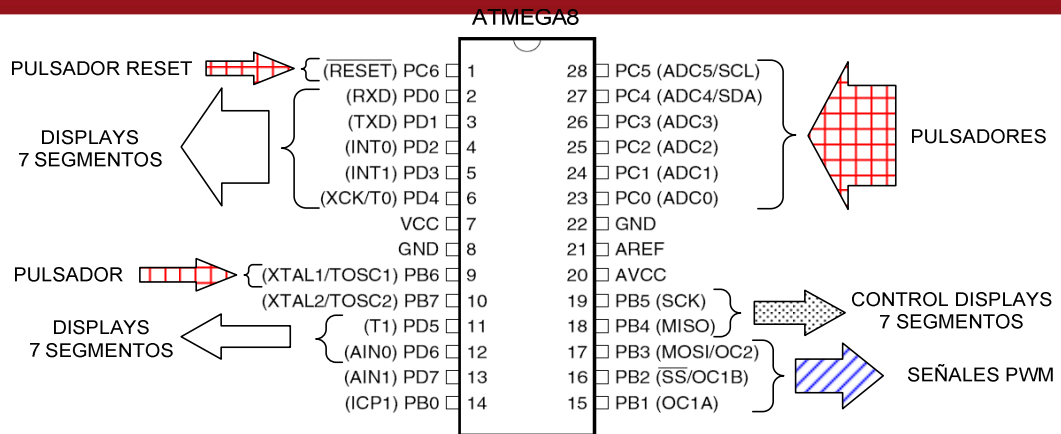


Figura 3.9. Puertos usados del microcontrolador Atmega8

- b) Display de 7 segmentos, se elige usar este tipo de interfaz entre el control y el usuario, más no una pantalla lcd, porque los requerimientos son mostrar solo dos dígitos, cada uno para indicar el nivel de trabajo de uno de los dos modos (explicación de estos modos líneas más abajo) que se tienen para que el usuario elija, es por esta razón que si se incluye una pantalla lcd en el diseño, se estaría desaprovechando toda su capacidad, como es la de mostrar letras, símbolos y dígitos en simultáneo.
- c) Se elige trabajar con pulsadores en vez de un teclado matricial, ya que la mayoría de teclados son de 4x4, con lo que se estaría desaprovechando su capacidad toda vez que se necesita solo de 8 líneas de entrada. El problema de los rebotes en los pulsadores se soluciona con un circuito RC como se observa en la figura 3.11, al final de este subcapítulo.

El bloque de control se encarga de procesar la información recibida del usuario por los puertos del microcontrolador, visualizar estos cambios que se realizan y alterar la intensidad luminosa de los tres LEDs internos del LED Atlas. El programa desarrollado para esta etapa del sistema de iluminación se encuentra en el subcapítulo 3.4; dicho algoritmo presenta dos opciones de trabajo que se brinda al usuario, llamados: modo 1 y modo 2.

- El modo 1 se encarga de aumentar o disminuir el ancho de pulso PWM en tres de los puertos del microcontrolador Atmega8: PB1, PB2 y PB3 independientemente, los cuales son las señales que reciben los tres drivers en la interfase de potencia como se muestra en la tabla 3.6, con esto se puede

variar el flujo luminoso de los colores primarios de acuerdo a la cantidad de potencia promedio que consume cada LED interno del LED.

Tabla 3.6 Líneas de PWM asociadas a puertos del microcontrolador Atmega8.

PUERTO	LÍNEA
PB1	PWM-R (rojo)
PB2	PWM-G (verde)
PB3	PWM-B (azul)

- En el modo 2, el usuario varía entre 7 colores diferentes, los cuales son: los primarios rojo, verde y azul al 100% de DC (siglas en inglés de duty cycle), los tonos de colores aproximados a los secundarios magenta, amarillo y cian que se forman con el 100% del ancho de pulso de 2 colores primarios a la vez, en este punto cabe mencionar que los colores obtenidos son de diferentes intensidades luminosas promedio ya que la cantidad de lúmenes que emiten cada uno de los LEDs a una misma corriente (I_d) es diferente debido al material inorgánico del que están hechos. Por último se obtendrá el color blanco con el 100% de DC de las líneas PWM-R, G y B. En la tabla 3.7 se muestra la combinación de los anchos de pulso para cada línea del LED Atlas

Tabla 3.7 Ancho de Pulso (DC%) de cada línea PWM para el modo 2 de trabajo.

LÍNEA	ROJO	VERDE	AZUL	AMARILLO	MAGENTA	CIAN	BLANCO
PWM-R	100	0	0	100	100	0	100
PWM-G	0	100	0	100	0	100	100
PWM-B	0	0	100	0	100	100	100

Para la interfase hombre-máquina que se realiza entre el usuario y los dos modos de trabajo del sistema de iluminación, se cuenta con 8 pulsadores y dos displays de 7 segmentos de ánodo común como se ha mencionado anteriormente. En la figura 3.10 se presenta el circuito esquemático del Atmega8 donde se observa las líneas de control de los dos displays de 7 segmentos (puertos PB4 y PB5), así como las líneas provenientes de los circuitos anti rebote de los pulsadores (puertos <PC0:PC5> y PB6 del microcontrolador) y las líneas de PWM (puertos PB1, PB2 y PB3).

En el modo 1 se tienen 3 pares de pulsadores para disminuir y aumentar la intensidad luminosa de solamente uno de los LEDs internos del Atlas, ya sea el

Se observa en la figura 3.10 que los dos displays de 7 segmentos son controlados por las señales de los puertos PB4 y PB5 del microcontrolador, los cuales conmutan las salidas del integrado de desplazamiento de registro 74LS164 (ver Anexo 8) a través de una señal de reloj (PB5), las salidas QA y QB de este componente saturan alternadamente los dos transistores npn TIP30 (Anexo 9) encendiendo un display (ánodo común) a la vez; además se usa el integrado de arreglos darlington ULN2804 (Anexo 10) para el encendido de los LEDs internos de los displays los cuales dependen de los estados lógicos de los puertos PD0 a PD6 del Atmega8. La corriente de encendido de cada uno de los LEDs (i_1) de un display de 7 segmentos proviene de la malla formada por el voltaje emisor-colector (V_{EC}) de un TIP30, la caída de tensión en uno de estos LEDs (V_f), la caída en las resistencias R1 a R7 y el voltaje de salida del ULN2804, que según su hoja de datos (Anexo 10) un valor típico es 0.9V.

$$V_{EC} + V_f + (i_1 \times R1) + 0.9 = 5 \quad (\text{ec 3.3})$$

En la ecuación 3.9, al tomar valores comunes como 0.2V para V_{EC} , extraídos de la hoja de datos del TIP30, V_f igual a 0.6V y considerando i_1 igual a 15mA (corriente necesaria para encender los leds internos de los displays de 7 segmentos), da como resultado el valor de 220Ω para las resistencias R1 a R7 de la figura 3.10.

Para asegurar el estado de saturación de los TIP30, se debe hacer cumplir la relación extraída su hoja de datos: $I_c/I_b = 10$ la que establece una corriente emisor-base de 1.5mA, para lo cual se extraen los valores típicos y máximos permitidos en las salidas del integrado de desplazamiento de registro 74LS164. Esto lleva a resolver la ecuación 3.4 para hallar el valor de las resistencias R8 y R9 de la figura 3.10.

$$V_{EB} + (i_b \times R8) + V_{OH} = 5 \quad (\text{ec 3.4})$$

Considerando V_{OH} igual a 3.4V, valor típico extraído de la hoja de datos del 74LS164 (Anexo 8); y V_{EB} del TIP30 igual a 0.7V (Anexo 9) para su estado de saturación, da como resultado el valor de 660Ω para el par de resistencias R8 y R9 de la figura 3.10.

En la figura 3.11 se presenta el circuito esquemático de uno de los 7 pulsadores normalmente abiertos que se encuentran relacionados a los puertos PC0 hasta PC5 y PB6 del Atmega8. Cada uno de estos pulsadores se encuentra en un circuito anti rebote, con esto no se permite picos indeseados de voltaje al presionar un pulsador con lo que se evita registrar posibles pulsaciones fantasma. Como se observa es un circuito RC que al alimentarse con +5V se carga el voltaje en el condensador a través de R1 (5K) en un tiempo aproximado de 5mseg ($\tau_1 = R1 \times C1$) con lo que la compuerta inversora Schmitt trigger HEF40106 establece un estado de '0' lógico en el puerto de entrada del microcontrolador.

Al presionarse S6, la tensión en el condensador se descarga a través de R2 (100 Ω) en un tiempo de 0.1mseg ($\tau_2 = R2 \times C1$) con lo que se obtiene un estado de 'alta' en el Atmega8.

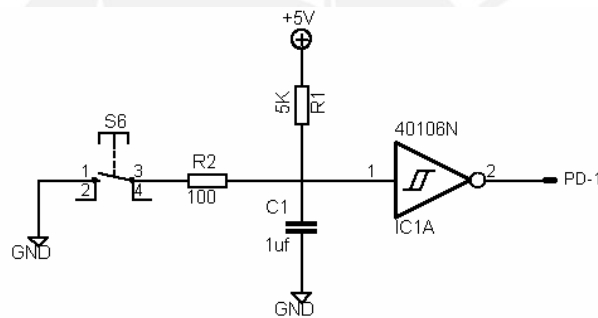


Figura 3.11 Circuito esquemático para cada uno de los 7 pulsadores de selección de los modos 1 y 2

El pulsador designado para el reinicio del programa (RESET) se encuentra asociado al puerto PC6 y se observa su circuito esquemático en la figura 3.10.

3.3.4 Fuente de alimentación

Previo al diseño de la fuente de alimentación se halla la potencia consumida por las diferentes etapas del sistema de iluminación.

Los cálculos de consumo para la interfase de potencia son hallados para el estado de conmutación '1' lógico de la señal de PWM, ya que, en el caso contrario no fluye corriente por ninguna de las tres líneas del LED Atlas.

De la tabla 3.2 se obtiene los valores de caída de tensión en los LEDs y de la hoja de datos del mosfet 2N6659 (Anexo 5) el voltaje drenador-surtidor 0.9V a una tensión V_{gs} de aproximadamente 12V y una corriente drenador-surtidor (I_d) de 550mA. La potencia consumida por el dispositivo de conmutación es $0.9 \times 0.55 = 0.495W$ y por la resistencia R_{sense} es 0.68W. Para el cálculo en el regulador de voltaje LM317HV se tiene que obtener la diferencia entre 12V y la suma de tensiones de R_{sense} , más V_f de cada LED interno y V_{ds} , como se muestra en la ecuación 3.5.

$$P_{LM317H} = 0.55 \times [12 - (1.25 + V_f + 0.9)] \quad (\text{ec } 3.5)$$

En la tabla 3.8 se tiene la potencia disipada de cada regulador LM317HV:

Tabla 3.8 Potencia disipada por los tres LM317HV de cada línea R, G y B del LED Atlas

POTENCIA DISIPADA LM317HV a 550mA	
R	2.77 W
G	1.34 W
B	1.07 W

El consumo de cada una de estas redes compuesta por el regulador de voltaje LM317HV, la resistencia R_{sense} , un LED interno del LED Atlas y el dispositivo de conmutación es: $12 \times 0.55 = 6.6W$

Los tres drivers usan un solo integrado SN7416 que consta de 6 buffers inversores que se alimentan con +5V al igual que todo el bloque de control. La corriente que consumen los buffers es aproximadamente 20mA, los dos displays de 7 segmentos disipan 7 veces la corriente hallada a través de la ecuación 3.3 (220mA), ya que se enciende alternadamente; el consumo máximo del microcontrolador es alrededor de 40mA con una alimentación de 5V según su hoja de datos y de 10mA por cada puerto utilizado, como en este diseño se usa 20 puertos, el gasto total del Atmega8 es alrededor de 240mA. La corriente total absorbida de una fuente de +5V es 460mA, es por esta razón que se elige usar un regulador de voltaje LM7805 para ajustar la tensión de alimentación de 12V (voltaje continuo a la salida del adaptador AC/DC que se presenta líneas más adelante) a 5V, ya que su máxima corriente soportada es 1A. En la figura 3.12 se presenta el diseño del regulador de voltaje LM7805, cuya potencia disipada es 3.22W.

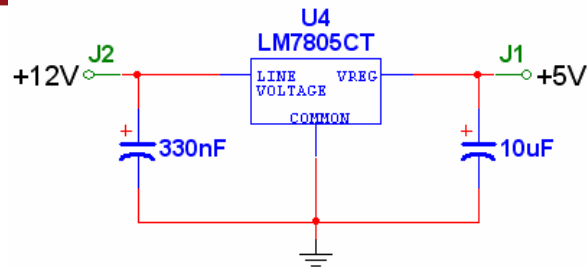


Figura 3.12 Circuito esquemático del regulador de voltaje LM7805.

Para el diseño de la fuente de alimentación o llámese adaptador AC/DC, se tiene que considerar la corriente total consumida por el sistema de iluminación, para esto se suma el consumo de la interfase de potencia y el bloque de control. Considerando lo hallado en el párrafo anterior, la corriente que consume todo el sistema de iluminación es 2.15A (De $3 \times 0.55 + 0.5 = 2.15A$). La tabla 3.9 presenta el consumo de corriente a 12 y 5V.

Tabla 3.9 Consumo de corriente

Voltaje	Corriente consumida
12V (de los LM317HV)	1,65A
5V (del LM7805)	0,5A

Se elige un rectificador de onda completa de puente de diodos junto a un filtro compuesto por un condensador C como se muestra en la figura 3.13. Para la elección de los componentes se usa la teoría basada en las curvas de Schade del manual de On Semiconductor [29] que se encuentran en el ANEXO 12, se tiene en cuenta las siguientes ecuaciones:

$$r_f = \frac{V_R}{2\sqrt{2} \times V_{dc}} \times 100\% \tag{ec 3.6}$$

$$C = \frac{\omega CR_L}{2\pi f \left(\frac{V_{dc}}{I_o} \right)} \tag{ec 3.7}$$

Donde r_f sirve para determinar valores mínimos del capacitor que aseguren el rizado deseado (ωCR_L) y la resistencia total en serie (R_s) del transformador, luego de obtener estos datos de las curvas 8.5 y 8.3 del anexo 12 se halla el valor del capacitor C según la ecuación 3.7. Para los requerimientos del rectificador se usa

$I_f = I_o/2$ para hallar la corriente promedio por diodo y las corriente RMS y pico son extraídas de las graficas 8.4 del anexo en cuestión. Con respecto al transformador, el voltaje RMS del secundario es $V_s = (V_m + 2)/\sqrt{2}$ y la potencia aparente se halla mediante el producto $V_s \times I_{RMS} \times \sqrt{2}$.

Considerando: V_R igual a 0.5V, I_o igual a 2.15A, V_{dc} igual a 12V y R_L igual 5.58 Ω (se obtiene del cociente de 12V y 2.15A) se obtiene un valor de capacitancia de 18mF. Para la elección de los diodos rectificadores se obtiene la corriente promedio 1.05A, corriente RMS 1.8A, la corriente pico igual 8.7A y PIV (máxima diferencia de tensión inversa en un diodo) igual a 28V, con estos datos se elige al diodo 1N5401 (ver Anexo 11). Los parámetros que se obtienen para el transformador son $V_s=11.34V_{RMS}$ y una potencia aparente de 29VA; con estos resultados se elige un transformador de valor comercial en el mercado de 220/12V_{RMS}, 3A y 36VA.

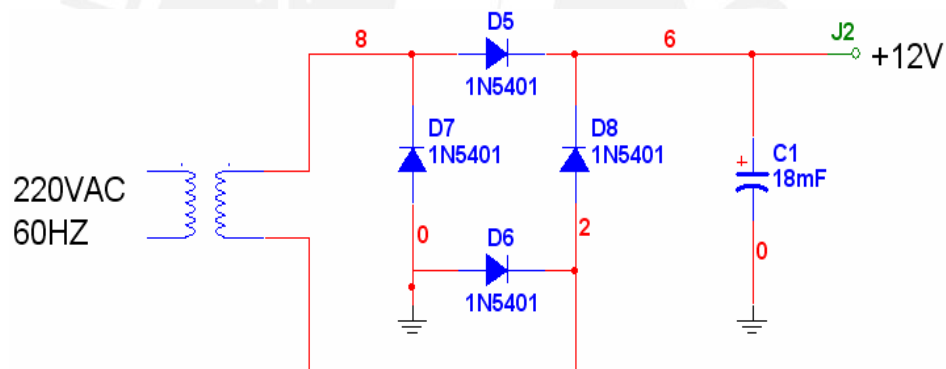


Figura 3.13 Adaptador AC/DC

3.3.4.1 Disipador de calor del LED Atlas

La máxima potencia que disipa el LED Atlas se da en el último estado del modo 2, ya que los tres LEDs internos se encuentran encendidos al 100% del ancho de pulso produciendo el color blanco. El producto NT-43F0-0424 RGB – ATLAS consta de tres LEDs montados sobre una placa de circuito impreso con un distribuidor de calor de aluminio en la parte posterior; esto se muestra en la figura 3.14.

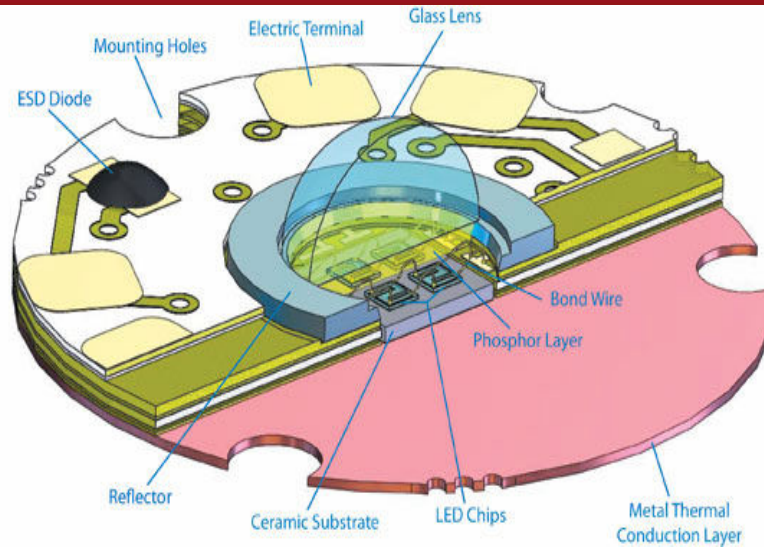


Figura 3.14 Esquema constructivo del LED Atlas.
(Accesorios de Lamina Lighting Incorporated, 2008)

Como se puede extraer de la tabla 3.2 la potencia total que disipa el LED es 11.2W; tomando valores de su hoja de datos (Anexo 1) se tiene que la resistencia térmica entre la unión y su encapsulado (θ_{JC}) es 2°C/W, la temperatura máxima de la unión, T_J , es 125°C. Considerando que la unión con el disipador será usando silicona termo conductora, se obtiene, del manual de reguladores de voltaje del fabricante de semiconductores ON Semiconductor [30], que la resistencia térmica entre la cápsula y el disipador (θ_{CS}) es 1.6°C/W. Se halla la resistencia térmica máxima permitida entre el disipador y el aire circundante, θ_{SA} , resolviendo la ecuación 3.8 (también extraída del manual mencionado). [30]

$$\theta_{SA} = \frac{T_J - T_A}{\text{Potencia Trabajo}} - \theta_{JC} - \theta_{CS} \quad (\text{ec 3.8})$$

Se considera una temperatura ambiente (T_A) de 25°C, lo que da como resultado un θ_{SA} requerida por el disipador de 5.3°C/W; por lo que se escoge el disipador recomendado por el fabricante Lamina Lighting para los LEDs Atlas: HS-4150-0345 de 1.5" de espesor, que según su hoja de especificaciones (ver Anexo 13) la resistencia térmica para un consumo de potencia de 11W es de 4.5°C/W. [23]

Se muestra en la figura 3.15 las dimensiones físicas del disipador de calor elegido para el led Atlas, donde el valor de "A" es 1.5 pulgadas.

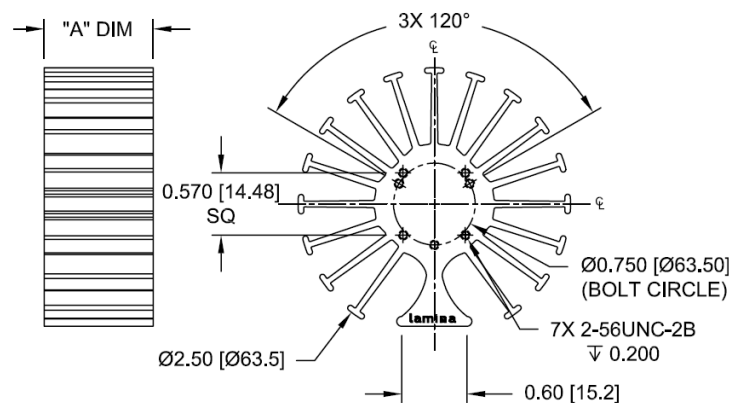


Figura 3.15 Dimensiones físicas del disipador de calor HS-4150-0345
Unidades: pulgadas [milímetros] (Lamina Lighting Incorporated, 2008)

3.3.4.1 Disipadores de calor de los reguladores de voltaje

En este subcapítulo se presenta el motivo por el cual se usa disipadores de calor para los tres reguladores de voltaje LM317HV y el único LM7805, además, porque no es necesario para los tres mosfets 2N6659, usados para la conmutación de los LEDS Atlas en la interfase de potencia.

Para hallar la máxima temperatura del ambiente tolerada sin el uso de un disipador de calor, se usa la ecuación 3.9: [30]

$$T_A = T_J - (PotenciaTrabajo \times \theta_{JA}) \quad (\text{ec 3.9})$$

Primero, asumiendo que voy a trabajar a la temperatura de juntura máxima (T_{J-MAX}) permitida por los reguladores de voltaje (125°C) y sin disipador de calor, la temperatura del ambiente máxima (T_{A-MAX}) debería ser -13.5, 58 y 71.5°C para los reguladores de voltaje LM317HV que alimentan las líneas de los LEDs rojo, verde y azul respectivamente, así como de -102.5°C para el componente LM7805. Lo cual da dos valores, de los cuatro, bajo cero, lo que no es posible en este sistema de iluminación; para los otros dos, como no es recomendable trabajar a la T_{J-MAX} , si se reduce este a un valor razonable (por lo menos 25 ó 30°C), la T_{A-MAX} también sería menor a 0°C, lo cual obliga el uso de disipadores de calor en todos los reguladores.

Considerando el tipo de empaque TO-220 para los reguladores de voltaje LM317HV y el LM7805, se resuelve la ecuación 3.8 tomando en cuenta la información de las hojas de datos, así como una T_A deseada de 25°C, el uso de una silicona termo

conductor entre capsula-disipador, y la potencia disipada por cada regulador, esta última información extraída de la tabla 3.8, da como resultado:

Tabla 3.10 Resistencias Térmicas θ_{SA}

	Resistencia Térmica Disipador-Ambiente [°C/W] θ_{SA}
LM317HV - Rojo	30,5
LM317HV - Verde	69,02
LM317HV - Azul	87,85
LM7805	21,97

Se elige un mismo disipador de calor, para los cuatro reguladores de voltaje, de la marca WakeField Thermal Solutions de modelo 637-15ABP [31] con una resistencia térmica de 10.8°C/W, con las siguientes dimensiones: altura 38.1mm, máxima área ocupada sobre tarjeta 34.9 x 12.7mm (véase Anexo 14).

Con respecto a los mosfets 2N6659, no es necesario usar un disipador de calor para cada uno de estos, debido básicamente a que se eligió el empaque metálico TO-39, el cual, según hoja de datos (Anexo 5), puede disipar hasta 6.25W sin disipador de calor y los mosfets usados solo van a disipar un máximo de 0.33W, es decir casi 18 veces menos de lo que estipula la información técnica; además considerando la ecuación 3.9, la temperatura de ambiente máxima soportada por el mosfet 2N6659 es de 143°C, para la potencia disipada y a la máxima de temperatura de juntura ($T_{J-MAX} = 150^\circ\text{C}$). Por último, si se considera que se desea trabajar a una temperatura de juntura de 30°C, a las mismas condiciones, la temperatura de ambiente máxima debería de ser de 24°C, lo que es factible en el sistema de iluminación diseñado en la presente tesis.

3.4 Software

El diagrama de flujo del programa desarrollado para el sistema de iluminación se presenta en las figuras 3.16 y 3.17.

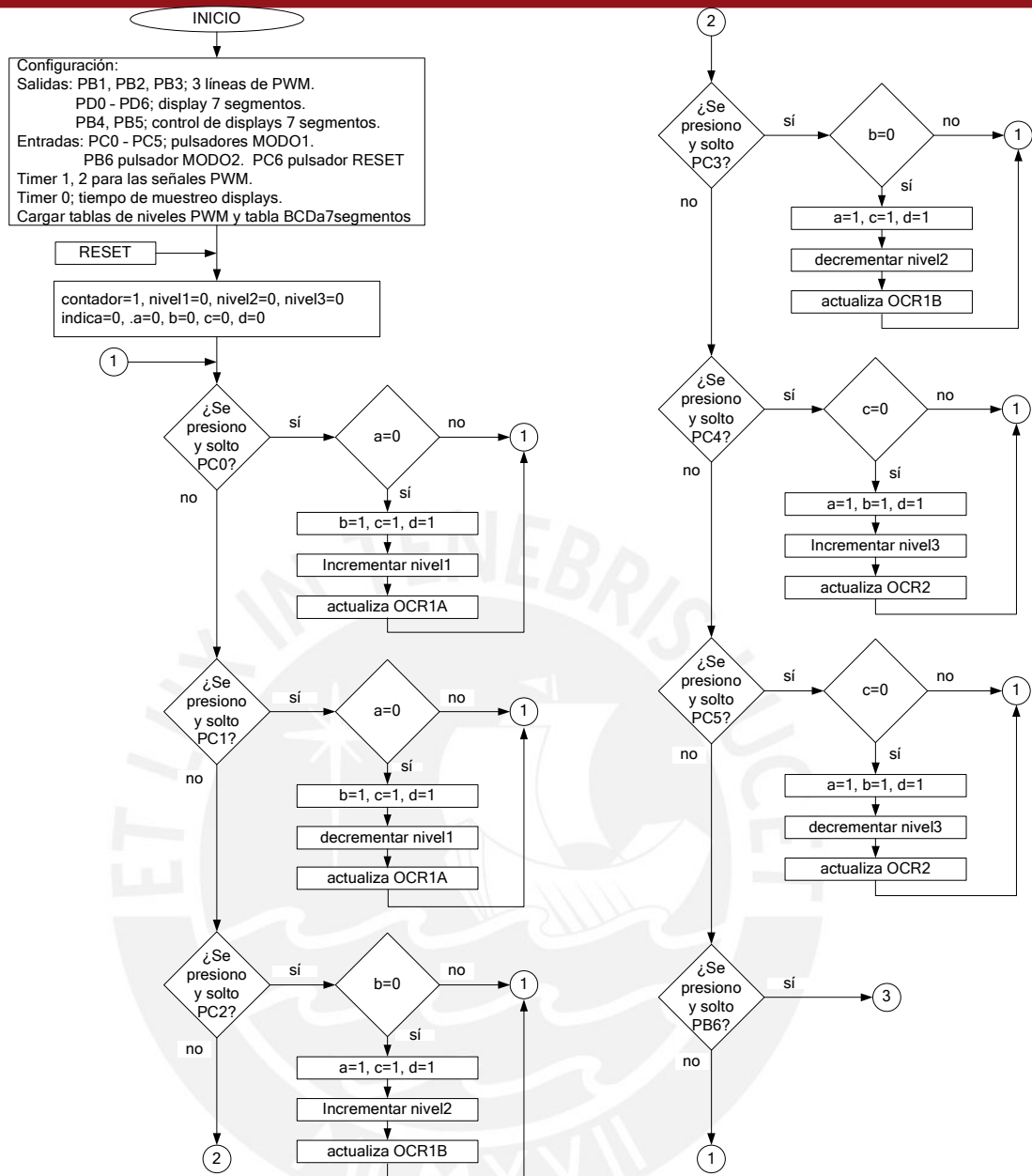


Figura 3.16 Diagrama de bloques – programa principal

Como se observa en la figura 3.16 el programa inicia configurando los puertos PB1 a PB5 y de PD0 a PD6 como salidas, y desde PC0 hasta PC6 junto a PB6 como entradas. Antes de definir los valores iniciales de las variables se localiza el vector RESET que atiende el pedido del usuario, mediante el pulsador asociado al puerto PC6, de cambiar de modo (véase capítulo 3.3.3) o cambiar de color primario si se encuentra en el modo 1. El programa se encuentra en un lazo cerrado a espera que se presione algún pulsador que inicie cualquiera de los dos modos de trabajo, si se activan los pulsadores asociados a los puertos PC0 o PC1 se trabaja el LED rojo en

el modo 1, para PC2 o PC3 el LED verde en el modo 1, para PC4 o PC5 el LED azul en el mismo modo anterior, pero si se presiona PB6 se entra al modo 2 (columna izquierda de la figura 3.17), el cual espera que se presione el mismo pulsador para cambiar de colores primarios a secundarios y al blanco.

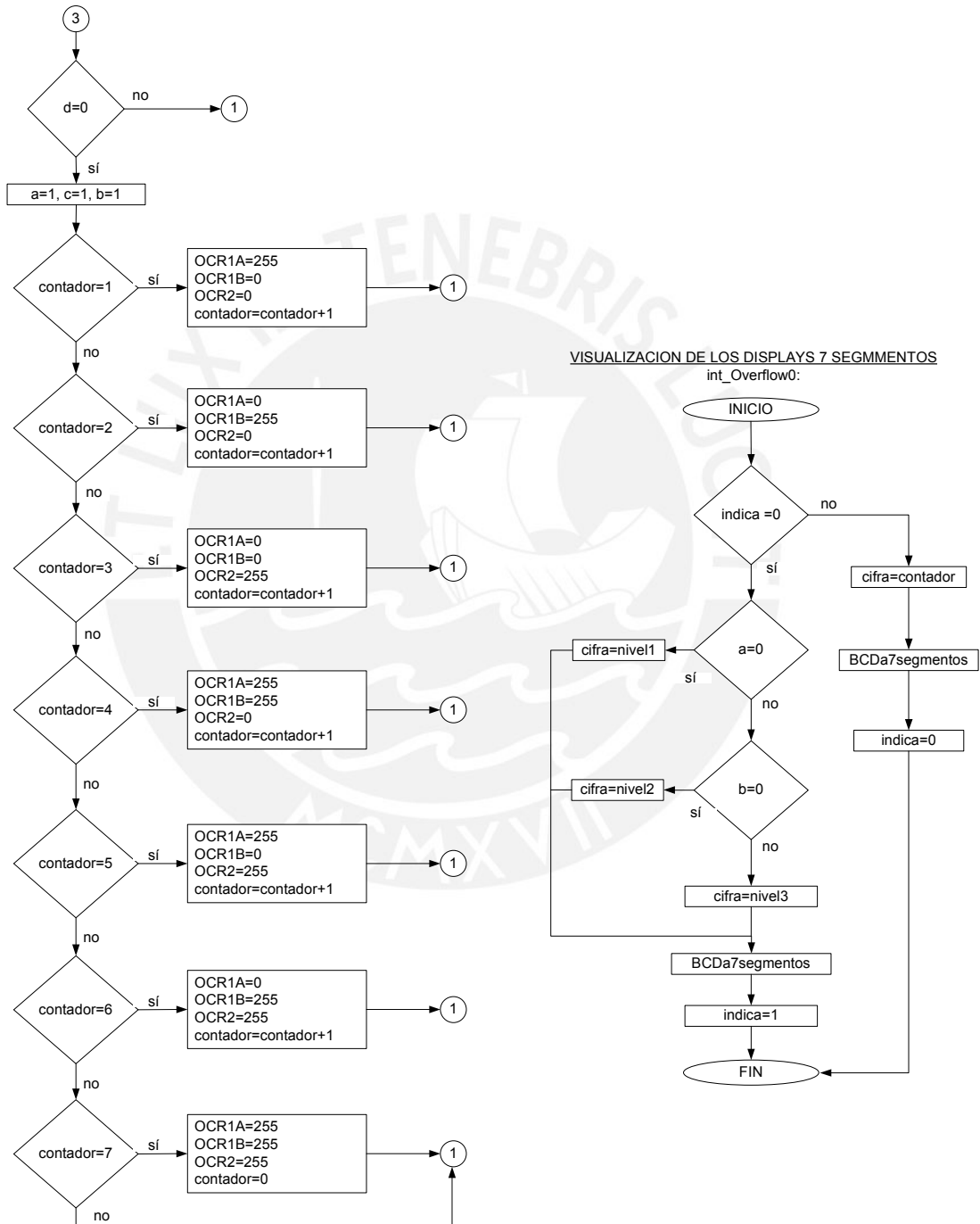


Figura 3.17 Diagrama de bloques – continuación de programa principal y subrutina para visualizar displays de 7 segmentos.

En paralelo al desarrollo del programa se tiene la rutina de servicio de interrupción por desbordamiento del timer 0 para multiplexar los dos displays de 7 segmentos cada 1mseg (figura 3.17 - columna derecha).

Todo lo planteado en la sección 3.3.3 se tiene en el diagrama de flujo anterior; se observa la configuración de los puertos PD para los displays de 7 segmentos, PC para los pulsadores; PB1, PB2 y PB3 para las líneas de PWM rojo, verde y azul respectivamente; y por último se usan los timers 1 y 2 para generar una frecuencia de PWM de 2KHz.



CAPÍTULO 4

SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

4.1 Descripción

La simulación de la tesis se ha dividido en dos bloques: la interfase de potencia y la generación de las señales de ancho de pulso variable por el microcontrolador Atmega8. En el subcapítulo 4.2 se observa los efectos de la variación del ancho de pulso en la interfase de potencia, para esto se presenta sólo una de las tres líneas independientes del LED Atlas, ya que los efectos son los mismos en los otros dos LEDs internos. En el subcapítulo 4.3 se observa las señales de los puertos de salida del microcontrolador, estas son las tres líneas de PWM que recibe la interfase de potencia.

4.2 Simulación de la Interfase de Potencia

EL simulador usado es el Electronic Workbench NI Multisim versión 10.0.144 de National Instruments.

Todos los puntos de adquisición de datos son tomados de la figura 3.5 y se simula tomando el LED interno azul, el cual tiene una diferencia de tensión entre ánodo-cátodo (V_f) de 7.9V a 550mA y la frecuencia de las señales PWM es de 2Khz. El primer caso presenta la tensión drenador-surtidor y puerta-surtidor del mosfet 2N6659, así como el voltaje de salida del regulador LM317HV y la tensión en el ánodo del LED interno del LED Atlas con respecto a GND, esta simulación se realiza usando un ciclo de trabajo de 35%.

a) Caso1: DC=35% $f=2\text{kHz}$

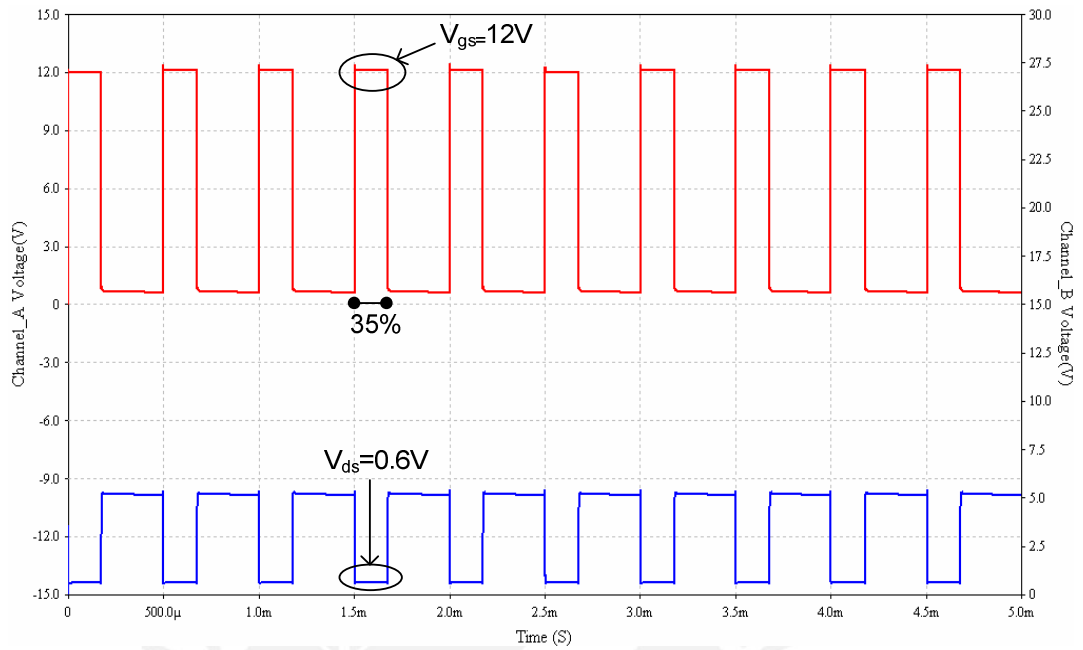


Figura 4.1
 Canal A (izquierda) - línea superior: V_{gs} - Puntos 12:0
 Canal B (derecha) - línea inferior: V_{ds} - Puntos 13:0

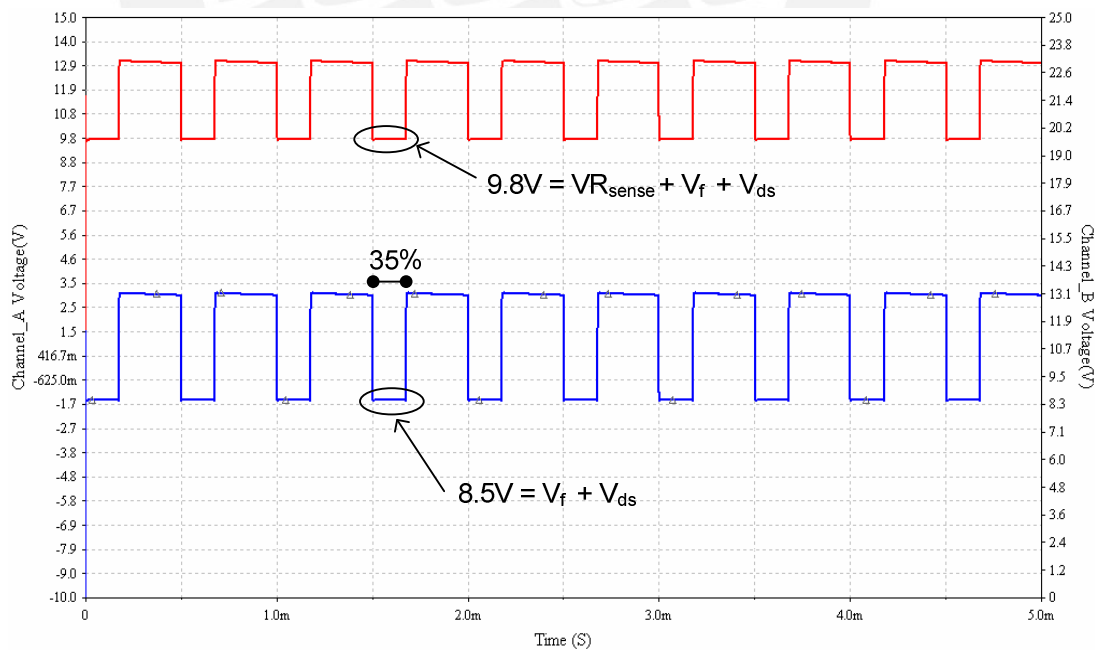


Figura 4.2
 Canal A (izquierda) - línea superior: V_{out} del LM317HV - Puntos 11:0
 Canal B (derecha) - línea inferior: Tensión ánodo LED - Puntos 10:0

b) Caso2: DC=70% $f=2\text{kHz}$

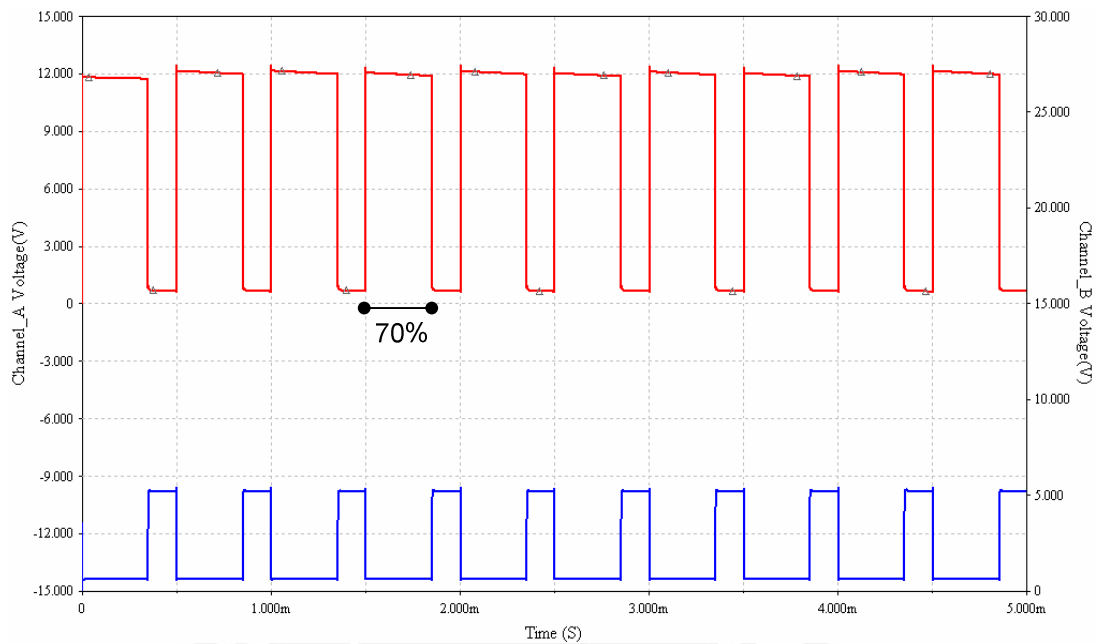


Figura 4.3

Canal A (izquierda) - línea superior: V_{gs} - Puntos 12:0
Canal B (derecha) - línea inferior: V_{ds} - Puntos 13:0

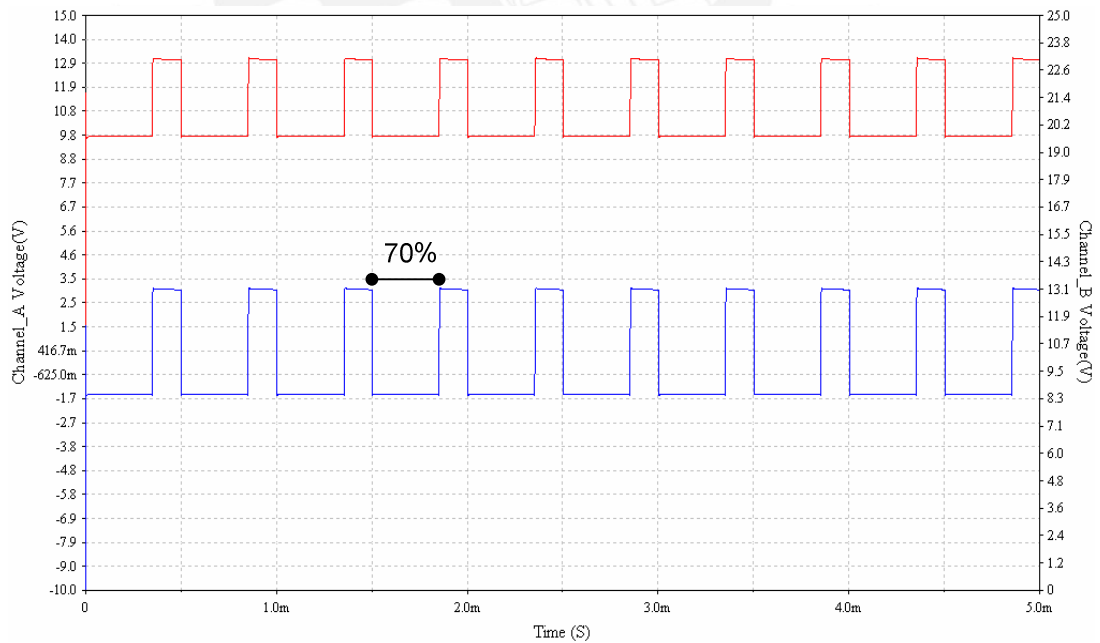


Figura 4.4

Canal A (izquierda) - línea superior: V_{out} del LM317HV - Puntos 11:0
Canal B (derecha) - línea inferior: Tensión ánodo LED - Puntos 10:0

Como se observa en las figuras 4.1 y 4.3, cuando la tensión V_{gs} (línea superior) es 12V, la caída entre el drenador y surtidor es aproximadamente 0.6V; en el mismo tramo de tiempo la diferencia de tensiones de las dos curvas en las figura 4.2 y 4.4 es 1.25V, es en este lapso en el cual logra atravesar un flujo de corriente de 550mA (I_d) por el LED, la resistencia R_{sense} y el mosfet, polarizando en directa el LED Atlas. Para una explicación más detallada véase la reseña de la figura 3.6 - Señal de PWM en “alta”, en el capítulo 3.3.2.

Se aprecia lo contrario cuando la tensión V_{gs} es aproximadamente 0.5V, esto produce el cambio de estado del mosfet, llevándolo a corte y elevándose el voltaje V_{ds} a 5V, impidiendo que fluya la corriente a través del LED. Se observa que la diferencia de tensiones de las líneas superior e inferior de las figuras 4.2 y 4.4, es 0V, con lo cual aseguramos que la corriente que fluye a través de la resistencia R_{sense} , el LED Atlas y el mosfet 2N6659 es cero. El circuito esquemático de esta fase se encuentra en la figura 3.7 - Señal de PWM en “baja”, en el capítulo 3.3.2.

4.3 Simulación del Software

La simulación se realiza con el programa VMLAB 3.14. Como ya se explicó en la sección 3.3.3 y 3.4 de la presente tesis, el programa desarrollado cumple dos objetivos principales: la variación de las líneas PWM-R, PWM-G, PWM-B independientemente, y segundo, la generación de colores primarios (rojo, verde, azul), tonos de colores secundarios (magenta, cian, amarillo) y el blanco, con un ancho de pulso de 100% para estos siete casos. Estas dos opciones de trabajo son elegidas por el usuario, para esto se usa el teclado virtual del programa VMLAB asociado a los puertos PC0, PC1, PC2, PC3, PC4, PC5, PC6 y PB6.

La configuración del teclado se explica a continuación: el botón 3 se encuentra asociado al puerto PB6 y cumple la función de inicializar el programa (RESET), este debe ser presionado cada vez que se desee cambiar de modo de trabajo o de color en el modo 1, esto se logra poniendo a ‘0’ lógico todas las salidas de PWM.

En el modo 1 se usan los botones 0, 1, 2, 4, 5 y 6, estos trabajan en parejas para aumentar y disminuir el ancho de pulso de cada una de las 3 líneas de PWM. El par 0 – 4, asociados a los puertos PC0 y PC1 respectivamente, se encarga de aumentar y disminuir el ciclo de trabajo de la línea PWM-R (PB1), encargada de la

conmutación del LED rojo. El siguiente par de botones 1 (PC2) – 5 (PC3) realizan la misma función sobre el puerto PB2, el cual conmuta el LED verde del LED Atlas. El último par 2 – 6, asociados a los puertos PC4 y PC5 respectivamente, opera sobre el puerto PB3 que corresponde a la línea de conmutación del LED interno azul.

El botón 7 es el encargado de entrar al segundo modo de trabajo, en el cual se varía entre los colores rojo, verde, azul, amarillo, magenta, cian, y blanco conforme se presione repetidamente este botón.

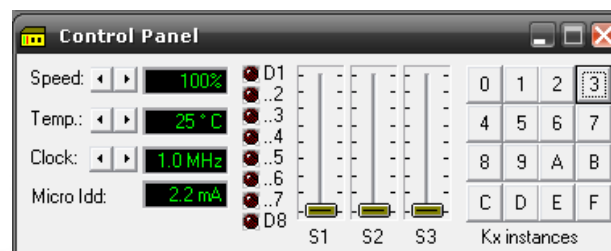


Figura 4.5 Tablero de control donde se simulan los 8 pulsadores.

A continuación se presentan los dos modos de trabajo:

a) Modo 1. Para ingresar a este modo de trabajo solo hace falta presionar el botón 3 (todas las líneas con un ancho de pulso de 0%) y luego cualquiera de los tres pares de botones antes mencionados. En las figuras 4.7, 4.8 y 4.9 se presentan las variaciones del ancho de pulso de cada una de las 3 líneas de PWM a un 35 y 70%.

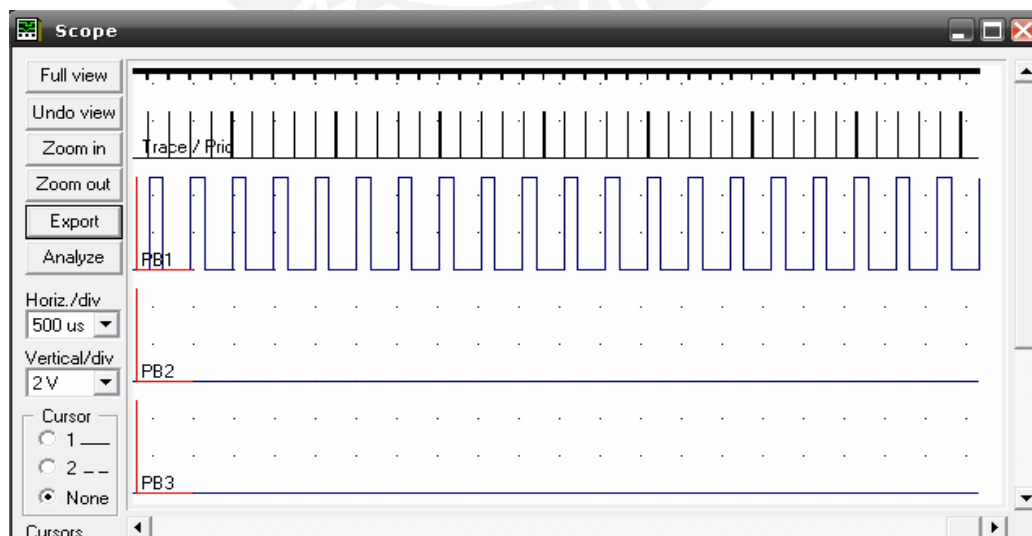


Figura 4.6
Variación del PWM-R (PB1) con un DC=35%

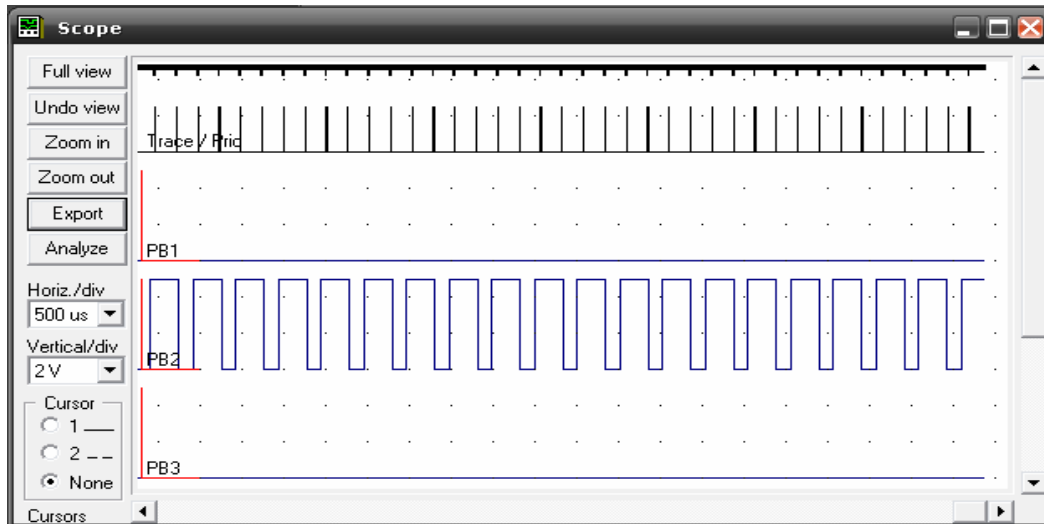


Figura 4.7
Variación del PWM-G (PB2) con un DC= 70%

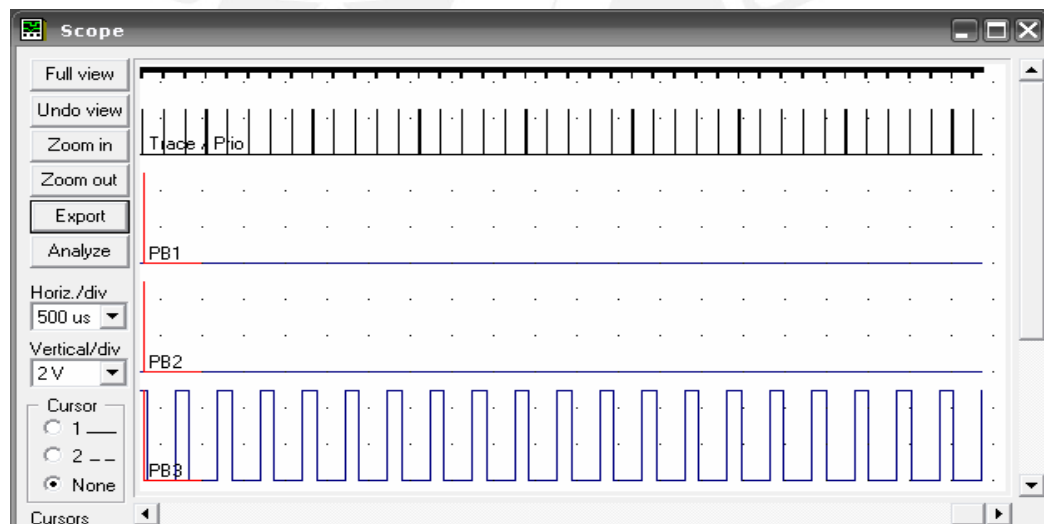


Figura 4.8
Variación del PWM-B (PB3) con un DC=35%

b) Modo 2, en esta opción se cambia entre los 3 colores primarios, los 3 secundarios y por último el blanco; para entrar a este modo se tiene que presionar el botón 3 para apagar los tres LEDs internos del Atlas y luego el número 7 para realizar el cambio secuencial de colores.

A continuación se observa las señales en los puertos PB1, PB2 y PB3 cuando se genera el color primario rojo (figura 4.9), el secundario cian (figura 4.10) y por último el blanco (figura 4.11).

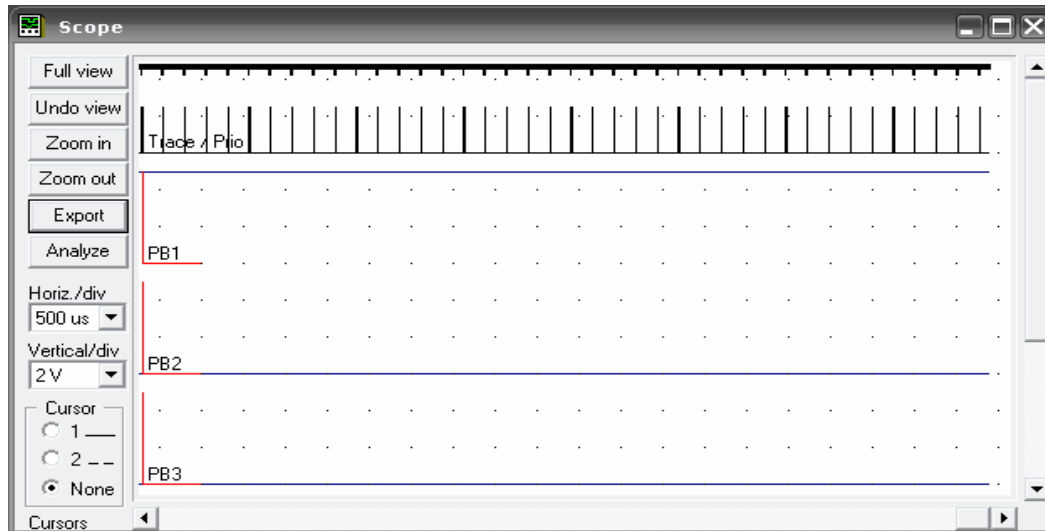


Figura 4.9
Color primario: rojo (PB1 con DC=100%)

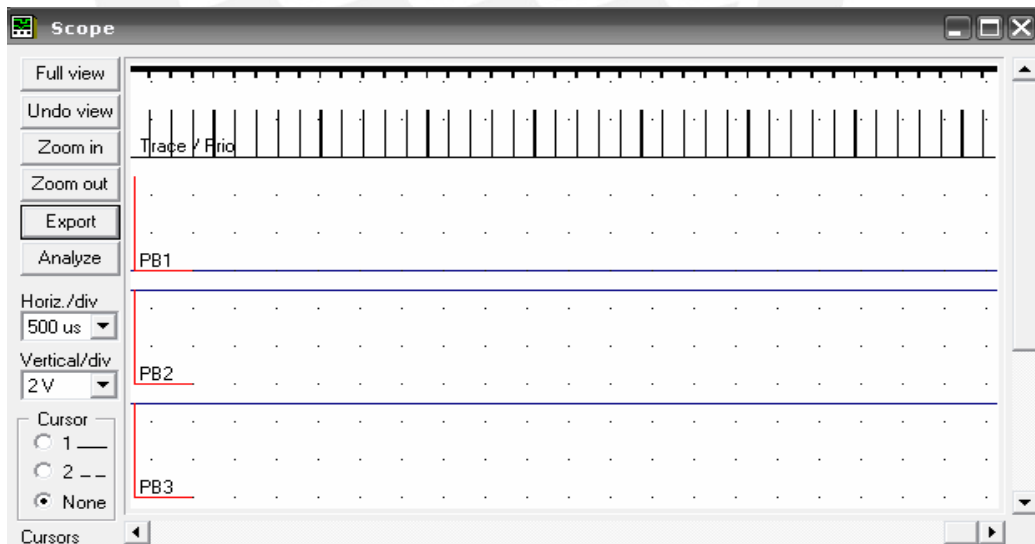


Figura 4.10
Color secundario: cian (PB2 y PB3 con DC=100%)

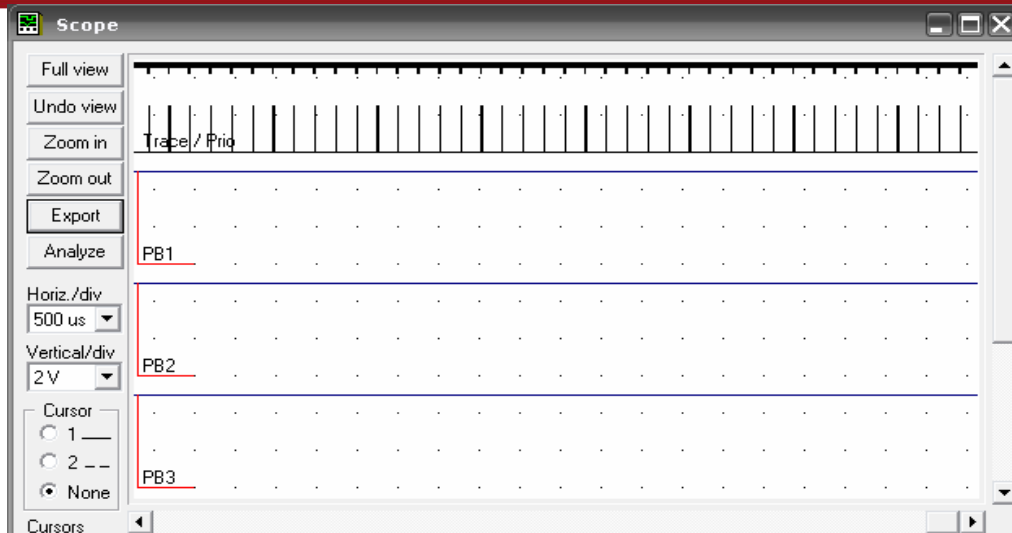


Figura 4.11
Color: blanco (PB1, PB2 y PB3 con DC=100%)

Como se observa en las figuras 4.9, 4.10 y 4.11 se obtienen los colores anteriores combinando las diferentes líneas de PWM y estableciendo el ancho de los pulsos en 0 y 100% conforme la información de la tabla 3.7 localizada en subcapítulo 3.3.3.

4.4 Costos

En la tabla 4.1 se presentan los precios de los componentes utilizados en el diseño del sistema de iluminación. Los servicios se especifican en la siguiente página.

Tabla 4.1 Costo de Productos

PRODUCTO	UNITARIO \$USD	CANTIDAD	ACUMULADO \$USD
LM317HV *	3,01	3	9,03
LED NT-43F0-0424 RGB ATLAS	24,0	1	24
2N6659	2,90	3	8,7
SN7416	0,64	1	0,64
LM7805	0,47	1	0,47
2N2222	0,36	3	1,08
ATMEGA8	3,66	1	3,66
BAT86	0,15	3	0,45
ULN2804	1,05	1	1,05
74LS164	0,64	1	0,64
HS-4150-0345**	8,12	1	8,12
1N5401	0,35	4	1,4
Capacitor 18mF 25V	5,29	1	5,29
Transformador 220/12VRMS 3A 36VA ***	13,4	1	13,4
637-15ABP ⁺	2,49	4	9,96
TOTAL PRODUCTOS:			87,89

- * Regulador de voltaje con empaque tipo TO-220.
- ** Disipador de calor radial anodizado de 1.5" (espesor) de Lamina Ligthing.
- *** Costo unitario considerando un pedido mínimo de 30 unidades.
- † Disipador de calor anodizado para los reguladores de voltaje LM317HV y LM7805.

Todos los valores son extraídos de páginas de distribución de componentes electrónicos con sede en los Estados Unidos de Norteamérica (Digi-key, etc). No se incluye el precio de envío a nuestro país, ya que, varía dependiendo de la compañía de transportes que se elija. También se puede considerar un chasis de fibra de vidrio, donde se ubique los distintos circuitos del sistema y la interfase hombre-máquina, con un costo aproximado de 150 soles.

Con respecto a los servicios; el costo de la fabricación de una tarjeta impresa depende del material, tamaño, número de capas y caras que se desee usar. Para el diseño presentado, si se integran los circuitos de control y potencia en una sola tarjeta, eligiendo la fibra de vidrio como materia prima, usando las dos caras con una capa cada una y un tamaño de 10x8 cm² se puede estimar un costo de 40 soles en el mercado local. Estimando un tiempo de 2 meses para la realización del proyecto, el costo de la mano de obra por mes sería 1200 soles.

El precio de venta del sistema de iluminación estaría dado por la suma del costo total de los productos que lo integran más el margen de ganancia; considerando el cambio del dólar americano a S/3.00, el costo del sistema de iluminación sería de 550 soles la unidad, la cual considera un porcentaje de ganancia de 35% sobre el costo total del producto.

CONCLUSIONES

Finalizado el diseño de un sistema de iluminación para espacios publicitarios de tamaño pequeño usando LEDs de potencia RGB, se presentan las siguientes conclusiones.

- El objetivo de variar la intensidad luminosa de los colores rojo, verde y azul se cumple con el diseño del circuito electrónico y la simulación del software presentado en el capítulo 3 y 4, respectivamente.
- El segundo objetivo planteado fue permitir que el usuario elija generar los colores secundarios y el blanco, para esto se propone un diseño en el capítulo 3 y como se observa en la simulación se cumple con lo requerido.
- El sistema diseñado en esta tesis también sirve en la iluminación de piezas en museos o pinturas en galerías, ya que los LEDs emiten poco calor y rayos UV, los cuales son factores dañinos para cualquier obra de arte.
- El uso de este sistema de iluminación en paralelo a otros iguales lleva a la necesidad de llevar y centralizar la interfase hombre-máquina a un computador, dejando de lado el uso de pulsadores y displays de 7 segmentos.
- El uso de un adecuado disipador de calor para el LED Atlas es necesario, ya que los leds de potencia dependen directamente de la temperatura de trabajo para mantener su tiempo de vida útil.

RECOMENDACIONES

- El primer modo de trabajo del sistema de iluminación se puede modificar para que permita la variación de la intensidad luminosa de cualquier de los tres LEDs internos del Atlas en simultáneo, esto lleva a la necesidad de medir a través de un fotómetro las coordenadas X e Y de la curva fotópica según el estándar CIE, para poder tabular los colores generados por la combinación de los tres colores primarios de la luz a distintas intensidades luminosas.
- Plantear un rediseño e implementación del sistema de iluminación con las mismas características pero aplicando un convertidor de voltaje DC-DC (fuente conmutada) en vez de una fuente de corriente lineal en la interfase de potencia, para poder identificar y comparar las diferencias técnicas y monetarias de las dos topologías.
- Proponer un lente apropiado para el LED Atlas dependiendo del ángulo de divergencia de la luz que se desee irradiar al display.
- Realizar un estudio que busque elaborar modelos de comportamiento del LED Atlas, para plasmar en un solo gráfico, la relación entre el tiempo operativo medio, el mantenimiento del nivel de lúmenes, las distintas corrientes de control y temperaturas de trabajo del LED. Ya que en la hoja de datos del LED Atlas solo se encuentra una curva para una sola corriente de control.
- El diseño de la interfase de potencia puede soportar más de un solo LED de potencia en serie, la cantidad depende de las características de la fuente de corriente lineal y de la capacidad del adaptador de voltaje continuo que se diseñe; con lo cual el sistema de iluminación ya no se limitaría a espacios publicitarios pequeños.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] SOLANO, Juan.
2002 Diseño de espacios comerciales nuevos en Lima: esparcimiento, oficinas, tiendas. Lima.
- [2] TURNER, Janet.
2000 Diseño con Luz en Centros Comerciales. Soluciones de iluminación para tiendas, centros comerciales y mercados. México D.F: McGraw – Hill Interamericana Editores
- [3] RUIZ, Antonio y ROJAS, Sebastián
1998 Instalaciones de Iluminación. Madrid, Sección de Publicaciones de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Madrid.
- [4] TURNER, Janet.
2000 Diseño con Luz en Espacios Públicos. Soluciones de iluminación para exhibiciones, museos y lugares históricos. México D.F: McGraw -Hill Interamericana Editores.
- [5] RAMÍREZ-GASTÓN ZEVALLOS, Alfredo.
1994 Manual de Iluminación JOSFEL. Lima.
- [6] Osram
2004 La nueva dimensión en iluminación. Dimensiones mínimas, máximas opciones: Módulos LED para iluminación general [en línea] [consultado 23/11/2007] <<http://www.osram.es/108FOLLETO.pdf>>
- [7] MARTIN, Gustavo
2006 LED - Información Sobre LEDs, historia y tecnologías [en línea] [consultado 25/11/2007] <<http://www.dbup.com.ar/info.html>>
- [8] SCHMID, Luis
2007 El futuro de la tecnología en iluminar va mucho mas allá de simplemente dar luz. [en línea] [consultado 23/11/2007] <<http://www.emb.cl/electroindustria/articulm?id=757&edi=> >

- [9] U.S. Department of Energy
LED Basics - Terms [en línea] [consultado 30/10/2008]
<http://www.netl.doe.gov/ssl/usingLEDs/general_illumination_basics_terms.htm>
- [10] ARES DE BLAS, Félix.
2007 Iluminación LED: Parece que su momento está llegando. [en línea] Julio [consultado 17/09/2007]
<<http://www.tecnologiahechapalabra.com/ciencia/tecnologia/articulo.asp?i=1204>>
- [11] U.S. Department of Energy
Using LEDs to Their Best Advantage [en línea] [consultado 30/10/2008]
<<http://www.netl.doe.gov/ssl/PDFs/LEDAdvantage.pdf>>
- [12] EC&M Magazine
2007 The Evolution of the LED. EC & M, 106(5), 24-27 [en línea] [consultado 26/10/2007]
<<http://proquest.umi.com/pqdweb?did=1276680391&sid=5&Fmt=3&clientId=39490&RQT=309&VName=PQD>>
- [13] BARTENBACH, Wilfried.
2007 LED Luminaries for general Illumination. *LED Profesional Review* [en línea] Setiembre [consultado 25/09/2007]
<http://www.LEDprofessional.com/downloads/LpR_03_Sep_2007_freeversion_11487.pdf>
- [14] GREENLAND, Paul y BERNS, Werner.
2004 Powering Next-Generation Solid-State Lighting. [en línea]. Mayo [consultado 2/09/2007] <<http://powerelectronics.com/mag/405PET24.pdf>>
- [15] STEELE, Robert
2008 LED market to grow by 12% in 2008 [en línea] [consultado 05/07/2008]
<<http://www.LEDsmagazine.com/news/5/2/9>>
- [16] WHITAKER, Tim
2008 Strategies in Light 2008 pulls the crowds in Santa Clara [en línea] [consultado 06/07/2008] <<http://www.LEDsmagazine.com/features/5/2/7>>
- [17] General Electric Company
Lighting Application Bulletin [en línea] [consultado 29/10/2008]
<http://www.gelighting.com.pe/App_Lib/lernabout/spec_light_color_final.pdf>
- [18] GARCÍA, Javier y BOIX, Oriol.
2004 Luminotecnia. Iluminación de interiores y exteriores [en línea] [consultado 7/07/2008] < <http://edison.upc.es/curs/llum/indice0.html> >
- [19] ARAY, Rosa Nila
1994 Display: diseño de espacios y formas para la exhibición de productos. Tesis (Lic.) Pontificia Universidad Católica del Perú. Facultad de Arte. Lima 618p.

- [20] KAUFMAN, Paul y ALM, Albert.
2003 Adler Fisiología del Ojo: Aplicación clínica
España: Elsevier.
- [21] INGLE, Becki
2008 Asunto: why in LED atlas rgb the lumens of the colors at a same current is
diferent? [correo electrónico recibido: 10/11/2008] A: Carlo Lara [en correo
electrónico: cm.lara@ieee.org]
- [22] CURTIS, Keith
2006 Cómo afrontar los retos en el diseño de modernos LED de alta potencia.
Revista española de electrónica (623), pp. 72-74
- [23] Laminalighting. [en línea] [consultado 04/05/2008]
<<http://www.laminalighting.com/userfiles/File/Datasheets/AtlasDatasheet%20FM-0167%20Rev.02.14.07.pdf>>
- [24] Optek Technology [en línea] [consultado 29/05/2008]
<http://www.optekinc.com/pdf/OVTL09LG3x_Series.pdf>
- [25] Digikey 2008 [en línea] [consultado 25/10/2008]
<<http://search.digikey.com/scripts/DkSearch/dksus.dll>>
- [26] RASHID, Muhammad.
2004 Electrónica de potencia: Circuitos, dispositivos y aplicaciones. México D.F:
Pearson Educación, 3era edición.
- [27] ASGAR, J y SYED, M. RASHID, Muhammad (ed.)
2001 Power Electronics Handbook. Gate Drive Circuits. Canada: Academic Press.
- [28] BALOGH, Laszlo.
2002 Design And Application Guide For High Speed MOSFET Gate Drive Circuits
[en línea] [consultado 8/05/2008]
<<http://focus.ti.com/lit/ml/slup169/slup169.pdf>>
- [29] ON Semiconductor.
2002 Linear & Switching Voltage Regulator Handbook. Section 8. Designing the
input supply [en línea] [consultado 18/12/2008]
<http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/HB206-D.PDF>
- [30] ON Semiconductor.
2002 Linear & Switching Voltage Regulator Handbook. Section 15. Heatsinking.
[en línea] [consultado 18/12/2008]
<http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/HB206-D.PDF>
- [31] Wakefield Thermal Solutions.
2006 Board Level Heat Sinks. [en línea] [consultado 20/04/2009]
<http://www.wakefield.com/products/product_information.cfm>