



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**ESTUDIO TÉCNICO ECONÓMICO DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DEL SISTEMA DE
ALUMBRADO PÚBLICO DE LA CABECERA MUNICIPAL DE ORATORIO, SANTA ROSA**

Walter Rafael Véliz Muñoz

Asesorado por el Ing. Francisco Javier González López

Guatemala, julio de 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTUDIO TÉCNICO ECONÓMICO DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DEL SISTEMA DE
ALUMBRADO PÚBLICO DE LA CABECERA MUNICIPAL DE ORATORIO, SANTA ROSA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

WALTER RAFAEL VÉLIZ MUÑOZ

ASESORADO POR EL ING. FRANCISCO JAVIER GONZÁLEZ LÓPEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, JULIO DE 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Julio Rolando Barrios Archila
EXAMINADOR	Ing. Jorge Gilberto González Padilla
EXAMINADOR	Ing. Marvin Marino Hernández Fernández
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

ESTUDIO TÉCNICO ECONÓMICO DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DEL SISTEMA DE ALUMBRADO PÚBLICO DE LA CABECERA MUNICIPAL DE ORATORIO, SANTA ROSA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 5 de febrero de 2014.



Walter Rafael Véliz Muñoz



FACULTAD DE INGENIERIA

Ref. EIME 30. 2014
Guatemala, 26 de junio 2014.

Señor Director
Ing. Guillermo Antonio Puente Romero
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado: ESTUDIO TÉCNICO ECONÓMICO DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DEL SISTEMA DE ALUMBRADO PÚBLICO DE LA CABECERA MUNICIPAL DE ORATORIO, SANTA ROSA, del estudiante Walter Rafael Véliz Muñoz, que cumple con los requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Francisco Javier González López
Coordinador Área Potencia



S/O

Guatemala 2 de julio de 2014

Ingeniero
Guillermo Antonio Puente Romero
Director de Escuela
Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

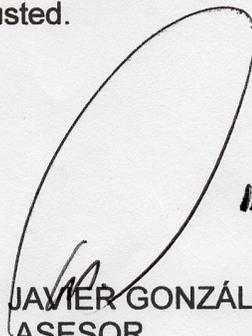
Estimado Señor Coordinador Área de Potencia:

Por medio de la presente informo a usted, que he asesorado y revisado el trabajo de tesis titulado ESTUDIO TÉCNICO ECONÓMICO DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DEL SISTEMA DE ALUMBRADO PÚBLICO DE LA CABECERA MUNICIPAL DE ORATORIO, SANTA ROSA, elaborado por el estudiante WALTER RAFAEL VÉLIZ MUÑOZ, con carné 200516137, previo a obtener el título de Ingeniero Electricista.

Habiendo determinado que dicho trabajo cumple con los requisitos establecidos de la Facultad de Ingeniería, y reconociendo la importancia del tema. Por todo lo anterior tanto el autor como el asesor somos responsables del contenido y conclusiones del presente trabajo de tesis y en consecuencia, por medio de la presente me permito APROBARLO, agregando que lo encuentro completamente satisfactorio.

Sin otro particular, me suscribo de usted.

Atentamente,



Ing. Francisco Javier González López
Colegiado No. 2364

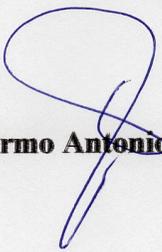
Ing. FRANCISCO JAVIER GONZÁLEZ LÓPEZ
ASESOR
COORDINADOR AREA DE POTENCIA



FACULTAD DE INGENIERIA

REF. EIME 30. 2014.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; **WALTER RAFAEL VÉLIZ MUÑOZ** titulado: **ESTUDIO TÉCNICO ECONÓMICO DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DEL SISTEMA DE ALUMBRADO PÚBLICO DE LA CABECERA MUNICIPAL DE ORATORIO, SANTA ROSA,** procede a la autorización del mismo.


Ing. Guillermo Antonio Puente Romero

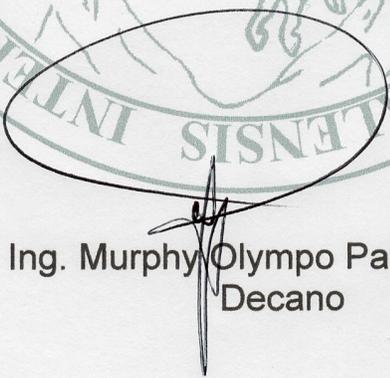
GUATEMALA, 4 DE JULIO 2,014.





El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **ESTUDIO TÉCNICO ECONÓMICO DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DEL SISTEMA DE ALUMBRADO PÚBLICO DE LA CABECERA MUNICIPAL DE ORATORIO, SANTA ROSA**, presentado por el estudiante universitario: **Walter Rafael Véliz Muñoz** y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano

Guatemala, julio de 2014



ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por ser una importante influencia en mi carrera.
Mis padres	Miriam Muñoz y Rafael Véliz, su amor será siempre mi inspiración.
Mis hermanos	Rogelio y Diego Véliz, por ser siempre solidarios conmigo.
Mis abuelas	Marta Cardona y Doris Juárez, por todo su cariño.
Mi familia	Por darme palabras de motivación para salir adelante.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por darme la oportunidad de superarme como ser humano.
Facultad de Ingeniería	Por formarme como profesional con principios basados en la técnica y la verdad.
Mis amigos de la Facultad	José Miguel Nimatuj Cajas, Mario Velásquez Chen, Sergio Donis Soto y a todos los que compartieron conmigo en las aulas universitarias.
A mi maestro	Ing. Francisco Javier González López, por todas sus enseñanzas, no solo en la ingeniería sino que también por sus consejos para ser un mejor ser humano.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XVII
OBJETIVOS.....	XIX
INTRODUCCIÓN	XXI
1. FUNCIONAMIENTO Y ESPECIFICACIONES DE LÁMPARAS QUE SON UTILIZADAS EN SISTEMAS DE ALUMBRADO PÚBLICO MUNICIPAL	1
1.1. Lámparas de vapor de mercurio	1
1.1.1. Funcionamiento	1
1.1.2. Especificaciones	3
1.2. Lámparas de haluro metálico	4
1.2.1. Funcionamiento	4
1.2.2. Especificaciones	5
1.3. Lámparas de vapor de sodio a alta o presión (SAP)	6
1.3.1. Funcionamiento	6
1.3.2. Especificaciones	7
1.4. Lámparas fluorescentes	8
1.4.1. Funcionamiento	9
1.4.2. Especificaciones	9
1.5. Lámparas LED.....	10
1.5.1. Funcionamiento	11
1.5.2. Especificaciones	11

1.6.	Lámparas de inducción	12
1.6.1.	Funcionamiento.....	13
1.6.2.	Especificaciones.....	13
2.	CALIDAD DE LA POTENCIA ELÉCTRICA Y LA RELACIÓN CON SISTEMAS DE ALUMBRADO PÚBLICO	15
2.1.	Distorsión armónica	15
2.1.1.	Causas que la originan.....	16
2.1.2.	Efectos que produce	18
2.2.	<i>Flicker</i>	20
2.2.1.	Causas que la originan.....	20
2.2.2.	Efectos que produce	21
2.3.	Regulación de voltaje.....	21
2.4.	Transitorios	21
2.4.1.	Transitorio oscilatorio	22
2.4.2.	Transitorio impulsivo.....	22
2.5.	<i>Sag</i> (depresiones) y <i>swell</i> (cresta).....	22
2.5.1.	<i>Sag</i> (depresiones).....	23
2.5.2.	<i>Swell</i> (cresta)	23
3.	ESTUDIO TÉCNICO DE LAS LÁMPARAS A UTILIZAR EN EL PROYECTO	25
3.1.	Análisis de la lámpara vapor de mercurio de 175 W	25
3.1.1.	Diagrama eléctrico de la lámpara vapor de mercurio de 175 W.....	26
3.1.2.	Mediciones de corriente, tensiones y temperatura ...	26
3.1.2.1.	Medición de corriente	27
3.1.2.2.	Medición de tensión	27
3.1.2.3.	Medición de temperatura.....	27

3.1.3.	Potencia y flujo luminoso	27
3.2.	Análisis de la lámpara fluorescente con transformador	27
3.2.1.	Diagrama eléctrico de la lámpara fluorescente con transformador	28
3.2.2.	Mediciones de corriente y temperatura.....	30
3.2.2.1.	Medición de corriente.....	30
3.2.2.2.	Medición de tensión.....	30
3.2.2.3.	Medición de temperatura	30
3.2.3.	Potencia y flujo luminoso	31
3.3.	Análisis de la lámpara fluorescente sin transformador	31
3.3.1.	Diagrama eléctrico de la lámpara fluorescente sin transformador	32
3.3.2.	Mediciones de corriente, tensión y temperatura	32
3.3.2.1.	Medición de corriente.....	33
3.3.2.2.	Medición de tensión.....	33
3.3.2.3.	Medición de temperatura	33
3.3.3.	Potencia y flujo luminoso	33
3.4.	Análisis de la lámpara LED con transformador.....	33
3.4.1.	Diagrama eléctrico de la lámpara LED con transformador	34
3.4.2.	Mediciones de corriente, tensión y temperatura	35
3.4.2.1.	Medición de corriente.....	36
3.4.2.2.	Medición de tensión.....	36
3.4.2.3.	Medición de temperatura	36
3.4.3.	Potencia y flujo luminoso	36
3.5.	Análisis de la lámpara LED sin transformador.....	36
3.5.1.	Diagrama eléctrico de la lámpara LED sin transformador.....	37
3.5.2.	Mediciones de corriente, tensión y temperatura	38

	3.5.2.1.	Medición de corriente	38
	3.5.2.2.	Medición de tensión	39
	3.5.2.3.	Medición de temperatura.....	39
	3.5.3.	Potencia y flujo luminoso.....	39
3.6.		Nivel de iluminación de calles	39
	3.6.1.	Altura de ubicación de lámparas	39
	3.6.2.	Cálculo de distancia entre lámparas	40
	3.6.2.1.	Cálculo de distancia entre lámparas de vapor de mercurio	42
	3.6.2.2.	Cálculo de distancia entre lámparas fluorescentes.....	42
	3.6.2.3.	Cálculo de distancia entre lámparas LED	43
3.7.		Operación y mantenimiento del sistema de alumbrado público.....	44
	3.7.1.	Interruptor termo magnético	45
	3.7.2.	Lámparas	45
	3.7.3.	Transformador.....	46
	3.7.4.	Fotocelda	47
4.		ANÁLISIS ECONÓMICO.....	49
	4.1.	Ecuación de la potencia real	49
	4.2.	Ecuación del número de horas de trabajo de la lámpara	49
	4.3.	Ecuación de cálculo de costo de la energía eléctrica de la lámpara	49
	4.3.1.	Costo mensual de usar lámparas de vapor de mercurio.....	50
	4.3.2.	Costo mensual de usar lámparas fluorescentes con transformador	50

4.3.3.	Costo mensual de usar lámparas fluorescentes sin transformador	51
4.3.4.	Costo mensual de usar lámparas LED con transformador	51
4.3.5.	Costo mensual de usar lámparas LED sin transformador	52
4.4.	Consumo vs. costo	52
4.5.	Consumo vs. iluminación	53
4.6.	Tiempo de vida útil.....	54
4.7.	Distorsión armónica	54
4.8.	Número de lámparas fluorescentes y LED para obtener la iluminación de la lámpara de mercurio	55
4.9.	Sistema de protección de la lámpara.....	56
4.10.	Tiempo en recuperar la inversión de cambio de lámparas de vapor de mercurio a lámparas fluorescentes	56
4.11.	Tiempo en recuperar la inversión de cambio de lámparas de vapor de mercurio a lámparas LED	58
4.12.	Valor Presente Neto (VPN) de lámparas fluorescentes y LED ..	59
4.12.1.	Valor Presente Neto (VPN) de lámparas fluorescentes	60
4.12.2.	Valor Presente Neto (VPN) de lámparas LED	64
4.13.	Tasa Interna de Retorno (TIR) de lámparas fluorescentes y LED.....	67
4.13.1.	Tasa Interna de Retorno (TIR) de lámparas fluorescentes	68
4.13.2.	Tasa Interna de Retorno (TIR) de lámparas LED	72
CONCLUSIONES		77
RECOMENDACIONES		79

BIBLIOGRAFÍA 81

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Curva fotométrica lámpara vapor de mercurio	4
2.	Curva fotométrica de lámpara de haluro metálico	6
3.	Curva fotométrica lámpara de vapor de sodio.....	8
4.	Curva fotométrica de lámpara fluorescente.....	10
5.	Curva fotométrica de lámpara LED	13
6.	Curva fotométrica de lámpara de inducción	14
7.	Lámpara vapor de mercurio de 175 W	25
8.	Diagrama eléctrico de lámpara vapor de mercurio de 175 W	26
9.	Lámpara fluorescente con transformador.....	28
10.	Diagrama eléctrico de la lámpara fluorescente con transformador	29
11.	Lámpara fluorescente sin transformador.....	31
12.	Diagrama eléctrico de la lámpara fluorescente sin transformador	32
13.	Lámpara LED con transformador	34
14.	Diagrama eléctrico de lámpara LED con transformador.....	35
15.	Lámpara LED sin transformador	37
16.	Diagrama eléctrico de la lámpara LED sin transformador	38
17.	Diagrama de flujo de efectivo de lámparas fluorescentes a una tasa de interés del 20 %.....	62
18.	Diagrama de flujo de efectivo de lámparas LED a una tasa de interés del 20 %	66
19.	Diagrama de flujo de efectivo de lámparas fluorescentes a una tasa de interés del 50 %.....	69

20.	Diagrama de flujo de efectivo de lámparas LED a una tasa de interés de 50 %.....	73
-----	--	----

TABLAS

I.	Relación entre flujo luminoso y altura de la lámpara	40
II.	Tiempo de vida útil de las lámparas	46
III.	Consumo vs. costo	53
IV.	Consumo vs. iluminación.....	53
V.	Tiempo de vida útil	54
VI.	Distorsión armónica.....	55
VII.	Número de lámparas fluorescentes y LED para obtener la iluminación de la lámpara de mercurio	56
VIII.	Interpolación lineal para Tasa Interna de Retorno	68
IX.	Interpolación lineal para Tasa Interna de Retorno de lámparas fluorescentes	71
X.	Interpolación lineal para Tasa Interna de Retorno de lámparas LED	75

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Amperio
C_u	Coeficiente de utilización
CC	Corriente continúa
I promedio	Corriente promedio
Swell	Cresta
CE	De conformidad europea
Sag	Depresiones
LED	Diodo emisor de luz
D	Distancia entre lámparas
f_c	Factor de conservación
f_d	Factor de depreciación
° C	Grado centígrado
IP	Grado de protección
Hz	Hertz
E	Iluminancia
i	Interés
K	Kelvin
kW	Kilowatt
lm	Lumen
m	Metro
nm	Nanómetro
%	Por ciento
P/A	Presente dado anualidad

P/F	Presente dado futuro
PLC	Programador lógico computarizado
PCC	Punto de conexión común
Q	Quetzales
RMS	<i>Root mean square</i> (raíz cuadrada media)
SAP	Sodio a alta presión
V	Voltio
W	Watt
Φ	Flujo de la lámpara

GLOSARIO

Adimensional	Cantidad sin una dimensión física asociada, siendo por tanto un número puro que permite describir una característica física sin dimensión ni unidad de expresión explícita, y que como tal, siempre tiene una dimensión de 1.
Arco voltaico	Descarga eléctrica que se forma entre dos electrodos sometidos a una diferencia de potencial y colocados en el seno de una atmósfera gaseosa enrarecida.
Armónicas	Frecuencias múltiplos de la frecuencia fundamental de trabajo del sistema y cuya amplitud va decreciendo conforme aumenta el múltiplo.
Balastro	Equipo que sirve para mantener estable y limitar un flujo de corriente para lámparas.
Bobina	Componente pasivo de un circuito eléctrico que, debido al fenómeno de la autoinducción, almacena energía en forma de campo magnético.

Capacitor	Es un dispositivo pasivo, utilizado en electricidad y electrónica, capaz de almacenar energía sustentando un campo eléctrico.
Conductividad eléctrica	Medida de la capacidad (o de la aptitud) de un material para dejar pasar (o dejar circular) libremente la corriente eléctrica.
Corriente alterna	Corriente en la que la magnitud y el sentido varían cíclicamente.
Corriente continua	Flujo continuo de carga eléctrica a través de un conductor entre dos puntos de distinto potencial, que no cambia de sentido con el tiempo.
Corriente eléctrica	Flujo de carga eléctrica por unidad de tiempo que recorre un material.
Curva fotométrica	Distribución de las intensidades luminosas emitidas por una lámpara.
Distorsión armónica	Se produce cuando la señal de salida de un sistema no equivale a la señal que entró en él.
Efecto estroboscópico	Destellos de iluminación que normalmente son producidos mediante una lámpara de descarga.
Espectro	Radiación electromagnética que emite (espectro de emisión) o absorbe (espectro de absorción) una sustancia.

FEMESA	Ferretería y materiales eléctricos sociedad anónima. Empresa ubicada en el municipio de Jutiapa donde se realizó la investigación de este trabajo.
Flujo luminoso	Medida de la potencia luminosa percibida.
Frecuencia	Magnitud que mide el número de repeticiones por unidad de tiempo de cualquier fenómeno o suceso periódico.
Fusible	Está constituido por un soporte adecuado, un filamento o lámina de un metal o aleación de bajo punto de fusión que se intercala en un punto determinado de una instalación eléctrica para que se funda.
Grado de protección	Estándar que ha sido desarrollado para calificar de una manera alfa-numérica a equipamientos en función del nivel de protección que sus materiales contenedores le proporcionan contra la entrada de materiales extraños.
Impedancia	Medida de oposición que presenta un circuito a una corriente cuando se aplica un voltaje.

Índice de color	Es una medida de la capacidad que una fuente luminosa tiene para reproducir fielmente los colores de varios objetos en comparación con una fuente de luz natural o ideal.
Inductancia	Medida de la oposición a un cambio de corriente de un inductor o bobina que almacena energía en presencia de un campo magnético
Interruptor termo magnético	Dispositivo capaz de interrumpir la corriente eléctrica de un circuito cuando esta sobrepasa ciertos valores máximos
Ionización	Fenómeno químico o físico mediante el cual se producen iones, estos son átomos o moléculas cargadas eléctricamente debido al exceso o falta de electrones respecto a un átomo o molécula neutra.
Relé	Funciona como un interruptor controlado por un circuito eléctrico en el que, por medio de una bobina y un electroimán, se acciona un juego de uno o varios contactos que permiten abrir o cerrar otros circuitos eléctricos independientes.
Resistencia	Igualdad de oposición que tienen los electrones al desplazarse a través de un conductor.

Resonancia (eléctrica)	Fenómeno que se produce en un circuito en el que existen elementos reactivos (bobinas y condensadores) cuando es recorrido por una corriente alterna de una frecuencia tal que hace que la reactancia se anule.
Saturación (magnetismo)	Efecto que se observa en algunos materiales magnéticos, y se caracteriza como el estado alcanzado cuando cualquier incremento posterior en un campo de magnetización externo no provoca un aumento en la magnetización del material.
Sistema por unidad (p.u.)	Relación entre una cantidad y la cantidad base y se expresa como un decimal.
Temperatura del color	Comparación del color de una fuente de luz dentro del espectro luminoso con el de la luz que emitiría un cuerpo negro calentado a una temperatura determinada.
Transformador	Dispositivo eléctrico que permite aumentar o disminuir la tensión en un circuito eléctrico de corriente alterna, manteniendo la potencia.
Voltaje (tensión)	Magnitud física que cuantifica la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos.

RESUMEN

El presente trabajo de graduación es un estudio técnico económico de la eficiencia energética del sistema de alumbrado público de la cabecera municipal de Oratorio, departamento de Santa Rosa.

En el primer capítulo se estudió el funcionamiento y especificaciones de las lámparas que son utilizadas en el sistema de alumbrado público municipal, con el objetivo de que los consejos municipales puedan ver qué tipo de tecnología de lámparas de alumbrado público están utilizando en los municipios.

En el segundo capítulo se analizó la calidad de la potencia eléctrica y la relación con sistemas de alumbrado público, con el propósito de interpretar los temas de distorsión armónica, *flicker*, regulación de voltaje, transitorios, *sag* y *swell*.

En el tercer capítulo se desarrolló un estudio técnico de las lámparas a utilizar, en donde se realizó una serie de mediciones de voltaje, corriente, y potencia eléctrica de tres tipos de lámparas de alumbrado público distintas, se efectuó un cálculo para determinar las distancias entre lámparas para ofrecerle a la población un buen nivel de iluminación y una guía de operación y mantenimiento del sistema de alumbrado público.

En el cuarto capítulo se elaboró un análisis económico en donde se calculó el costo mensual de usar los diferentes tipos de lámparas, el tiempo

en recuperar la inversión de lámparas de vapor de mercurio a lámparas fluorescentes y LED, el VPN y la TIR de las lámparas fluorescentes y LED.

OBJETIVOS

General

Presentar el estudio técnico económico de la eficiencia energética del sistema de alumbrado público de la cabecera municipal de Oratorio, Santa Rosa.

Específicos

1. Mostrar el funcionamiento y especificaciones de lámparas que son utilizadas en sistemas de alumbrado público municipal.
2. Presentar los fundamentos de la calidad de la potencia eléctrica y la relación con sistemas de alumbrado público.
3. Realizar un estudio técnico de las lámparas a utilizar en el proyecto.
4. Realizar un análisis económico del proyecto.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de graduación es un estudio técnico económico de la eficiencia energética del sistema de alumbrado público de la cabecera municipal de Oratorio, Santa Rosa. La eficiencia energética es una práctica que tiene como objeto reducir el consumo de energía.

El tema de la eficiencia energética del alumbrado público es muy importante para las corporaciones municipales del país, ya que tiene una relación directa con el cobro de la tasa de alumbrado público municipal la cual paga la población que tiene el servicio de energía eléctrica y, que los usuarios de escasos recursos en la mayoría de municipios, paga más en la tasa de alumbrado público municipal que en consumo energético del domicilio.

En estos últimos años varias municipalidades del departamento de Santa Rosa han decidido cambiar las lámparas de vapor de mercurio por lámparas fluorescentes en los sistemas de alumbrado público. El presidente de la Asociación Nacional de Municipalidades de la República de Guatemala solicitó a la Coordinación del Área de Potencia de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, un estudio técnico y económico de la eficiencia energética de un sistema de alumbrado público municipal para que permita a dicha Asociación proponerlo a nivel nacional.

El objetivo de este trabajo de graduación es mostrar a las corporaciones municipales como cambiando las lámparas de vapor de mercurio por lámparas fluorescentes u otras tecnologías, tendrán ahorros en

el pago de la factura de consumo de energía eléctrica en alumbrado municipal y que también podrán reflejar este ahorro a la población, fijando una tasa de alumbrado público menor a la actual, tomando en cuenta que las lámparas fluorescentes poseen un período de mantenimiento más corto que las lámparas de vapor de mercurio.

En este trabajo de graduación se analizan los sistemas de protección eléctrica para los sistemas de alumbrado público, para que las corporaciones municipales inviertan lo necesario en la capacitación de los elementos del Departamento de Electricistas, asimismo, que ellos conozcan los diferentes tipos de protección eléctrica que existen en el mercado a fin de alargar el período de mantenimiento de las lámparas fluorescentes o de otras tecnologías.

1. FUNCIONAMIENTO Y ESPECIFICACIONES DE LÁMPARAS QUE SON UTILIZADAS EN SISTEMAS DE ALUMBRADO PÚBLICO MUNICIPAL

En este capítulo se describe el funcionamiento y las especificaciones de las lámparas de: vapor de mercurio, haluro metálico, vapor de sodio a alta presión (SAP), fluorescente, LED e inducción. Es importante saber además de las especificaciones, que la temperatura promedio según los isotermas de temperatura de promedio anual del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología del municipio de Oratorio del departamento de Santa Rosa es de 25 °C, este dato es importante para que se tome en cuenta, ya que los fabricantes de lámparas diseñan las mismas para que funcionen en un rango determinado de temperaturas.

1.1. Lámparas de vapor de mercurio

Las lámparas de vapor de mercurio de alta presión están formadas de un tubo de descarga de cuarzo relleno de vapor de mercurio, el cual posee dos electrodos principales y uno auxiliar para facilitar el arranque.

1.1.1. Funcionamiento

El funcionamiento de las lámparas de vapor de mercurio, está basado en el mismo principio de las lámparas fluorescentes, solo que en este caso, el rendimiento luminoso oscila los 60 lm/W por la mayor presión en el tubo de descarga. La lámpara está fabricada por una ampolla interior de cuarzo, ya que por el elevado punto de fusión, es capaz de tolerar la temperatura del

arco de descarga. En los extremos del tubo de descarga están ubicados electrodos de wolframio impregnados por una sustancia que emite electrones y cercano a ellos hay un tercer electrodo auxiliar de encendido, conectado por medio de una resistencia de alto valor.

La ampolla exterior está elaborada de vidrio duro, resistente a la variación brusca de temperatura y se utiliza para asilar de forma térmica el tubo de cuarzo, también para poder proteger las partes de metal de la oxidación. En el interior está recubierta por una sustancia fluorescente es activada por la radiación ultravioleta que genera el mercurio, produce radiaciones rojizas. Estas últimas sumadas a las azuladas del arco enmiendan el color del conjunto dando luz blanca.

Al hacer la conexión de la lámpara por medio de un balastro se genera al inicio una descarga entre el electrodo principal y el electrodo de arranque, ya que estos se encuentran cerca. Esto proporciona la ionización del gas argón, haciéndolo conductor y fijando el arco entre los electrodos principales ya que ahora la corriente tiene un camino más conductor a través de estos dos, por lo cual se coloca el resistor de arranque de alto valor en serie al electrodo de arranque. El calor producido por la descarga vaporiza el mercurio en la parte interna del tubo ayudando a la conducción.

A medida que va creciendo la temperatura en el tubo de descarga, crece la presión, la potencia y el flujo luminoso producido hasta alcanzar los valores nominales de funcionamiento al finalizar aproximadamente 5 minutos. Al apagar la lámpara la gran presión interior no permite que se reencienda de forma instantánea, hasta que se enfría, se restablecen las condiciones iniciales. Las lámparas de vapor de mercurio proporcionan una característica de resistencia negativa, por lo que la energización debe

hacerse por medio de una impedancia que pueda controlar de una forma adecuada la corriente es decir un balastro.

1.1.2. Especificaciones

“Voltaje: 240 Voltios

Frecuencia: 60 Hz

Horas de vida: 10 000

Índice de color: 20

Temperatura del color: 3 500 K

Espectro: 404,7 nm – 579 nm

Grado de protección: IP 55

Sujeto a certificaciones de calidad:

- UL (Underwriters Laboratories)
- CE (de Conformidad Europea)
- ISO 9001:2000¹

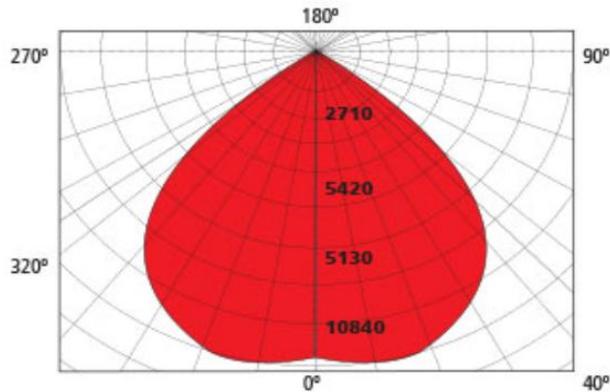
Efecto estroboscópico: sí tiene

Distorsión armónica: 15-20 %

¹http://www.ecoluxlite.com/home/index.php?option=com_virtuemart&view=productdetails&virtuemart_product_id=42&virtuemart_category_id=41&Itemid=510&lang=es.

Consulta: 24 de mayo de 2014.

Figura 1. **Curva fotométrica lámpara vapor de mercurio**



Fuente: www.ecoluxlite.com. Consulta: 11 de junio de 2014.

1.2. Lámparas de haluro metálico

Las lámparas de haluro metálico, también se les conoce como lámparas de aditivos metálicos, lámparas de halogenuros metálicos, lámparas de mercurio halogenado o METALARC. Son lámparas de descarga de alta presión, usualmente son de potencia alta y con una buena reproducción de colores.

1.2.1. Funcionamiento

Así como otras lámparas de descarga de gas eléctrica (las lámparas de haluro metálico), la luz se da cuando pasa un arco eléctrico por una mezcla de gases. En una lámpara de haluro metálico, el tubo compacto donde se genera el arco está compuesto por una mezcla de argón, mercurio y una variedad de haluros metálico. Las mezclas de haluros metálicos

inciden a la naturaleza de la luz que se genera, variando correlacionadamente la temperatura del color y la intensidad (por ejemplo, que la luz que se genere sea de color azul o roja). El gas argón tiende a ionizarse de forma fácil, dando así el paso al arco voltaico pulsante por dos electrodos cuando se le proporciona un cierto voltaje a la lámpara. El calor entregado por el arco eléctrico vaporiza el mercurio y los haluros metálicos proporcionando luz a medida que van aumentando la presión y la temperatura. Así como otras lámparas de descarga eléctrica, las lámparas de haluro metálico necesitan de un equipo auxiliar para entregar el voltaje apropiado, empezar el encendido y regular el flujo de electricidad y mantener la lámpara funcionando.²

1.2.2. Especificaciones

“Voltaje: 120V/ 208V/ 240V/277 V

Frecuencia: 60 Hz

Horas de vida: 10 000 horas

Índice de color: 90

Temperatura del color: 6 500 K

Grado de protección: IP 65

Certificaciones de calidad:

- UL (Underwriters Laboratories)
- CE (de Conformidad Europea)

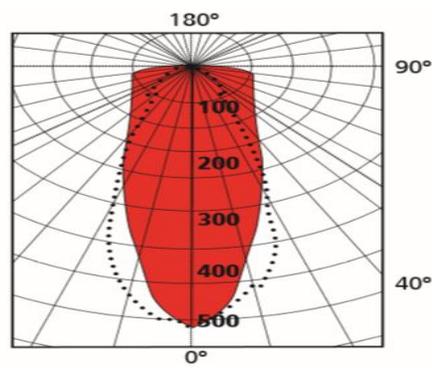
²http://es.wikipedia.org/wiki/L%C3%A1mpara_de_haluro_met%C3%A1lico. Consulta: 24 de mayo de 2014

- ISO 9001:2000³

Efecto estroboscópico: sí tiene

Distorsión armónica: 15-20 %

Figura 2. **Curva fotométrica de lámpara de haluro metálico**



Fuente: www.ecoluxlite.com. Consulta: 11 de junio de 2014.

1.3. **Lámparas de vapor de sodio a alta presión (SAP)**

La lámpara de vapor de sodio a alta presión es una de las más usadas en el alumbrado público, ya que entrega una reproducción de los colores considerablemente mejor que la lámpara de sodio a baja presión, aunque no tanto como para que se ilumine algo que requiere una excelente reproducción cromática.

³http://www.ecoluxlite.com/home/index.php?option=com_virtuemart&view=productdetails&virtuemart_product_id=42&virtuemart_category_id=41&Itemid=510&lang=es. Consulta: 24 de mayo de 2014.

1.3.1. Funcionamiento

El principio de operación de las lámparas de descarga de alta presión se diferencia de las incandescentes comunes. La luz se genera por medio de una descarga de gas, que empieza en un tubo de arco entre 2 electrodos, después del encendido. La conductividad eléctrica está establecida mediante componentes de llenado ionizados. Los electrodos se energizan en un tubo de descarga que está sellado totalmente.

Cuando se está descargando el gas, los aditivos (haluros metálicos) y el mercurio se excitan por el flujo de la corriente y generan la energía de excitación en forma de la radiación característica. La mezcla de las distintas partes de radiación da la temperatura del color y las propiedades de reproducción que se desean. El mercurio se vaporiza por completo en el estado de operación. La mayoría de las lámparas de descarga necesitan un equipo de conexión para ponerlas a funcionar y limitar la corriente.

1.3.2. Especificaciones

“Voltaje: 220/240 V

Frecuencia: 60 Hz

Horas de vida: 10 000

Índice de color: 21

Temperatura del color: 2 500 K

Espectro: 555 nm

Grado de protección: IP 65

Certificaciones de calidad:

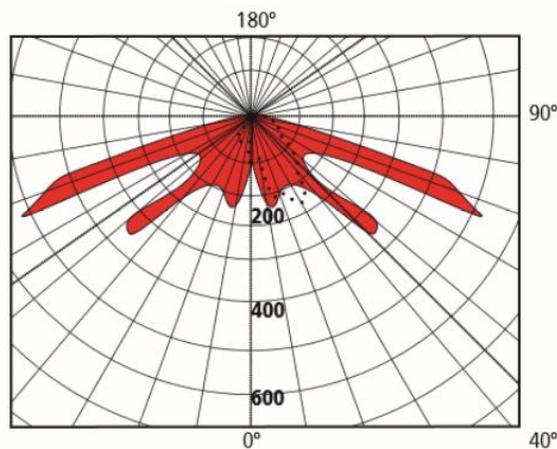
- UL (Underwriters Laboratories)
- CE (de Conformidad Europea)

- ISO 9001:2000⁴

Efecto estroboscópico: sí tiene

Distorsión armónica: 15-20 %

Figura 3. **Curva fotométrica lámpara de vapor de sodio**



Fuente: www.ecoluxlite.com. Consulta: 11 de junio de 2014.

1.4. Lámparas fluorescentes

Se conoce luminaria fluorescente, al conjunto que forman un tubo fluorescente y una armadura que tiene los accesorios necesarios para el funcionamiento. En algunos lugares se le conoce como luminaria o solamente lámpara.

⁴http://www.ecoluxlite.com/home/index.php?option=com_virtuemart&view=productdetails&virtuemart_product_id=42&virtuemart_category_id=41&Itemid=510&lang=es. Consulta: 24 de mayo de 2014

1.4.1. Funcionamiento

Todas las lámparas fluorescentes tienen dos partes principales: el cebador y el balastro. El cebador está formado por una ampolla pequeña de vidrio dentro de la que están los gases de mercurio, neón y argón a baja presión. El balastro tiene como función proporcionar reactancia inductiva, básicamente está formado de una bobina que está elaborada por alambre de cobre con esmalte.

Cuando se aplica voltaje a la lámpara se genera la ionización de los gases para que la temperatura aumente. Esto da como resultado que se cierre el circuito y pone al rojo vivo los filamentos que están ubicados en los extremos del tubo. Cuando los filamentos se calientan desprenden electrones ionizando los gases que están dentro del tubo y da como resultado un plasma conductor de electricidad. La función del plasma es la de que los átomos de vapor de mercurio se exciten, estos emiten luz ultravioleta y luz visible una vez que salen del estado de excitación.

1.4.2. Especificaciones

"Voltaje: 220/240 V

Frecuencia: 60 Hz

Horas de vida: 8 000

Índice de color: 20

Temperatura del color: 6 400 K

Certificaciones de calidad:

- UL (Underwriters Laboratories)
- CE (de Conformidad Europea)

- ISO 9001:2000

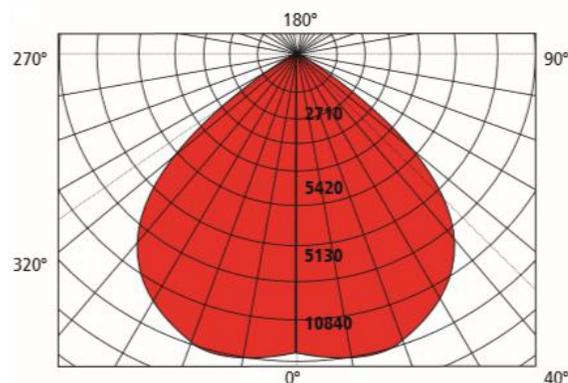
Grado de protección: IP 55

Espectro: 253,7 nm ⁵

Efecto estroboscópico: sí tiene

Distorsión armónica: Menos de 10 % hasta más del 40 %

Figura 4. **Curva fotométrica de lámpara fluorescente**



Fuente: www.ecoluxlite.com. Consulta: 11 de junio de 2014.

1.5. Lámparas LED

Una lámpara led es una lámpara de estado sólido que usa diodos emisores de luz como fuente luminosa, debido a que la luz capaz de dar un diodo emisor de luz no es muy intensa, para alcanzar la intensidad luminosa

⁵http://www.ecoluxlite.com/home/index.php?option=com_virtuemart&view=productdetails&virtuemart_product_id=42&virtuemart_category_id=41&Itemid=510&lang=es. Consulta: 24 de mayo de 2014

similar a las otras lámparas existentes como las lámparas fluorescentes o incandescentes, las lámparas LED están formadas por agrupaciones de led, en mayor o menor número, dependiendo de la intensidad luminosa deseada.

1.5.1. Funcionamiento

Los diodos de estas lámparas funcionan con energía eléctrica de corriente continua (CC), así que las LED tienen que incluir circuitos internos para que operen desde el voltaje de corriente alterna. Los ledes se arruinan a altas temperaturas, por lo que estas poseen componentes de gestión del calor, tales como disipadores y aletas de refrigeración. Las lámparas LED poseen una larga vida útil y una eficiencia energética grande, pero la inversión que se hace al adquirirlas es más alta que de la de las lámparas fluorescentes ⁶

1.5.2. Especificaciones

"Voltaje: 90/277 V

Frecuencia: 60 Hz

Horas de vida: 50 000

Temperatura de color: 6 500

Espectro: 450 nm

Certificaciones de calidad

- UL (Underwriters Laboratories)
- CE (de Conformidad Europea)

⁶http://es.wikipedia.org/wiki/L%C3%A1mpara_LED. Consulta: 24 de mayo de 2014

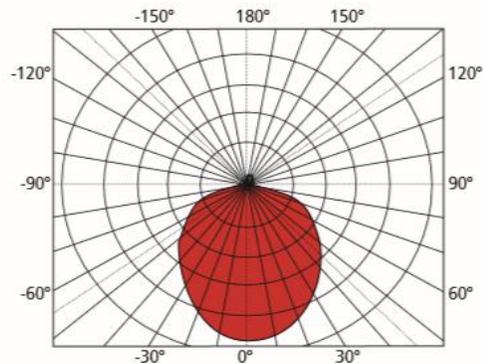
- ISO 9001:2000⁷

Efecto estroboscópico: sí tiene

1.6. Lámparas de inducción

La tecnología de la lámpara de inducción no es nada nuevo. Esencialmente, una lámpara de inducción es una fluorescente sin electrodos. Al no tener los electrodos, funciona bajo los principios básicos de la inducción magnética y la descarga eléctrica en gas para crear luz. La eliminación de los electrodos y filamentos dan por resultado una lámpara con una prolongada vida.

Figura 5. **Curva fotométrica de lámpara LED**



Fuente: www.luxlite.com. Consulta: 11 de junio de 2014.

⁷http://www.ecoluxlite.com/home/index.php?option=com_virtuemart&view=productdetails&virtuemart_product_id=42&virtuemart_category_id=41&Itemid=510&lang=es.
Consulta: 24 de mayo de 2014

1.6.1. Funcionamiento

El funcionamiento de la lámpara de inducción está basado en la descarga de un gas a baja presión, no tiene electrodos para que produzca la ionización, estos se sustituyen por una bobina de inducción que no tiene filamentos y una antena acopladora (cuya potencia viene de un generador externo de alta frecuencia). Estos dos elementos crean un campo electromagnético que ingresa la corriente eléctrica en el gas, generando la ionización.⁸

1.6.2. Especificaciones

"Voltaje: 230 V

Frecuencia: 60 Hz

Horas de vida: 100 000

Temperatura del color: 5 000 K

Espectro: 575 nm

Certificaciones de calidad: CE (de Conformidad Europea)

Grado de protección: IP 65⁹

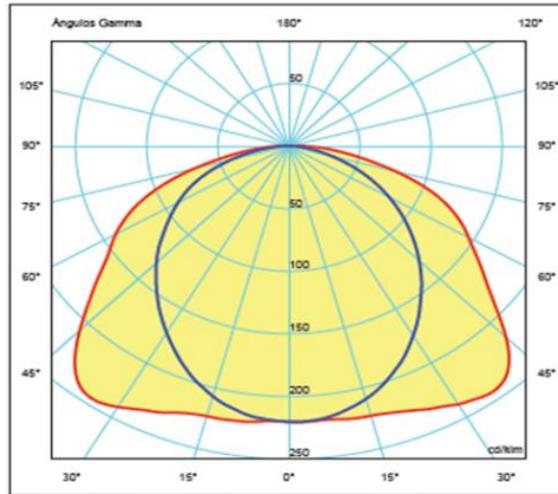
Efecto estroboscópico: no tiene

Distorsión armónica: Menor al 10 %

⁸http://es.wikipedia.org/wiki/L%C3%A1mpara_de_inducci%C3%B3n. Consulta:24 de mayo de 2014

⁹http://www.silumin.es/2012/folleto_catalogos/folletoinduccin.pdf. Consulta 24 de mayo de 2014

Figura 6. **Curva fotométrica de lámpara de inducción**



Fuente: www.silumin.es. Consulta: 11 de junio de 2014.

2. CALIDAD DE LA POTENCIA ELÉCTRICA Y LA RELACIÓN CON SISTEMAS DE ALUMBRADO PÚBLICO

2.1. Distorsión armónica

Se dice que existe una distorsión armónica cuando la onda sinusoidal, prácticamente pura, que producen las centrales eléctricas adquiere deformaciones en las redes de alimentación a los usuarios. Para poder cuantificar el grado de deformación de una onda de voltaje o corriente que no es sinusoidal pura (aunque si periódica con 60 Hz de frecuencia), se recurre al análisis frecuencial de la misma. Este se realiza normalmente por medio de la transformada rápida de Fourier, un algoritmo de cálculo que da los contenidos de las diversas ondas sinusoidales puras que integran la onda deformada. Estos contenidos se indican a:

- La componente fundamental de la onda (60 Hz de frecuencia).
- Las componentes de frecuencia armónicas (múltiplos de 60 Hz), que se les conoce con la denominación de armónicos de voltaje o de corriente. La presencia se debe limitar.

Los contenidos de los diversos armónicos de tensión que integran una onda deformada se expresan en forma de porcentaje respecto de la componente fundamental, mediante la siguiente relación:

$$U_n\% = \frac{U_n}{U_1} 100$$

En esta ecuación, U_n es la amplitud del armónico de tensión de orden n y U_1 la amplitud de la componente fundamental de la onda de tensión.

También se ha establecido una tasa de distorsión total que toma en cuenta de forma simultánea todos los armónicos de tensión existentes. La probabilidad de que no se sobrepase en el tiempo ha de ser como valor mínimo del 95 %. La tasa de distorsión total se expresa en forma de porcentaje respecto de la componente fundamental a partir de la siguiente ecuación, en la cual se tiene en cuenta hasta el armónico de orden 40:

$$TDH = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{40} U_i^2}}{U_1}$$

2.1.1. Causas que la originan

Se puede considerar, que la mayoría de veces, los equipos y elementos que forman parte de los sistemas de distribución de energía eléctrica son lineales. En otras palabras la característica de intensidad/tensión se mantiene de forma constante.

No obstante, hay algunos equipos que poseen características no lineales, es decir, cuya intensidad que demanda no es sinusoidal pura y por lo tanto es una onda deformada. Estos equipos producen armónicos a la red general de alimentación de energía eléctrica en el punto de conexión común (PCC). Las principales fuentes de corrientes armónicas son:

- Receptores de uso industrial, entre ellos cabe destacar:

- Los rectificadores: son los dispositivos mediante los cuales se realiza el proceso básico de conversión de la energía eléctrica, de corriente alterna a corriente continua.
- Los hornos de inducción y los hornos de arco: las alteraciones de la onda de tensión más notables de estos receptores son, las fluctuaciones de tensión, que en forma general producen *flicker*.
- Receptores de uso doméstico. No tienen una potencia unitaria elevada, pero en conjunto son una importante fuente de armónicos, ya que en gran número de ellos suelen ser usados en forma simultánea mediante largos períodos de tiempo. Destacan:
 - Los receptores de televisión: los aparatos que son controlados por elementos electrónicos (electrodomésticos, reguladores de luminosidad, etc.).
 - Las lámparas fluorescentes.
 - Las lámparas de descarga de vapor de sodio.
- Elementos de instalaciones eléctricas se pueden mencionar:
 - Los dispositivos electrónicos de mando y control que regulan la corriente que se absorbe: estos cortan el paso de esta en ciertos momentos, dando componentes armónicas en el sistema de alimentación.

- Los equipos que tienen núcleos magnéticos: cuando operan en situaciones de saturación, producen armónicos de tensión. Entre ellos están. Los transformadores de potencia que sufren situaciones de saturación cuando las tensiones que se aplican son más grandes que la nominal. Generan entonces armónicos de tensión, que la mayoría de veces, son de orden impar.

Es importante saber que los armónicos de tensión de una red pueden verse de forma amplificada, incluso en lugares alejados de la carga perturbadora que los genera, si se dan condiciones de resonancia. Estas pueden iniciar en un punto determinado de la red, cuando son conectados los capacitores para la corrección del factor de potencia.

2.1.2. Efectos que produce

La magnitud de los problemas que producen las tensiones armónicas en los equipos que se instalan en un determinado entorno electromagnético está en función del valor de las tasas de las componentes armónicas, (es decir, del grado de deformación que tiene la onda) y de la sensibilidad de dichos equipos a este tipo de perturbaciones. En cualquier caso, la incidencia de la distorsión armónica producida por un receptor perturbador será menor cuanto mayor sea la potencia de corto circuito en el punto de conexión común. Entre los equipos que son sensibles a los efectos de este tipo de perturbaciones, se tienen:

- Los capacitores: registran pérdidas adicionales y calentamientos que son capaces de ocasionar un deterioro notable.
- Los fusibles de protección: pueden sufrir procesos de calentamiento o, incluso fusión en situaciones de intensidad normal.

- Los cables: los armónicos de alta frecuencia producen fallos en el aislamiento, gradiente de tensión altos y efecto corona.
- Los balastos inductivos que se utilizan en el alumbrado con lámparas fluorescentes o con lámparas de descarga. El circuito resonante formado por la inductancia de los mismos y por la capacidad que está instalada en el sistema de alumbrado produce una amplificación de armónicos que da, a la vez, un aumento de calor que es capaz de producir fallos de forma prematura en estos dispositivos.
- Los relés de protección. Algunas veces, pueden funcionar de manera intempestiva – es decir, sin que haya falla- como producto del valor de la cresta de la onda resultante o del desfase respecto el paso por cero.
- Los equipos que están fabricados para usar la onda de tensión de la forma más pura posible. Así como los que se emplean en los sistemas de comunicaciones, manipulación de datos, control de procesos electrónicos, etc. Las fuentes de alimentación eléctrica están enfocadas de manera que no den lugar a la producción de armónicos hasta un determinado nivel. No obstante, si este es superado se pueden generar pérdidas de datos o aparición de datos erróneos en los equipos de cómputo, operaciones que estén fuera de secuencia en máquinas, herramientas o robots controlados por computadora, etc.
- Los equipos de medida de inducción. La aparición de armónicos en la red produce en ellos pequeños errores de lectura, ya que usualmente están calibrados para una onda sinusoidal pura.
- Los sistemas de transmisión de señales por la red. Estos pueden verse afectados cuando existen componentes armónicas, cuya frecuencia es similar a la de corriente portadora.
- Las redes eléctricas: los armónicos incrementan las pérdidas por calentamiento, en especial en conductores neutros de baja tensión,

transformadores y motores degradando los aislamientos y volviendo más corta la vida útil.

2.2. Flicker

Se define como la impresión subjetiva de fluctuación de la luminancia, que es producida por una serie de variaciones de tensión, por la variación cíclica de la envolvente de la onda de tensión, produciendo a quien lo percibe una sensación desagradable. El *flicker* depende, fundamentalmente de la amplitud, frecuencia y duración de las fluctuaciones de tensión que lo originan. Estas oscilan entre los 0,5 HZ y los 30 HZ de frecuencia.

2.2.1. Causas que lo originan

Las fluctuaciones de tensión son producidas por los receptores conectados a la red, cuya demanda de potencia no se mantiene constante en el tiempo. En determinadas circunstancias y dependiendo el punto del punto de conexión, pueden dar lugar a *flicker*.

Los principales dispositivos perturbadores son del tipo industrial:

- Máquinas de soldadura por resistencia
- Molinos trituradores
- Ventiladores de minas
- Hornos de arco
- Plantas de soldadura por arco
- Compresores
- Laminadoras
- Máquinas herramientas

- Cargas controladas por impulsos

2.2.2. Efectos que producen

Las fluctuaciones de voltaje pueden dañar a gran cantidad de usuarios que reciben energía eléctrica de la misma red. Estas fluctuaciones de voltaje rara vez superan una amplitud a $\pm 10\%$, por lo que, gran cantidad de equipos no se ven afectados por ellas. El *flicker*, que no puede evitarse, es el efecto más perjudicial. Los dispositivos que generan mayor *flicker* son:

- Las lámparas de incandescencia y de descarga
- Los monitores y receptores de televisión

2.3. Regulación de voltaje

- Lámpara vapor de mercurio: 240 V
- Lámpara de haluro metálico: 120/208/240/277 V
- Lámpara de vapor de sodio a alta presión (SAP): 220/240 V
- Lámpara fluorescente: 220/240 V
- Lámpara LED: 90/277 V
- Lámpara de inducción: 230 V

2.4. Transitorios

Los transitorios son incrementos de voltaje y/o corriente con magnitudes de hasta miles de voltios y amperios que se transmiten por medio de los elementos de un sistema eléctrico en baja, media y alta tensión. Se pueden clasificar generalmente en los siguientes tipos: transitorio oscilatorio y transitorio impulsivo.

2.4.1. Transitorio oscilatorio

Es un cambio brusco que se da en la señal de voltaje y/o corriente que tiene valores de polaridad negativo y positivo. El transitorio oscilatorio se clasifica en:

Transitorio de baja frecuencia: sí el transitorio posee una frecuencia menor de 5 Kilo-hertz y con una duración de 0,3 milisegundos a 50 milisegundos.

- Transitorio de media frecuencia: sí el transitorio posee una frecuencia primaria entre 5 kilo-hertz y 500 kilo-hertz, con una duración de decenas de microsegundos.
- Transitorio de alta frecuencia: si el transitorio posee una frecuencia primaria mayor a 500 kilo-hertz y con una duración medida en microsegundos.

2.4.2. Transitorio impulsivo

Es un cambio brusco en la señal de corriente o voltaje y de polaridad unidireccional (negativo o positivo), posee una duración típica mayor que 0,1 milisegundos. La causa más común de transitorios impulsivos son las descargas eléctricas atmosféricas

2.5. Sag (depresiones) y swell (cresta)

El *sag* una disminución del valor de la tensión entre 0,9 y el 0,1 p.u. de la tensión normal y tiene una duración desde medio ciclo (8 ms o 10 ms) hasta algunos segundos. Y el *swell* es un incremento del valor eficaz de la

tensión entre el 1,1 y el 1,8 p.u. de la tensión de funcionamiento normal, con una duración de entre medio ciclo (8 ms o 10 ms) y algunos segundos.

2.5.1. Sag (depresiones)

Las depresiones de voltaje usualmente son asociadas a fallas del sistema, a la energización de grandes cargas, al arranque de motores de potencia elevada y a la energización de transformadores de potencia.

Los efectos nocivos de las depresiones de voltaje están en función de la duración y de la profundidad, estando en relación con la desconexión de PLC, equipos de cómputo y contactores entre otros dispositivos. También presenta efectos en la velocidad de los motores.

Existen distintas posibilidades para reducir los efectos de los sags. La primera consiste en estabilizar la señal de voltaje por medio de acondicionadores de red, los cuales existen con distintas tecnologías y principios.

2.5.2. Swell (cresta)

Como en el caso de las depresiones, las crestas están asociadas a fallas en el sistema, aunque no son tan usuales como las depresiones. Un caso típico es el aumento temporal del voltaje en las fallas que no tienen fallas durante una falla línea a tierra.

También pueden ser originadas por la desconexión de grandes cargas o la energización de grandes bancos de capacitores.

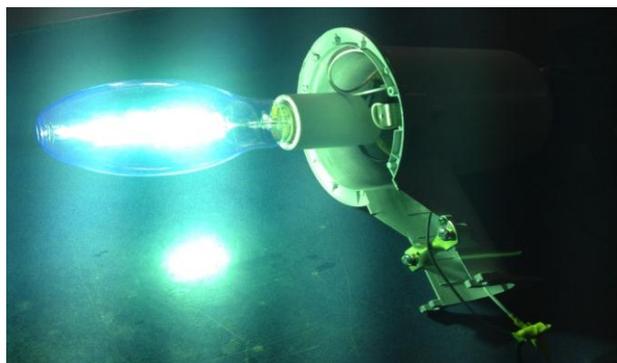
3. ESTUDIO TÉCNICO DE LAS LÁMPARAS A UTILIZAR EN EL PROYECTO

Este capítulo es un estudio técnico para que las municipalidades analicen la viabilidad del cambio de las lámparas de vapor de mercurio a lámparas fluorescentes o LED.

3.1. Análisis de la lámpara vapor de mercurio de 175 W

Este análisis se realizó utilizando una lámpara vapor de mercurio de la marca LUXLITE, en el momento cuando se realizaron las pruebas era de día, por lo que se usó una bolsa de plástico para tapar el sensor de la fotocelda con el objetivo de que se cerrara el circuito y poder hacer las mediciones de temperatura, voltaje y corriente.

Figura 7. **Lámpara vapor de mercurio de 175 W**

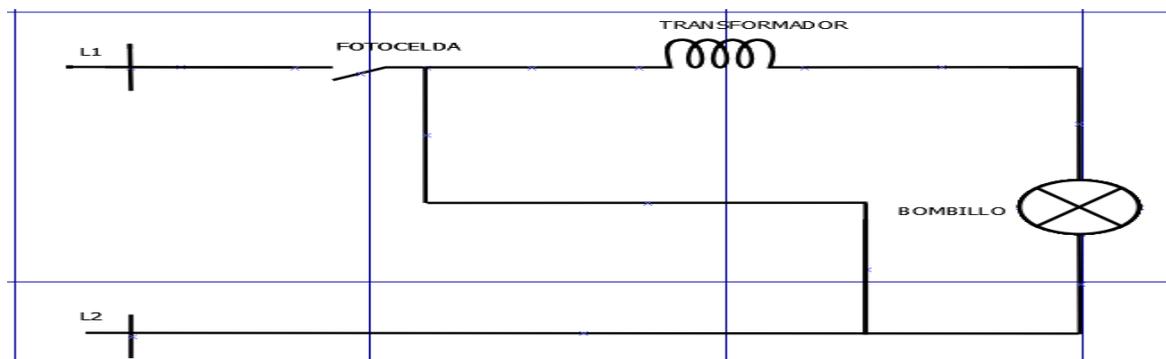


Fuente: empresa FEMESA.

3.1.1. Diagrama eléctrico de la lámpara vapor de mercurio de 175 W

El diagrama eléctrico muestra que el sensor de la fotocelda abre el circuito si es de día o lo cierra en la noche, la lámpara funcionará adecuadamente cuando la fotocelda, el transformador y el bombillo estén en buen estado.

Figura 8. Diagrama eléctrico de la lámpara vapor de mercurio de 175 W



Fuente: elaboración propia, con programa Dia.

3.1.2. Mediciones de corriente, tensiones y temperatura

En esta sección se realizaron las mediciones de corriente, tensión y temperatura con un multímetro digital de la marca FULGORE, se hicieron 10 veces para cada uno de los parámetros antes mencionados y después se hizo un promedio para dar un resultado final en este trabajo.

3.1.2.1. Medición de corriente

$I = 1.28 \text{ A}$

3.1.2.2. Medición de tensión

V de entrada= 230 voltios

3.1.2.3. Medición de temperatura

Temperatura exterior de lámpara apagada = 29 °C

Temperatura exterior de lámpara encendida = 147 °C

3.1.3. Potencia y flujo luminoso

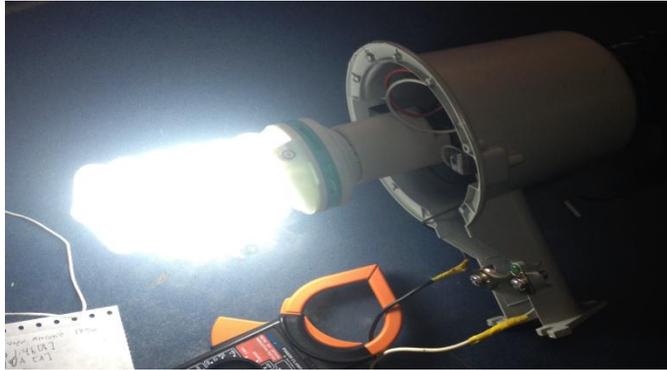
Potencia = 175 W

Flujo luminoso = 14 000 lúmenes

3.2. Análisis de la lámpara fluorescente con transformador

Este análisis se realizó utilizando una lámpara de vapor de mercurio de la marca LUXLITE y con una lámpara fluorescente de la marca LUXLITE, en el momento cuando se realizaron las pruebas era de día, por lo que se usó una bolsa de plástico para tapar el sensor de la fotocelda con el objetivo de que se cerrara el circuito y poder hacer las mediciones de temperatura, voltaje y corriente.

Figura 9. **Lámpara fluorescente con transformador**

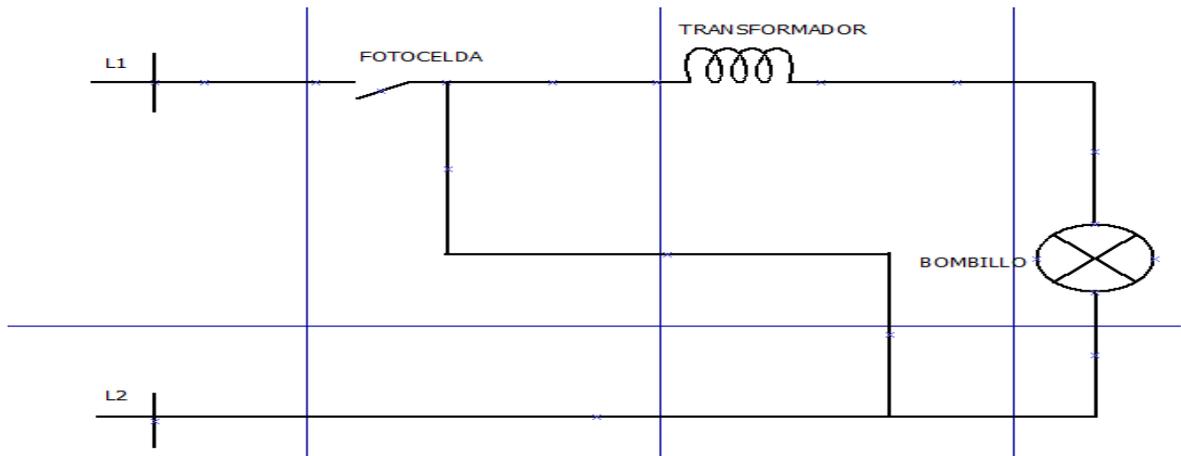


Fuente: empresa FEMESA.

3.2.1. Diagrama eléctrico de la lámpara fluorescente con transformador

El diagrama eléctrico muestra que el sensor de la fotocelda abre el circuito si es de día o cierra en la noche, la lámpara funcionará adecuadamente cuando la fotocelda, el transformador y el bombillo estén en buen estado.

Figura. 10 **Diagrama eléctrico de la lámpara fluorescente con transformador**



Fuente: elaboración propia, con programa Dia.

Se debe evitar usar esta conexión, ya que el transformador no es necesario para el funcionamiento de la lámpara y lo único que aumenta el transformador es el consumo de energía en 8,8 watts por lámpara, que reflejado en dinero es:

Costo de usar la lámpara con transformador por mes [quetzales]

= P[K Watts] * tiempo de trabajo de la lámpara al mes [horas]

* Costo de la energía $\left[\frac{Q}{\text{K Watt} * \text{hora}} \right]$

* número de lámparas del municipio [adimensional]

Donde:

$$P[\text{K Watts}] = 0,0088$$

$$\text{tiempo de trabajo de la lámpara al mes [horas]} = 360$$

$$\text{Costo de la energía} \left[\frac{Q}{\text{K Watt} * \text{hora}} \right] = 1.93$$

número de lámparas del municipio = 500

Costo de usar la lámpara con transformador por mes es igual a $0,0088 * 360 * 1,93 * 500 = \text{Q. } 3\,057,12$.

3.2.2. Mediciones de corriente, tensión y temperatura

En esta sección se realizaron las mediciones de corriente, tensión y temperatura con un multímetro digital de la marca FULGORE, las mediciones se hicieron 10 veces para cada uno de los parámetros antes mencionados y después se hizo un promedio para dar un resultado final en este trabajo.

3.2.2.1. Medición de corriente

$$I = 0,22 \text{ A}$$

3.2.2.2. Medición de tensión

$$V = 228 \text{ voltios}$$

3.2.2.3. Medición de temperatura

Temperatura exterior de la lámpara apagada = 28 °C

Temperatura exterior de la lámpara encendida = 64 °C

3.2.3. Potencia y flujo luminoso

Potencia = 105 W

Flujo luminoso = 6 300 lúmenes

3.3. Análisis de la lámpara fluorescente sin transformador

Este análisis se realizó utilizando una lámpara vapor de mercurio de la marca LUXLITE y con una lámpara fluorescente de la marca LUXLITE, en el momento cuando se realizaron las pruebas era de día, por lo que se usó una bolsa de plástico para tapar el sensor de la fotocelda con el objetivo de que se cerrara el circuito y poder hacer las mediciones de temperatura, voltaje y corriente.

Figura 11. Lámpara fluorescente sin transformador

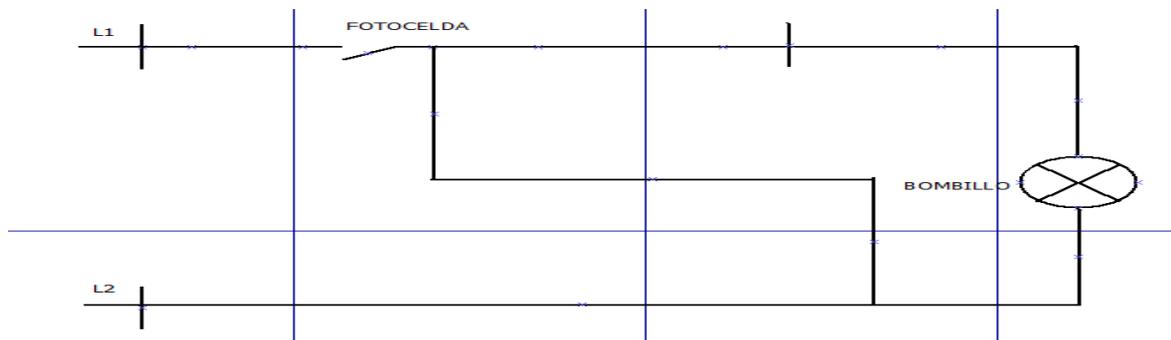


Fuente: empresa FEMESA.

3.3.1. Diagrama eléctrico de la lámpara fluorescente sin transformador

El diagrama eléctrico muestra que el sensor de la fotocelda abre el circuito si es de día o cierra en la noche, la lámpara funcionará adecuadamente cuando la fotocelda y el bombillo estén en buen estado.

Figura 12. Diagrama eléctrico de la lámpara fluorescente sin transformador



Fuente: elaboración propia, con programa Dia.

3.3.2. Mediciones de corriente, tensión y temperatura

En esta sección se realizaron las mediciones de corriente, tensión y temperatura con un multímetro digital de la marca FULGORE, las mediciones se hicieron 10 veces para cada uno de los parámetros antes mencionados y después se hizo un promedio para dar un resultado final en este trabajo.

3.3.2.1. Medición de corriente

$I = 0,18 \text{ A}$

3.3.2.2. Medición de tensión

$V = 228 \text{ voltios}$

3.3.2.3. Medición de temperatura

Temperatura exterior de la lámpara apagada = $27 \text{ }^\circ\text{C}$

Temperatura exterior de la lámpara encendida = $64 \text{ }^\circ\text{C}$

3.3.3. Potencia y flujo luminoso

Potencia = 105 W

Flujo luminoso = $6\,300 \text{ lúmenes}$

3.4. Análisis de la lámpara LED con transformador

Este análisis se realizó utilizando una lámpara vapor de mercurio de la marca LUXLITE y con una lámpara LED de la marca LUXLITE, en el momento cuando se realizaron las pruebas era de día, por lo que se usó una bolsa de plástico para tapar el sensor de la fotocelda con el objetivo de que se cerrara el circuito y poder hacer las mediciones de temperatura, voltaje y corriente.

Figura 13. **Lámpara LED con transformador**

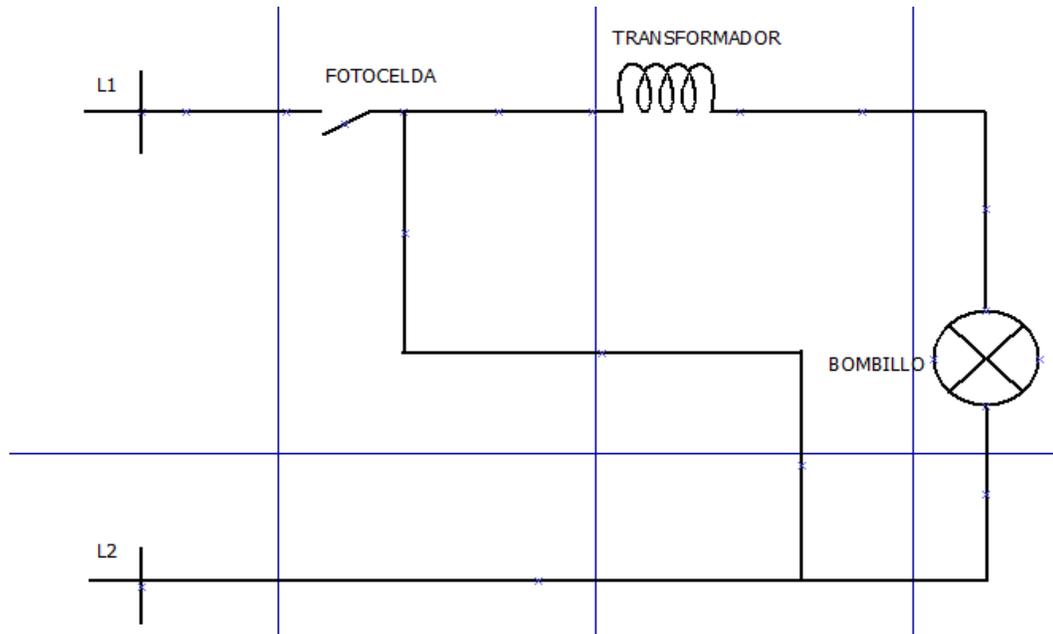


Fuente: empresa FEMESA

3.4.1. Diagrama eléctrico de la lámpara LED con transformador

El diagrama eléctrico muestra que el sensor de la fotocelda abre el circuito si es de día o cierra en la noche, la lámpara funcionará adecuadamente cuando la fotocelda, el transformador y el bombillo estén en buen estado.

Figura 14. **Diagrama eléctrico de la lámpara LED con transformador**



Fuente: elaboración propia, con programa Dia.

Se debe evitar usar esta conexión, ya que el transformador no es necesario para el funcionamiento de la lámpara, pero sí en determinado caso se usa esta conexión, el consumo de energía de la lámpara LED con transformador será igual al de la lámpara LED sin transformador.

3.4.2. Mediciones de corriente, tensión y temperatura

En esta sección se realizaron las mediciones de corriente, tensión y temperatura con un multímetro digital de la marca FULGORE, las mediciones se hicieron 10 veces para cada uno de los parámetros antes mencionados y después se hizo un promedio para dar un resultado final en este trabajo.

3.4.2.1. Medición de corriente

$I = 0,06 \text{ A}$

3.4.2.2. Medición de tensión

$V = 234 \text{ voltios}$

3.4.2.3. Medición de temperatura

Temperatura exterior de la lámpara apagada= 27 °C

Temperatura exterior de la lámpara encendida= 33 °C

Temperatura exterior del disipador con la lámpara encendida= 47 °C

3.4.3. Potencia y flujo luminoso

Potencia = 20 watts (con autotransformador de 85-265 VAC)

Flujo luminoso = 1 500 lúmenes

3.5. Análisis de la lámpara LED sin transformador

Este análisis se realizó utilizando una lámpara vapor de mercurio de la marca LUXLITE y con una lámpara LED de la marca LUXLITE, en el momento cuando se realizaron las pruebas era de día, por lo que se usó una bolsa de plástico para tapar el sensor de la fotocelda con el objetivo de que se cerrara el circuito y poder hacer las mediciones de temperatura, voltaje y corriente.

Figura 15. **Lámpara LED sin transformador**

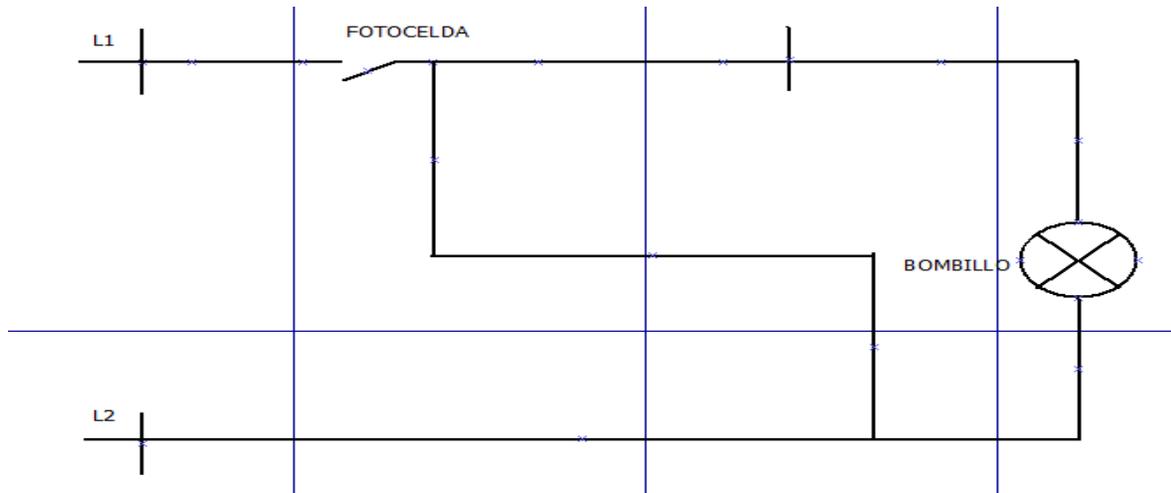


Fuente: empresa FEMESA.

3.5.1. Diagrama eléctrico de la lámpara LED sin transformador

El diagrama eléctrico muestra que el sensor de la fotocelda abre el circuito si es de día o cierra en la noche, la lámpara funcionará adecuadamente cuando la fotocelda y el bombillo estén en buen estado.

Figura 16. **Diagrama eléctrico de la lámpara LED sin transformador**



Fuente: elaboración propia, con programa Dia.

3.5.2. Mediciones de corriente, tensión y temperatura

En esta sección se realizaron las mediciones de corriente, tensión y temperatura con un multímetro digital de la marca FULGORE, las mediciones se hicieron 10 veces para cada uno de los parámetros antes mencionados y después se hizo un promedio para dar un resultado final en este trabajo.

3.5.2.1. Medición de corriente

$$I = 0,06 \text{ A}$$

3.5.2.2. Medición de tensión

$$V = 234 \text{ voltios}$$

3.5.2.3. Medición de temperatura

Temperatura exterior de la lámpara apagada= 27 °C

Temperatura exterior de la lámpara encendida= 33 °C

Temperatura exterior del disipador con la lámpara encendida= 47 °C

3.5.3. Potencia y flujo luminoso

Potencia = 20 watts (con autotransformador de 85-265 VAC)

Flujo luminoso= 1 500 lúmenes

3.6. Nivel de iluminación de calles

En esta sección se analizarán la altura de ubicación de la lámparas, el nivel de iluminación de calles y la distancia entre luminarias utilizando las lámparas de: vapor de mercurio, fluorescentes y LED.

3.6.1. Altura de ubicación de lámparas

Para poder calcular la altura de ubicación de lámparas es necesario tomar en cuenta factores como el nivel iluminación que se quiere o la uniformidad necesaria. Para el cálculo se emplea el factor de altura R, que relaciona la altura del punto de luz con la anchura de la calle a iluminar:

$$R = \frac{\text{Altura del punto de luz}(h)}{\text{Anchura de la calle}(A)}$$

El valor que se recomienda de este factor varía en los valores de 0,85 a 1,00 cuando las lámparas están colocadas en forma unilateral.

Otra característica que determina la altura de la lámpara es la potencia de la misma, o su flujo luminoso característico. A continuación se muestra una tabla sancionada por la experiencia que ofrece una aproximación adecuada:

Tabla I. **Relación entre flujo luminoso y altura de la lámpara**

Flujo (Lm)	Altura (m)
3 000 a 9 000	6,5 a 7,5
9 000 a 19 000	7,5 a 9
Más de 19 000	Más de 9 m

Fuente: <http://www.sirio.ua.es>. Consulta: 12 de junio de 2014.

A pesar de estos métodos orientativos de cálculo, la selección de la altura de la lámpara debe realizarse en función de los niveles de iluminancia y uniformidad requeridos. Es importante recordar que a una altura mayor favorece una distribución más uniforme del flujo lumínico, aunque reduce el nivel de iluminación alcanzado en la superficie de la calle, evidentemente, alturas menores darán efectos totalmente opuestos.

3.6.2. Cálculo de distancia entre lámparas

Para el cálculo de la distancia entre lámparas se utilizó el método de los coeficientes de utilización, este método tiene como base la utilización del coeficiente de utilización (Cu), que define el porcentaje de luz que llega a la superficie que se desea. Este coeficiente, es dado por los fabricantes de luminarias, es función de la geometría y del diseño de la propia luminaria.

Una vez teniendo el dato del coeficiente de utilización es necesario minorarlo mediante el uso de dos tipos de factores relacionados a las luminarias. Factor de conservación (fc): cuantifica el grado de mantenimiento que tendrá la luminaria. Un mal mantenimiento-limpieza y conservación de luminarias provoca una disminución del rendimiento de la misma.

Factor de depreciación (fd): determina la progresiva disminución de la eficiencia del sistema por el incorrecto uso del mismo o al no reemplazar los elementos dañados o fundidos.

Una vez introducidas todas las variables, se obtiene la siguiente ecuación:

$$E = \frac{\Phi_{\text{util}}}{S} = \frac{\Phi \cdot Cu \cdot fc \cdot fd}{D \cdot A}$$

Donde

E = iluminancia media en lux

Φ = flujo de la lámpara en lúmenes

Cu = coeficiente de utilización de la luminaria

fc y fd son los coeficientes de conservación y depreciación

A = ancho de la vía

D = distancia entre lámparas

De la ecuación anterior se despeja la distancia entre lámparas y se tiene:

$$D = \frac{\Phi \cdot Cu \cdot fc \cdot fd}{E \cdot A}$$

3.6.2.1. Cálculo de distancia entre lámparas de vapor de mercurio

Se calculará la distancia entre lámparas de vapor de mercurio con las siguientes condiciones:

$$\Phi = 14\,000 \text{ [lúmenes]}$$

$$C_u = 0,42$$

$$F_c = 0,83$$

$$F_d = 0,79$$

$$E = 17 \text{ [luxes]}$$

$$A = 6 \text{ [metros]}$$

$$D = \frac{14\,000 \cdot 0,42 \cdot 0,83 \cdot 0,79}{17 \cdot 6} = 37,80 \text{ [metros]}$$

La distancia entre lámparas de vapor de mercurio debe ser de aproximadamente 38 metros para darle a la población un buen nivel de iluminación, en la actualidad en el interior del país la distancia entre lámparas es de aproximadamente 50 metros, por lo que se recomienda a las municipalidades mover las distancias entre lámparas de 50 metros a 38 metros para obtener un buen nivel de iluminación o dejar la distancia entre lámparas a 50 metros sabiendo que van a castigar el nivel de iluminación de las calles.

3.6.2.2. Cálculo de distancia entre lámparas fluorescentes

Se calculó la distancia entre lámparas fluorescentes con las siguientes condiciones:

$$\Phi = 4\,200 \text{ [lúmenes]}$$

$$C_u = 0,42$$

$$F_c = 0,83$$

$$F_d = 0,79$$

$$E = 17 \text{ [luxes]}$$

$$A = 6 \text{ [metros]}$$

$$D = \frac{4\,200 \cdot 0,42 \cdot 0,83 \cdot 0,79}{17 \cdot 6} = 11,34 \text{ [metros]}$$

La distancia entre lámparas fluorescentes debe ser de aproximadamente 12 metros para darle a la población un nivel de iluminación adecuado, en la actualidad en el interior del país la distancia entre lámparas es de aproximadamente 50 metros, por lo que se recomienda a las municipalidades mover las distancias entre lámparas de 50 metros a 12 metros para obtener un buen nivel de iluminación o dejar la distancia entre lámparas a 50 metros sabiendo que van a castigar el nivel de iluminación de las calles.

3.6.2.3. Cálculo de distancia entre lámparas LED

Se calculó la distancia entre lámparas fluorescentes con las siguientes condiciones:

$$\Phi = 1\,000 \text{ [lúmenes]}$$

$$C_u = 0,42$$

$$F_c = 0,83$$

$$F_d = 0,79$$

$$E = 17 \text{ [luxes]}$$

$$A = 6 \text{ [metros]}$$

$$D = \frac{1\,000 \cdot 0,42 \cdot 0,83 \cdot 0,79}{17 \cdot 6} = 2,70 \text{ [metros]}$$

La distancia entre lámparas LED debe ser aproximadamente 3 metros para darle a la población un buen nivel de iluminación, en la actualidad en el interior del país la distancia entre lámparas es aproximadamente de 50 metros, por lo que se recomienda a las municipalidades mover las distancias entre lámparas de 50 metros a 3 metros para obtener un buen nivel de iluminación o dejar la distancia entre lámparas a 50 metros sabiendo que van a castigar el nivel de iluminación de las calles.

3.7. Operación y mantenimiento del sistema de alumbrado público

El conocimiento de la operación y mantenimiento del sistema de alumbrado público es importante para las municipalidades del país, ya que con esta información, los consejos municipales pueden crear una partida presupuestaria mensual, semestral o anual destinada a la operación y mantenimiento del sistema de alumbrado público de su municipio, en esta sección expondremos las descripciones de los siguientes dispositivos que conforman la lámpara de alumbrado público; interruptor termo magnético, transformador, fotocelda y lámpara.

Antes de exponer las descripciones de los dispositivos que conforman la lámpara de alumbrado público, se les recomienda a las municipalidades que dentro del equipo de trabajo cuenten con un Departamento de Operación y Mantenimiento del alumbrado público municipal conformado por un ingeniero electricista (para supervisión y elaboración de informes técnicos para el consejo municipal), peritos en electricidad o electricistas profesionales equipados con grúas, vehículos y herramientas adecuadas para realizar tareas de

mantenimiento del alumbrado público municipal, ya que en el mercado actualmente un electricista profesional está cobrando Q. 100,00 o más por cambiar un dispositivo defectuoso de una lámpara de alumbrado público

3.7.1. Interruptor termo magnético

Ya sea para la lámpara vapor de mercurio, fluorescente o LED, se recomienda usar un interruptor termo magnético de 2 X 15 amperios con un tablero de 2 polos de intemperie, este dispositivo protegerá a la lámpara de cortos circuitos y sobrecarga.

Actualmente, existen municipalidades en el interior del país que no invierten en el interruptor termo magnético y que instalan las lámparas sin este dispositivo de protección, la lámpara al funcionar sin este dispositivo de protección tendrá menor vida útil si se presentan cortos circuitos, sobrecargas, o descargas eléctricas atmosféricas (rayos).

3.7.2. Lámparas

Las lámparas de vapor de mercurio, fluorescentes y LED tienen un tiempo de vida útil, el cual es medido en horas. A continuación se presenta el tiempo de vida útil de estos tres tipos de lámparas:

Tabla II. **Tiempo de vida útil de las lámparas**

Lámpara	Tiempo de vida útil [horas]
Lámpara vapor de mercurio	10 000
Lámpara fluorescente	8 000
Lámpara LED	50 000

Fuente: www.ecoluxlite.com. Consulta: 12 de junio de 2014.

El tiempo de vida útil puede variar, ya sea por cortos circuitos, sobre cargas o descargas atmosféricas (rayos), es por eso que se recomienda a las municipalidades invertir en el sistema de protección (interruptor termo magnético) de lámparas para evitar que las tres condiciones antes descritas dañen la lámpara es evidente que hay que efectuar el remplazo de la lámpara cuando está en el transcurso de la noche no funcione, tomando en cuenta que la fotocelda, el sistema de protección y el transformador (en el caso de la lámpara de vapor de mercurio) estén en buen estado y que la lámpara este recibiendo el voltaje de operación (220 voltios).

3.7.3. Transformador

El transformador o balastro se utiliza únicamente en una lámpara de vapor de mercurio y es un dispositivo que controla la corriente que circula por la lámpara, la potencia de la lámpara y el voltaje de encendido. Un buen balastro hará posible que la lámpara opere satisfactoriamente y se obtenga de ella todo lo que es capaz de entregar.

Actualmente, el personal de los Departamentos de Mantenimiento y Operación del sistema de alumbrado público de las municipalidades realizan solo el cambio de lámparas de vapor de mercurio a fluorescentes o LED y no desconectan el transformador, ya que las lámparas fluorescentes o LED no necesitan para el funcionamiento el transformador, ya que este lo único que aumenta es el consumo de energía en 8,8 watts por lámpara

3.7.4. Fotocelda

Las fotoceldas son elementos de control automático. Esta abre o cierra el contacto dependiendo de la intensidad luminosa. Estando cerrado cuando esta oscuro y abierto en la claridad. El personal del Departamento de Operación y Mantenimiento del sistema de alumbrado público de las municipalidades deben realizar el cambio de las fotoceldas cuando noten que las lámparas de mercurio, fluorescente o LED estén encendidas cuando este de día (cuando se observe luz solar).

4. ANALISIS ECONÓMICO

En este capítulo se analizan las variables económicas con el objetivo que las municipalidades puedan observar cuál es la opción de las lámparas que generarán una reducción de costos en el pago del alumbrado público, y también ver el período de recuperación de inversión del cambio de las lámparas.

4.1. Ecuación de la potencia real

$$P = \frac{V [\text{Voltios}] * I_{\text{promedio}} [\text{Amperios}]}{1\,000} \quad [\text{K Watts}]$$

4.2. Ecuación del número de horas de trabajo de la lámpara

Se asume que el mes consta de 30 días y que la lámpara va a trabajar 12 horas diarias.

$$30 \text{ días} * \frac{12 \text{ horas}}{1 \text{ día}} = 360 \text{ horas de trabajo al mes}$$

4.3. Ecuación de cálculo de costo de la energía eléctrica de la lámpara

Costo [quetzales] = P[K Watts] * tiempo de trabajo de la lámpara al mes [horas] *

$$\text{costo de la energía} \left[\frac{\text{Q}}{\text{K Watt*hora}} \right] *$$

número de lámparas del municipio [adimensional] = ecuación (1)

4.3.1 Costo mensual de usar lámparas de vapor de mercurio

Usando la ecuación (1), donde

$$P[\text{K Watts}] = 0,2816$$

tiempo de trabajo de la lámpara al mes [horas]=360

$$\text{Costo de la energía} \left[\frac{Q}{\text{K Watt} * \text{hora}} \right] = 1,93$$

número de lámparas del municipio = 500

$$\text{Costo} = 0,2816 * 360 * 1,93 * 500 = \text{Q. } 97\,827,80$$

4.3.2. Costo mensual de usar lámparas fluorescentes con transformador

Usando la ecuación (1), donde

$$P[\text{K Watts}] = 0.0484$$

tiempo de trabajo de la lámpara al mes [horas]=360

$$\text{Costo de la energía} \left[\frac{Q}{\text{K Watt} * \text{hora}} \right] = 1,93$$

número de lámparas del municipio = 500

$$\text{Costo} = 0,0484 * 360 * 1,93 * 500 = \text{Q } 16\,814,20$$

4.3.3. Costo mensual de usar lámparas fluorescentes sin transformador

Usando la ecuación (1), donde

$$P[\text{K Watts}] = 0,0396$$

tiempo de trabajo de la lámpara al mes [horas]=360

$$\text{Costo de la energía} \left[\frac{Q}{\text{K Watt} * \text{hora}} \right] = 1,93$$

numero de lámparas del municipio = 500

$$\text{Costo} = 0,0396 * 360 * 1,93 * 500 = \text{Q}13\,757,00$$

4.3.4. Costo mensual de usar lámparas LED con transformador

Usando la ecuación (1), donde

$$P[\text{K Watts}] = 0,0132$$

tiempo de trabajo de la lámpara al mes [horas]=360

$$\text{Costo de la energía} \left[\frac{Q}{\text{K Watt} * \text{hora}} \right] = 1,93$$

número de lámparas del municipio = 500

$$\text{Costo} = 0,0132 * 360 * 1,93 * 500 = \text{Q}4\,585,68$$

4.3.5. Costo mensual de usar lámparas LED sin transformador

Usando la ecuación (1), donde

$$P[\text{K Watts}] = 0,0132$$

tiempo de trabajo de la lámpara al mes [horas]=360

$$\text{Costo de la energía} \left[\frac{Q}{\text{K Watt} * \text{hora}} \right] = 1,93$$

número de lámparas del municipio = 500

$$\text{Costo} = 0,0132 * 360 * 1,93 * 500 = \text{Q. } 4\,585,68$$

4.4. Consumo vs costo

El análisis de consumo y costo de las lámparas vapor de mercurio, fluorescentes y LED sirve a los consejos municipales y al Departamento Técnico de Mantenimiento de alumbrado público municipal a determinar inversiones de compra de *stocks* de lámparas y a calcular el total de consumo de energía eléctrica del sistema de alumbrado público municipal. A continuación el costo y la potencia de estos tres tipos de lámparas.

Tabla III. **Consumo vs. costo**

Lámpara	Consumo [watts]	Costo [quetzales]
Lámpara vapor de mercurio	175	60,00
Lámpara fluorescente	105	135,00
Lámpara LED	18	190,00

Fuente: empresa FEMESA.

4.5. **Consumo vs iluminación**

El análisis de consumo e iluminación sirve para que los consejos municipales y el Departamento Técnico de Mantenimiento del alumbrado público municipal puedan observar la iluminación y el consumo que proporcionan la lámpara vapor de mercurio, fluorescente y LED. A continuación la tabla consumo vs. iluminación:

Tabla IV. **Consumo vs. iluminación**

Lámpara	Consumo [watts]	iluminación [lúmenes]
Lámpara vapor de mercurio	175	14 000
Lámpara fluorescente	105	4 200
Lámpara LED	18	1 000

Fuente: www.ecoluxlite.com. Consulta 12 de junio de 2014.

4.6. Tiempo de vida útil

Las lámparas de vapor de mercurio, fluorescentes y LED tienen un tiempo de vida útil, el cual es medido en horas. A continuación se presenta el tiempo de vida útil de estos tres tipos de lámparas:

Tabla V. **Tiempo de vida útil**

Lámpara	Tiempo de vida útil [horas]
Lámpara vapor de mercurio	10 000
Lámpara fluorescente	8 000
Lámpara LED	50 000

Fuente: www.ecoluxlite.com. Consulta 12 de junio de 2014.

4.7. Distorsión armónica

Cuando el voltaje o la corriente de un sistema energético (alumbrado público en este caso) tienen deformaciones con respecto a la forma de onda sinusoidal, se dice que la señal está distorsionada. A continuación el porcentaje de distorsión armónica de las lámparas de vapor de mercurio, fluorescente y LED:

Tabla VI. **Distorsión armónica**

Lámpara	Distorsión armónica [%]
Lámpara vapor de mercurio	15-20
Lámpara fluorescente	Menos del 10 hasta más del 40
Lámpara LED	Menor al 20

Fuente: www.ecoluxlite.com. Consulta 12 de junio de 2014.

4.8. Número de lámparas fluorescentes y LED para obtener la iluminación de la lámpara vapor de mercurio

Con este análisis se puede determinar cuántas lámparas fluorescentes y LED se necesitan para obtener la iluminación de la lámpara vapor de mercurio utilizando la relación de flujo luminoso de la lámpara de vapor de mercurio y los flujos luminosos de las lámparas fluorescentes y LED. A continuación se presenta el número de lámparas fluorescentes y LED para obtener la iluminación de la lámpara vapor de mercurio

Tabla VII. **Número de lámparas fluorescentes y LED para obtener la iluminación de la lámpara vapor de mercurio**

Lámpara	Iluminación [lúmenes por lámpara]	Numero de lámparas
Lámpara vapor de mercurio	14 000	-
Lámpara fluorescente	4 200	3,33
Lámpara LED	1 000	14

Fuente elaboración propia.

4.9. Sistema de protección de la lámpara

Ya sea para la lámpara vapor de mercurio, fluorescente o LED se recomienda usar un interruptor termo magnético de 2 X 15 amperios con un tablero de 2 polos de intemperie, este dispositivo protegerá a la lámpara de cortos circuitos y sobrecarga.

4.10. Tiempo en recuperar la inversión de cambio de lámparas de vapor de mercurio a lámparas fluorescentes

Los costos de cambio de lámparas de vapor de mercurio a lámparas fluorescentes son:

Costo de lámparas fluorescentes + costo de protección de la lámpara+ mano de obra, en donde:

- Costo de las lámparas fluorescentes: 500 unidades X Q.135.00 = Q. 67 000,00
- Costo de la protección de la lámpara: 500 unidades X Q300.00 = Q. 150 000,00
- Costo de la mano de obra (este costo incluye desconexión del balastro de la lámpara ya que la lámpara fluorescente no necesita este dispositivo e instalación del sistema de protección de la lámpara): 500 unidades X Q.150,00 = Q. 75 000,00

Sumando los 3 costos anteriores se tiene un total de Q. 292 000,00

El ahorro mensual del cambio de las lámparas de mercurio a lámparas fluorescentes es la diferencia entre el costo mensual de usar lámparas de mercurio y el costo mensual de usar lámparas fluorescentes sin transformador:

$$\text{Ahorro mensual} = \text{Q. } 97\,827,80 - \text{Q. } 13\,757,00 = \text{Q. } 84\,070,80$$

El tiempo en el cual se recuperará la inversión del cambio de lámparas vapor de mercurio a lámparas fluorescentes se describe con la siguiente ecuación:

$$\text{Costos (en quetzales)} = \text{ahorro mensual} \times \text{tiempo (en meses)}$$

Por lo cual, al sustituir la ecuación anterior con los datos obtenidos se tiene:

$$\text{Q. } 292\,000,00 = \text{Q. } 84\,070,80 \times \text{tiempo (en meses)}$$

$$\text{Tiempo en meses} = \frac{Q292\,000,00}{Q84\,070,80} = 3,47 \text{ meses}$$

Por lo tanto se le sugiere a las municipalidades que 4 meses a partir del cambio de lámparas, cobren la tarifa calculada con lámparas de vapor de mercurio, a partir del quinto mes ya pueden cobrar la tarifa con lámparas fluorescentes para que los usuarios puedan ver el ahorro en el cobro de la tarifa de alumbrado público.

4.11. Tiempo en recuperar la inversión de cambio de lámparas de vapor de mercurio a lámparas LED

Los costos de cambio de lámparas de vapor de mercurio a lámparas LED son:

Costo de lámparas LED + costo de protección de la lámpara+ mano de obra, en donde:

- Costo de las lámparas LED: 500 unidades X Q.190,00 = Q. 95 000,00
- Costo de la protección de la lámpara: 500 unidades X Q.300,00 = Q. 150 000,00
- Costo de la mano de obra (este costo incluye desconexión del balastro de la lámpara ya que la lámpara LED no necesita este dispositivo e instalación del sistema de protección de la lámpara): 500 unidades X Q.150,00 = Q. 75 000,00

Sumando los 3 costos anteriores se tiene un total de Q. 320 000,00

El ahorro mensual del cambio de las lámparas de mercurio a LED es la diferencia entre el costo mensual de usar lámparas de mercurio y el costo mensual de usar lámparas LED sin transformador:

$$\text{Ahorro mensual} = \text{Q.}97\,827,80 - \text{Q.}4\,585,68 = \text{Q.}93\,242,10$$

El tiempo en el cual se recuperará la inversión del cambio de lámparas vapor de mercurio a LED se describe con la siguiente ecuación:

$$\text{Costos (en quetzales)} = \text{ahorro mensual} \times \text{tiempo (en meses)}$$

Por lo cual, al sustituir la ecuación anterior con los datos obtenidos tenemos:

$$\text{Q.}292\,000,00 = \text{Q.}93\,242,10 \times \text{tiempo (en meses)}$$

$$\text{Tiempo en meses} = \frac{\text{Q}292\,000,00}{\text{Q}93\,242,1} = 3,13 \text{ meses}$$

Por lo tanto se le sugiere a las municipalidades que 4 meses a partir del cambio de lámparas, cobren la tarifa calculada con lámparas de vapor de mercurio, a partir del quinto mes ya pueden cobrar la tarifa con lámparas LED para que los usuarios puedan ver el ahorro en el cobro de la tarifa de alumbrado público.

4.12. Valor Presente Neto (VPN) de lámparas fluorescentes y LED

Es un proceso que permite calcular el valor presente de un número determinado de flujos de caja futuros, empezando por una inversión. La metodología se basa en descontar al momento actual todos los flujos de caja

futuros den para determinar la equivalencia en el tiempo cero de los flujos de efectivo futuros que genera un proyecto y comparar esta equivalencia con el desembolso inicial. Cuando dicha equivalencia es mayor que el desembolso inicial, entonces es recomendable que el proyecto sea aceptado.

En esta sección se analizará el VPN de las lámparas fluorescentes y LED, para que se elija por medio de criterios de ingeniería económica la mejor opción.

4.12.1 VPN de lámparas fluorescentes

Se iniciará el análisis de VPN de las lámparas fluorescentes buscando el costo inicial del cambio de lámparas de vapor de mercurio a lámparas fluorescentes. El costo inicial se calcula usando la siguiente ecuación:

Costo inicial= costo de lámparas fluorescentes + costo de protección de la lámparas + mano de obra.

En donde:

- Costo de las lámparas fluorescentes: 500 unidades X Q. 135,00 = Q. 67 000,00
- Costo de la protección de las lámparas: 500 unidades X Q. 300,00 = Q. 150 000,00
- Costo de la mano de obra (este costo incluye desconexión del balastro de la lámpara, ya que la lámpara fluorescente no necesita este dispositivo e instalación del sistema de protección de la lámpara): 500 unidades X Q.150,00 = Q.75 000,00

Sumando los 3 costos anteriores se tiene un costo inicial de Q. 292 000,00

Los ingresos anuales es el ahorro anual del cambio de las lámparas vapor de mercurio a lámparas fluorescentes, este ahorro es la diferencia entre el costo anual de usar lámparas vapor de mercurio y el costo anual de usar lámparas fluorescentes sin transformador:

$$\text{Ingresos anuales} = \text{Q. } 1\,173\,933,60 - \text{Q. } 165\,084,00 = \text{Q. } 1\,008\,849,60$$

El valor de rescate es un valor que se asigna a un activo totalmente depreciado si se desea vender, en el análisis se calculó como el 10 % del costo inicial.

$$\text{Valor de rescate} = 0,10 \times \text{Q. } 292\,000,00 = \text{Q. } 29\,200,00$$

Egresos anuales se calcularon con un 20 % del costo inicial

$$\text{Los egresos anuales} = 0,20 \times \text{Q. } 292\,000,00 = \text{Q. } 58\,400,00$$

Tasa de interés: se analizó en este caso a un 20 % de interés

La vida del proyecto se calculó de 1 año para que las municipalidades analicen la viabilidad del cambio.

Con los datos que se obtuvieron con anterioridad, se procedió a calcular el VPN. Cambio a lámparas fluorescentes:

$$\text{Costo inicial} = \text{Q. } 292\,000,00$$

$$\text{Ingresos anuales} = \text{Q. } 1\,008\,849,60$$

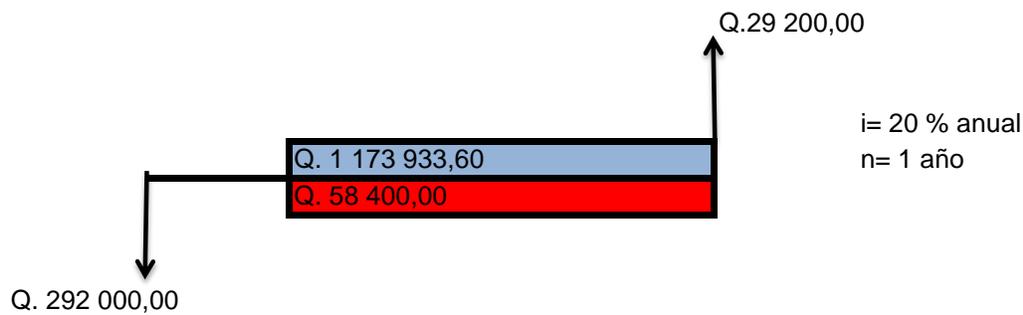
Egresos anuales = Q. 58 400,00

Valor de rescate = Q. 29 200,00

Interés = $i = 20\%$ anual

Vida del proyecto = 1 año

Figura 17. **Diagrama de flujo de efectivo de lámparas fluorescentes a una tasa de interés del 20 %**



Fuente: elaboración propia, con programa de Microsoft Excel.

El VPN de las lámparas fluorescentes se calculó con la siguiente ecuación:

$$\text{VPN} = \text{VPN ingresos} - \text{VPN egresos}$$

Se calculó el VPN ingresos por medio de la siguiente ecuación:

$$\text{VPN ingresos} = \text{ingresos anuales} \times (P/A, i, n) + \text{valor de rescate} \times (P/F, i, n)$$

En donde:

P/A = presente dado anualidad

P/F = presente dado futuro

i = tasa de interés anual

n = vida del proyecto

$$(P/A, i, n) = \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n}$$

$$(P/F, i, n) = \frac{1}{(1+i)^n}$$

Sustituyendo datos en la ecuación:

$$\text{VPN ingresos} = \text{Q. } 1\,008\,849,60 \times (P/A, 20\%, 1) + \text{Q. } 29\,200 \times (P/F, 20\%, 1)$$

$$\text{VPN ingresos} = \text{Q. } 1\,008\,849,60 \times 0,8333 + \text{Q. } 29\,200 \times 0,8333$$

$$\text{VPN ingresos} = \text{Q. } 865\,006,73$$

Se calculó el VPN egresos con la siguiente ecuación:

$$\text{VPN egresos} = \text{costo inicial} + \text{egresos anuales} \times (P/A, 20\%, 1)$$

$$\text{VPN egresos} = \text{Q. } 292\,000,00 + \text{Q. } 58\,400,00 \times 0,8333$$

$$\text{VPN egresos} = \text{Q. } 340\,664,72$$

Se calculó el Valor Presente Neto (VPN) de las lámparas fluorescentes con la siguiente ecuación:

$$\text{VPN de lámparas fluorescentes} = \text{VPN ingresos} - \text{VPN egresos}$$

VPN de lámparas fluorescentes = Q. 865 006,73 – Q. 349 664,72 =

Q. 524 342,01

4.12.2. Valor Presente Neto (VPN) de lámparas LED

Se iniciará el análisis de VPN de las lámparas LED buscando el costo inicial del cambio de lámparas de vapor de mercurio a LED. El costo inicial se calculó utilizando la siguiente ecuación:

Costo inicial = costo de las lámparas LED + costo de protección de la lámpara + mano de obra

En donde:

- Costo de las lámparas LED: 500 unidades X Q. 190,00 = Q. 95 000,00
- Costo de la protección de las lámparas: 500 unidades X Q. 300,00 = Q. 150 000,00
- Costo de la mano de obra (este costo incluye desconexión del balastro de la lámpara, ya que la lámpara LED no necesita este dispositivo e instalación del sistema de protección de la lámpara): 500 unidades X Q. 150,00 = Q. 75 000,00

Sumando los 3 costos anteriores se tiene un costo inicial de Q. 320 000,00. Los ingresos anuales, es el ahorro del cambio de las lámparas vapor de mercurio a LED, este ahorro es la diferencia entre el costo anual de usar lámparas vapor de mercurio y el costo anual de usar lámparas LED sin transformador.

Ingresos anuales = Q. 1 173 933,60 – Q. 55 028,16

Ingresos anuales = Q. 1 118 905,44

El valor de rescate es un valor que se asigna a un activo totalmente depreciado si se desea vender, en el análisis se calculó como el 10 % del costo inicial.

$$\text{Valor de rescate} = 0,10 \times \text{Q. } 320\,000,00 = \text{Q. } 32\,000,00$$

Los egresos anuales se calcularon con un 20 % del costo inicial.

$$\text{Egresos anuales} = 0,20 \times \text{Q. } 320\,000 = \text{Q. } 64\,000,00$$

Tasa de interés: se analizará en este caso a un 20 % de interés.

La vida del proyecto será de 1 año para que las municipalidades analicen la viabilidad del cambio.

Con los datos que se obtuvieron con anterioridad se procede a calcular el VPN.

Cambio a lámparas LED

Costo inicial = Q. 320 000,00

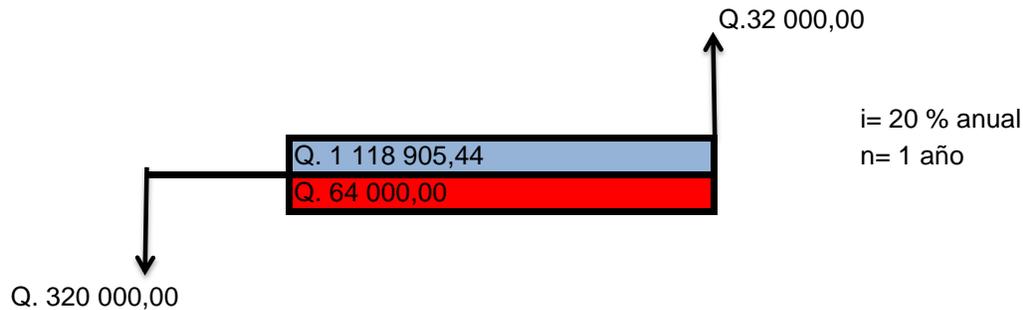
Ingresos anuales = Q. 1 118 905,44

Egresos anuales = Q. 64 000,00

Valor de rescate = Q. 32 000,00

Interés = i = 20 % anual

Figura 18. **Diagrama de flujo de efectivo de lámparas LED a una tasa de interés del 20 %**



Fuente: elaboración propia, con programa de Microsoft Excel.

El VPN de las lámparas LED se calculó con la siguiente ecuación:

$$\text{VPN} = \text{VPN ingresos} - \text{VPN egresos}$$

Se calculó el Valor Presente Neto (VPN) ingresos

$$\text{VPN ingresos} = \text{ingresos anuales} \times (P/A, i, n) + \text{valor de rescate} \times (P/F, i, n)$$

En donde

P/A = valor presente

i = tasa de interés anual

n = vida del proyecto

$$(P/A, i, n) = \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n}$$

$$(P/F, i, n) = \frac{1}{(1+i)^n}$$

Sustituyendo datos en la ecuación

$$\text{VPN ingresos} = \text{Q. } 1\,118\,905,44 \times (\text{P/A}, 20\%, 1) + \text{Q. } 32\,000,00 \times (\text{P/F}, 20\%, 1)$$

$$\text{VPN ingresos} = \text{Q. } 1\,118\,905,44 \times (0,8333) + \text{Q. } 32\,000,00 \times (0,8333)$$

$$\text{VPN ingresos} = \text{Q. } 959\,049,50$$

Se calculó el VPN egresos con la siguiente ecuación:

$$\text{VPN egresos} = \text{costo inicial} + \text{egresos anuales} \times (\text{P/A}, 20\%, 1)$$

$$\text{VPN egresos} = \text{Q. } 320\,000,00 + \text{Q. } 64\,000 \times (0,8333)$$

$$\text{VPN egresos} = \text{Q. } 373\,331,20$$

Se calculó el VPN de lámparas LED

$$\text{VPN de lámparas LED} = \text{VPN ingresos} - \text{VPN egresos}$$

$$\text{VPN de lámparas LED} = \text{Q. } 959\,049,50 - \text{Q. } 373\,331,20$$

$$\text{VPN de lámparas LED} = \text{Q. } 585\,718,30$$

4.13. Tasa Interna de Retorno (TIR) de lámparas fluorescentes y LED

La Tasa Interna de Retorno (TIR) de una inversión es la media geométrica de los rendimientos futuros que se esperan de dicha inversión, y que implica por cierto el supuesto de una oportunidad para reinvertir. En otras palabras, diversos autores la conceptualizan como la tasa de descuento con el que el Valor Presente Neto (VPN) es igual a cero. La Tasa Interna de Retorno

(TIR) se puede usar como indicador de la rentabilidad de una inversión: a mayor TIR mayor rentabilidad.

La Tasa Interna de Retorno en una inversión cuando el Valor Presente Neto (VPN) es igual a cero, un método práctico para poder calcular la TIR es por medio del método de interpolación polar.

Tabla VIII. **Interpolación lineal para Tasa Interna de Retorno**

i (%)	VPN
i_1	VPN_1
TIR	0
i_2	VPN_2

Fuente: elaboración propia.

La ecuación para calcular la Tasa Interna de Retorno es la siguiente:

$$TIR = \left[\frac{(i_1 - i_2)(0 - VPN_2)}{VPN_1 - VPN_2} \right] + i_2$$

En esta sección se analizarán los VPN de las lámparas fluorescentes y LED, para que se elija por medio de criterios de ingeniería económica la mejor opción.

4.13.1. Cálculo de Tasa Interna de Retorno (TIR) para lámparas fluorescentes

Se iniciará el análisis de la TIR de las lámparas fluorescentes con los datos calculados para la tasa de interés (i) de 20 % en donde se determinó que el Valor Presente Neto (VPN) es de Q. 524 342,01.

Se calcula el VPN para una tasa de interés $i = 50 \%$, tomando como referencia los datos calculados para el VPN de lámparas fluorescentes.

Costo inicial = Q. 292 000,00

Ingresos anuales = Q. 1 008 849,60

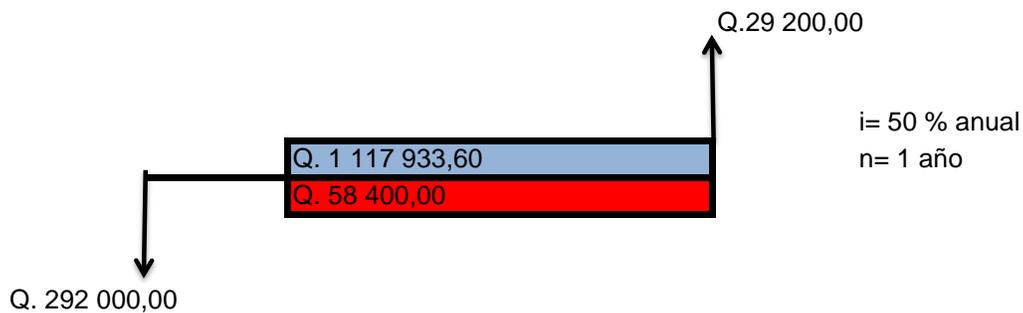
Egresos anuales = Q. 58 400,00

Valor de rescate = Q. 29 200,00

Interés = $i = 50 \%$ anual

Vida del proyecto = 1 año

Figura 19. **Diagrama de flujo de efectivo de lámparas fluorescentes a una tasa de interés del 50 %**



Fuente: elaboración propia, con programa de Microsoft Excel.

El VPN de las lámparas fluorescentes se calculará con la siguiente ecuación:

$$\text{VPN} = \text{VPN ingresos} - \text{VPN egresos}$$

Se calcula el VPN ingresos.

$$\text{VPN ingresos} = \text{ingresos anuales} \times (P/A, i, n) + \text{Valor de rescate} \times (P/F, i, n)$$

En donde:

P/A = presente dado anualidad

P/F = presente dado futuro

i = tasa de interés anual

n = vida del proyecto

$$(P/A, i, n) = \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n}$$

$$(P/F, i, n) = \frac{1}{(1+i)^n}$$

Sustituyendo datos en la ecuación

$$\text{VPN ingresos} = \text{Q. } 1\,008\,849,60 \times (P/A, 50\%, 1) + \text{Q. } 29\,200 \times (P/F, 50\%, 1)$$

$$\text{VPN ingresos} = \text{Q. } 1\,008\,849,60 \times (0,6667) + \text{Q. } 29\,200 \times (0,6667)$$

$$\text{VPN ingresos} = \text{Q. } 692\,067,67$$

Se calcula el VPN egresos

$$\text{VPN egresos} = \text{costo inicial} + \text{egresos anuales} \times (P/A, 50\%, 1)$$

$$\text{VPN egresos} = \text{Q. } 292\,000,00 + \text{Q. } 58\,400,00 (0,6667)$$

$$\text{VPN egresos} = \text{Q. } 330\,935,28$$

Se calcula el VPN de lámparas fluorescentes

VPN de lámparas fluorescentes = VPN ingresos – VPN egresos

VPN de lámparas fluorescentes = Q. 692 067,67 – Q. 330 935,28

VPN = VPN de lámparas fluorescentes = Q. 361 132,39

Se elaboró la siguiente tabla para calcular la Tasa Interna de Retorno de las lámparas fluorescentes, se calcularon los valores presentes netos con las tasas de interés del 20 % y del 50 %.

Tabla IX. **Interpolación lineal para Tasa Interna de Retorno de lámparas fluorescentes**

i (%)	VPN
$i_1 = 20 \%$	$VPN_1 = Q. 524 342,01$
TIR	0
$i_2 = 50 \%$	$VPN_2 = Q. 361 132,39$

Fuente: elaboración propia.

La ecuación para calcular la Tasa Interna de Retorno es la siguiente:

$$TIR = \left[\frac{(i_1 - i_2)(0 - VPN_2)}{VPN_1 - VPN_2} \right] + i_2$$

Se sustituyen las variables de la ecuación de la ecuación de la TIR con los datos que se calcularon con anterioridad:

$$TIR = \left[\frac{(20\% - 50\%)(0 - 361\,132,39)}{524\,342,01 - 361\,132,39} \right] + 50\%$$

TIR = 116,381 %

4.13.2. Cálculo de Tasa Interna de Retorno (TIR) para lámparas LED

Se iniciará el análisis de la TIR para las lámparas LED con los datos calculados para la tasa de interés (i) de 20 % en donde se determinó que el VPN es de Q. 585 718,30.

Se calculó el VPN para una tasa de interés $i = 50\%$ tomando como referencia los datos calculados para el VPN de lámparas LED.

Costo inicial = Q. 320 000,00

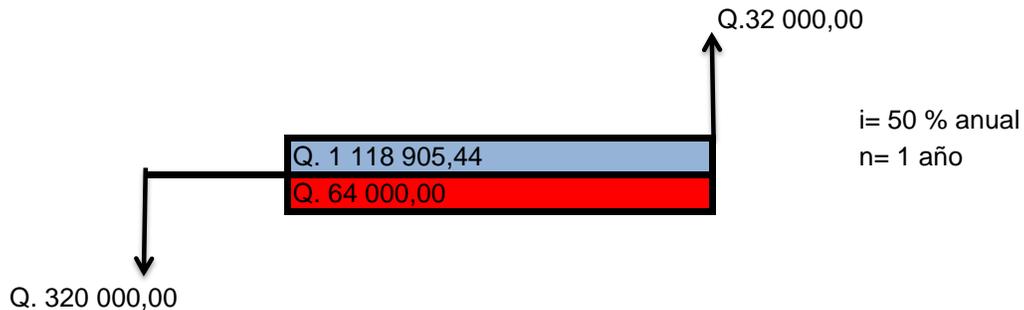
Ingresos anuales = Q. 1 118 905,44

Egresos anuales = Q. 64 000,00

Valor de rescate = Q. 32 000,00

Interés = $i = 50\%$ anual

Figura 20. **Diagrama de flujo de efectivo de lámparas LED a una tasa de interés del 50 %**



Fuente: elaboración propia, con programa de Microsoft Excel.

El VPN de las lámparas LED se calculó con la siguiente ecuación:

$$\text{VPN} = \text{VPN ingresos} - \text{VPN egresos}$$

Cálculo de VPN ingresos con la siguiente ecuación:

$$\text{VPN ingresos} = \text{ingresos anuales} \times (P/A, i, n) + \text{valor de rescate} \times (P/F, i, n)$$

En donde:

P/A = presente dado anualidad

P/F = presente dado futuro

i = tasa de interés anual

n = vida del proyecto

$$(P/A, i, n) = \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n}$$

$$(P/F, i, n) = \frac{1}{(1+i)^n}$$

Sustituyendo datos en la ecuación

$$\text{VPN ingresos} = \text{Q. } 1\,118\,905,44 \times (P/A, 50\%, 1) + \text{Q. } 32\,000,00 \times (P/F, 50\%, 1)$$

$$\text{VPN ingresos} = \text{Q. } 1\,118\,905,44 \times (0,6667) + \text{Q. } 32\,000,00 \times (0,6667)$$

$$\text{VPN ingresos} = \text{Q. } 767\,309,00$$

Cálculo del VPN egresos con la siguiente ecuación:

$$\text{VPN egresos} = \text{costo inicial} + \text{egresos anuales} \times (P/A, 50\%, 1)$$

$$\text{VPN egresos} = \text{Q. } 320\,000,00 + \text{Q. } 64\,000,00 \times (0,6667)$$

$$\text{VPN egresos} = \text{Q. } 362\,669,00$$

Cálculo el VPN de las lámparas LED con la siguiente ecuación:

$$\text{VPN de las lámparas LED} = \text{VPN ingresos} - \text{VPN egresos}$$

$$\text{VPN de las lámparas LED} = \text{Q. } 767\,309,00 - \text{Q. } 362\,669,00$$

$$\text{VPN de las lámparas LED} = \text{Q. } 404\,640,00$$

Se elaboró la siguiente tabla para calcular la TIR de las lámparas LED se calcularon los valores presentes netos con las tasas de interés del 20 % y del 50 %.

Tabla X. **Interpolación lineal para Tasa Interna de Retorno de lámparas LED**

i (%)	VPN
$i_1 = 20 \%$	$VPN_1 = Q. 585 718,30$
TIR	0
$i_2 = 50 \%$	$VPN_2 = Q. 404 640,00$

Fuente: elaboración propia.

La ecuación para calcular la Tasa Interna de Retorno es la siguiente:

$$TIR = \left[\frac{(i_1 - i_2)(0 - VPN_2)}{VPN_1 - VPN_2} \right] + i_2$$

Se sustituyen las variables en la ecuación de la TIR con los datos que se calcularon con anterioridad:

$$TIR = \left[\frac{(20\% - 50\%)(0 - 404 640)}{585 718,30 - 404 640} \right] + 50\%$$

$$TIR = 117,04 \%$$

CONCLUSIONES

1. Se localizó que algunas municipalidades solo cambian las lámparas de alumbrado público de vapor de mercurio a lámparas fluorescentes o LED, sin desconectar el transformador de la lámpara de vapor de mercurio.
2. Se observó que transformador no es necesario para el funcionamiento de las lámparas fluorescentes o LED.
3. Técnicamente se determinó que la lámpara fluorescente ofrece una mayor iluminación por lámpara que la lámpara LED
4. Se resolvió con el modelo matemático de la iluminancia media que la distancia entre postes con lámparas de vapor de mercurio debe ser de aproximadamente 38 metros, para darle a la población el nivel de iluminación correspondiente.
5. Se determinó con el modelo matemático de la iluminancia media que la distancia entre postes con lámparas fluorescentes debe ser de aproximadamente 12 metros, para darle a la población un buen nivel de iluminación.
6. Se determino con el modelo matemático de la iluminancia media que distancia entre postes con lámparas LED debe ser de

aproximadamente 3 metros, para darle a la población un nivel de iluminación adecuado.

7. Se evaluó la importancia de contar con un Departamento Técnico para que realice tareas de operación y mantenimiento del alumbrado público municipal.
8. Se consideró que al no dar un mantenimiento adecuado al alumbrado público municipal se le dará a la población de la cabecera municipal de Oratorio, Santa Rosa un mal servicio.
9. Se evaluó la importancia de utilizar un interruptor termo magnético por lámpara para proteger a la lámpara de cortos circuitos y sobrecargas.
10. Se realizaron los cálculos de VPN y TIR de las lámparas fluorescentes y LED y se determinó que son factibles económicamente las dos opciones.

RECOMENDACIONES

1. Es importante que en la Municipalidad de Oratorio se cuente con un equipo de personal adecuado que conforme un Departamento de Operación y Mantenimiento del alumbrado público municipal abastecidos con grúas, vehículos y herramientas adecuadas para realizar tareas de mantenimiento del alumbrado público municipal.
2. Tener un *stock* de repuestos para reparar las lámparas dañadas en el menor tiempo posible.
3. Que la Municipalidad invierta en la compra de un interruptor termo magnético por lámpara para proteger a la lámpara de cortos circuitos y sobrecargas.

BIBLIOGRAFÍA

1. *Armónicos y flicker.* [en línea] http://www3.fi.mdp.edu.ar/electrica/archivos/medicion_calidad_energia.pdf. [Consulta: 23 de abril de 2013].
2. BLANK, Leland; TARQUIN, Anthony. *Ingeniería económica*, 6a ed. Mexico: McGraw-Hill , 2006.
3. *Catalogo LUXLITE 2013.* [en línea] <http://www.ecoluxlite.com>. [Consulta: 8 de abril de 2014].
4. *Curso de instaladores - Capítulo II- Lámparas de vapor de mercurio alta presión (parte 3).* [en línea] <<http://www.es-es.facebook.com/notes/artelum/curso-de-instaladores-cap%C3%ADtulo-ii-l%C3%A1mparas-de-vapor-de-mercurio-alta-presi%C3%B3n-par/434217683305744>>. [Consulta: 7 de abril de 2014].
5. *Distorsión Armónica.* [en línea] <<http://www.waterymex.org/contenidos/rtecnicos/Optimizando%20la%20Operacion%20y%20el%20Mantenimiento/Distorsion%20Armonica.pdf>>. [Consulta: 11 de abril de 2014].
6. *Distorsión armónica thd.* [en línea] <http://www.tecnosoluciones-zitro.com/Documentos/B04_Distorsion_Armonica.pdf>. [Consulta: 23 de abril de 2013].

7. *Funcionamiento de las luminarias fluorescentes.* [en línea]
<http://www.quiminet.com/articulos/conozca-el-funcionamiento-de-las-luminarias-fluorescentes-2706045.htm>. [Consulta: 23 de abril de 2013].
8. *Lámpara de descarga.* [en línea]
<http://www.es.wikipedia.org/wiki/L%C3%A1mpara_de_descarga. [Consulta: 8 de abril de 2014].
9. *Lámpara de haluro metálico.* [en línea]
<http://www.es.wikipedia.org/wiki/L%C3%A1mpara_de_haluro_metal%C3%A1lico>. [Consulta: 7 de abril de 2014].
10. *Lámpara de inducción.* [en línea]
<[http://www.cnee.gob.gt/EficienciaEnergetica/FIDE/002%20M%C3%B3dulo%20II%20\(AEE%20Sistemas%20de%20Iluminaci%C3%B3n\).pdf](http://www.cnee.gob.gt/EficienciaEnergetica/FIDE/002%20M%C3%B3dulo%20II%20(AEE%20Sistemas%20de%20Iluminaci%C3%B3n).pdf)>. [Consulta: 23 de abril de 2013].
11. *Lámpara de inducción.* [en línea]
<http://www.es.wikipedia.org/wiki/L%C3%A1mpara_de_inducci%C3%B3n>. [Consulta: 23 de abril de 2013].
12. *Lámpara de vapor de mercurio.* [en línea]
<http://www.es.wikipedia.org/wiki/L%C3%A1mpara_de_vapor_de_mercurio>. [Consulta: 7 de abril de 2014].
13. *Lámparas de descarga de alta presión.* [en línea]
<http://www.osram.es/osram_es/noticias-y-

conocimiento/lamparas-de-descarga-de-alta-presion/conocimiento-profesional/index.jsp>. [Consulta: 22 de abril de 2012].

14. *Lámparas LED.* [en línea] <http://es.wikipedia.org/wiki/L%C3%A1mpara_LED>. [Consulta: 24 de mayo de 2014].
15. *Nivel de iluminación de calles.* [en línea] <http://sirio.ua.es/proyectos/manual_20carreteras/01030502.pdf>. [Consulta 25 de mayo de 2014].
16. *Niveles lumínicos y parámetros de calidad lumínica (parte 1ª) Temperatura del color y Reproducción Cromática.* [en línea] <<http://www.electromagazine.com.uy/anteriores/numero12/iluminacion1.htm>>. [Consulta: 7 de abril de 2014].
17. *Transitorios.* [en línea] <<http://www.reasa.com.mx/pdf/FTREA00310-Transitorios-y-ruido-electrico.pdf>>. [Consulta: 15 de mayo de 2014].
18. *Variaciones de tensión de corta duración.* [en línea] <<http://www.si3ea.gov.co/Portals/0/Gie/Docs/calidad.pdf>>. [Consulta: 15 de mayo de 2014].