

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



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

**DISEÑO DEL SISTEMA DE ILUMINACIÓN PARA LAS ZONAS DE ALMACÉN Y  
CONSERVACIÓN DE UN MUSEO DE ARQUEOLOGÍA**

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

**Victor Ricardo Zegarra Cuéllar**

**ASESOR Laureano Rodríguez**

Lima, agosto del 2012

## RESUMEN

En la actualidad existen diversas tecnologías de iluminación, pero no todas son idóneas para utilizar en los museos, debido a los tipos de objetos que estos presentan. La utilización de la tecnología LED favorece a este tipo de instituciones gracias a sus características y su constante desarrollo.

El objetivo principal de la tesis es el diseño de un sistema de iluminación que brinde un mayor nivel de cuidado a los restos materiales que presenta un museo de arqueología. Se tomará como base el Museo de Arqueología Josefina Ramos de Cox.

En el Capítulo 1 se trata el tema de las estrategias de iluminación existentes para un museo. Además, se detallan las distintas tecnologías de iluminación. Finalmente, se explica el marco problemático que actualmente existe en el museo.

En el Capítulo 2 se brindan ejemplos de sistemas de iluminación en base a LEDs de potencia. Luego, se indican los principales fabricantes de LEDs de potencia. Finalmente, se detallan las distintas fuentes conmutadas existentes.

En el Capítulo 3 se detallan los diseños de los subsistemas de excitación, control y alimentación. Además de la selección del LED a utilizar.

En el Capítulo 4 se muestran los resultados de las simulaciones e implementación de los subsistemas diseñados y se indica el costo total de la implementación del proyecto.

## INDICE

INTRODUCCION.....	1
CAPITULO 1: SISTEMAS DE ILUMINACIÓN Y PROTECCIÓN EN MUSEOS .....	2
1.1    Estrategias de iluminación para museos: .....	2
1.1.1 Estrategia básica para museos pequeños: elimine toda exposición extrema a la luz:.....	2
1.1.2 Estrategia tradicional: ilumine todo a una intensidad fija y baja: .....	3
1.1.3 Estrategia de manejo de riesgo: acepte y maneje la decoloración y la visibilidad: .....	3
1.2    Tecnologías de iluminación: .....	4
1.2.1    LEDs de Potencia:.....	7
1.3 Marco Problemático: .....	8
1.3.1 Variables Externas .....	8
1.3.2 Variables Internas:.....	9
1.3.3    Declaración del marco problemático:.....	11
CAPITULO 2: SISTEMAS DE ILUMINACIÓN MEDIANTE LEDS DE POTENCIA.....	13
2.1    Estado del Arte: .....	13
2.2    Lámparas LED:.....	15
2.2.1    Fabricantes de lámparas LED:.....	15
2.2.2    Circuitos de excitación para LEDs de potencia: .....	16
CAPITULO 3: DISEÑO DE LOS SUBSISTEMAS DE ALIMENTACIÓN, CONTROL Y EXCITACIÓN DE LOS LEDS DE POTENCIA.....	22
3.1    Objetivos:.....	22
3.1.1    Objetivo general:.....	22
3.1.2    Objetivos específicos: .....	22

3.2	Consideraciones preliminares: .....	22
3.2.1	Museo de Arqueología Josefina Ramos de Cox: .....	22
3.2.2	Niveles de iluminancia para los restos materiales: .....	23
3.3	Requerimientos del sistema de iluminación: .....	24
3.3.1	Sala de Conservación: .....	24
3.3.2	Almacén primer sótano: .....	25
3.3.3	Almacén segundo piso: .....	25
3.4	Diagrama de bloques del sistema de iluminación: .....	26
3.5	Selección de LEDs: .....	27
3.5.1	Requisitos de los LEDs: .....	27
3.5.2	Selección de LEDs: .....	27
3.6	Selección del disipador: .....	30
3.7	Diseño del subsistema de excitación para los LEDs de potencia: .....	31
3.7.1	Consideraciones preliminares: .....	31
3.7.2	Requerimientos del subsistema de excitación: .....	32
3.7.3	Diseño del circuito de excitación: .....	33
3.8	Diseño del subsistema de control para los LEDs de potencia: .....	35
3.8.1	Consideraciones preliminares: .....	35
3.8.2	Requerimientos del subsistema de control: .....	36
3.8.3	Diseño del subsistema de control: .....	36
3.9	Diseño del subsistema de alimentación para los LEDs de potencia: .....	40
3.9.1	Consideraciones preliminares: .....	40
3.9.2	Requerimientos del subsistema de alimentación: .....	40
3.9.3	Diseño del subsistema de alimentación: .....	41

3.10	Plan de colocación de los LEDs de potencia: .....	42
3.10.1	Consideraciones preliminares .....	42
3.10.2	Caja contenedora: .....	44
3.10.3	Plan de colocación de LEDs según ambiente: .....	45
CAPITULO 4: PRESENTACIÓN DE SIMULACIONES .....		48
4.1	Introducción: .....	48
4.2	Descripción del software: .....	48
4.3	Descripción de los circuitos implementados: .....	49
4.4	Resultados de la simulación por software: .....	49
4.5	Resultados de los circuitos implementados: .....	51
4.6	Costo implementación del proyecto: .....	57
CONCLUSIONES .....		58
RECOMENDACIONES .....		59
BIBLIOGRAFÍA .....		60

## INTRODUCCION

Las muestras que se encuentran en los distintos ambientes de un museo deben protegerse de los agentes que causan su deterioro, como la iluminación o la humedad, pues el debido control de estos agentes lleva a que los objetos puedan conservarse por un tiempo prolongado y de esta manera ser vistos por más visitantes del museo en futuras exposiciones.

Las muestras; ya sean de tipo cerámico, textil, lítico o cualquier otro material en el que estén hechos, son parte de nuestra historia, son prueba física de culturas antiguas y nos relatan sus creencias, su concepción del mundo. Debido a esto, es importante que estos restos sean bien cuidados y conservados

La tecnología LED a comparación de las otras tecnologías de iluminación se destaca por su alta eficiencia lumínica, gran durabilidad y si hablamos de LEDs de potencia de color blanco, por su no emisión de radiación infrarroja ni ultravioleta. Lo que los hace idóneos para utilizar en ambientes donde se presenten objetos sensibles a la luz.

En la presente tesis se desarrolla el diseño de los subsistemas de alimentación, control y excitación de los LEDs de potencia. Del mismo modo, la selección del tipo de LED a utilizar en un museo de arqueología. Este sistema se caracteriza por su alta eficiencia, bajo consumo de energía y por utilizar tecnología que sigue en constante desarrollo.

## CAPITULO 1: SISTEMAS DE ILUMINACIÓN Y PROTECCIÓN EN MUSEOS

### 1.1 Estrategias de iluminación para museos:

Al diseñar el sistema de iluminación para un museo se debe de enfrentar al reto que significa satisfacer los intereses tanto del arquitecto, preocupado por los espacios, como del conservador, el cual desea que sus muestras sean vistas con el máximo detalle posible y a la vez, evitando que se deterioren los objetos. Esto puede complicarse aún más cuando se trata de edificios que han sido concebidos para otros usos y que disponen de un entorno arquitectónico competitivo con las exposiciones [1]

Existen tres estrategias que nos ayudan a reducir el daño ocasionado por las radiaciones ultravioleta e infrarroja y a la vez brindan un buen acceso visual.

#### 1.1.1 Estrategia básica para museos pequeños: elimine toda exposición extrema a la luz:

Para esta estrategia se debe de contar con una techumbre confiable que proteja todos los objetos orgánicos y la mayor parte de los objetos inorgánicos, sin importar sus dimensiones. Se debe de contar con muros, ventanas y puertas confiables que protejan del clima, la luz solar y de ladrones. Del mismo modo se debe evitar la luz solar directa y fuentes de luz intensas a poca distancia de los objetos.

Los resultados de esta estrategia son que los objetos de baja sensibilidad conservarán su intensidad de colores, los de sensibilidad media se decolorarán en poco más de una década y los objetos con sensibilidad alta habrán perdido su

intensidad de color en poco tiempo; a menos que hayan quedado, casualmente apartados en lugares oscuros. [7]

### **1.1.2 Estrategia tradicional: ilumine todo a una intensidad fija y baja:**

Las reglas tradicionales de iluminación en museos, fueron basadas en el punto de referencia de 50 lux para textiles y soporte en papel, 150 lux para superficies pintadas al óleo y acrílicas, paneles, mobiliario; y 300 lux para piedra, metal. Además la regla tradicional sobre la radiación ultravioleta era mantener su nivel bajo 75 uW/lm. Además con la práctica se postuló que los objetos con componentes de diferentes sensibilidades se debían de iluminar por la cantidad de luz recomendada para la componente más sensible.

La mayoría de los requerimientos necesarios para hacer y recibir préstamos de colecciones, consideran las políticas tradicionales de iluminación.

Los resultados de esta estrategia nos indican que se reduce el índice de daño en las muestras; aunque a pesar de todo, los objetos de alta sensibilidad se decoloran al pasar unas cuantas décadas; mientras que los de baja sensibilidad serán difíciles de apreciar. Para la mayoría de personas, será difícil ver los objetos si estos son oscuros, con poco contraste o tienen muchos detalles. [7]

### **1.1.3 Estrategia de manejo de riesgo: acepte y maneje la decoloración y la visibilidad:**

En esta estrategia se reconoce que los colorantes se decoloran y que la visibilidad mejora con una mayor cantidad de luz.



Se debe de establecer un periodo de decoloración, apenas perceptible, en años: 30, 100, 300 o etc. Se debe utilizar como patrón a los niveles de iluminación para los diferentes materiales de la estrategia tradicional. Es decir se parte de los 50 lux, pero si la colección no contiene ningún colorante de sensibilidad alta o media se evalúa la posibilidad de aumentar este nivel. Además se debe de determinar el tiempo de exhibición para mantener el criterio establecido al inicio.

Como resultado se tiene que los museos manejarán la durabilidad de los colores de sus colecciones y al mismo tiempo la visibilidad de los objetos. El uso generalizado de esta estrategia será posible a medida que vaya aumentando la información y se extiendan las categorías más útiles según su sensibilidad. Para ayudar a tomar estas decisiones a partir de esta estrategia, el ICC (Instituto Canadiense de Conservación) ha desarrollado un calculador de daño que se puede encontrar en Internet, gracias a esto se permite explorar los posibles daños a las muestras bajo un rango de niveles de lux y horas de exhibición. [7]

## **1.2 Tecnologías de iluminación:**

La industria de iluminación desarrolla millones de fuentes de luz eléctrica, llamadas lámparas. Estas se utilizan para proporcionar iluminación, se pueden dividir en tres categorías: Lámparas incandescentes, lámparas de descarga y lámparas de estado sólido. En la Tabla 1.1 se puede apreciar los distintos tipos de lámparas existentes. [2]

Tabla 1.1 Tipos de Lámparas [2]

Tipos de Lámparas	Lámparas Incandescentes	Incandescente	
	Lámparas de Descarga	Alta intensidad de descarga	Halógena
			Mercurio de alta presión
			Sodio de alta presión
			Xenón
	Lámparas de estado sólido	Fluorescentes	Fluorescentes lineales
		Fluorescentes compactos	
		LED	

**Lámparas Incandescentes:**

Las lámparas incandescentes utilizan la corriente eléctrica para calentar un filamento de tungsteno hasta la incandescencia. La envoltura de vidrio contiene nitrógeno y otros gases como el Argón o Xenón. Este tipo de lámparas son,

fuertemente, afectadas por la cantidad de voltaje de entrada, una pequeña variación de este afecta al tiempo de vida, la potencia y eficiencia. [2]

- **Lámparas Halógenas:** A diferencia de las lámparas incandescentes, estas emplean un gas halógeno, como el yodo o bromo, para producir un ciclo halógeno dentro de la lámpara. Su vida útil es mayor a las lámparas incandescentes. Además, su intensidad de luz puede regularse. [3]

**Lámparas de Descarga:** Este tipo de lámparas emiten luz haciendo pasar una corriente eléctrica a través de un gas cuando es ionizado. Son lámparas de gran eficiencia. Sin embargo, se presentan en poca variedad de colores y se toman un poco de tiempo para alcanzar su brillo máximo. [3]

- **Lámparas de Alta Intensidad de Descarga:** Son lámparas que presentan alta eficiencia, siendo utilizadas en iluminación exterior debido a su largo tiempo de vida. Entre estas podemos encontrar: Mercurio de alta presión, Sodio de alta presión, Halogenuros metálicos y Xenón. [2]
- **Lámparas Fluorescentes:** Es una fuente de descarga de gas que contiene vapor de mercurio a baja presión con una pequeña cantidad de gases inertes. Poseen alta eficiencia, bajo coste y en la actualidad se puede regular la intensidad de la luz que emiten. Se pueden encontrar en lámparas fluorescentes lineales y compactas. [2,3]

**Lámparas de Estado Sólido:** Emiten luz mediante un material sólido. La iluminación mediante estado sólido se da con semiconductores que transforman la

electricidad en luz. Presentan largo tiempo de vida, consumen poca potencia y no poseen filamentos que se puedan romper mediante vibración. [4]

- **Lámparas LED:** La luz se genera cuando la corriente fluye a través de las uniones de diferentes materiales. La composición de los materiales determina la longitud de la onda, por lo tanto determinan el color del led. Entre sus principales ventajas se encuentran el largo tiempo de vida, que pueden ser controlables, la baja potencia que consumen en comparación con las otras tecnologías, emiten en banda estrecha y su mayor rapidez de respuesta. [2,3]

### 1.2.1 LEDs de Potencia:

Los LEDs de Potencia son una prueba del avance de la tecnología con LEDs convencionales, pero a diferencia de estos, pueden manejar niveles de corriente mayores, desde unos 250mA hasta más de 2A. Además de poseer niveles de intensidad luminosa mayores, llegando inclusive en algunos casos alrededor de los 2000 lúmenes.

Estos LEDs son utilizados en: [6]

- Industria automotriz
- Iluminación interior y exterior
- Productos electrónicos
- Señales de Tránsito

### 1.3 Marco Problemático:

#### 1.3.1 Variables Externas

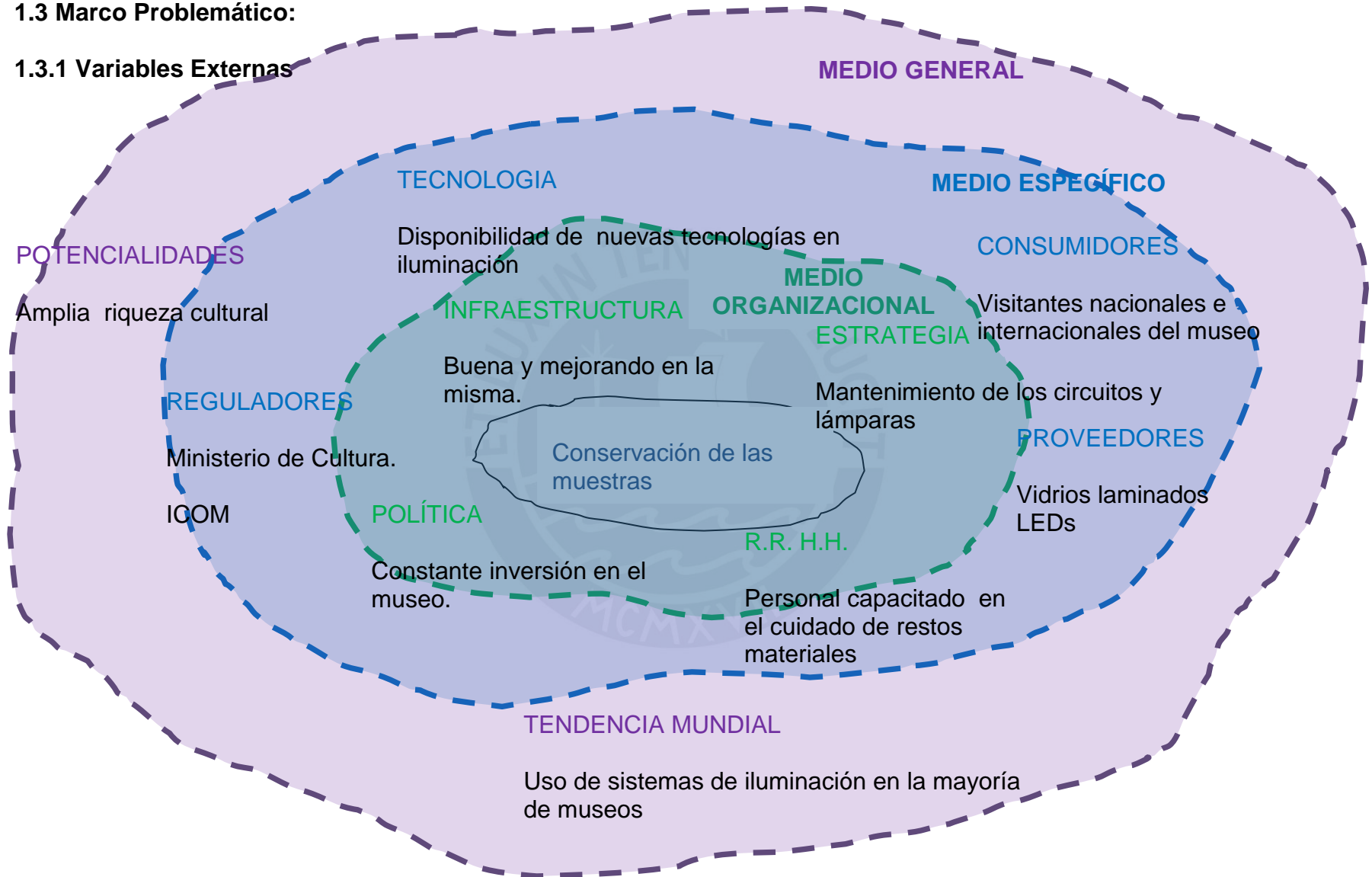


Figura 1.1 Variables Externas

1.3.2 Variables Internas:

Proceso de puesta de muestras en exposición para el Museo de Arqueología

Josefina Ramos de Cox:

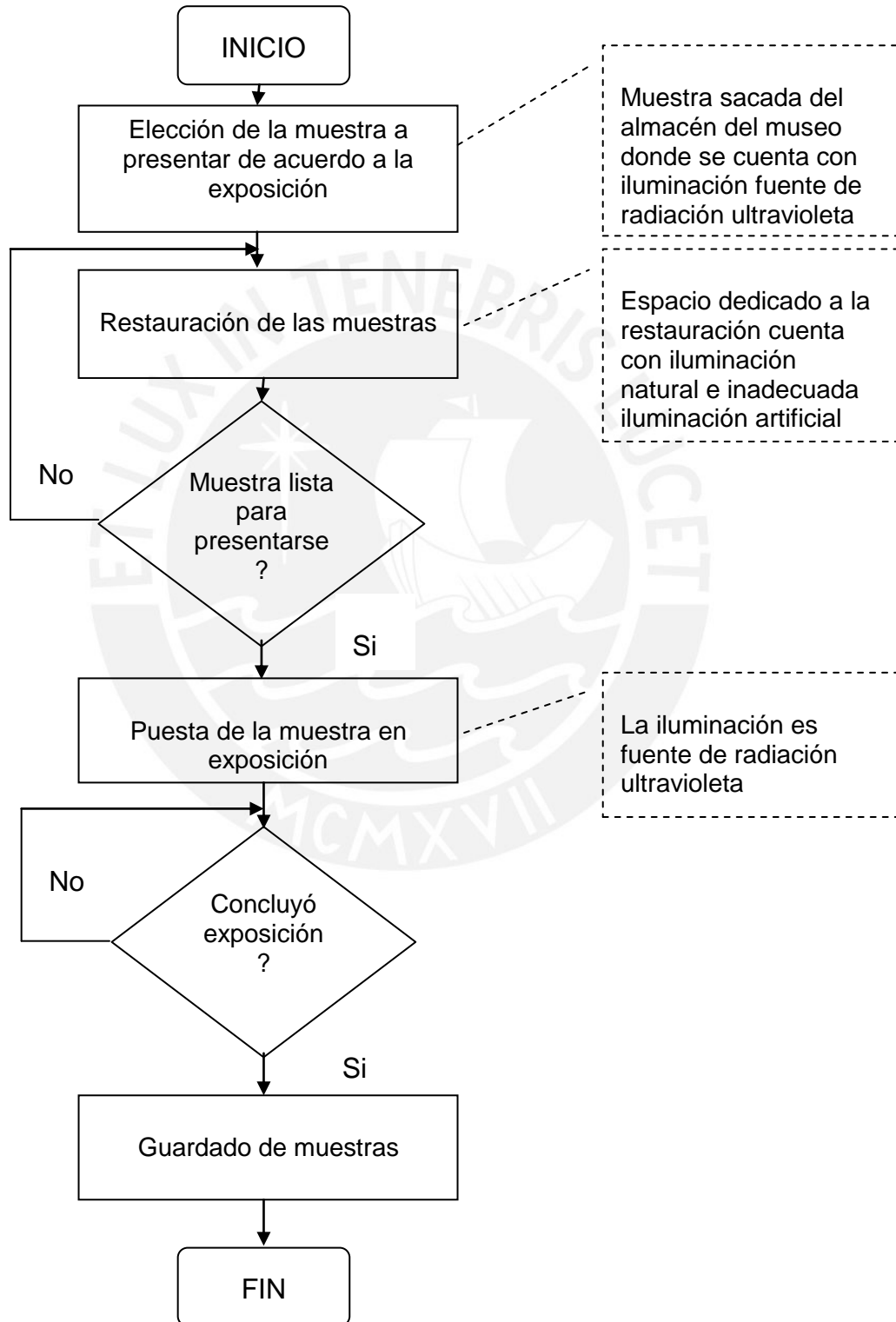


Tabla 1.2 Variables internas

Problemas	Análisis
<p>Muestra sacada del almacén del museo donde se cuenta con iluminación fuente de radiación ultravioleta</p>	<p>Los objetos son conservados en almacenes grandes y oscuros. Sin embargo, estos cuentan con iluminación mediante lámparas fluorescentes las cuales emiten radiación que se encuentra en el rango ultravioleta.</p>
<p>Espacio dedicado a la restauración cuenta con iluminación natural e inadecuada iluminación artificial</p>	<p>El lugar destinado a la restauración de las muestras cuenta con iluminación mediante lámparas fluorescentes las cuales emiten radiación ultravioleta. Además, el ambiente cuenta con ventanas por donde la luz natural ingresa, siendo esta perjudicial para los restos. Estas muestras podrían permanecer en este ambiente hasta por un par de meses.</p>
<p>La iluminación es fuente de radiación ultravioleta</p>	<p>La iluminación con la que cuentan los restos una vez expuestos es mediante lámparas halógenas de tungsteno, las cuales emiten radiación ultravioleta.</p>

### 1.3.3 Declaración del marco problemático:

Un sistema de iluminación adecuado para las muestras en un museo es sumamente importante para su conservación. Muchas de las fuentes de luz que se utilizan actualmente emiten radiaciones que se encuentran en el rango infrarrojo o ultravioleta además del de luz visible, siendo estos los causantes de los daños a los restos materiales, en materia de iluminación. [5]

La radiación infrarroja afecta a las muestras debido a que calienta el objeto, lo que genera una temperatura superior a la recomendada, se ocasionan reacciones químicas de manera más acelerada, causando daños a la estructura interna del mismo y así debilita a la muestra. Mientras que, la radiación ultravioleta es causante del amarillamiento, pérdida de cohesión, debilitamiento y/o desintegración de los materiales. La radiación ultravioleta, al presentar una menor longitud de onda, posee más energía lo que la hace fotoquímicamente más activa. Debido a esto, es más perjudicial para los objetos expuestos que la radiación infrarroja. [7,19]

Los almacenes albergan una gran cantidad de restos arqueológicos. Son ambientes que cuentan con control de humedad, pero la iluminación que poseen, tubos fluorescentes, no es la adecuada. Si bien estos lugares se mantienen con la luz apagada la mayor cantidad de tiempo, es importante la colocación de luminarias que no vayan en contra de su preservación.



Del mismo modo, la sala de conservación no cuenta con un sistema de iluminación idóneo, más aún que cuenta con fuentes de iluminación natural la cual es dañina, especialmente, durante el alba, pues es allí donde la radiación ultravioleta alcanza altos niveles. Los textiles que son zurcidos para su restauración pueden permanecer hasta por un plazo de 60 días durante los cuales se verían afectados por la radiación ultravioleta al ser uno de los materiales más sensibles.

Finalmente, para exponer las muestras se cuenta con ambientes donde se utilizan lámparas halógenas de tungstenos las cuales son fuente de radiación ultravioleta. Además, las zonas de exposición se encuentran rodeadas por fuentes de iluminación natural y como fue explicado para la sala de restauración, esta resulta perniciosa para los objetos del museo.

## CAPITULO 2: SISTEMAS DE ILUMINACIÓN MEDIANTE LEDS DE POTENCIA

### 2.1 Estado del Arte:

Los sistemas de iluminación desarrollados para los objetos que se encuentran en las distintas áreas de un museo permiten proporcionar un mayor nivel de cuidado y conservación a los restos. En los museos se pueden encontrar usualmente restos del tipo lítico, cerámico, textil, etc. La inadecuada iluminación que se les brinda a estos objetos, son en su mayoría fuente de radiación ultravioleta e infrarroja del espectro electromagnético, siendo estos perjudiciales para la conservación de las muestras.

La invención de la tecnología LED representa una de las mayores revoluciones en iluminación desde que se inventase la bombilla eléctrica y actualmente están llamadas a reemplazar a las lámparas convencionales. La versatilidad que ofrecen los LEDs para sus distintos usos tanto en interiores como en exteriores, ha permitido el desarrollo de compañías que promueven su uso en distintos lugares del planeta. [3]

Los LEDs de potencia de color blanco son adecuados para la conservación de las muestras no solo por la eliminación de la radiación ultravioleta e infrarroja. Sino también, debido a que en la actualidad se puede encontrar LEDs con un alto índice de reproducción cromática que nos ofrece una reproducción más fiel de los colores reales de los objetos, alto nivel de eficiencia, bajo consumo, capacidad de regulación, etc.[10]

Alrededor del mundo, existen diversos museos que han empleado la tecnología LED para iluminar sus ambientes debido a la amplia ventaja que tienen con respecto a las tecnologías de iluminación convencional. A continuación, se presentan algunos importantes:

1. **Lugar:** Museo Chileno de Arte Precolombino – Sala Textil

**País:** Chile - Santiago

**Detalles:** El museo chileno de Arte Precolombino se inauguró al público en 1981, siendo uno de los más importantes del país. El sistema de iluminación fue diseñado en base a LEDs con los que se logró crear una óptima luz blanca que simula la irradiación del sol, en este se utilizó la mezcla de tres tipos de rojo, un amarillo, un azul y dos verdes. En la Figura 2.1 se puede ver una foto de la fachada del museo.[11]



**Figura 2.1 Museo Chileno de Arte Precolombino**

2. **Lugar:** Museo del Louvre – Pirámides, Corte de Napoleón y CourCarrée

**País:** Francia - Paris

**Detalles:** El Museo del Louvre es el museo nacional de Francia desde 1793 y uno de los más importantes del mundo. En conjunto con la empresa Toshiba se está realizando actualmente la implementación de luminarias LED en reemplazo de las de Xenón con las que contaba el museo. En la Figura 2.2 se aprecia una vista del museo.[14]



Figura 2.2 Museo del Louvre

## 2.2 Lámparas LED:

### 2.2.1 Fabricantes de lámparas LED:

En la actualidad existen diversas compañías que desarrollan tanto los LEDs normales como LEDs de potencia, entre ellas se encuentran: Cree, Philips, Nichia, Osram, Toyoda Gosei, Bridgelux y Toshiba. Todas emplean tecnología de punta y se encuentran a la vanguardia en la fabricación de LEDs de potencia.

### 2.2.2 Circuitos de excitación para LEDs de potencia:

El circuito de excitación para LEDs o Driver de LEDs es un sistema que provee una salida eléctrica con las características que el LED necesita para funcionar eficientemente. Si el LED variara su intensidad de luz, entonces el circuito de excitación necesita un circuito que controle la variación de intensidad de corriente que atraviesa el LED, debido a que si varía la intensidad de corriente, varía la intensidad de luz que emite el LED. Existen dos métodos para realizar esta acción:

La modulación por ancho de pulso PWM (por sus siglas en inglés Pulse Width Modulation) y la utilización de circuitos de excitación de regulación de corriente.

Dentro de los drivers de regulación de corriente, existen los drivers de fuentes lineales y los drivers de fuentes conmutadas.[3]

#### **Fuentes Lineales:**

Tipo de fuente ampliamente utilizada debido a su bajo costo y baja complejidad. La primera etapa de esta fuente consiste en el rectificado, en donde la señal alterna es convertida en una señal pulsante. Luego, la señal es filtrada generando una salida estable, pero con un pequeño rizado. Finalmente, el rizado es eliminado en la etapa de regulación, permitiendo generar una señal DC constante, ésta permanecerá constante a pesar de las posibles variaciones en el voltaje de línea o en la carga del circuito.[8]

Sin embargo entre sus principales desventajas se encuentran su baja eficiencia, el

gran espacio ocupado por sus componentes y el hecho de no poder obtener un voltaje de salida mayor al del voltaje de entrada.

### **Fuentes Conmutadas:**

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

Estas fuentes son mucho más complejas que las lineales, debido principalmente a la variedad de componentes empleados y a una compleja etapa de regulación.

La primera etapa consiste en la transformación de una señal alterna en una señal continua pulsante, por medio de un rectificador y filtro de entrada. El segundo y tercer bloque vienen a ser el convertidor DC-DC, conformado por transistores (en modo ON/OFF), un transformador (en el caso para fuentes conmutadas aisladas), y un filtro de salida. En esta etapa se genera una onda cuadrada de alta frecuencia, que luego es filtrada, permitiendo generar una salida DC constante. El cuarto bloque es uno de las partes más importantes de la fuente, ya que es la etapa de control. En este bloque se toma como referencia la salida DC generada, con la finalidad de generar un lazo de retroalimentación que permita mantener la salida en un valor deseado. Esto se alcanza variando el ciclo de trabajo de los transistores mediante señales PWM.

Existen 4 topologías de fuentes conmutadas:

- Convertidor Buck
- Convertidor Boost
- Convertidor Buck – Boost
- Convertidor Cúk

**Convertidor Buck:** El voltaje de salida  $V_o$ , es menor que el voltaje de entrada  $V_s$ .

El convertidor Buck es bastante popular y solo requiere de un transistor. Su diseño es simple y tiene una eficiencia de alrededor de 90%. [8]

Su funcionamiento es en base a la saturación transistor. Cuando éste se encuentra en zona de saturación (cerrado), el diodo se polariza inversamente permitiendo que la energía se transfiera directamente de la entrada hacia la salida por medio de la bobina. Cuando el conmutador entra en zona de corte (abierto), el diodo se polariza generando un cortocircuito y la salida se aísla de la entrada, en este instante la bobina tiende a mantener las condiciones de corriente por el circuito. En la Figura 2.3 se presenta el circuito de un convertidor buck. [6]

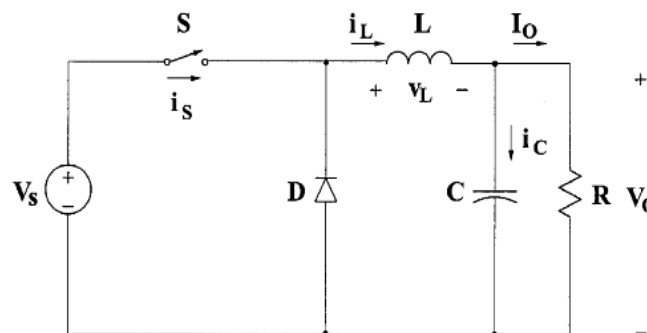


Figura 2.3 Convertidor Buck [9]

**Convertidor Boost:** La salida de voltaje  $V_o$  es mayor a la entrada  $V_s$ , esto se logra sin la utilización de un transformador; sino gracias a la utilización de un mosfet de potencia. Sin embargo, la salida de voltaje es muy sensible a los cambios del ciclo de trabajo, lo que dificulta la estabilización del convertidor. [8]

Para este caso, en la zona de saturación del mosfet, el ánodo del diodo se va a tierra, polarizándose inversamente, por lo que el circuito se aislará, dejando a un lado la fuente con la bobina y al otro, el condensador y la carga. En este periodo la bobina se carga directamente por la entrada. Cuando el conmutador se abre, el diodo conducirá, y la bobina al tratar de mantener la corriente del circuito generará un potencial de signo contrario al periodo anterior. De esta forma la tensión de salida será:  $V_o = V_L + V_s$ . En la Figura 2.4 se presenta el circuito de un convertidor boost. [6]

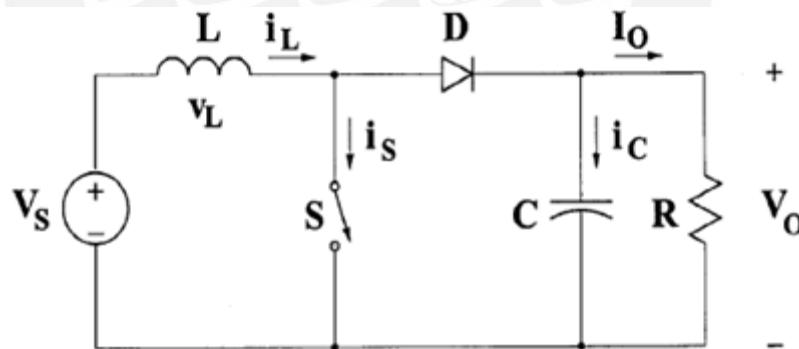


Figura 2.4 Convertidor Boost[9]

**Convertidor Buck - Boost:** La salida de voltaje,  $V_o$  de este convertidor puede ser menor, igual o mayor que el voltaje de entrada  $V_s$ . La polaridad del voltaje de salida es opuesta al de la entrada. Presenta una alta eficiencia. Sin embargo, la



corriente de entrada es discontinua y tiene picos altos de corriente a través del transistor. [8]

Cuando el conmutador está en saturación, el diodo se polariza inversamente, permitiendo que la bobina se cargue directamente de la entrada y aislando la etapa del condensador y la carga. En la etapa de corte, el diodo se polariza directamente, y la bobina al tratar de mantener el nivel de corriente se polarizará inversamente, y al estar en paralelo con el condensador, el voltaje de salida será de polaridad contraria al de entrada. En la Figura 2.5 se presenta el circuito de un convertidor buck - boost. [6]

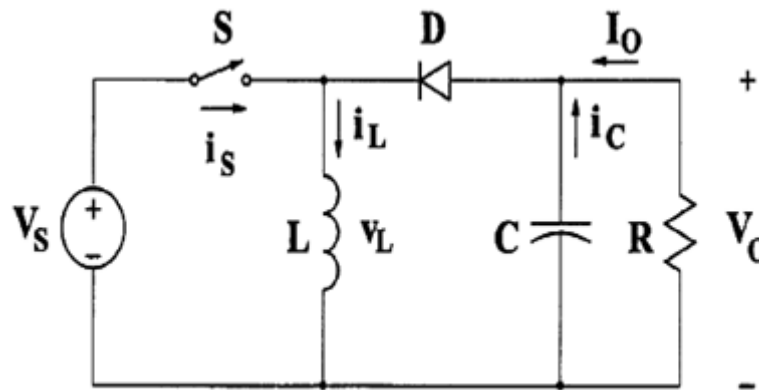


Figura 2.5 Convertidor Buck–Boost[9]

**Convertidor Cúk:** Al igual que el convertidor Buck – Boost, el voltaje de salida  $V_s$  puede ser menor, igual o mayor que la entrada. Sin embargo, estos voltajes tendrán polaridades opuestas.[8]

En este caso, cuando el transistor esta en saturación, la corriente que fluye a través del inductor  $L1$  empieza a elevarse. El diodo se polariza inversamente y el capacitor  $C1$  se descarga a través del circuito formado por  $C1$ ,  $C$ ,  $L2$  y la carga. Cuando el transistor esta en corte, el capacitor  $C1$  se carga directamente de la fuente y la energía del inductor  $L2$  se transfiere a la carga. El diodo y el transistor hacen una conmutación síncrona y el capacitor  $C1$  es el mediador para pasar la energía de la fuente a la carga. En la Figura 2.6 se presenta el circuito de un convertidor cúk. [8]

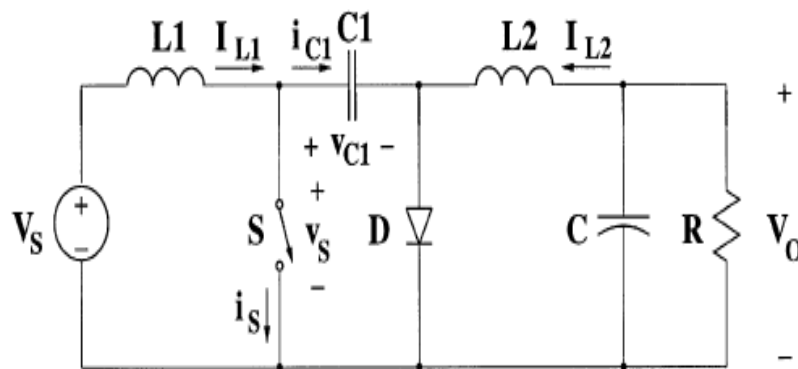


Figura 2.6 Convertidor Cúk[9]

## CAPITULO 3:DISEÑO DE LOS SUBSISTEMAS DE ALIMENTACIÓN, CONTROL Y EXCITACIÓN DE LOS LEDS DE POTENCIA

### 3.1 Objetivos:

#### 3.1.1 Objetivo general:

Diseñar un sistema de iluminación para las zonas de almacén y conservación de un museo de arqueología mediante la utilización de LEDs de potencia de color blanco frío, a fin de brindar un mayor nivel de protección a las muestras, en materia de iluminación.

#### 3.1.2 Objetivos específicos:

1. Diseño del subsistema de excitación de los LEDs de potencia mediante convertidores DC-DC para las zonas de almacén y conservación del museo
2. Diseño del subsistema de regulación del flujo luminoso de los LEDs de potencia mediante un microcontrolador.
3. Diseño del subsistema de alimentación de los circuitos para las zonas de almacén y conservación de la institución.

### 3.2 Consideraciones preliminares:

#### 3.2.1 Museo de Arqueología Josefina Ramos de Cox:

El Museo de Arqueología Josefina Ramos de Cox se encuentra ubicado desde el año 2010 en la plazoleta Plaza Francia en el centro de Lima. Fue creado por el Consejo Directivo del Instituto Riva-Agüero en 1971 en base a la propuesta de la

doctora Josefina Ramos de Cox, a fin de difundir las colecciones arqueológicas documentadas. [13]

El museo cuenta con bienes materiales del tipo cerámico, textil, lítico, metales, etc. Los almacenes están ubicados en el primer sótano y en el segundo piso. Luego, la sala de conservación se encuentra en el primer piso. En la Figura 3.1 se puede apreciar el vestíbulo en la entrada principal del museo.



**Figura 3.1 Museo de Arqueología Josefina Ramos de Cox**

### **3.2.2 Niveles de iluminancia para los restos materiales:**

El Museo Arqueológico Josefina Ramos de Cox presenta diversos tipos de objetos, los cuales requieren niveles de iluminación diferentes. En la Tabla 3.1 se detalla el nivel de iluminancia máxima para los diferentes tipos de restos materiales.

Tabla 3.1 Niveles de iluminancia [14]

Objetos	Máxima Iluminancia
Textiles, vestimentas, dibujos, manuscritos, pieles, miniaturas, acuarelas, materiales orgánicos	50 lux
Pinturas de óleo, murales, vajilla oriental	150 lux
Metal, piedra, vidrios, cerámicas, joyería, huesos, esmalte	Ilimitada, en la práctica 300 lux

### 3.3 Requerimientos del sistema de iluminación:

#### 3.3.1 Sala de Conservación:

La sala de conservación presenta un área de  $30.4m^2$ . Requiere de un sistema de iluminación el cual brinde un máximo de 300 lux de iluminancia a 0,8m del suelo donde se encuentra la mesa de trabajo. Dicha iluminancia debe ser controlable a los niveles recomendados en la Tabla 3.1 acorde a las muestras que se encuentren en la sala de conservación.

### 3.3.2 Almacén primer sótano:

El almacén ubicado en el primer sótano presenta un área de  $104.08m^2$  y una altura de 3.05m aproximadamente. En este se encuentran estantes abiertos donde se colocan los objetos, estos estantes miden 2.70m de alto. Se deberá utilizar máximo 150 lux de iluminancia a 1m del suelo, altura en la que se colocarán los objetos más sensibles. Mientras que, los objetos menos sensibles se encontrarán en las partes más altas de los estantes. Debido a que, por la Ley Inversa del Cuadrado se calcula tener aproximadamente 400 lux a una distancia de 1m del techo. Del mismo modo que la sala de conservación, se podrá controlar la iluminancia al regular el flujo luminoso de los LEDs.

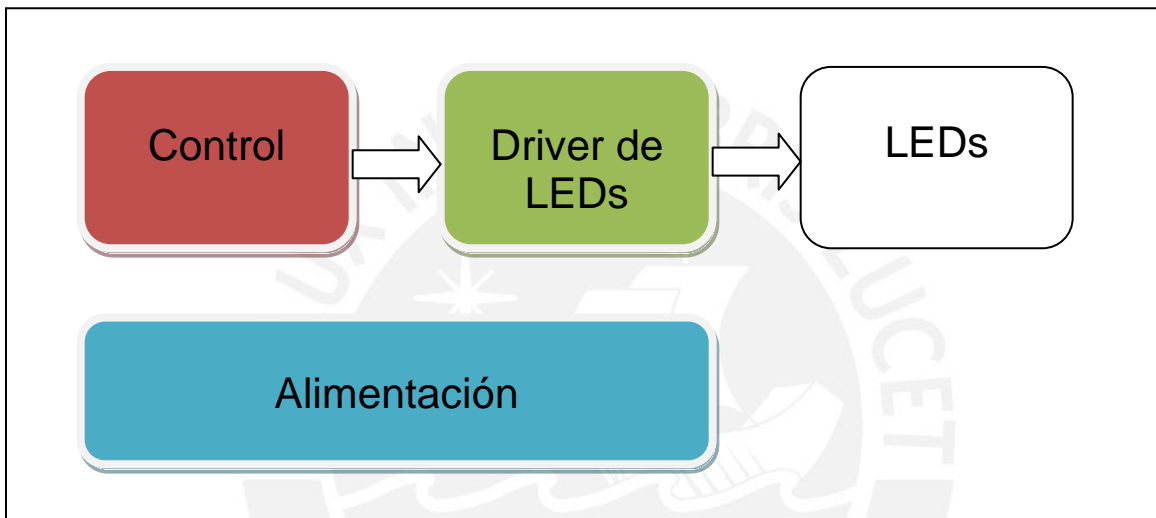
### 3.3.3 Almacén segundo piso:

El almacén ubicado en el segundo piso presenta un área de  $100.63m^2$  y altura de 2.95m. Este presenta el mismo modelo de estantes abiertos que el almacén que se encuentra en el primer sótano. Del mismo modo, se requerirá de una iluminancia máxima de 150 lux a 1m del suelo, lo cual nos dará unos 400 lux aproximadamente, a 1m del techo. Alturas a la que se colocarán las muestras menos y más sensibles, respectivamente. Así mismo, se podrá controlar el flujo luminoso de los LEDs de potencia.

Los cálculos de lúmenes y cantidad de LEDs necesarios para los distintos ambientes se encuentran en el Anexo 1. Finalmente, los cálculos de potencia necesaria se encuentran en el Anexo 2.

### 3.4 Diagrama de bloques del sistema de iluminación:

La Figura 3.2 muestra el diagrama de bloques detallado del sistema de iluminación el cual cumplirá con los requerimientos anteriormente expuestos. Cabe mencionar que el mismo diagrama será empleado para todas las zonas de la institución mencionadas.



**Figura 3.2 Diagrama de bloques del sistema de iluminación**

- **Subsistema de Alimentación:** Es el encargado de proveer la energía necesaria a todos los circuitos involucrados del sistema de iluminación para cada ambiente del museo.
- **Subsistema de Control:** Este subsistema se encargará de controlar el flujo luminoso de los LEDs de potencia mediante señales PWM (Pulse Wide Modulation) generadas por un microcontrolador. El ciclo de trabajo de la PWM será regulado por un potenciómetro conectado a una entrada ADC del microcontrolador.

- **Subsistema de Excitación:** Es la etapa encargada de brindar la potencia necesaria a los LEDs mediante fuentes conmutadas DC-DC en configuración Step-Down. Además, recibirá la señal de control proveniente del subsistema de control.

### 3.5 Selección de LEDs:

#### 3.5.1 Requisitos de los LEDs:

- Para este sistema de iluminación es necesario seleccionar LEDs que no emitan en el rango infrarrojo ni ultravioleta del espectro electromagnético. Los LEDs de potencia blancos cumplen con este requisito, pues su longitud de onda se sitúa alrededor de los 450 a 650 nm.
- Se necesita que los colores de las muestras sean vistos con sus colores reales, para esto se debe imitar en el ambiente, la iluminación natural del sol al medio día, el cual es aproximadamente 5500°K con 100% de índice de reproducción de color (IRC).
- Se deben seleccionar LEDs con un alto rendimiento lumínico, expresado en lm/w, lo cual representará un mayor nivel de ahorro económico para la institución.

#### 3.5.2 Selección de LEDs:

En la Tabla 3.2 se detallan las principales características de los LEDs de potencia blancos que cumplen con los requerimientos antes detallados.



Tabla 3.2 Características posibles LEDs [15, 16]

LEDs			
Nombre	Bridgelux C0402	Cree Inc. XPGWHT-01	Bridgelux C0802
Color	White cool	White cool	White cool
Temperatura de color	5600°K	5000°K	5600°K
IRC	65%	-	65%
Eficiencia	95lm/w	116lm/w	99lm/w
Lúmenes corriente máxima	788 lúmenes	415 lúmenes	1716 lúmenes
Corriente máxima	1 A	1.5 A	1.5 A
Volt.Polariz. Direct(Max.)	10.4v	-	13.7v
Precio unitario (en USA)	\$ 4.05	\$ 3.08	\$ 8.22

De los LEDs mostrados, el C0802 posee buen rendimiento. Sin embargo, los lúmenes son excesivos, lo que daría incomodidad al usuario al momento de mirarlo directamente. Además se debe tomar en cuenta su elevado costo por LED.

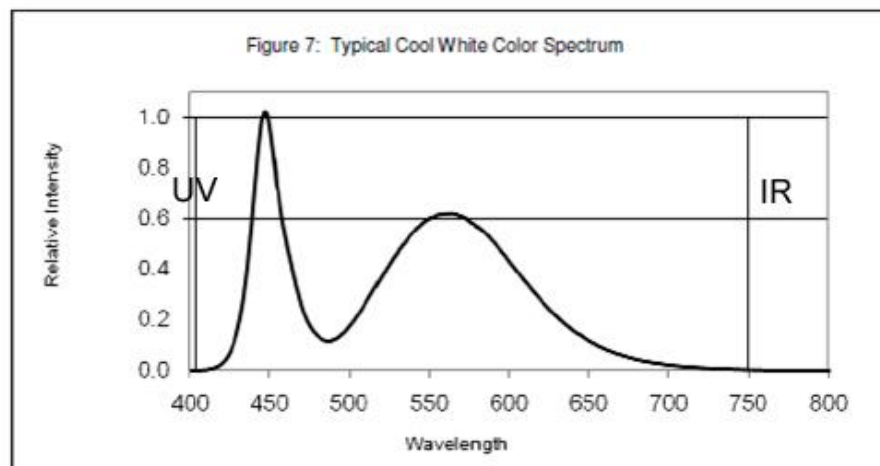
El XPGWHT-01 posee gran rendimiento y su costo es bajo. Sin embargo, se necesitará muchos de estos para cada ambiente. Además de que necesita una

corriente máxima de 1.5 lo que limita más las opciones de convertidores a utilizar para su energizado.

Por otro lado, el C0402 posee buen rendimiento, su flujo luminoso es alto y no molesto (este comparable a un incandescentes un poco mayor a 75W) y su precio no es muy elevado. Sin embargo, su coeficiente de rendimiento cromático no es muy alto, pero no será un factor crucial debido a que no se utilizará para zonas de exposición donde este valor se vuelve más importante.

Debido a esto el LED a utilizar es el C0402 de la marca Bridgelux.

En la figura 3.3 se muestra el espectro de color del LED seleccionado, en el cual se aprecia que no emite radiación en los rangos ultravioleta ni infrarrojo. Es decir, su rango de emisión es mayor a los 400nm y menor a los 750nm.



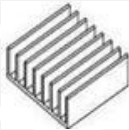


**Figura 3.3 Espectro de color para LED Cool White[15]**

### 3.6 Selección del disipador:

Debido a que la temperatura del LED se debe mantener menor a los 70°C, según indicación del fabricante, es necesaria la colocación de un disipador el cual asegure que el LED no se sobrecaliente. De esta manera, no se verá afectado el tiempo de vida del LED de potencia.

En el Anexo 8 se calculó que la resistencia térmica del disipador debe ser 2.71°C/W, por ello se debe elegir uno con un valor igual o menor. En la Tabla 3.3 se indican las características de los disipadores que cumplen los requisitos.

**Tabla 3.3 Características principales disipadores**

Disipador			
Nombre	Wakefield 527-45AB	Wakefield 518-95AB	Wakefield 641A
Resistencia térmica	2.3°C/W	2.2°C/W	2.4°C/W
Material	Aluminio	Aluminio	Aluminio
Precio (USA)	\$ 3.7	\$ 4.95	\$ 11.4

De los disipadores presentados se selecciona el Wakefield 5227-45AB debido a que su valor de resistencia térmica es cercano y menor al calculado. Además, tiene

el menor precio a comparación de los otros disipadores de características similares.

### **3.7 Diseño del subsistema de excitación para los LEDs de potencia:**

#### **3.7.1 Consideraciones preliminares:**

- Actualmente, existe en el mercado diversos circuitos integrados diseñados, especialmente, para comportarse como driver de LEDs de potencia como es el caso de los LM3404, LM3405, LM3409, etc. Sin embargo, estos requieren de componentes externos para su uso, dependiendo si cuentan con un driver interno se necesitarán varios o pocos componentes. Debido a que es poca la variación de precio entre uno que cuente con driver interno a uno que no cuente con este, se escogerá un driver de LEDs que requiera de pocos componentes adicionales y ofrezca los requerimientos a los LEDs de potencia escogidos.
- Se usarán arreglos de 2 LEDs por driver por el alto voltaje de polarización directa de los LEDs de BRIDGELUX, de esta manera mantener un voltaje de entrada en valores comerciales los cuales aminoran el costo de la alimentación.
- La sala de conservación y los 2 almacenes utilizarán la misma cantidad de LEDs por arreglo. Sin embargo, al contar con áreas diferentes, la cantidad de estos arreglos variará en función del número de LEDs por ambiente. Debido a esto, la sección de diseño de los circuitos de excitación será la misma para todos los ambientes. En el Anexo 1 se calcula que se necesitan

16057.60, 22980.87 y 24256.24 lúmenes para la a sala de conservación, almacén primer sótano y almacén del segundo piso, respectivamente. Luego, para calcular la cantidad de LEDs y así el número de arreglos por ambiente, se utiliza la siguiente fórmula:

$$Puntos\ de\ luz = \frac{Cantidad\ de\ lúmenes\ necesarios}{Lúmenes\ por\ LED}$$

. En la Tabla 3.4 se detalla la cantidad de estos de LEDs por ambiente.

**Tabla 3.4 Cantidad de LEDs y arreglos por ambiente**

Ambiente	LEDs por arreglo	Cantidad de LEDs
Sala Conservación	2	20
Almacén primer sótano	2	30
Almacén segundo piso	2	30

### 3.7.2 Requerimientos del subsistema de excitación:



- Basado en fuentes conmutadas DC-DC (Buck, Boost, Buck-Boost, etc.) debido a su alta eficiencia.
- Eficiencia mayor al 90%
- Posibilidad de control mediante PWM (Pulse Wide Modulation) para variar el flujo luminoso de los LEDs.
- Corriente de salida de 1 Amperio.
- Capacidad para controlar 2 LEDs a más.

### 3.7.3 Diseño del circuito de excitación:

#### Selección de circuito integrado para el circuito de excitación de LEDs:

En la Tabla 3.5 se detallan las principales características de los circuitos integrados que cumplen con los requerimientos de fuente DC-DC para energizar los LEDs de potencia.

**Tabla 3.5 Características posibles drivers de LEDs [17,18]**

Circuito Integrado		
Nombre	National Instruments LM3404	National Instruments LM3409
Corriente constante	Si	Si
Topología	Step-down (Buck)	Step-down (Buck)
Driver interno	Si	No
Corriente de salida	Hasta 1.2A	Hasta 1.5A
Voltaje de entrada	6-42v	6-42v
Permite entrada PWM	Si	Si
Precio unitario (en USA)	\$ 3.28	\$3.3

Ambos circuitos integrados son presentados por la empresa fabricante como Drivers para LEDs de alto brillo. Además sus características son parecidas. Sin embargo, el LM3409 puede manejar mayor cantidad de corriente, mas no cuenta con Driver interno, esto quiere decir que es necesario el empleo de un mosfet externo y otra circuitería adicional, lo que añadiría complejidad al diseño y subiría el costo del mismo. Debido a esto, se selecciona el LM3404 que cumple con las características requeridas para el diseño del circuito de excitación de LEDs.

El cálculo de los componentes exteriores se encuentra en el Anexo 3. Estos cálculos se realizaron con la ayuda de las hojas de fabricante del LM3404, LM3404HV. Del mismo modo, se calcula que la eficiencia del driver e de LEDses de 94,5%. Estos cálculos se pueden encontrar en el Anexo 4.

### **Diseño del circuito de excitación de LEDs:**

Luego, las especificaciones del driver de LEDs diseñado son las siguientes para controlar 2 LEDs por arreglo acorde:

- Voltaje de alimentación: 24VDC
- Eficiencia: 94.5%
- Voltaje de salida: 21VDC
- Corriente de salida: 1A

Los cálculos realizados para este diseño se encuentran en los Anexos 3 y 4. En la Figura 3.4 se muestra el diagrama esquemático del circuito de excitación de LEDs

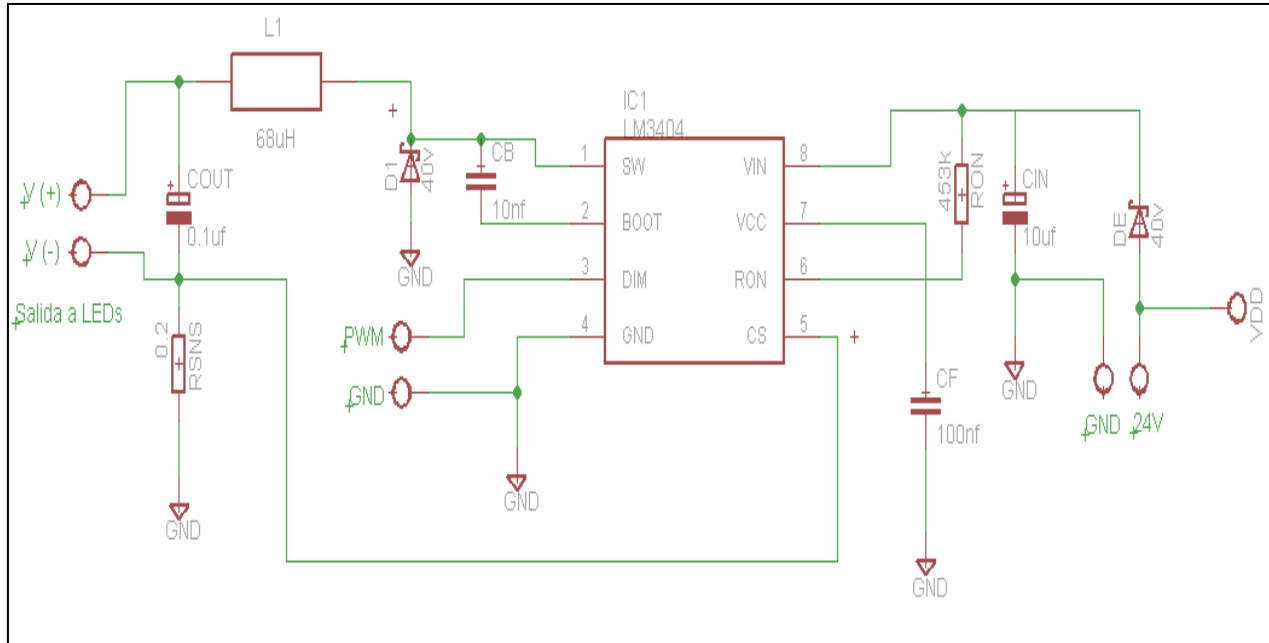


Figura 3.4 Circuito esquemático del LM3404

### 3.8 Diseño del subsistema de control para los LEDs de potencia:

#### 3.8.1 Consideraciones preliminares:

- El circuito integrado LM3404 requiere de una señal PWM para que la intensidad luminosa de los LEDs pueda variar. Entonces se requerirá de la utilización de algún microcontrador que cuente con esta salida.
- El usuario final deberá tener control sobre la regulación de iluminancia en la zona de trabajo. Es decir, control en el ciclo de trabajo (DC) de la onda PWM. Debido a esto, se utilizará un conversor análogo-digital (ADC) en el que se variará la señal de entrada analógica y de esta manera, configurado por software, modificar el ciclo de trabajo de la señal PWM.
- Debido a que para controlar el flujo luminoso de los LEDs son necesarias una entrada ADC y señales PWM provenientes de un



microcontrolador configurado por software, el subsistema de control será el mismo para los 3 ambientes.

### **3.8.2 Requerimientos del subsistema de control:**

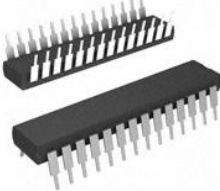
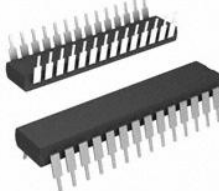
- Microcontrolador que cuente con salidas configurables a señales PWM.
- Microcontrolador que cuente con señal de salida en alta mayor a 2.2V como mínimo y señal de salida en baja con un máximo de 0.8V.
- Microcontrolador que disponga de entrada ADC.

### **3.8.3 Diseño del subsistema de control:**

#### **Elección del microcontrolador:**

Se pueden encontrar soluciones utilizando PICs y microcontroladores de la familia Atmel. Sin embargo, debido a que se tiene previo conocimiento de la familia Atmel. Se elige trabajar con uno de estos. En la Tabla 3.6 se detallan las principales características de los microcontroladores que cumplen con los requerimientos.

Tabla 3.6 Características microcontroladores ATMEL [19 20]

Microcontrolador		
Nombre	ATMEGA8A-PU	ATMEGA48A-PU
Voltaje alimentación	2.7 – 5.5V	1.8 – 5.5V
V salida en baja (Vcc = 5V)	0.9V (max)	0.9V (max)
V salida en alta (Vcc = 5V)	4.2V (min)	4.2V (min)
Puertos I/O	23	23
ADC	6 canales de 10 bits	6 canales de 10 bits
Salidas PWM	3	6
Precio (USA)	\$ 3.32	\$ 2.24

Ambos microcontroladores ofrecen características muy similares, pero un factor determinante para la selección será el hecho de que ofrezca la mayor cantidad de salidas PWM debido a que se emplearán varios circuitos de excitación de LEDs por ambiente, y serán los microcontroladores los que proveerán esta señal. Debido a esto, se elige trabajar con el ATMEGA48A-PU.

**Selección de pines del microcontrolador:**

- El puerto B (PB1, PB2, PB3) como pines de salida para las señales PWM
- El puerto D (PD3, PD5, PD6, PD2) los 3 primeros como pines de salida para las señales PWM y el último que servirá de interrupción externa para activar las PWM.

En la Figura 3.5 se puede apreciar la disposición de pines del microcontrolador Atmega48A y en la Figura 3.6 el circuito esquemático diseñado para controlar el flujo luminoso de los LEDs de potencia.

Se utilizarán dos reguladores de la familia LM78XX para llevar de 24V a 5V debido a que la potencia de disipación es de solo 0.64W, la cual es pequeña comparada con los 222.22W y el 331.58W que se requieren para los ambientes. De esta manera, no se empleará una fuente conmutada para la alimentación del subcircuito de control, lo que reducirá los costos y complejidad del mismo.

Los cálculos realizados de la potencia disipada se encuentran en el Anexo 5.

(PCINT14/RESET) PC6	□ 1	28	□ PC5 (ADC5/SCL/PCINT13)
(PCINT16/RXD) PD0	□ 2	27	□ PC4 (ADC4/SDA/PCINT12)
(PCINT17/TXD) PD1	□ 3	26	□ PC3 (ADC3/PCINT11)
(PCINT18/INT0) PD2	■ 4	25	□ PC2 (ADC2/PCINT10)
(PCINT19/OC2B/INT1) PD3	■ 5	24	□ PC1 (ADC1/PCINT9)
(PCINT20/XCK/T0) PD4	□ 6	23	□ PC0 (ADC0/PCINT8)
VCC	□ 7	22	□ GND
GND	□ 8	21	□ AREF
(PCINT6/XTAL1/TOSC1) PB6	□ 9	20	□ AVCC
(PCINT7/XTAL2/TOSC2) PB7	□ 10	19	□ PB5 (SCK/PCINT5)
(PCINT21/OC0B/T1) PD5	■ 11	18	□ PB4 (MISO/PCINT4)
(PCINT22/OC0A/AIN0) PD6	■ 12	17	■ PB3 (MOSI/OC2A/PCINT3)
(PCINT23/AIN1) PD7	□ 13	16	■ PB2 (SS/OC1B/PCINT2)
(PCINT0/CLKO/ICP1) PB0	□ 14	15	■ PB1 (OC1A/PCINT1)

**Figura 3.5 Disposición de pines Atmega48 [20]**

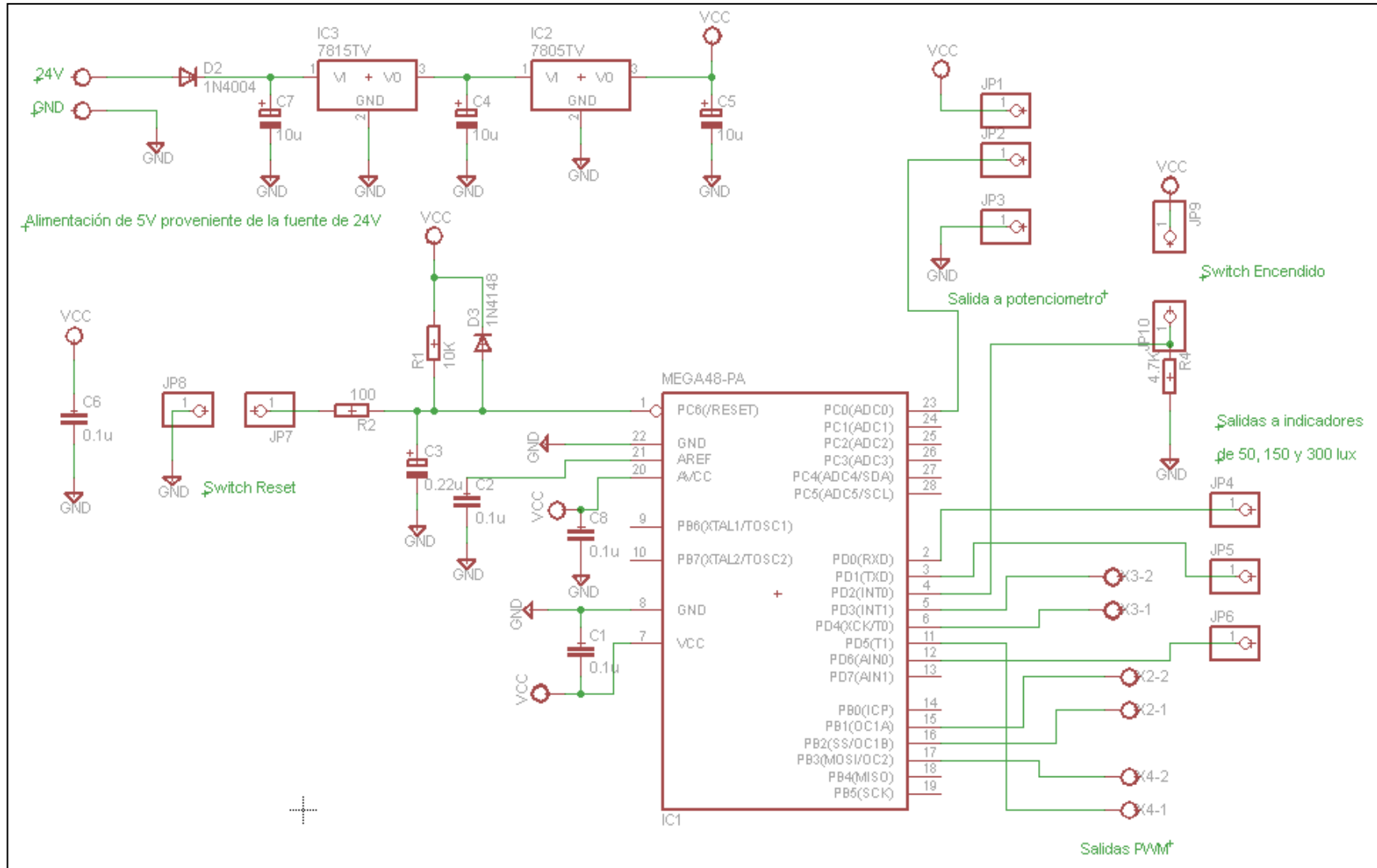


Figura 3.6 Circuito esquemático Atmega48

### **3.9 Diseño del subsistema de alimentación para los LEDs de potencia:**

#### **3.9.1 Consideraciones preliminares:**

- Debido a la alta eficiencia que poseen las fuentes conmutadas en comparación con las fuentes lineales se plantea el uso de las primeras, a fin de que represente un ahorro económico para la institución.
- Se ha decidido seleccionar fuentes comerciales debido al complejo diseño que estas representan, a la alta potencia que deben suministrar lo que dificulta aún más su diseño y porque sus componentes son en su mayoría de importación lo que aumentaría el costo de la implementación.
- Debido a que cada ambiente cuenta con un mínimo de 20 LEDs de potencia con sus respectivos controladores se utilizarán fuentes conmutadas para cada ambiente por separado. De esta manera se requerirá la compra de fuentes de menor potencia a 24V lo cual las hace más comerciales y reduce su costo.

#### **3.9.2 Requerimientos del subsistema de alimentación:**

- Fuente conmutada AC-DC monofásica con voltaje de entrada de 220VAC y 24VDC de salida.
- Para la sala de conservación se requieren 223W de potencia por lo que se requiere una fuente de 300W.
- Para los almacenes del segundo piso y primer sótano se necesita 332W por lo que se requiere una fuente de 400W.
- Alta eficiencia energética



En el Anexo 2 se puede encontrar los cálculos realizados para la potencia necesaria en los distintos ambientes del museo.

### **3.9.3 Diseño del subsistema de alimentación:**

Actualmente, en el mercado se encuentran gran variedad de fuentes conmutadas de distintos valores de potencia y voltaje de salida. Entre los más populares se encuentran las de 12V, 15V y 24V. Debido a esto las hace más económicas a comparación de las que brindan mayor voltaje de salida. Del mismo modo, el precio se ve drásticamente elevado cuando se trata de brindar altas potencias.

En la Tabla 3.7 se encuentran las principales características de 2 fuentes conmutadas. Se plantea la utilización de la fuente de 300W para la sala de conservación y el uso en conjunto de una fuente de 300W y otra de 100W para los almacenes. Así, al mantener valores comerciales se reduce el costo para este subsistema.

**Tabla 3.7 Características fuentes conmutadas seleccionadas**

	
Fuente conmutada FUS-300-24	Fuente conmutada FUS-100-24
Rango entrada universal	Rango entrada universal
300W	100W
24v - 12.5A	24v – 4.16A
Eficiencia típica 80%	Eficiencia típica 85%
Protección sobrecarga y cortocircuitos	Protección sobrecarga y cortocircuitos
\$75 (Precio USA)	\$ 50 (Precio USA)

### 3.10 Plan de colocación de los LEDs de potencia:

#### 3.10.1 Consideraciones preliminares

- Debido a que la salida máxima de los pines de los puertos B, C y D del microcontrolador Atmega48 es de aproximadamente 20mA a condiciones

de 5V de voltaje de alimentación, se colocarán lo más cercano posibles los drivers de LEDs al microcontrolador para así evitar caída de señal o ruido.

- Se asumirá que la caída de tensión máxima desde la salida de driver de LEDs hasta la entrada a los LEDs será de 1% (utilizada para alumbrado) Así, para obtener el calibre del conductor de cada ambiente se calcula: [21]

$$S = \frac{2xPxL}{kxexV}$$

Siendo:

S = Sección en  $mm^2$

P = Potencia en W. En todo caso será de 24W

L = Longitud de la línea en m.

K = Conductividad del conductor. Se usará de cobre, por lo que  $k = 56$ .

E = Caída de tensión en V. En todo caso será 0.24V.

V = Tensión en V. En todo caso será de 24V.

- De esta manera se plantea utilizar cable AWG 16 para la sala de conservación, AWG 14 para el almacén del primer sótano y AWG 12 para el almacén del segundo piso. Se puede encontrar el cálculo de caída de tensión en el Anexo 6.



### 3.10.2 Caja contenedora:

Incrustada en la pared y cercana a la entrada del ambiente se coloca una caja que contiene el sistema de control con la cantidad de drivers de LEDs para cada zona. Luego, los controles como la perilla que varía la PWM, los pulsadores de ON y OFF y los indicadores LED que señalan el nivel de iluminancia deben estar accesibles al usuario. En la Figura 3.7 se aprecia el diseño de las cajas tanto para la sala de conservación donde llega hasta 300 lux y el de los almacenes donde presenta un máximo de 150 lux.

El tamaño de los circuitos de excitación de LEDs y regulación del ciclo de trabajo es de 5x5cm y 8x5cm, respectivamente. De esta manera, la caja que se ubicará en la entrada de la sala de conservación tiene un tamaño de 20x20x15cm. Mientras que las cajas ubicadas en los almacenes disponen de un tamaño de 20x20x20cm.

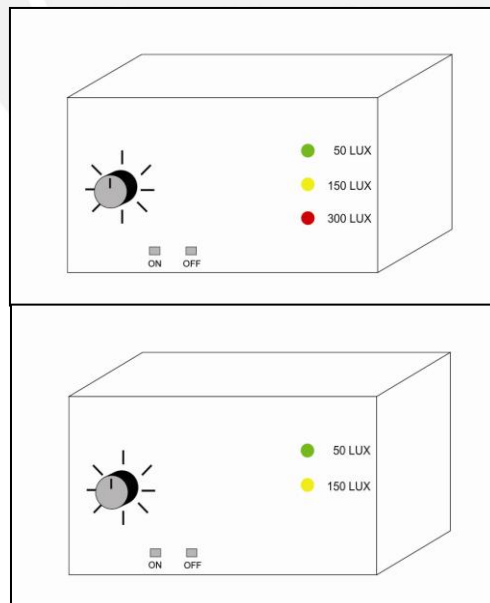


Figura 3.7 Cajas contenedoras de circuitos

### 3.10.3 Plan de colocación de LEDs según ambiente:

#### Sala de Conservación:

Este ambiente se encuentra en el primer piso del museo, presenta las siguientes dimensiones:

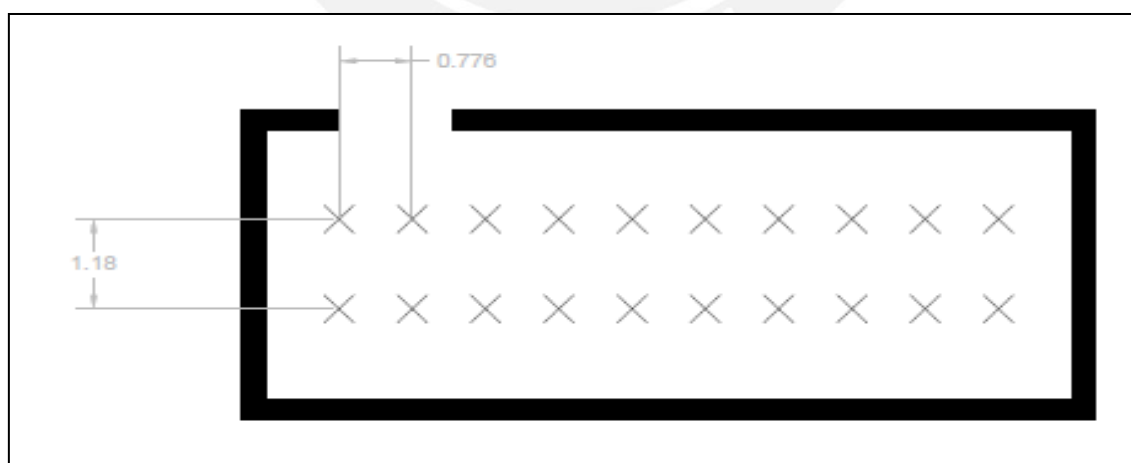
-Largo = 8.54m

-Ancho = 3.56m

-Alto = 3.07m

Debido a esto y tomando en cuenta un plano de trabajo a 0.8m desde el suelo, pues la mesa principal de trabajo se encuentra a esa altura, se calcula que la distancia máxima entre LEDs debe de ser menor a 2.7m. Además, se tiene que en este ambiente se emplearán 20 lámparas.

En la Figura 3.8 se puede apreciar una vista de planta de la sala de conservación con la distribución de los LEDs propuesta.



**Figura 3.8 Distribución LEDs sala conservación**

### Almacén primer sótano:

Este ambiente presenta las siguientes dimensiones:

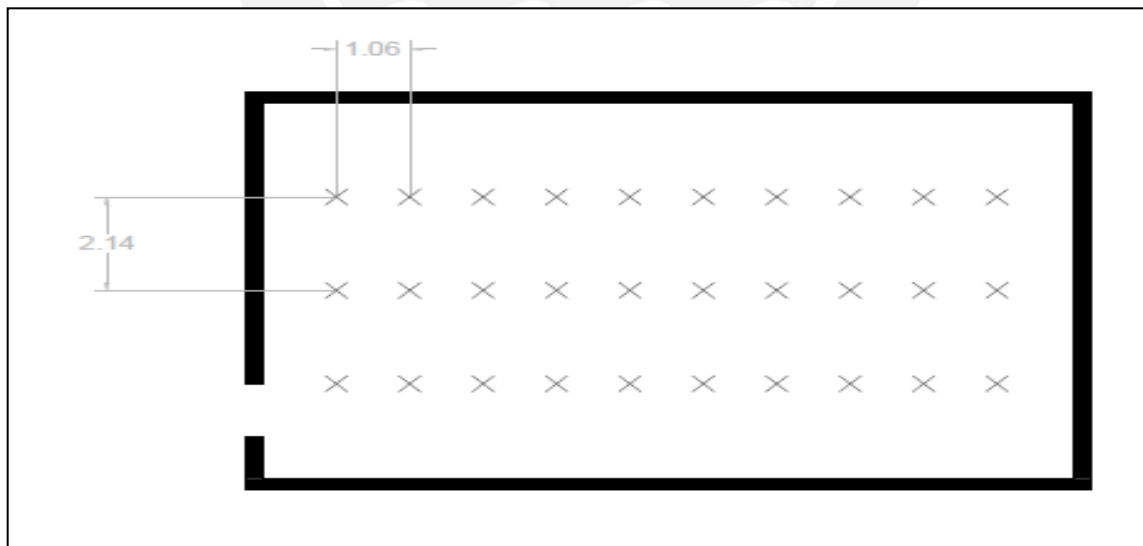
-Largo = 11.7m

-Ancho = 8.59m

-Alto = 2.55m

Debido a esto y tomando en cuenta un plano de trabajo a 1.00m desde el suelo que es una altura donde se recomienda colocar los restos materiales de mediana sensibilidad a la luz, se calcula que la distancia máxima entre LEDs debe de ser menor a 1.86m. Además, se tiene que en este ambiente se emplearán 30 lámparas.

En la Figura 3.9 se puede apreciar una vista de planta del almacén que se encuentra en el primer sótano con la distribución de los LEDs propuesta.



**Figura 3.9 Distribución LEDs almacén primer sótano**

### Almacén segundo piso:

Este ambiente presenta las siguientes dimensiones:

-Largo = 19.13m

-Ancho = 5.41m

-Alto = 3.07m

Debido a esto y tomando en cuenta un plano de trabajo a 1.00m por las mismas razones que el almacén del primer sótano, se calcula que la distancia máxima entre LEDs debe de ser menor a 2.48m. Además, se tiene que en este ambiente se emplearán 30 lámparas.

En la Figura 3.10 se puede apreciar una vista de planta del almacén que se encuentra en el segundo piso con la distribución de los LEDs propuesta.



**Figura 3.10 Distribución LEDs almacén segundo piso**

Los cálculos de la distancia de separación máxima de los LEDs de potencia se encuentran en el Anexo 1.

## CAPITULO 4: PRESENTACIÓN DE SIMULACIONES

### 4.1 Introducción:

Para probar el diseño del driver de LEDs, se ha implementado un circuito que pueda manejar un LED de la marca seleccionada. Del mismo modo, para verificar el diseño de la etapa de control se ha creado un programa con el software Vmlab que mediante simulaciones pueda brindar ondas PWM y mediante un circuito implementado con el microcontrolador Atmega8Ade la marca Atmelse prueba el control de las ondas PWM a través de un potenciómetro conectado a una entrada ADC del microcontrolador. Finalmente, para simular las intensidades de luz recomendadas se ha utilizado el programa Revit el cual modela un ambiente.

### 4.2 Descripción del software:

El programa desarrollado para el circuito implementado en el software Vmlabpermite variar el Duty Cicle de la onda PWM generada mediante cambios en la digitalización de una entrada ADC. De esta manera, al variar el DutyCycle se pueda tener distintos valores de flujo luminoso de los LEDs de potencia.

Por otro lado, para simular la cantidad de iluminancia en un ambiente, se ha utilizado el software Revit de Autodesk, este permite generar imágenes desde planos modelados en AutoCADpara tener una muestra más fiel del lugar. Además, elmismo software permite simular luminarias ajustando valores de eficiencia, flujo luminoso, temperatura de color, etc.

### 4.3 Descripción de los circuitos implementados:

El circuito implementado para el driver de LEDs se compone del circuito integrado LM3404 con los componentes seleccionados en el Anexo 3. Sin embargo, por motivos económicos solo se manejará un LED C0402 de la marca BRIDGELUX. Del mismo modo, para probar el funcionamiento de la etapa de control, se implementará un circuito en base al microcontrolador Atmega8 con un potenciómetro conectado al ADC0 y la salida PWM será a través del PB1. De esta manera, la señal PWM se conectará al pin DIM del driver de LEDs.

Los circuitos implementados tienen por objetivo:

- Demostrar el correcto control de la onda PWM mediante variaciones del ADC a través de un potenciómetro conectado a 5V, ADC0 y GND.
- Verificar que los LEDs indicadores de iluminancia de 50, 150 y 300 lux se enciendan en los valores calculados de la señal PWM.
- Verificar que se pueda variar el flujo luminoso de los LEDs mediante la señal PWM proveniente del circuito de control

### 4.4 Resultados de la simulación por software:

En la simulación mediante Vmlab se evalúa el funcionamiento del ADC asociado a un Slider, mediante el prendido de los diodos LED. Además, se simulará la variación del ciclo de trabajo de la PWM variando el valor del registro OCR1A.

En la Figura 4.1 se aprecia el valor del registro Z (676) el cual está dentro del rango [632-700] que se calculó en el Anexo 7. Así, se prende el LED1. En la Figura 4.2 se puede ver el control del ciclo de trabajo de la señal PWM y se puede apreciar que en la salida PB1 se tiene un 50% de DC.

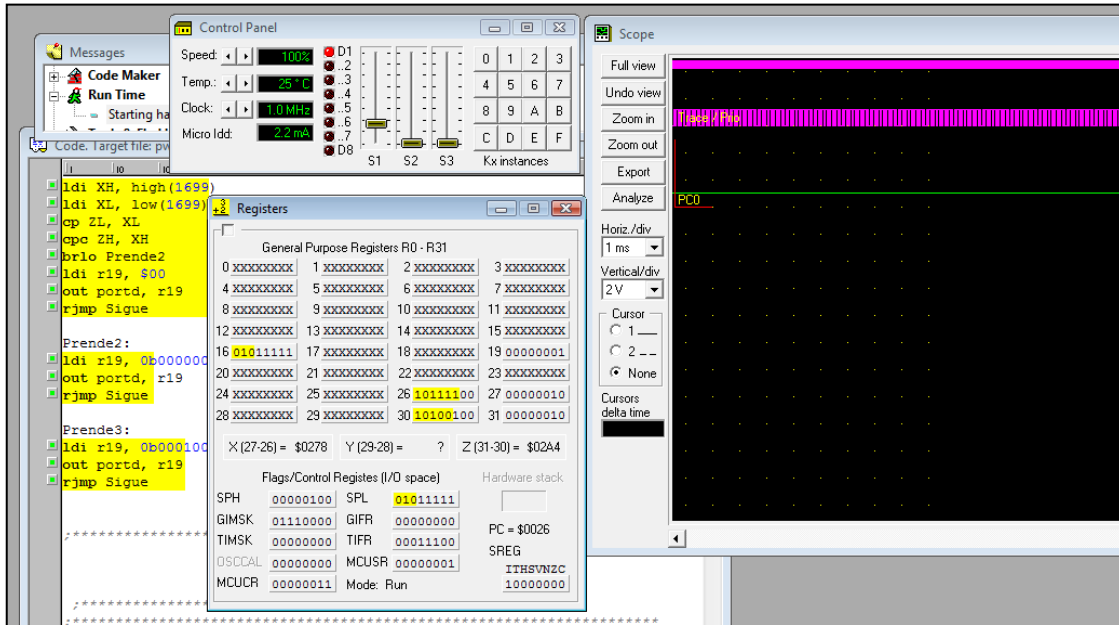


Figura 4.1 Simulación del ADC

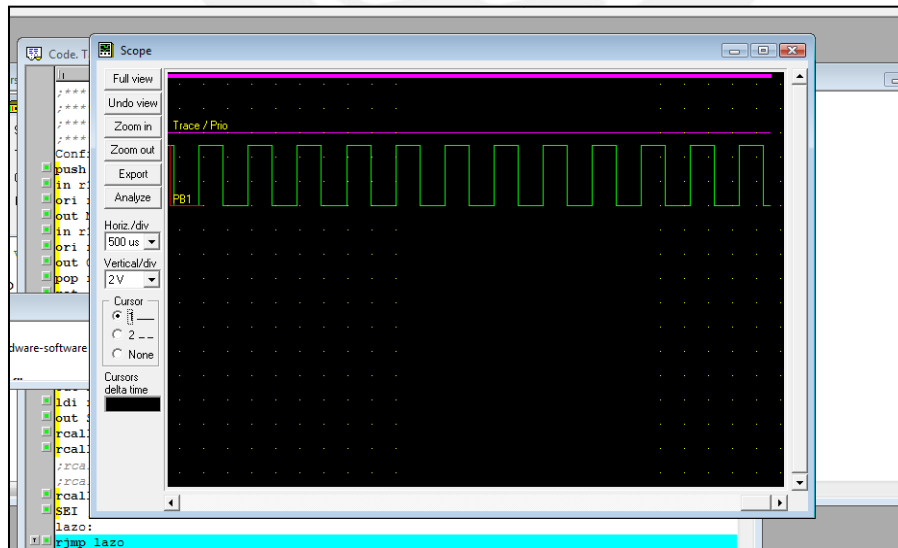


Figura 4.2 Simulación de la señal PWM

Luego, para la simulación mediante el software Revit, se decidió modelar el ambiente que dispondrá de los 3 niveles de iluminancia recomendada, es decir, la sala de conservación.

En la Figura 4.3 se puede apreciar el modelado del ambiente de la sala de conservación a los distintos niveles de iluminancia recomendada en su zona de trabajo, que se representa por la mesa central.



**Figura 4.3 Sala de conservación a 50, 150 y 300 lux**

Los ambientes destinados al almacenaje presentarán iluminancia máxima de 150 lux en su zona de trabajo, por las razones anteriormente expuestas.

#### **4.5 Resultados de los circuitos implementados:**

Los circuitos implementados permiten corroborar las simulaciones realizadas en software. A continuación, se pasa a detallar las pruebas realizadas.



### Circuito del subsistema de Control:

El circuito de la Figura 4.4 representa al de la sala de conservación. Con 3 indicadores LED, los cuales se prenden al llegar a los 20, 50 y 99% de PWM.

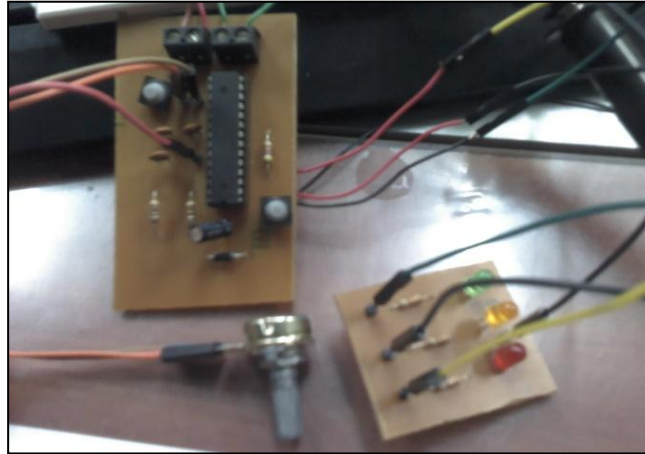


Figura 4.4 Circuito del subsistema de control implementado

### Señal PWM a 20%:

En la Figura 4.5 se muestra la señal PWM al 20% de ciclo de trabajo, en este punto se prende el primer LED el cual indica que la iluminancia en la zona de trabajo es de 50 lux.

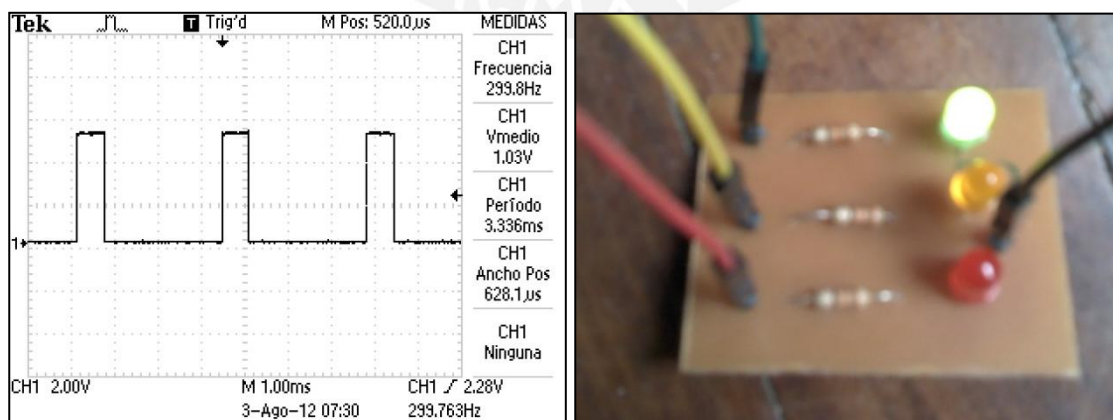
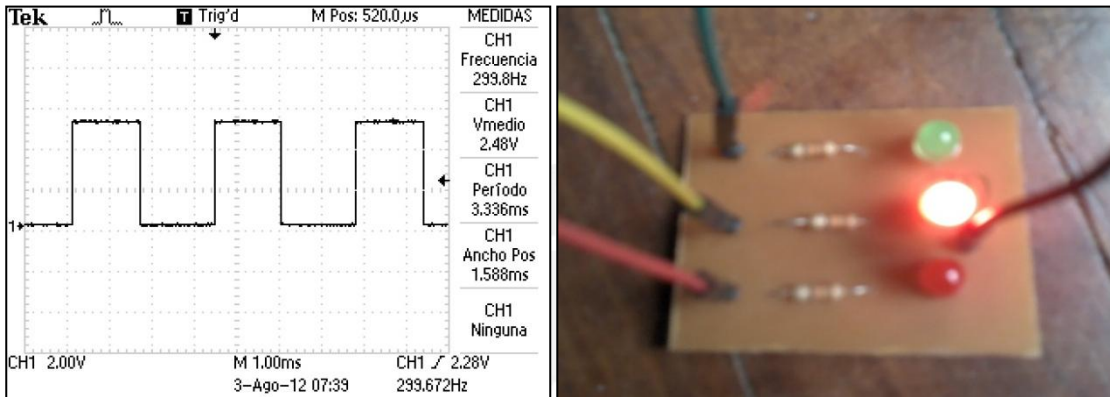


Figura 4.5 Señal PWM al 20% del ciclo de trabajo

**Señal PWM a 50%:**

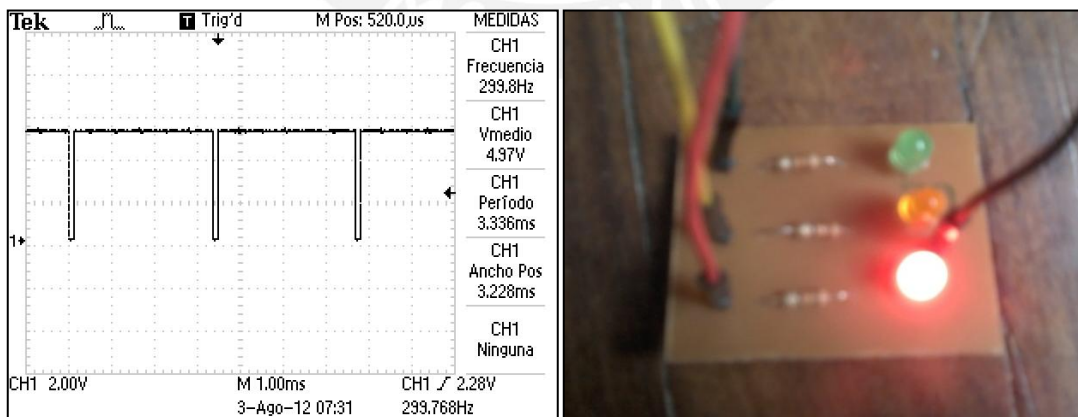
En la Figura 4.6 se muestra la señal PWM al 50% de ciclo de trabajo, en este punto se prende el segundo LED el cual señala que la iluminancia en la zona de trabajo es de 150 lux.



**Figura 4.6 Onda PWM al 50% del ciclo de trabajo**

**Señal PWM a 99%:**

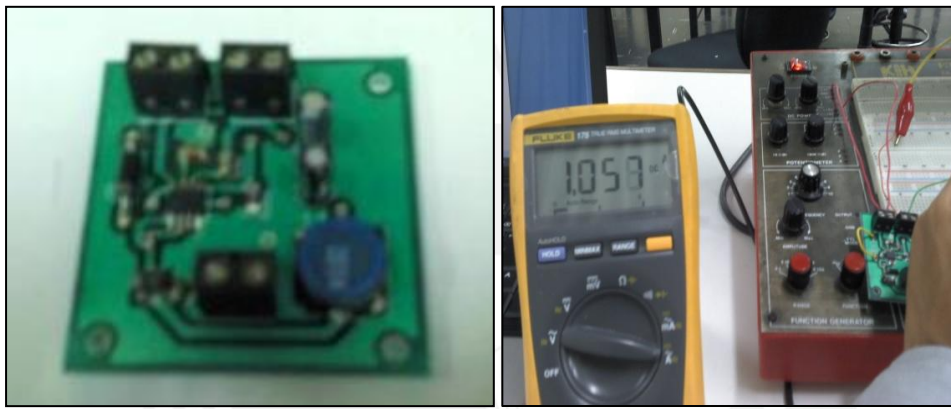
En la Figura 4.7 se muestra la señal PWM al 99% de ciclo de trabajo, en este punto se prende el tercer LED el cual señala que la iluminancia en la zona de trabajo es de 300 lux.



**Figura 4.7 Señal PWM al 99% del ciclo de trabajo**

### Circuito del subsistema de excitación:

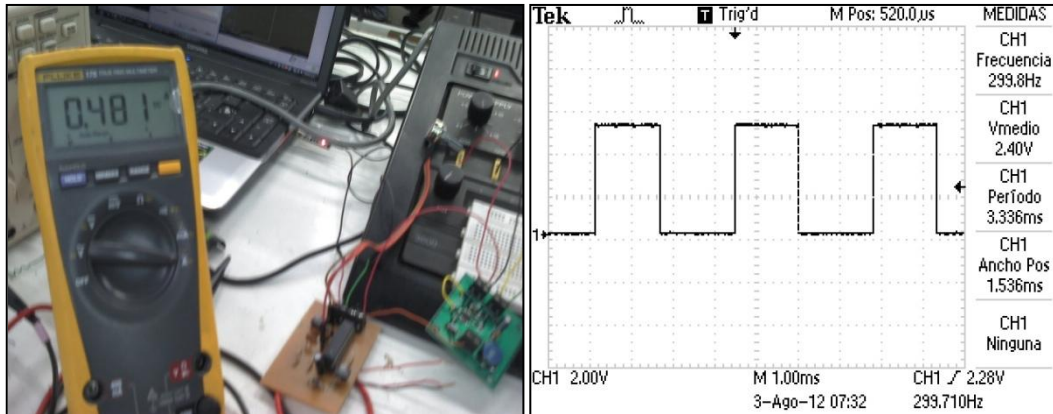
El circuito de excitación de LEDs se puede apreciar en la Figura 4.8, en este se observa que a los 24V de entrada se obtiene una corriente de salida de 1.057 A cabe mencionar que esta prueba se realiza con una resistencia de valor equivalente a la caída de voltaje del LED de potencia seleccionado.



**Figura 4.8 Circuito del subsistema de excitación de los LEDs**

Luego de probar el funcionamiento de este circuito se pasó a complementarse con el circuito de regulación del flujo luminoso. Estos circuitos se conectan mediante la salida PWM del Atmega8A y la entrada DIM del LM3404, también se conectan las tierras.

En la Figura 4.9 se aprecia que con un ciclo de trabajo dealredorde 48% la corriente media es de 0.48 A.



**Figura 4.9 Pruebas con el driver de LEDs y el circuito de control**

Del mismo modo se realizaron pruebas para medir la frecuencia de conmutación. Cabe mencionar que la  $F_{sw}$  solo tiene relación con el voltaje de salida y con la resistencia de entrada. Debido a que el circuito de prueba solo alimenta a un LED, la frecuencia variará a la calculada en el Anexo 3, de la siguiente manera:

$$f_{sw} = \frac{V_{out}}{R_{on} \times 1.34 \times 10^{-10}} = \frac{10.5}{0.44 \times 1.34 \times 10^{-10}} = 178.1 \text{kHz}$$

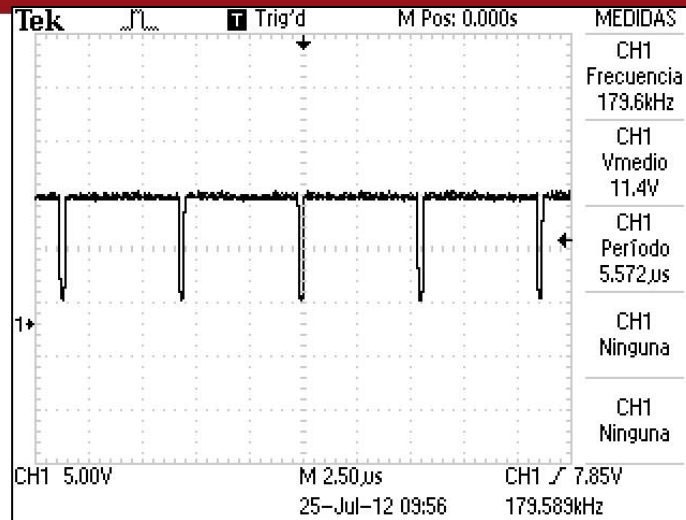
Siendo:

$F_{sw}$  = Frecuencia de conmutación en Khz.

$V_{out}$  = Voltaje de salida del driver de LEDs en V.

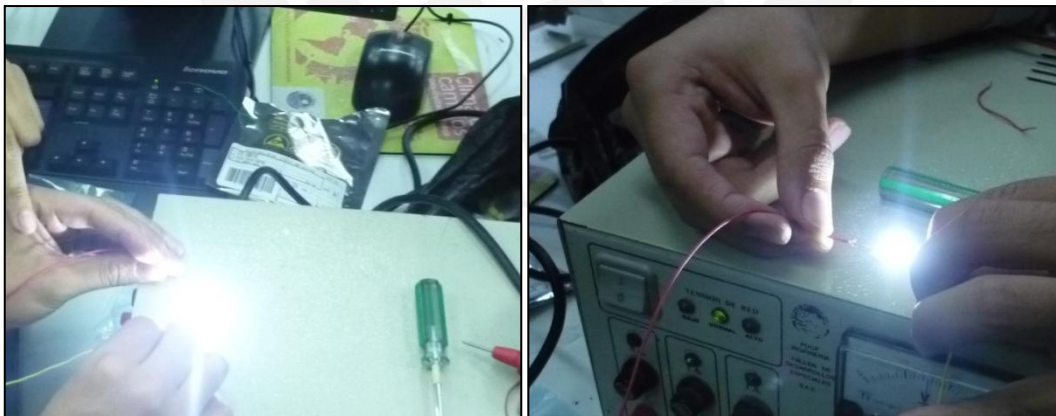
$R_{on}$  = Resistencia de entrada del driver de LEDs en  $\Omega$ .

En la Figura 4.10 se puede apreciar la frecuencia medida en el diodo schottky el cual va conectado al pin SW del LM3404.



**Figura 4.10 Frecuencia de conmutación medida**

Finalmente, una vez comprobado que los valores de salida van acorde a lo esperado se coloca el LED. En la Figura 4.11 se puede ver el LED funcionando con la tarjeta de excitación. Se puede apreciar la gran cantidad de flujo luminoso de un solo LED.



**Figura 4.11 LED funcionando con el circuito de excitación**

#### 4.6 Costo implementación del proyecto:

En la Tabla 4.1 se presenta el detalle de los costos totales para la implementación del proyecto.

**Tabla 4.1 Costo total del proyecto**

Descripción	Cantidad	Proveedor	Costo total (\$)
Bridgelux C0402	80 und	Digikey	616
Wakefield 527-45AB	80 und	Mouser	590
LM3404	40 und	Digikey	251
Atmega48	3 und	Digikey	13
Componentes tarjeta excitación	40 und	Digikey,	320
Componentes tarjeta control	3 und	Local	9
PCB excitación	40 und	Local	440
Fuente conmutada 100w	1 und	Cetronic	95
Fuente conmutada 300w	3 und	Cetronic	428
Cable AWG16	90m	SODIMAC	22
Cable AWG14	185m	SODIMAC	65
Cable AWG12	250m	SODIMAC	124
Herramientas		Local	400
Mano de obra (3 personas)	2 mes		5400
Imprevistos			300
<b>Costo total (\$)</b>			<b>8913</b>

## CONCLUSIONES

Se cumple el objetivo principal de esta tesis, es decir, comprobar la validez del diseño de un sistema de iluminación para las diferentes zonas de la institución y que esta brinde un nivel mayor de cuidado a los restos materiales.

Acorde a las pruebas realizadas se demuestra también la correcta operación del circuito de excitación de LEDs de potencia diseñado. Debido a su alta eficiencia y reducido tamaño, hace de este un dispositivo adecuado para alimentar a los LEDs seleccionados.

De acuerdo a las pruebas realizadas tanto a nivel de simulación como implementación, se verifica el circuito de regulación para poder variar el flujo luminoso de los LEDs de potencia que incluye los indicadores de nivel de iluminancia.

Acorde a los cálculos realizados para cada ambiente a iluminar, queda demostrada la validez técnica de las fuentes de alimentación seleccionadas para los distintos ambientes de la institución.

## RECOMENDACIONES

Para la caja contenedora, que es la interfaz con el usuario, se podría mejorar colocando un teclado matricial para que se introduzca directamente la cantidad de lux que se desea en la zona de trabajo de cada ambiente.

Para disminuir el número de circuitos de excitación, se podría hacer el diseño en base a voltajes mayores, así se disminuye el número de circuitos, de cableado e incluso el del tamaño de la caja contenedora. Sin embargo, de esta manera se necesitaría fuentes conmutadas de voltajes no comerciales, lo que podría elevar el costo del subsistema de alimentación a aproximadamente el doble.

Se recomienda la utilización de vidrios laminados para las ventanas de los ambientes, ya que cuentan un alto grado de filtro contra la radiación ultravioleta (mayor al 90%). De esta manera, se brinda aún mayor cuidado a las muestras, pues a diferentes horas del día la cantidad de radiación ultravioleta proveniente de iluminación natural varía. Además, en caso de quebrarse, sus partes quedan unidas y no caen hacia el piso o las muestras, evitando posibles daños.



## BIBLIOGRAFÍA

- [1] ILUMINET  
Iluminación en museos y galerías de arte. [En línea] [Consultado 2011/11/02]<<http://www.iluminet.com.mx/iluminacion-en-museos-y-galerias-de-arte/>>
- [2] RENSSELAER POLYTECHNIC INSTITUTE. Lighting Research Center.  
2000 Illumination Fundamentals. California
- [3] ZEVALLOS RACSY, Juan  
2010 Diseño de los subsistemas de las luminarias y circuitos de excitación de un sistema de iluminación exterior basado en tecnología de leds de potencia para el logo de la PUCP en el edificio Mac Gregor. Tesis (Ing.) Pontificia Universidad Católica del Perú. Facultad de Ciencias e Ingeniería. Lima. 53 p.
- [4] RENSSELAER POLYTECHNIC INSTITUTE. Lighting Research Center.  
The Solid-State Lighting Program at the LRC.[En línea] [Consultado 2011/11/04]  
<<http://www.lrc.rpi.edu/programs/solidstate/SSLWhat.asp>>
- [5] THOMPSON, Garry.  
1990 The museum environment. 2a edición. Londres
- [6] DUEÑAS ROMAN, Sergio  
2010 Diseño de subsistemas de alimentación y control de un sistema de iluminación exterior basado en tecnología de leds de potencia del logo PUCP en el edificio McGregor. Tesis (Ing.) Pontificia Universidad Católica del Perú. Facultad de Ciencias e Ingeniería. Lima. 120 p.
- [7] CANADIAN CONSERVATION INSTITUTE. Conservation Resource Centre  
2009 Light , Ultraviolet and Infrared .Canadá
- [8] RASHID, Muhammad  
1993 Power Electronics: Circuits Devices and Applications.2a edición.Estados Unidos
- [9] RASHID, Muhammad  
2001 PowerElectronicsHandbook. Estados Unidos

[10] PHILIPS

Bombillas LED: la innovación de hoy y de mañana. [En línea] [Consultado 2011/10/07]

<<http://www.philips.es/c/luz-led/30016/cat/>>

[11] MUSEO CHILENO DE ARTE PRECOLOMBINO

Museo inaugura renovada sala textil. [En línea] [Consultado 2011/11/ 10]

<<http://www.precolombino.cl/Noticias/84-Museo-inaugura-renovada-sala-textil>>

[12] ILUMINET

LEDs de Toshiba en el museo de Louvre. [En línea] [Consultado 2011/11/10]

<<http://www.iluminet.com.mx/leds-de-toshiba-en-el-museo-de-louvre/>>

[13] INSTITUTO RIVA AGUERO

Museo Josefina Ramos de Cox. [En línea] [Consultado 2012/03/26]

<<http://ira.pucp.edu.pe/museo-arqueologia/presentacion>>

[14] AGRAWAL, O.P

1989 Museum Lighting. ICCROM Rome.

[15] BRIDGELUX

2011 Bridgelux ES Array Series. Estados Unidos

[16] CREE

2012 Cree XLamp XP Family LEDs. USA

[17] National Instruments

2010 LM3404, LM3404HV. USA

[18] National Instruments

2012 LM3409/ LM3409HV/ LM3409Q/ LM3409QHV/ LM3409N. USA

[19] ATMEL Corporation

2011 ATmega8, ATmega8L. USA

[20] ATMEL Corporation  
2011 ATmega48A, ATmega48PA, ATmega88A, ATmega88PA, ATmega168A,  
ATmega168PA, ATmega328, ATmega328PA. USA

[21] PUCP. Facultad de Ciencias e Ingeniería. Área de Electricidad.  
2010 Selección de Cables de Energía. PERU

