



EDITORIAL ANDES COGNITIO

COMPORTAMIENTO ARMÓNICO DE SISTEMAS DE ALUMBRADO PÚBLICO URBANO BASADOS EN TECNOLOGÍA LED



ESTUDIO DE CASO EN LA CIUDAD DE AMBATO – ECUADOR

Carlos David Murillo Andrade

Cristian Patricio Marín Cajas

María Rebeca Tenenaula Cunduri

Ángel Medardo Tacoamán Andrade

Editorial "ANDES COGNITIO EDAC S.A.S."

DEPARTAMENTO DE EDICIÓN

Editado y Distribuido por:

Editorial: Andes Cognito
Sello Editorial: 978-9942-7408
Teléfono: 0995805659
Web: <https://andescognitio.org>
ISBN: 978-9907-9504-1-0
DOI: <https://doi.org/10.64230/1p673841>

© Primera Edición
© Enero 2026
Impreso en Ecuador

Revisión de Ortografía

Lcda. Cristina Paola Chamorro Ortega

Diseño de Portada

Ing. Pamela Rosa Taco Hernández Mgs

Diagramación

Ing. Yoselyn Andrea Rogel Gaibor

Director Editorial

Ec. Juan F. Villacis U. Mgs.

Aviso Legal

El contenido de este libro incluyendo textos, imágenes, gráficos, tablas, cuadros y referencias bibliográficas es de exclusiva responsabilidad del/ de los autor (es). Las opiniones, datos y criterios expresados no representan necesariamente la postura institucional ni el pensamiento de la Editorial Andes Cognito.

Derechos de Autor ©

Este documento se publica bajo los términos y condiciones de la Licencia Creative Commons Reconocimiento – NoComercial – CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0).



Todos los derechos de autor y de propiedad intelectual e industrial relativos al contenido de esta publicación pertenecen exclusivamente a la “Editorial Andes Cognitio” y a sus respectivos autores. Queda expresamente prohibida, bajo las sanciones establecidas por la legislación vigente, la reproducción total o parcial de esta obra, su almacenamiento en sistemas informáticos, su tratamiento digital, así como cualquier forma de distribución, transmisión o comunicación pública por medios electrónicos, mecánicos, ópticos, químicos, de grabación o fotocopia sin la debida autorización previa y por escrito de los titulares del copyright.

Se exceptúan únicamente los usos con fines académicos o de investigación científica, siempre que no persigan propósitos comerciales y se realicen de forma gratuita, debiendo citarse en todo momento a la fuente editorial correspondiente. Las opiniones vertidas en los distintos capítulos son de exclusiva responsabilidad de los autores y no reflejan necesariamente la postura institucional de la editorial.

Comité Científico Académico

Dr. Jorge Gualberto Paredes Gavilanez PhD.
Universidad Técnica Estatal de Quevedo

Dr. Oscar Patricio López Solís PhD.
Universidad Técnica de Ambato

Ec. Carlos Roberto López Paredes PhD.
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo Extensión Orellana

Dr. Héctor Enrique Hernández Altamirano PhD.
Universidad Técnica de Ambato

Dr. Carlos Arturo Jara Santillán PhD.
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

Dr. Guillermo Carrillo Espinosa PhD,
Universidad Autónoma de Chapingo - México

Dra. Doris Coromoto Pernía Barragán PhD,
Universidad de los Andes Tachira Venezuela

Ec. María Gabriela González Bautista PhD.
Universidad Nacional de Chimborazo

My. Efraín Arguello Arellano, Mgs.
Tecnológico Universitario ARGOS – Policía Nacional del Ecuador

Ing. Liliana Priscila Campos Llerena Mgs.
Universidad Técnica de Ambato

Dr. Mario Humberto Paguay Cuvi Mgs.
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

Ec. Oswaldo Javier Jacome Izurieta Mgs.
Universidad Técnica de Ambato

Ab. Brayan Alexis Villarreal Chiriboga Mgs.
Investigador Independiente

Ab. Luis Adrián Chiliquinga Cevallos Mgs.
Universidad Técnica del Norte

Ec. Juan Carlos Pérez Briceño Mgs.
Instituto Superior Universitario Bolivariano

Ec. Ligia Ximena Tapia Hermida Mgs.
Universidad Nacional de Chimborazo

Ing. Kevin Liroy Ortega Chávez Mgs.
Universidad Politécnica Estatal del Carchi (UPEC)

Ing. Paula Alejandra Abdo Peralta Mgs.
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

Ing. Catherine Gabriela Frey Erazo Mgs.
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

Ing. Juan Enrique Ureña Moreno Mgs.
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

Abg. Roberto Fabian Sánchez Chávez PhD.
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

Ing. José Fernando Esparza Parra Mgs.
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

Ing. Alexis Gabriel Reinoso Haro Mgs.
Universidad Estatal de Bolívar

Constancia de Arbitraje

La Editorial Andes Cognito, hace constar que este libro proviene de una investigación realizada por los autores, siendo sometido a un arbitraje bajo el sistema de doble ciego, de contenido y forma por jurados especialistas. Además, se realizó una revisión del enfoque, paradigma y método investigativo; desde la matriz epistémica asumida por los autores, aplicándose las normas APA, Séptima Edición, proceso de anti plagio en línea Compilatio, garantizándose así la científicidad de la obra.

Comité Editorial

Eco. Juan Federico Villacis Uvidia Mgs.
Director de la Editorial Andes Cognito

Lcda. Andrea Damaris Hernández Allauca PhD.
Editora de Andes Cognito

**“COMPORTAMIENTO ARMÓNICO DE SISTEMAS
DE ALUMBRADO PÚBLICO URBANO BASADOS EN
TECNOLOGÍA LED:**

**ESTUDIO DE CASO EN LA CIUDAD DE AMBATO –
ECUADOR”**

Carlos David Murillo Andrade

Cristian Patricio Marín Cajas María

Rebeca Tenenaula Cunduri Ángel

Medardo Tacoamán Andrade

PRÓLOGO

El alumbrado público urbano constituye un componente esencial para el desarrollo sostenible de las ciudades, al incidir directamente en la seguridad vial y ciudadana, la calidad de vida de la población y la eficiencia en el uso de los recursos energéticos. En los últimos años, la incorporación de tecnologías basadas en diodos emisores de luz (LED) ha representado una alternativa innovadora frente a los sistemas tradicionales de iluminación, debido a sus ventajas en eficiencia energética, durabilidad y reducción del impacto ambiental. Sin embargo, la adopción de esta tecnología también plantea nuevos desafíos técnicos, particularmente relacionados con la calidad de la energía eléctrica y el comportamiento armónico de los sistemas de distribución.

En este contexto, el libro “Comportamiento Armónico de Sistemas de Alumbrado Público Urbano Basados en Tecnología LED: Estudio de Caso en la Ciudad de Ambato – Ecuador” se presenta como un aporte relevante y oportuno al campo de la ingeniería eléctrica y energética. La obra aborda de manera rigurosa el análisis de los armónicos generados por luminarias LED en sistemas de alumbrado público, evaluando su impacto sobre la red eléctrica y el cumplimiento de las normativas nacionales e internacionales vigentes, especialmente las establecidas por la norma IEEE 519.

El texto combina fundamentos teóricos sólidos con un enfoque práctico y aplicado, sustentado en un estudio de campo desarrollado en sectores urbanos específicos de la ciudad de Ambato. A través del uso de herramientas de simulación, mediciones reales y análisis comparativos entre tecnologías convencionales y LED, los autores logran evidenciar los efectos de la distorsión armónica en voltaje y corriente, así como sus implicaciones en la eficiencia, confiabilidad y vida útil de los equipos eléctricos.

Asimismo, la obra ofrece una visión integral del diseño de sistemas de alumbrado público, considerando aspectos fotométricos, eléctricos y normativos, lo que la convierte en un material de consulta valioso para estudiantes, profesionales, investigadores y responsables de la planificación energética urbana. Este libro no solo contribuye al conocimiento técnico especializado, sino que también fomenta la toma de decisiones informadas orientadas a la mejora de la calidad de energía y a la implementación responsable de tecnologías LED en entornos urbanos.

ÍNDICE GENERAL

PRÓLOGO.....	2
ÍNDICE GENERAL	3
INTRODUCCIÓN	7
CAPÍTULO I.....	9
FUNDAMENTOS DEL ALUMBRADO PÚBLICO URBANO	9
1.1. Introducción	9
1.2. Alumbrado Público	9
1.3. Clasificación de las vías	10
1.3.1. Factores de los que depende la decisión de iluminar una vía.....	12
1.3.2. Uso adecuado de Luminarios	13
1.4. Tipos de luminarias utilizadas en alumbrado público.....	15
1.5. Luminarias LED.....	19
1.5.1. Parámetros de la iluminación LED.....	23
1.5.2. Factor de Uniformidad General de Iluminancia LED.....	25
1.6. Curvas de distribución luminosa de lámparas de alumbrado público	25
1.6.1. Nivel de Luminancia	26
1.6.2. Uniformidad de luminancia.....	27
1.6.3. Factor de Utilización	27
1.6.4. Factor de Mantenimiento	28
1.7. Relación entre separación y altura de los puntos de luz	28

1.7.1.	Sistema de localización de las luminarias	29
1.7.2.	Limitación del Deslumbramiento	30
1.7.3.	Coefficiente de iluminación en los alrededores	30
1.8.	Guiado visual y óptico	31
1.8.1.	Guiado visual	32
1.8.2.	Guiado óptico	32
1.9.	Altura de Montaje de iluminación.....	32
1.9.1.	Saliente de las luminarias	33
1.9.2.	Ubicación de las luminarias	34
CAPÍTULO II.....		36
TECNOLOGÍA LED APLICADA AL ALUMBRADO PÚBLICO		36
2.1.	Postes de alumbrado público	36
2.1.1.	Espaciamiento entre postes de alumbrado público	37
2.1.2.	Procedimientos de diseño de alumbrado público.....	38
2.1.3.	Alimentación y sistema de distribución de energía eléctrica al Alumbrado Público	39
2.2.	Selección del Transformador.....	40
2.2.1.	Cálculo de la carga por tramos	40
2.2.2.	Continuidad de Servicio	41
2.2.3.	Calidad de Energía	41
2.2.4.	Distorsión Armónica	42
2.2.5.	Indicadores de calidad	43
2.3.	Distorsión Armónica	43

2.3.1.	Distorsión total armónica de voltaje y corriente (THD)	44
2.3.2.	Distorsión armónica individual (THD).....	45
2.3.3.	Límites de Distorsión de Voltaje	45
2.3.4.	Análisis de distorsión armónica en iluminación LED	46
2.4.	Límites de Distorsión de Corriente.....	46
2.5.	Filtros para mitigar Armónicos	48
2.5.1.	Filtro Pasivo Sintonizado	49
2.5.2.	Cálculo de Filtros Armónicos.....	50
2.5.3.	Factor de Calidad	52
2.5.4.	Resistencia de un filtro	52
2.6.	Corrientes armónicas.....	53
2.6.1.	Voltajes de Diseño del Capacitor	54
2.6.2.	Norma IEEE – 1531 -2003	55
2.6.3.	Limitaciones armónicas.....	55
2.6.4.	Esquema Unifilar de referencia	56
CAPÍTULO III.....		58
SISTEMA ELÉCTRICO DE ALUMBRADO PÚBLICO		58
3.1.	Análisis de caso.....	58
3.2.	Análisis y discusión de los resultados	59
3.2.1.	Datos Característicos de las luminarias utilizadas en el estudio	59
3.2.2.	Disposición de luminarias	61
3.3.	Análisis del flujo luminoso de las luminarias tipo Vapor de Sodio y LED.....	66

3.4.	Análisis de los parámetros eléctricos de las luminarias tipo Vapor de Sodio y LED.....	72
3.5.	Procedimiento de configuración que se realiza para la medición de datos del sistema eléctrico	74
3.6.	Análisis de datos obtenidos a través de mediciones	79
CAPÍTULO IV		81
ANÁLISIS DEL ESTUDIO DE CASO		81
4.1.	Luminarias Tipo LED	81
4.2.	Análisis del factor de Potencia (LED).....	84
4.3.	Análisis de Niveles de Voltaje (LED)	84
4.4.	Análisis de la carga Diaria	86
4.5.	Armónicos de Corriente individual (LED).....	92
4.6.	Problemas encontrados mediante la simulación (LED).....	96
4.7.	Soluciones Propuestas	100
BIBLIOGRAFÍA		137

INTRODUCCIÓN

El crecimiento urbano acelerado y la creciente demanda energética han convertido al alumbrado público en un elemento estratégico para el desarrollo sostenible de las ciudades. Más allá de su función básica de iluminación, este servicio influye directamente en la seguridad vial y ciudadana, la percepción del espacio urbano, la actividad económica nocturna y la eficiencia en el uso de la energía eléctrica. En este escenario, la incorporación de tecnologías de iluminación más eficientes, como la tecnología LED, se ha consolidado como una alternativa clave frente a los sistemas tradicionales basados en lámparas de vapor de sodio o mercurio.

La tecnología LED destaca por su alta eficiencia luminosa, mayor vida útil y menor impacto ambiental; sin embargo, su integración masiva en sistemas de alumbrado público urbano ha puesto en evidencia nuevos retos técnicos relacionados con la calidad de la energía eléctrica. En particular, el comportamiento no lineal de los dispositivos electrónicos asociados a las luminarias LED puede generar distorsiones armónicas en la red, afectando parámetros como el voltaje, la corriente, el factor de potencia y la vida útil de los equipos eléctricos, así como la estabilidad del sistema de distribución.

En este contexto, el presente libro titulado “Comportamiento Armónico de Sistemas de Alumbrado Público Urbano Basados en Tecnología LED: Estudio de Caso en la Ciudad de Ambato – Ecuador” tiene como objetivo analizar de manera integral los efectos de la distorsión armónica producida por luminarias LED en sistemas reales de alumbrado público. El estudio se desarrolla a partir de una investigación de campo y experimental, combinando mediciones in situ, simulaciones mediante software especializado y el análisis comparativo con tecnologías convencionales de iluminación.

La investigación se centra en sectores urbanos específicos de la ciudad de Ambato, permitiendo contextualizar los resultados dentro de la realidad energética local y evaluar el cumplimiento de las normativas técnicas nacionales e internacionales, especialmente las establecidas por la norma IEEE 519. Asimismo, se abordan aspectos fundamentales del diseño luminotécnico, la clasificación de vías, la selección de luminarias, y los indicadores de calidad de energía, proporcionando una visión técnica integral del sistema de alumbrado público.



EDITORIAL ANDES COGNITIO

CAPÍTULO I

FUNDAMENTOS DEL ALUMBRADO PÚBLICO URBANO



CAPÍTULO I

FUNDAMENTOS DEL ALUMBRADO PÚBLICO URBANO

1.1.Introducción

En este apartado se presenta las definiciones básicas relacionadas con el diseño de un sistema de iluminación, que son fundamentales para el entendimiento de este proyecto de investigación, además se estudia las tecnologías de iluminación existentes, poniendo énfasis en las tecnologías que van a ser objeto principal de estudio, como son: las lámparas convencionales y las de tecnología tipo LEDs.

Finalmente se hace un repaso sobre los conceptos referidos a calidad de energía eléctrica, tratando especialmente sobre los armónicos, que producen los dos tipos de luminarias que se van a utilizar para realizar la comparación, además se definirá los indicadores de calidad que se tiene que cumplir de acuerdo a normas nacionales e internacionales.

1.2.Alumbrado Público

La principal función del alumbrado público es permitir la circulación en horas de la noche o en áreas oscuras (túneles), con niveles aceptables de seguridad y confort, tanto para conductores como para peatones. Con el pasar del tiempo el alumbrado público ha constituido, un servicio básico debido a que la funcionalidad del alumbrado ha aumentado, como prevención del crimen, mejora en la economía de las ciudades gracias a su estética, facilidad en la orientación para peatones y conductores, seguridad en el tráfico, y seguridad social de los peatones y residentes

Las funciones del alumbrado público suelen estar definidas con base en los siguientes aspectos:

- Ubicación (urbana o rural)
- Sector (industrial, residencial, comercial)
- Función de la red (flujo, acceso, local)
- Infraestructura (doble carril, un solo carril)

Los requisitos fotométricos se suelen expresar en términos de luminancia para las vías destinadas al tráfico de automotores, mientras que para las vías locales y residenciales se evalúa en términos de iluminancia (Acuña, 2011).

1.3. Clasificación de las vías

Desde un punto de vista de seguridad y de comodidad sería que para todas las vías públicas se alcanzara un elevado nivel de iluminación. Por razones económicas, no es posible iluminar todas las vías públicas (particularmente en las zonas rurales), ni tampoco dar el mismo nivel a todas las vías que deben iluminarse. Respecto al nivel de iluminación que debe alcanzarse, las vías públicas se pueden clasificar según: el volumen, la velocidad y clases de vehículos que la utilizan, en vez de considerar las propiedades de la construcción y el entorno de la vía.

En la Tabla N° 1.1, se resumen las características de las vías públicas según la clasificación:

Tabla N° 1.1
Clasificación de las vías públicas

Clase de vía	Tipo y densidad de tráfico	Tipo de vía
A	Tráfico motorizado pesado y de gran velocidad	Vías con carriles separados completamente libres de cruces a nivel. Accesos totalmente controlados
B	Tráfico motorizado pesado y de gran velocidad	Carreteras importantes para tráfico motorizado, posiblemente con carriles separados para tráfico lento y/o peatones
C	Tráfico motorizado pesado o mixto y velocidad moderada	Carreteras urbanas o rurales importantes y de todo uso
D	Tráfico mixto de importancia con mayor proporción de tráfico lento o peatonal	Calles en ciudades o centros comerciales de acceso a edificios o entidades oficiales
E	Tráfico mixto con límite de velocidad y densidad moderada	Carreteras de unión entre zonas residenciales y carreteras de tipo A hasta D

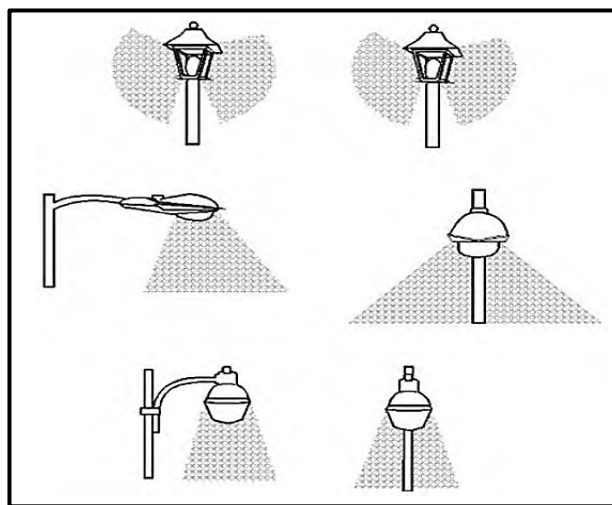
Fuente: (Rosero & Bolaños, 2016)

Luminarios

En el mercado existe una amplia variedad de luminarios, cuya eficiencia varía notablemente. Para identificar los de mayor eficiencia es necesario evaluar el nivel de iluminación y la forma de distribuir la luz: ésta también tiene relación con la altura de montaje y separación entre postes. En la Gráfico N° 1.1 se indican los tipos de luminarios usadas en alumbrado público vista lateral y frontal.

Gráfico N° 1.1

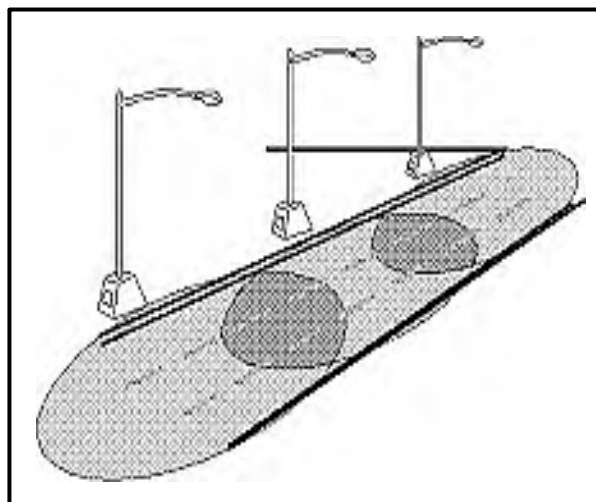
Tipos de luminarios usados en alumbrado público vista lateral y frontal



Fuente: (Lara et al., 2009)

Gráfico N° 1.2

Curva alargada longitudinalmente

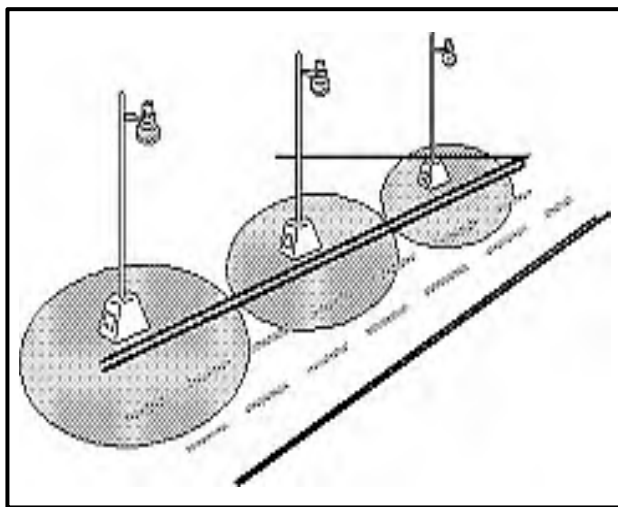


Fuente: (Lara et al., 2009)

El luminario aloja los elementos activos del sistema como los controles el balastro y la lámpara: puede iluminar con curva alargada longitudinalmente o curva circular según se utilice para vialidades o para tramos especiales de las mismas o en áreas abiertas. Según la Gráfico N° 1.2 las luminarias se colocan en una curva longitudinalmente, mientras que en la Gráfico N° 1.3 las luminarias se colocan en curvas circulares.

Gráfico N° 1.3

Curva circular



Fuente: (Lara et al., 2009)

La selección de uno u otro, así como el espaciamiento, altura, número de hileras y el tipo de acabado de la superficie reflejante receptora de la luz, depende del criterio de diseño del sistema. Como se puede observar, hay que tomar en cuenta diferentes aspectos para alcanzar la calidad total del servicio.

1.3.1. Factores de los que depende la decisión de iluminar una vía

Los factores más importantes que determinan si una vía debe ser iluminada son:

1. La naturaleza de la vía (por ejemplo, autopista o carretera) determinada en función de su trazado y también por la proporción de accidentes nocturnos.
2. La intensidad y composición del tráfico (por ejemplo, tráfico rápido o mezcla de rápido y lento)

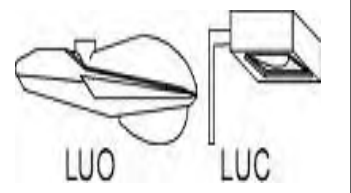

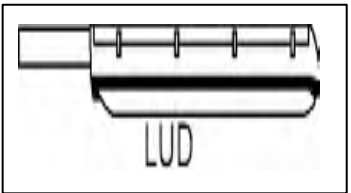
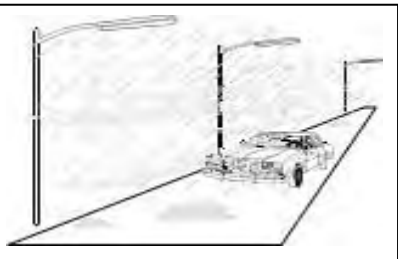
3. Los puntos peligrosos y otras situaciones especiales tales como, intersecciones con otras carreteras, pasos para peatones, ciclistas y otras interrupciones en la continuidad del tráfico, que pueden presentar a los conductores situaciones inesperadas, fundamentalmente durante las horas de oscuridad (Lara et al., 2009).

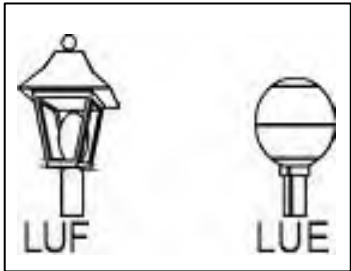
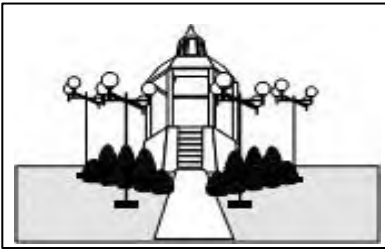
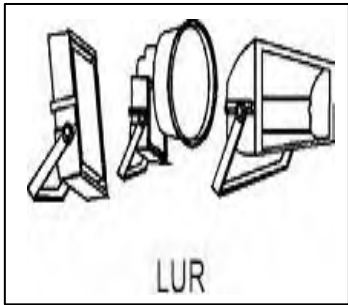

1.3.2. Uso adecuado de Luminarios

Los tipos de luminarios que se ilustran a continuación son los más usuales en alumbrado de vialidades y exteriores. A cada uno de ellos se le ha asignado una clave para facilitar su identificación. El uso eficiente se alcanza cuando se ubican en los espacios y lugares adecuados. En la Tabla N° 1.2 se indica el uso adecuado de cada luminaria utilizada para el alumbrado público.

Tabla N° 1.2

Uso adecuado de luminarios

Luminario		Lugar o espacio
		Vialidades vehiculares
		Autopistas, puertos, zonas abiertas de terminales y zonas con neblina

		<p>Plazas, parques y jardines</p>
		<p>Iluminación decorativa de edificios, monumentos y fuentes</p>

Fuente: (Lara et al., 2009)

Los tipos de lámparas pueden agruparse en:

- Incandescentes
- Fluorescentes
- De descarga de alta intensidad
- Inducción
- LED

De estos tipos de lámparas, las de mayor demanda en exteriores actualmente son las de descarga de alta intensidad. En la Tabla N° 1.3 se indica la clasificación de las luminarias, identificando su uso y eficiencia de cada luminaria, en base al uso del alumbrado público.

Tabla N° 1.3
Clasificación de lámparas

Tipos			Uso	Eficiencia
Incandescencia	Lámpara de filamento		Sólo se justifica en poblaciones aisladas, en forma provisional o en casos especiales; no recomendable	Baja
Fotoluminiscencia	Fluorescentes		Recomendado ocasionalmente para pasos a desnivel y	Media/alta
	Descarga gaseosa de alta intensidad	Sodio de alta presión	Alumbrado en exteriores, ocasionalmente en locales interiores grandes; recomendable	Alta
		Aditivos metálicos	Fachadas y monumentos, parques y jardines	Media/alta
Electroluminiscencia	Luz emitida por diodos	LED	Alumbrado en exteriores e interiores recomendable	Alta

Fuente: (Lara et al., 2009)

1.4. Tipos de luminarias utilizadas en alumbrado público

Lámparas de Mercurio de Alta Presión

En estas lámparas, la descarga tiene lugar en un tubo de descarga de cuarzo. Una parte de la radiación de la descarga se da en forma de luz, en la región visible del espectro, pero otra parte se emite en la región ultravioleta. Este tipo de lámparas la distribución espectral abarca casi todo el espectro visible lo que nos proporciona una luz blanca amarilla mucho más agradable

que la proporcionada por las lámparas de baja presión.

El funcionamiento de estas lámparas se da a temperaturas elevadas, a una alta presión y el tubo de descarga debe soportar una gran agresión química que produce el sodio. El tubo está rodeado por una ampolla en el vacío. La tensión de encendido de estas lámparas es muy elevada y su tiempo de arranque es muy breve.

Eficacia luminosa

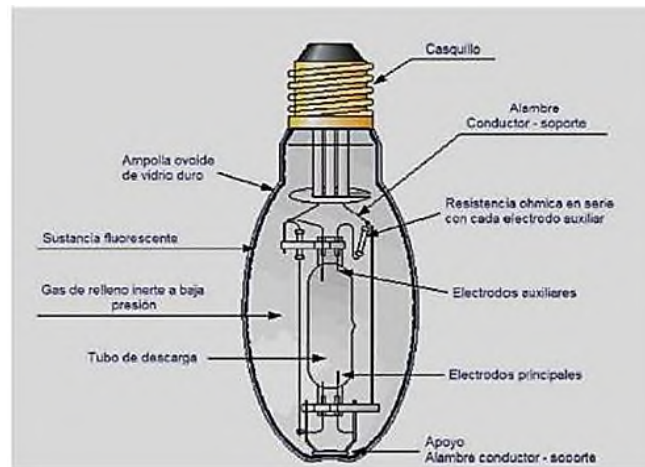
La eficacia luminosa de aquellas que contienen recubrimientos fluorescentes es mayor que las que no lo tienen. Por ejemplo, una lámpara de igual potencia con recubrimiento fluorescente de 250 W llega a 51 lm/W o mayor frente a 46 lm/W en el caso que no contenga dicho recubrimiento. Además, la eficacia luminosa depende de la potencia, por ejemplo, para una lámpara de mercurio de alta presión de color mejorado de 80 W es de alrededor de 41 lm/W frente a 59 lm/W para una lámpara de 1 kW. Cabe observarse que la eficacia de una lámpara de vapor de mercurio es muy inferior a las de fluorescentes y de sodio de alta presión.

Vida útil

La vida útil de una lámpara de mercurio de alta presión se encuentra entre valores de 12 000 a 16 000 horas, dependiendo de la potencia. En la Gráfica N° 1.4 se señala las características constructivas de las luminarias de mercurio de alta presión.

Gráfico N°1. 4

Característica constructiva típica de una lámpara de mercurio de alta presión



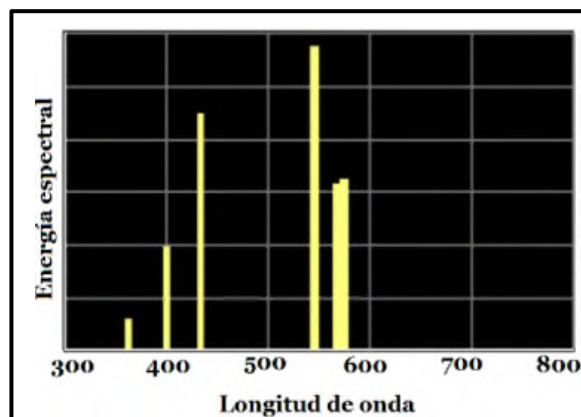
Fuente: (Chantera & Tobar, 2013)

Energía Espectral

En la Gráfica N°5 se indica la energía espectral de las luminarias de mercurio de alta presión, donde se visualiza el consumo mayor de energía.

Gráfica N° 1.5

Energía espectral



Fuente: (Chantera & Tobar, 2013)

Vapor de Sodio Alta Presión

Este tipo de lámparas a diferencia con las de baja presión es la cantidad de sodio que almacenan, estas lámparas poseen mayor cantidad, y además de este componente poseen mercurio y xenón, que son los que permiten que sea viable el encendido de la lámpara y a su vez limitan la elevación de calor en las paredes del tubo por el arco de descarga que se produce.

Eficacia luminosa

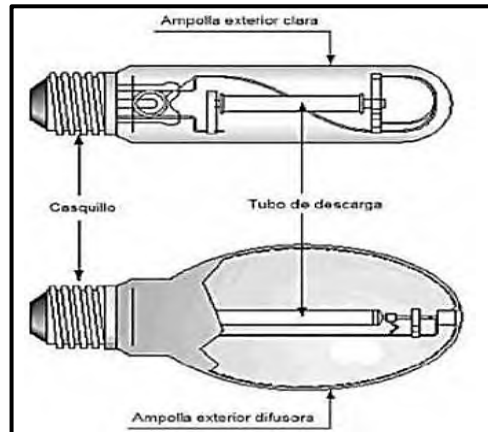
Como se indicó la eficacia decrece a medida que la presión de vapor de sodio aumenta debido al ensanchamiento y posterior desaparición del doblete del sodio, con lo que se elimina la radiación en la zona donde el sistema visual es más sensible. Otro factor que influencia la eficacia es la composición y presión del gas amortiguador y de arranque en el tubo de descarga. Como la conductividad térmica del sodio es alta, la eficacia luminosa es baja, pero a fin de contrarrestar este efecto se usan gases de amortiguación y arranque de baja conductividad térmica, a presiones mucho mayores que el vapor de sodio. Si se aumenta la presión del xenón desde 20 kPa a 200 kPa, la eficacia luminosa aumenta entre un 10 a 15 %, sin cambiar sus características de color, aunque la desventaja es que se necesitan ayudas extras para el arranque.

Vida útil

La vida útil para estas lámparas es de aproximadamente 16 000 horas dependiendo de su diseño. Sin embargo, este valor está limitado por el aumento en la tensión, aunque lento, que ocurre durante su vida. Este aumento es principalmente debido al ennegrecimiento de los extremos del tubo de arco debido a la dispersión del material emisor del electrodo. En la Gráfica N° 1.6 se señala las características constructivas de las luminarias de mercurio de alta presión.

Gráfica N° 1.6

Característica constructiva típica de una lámpara de mercurio de alta presión

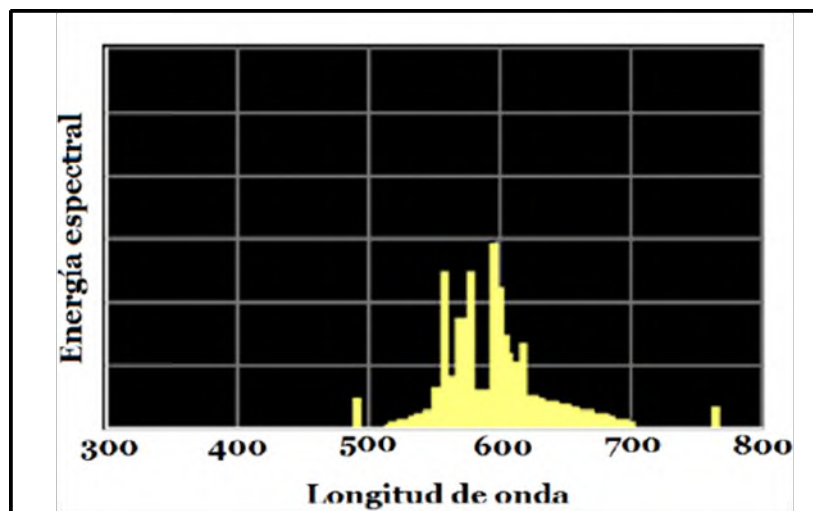


Fuente: (Chantera & Tobar, 2013)

En la Gráfica N° 1.6 se indica la energía espectral de las luminarias de mercurio de alta presión, donde se visualiza el consumo mayor de energía.

Gráfica N° 1.7

Característica constructiva típica de una lámpara de sodio de alta presión



Fuente: (Chantera & Tobar, 2013)

1.5.Luminarias LED

Las lámparas LED están conformados por bancos reunidos de diodos emisores de luz, es decir que una lámpara de este tipo está compuesta por una cierta cantidad de LEDs, esta cantidad va de acuerdo a la fuente luminosa a la que se desea llegar comparándose con lámparas de uso

común como las fluorescentes y las incandescentes. Esta lámpara se caracteriza además por ser de estado sólido.

Este tipo de lámpara LED es usada para iluminación exterior, está compuesta por bancos de LEDs de alta luminosidad, empleada en calles y avenidas. Fue creada con el objetivo de sustituir a sus equivalentes en alumbrado público o exterior, como son las lámparas de vapor de sodio y de mercurio. Por ser construida bajo similares condiciones de todas las lámparas LED, posee las mismas características de bajo consumo y de vida útil además de su impacto en el medio ambiente (Lara et al., 2009).

En la Gráfica N° 1.8 se indica los tipos de luminarias LED, que se usan comúnmente en el alumbrado público, debido a sus propiedades lumínicas.

Gráfica N° 1.8

Lámpara LED



Fuente: (Chantera & Tobar, 2013)

La Tabla N°1.4 indica las características de las luminarias LED, donde se especifica la vida útil y la eficiencia luminosa de cada luminaria.

Tabla N° 1.4

Lámpara LED

CARACTERÍSTICAS		
Vida Útil	30 000 - 50 000	Horas
Eficiencia Luminosa	70 - 120	Lm/W

Fuente: (Chantera & Tobar, 2013)

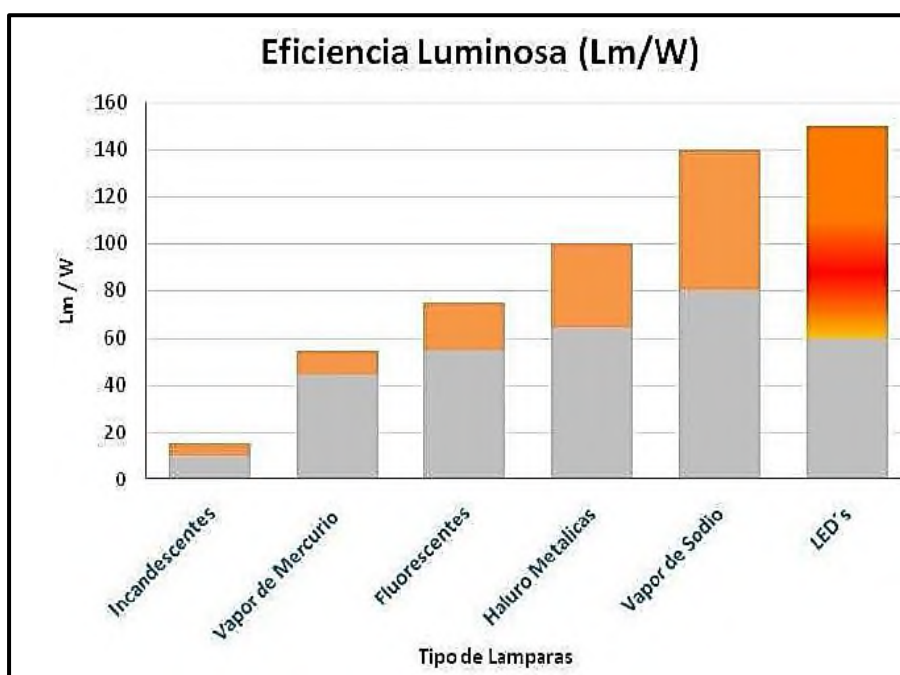
A continuación, se enumeran algunas de las ventajas de la iluminación LED frente a las tecnologías incandescentes y fluorescentes:

- Bajo consumo de energía, en esto se debe tener en consideración la tecnología con la que se está comparando el led, si lo que se requiere es hacer un reemplazo uno a uno con respecto a la tecnología de Na se usa la relación 81 W Na por 50 W en Led, se debe tener en cuenta que este reemplazo se realiza bajo los parámetros de eficiencia en el que es importante mantener los niveles de iluminación con un menor consumo de potencia activa; en cuanto a la relación de reemplazo uno a uno de las tecnologías fluorescentes, la relación es más estrecha debido a la buena efectividad de la tecnología fluorescente.
- Mayor tiempo de vida útil, oscila entre las 30 000 horas y 50 000 horas.
- En la mayoría de las luminarias de Alumbrado Público se encuentran dispositivos de protección contra sobrecorrientes independiente de la potencia de la misma, a diferencia de las luminarias de Sodio donde se encuentran fusibles para las luminarias con potencia mayor a 150 W.
- No existe presencia de mercurio evitando así la contaminación del medio ambiente, a diferencia de las demás tecnologías que cuentan con este componente.
- En iluminación interior, los tubos fluorescentes además de presentar mercurio producen campos magnéticos debido a su sistema de inducción magnética, es por esto que la tecnología Led presenta esta ventaja en relación a la tecnología Fluorescente al no producir campos magnéticos reduciendo de una manera significativa los niveles de radiación residual hacia el ser humano.
- En cuanto a su IRC (índice de reproducción cromática) presentan niveles superiores con respecto a las demás tecnologías, reproduciendo así mayores longitudes de onda lo que la hace más similar a la luz natural.

- Minimizan la contaminación por ruido producida por los balastos en las líneas de distribución y de usuarios finales.
- Se debe tener en consideración que se establece la comparación entre las luminarias de tecnología convencional versus su equivalente en tecnología led por flujo luminoso establecido a través de prueba de fotometría. (Chantera & Tobar, 2013)

En la Gráfica N° 1.9 se indica un diagrama comparativo de eficiencia entre algunos tipos de lámparas tratados en el apartado anterior:

Gráfica N° 1.9
Eficiencia Luminosa



Fuente: (Consejo Nacional de Energía, 2012)

La selección de uno u otro, así como el espaciamiento, altura y número de hileras, y el tipo de acabado de la superficie reflejante receptora de la luz, depende del criterio de diseño del sistema. Como se puede observar, hay que tomar en cuenta diferentes aspectos para alcanzar la calidad total del servicio. Los tipos de luminarios que se ilustran a continuación son los más usuales en alumbrado de vialidades y exteriores. El uso eficiente se alcanza cuando se ubican en los espacios y lugares adecuados. (López, 2015)

1.5.1. Parámetros de la iluminación LED

Para poder saber que tan bien se está iluminando un área determinada, es necesario tomar mediciones, para lo cual, se deben definir primero los parámetros relacionados con las mediciones de iluminación. Entre ellos se tiene:

Lumen: Es la unidad de la cantidad de luz o flujo luminoso (Φ) emitida por una fuente de luz puntual de una candela de intensidad dentro de un ángulo solido de un estero radian por unidad de tiempo (un segundo).

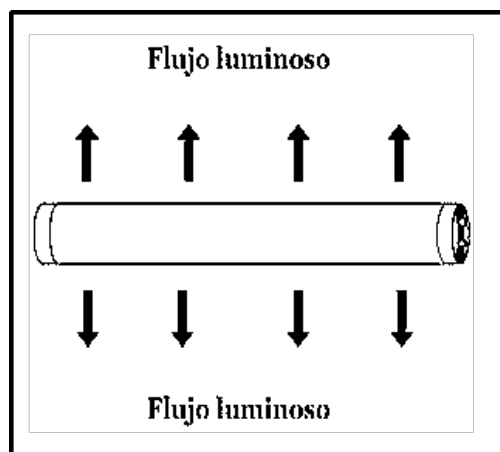
Candela: Es la unidad de la intensidad luminosa (I) de una fuente de luz en una dirección dada producida en un 1/600 000 de metro cuadrado de un cuerpo negro radiante a la temperatura de solidificación del platino.

$$I = \frac{\Phi}{\omega} = \frac{\text{lumen}}{\text{esteroradian}} = \text{Candela}$$

Flujo luminoso: es la cantidad total de luz radiada o emitida por una fuente durante un segundo y que produce sensación luminosa en el ojo humano. En la Gráfica N° 1.10 se señala el flujo luminoso de las luminarias.

Gráfica N° 1.10

Flujo luminoso



Fuente: (Consejo Nacional de Energía, 2012)

Rendimiento luminoso (eficacia luminosa): Indica el flujo luminoso que emite una fuente de luz por cada unidad de potencia eléctrica consumida para su obtención. Se representa por la letra griega ε y su unidad es el lumen/vatio (lm/W).

$$\varepsilon = \frac{\Phi_L}{P} \text{ [lm/W]}$$

Donde:

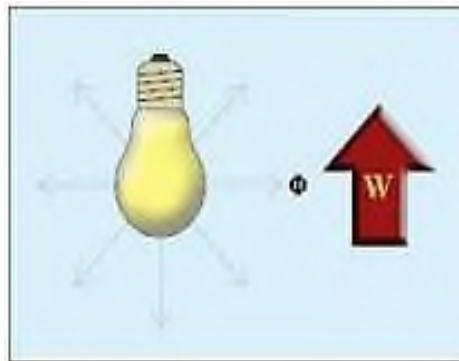
ε : Eficacia luminosa (lm/W)

P: Potencia activa (W)

En la Gráfica N° 1.11 se señala la representación de la eficacia luminosa o del rendimiento luminoso:

Gráfica N° 1.11

Representación de la eficacia luminosa



Fuente: (Escobar Simancas, s. f.)

Intensidad luminosa: Es la relación entre el flujo luminoso emitido por una fuente de luz en una dirección por unidad de ángulo sólido en esa misma dirección, medido en estereorradianes (sr) (Consejo Nacional de Energía, 2012).

$$I = \frac{\Phi_L}{\omega} \text{ [lm/W]}$$

$$\omega = \frac{\Delta}{r^2} \text{ [lm/W]}$$

Donde:

I: Intensidad luminosa (cd)

Φ L: Flujo luminoso (lm)

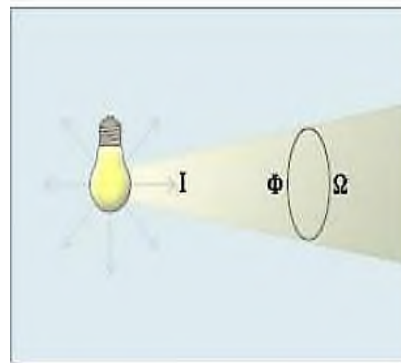
ω : Ángulo sólido (sr)

r: Radio de proyección (m)

En la Gráfica N° 1.12 se señala la representación de la intensidad luminosa de las luminarias, estos conceptos se estudiarán más adelante.

Gráfica N° 1.12

Representación de la intensidad luminosa



Fuente: (Escobar Simancas, s. f.)

1.5.2. Factor de Uniformidad General de Iluminancia LED

Es la relación entre el nivel de iluminación mínimo y el nivel de iluminación medio sobre una superficie de trabajo. Se simboliza por U_m y su unidad está dada en por ciento (%). Su expresión es:

$$U_m = \frac{E_{min}}{E_{med}}$$

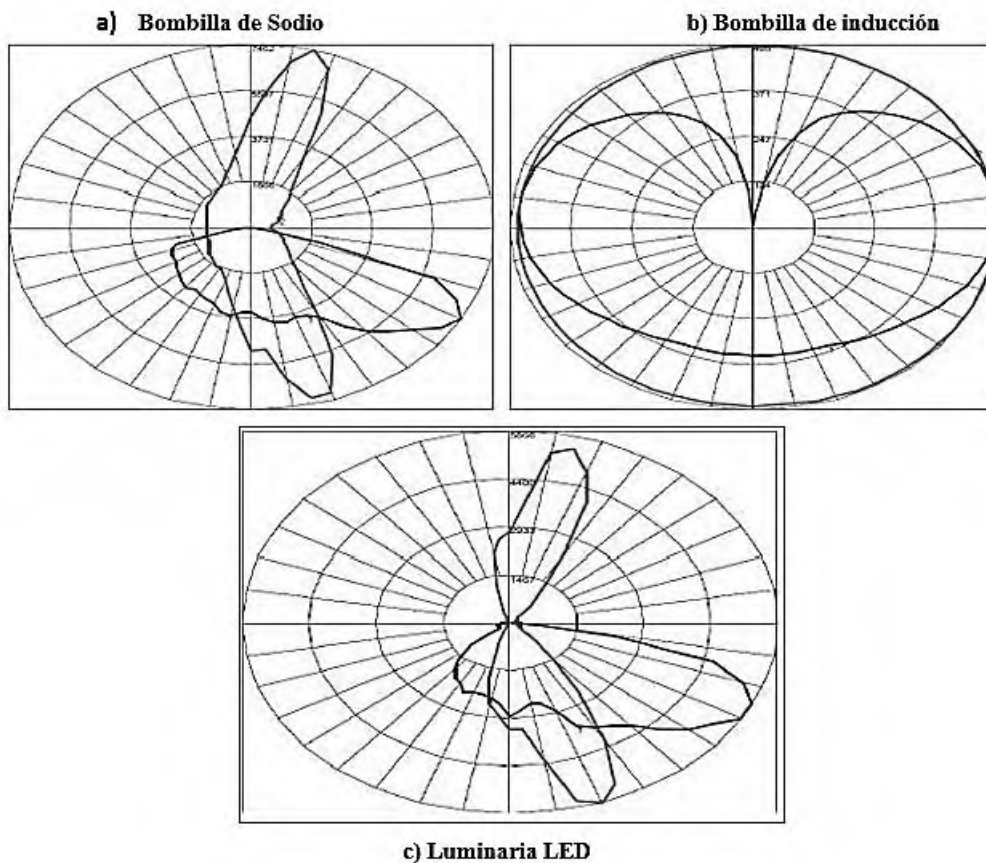
1.6. Curvas de distribución luminosa de lámparas de alumbrado público

También se conocen como curvas fotométricas y es un diagrama polar donde se representa la intensidad luminosa de una luminaria, estas curvas se obtienen al tomar mediciones de la intensidad luminosa desde distintos ángulos alrededor de una luminaria. Cada luminaria tiene

una curva de distribución en particular, lo cual permite escoger la más adecuada para una aplicación determinada. En la Gráfica N° 1.13 se representa las curvas de distribución luminosa de las luminarias de estudio.

Gráfica N° 1.13

Curvas fotométricas de lámparas de estudio



Fuente: (Acuña, 2011)

1.6.1. Nivel de Luminancia

La luminancia, es la medida de la brillantez de la superficie con la cual es percibida por un observador, por esto, el nivel de luminancia en la superficie de una calzada, influye sobre la sensibilidad a los contrastes del ojo del conductor y sobre el contraste de los obstáculos en la vía con respecto al fondo; tiene una influencia directa sobre el rendimiento visual de los conductores.

El nivel de luminancia varía de acuerdo a la importancia de la vía y se tienen valores establecidos, recomendados por las normas internacionales. La luminancia se designa por la letra L.

1.6.2. Uniformidad de luminancia

El rendimiento como para la comodidad visual del conductor de un vehículo. Existen dos criterios de uniformidad, el uno es la uniformidad global designada por U_o y el otro criterio es el de la uniformidad longitudinal designada por U_l .

La uniformidad global y longitudinal, se definen así:

$$U_o = \frac{L_{min}}{L_{med}}$$

$$U_o = \frac{L_{min}}{L_{max}}$$

Donde:

Lmin: Luminancia mínima

Lmed: Luminancia media

Lmax: Luminancia máxima

1.6.3. Factor de Utilización

El factor de utilización de una luminaria se puede definir como la relación entre el flujo luminoso que llega a la superficie, y el nominal emitido por la lámpara instalada. Este factor se obtiene de las curvas de utilización de la luminaria facilitadas por el fabricante.

$$f_u = \frac{\Phi_{superficie}}{\Phi_{lámpara}}$$

$\Phi_{\text{superficie}}$: Flujo de superficie

$\Phi_{\text{lámpara}}$: Flujo de lámpara

1.6.4. Factor de Mantenimiento

En el alumbrado público debe tenerse en cuenta al realizar los cálculos de la depreciación luminosa, a causa del envejecimiento de la lámpara y de la luminaria, por una parte, la pérdida de luz, por la suciedad que se va depositando sobre ambos elementos. El factor de mantenimiento puede considerarse como el producto de tres componentes:

$$FM = FE * DLB * Fb \quad (9)$$

Donde:

FM : Factor de Mantenimiento

FE: Depreciación de la luminaria por suciedad

DLB: Depreciación por disminución de flujo luminoso de la bombilla

Fb: Factor de balastro

1.7. Relación entre separación y altura de los puntos de luz

Esta relación afecta directamente a la uniformidad de la iluminación que se consigue sobre la calzada, a los valores absolutos de las luminancias y a las características fotométricas de la luminaria.

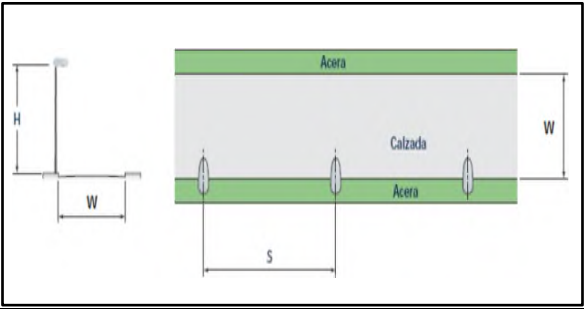
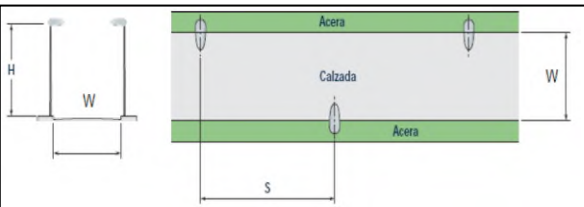
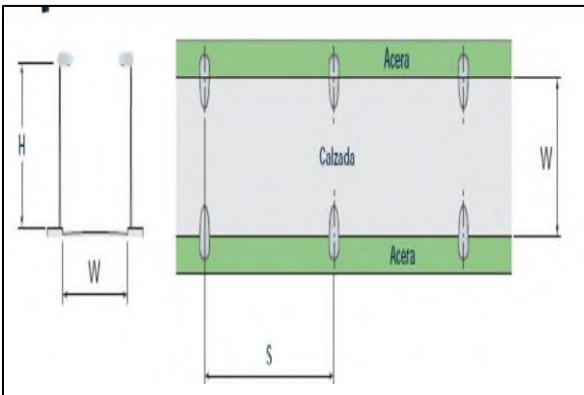
A medida que esta relación disminuye, la uniformidad de la iluminación es más elevada y mejor el reparto de luminancias, consiguiéndose una mayor comodidad visual para los usuarios de la calzada, esto causa un inconveniente ya que la instalación tendría un costo mayor, ya que es necesario distanciar menos las unidades luminosas o situar los puntos de luz a una mayor altura. De aquí que esta relación debe ser un compromiso entre las necesidades cualitativas de la iluminación y las posibilidades económicas por satisfacerlas (Chabla et al., 2015).

1.7.1. Sistema de localización de las luminarias

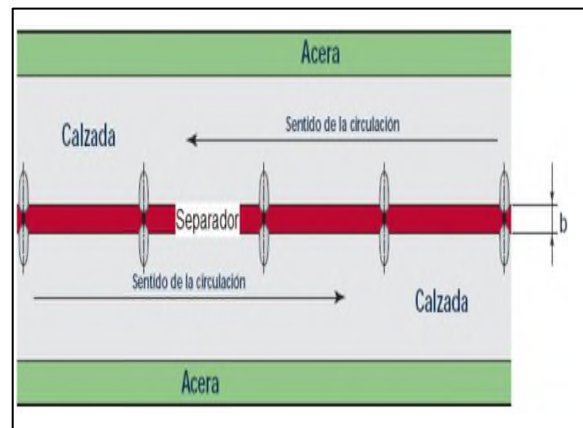
Existen cuatro tipos de disposición, que son: disposición unilateral, disposición bilateral alternada (Zig-Zag), disposición bilateral opuesta, y disposición central doble. Se pueden obtener otras disposiciones de las combinaciones de estos cuatro tipos básico (Lara et al., 2009).

En la Tabla N° 1.5 se indica la disposición de las luminarias en la vía:

Tabla N° 1.5
Comparación de luminarias

Disposición de las luminarias	Diagrama
Disposición Unilateral: en esta disposición se instalan las luminarias a un solo lado de la vía. Para esto se debe utilizar la luminaria más apropiada que cumpla con los requisitos fotométricos, altura de montaje, interdistancia y menor potencia eléctrica	
Disposición Bi lateral Alternada (Zig – Zag): Cuando la vía presenta un ancho W superior a la altura de montaje H de las luminarias ($1,0 < (W/H) < 1,50$)	
Disposición Bilateral Opuesta: Cuando la vía presenta un ancho W muy superior a la altura de montaje H de las luminarias ($1,25 < (W/H) < 1,75$). En este caso, la iluminación consta de dos filas de luminarias: una a cada lado de la vía y cada luminaria se encuentra enfrentada con su correspondiente del lado contrario	

Disposición central doble: Donde los carriles de circulación en una dirección y otra se encuentran separados por un pequeño parterre que no debe ser menor de 1,5 m de ancho y no mayor a 4 m de ancho



Fuente: (Rosero & Bolaños, 2016)

1.7.2. Limitación del Deslumbramiento

El deslumbramiento es el fuerte brillo que se presenta en el campo visual del conductor, este brillo es causado por la distribución fotométrica de la luminaria. El deslumbramiento hace que la visibilidad del conductor disminuya debido a los contrastes que se presentan en la vía. Conviene distinguir dos formas de deslumbramiento: el fisiológico que disminuye inmediatamente la capacidad visual del ojo por consiguiente la visibilidad y, el deslumbramiento psicológico, disminuye la comodidad visual y puede provocar nerviosismo y fatiga. Otros factores como superficies con alto factor de reflexión, superficies pulidas, señales y fuentes de luz extrañas, pueden también producir deslumbramiento. Normalmente, para cualquier luminaria o lámpara dada, el deslumbramiento se reduce cuando:

- Aumenta el área proyectada de la luminaria;
- Su posición se aleja de la línea de la vista, y
- El fondo (compuesto de la totalidad del campo visual) contra el cual se ve la luminaria es más brillante

Si están presentes varias luminarias en el campo visual, el aumento de deslumbramiento resultante es acumulativo.

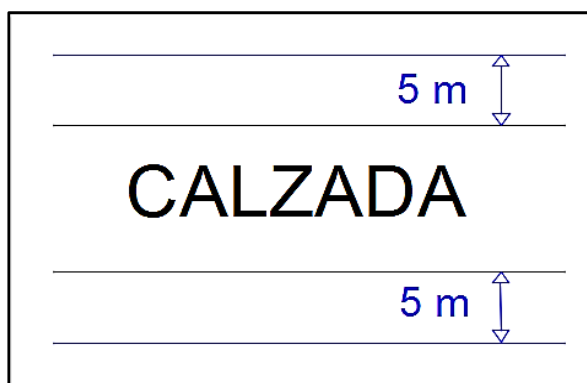
1.7.3. Coeficiente de iluminación en los alrededores

El coeficiente de iluminación en los alrededores es una medida de la iluminación en las zonas limítrofes de la vía. De esta manera se asegura que los objetos, vehículos o peatones que se

encuentren allí sean visibles para los conductores. Se obtiene calculando la iluminancia media de una franja de 5 m de ancho a cada lado de la calzada (Delgadillo et al., 2010).

En la Gráfica N° 1.14 se señala el espacio que debe existir entre las luminarias y la calzada.

Gráfica N° 1.14
Coeficiente de iluminación en alrededores



Fuente: (Delgadillo et al., 2010)

Desde el punto de vista constructivo y de iluminación, considerando también la importancia y características de la calle por luminar, existen distintas posibilidades de disposición de las luminarias, las más comunes son las que se mencionan a continuación.

1.8. Guiado visual y óptico

Para una circulación segura deben ser perfectamente visibles: el trazado de la vía, los límites de la misma, los posibles cruces y cualquier otro punto singular. El sistema de iluminación ha de contribuir a lograr esto, y para ello se requiere necesario lo siguiente:

- Incrementar la visibilidad de la calzada con respecto a las zonas aledañas y la visibilidad de las señales que sirve como guía y es parte de la calzada.
- La disposición de las luminarias ha de permitir detectar la suficiente distancia de la vía en el curso de la vía, los puntos de cruce y otros puntos singulares que contribuyan al guiado visual

A continuación, se define el guiado visual y óptico:

1.8.1. Guiado visual

El cumplimiento de las condiciones requeridas de luminancia y uniformidad proporcionará una visibilidad suficiente de la calzada y de los alrededores, siempre que las luminancias se mantengan razonablemente aún en condiciones meteorológicas adversas.

1.8.2. Guiado óptico

La alineación de las luminarias en una instalación de alumbrado público, es de suma importancia para el guiado óptico. Las luminarias visibles señalan el trazado de la vía, si una luminaria está mal situada puede inducir a una falsa interpretación del trazado de la vía, crear situaciones de peligro y originar accidentes.

La disposición de los brazos o ménsulas y de las luminarias debe señalar el trazado de la vía pública, en consonancia con otras ayudas al guiado visual y debe llamar la atención a una distancia suficiente de los puntos de peligro, sin el riesgo de falsas interpretaciones o de confusión

1.9. Altura de Montaje de iluminación

La altura de montaje depende de la potencia luminosa de la fuente de luz, la distribución de la intensidad luminosa de la luminaria y el ancho de la calzada; mientras más potente sea la fuente de luz y más ancha sea la calzada, mayor debe ser la altura de montaje requerida, para evitar excesivo deslumbramiento y proveer suficiente uniformidad transversal.

Por regla general, se considera apropiada una altura de montaje de 7,5 a 10,5 m; mientras que, para luminarias de muy alta potencia luminosa, se recomienda una altura de 12 m o mayor. En la Tabla N° 1.6, se muestran la altura de montaje de luminarias para diferentes potencias de lámparas.

Tabla N° 1.6

Altura de montaje de luminarias

Lámpara		Altura de montaje
Sodio alta presión	70 W	Hasta 8 m de altura
Mercurio	127 – 175 W	
Sodio de baja presión	35 – 55 W	
Sodio alta presión	150 – 250 W	Entre 8 y 12 metros
Mercurio	250 – 400 W	
Sodio de baja presión	90 – 135 W	
Sodio alta presión	400 W	Mayores a 12 metros
Mercurio	400 W	
Sodio de baja presión	180 W	

Fuente: (Rosero & Bolaños, 2016)**1.9.1. Saliente de las luminarias**

Para asegurar la máxima uniformidad de luminancia y acentuar el "efecto faro" (cambio de color de los puntos luminosos, o de su ubicación), el saliente no debe exceder un cuarto de la altura de montaje, o un cuarto del ancho de la calzada, cualquiera que sea mayor. Un saliente excesivo reduce la visibilidad de los bordillos, evitando la visualización de posibles obstáculos en el lado de calzada, de las aceras y puede presentar problemas mecánicos y estéticos.

La longitud del brazo debe ser seleccionada de acuerdo al ancho de la calle como se sugiere a continuación en la Tabla N° 1.7:

Tabla N° 1.7

Longitud del brazo de las luminarias

Ancho de la Calle	Longitud de brazo
4 m a 8 m	1,20 m
8 m a 10 m	1,80 m
10 m o más	2,40 m

Fuente: (Lara et al., 2009)

1.9.2. Ubicación de las luminarias

Para la ubicación de las luminarias, se hacen las siguientes recomendaciones:

- La disposición unilateral se admite generalmente cuando el ancho (W) de la vía por iluminar es inferior a la altura (H) de las luminarias ($W < H$).
- En el caso de vías dobles, si el separador es estrecho y si las dos vías responden a la condición ($W < H$), la disposición más económica consiste en colocar sobre el separador postes provistos con dos luminarias que dirigen su flujo luminoso, respectivamente, hacia cada una de las vías laterales; sin embargo, la mejor solución luminotécnica consiste en colocar las luminarias en direcciones opuestas sobre el borde exterior de las dos vías.
- Las disposiciones bilaterales opuesta y alternada se recomiendan por lo general cuando el ancho de la vía es superior a la altura de las fuentes ($W > H$). Estas disposiciones aseguran en efecto una buena repartición de las zonas brillantes sobre la calzada. Para una vía medianamente ancha se recomienda la disposición bilateral alternada, mientras que para la vía muy ancha se recomienda adoptar la disposición bilateral opuesta.
- En el caso de vías dobles, con un separador medianamente ancho (3 a 5 m), se recomienda una disposición de las luminarias en direcciones opuestas sobre cada borde exterior de las dos vías, con una serie de luminarias intercaladas sobre el separador central si fuera necesario. Esto equivale a la disposición bilateral alternada para cada una de las calzadas (Lara et al., 2009).



EDITORIAL ANDES COGNITIO

CAPÍTULO II

TECNOLOGÍA LED APLICADA AL ALUMBRADO PÚBLICO



CAPÍTULO II

TECNOLOGÍA LED APLICADA AL ALUMBRADO PÚBLICO

2.1. Postes de alumbrado público

Para alumbrado exterior en sus distintas modalidades, ya sea de calles avenidas y jardines. Uno de los elementos complementarios en algunos casos para luminarias, son los postes, llamados elementos de montaje pero que deben cumplir con ciertas solicitudes mecánicas, como son: la carga que representa el viento, la carga por hielo o nieve en algunos casos, además deben resistir la acción corrosiva de los agentes atmosféricos y también poco pesados para facilitar el transporte, su instalación o su sustitución. Pueden tener distintas formas de acuerdo a su aplicación y desde el punto de vista del material, pueden estar constituidos de:

DE ACERO: Son muy usados por sus propiedades mecánicas cuando se emplean en ambientes corrosivos. Deben de ser debidamente tratados (galvanizados y/o con pintura anticorrosiva). Tienen la ventaja de tener un peso inferior a los postes de cemento.

DE CEMENTO ARMADO: Estos postes también son muy usados, sobre todo en algunas áreas corrosivas, tienen la ventaja de tener una larga duración sin requerir prácticamente de mantenimiento, tienen la desventaja de su peso que es elevado y que se refleja sobre los costos de montaje e instalación.

DE ALUMINIO: El peso es mucho menor que el de los dos tipos anteriores, esto reduce la dificultad constructiva, prácticamente no requieren mantenimiento, puesto que no son atacados por el medio ambiente. La desventaja de estos postes es su costo, que generalmente es superior a los de acero o de concreto armado. En la Tabla N° 2.1 se indica la longitud del brazo que va dependiendo del ancho de la calle.

Tabla N° 2.1

Longitud del brazo de las luminarias

Ancho de la calle (metros)	Longitud del brazo (metros)
4 a 8	1,20
8 a 10	1,80
10 o más	2,40

Fuente: (Lara et al., 2009)

2.1.1. Espaciamiento entre postes de alumbrado público

Este parámetro depende mucho de la calidad fotométrica de la luminaria y debe ser calculado en base a las curvas isolux propias de cada luminaria. Para una luminaria y fuente de luz en particular, montada a una altura predeterminada, el espaciamiento está determinado por el nivel promedio de luminancia recomendado para la calzada en consideración.

Distancia entre luminarias de alumbrado público

Cuando está definida la altura de la luminaria, se puede calcular la distancia entre postes o centros luminosos. Valores indicativos de la relación distancia entre luminarias contra altura como valores indicativos se dan en la Tabla N° 2.2:

Tabla N° 2.2

Relación distancia entre luminarias a la altura de montaje

Tipo de luminaria	Lámpara con gran superficie emitente	Lámpara de emisión concentrada (clara)
Cubierta	2,8 a 3,2	3,0 a 3,5
Semicubierta	3,0 a 3,5	3,2 a 3,5
Abierta	Diferente a 3,5	Diferente a 3,5

Fuente: (Lara et al., 2009)

Superficie de la calzada

Las características de reflexión de las superficies de la calzada, varían considerablemente y están influenciadas por:

- a) La claridad del color
- b) La textura
- c) El grado de desgaste y suciedad
- d) La presencia de agua.
- e) Las características de reflexión afectan directamente

Las características de reflexión afectan directamente tanto el nivel como la uniformidad de luminancia de la calzada y deben, por tanto, ser tomadas en cuenta en el diseño del sistema de alumbrado. No existe una clasificación exacta de los pavimentos de las vías ni un método simple que permita clasificarlos desde sus características fotométricas, sin embargo, se hace la siguiente distinción:

- a) Pavimentos claros (factor de reflexión del orden 0,20)
- b) Pavimentos oscuros (factor de reflexión del orden 0,10)
- c) Pavimentos brillantes, que presentan un índice de reflexión mixto, como es el caso de todos los pavimentos lisos, ya sea por construcción o por uso continuo
- d) Pavimentos mate, en los cuales el índice de reflexión es aproximadamente difuso (es el caso de la mayor parte de los pavimentos antideslizantes modernos, más o menos en estado nuevo).

El pavimento es de color claro y de superficie rugosa. Debe además presentar una gran resistencia a la fricción y al deslizamiento de los vehículos y su perfil debe ser tal que el agua lluvia se evacúe rápidamente.

2.1.2. Procedimientos de diseño de alumbrado público

Para conseguir un alumbrado eficaz, es esencial que la instalación esté bien proyectada, por lo que se sugiere seguir los siguientes pasos:

- Clasificación de la zona y de la vía a iluminarse.
- El nivel de iluminación (tipo de lámpara) apropiado según la clasificación.
- Selección de las luminarias de acuerdo con la distribución de luz requerida. La ubicación apropiada de las luminarias (altura de montaje, longitud del brazo y separación) para proporcionar la iluminación requerida en cantidad y calidad.
- La ubicación apropiada de las luminarias (altura de montaje, longitud del brazo y separación) para proporcionar la iluminación requerida en cantidad y calidad.

Los criterios de calidad más importantes para una instalación de alumbrado público desde el punto de vista del rendimiento y comodidad visual son:

- Nivel de luminancia
- Uniformidad de luminancia
- Deslumbramiento
- Nivel de iluminación

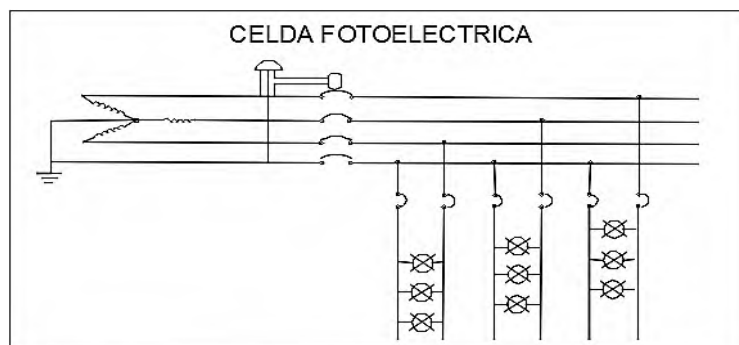
2.1.3. Alimentación y sistema de distribución de energía eléctrica al Alumbrado Público

Las luminarias se conectan en paralelo con su fuente de alimentación y el voltaje depende de la potencia instalada. El sistema de distribución preferido es por lo general el trifásico con neutro. Distribuyendo las lámparas entre las fases y neutro, de manera que se equilibran las cargas.

En la Gráfica N° 15 se indica el diagrama de alimentación trifásica con celdas fotoeléctricas.

Gráfica N° 2.1

Diagrama de alimentación trifásica con celda fotoeléctrica de encendido



Fuente: (Lara et al., 2009)

Este sistema de distribución es usado en calles y centros urbanos, así como para calles que se encuentran fuera de las zonas de alta densidad de población. Cada sección de alimentación puede variar entre 300 y 500 metros, con la posibilidad de tener distintos puntos de alimentación. La alimentación con sistemas monofásicos (fase - neutro) se recomienda que se adopte solo en los casos de instalación con cargas pequeñas, es decir, que se alimente a un número reducido de secciones de lámparas.

Para cualquiera de los sistemas de alimentación, la caída de tensión debe estar limitada al 4 o 5 %, este valor está relacionado con la carga (corriente) y la distancia a que se alimentan, por lo que en los circuitos derivados a cada grupo de luminarias se pueden emplear conductores calibre

Núm. 12 o 10 AWG, claro está que, a distancias grandes con valores de carga elevados, se deben tener secciones de conductores mayores. El sistema de mando o control de los sistemas de iluminación de calles se puede hacer por medio de un relevador o celda fotoeléctrica o, en ocasiones, por medio de un interruptor termomagnético general con interruptores para controlar cada circuito derivado

2.2. Selección del Transformador

El tipo de transformador a implementar en los lugares de intervención del OR es de tipo convencional; estos deben ser de fácil adaptación en posteadura exterior, sumergidos en aceite para evitar los aumentos de temperatura y daños de aislamiento y también deberán ser autorregulados. En cuanto a la capacidad del transformador a seleccionar cabe destacar que este está determinado por el valor nominal de la carga a instalar (KVA de la carga) pudiendo consumir el 100 % de capacidad del transformador; el OR establece que los transformadores a usar serán de 15 y 25 KVA monofásicos para iluminación independiente de vías.

En otros lugares como escenarios deportivos, zonas verdes o áreas especiales donde los requerimientos lumínicos sean mayores se aceptará la presencia de transformadores de más capacidad para suplir la carga de estas luminarias que en la mayoría de casos son proyectores y reflectores.

2.2.1. Cálculo de la carga por tramos

El cálculo de la carga instalada en un circuito de alumbrado público debe hacerse por tramos, circuitos o de la manera más cómoda y ordenada, a continuación, se presenta la forma como se direcciona dicho cálculo.

$$S(va) = \sum_{i=1}^k (\#luminarias) \times (S \text{ de cada luminaria})$$

Donde:

S= Potencia aparente total instalada (kVA).

K= Número de referencias de luminarias distintas presentes en el diseño.

I= Tipo de luminaria.

#Luminarias (i) = Número de luminarias instaladas del tipo i en el tramo en consideración.

S/Luminarias (i) = Potencia aparente de la luminaria i.

2.2.2. Continuidad de Servicio

De acuerdo a la Regulación CONELEC 008/11, señala que el alumbrado público general deberá encendido durante la noche y durante las horas del día en las cuales las condiciones climáticas o de seguridad determinen que sea necesario la iluminación artificial.

El tiempo medio de encendido del alumbrado público general será de doce (12) horas. Dependiendo del tipo de alumbrado y si está ubicado en zonas en las que sea posible su apagado, sin molestar la circulación normal de personas (ciclovías, paseos de parques entre otros), se deberá ubicar dispositivos temporizadores para el control de su operación en horarios especiales (Carachure & Sandoval, 2012).

2.2.3. Calidad de Energía

La calidad de energía, se refiere a qué tan cercanas son las señales de voltaje y corriente respecto a la señal fundamental para la operación del sistema de potencia, es decir la señal sinusoidal. Las perturbaciones que afectan la calidad de potencia se pueden clasificar de acuerdo con varios criterios como: amplitud, ancho de banda, duración, permanentes o aleatorias. Para analizar las perturbaciones de tipo permanente, se suele evaluar el comportamiento del sistema entre la frecuencia fundamental y el armónico 50 (Consejo Nacional de Energía, 2012).

Tomando como criterio permanencia o aleatoriedad de las perturbaciones, surges, sags, y swells que se ubican en la categoría de aleatorios, mientras que los armónicos, inter- armónicos, flicker y fluctuaciones de voltaje, se consideran de naturaleza permanente, es decir ocurren en el estado estable del sistema. De las perturbaciones de tipo permanente mencionadas anteriormente, solo los armónicos serán analizados en este proyecto de investigación. La presencia de estos equipos en la red hace que se produzcan perturbaciones en la misma, por lo que este problema está

directamente relacionado con la calidad de onda. En la Tabla N° 2.3 se muestran las principales perturbaciones de acuerdo al parámetro afectado.

Tabla N° 2.3

Perturbaciones de la red

Parámetro afectado	Tipo de perturbación
Amplitud	Ruidos en modo diferencial y modo común Impulsos en modo diferencial y modo común Variaciones lentas de voltaje Variaciones rápidas de voltaje Flicker Microcortes Cortes largos
Formas de onda permanente	Armónicos (distorsión)
Frecuencia	Variaciones de frecuencia
Simetría	Desequilibrios (asimetría)

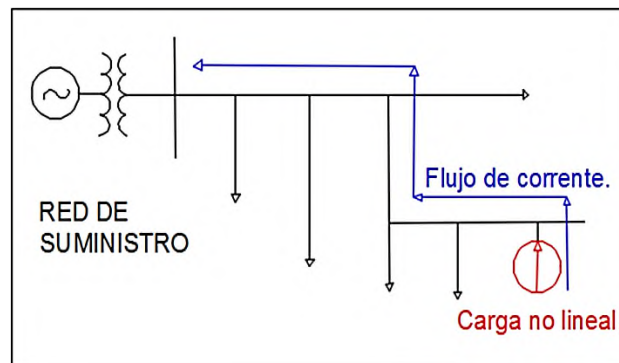
Fuente: (Delgadillo et al., 2010)

2.2.4. Distorsión Armónica

La distorsión armónica de corriente y de voltaje aparece principalmente en presencia de cargas de comportamiento no lineal presentes en el sistema. Las cargas no lineales son aquellas en las cuales la corriente no es proporcional a la del voltaje aplicado. La Gráfica N° 2.2 muestra un ejemplo de la circulación de las corrientes armónicas (Consejo Nacional de Energía, 2012).

Gráfica N° 2.2

Flujo normal de corrientes armónicas



Fuente: (Escobar Simancas, s. f.)

Se puede observar como el flujo normal de las corrientes armónicas, sin bancos de capacitores, va desde la carga no línea hacia la red de suministro, debido a que éstas fluyen hacia donde se encuentran las impedancias más bajas.

2.2.5. Indicadores de calidad

Para cuantificar la distorsión existente en una señal es preciso definir parámetros e índices que determinen su magnitud y contar con equipos de medición adecuados. A continuación, se presenta los siguientes índices:

2.3. Distorsión Armónica

La distorsión armónica es causada por varios dispositivos electrónicos utilizados en oficinas o en la industria, como, por ejemplo: fax, computadoras, impresoras, fotocopias y variadores de velocidad. Estos dispositivos distorsionan la señal senoidal corriente y voltaje en los circuitos eléctricos, corrientes transitorias son producidas, algunas de las cuales contribuyen al incremento de la corriente que circula por el neutro en un sistema trifásico.

La distorsión armónica total (THD) se mide en miliamperios y en ocasiones es expresada como un porcentaje de la corriente no distorsionada utilizada por el sistema de iluminación. Debido a que las corrientes armónicas no son útiles para el sistema de iluminación, estas pueden contribuir a la reducción del factor de potencia.

De acuerdo en la Tabla N° 2.4 se señala los rangos de distorsión armónica total para los diferentes balastos de las luminarias.

Tabla N° 2.4

Rangos de distorsión armónica total para algunos balastos

Tipo de Balastro	Rango
Electromagnético	25 – 30 %
Electrónico de Fluorescentes Compactas	18 – 80 %
Electrónico Estándar	<20 %
Electrónico de baja THD	<10 %

Fuente: (Chantera & Tobar, 2013)

Los balastos producen generalmente menos de 20 % de THD, aunque hay ciertos balastos electrónicos que pueden producir menos del 10 % de THD.

2.3.1. Distorsión total armónica de voltaje y corriente (THD)

El THD representa el porcentaje total de la distorsión de la señal respecto al valor de la fundamental. Ésta puede ser calculada tanto para la corriente como para el voltaje.

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} I_h^2}}{I_1}$$

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} V_h^2}}{V_1}$$

Donde:

I_h O V_h: Componente armónica de corriente o voltaje respectivamente.

h: Número del armónico

h_{máx}: Armónico máximo definido según el criterio o norma utilizada

I₁ O V₁: Componente fundamental de corriente o voltaje respectivamente

THDI o THDV: Tasa de distorsión total de corriente o voltaje respectivamente

2.3.2. Distorsión armónica individual (THD)

Mide la relación entre la componente armónica “n” de una onda periódica de voltaje o corriente y la componente fundamental de la misma onda.

$$IHD = \frac{I_h}{I_1}$$

$$IHD_V = \frac{V_h}{V_1}$$

Donde:

I_h O V_h: Componente armónica de corriente o voltaje respectivamente.

h: Número del armónico.

I₁ O V₁: Componente fundamental de corriente o voltaje respectivamente.

THDI o THDV: Tasa de distorsión total de corriente o voltaje respectivamente.

2.3.3. Límites de Distorsión de Voltaje

Es importante notar que la definición de la distorsión armónica total THD que se utiliza es diferente a la convencional ya que se expresa la distorsión en función al voltaje nominal, que es un valor constante para cada usuario, estableciéndose así, una base fija de evaluación a lo largo del tiempo.

Para el estudio de la distorsión armónica de voltaje, en este proyecto de investigación se toma como referencia la norma IEEE 519 – 1992. De acuerdo en la Tabla N° 2.5 se señala los límites de distorsión armónica de voltaje.

Tabla N° 2.5

Límites de la distorsión armónica de voltaje para sistemas de distribución según la norma
IEEE

Tensión	Distorsión armónica de tensión individual %	Distorsión de tensión total, THD [V_n]%
$U \leq 69 \text{ kV}$	3,0 %	5,0 %
$69 \text{ kV} < U \leq 161 \text{ kV}$	1,5 %	2,5 %
$U > 161 \text{ kV}$	1,0 %	1,5 %

Fuente: (CONELEC, 2012)

2.3.4. Análisis de distorsión armónica en iluminación LED

Los artículos consultados sobre la distorsión armónica en iluminación LED, realizaron las mediciones necesarias para evidenciar los armónicos generados expresados en porcentaje; escogen diferentes luminarias LED de ensayo, cada una con su respectiva potencia, la mayoría se fundamentan en iluminación LED fija y otros en iluminación LED dimerizable. Como referencia en la norma IEEE para la distorsión armónica, se selecciona como objeto de estudio y profundización el tercer armónico y el THD de la iluminación LED, ya que estos pueden indicar la mayor afectación a la red. Uno de los factores importantes analizados radica en el cumplimiento de las normas aplicadas y el análisis del controlador que acompaña a cada luminaria LED

2.4.Límites de Distorsión de Corriente

Las corrientes armónicas para cada usuario son evaluadas en la acometida y los límites se establecen en base a la relación entre la corriente de cortocircuito y demanda máxima de corriente de la carga del usuario.

Para el estudio de la distorsión armónica de corriente, en este proyecto de investigación se toma como referencia la norma IEEE 519 – 1992.

a) Distorsión Total de Demanda

TDD es la distorsión armónica basada en la máxima corriente de demanda (componente fundamental). Es una medida de la distorsión armónica total de la corriente en el PCC (punto de conexión común) para la carga total conectada.

b) Relación de Corriente de Cortocircuito a la Corriente de Carga I_{sc} / I_{L1}

Es la medida de la relación de corriente de cortocircuito disponible en el PCC a la máxima corriente de carga en el mismo punto. Esto es una medida de la rigidez del sistema eléctrico relativo a la carga.

c) Contenido armónico de corriente

Se calcula sobre la base de índices que consideran el porcentaje de contenido armónico individual en la onda de corriente y el valor del TDD (Factor de Distorsión Total de la Demanda) de la carga conectada por los Agentes en los puntos de conexión. Para efectos de esta Regulación, se consideran las armónicas comprendidas entre la 2° y la 30°, incluyendo las mismas.

d) Límites de Armónicos

Los valores límites de contenido armónico, de TDD y más procedimientos para aplicación de límites, se regirán a lo indicado en la guía IEEE 519 Control armónico. Una tabla con los límites señalados en esa guía se indica a continuación (Chabla et al., 2015):

La Tabla N° 2.6 señala los límites de inyección de corriente armónico según la regulación IEEE – 512.

Tabla N° 2.6

Límites de inyección de corriente armónico según la IEEE 519 – 1992

Sistemas de distribución (120 V – 69 kV)						
$\frac{I_{sc}}{I_L}$	Tasa individual admisible en relación a I_L (%)					TDD (%)
	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	
< 20	4,00	2,00	1,50	0,60	0,30	5,00
20 – 50	7,00	3,50	2,50	1,00	0,50	8,00
50 – 100	10,00	4,50	4,00	1,50	0,70	12,00
100 – 1000	12,00	5,50	5,00	2,00	1,00	15,00
> 1000	15,00	7,00	6,00	2,50	1,40	20,00
Sistemas de distribución (69 kV – 161 kV)						
< 20	2,00	1,00	0,75	0,30	0,15	2,50
20 – 50	3,50	1,75	1,25	0,50	0,25	4,00
50 – 100	5,00	2,25	2,00	0,75	0,35	6,00
100 – 1000	6,00	2,75	2,50	1,00	0,50	7,50
> 1000	7,00	3,50	3,00	1,25	0,70	10,00
Sistemas de distribución (> 161 kV)						
< 50	2,00	1,00	0,75	0,30	0,15	2,50
≥ 50	3,00	1,50	1,15	0,45	0,22	3,75

Fuente: (CONELEC, 2012)

2.5. Filtros para mitigar Armónicos

La solución de problemas de armónicos está caracterizada en preventiva y correctiva. Las soluciones preventivas: son aquellas medidas discretas mediante las cuales se busca evitar los armónicos y sus consecuencias. Estas incluyen:

- Cancelación de fase o control de armónicos en convertidores de potencia.
- Desarrollo de métodos y procedimientos para controlar, reducir o eliminar los armónicos en los equipos del sistema de potencia, principalmente condensadores, transformadores y generadores.

Para intentar mantener los armónicos en niveles de seguridad suficiente, las normativas de ámbito nacional y las recomendaciones de organismos internacionales desarrollan ciertos límites de cada armónico individual y también límites para los coeficientes de distorsión armónica (Delgadillo et al., 2010).

Las soluciones correctivas se llevan a cabo con el objetivo de eliminar problemas de armónicos existentes, e incluyen:

- El uso de filtros
- La desintonización de un circuito de resonancia previo mediante la reconfiguración de la red o la localización de los bancos de condensadores.

2.5.1. Filtro Pasivo Sintonizado

Estos filtros son pasivos y se conectan en paralelo al sistema de distribución general o a cargas individuales con la finalidad de reducir el nivel de armónicos producido por las cargas no lineales, además de estos proporciona potencia reactiva fundamental para compensar el factor de potencia. Cuando los filtros se instalan en el bus principal de distribución, su potencia total está conformada por grupos o pasos y son accionados por contactores de acuerdo al requerimiento de potencia reactiva del sistema ante una condición dada. En la Tabla N° 2.7 se indica las ventajas de los filtros pasivos sintonizados.

Tabla N° 2.7

Ventajas del Filtro Pasivo Sintonizado

Ventajas del Filtro Pasivo Sintonizado.
✓ Mejora el factor de potencia en el circuito secundario de baja voltaje lo que hace que mejore el sistema de distribución aguas arriba.
✓ Reducción de distorsión armónica de voltaje y corriente en circuitos de bajo voltaje
✓ Reducción de corriente de neutro causada por tercer armónico.
✓ Mejora de la regulación de voltaje en las redes de bajo voltaje
✓ Optimización de la capacidad de entrega de energía a un mayor número de usuarios por transformador
✓ Aumento de la vida útil del transformador y de equipos.
✓ Mejora la calidad de potencia de suministro en especial de la forma de onda de la señal de voltaje y regulación de voltaje
✓ Bajo costo de implementación.

Fuente: (IEEE, 1992)

2.5.2. Cálculo de Filtros Armónicos

Lo que se pretende establecer en este punto, es poder determinar mediante cálculos sugeridos a lo largo de este estudio los filtros de distorsión armónicas que se debe colocar a la entrada del horno de inducción, además, de poder determinar el tipo de filtro armónico a utilizar. En la actualidad es imprescindible el uso de estos equipos ya que ayudan a mantener un sistema eléctrico más estable y con equipos con una mayor vida útil, ya que los armónicos en la actualidad son el enemigo silencioso de los sistemas eléctricos (CONELEC, 2012).

Es por ello que éste estudio va dedicado especialmente a mejorar la calidad de energía de las luminarias, a lo largo del desarrollo de esta se ha podido determinar que los filtros a instalarse serán filtros sintonizados pasivos ya que son los que se ajustan y requieren en el sistema eléctrico en mención, es lo que se ha podido determinar a lo largo de este estudio.

Se realiza el siguiente Cálculo:

Hay que calcular la potencia reactiva que se necesita para compensar el sistema de donde:

$$Q_{\text{eff}} = (\tan\theta_1 - \tan\theta_2) * P$$

Donde:

θ_1 = Ángulo del Factor de potencia actual

θ_2 = Ángulo del Factor de potencia deseado

Se calcula la reactancia efectiva del filtro

$$X_{\text{eff}} = \frac{V_{\text{eff}}^2}{Q_{\text{eff}}}$$

Teniendo identificada la armónica que se desea filtrar, se debe de considerar un porcentaje menor de la frecuencia de sintonía, como lo sugiere la norma IEEE-1531-2003 para evitar

posibles resonancias de sintonía en el sistema. En este proyecto se manejará el 6 % menor de la frecuencia de sintonía para los cálculos a realizar

$$C = \frac{(h*0,6)^2}{(h*0,6)^2 - 1} \text{ eff}$$

Donde:

$$h = \frac{f \text{ fundamental}}{f \text{ armónico}}$$

En la ecuación que se muestra a continuación realizamos el cálculo del capacitor, su unidad de medida es el faradio.

$$C = \frac{1}{2\pi F X_c}$$

Reactor

Para sacar valores de impedancia, nos remitimos a la ecuación que se muestra a continuación:

$$Z = R + \left[\omega L - \frac{1}{\omega C} \right]$$

Donde R, L, C son la resistencia, inductancia y capacitancia de los elementos del filtro, respectivamente, y ω es la frecuencia angular del sistema de potencia. Si necesitamos XL:

$$X_L = \frac{X_C}{h^2}$$

Para el cálculo del inductor, expresado en henrios:

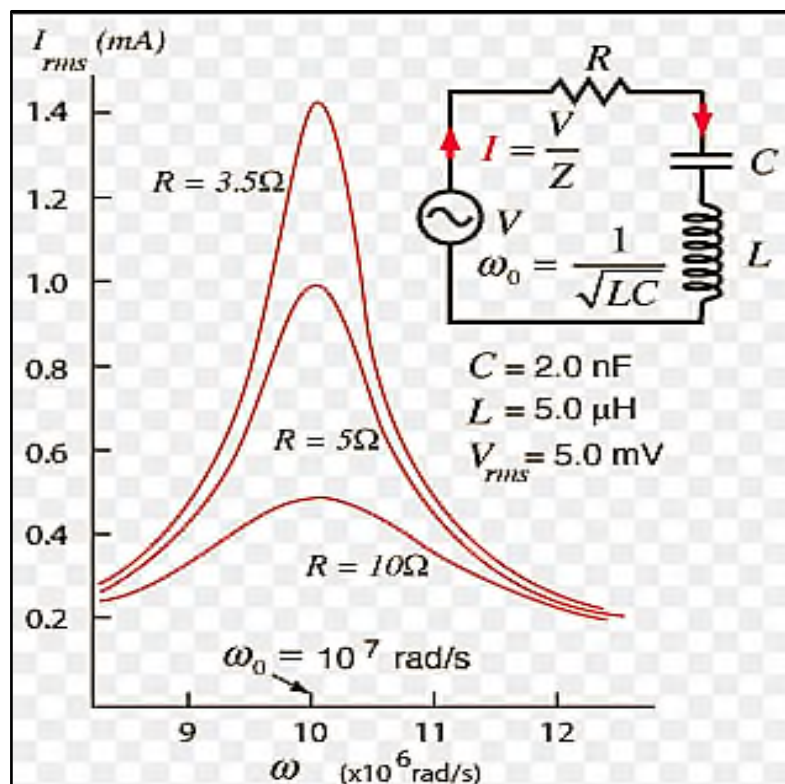
$$L = \frac{X_L}{2\pi F}$$

2.5.3. Factor de Calidad

Dentro del análisis de los filtros pasivos sintonizados, un parámetro muy importante es el factor de calidad, el cual relaciona la habilidad de un filtro para disipar energía absorbida a la frecuencia sintonizada. Un valor grande Qf de implica un valle a la frecuencia resonante de un filtro y por lo tanto captura el amontonamiento de frecuencia armónica. Factor de calidad debe considerarse entre 20 a 30. En la Gráfica N° 2.3 se indica la respuesta del filtro sintonizado ante diferentes factores de calidad.

Gráfica N° 2.3

Respuesta del filtro sintonizado ante diferentes factores de calidad



Fuente: (IEEE, 1992)

2.5.4. Resistencia de un filtro

El cálculo de la resistencia de un filtro está dado por la siguiente ecuación:

$$R = \frac{X_I * h * 0,6}{Q_f}$$

Donde:

H= es el orden armónico a que se encuentra.

6% = es el porcentaje en que debe disminuirse el valor del orden armónico para evitar resonancia

Qf= Factor de calidad

Potencia reactiva del filtro (frecuencia fundamental):

$$K_{\text{var filtro}} = \frac{V^2 |1|}{X_c - X_L}$$

**a) Comprobación del diseño del Filtro que establece la Norma IEEE-18 2002 1.-
Sintonización a la frecuencia:**

Para que el filtro se sintonice a la frecuencia requerida se debe cumplir la siguiente condición.

$$X_c = X_L$$

2.6. Corrientes armónicas

Para comprobar que el filtro no vaya a sufrir daño por posibles sobre corrientes debido a la presencia de corrientes armónicas, se procede a corroborar que no rebase un 1,35 % de la corriente fundamental

$$I_h = \% c$$

Donde

h= armónica inyectada por la carga no lineal

%= porcentaje de la corriente armónica con respecto a la fundamental, obtenido del espectro armónico de corriente de la carga no lineal, proporcionado como dato de sistema.

Si observamos la ecuación que sigue nos da la corriente total que circula por el filtro, la cual viene dada por:

$$I_{\text{total rms}} = \sqrt{I_h^2 + \dots + I_n^2}$$

Donde:

h = armónica inyectada por la carga no lineal

n = Numero armónicas inyectadas por la carga no lineal

$$\% \text{ Margén de Corriente} = \frac{I_{\text{total rms}} * 100}{I_{\text{fund}}} \leq 135\% I_{\text{fund}}$$

2.6.1. Voltajes de Diseño del Capacitor

Como siguiente paso está el cálculo del voltaje a frecuencia fundamental, además de los voltajes provocadas por los armónicos. El valor de voltaje pico del filtro no debe sobrepasar el 120% del voltaje pico del sistema.

$$V_c = I_{\text{fund}} * X_c$$

$$V_c(h) = \sum_h^n (V(h)) = \sum_h^n (I(h) \times \frac{X_c}{n})$$

$$V_{\text{cL-N total pico}} = \sqrt{2}(V_c + V_{c(h)})$$

$$V_{\text{L-N pico sistema}} = \sqrt{2} * V_{\text{L-N SISTEMA}}$$

$$V_{\text{L-N SISTEMA}} = \frac{V_{\text{ll sist}}}{\sqrt{3}}$$

La verificación de la norma se realiza por medio de la ecuación

$$\frac{V_{cL-N \text{ total pico}}}{V_{cL-N \text{ pico sist}}} * 100 < 120 \%$$

2.6.2. Norma IEEE – 1531 -2003

Según (IEEE, 2033) La instalación de un filtro de armónicos de derivación pasiva cerca de cargas que producen armónicos es uno de los métodos comunes para mitigar la distorsión armónica. El propósito del filtro de armónicos es derivar parte de la corriente armónica de la carga en el filtro para reducir la cantidad que va al sistema de energía eléctrica.

b) Principales consideraciones de diseño

Criterios de desempeño

Requisitos de energía reactiva (k VAR)

Es esencial conocer la potencia reactiva capacitiva necesaria y sus correspondientes ahorros, para optimizar los costes del sistema. Además, los requisitos de potencia reactiva y de control de voltaje podrían dictar la necesidad de que el banco de filtros de armónicos se conmute en pasos o no. Posteriormente, los tamaños k VAR totales y de paso se determinan normalmente por el flujo de carga de frecuencia fundamental y los requisitos de control de voltaje.

2.6.3. Limitaciones armónicas

Estos se definen en términos de lo siguiente:

c) Limitaciones del sistema

Estos se definen para garantizar que el equipo funcionará correctamente y no fallará debido a la distorsión armónica excesiva.

Frecuencia de sintonía

Partiendo de que la frecuencia fundamental es de 50 o 60 Hz, el número de orden determina el número de veces que la frecuencia de ese armónico es mayor que la fundamental: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, orden natural de los números.

También se define como la relación que hay entre la frecuencia de armónico (f_n) y la frecuencia fundamental (f_{60}).

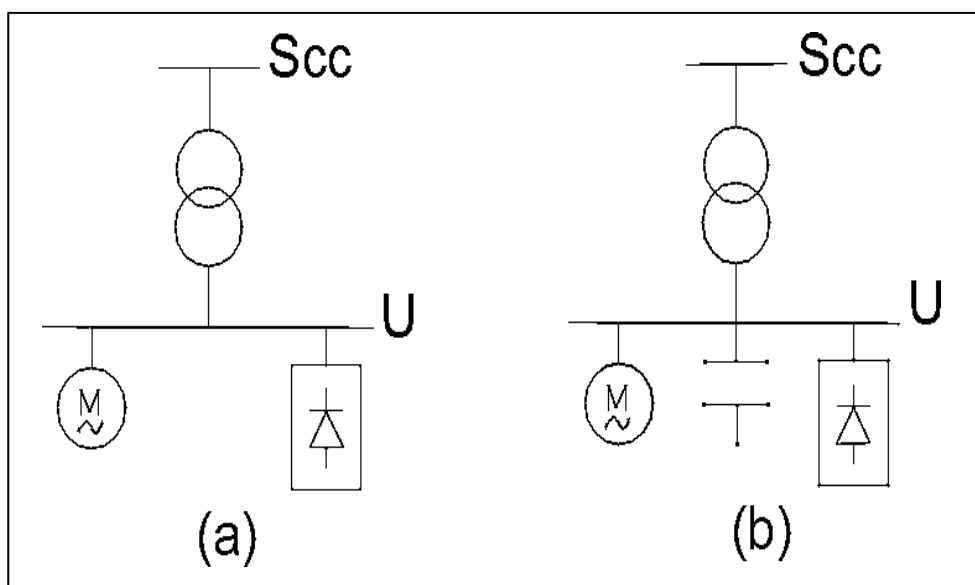
$$h = \frac{f_n}{f_{60}}$$

2.6.4. Esquema Unifilar de referencia

En una instalación industrial tipo se tienen cargas lineales, que pueden ser modeladas mediante una admitancia o impedancia, y cargas no lineales, que se modelarán sustituyéndolas por fuentes de intensidad a las frecuencias a las que generan los armónicos. Se establece por tanto un análisis lineal del problema. La Figura 4(a) muestra el esquema típico de una instalación industrial simple. Está compuesta por un transformador que alimenta a unas cargas lineales, simbolizadas en el esquema unifilar por un motor, y no lineales, representadas por el rectificador. Para reducir los armónicos que las cargas no lineales de la instalación vierten a la red se colocará un compensador pasivo, que podrá ser un banco de condensadores o bien un banco de filtros sintonizados, de forma que el esquema unifilar que se usará finalmente. En la Gráfica N° 2.4 se indica el diagrama unifilar de los filtros (Delgadillo et al., 2010).

Gráfica N° 2.4

(a) Unifilar sin compensador. (b) Unifilar con compensador



Fuente: (Gil de Castro, 2012)



EDITORIAL ANDES COGNITIO

CAPÍTULO III

SISTEMA ELÉCTRICO DE ALUMBRADO PÚBLICO



CAPÍTULO III

SISTEMA ELÉCTRICO DE ALUMBRADO PÚBLICO

3.1. Análisis de caso

La investigación es de campo ya que se realizará una recopilación de las principales características y ventajas de las luminarias LED para analizar las condiciones actuales del sistema eléctrico del alumbrado público del sector Huachi Chico.

La investigación es experimental ya que se realizará mediante una simulación de la red eléctrica de las luminarias en el programa DIALUX para determinar el nivel de armónicos y para conocer el nivel de luminancia e irradiación de las luminarias tanto de vapor de sodio como tipo LED.

Diseño básico metodológico

Tipos de estudio:

De campo. Esta investigación se realizó en el sector de Huachi Chico, para evaluar los niveles de armónicos de voltaje y corrientes en las luminarias del alumbrado público.

Experimentales. Se realizó una Simulación de la red eléctrica de las luminarias para determinar el nivel de armónicos.

Técnicas

Observación directa

En el sector de Huachi Chico se realizó continuas visitas donde se pudo observar las fallas que tiene el alumbrado público, recopilando información para encontrar los problemas existentes y aplicar las debidas medidas correctivas.

3.2. Análisis y discusión de los resultados

3.2.1. Datos Característicos de las luminarias utilizadas en el estudio

a) Datos de Luminarias tipo Vapor de Sodio

Tabla N° 3.1

Datos de luminarias tipo vapor de sodio

Luminarias tipo Vapor de Sodio		
Descripción	Valor	Unidades
Voltaje	110	V
Frecuencia	60	Hz
Potencia	250	Watts
Flujo luminoso	28 993,75	lm
Ángulo de apertura	120	grados
Luz útil	54	%

Fuente: Autores

En la Tabla N° 3.1 se señala las características de las luminarias tipo vapor de sodio, se detalla el nivel de voltaje al que se alimenta y su frecuencia. Los parámetros que se toman en cuenta para el análisis de la eficiencia energética, son la potencia de cada luminaria, el flujo luminoso y el ángulo de apertura, estos datos permiten escoger la tecnología más útil para el alumbrado público.

b) Datos de Luminarias tipo LED

Tabla N° 3.2

Datos de luminarias tipo vapor de sodio

Luminarias tipo LED		
Descripción	Valor	Unidades
Voltaje	110	V
Frecuencia	60	Hz
Potencia	70	Watts
Flujo luminoso	7 776,63	lm
Ángulo de apertura	140	grados
Luz útil	77	%

Fuente: Autores

En la Tabla N° 3.2 se indica las características de las luminarias de tipo LED, que se encuentran localizadas en la avenida Luis Aníbal Granja. Realizando una comparación entre las luminarias tipo LED y vapor de Mercurio, se puede concluir que la tecnología tipo LED tiene un mayor flujo luminoso y un mayor ángulo de apertura, por ende, la cobertura de iluminación es mayor en las luminarias tipo LED.

3.2.2. Disposición de luminarias

Luminarias tipo LED

a) Circuito 1 LED:

Tabla N° 3.3

Datos de luminarias tipo LED

DESCRIPCIÓN	CIRCUITO 1	UNIDADES
Potencia Instalada	3,9	kW
Protección	100	A
Equipo	Luminaria	-----
Potencia Unitaria	150	W
N° Lámparas	26	-----
Separación de cada luminaria	30	M
Longitud total	390	m
Cable	2 x 1/0	AWG

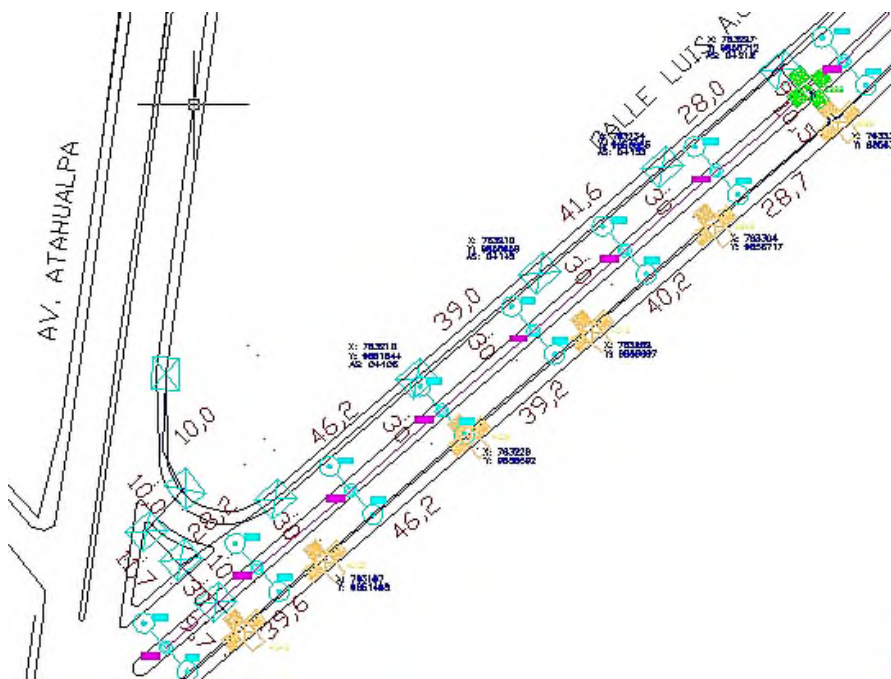
Fuente: Autores

En la avenida Luis Aníbal Granja se puede identificar ocho circuitos (cámaras de transformación). El Circuito 1 que comprende desde la luminaria 344 595 hasta la luminaria 344 608, el circuito es bifásico, que está conformado por luminarias tipo led.

En la Tabla N° 3.3 se describe el número de luminarias que conforman el circuito, son 26 luminarias tipo LED, el circuito es alimentado por un transformador de 25 kVA y una protección de 100 amperios. La longitud del primer circuito es de 390 m, con un cable de calibre de 1/0, posteriormente se realizará el análisis de los parámetros eléctricos de todos los circuitos.

Gráfica N° 3.1

Circuito 2 de Sistema de Iluminación



Fuente: Autores

En la Gráfica N° 3.1 se puede visualizar el primer tramo, en el plano se denota la cámara de transformación, la misma que alimenta a todo el sistema de iluminación. La conexión es subterránea y las luminarias se encuentran a una distancia de separación de 30 m y la instalación se lo realiza en postes de 12 metros.

b) Circuito 2 LED:

Tabla N° 3.4

Datos de luminarias tipo LED.

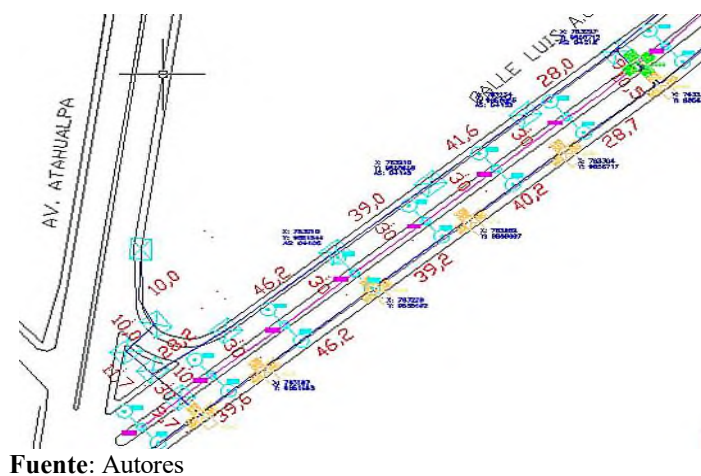
DESCRIPCIÓN	CIRCUITO 2	UNIDADES
Potencia Instalada	4,2	kW
Protección	100	A
Equipo	Luminaria	-----
Potencia Unitaria	150	W
Nº Lámparas	28	-----
Longitud	450	m
Cable	2x1/0	AWG

Fuente: Autores

En la Tabla N° 3.4 del circuito 2 se instala 28 luminarias, con una distancia total de 450 metros, la alimentación se realiza con dos conductores de 1/0 AWG, el circuito tiene una protección de 100 Amperios y la potencia total que da todo el circuito de iluminación es de 4,2 kW los datos que se expone sirve para determinar si los parámetros eléctricos y los niveles de iluminación se encuentran dentro de los rangos permitidos.

Gráfica N° 3.2

Circuito 2 de Sistema de Iluminación



En la Gráfica N° 3.2 se visualiza el segundo circuito que conforma desde la luminaria 344 612 hasta la luminaria 344 626. Este circuito es bifásico con una alimentación de 220 V, con una

configuración central doble. El circuito tiene una distancia total de 450 metros de distancia que recorre con un calibre de conductor de 1/0 AWG, este circuito conforma el circuito total

c) Circuito 3 LED:

Tabla N° 3.5

Datos de luminarias tipo LED

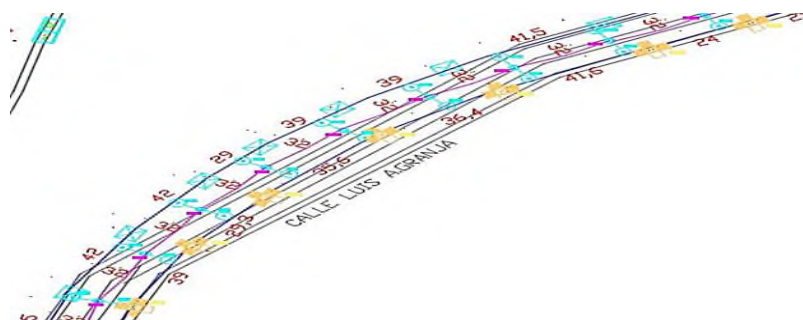
DESCRIPCIÓN	CIRCUITO 3	UNIDADES
Potencia Instalada	4,5	kW
Protección	100	A
Equipo	Luminaria	-----
Potencia Unitaria	150	W
N° Lámparas	30	-----
Longitud	420	m
Cable	2x1/0	AWG

Fuente: Autores

En la Tabla N° 3.5 se describe el circuito 3 que está conformado por 30 luminarias tecnología tipo LED, la distancia que conforma este circuito es de 420 metros, la alimentación de este circuito es por medio de dos conductores calibre de 1/0. La potencia total que se encuentra instalada es de 4,5 kW.

Gráfica N° 3.3

Circuito 3 de Sistema de Iluminación



Fuente: Autores

En la Gráfica N° 3.3 se visualiza el tercer circuito que conforma desde la luminaria 344 653 hasta la luminaria 344 667. Este circuito es bifásico con una alimentación de 220 V, con una configuración central doble. El circuito es un sistema subterráneo que recorre con un calibre

de conductor de 2/0 AWG que parte desde el pozo subterráneo, este circuito conforma el circuito total.

Luminarias tipo Vapor de Sodio

Tabla N° 3.6

Datos de luminarias tipo vapor de sodio

DESCRIPCIÓN	CIRCUITO 1	UNIDADES
Potencia Instalada	22,5	kW
Protección	150	A
Equipo	Luminaria	-----
Potencia Unitaria	250	W
N° Lámparas	90	-----
Longitud	1 350	m
Cable	2x1/0	AWG

Fuente: Autores

En la Tabla N° 3.6 se describe las características de las luminarias de vapor de sodio que se encuentran colocadas en el complejo Catiglata para realizar una comparación con las luminarias tipo LED de la avenida Luis Aníbal Granja, el mismo que consta de un circuito bifásico a 220 V. La longitud total del tramo es de 1 350 metros, es alimentado por dos conductores de 1/0 AWG, estos datos se ingresarán al simulador DIALUX, para determinar la calidad de los parámetros lumínicas.

Gráfica N° 3.4

Circuito de luminarias tipo Vapor de Sodio



Fuente: Autores

En la Gráfica N° 3.4 se visualiza el circuito de luminarias vapor de sodio, la configuración que presenta este circuito es una disposición central doble, con 250 luminarias en total, el circuito era subterráneo y formado por una sola cámara de transformación. Este circuito tiene una potencia total instalada de 22,5 kW, el objetivo de especificar estos parámetros es poder identificar el tipo de luminarias más eficientes.

3.3. Análisis del flujo luminoso de las luminarias tipo Vapor de Sodio y LED

Para el análisis del flujo luminoso de los tipos de luminarias de estudio, se realiza la simulación en el programa de luminotecnía DIALUX, el que permite ingresar los datos de las luminarias y calcular la iluminancia y la eficacia luminosa. A continuación, se resume los valores de niveles de iluminancia obtenidos por la simulación y se realiza la comparación de resultados entre luminarias Vapor de sodio y LED

a) **Análisis de la iluminancia****Tabla N° 3.7**

Flujo luminoso

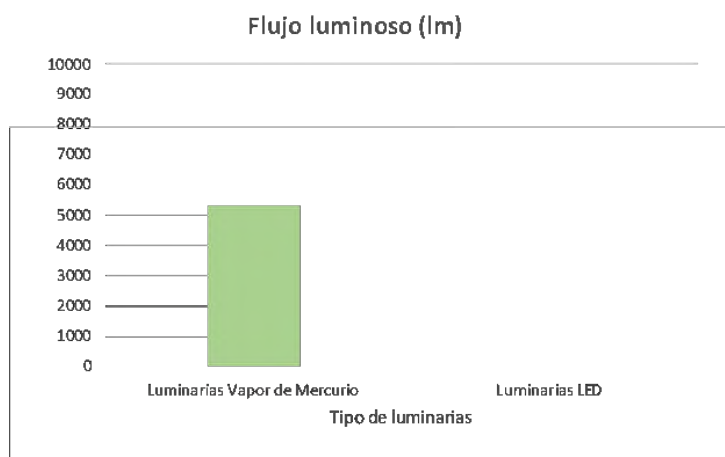
	MUESTRA					Unidades
	# luminarias	Potencia Unitaria	Potencia Total Equivalente	Distancia	Flujo Luminoso	
Luminarias Vapor de Sodio	90	250 W	22,5 kW	1 350 m	5 330	Lúmenes
Luminarias LED	150	150 W	22,5 kW	2 250 m	89 076	Lúmenes

Fuente: Autores

De acuerdo a la tabla 3.7 se muestra la comparación de los niveles máximos del flujo luminoso, estos valores son proporcionados del simulador DIALUX. El valor de iluminancia promedio es uno de los parámetros que determinan si un sector de iluminación cualquiera que sea este sitio se encuentra dentro de los parámetros mínimos de funcionamiento correcto y si el lugar se encuentra correctamente iluminado. De acuerdo a estos valores se determina qué tipo de luminaria tiene mayor flujo luminoso, para una correcta iluminación en el alumbrado público.

Gráfica N° 3.5

Flujo luminoso

**Fuente:** Autores

De acuerdo al gráfico de barras 23 se puede visualizar, que las luminarias vapor de sodio presentan un flujo luminoso de 5 330 lúmenes, mientras que las luminarias tipo LED cuentan con 89 076 lúmenes, donde se puede concluir que las luminarias led tienen un rango mayor de flujo luminoso, lo que significa que tienen mayor nivel de luminancia y son recomendables para el uso del alumbrado público.

b) Análisis de la eficiencia luminosa

Tabla N° 3.8

Eficiencia luminosa

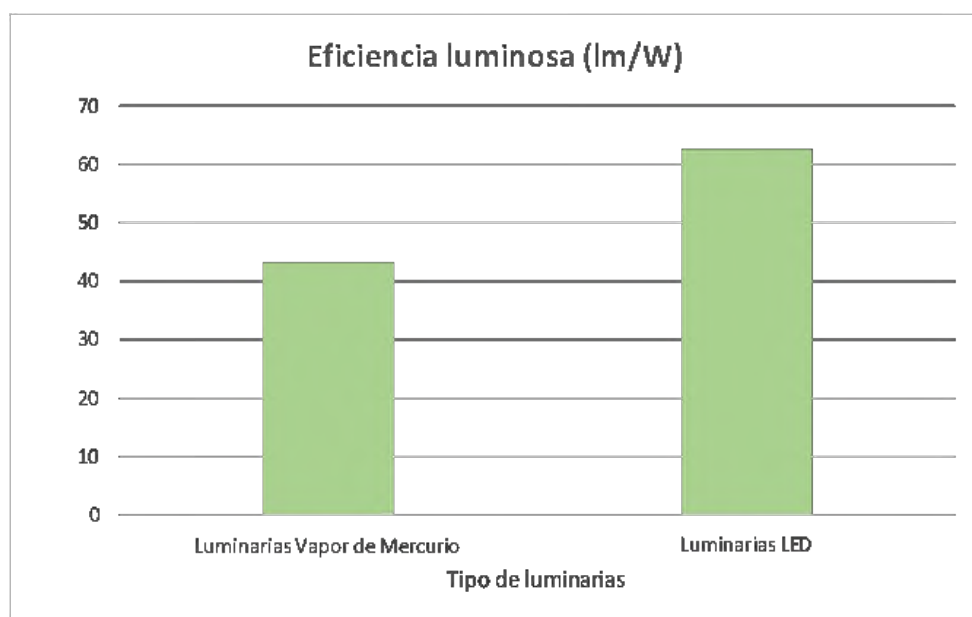
	MUESTRA					
	# luminarias	Potencia Unitaria	Potencia Total Equivalent e	Distancia	Eficiencia luminosa	Unidad es
Lumina rias Vapor de Sodio	90	250 W	22,5 kW	1 350 m	43,17	lm/W
Lumina rias LED	150	150 W	22,5 kW	2 250 m	62,55	lm/W

Fuente: Autores

De acuerdo a la tabla 3.8 se indica los niveles de eficiencia luminosa de los tipos de luminarias, LED y vapor de sodio. La eficiencia luminosa depende directamente del flujo luminoso del lugar de estudio. Este factor tiene prioridad, demandando un alto nivel de este factor, para evitar comportamientos erróneos y bruscos en el sistema de alumbrado público.

Gráfica N° 3.6

eficiencia luminosa



Fuente: Autores

Según la Gráfica N° 3.6 se indica los niveles de eficiencia luminosa, de las luminarias tipo vapor de mercurio y tipo LED. Se puede concluir que las luminarias tipo LED, tienen mayor eficiencia luminosa a comparación que las luminarias tipo vapor de mercurio, como se mencionó anteriormente tanto el flujo luminoso como la eficiencia luminosa tienen relación directa entre ellos, por lo tanto, estos dos factores en las luminarias LED se encuentran en niveles mayores que las de vapor de sodio.

c) Uniformidad general de iluminancia

Tabla N° 3.9

Uniformidad general de iluminancia

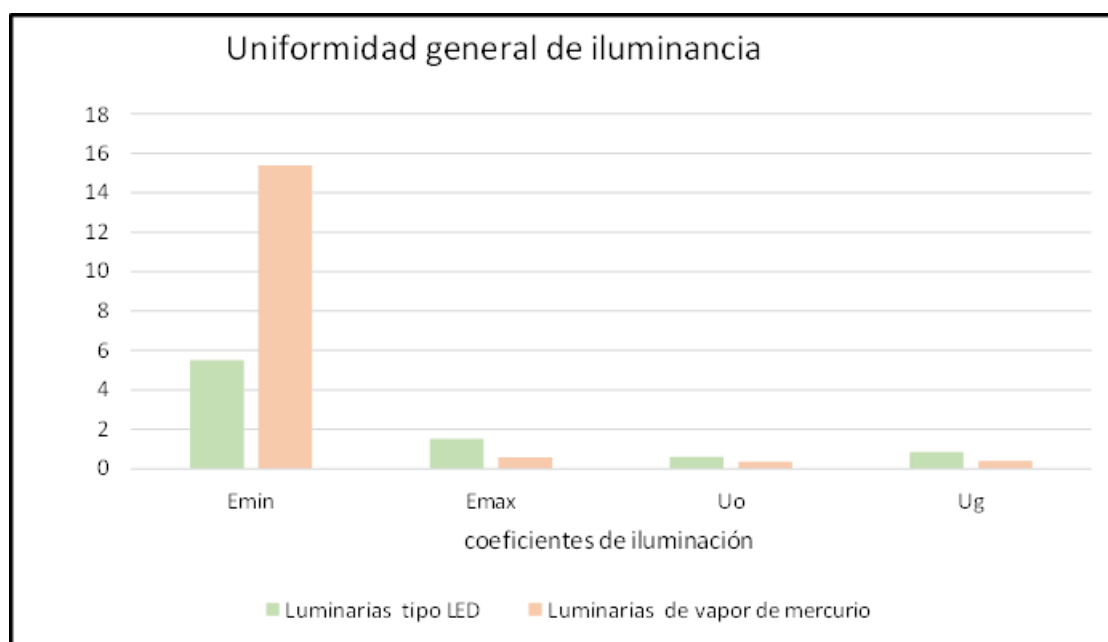
	Luminarias tipo LED	Luminarias de vapor de mercurio	Valor nominal establecido
E_{min}	5,52	15,39	$\geq 5,00 \leq 7,50$
E_{max}	1,52	0,58	$\geq 1,00$
U_o	0,60	0,35	$\geq 0,40$
U_g	0,85	0,40	$\geq 0,60$

Fuente: Autores

Según la Tabla N° 3.9 se muestra los índices de uniformidad general de iluminancia de los dos tipos de luminarias de estudio, estas mediciones se obtienen a través de la simulación en DIALUX. Estos coeficientes de uniformidad es uno de los parámetros que determinan si el sector de iluminación, se encuentra con un nivel de iluminación uniforme y amplia, considerando que el área sin iluminación entre luminarias debe ser mínima.

Gráfica N° 3.7

Coefficiente de uniformidad general



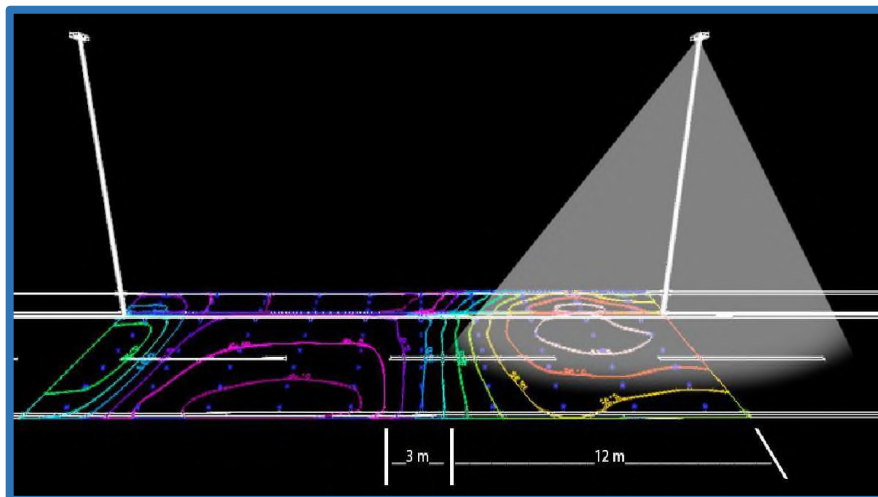
Fuente: Autores

De acuerdo a la Gráfica N° 3.7 se analiza la uniformidad de la iluminancia, tanto en luminarias led como en luminarias de vapor de sodio, donde el simulador establece si los niveles calculados cumplen o no con lo estipulado. Los valores de la uniformidad de las luminarias LED cumplen con el valor nominal estipulado por el software de simulación, esto significa que la distribución de la luz es uniforme para todas las áreas, mientras que los valores de uniformidad de las luminarias vapor de sodio están fuera de los valores nominales estipulados.

d) Cobertura de la iluminación Luminarias Tipo LED:

Gráfica N° 3.8

Cobertura de iluminación tipo LED



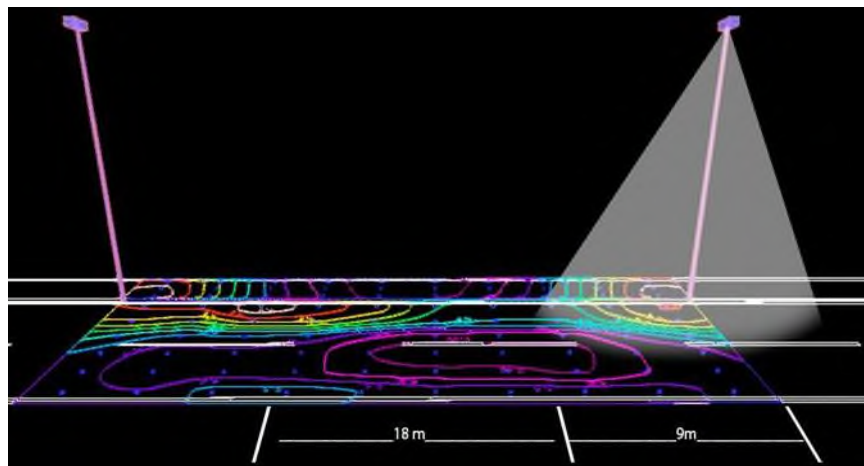
Fuente: Autores

En la Gráfica N° 3.8, se puede observar que, para la iluminación tipo LED, existe una cobertura lumínica de 12 m y de luminaria a luminaria queda una distancia de 3 m sin iluminar, esto se puede comprobar mediante sus curvas fotométricas, donde la intensidad luminosa de estas luminarias es mayor.

Luminarias Vapor de Sodio:

Gráfica N° 3.9

Cobertura de iluminación tipo Vapor de Sodio



Fuente: Autores

En la Gráfica N° 3.9, se puede observar que, para la iluminación tipo Vapor de Sodio, existe una cobertura lumínica de 9 m y de luminaria a luminaria queda una distancia de 18 m sin iluminar, esto se puede comprobar mediante sus curvas fotométricas, donde la intensidad luminosa de estas luminarias es menor. Por lo tanto, se concluye que las luminarias tipo LED, tienen un mayor flujo luminoso que las luminarias vapor de sodio.

3.4. Análisis de los parámetros eléctricos de las luminarias tipo Vapor de Sodio y LED

Descripción del sistema eléctrico de los circuitos de las luminarias LED

Tabla N° 3.10

Características del transformador

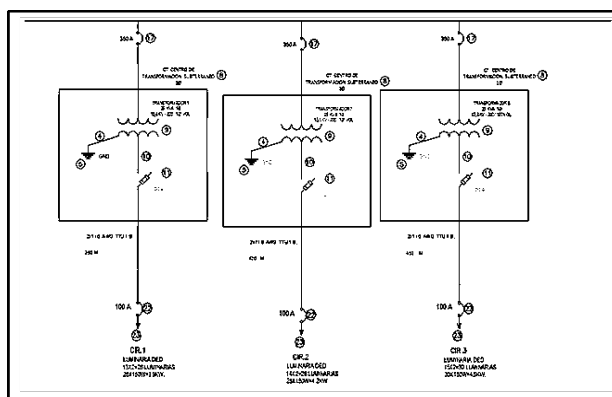
12 Marca:	INATRA
Voltaje de alta:	13 800 V
Voltaje de baja:	220 V
Capacidad:	25 kVA
Tipo de conexión:	DYn5
Nivel básico de aislamiento (BIL):	95 kV
Frecuencia:	60 Hz

Fuente: Autores

La Av. Luis Aníbal Granja del sector Huachi Chico, dispone de alumbrado público que está conformado por luminarias tipo LED de potencia de 150 Watts. En la tabla 3.10, se indica las características del sistema eléctrico de los circuitos de las luminarias LED, donde el sistema de iluminación está formado por tres cámaras de transformación, cada transformador tiene una capacidad de 25 Kva, con una impedancia del 2,3 % y con un nivel del voltaje de 13,8 kV a 220 V. La alimentación consta con dos conductores de 1/0 AWG.

Gráfica N° 3.10

Diagrama Unifilar de luminarias tipo LED



Fuente: Autores

En la Gráfica N° 3.10, se indica el diagrama unifilar del sistema eléctrico de las luminarias LED, en el diagrama se visualiza tres circuitos, cada uno alimentado con transformadores tipo Pad Mount.

Ingreso de datos en el analizador de carga

Gráfica N° 3.11

Analizador de carga FLUKE 435 II



Fuente: Autores

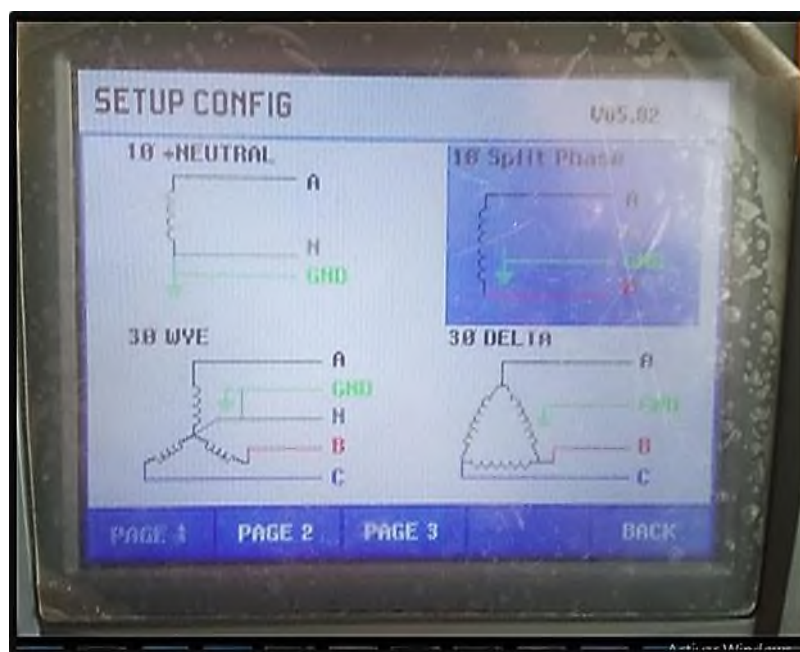
Para el análisis de los parámetros eléctricos de los circuitos de luminarias Led y de las luminarias Vapor de Sodio. El analizador que se utiliza para este estudio es el FLUKE 435 II, como se indica en la Gráfica N° 3.11. El analizador se instaló en el lado de bajo voltaje de cada transformador de los tres circuitos de las luminarias tipo LED y del circuito de luminarias Vapor de Sodio. Las mediciones se toman en un periodo de tiempo de 10 minutos por siete días como indica la regulación CONELEC 004/01.

3.5. Procedimiento de configuración que se realiza para la medición de datos del sistema eléctrico

1. Para iniciar la configuración del analizador se escoge la configuración del sistema eléctrico de los circuitos de las luminarias tipo LED y de las luminarias tipo vapor de sodio. De acuerdo a la Gráfica N° 30 se indica que la configuración adecuada para los circuitos de estudio es bifásico a 220 Voltios.

Gráfica N° 3.12

Configuración del sistema eléctrico

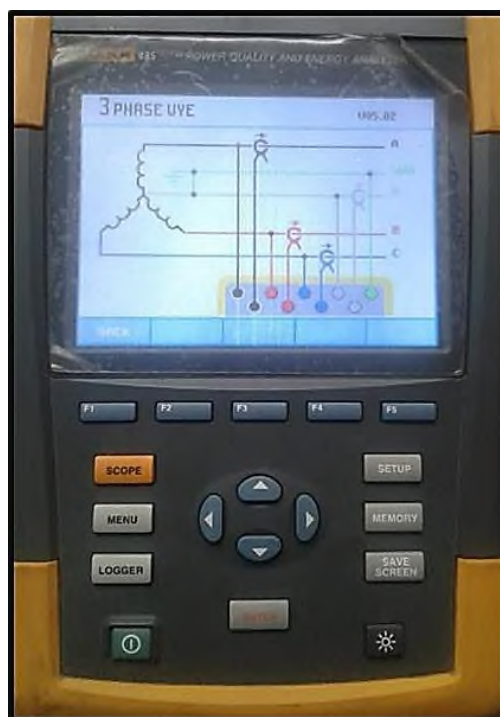


[Fuente: Autores

2. Una vez ingreso el modo de configuración del sistema eléctrico, el analizador de carga indica la forma de conexión de las sondas de voltaje y de corriente del analizador, como se indica en la Gráfica N° 3.12.

Gráfica N° 3.13

Modo de conexión de las sondas

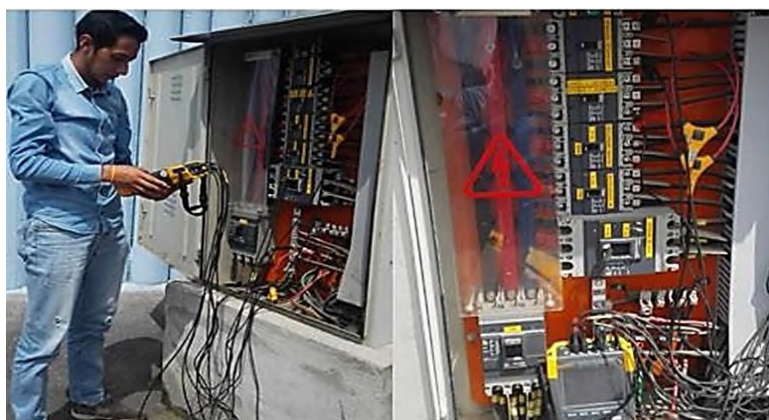


Fuente: Autores

Siguiendo el diagrama esquemático se procede a realizar las conexiones de las sondas de voltaje y de corriente, es importante conectar las sondas de tierra para proteger el sistema eléctrico, tal como se indica en la Gráfica N° 3.13

Gráfica N° 3.14

Configuración de voltaje



Fuente: Autores

3. Como siguiente paso se escoge el nivel de voltaje de alimentación, el voltaje para la configuración estrella (fase – neutro) es de 127 Voltios y la configuración delta (fase – fase) es de 220 Voltios, tal como se indica en la Gráfica N° 3.14.

Gráfica N° 3.15

Configuración de voltaje



Fuente: Autores

4. Otro parámetro que se debe configurar es la frecuencia, de acuerdo a los establecido en el sistema eléctrico ecuatoriano que es de 60 Hz como se indica en la Gráfica N° 3.15.

Gráfica N° 3.16

Configuración de la frecuencia

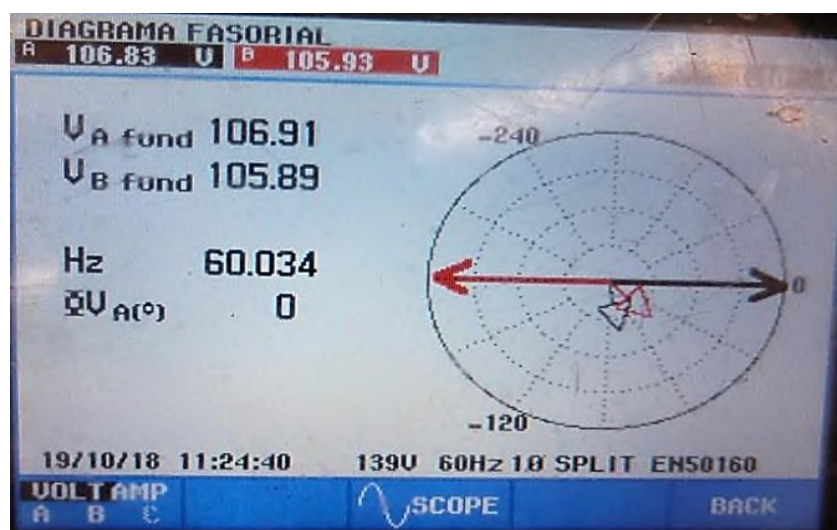


Fuente: Autores

- Una vez ingresado los datos para las mediciones y conectado las sondas de corriente y de voltaje al sistema eléctrico, se debe verificar la conexión correcta de las sondas tanto de corriente como de voltaje, esta comprobación se lo realiza mediante los diagramas fasoriales, si la conexión es correcta el desfase debe estar cada 120° para la fase A, B y C, estos diagramas fasoriales de voltaje se indica en la figura 35 y para los fasores de corriente se presenta en la Gráfica N° 3.16.

Gráfica N° 3.17

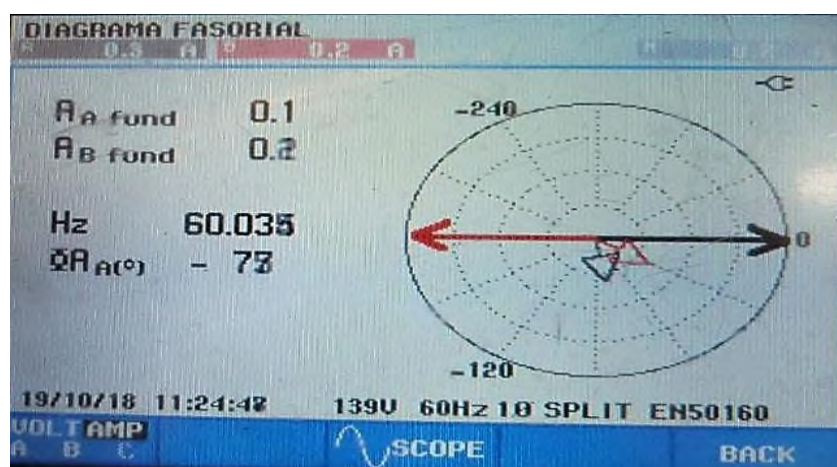
Diagrama fasorial de voltaje



Fuente: Autores

Gráfica N° 3.18

Diagrama fasorial de corriente



Fuente: Autores

6. Para poder comenzar con las mediciones, se escoge los parámetros eléctricos que se requiere analizar como niveles de voltaje, corriente, factor de potencia, valores de potencias (activa, reactiva y aparente), niveles de contaminación armónica, tal como se indica en la Gráfica N° 3.19.

Gráfica N° 3.19

Parámetros Eléctricos



Fuente: Autores

7. Una vez seleccionado los parámetros eléctricos para el análisis, se programa el periodo de medición de acuerdo a lo establecido por la norma, cada 10 minutos durante siete días, tal como se indica en la Gráfica N° 3.20.

Gráfica N° 3.20

Periodo de medición



Fuente: Autores

8. Después de dar inicio a las mediciones, el analizador comienza a registrar los parámetros configurados en el mismo. Como se indica en la Gráfica N° 3.21 el analizador toma mediciones en tiempo real.

Gráfica N° 3.21

Datos registrados



Fuente: Autores

3.6. Análisis de datos obtenidos a través de mediciones

Para el análisis de potencias se debe tomar en cuenta el periodo de trabajo de las luminarias en la Av. Luis Aníbal Granja Sector Huachi Chico. De acuerdo a la regulación nacional de Calidad de Energía CONELEC 004/01 se considera los días de período de estudio de 7 días en periodos de estudio de 10 minutos, en horarios de 18H00 hasta las 06H00.



EDITORIAL ANDES COGNITIO

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DEL ESTUDIO DE CASO



CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DEL ESTUDIO DE CASO

4.1. Luminarias Tipo LED

Circuito 1 LED:

Tabla N° 4.1

Recopilación de Datos de Luminarias tipo LED según FLUKE 435

Voltaje	Mínimo	Promedio	Máximo	Unidades
L 1- N	105,37	108,37	110,60	V
L 2-N	104,71	107,58	109,67	V
Corriente				
L 1	19,40	19,73	20,57	A
L 2	19,27	19,60	20,50	A
Frecuencia	59,91	60,00	60,08	Hz
Potencia Activa				
L 1	2,07	2,08	2,12	kW
L 2	2,04	2,06	2,09	kW
Total	4,11	4,14	4,11	kW
Potencia Aparente				
L 1	1,20	2,14	2,17	kVA
L 2	1,18	2,11	2,15	kVA
Total	2,38	4,25	4,32	kVA
Potencia Reactiva				
L 1	0,15	0,37	0,39	kVAR
L 2	0,15	0,38	0,40	kVAR
Total	0,31	0,39	0,40	kVAR
Energía Activa				
L 1	62,45	63,10	63,82	kWh
L 2	62,43	63,20	63,86	kWh
Total	124,98	126,30	127,68	kWh

Fuente: Autores

En la Tabla N° 4.1 se indica el resumen de los datos arrojados por el analizador, para estos parámetros eléctricos permiten determinar los niveles de voltaje, corriente, potencias, factor de potencia de cada fase y total. La tabla representa los valores tomados para el circuito 1

Circuito 2 LED:

Tabla N° 4.2

Recopilación de Datos de Luminarias tipo LED según FLUKE 435

Voltaje	Mínimo	Promedio	Máximo	Unidades
L 1-N	118,30	119,08	122,24	V
L 2-N	117,57	118,38	119,27	V
Corriente				
L 1	18,07	19,05	19,89	A
L 2	18,97	19,23	20,12	A
Frecuencia	59,95	60,00	60,03	Hz
Potencia Activa				
L 1	2,00	2,02	2,03	kW
L 2	2,01	2,03	2,06	kW
Total	4,01	4,05	4,09	kW
Potencia Aparente				
L 1	1,30	1,47	2,04	kVA
L 2	2,50	2,41	2,05	kVA
Total	3,80	3,88	4,09	kVA
Potencia Reactiva				
L 1	0,16	0,17	0,10	kVAR
L 2	0,11	0,22	0,20	kVAR
Total	0,27	0,29	0,30	kVAR
Energía Activa				
L 1	64,45	65,30	66,82	kWh
L 2	62,63	63,20	64,92	kWh
Total	126,98	128,50	131,74	kWh

Fuente: Autores

Circuito 3 LED:**Tabla N° 4.3**

Recopilación de Datos de Luminarias tipo LED según FLUKE 435

Voltaje	Mínimo	Promedio	Máximo	Unidades
L 1	107,97	109,52	110,35	V
L 2	107,94	108,08	110,20	V
Corriente				
L 1	19,40	19,00	20,37	A
L 2	18,97	19,78	20,00	A
Frecuencia	60,00	60,00	60,02	Hz
Potencia Activa				
L 1	2,08	2,09	2,10	kW
L 2	2,08	2,09	2,11	kW
Total	4,16	4,18	4,21	kW
Potencia Aparente				
L 1	1,97	2,00	2,01	kVA
L 2	1,91	2,00	2,02	kVA
Total	3,88	4,00	4,03	kVA
Potencia Reactiva				
L 1	0,30	0,39	0,59	kVAR
L 2	0,22	0,29	0,20	kVAR
Total	0,52	0,68	0,79	kVAR
Energía Activa				
L 1	68,45	75,21	76,14	kWh
L 2	69,43	75,69	76,49	kWh
Total	137,88	150,80	152,63	kWh

Fuente: Autores

Después de indicar cada uno de los parámetros eléctricos de los circuitos de luminarias tipo LED, se procede a realizar el análisis del cumplimiento de los parámetros de calidad de energía de acuerdo a la regulación CONELEC 004/01.

4.2. Análisis del factor de Potencia (LED)

Tabla N° 4.4

Valores de Factor de Potencia

	Circuito 1	Circuito 2	Circuito 3	Observación
Factor de Potencia	0,97	0,96	0,97	Cumple con la Regulación

Fuente: Autores

De acuerdo a la Tabla N° 4.4 se indica los valores del factor de potencia de los circuitos de las luminarias LED, se indica un factor de potencia promedio de 0,97, según la regulación CONELEC 004/01 el factor de potencia debe ser mayor a 0,92; por lo tanto, el factor de potencia se encuentra dentro de los valores establecidos por la norma.

4.3. Análisis de Niveles de Voltaje (LED)

Para el análisis de los niveles de voltaje, se debe aplicar la fórmula de índice de calidad para el nivel de voltaje, establecida en la regulación CONELEC 004/01:

$$\Delta V_K(\%) = \frac{V_K - V_n}{V_n}$$

Donde:

ΔV_K : Variación de voltaje, en el punto de medición, en el intervalo k de 10 minutos.

V_K : Voltaje eficaz (rms) medido en cada intervalo de medición k de 10 minutos.

V_n : Voltaje nominal en el punto de medición.

Tabla N° 4.5

Valores de Niveles de Voltaje

	Subetapa 1	Subetapa 2
Alto Voltaje	$\pm 7,0 \%$	$\pm 5,0 \%$
Medio Voltaje	$\pm 10,0 \%$	$\pm 8,0 \%$
Bajo Voltaje. Urbanas	$\pm 10,0 \%$	$\pm 8,0 \%$
Bajo Voltaje. Rurales	$\pm 13,0 \%$	$\pm 10,0 \%$

Fuente: Autores

Según la Tabla N° 4.5 los niveles de voltaje dependen de la zona en donde se ha realizado la medición: zona urbana o zona rural, la Subetapa 1 comprende medio voltaje (distribución), la Subetapa 2 al nivel de consumidor. Por consiguiente, las luminarias LED, corresponde a la categoría Bajo voltaje, zona urbana y Subetapa 2, cuya variación es menos del $\pm 8 \%$ como se resalta en la tabla.

Los datos obtenidos a través del registrador de carga, se analiza para determinar si existen desniveles de voltaje en los circuitos de alimentación de las luminarias LED.

Tabla N° 4.6

Valores de Niveles de Voltaje

	Circuito 1	Circuito 2	Circuito 3	Observación
Niveles de Voltaje Máximo	4,81 %	4,21 %	4,65 %	Cumple con la Regulación

Fuente: Autores

De acuerdo a lo especificado en la Tabla N° 4.6 los circuitos de las luminarias LED, presentan un desbalance promedio del 4,81%, lo que significa que no presenta desbalances de voltaje ya que estos parámetros se encuentran bajo el 8 % establecido por norma.

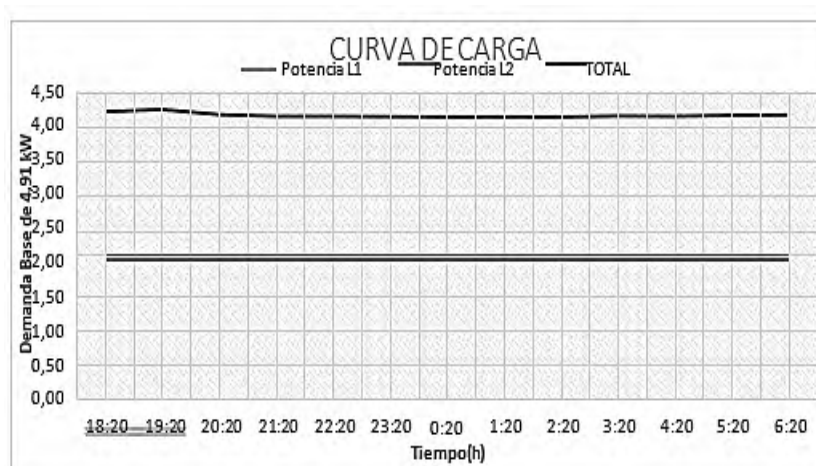
4.4. Análisis de la carga Diaria

Para la elaboración de la curva de carga se trabajó con las potencias medidas durante siete días por el analizador de carga, para esto se analiza el día más representativo del funcionamiento de las luminarias que fue el día 24 de Agosto del 2018. La curva de carga representa un comportamiento lineal característico, donde la demanda pico se presenta a las 19:20 am.

En la representación gráfica indicada se puede observar que no varía la demanda o carga eléctrica en el intervalo de tiempo, la demanda es constante.

Gráfica N° 4.1

Curva de carga diaria



Fuente: Autores

De acuerdo a la Gráfica N° 4.1 se puede observar la curva típica del consumo de las luminarias tipo LED, dicha curva es constante ya que no existen variaciones significativas de carga. Dicha curva es analizada en un periodo de tiempo de 24 horas, donde la potencia máxima es de 2 kW.

a) Análisis de los armónicos de Voltaje (LED)

• THD de Voltaje total (LED)

Para el análisis de la presencia de armónicos de voltaje, se debe determinar si el nivel de THD de voltaje sobrepasa el límite establecido por la norma IEEE – 519, para cada circuito. Para esto se debe basar en la tabla de niveles de THDV, de acuerdo al nivel de voltaje de alimentación de las luminarias. Como se indica en el Anexo 15

Tabla N° 4.7

Límites de la distorsión armónica de voltaje para sistemas de distribución según la norma IEEE.

Tensión	Distorsión armónica de tensión individual %	Distorsión de tensión total, THD [V_n]%
$U \leq 69 \text{ kV}$	3,0 %	5,0 %
$69 \text{ kV} < U \leq 161 \text{ kV}$	1,5 %	2,5 %
$U > 161 \text{ kV}$	1,0 %	1,5 %

Fuente: Autores

De acuerdo la Tabla N° 4.7 el nivel de THD de voltaje que se debe cumplir de acuerdo al nivel de voltaje de las luminarias que es menor a 69 kV es del 5,0 %, para esto se debe analizar los datos registrados de cada circuito.

Tabla N° 4.8

Valores de THD de voltaje

	% THDV Total Medido			%THDV Total IEEE - 519	Cumple/No cumple
	%THDV mínimo	%THDV promedio	%THDV máximo		
Circuito 1	1,46	2,26	4,50	5.0 %	Cumple
Circuito 2	1,38	2,10	4,05	5.0 %	Cumple
Circuito 3	1,52	2,87	4,00	5.0 %	Cumple

Fuente: Autores

Según los datos presentados en la tabla 4.8 el THD de voltaje es aproximadamente de 4,18 %, lo cual se encuentra dentro de los rangos establecidos por la norma. Con este valor se puede concluir que el sistema de luminarias LED no tiene armónicos de Voltaje.

- THD de Voltaje individual (LED)

Tabla N° 4.9

Valores de armónicos de voltaje individual

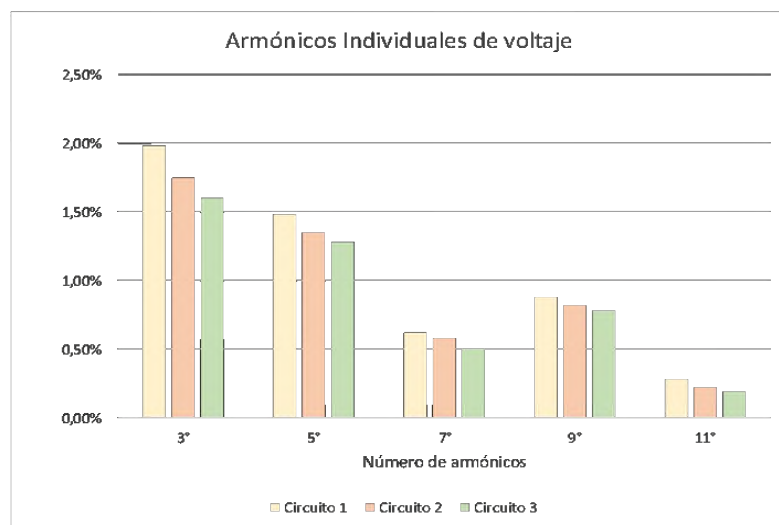
	% THDV Individual Medido					%THDV Total IEEE - 519	Cumple/No cumple
	3°	5°	7°	9°	11°		
Circuito 1	1,98 %	1,48 %	0,62 %	0,81 %	0,28 %	3.0 %	Cumple
Circuito 2	1,75 %	1,35 %	0,58 %	0,82 %	0,22 %	3.0 %	Cumple
Circuito 3	1,60 %	1,28 %	0,50 %	0,78 %	0,19 %	3.0 %	Cumple

Fuente: Autores

Según la Tabla N° 4.9 el porcentaje de los armónicos individuales de voltaje debe estar dentro del 3%, para esto se considera los niveles totales de los armónicos individuales de voltaje de las barras del circuito, en la tabla 35 se indica el nivel de armónicos impares de voltaje que presenta el sistema eléctrico.

Gráfica N° 4.2

Armónicos individuales de voltaje



Fuente: Autores

De acuerdo a la figura 41, se analiza que el porcentaje de los armónicos de voltaje individuales, se encuentran por debajo del 2 %, por lo tanto, no hay presencia de armónicos de voltaje.

a) Análisis de los armónicos de Corriente (LED)

Para el análisis de los armónicos de corriente, se debe realizar primero el análisis del THD de corriente, donde se debe realizar los cálculos correspondientes para determinar a qué nivel de THDI corresponde de acuerdo a la norma IEEE -519. Esto se realiza para cada circuito, y se considera los siguientes datos:

Potencia de alimentación: 25 kVA

Nivel de Voltaje de funcionamiento: 220 V

Impedancia: 2,3 %

Con los datos expuestos anteriormente, se consideran para realizar el cálculo de armónicos de corriente para todos los circuitos de alimentación de la vía. El transformador es de 25 kVA y cuenta con un porcentaje de impedancia de 2,3 % o 0,023

$$I_{CC} = \frac{1}{X_{p.u}}$$

$$I_{CC} = \frac{1}{0,023}$$

$$I_{CC} = 43,48$$

Para obtener el valor de la relación $\alpha = \frac{I_{CC}}{I_{Lpu}}$ se calcula la corriente de carga I_L en amperios,

para posteriormente obtener la corriente de carga en valores en por unidad I_{Lpu} . Para obtener la corriente de carga se emplea la siguiente ecuación:

$$S = V * I_L * \sqrt{3}$$

$$I_L = \frac{S}{V * \sqrt{3}}$$

La potencia que se considera es la del transformador 25 kVA, el voltaje es el del secundario del transformador 220 V.

$$I_L = \frac{25\,000}{220 \cdot \sqrt{3}} = 65,61 \text{ A}$$

$$\frac{I_{cc}}{I_L} = \frac{43,48}{65,61}$$

$$\alpha = \frac{I_{cc}}{I_L} = 0,663$$

A continuación, se debe calcular el TDD:

TDD: Distorsión de demanda total, distorsión de corriente armónica en % de la máxima corriente de carga demandada.

El TDD se calcula para cada uno de los circuitos a partir de la relación entre la corriente de cortocircuito y la corriente de línea, para cada circuito. En la tabla 36 se presenta los valores obtenidos y necesarios para el análisis del nivel de corrientes armónicas del sistema.

Tabla N° 4.10

Cálculo de α para verificar los armónicos de corriente

Circuito 1	X_{pu}	I_{cc}	I_{cc}/I_{Lpu}
Fase 1	0,023	43,48	138,70
Fase 2	0,023	43,48	139,15
Circuito 2			
Fase 1	0,023	43,48	138,00
Fase 2	0,023	43,48	138,25
Circuito 3			
Fase 1	0,023	43,48	138,90
Fase 2	0,023	43,48	138,98

Fuente: Autores

En la Tabla N° 4.10 se indica el resumen de la relación de (I_{cc}/I_{Lpu}) que está en un promedio de 138,92. De acuerdo a lo establecido en la norma IEEE-519, este valor que debe estar entre $100 < 1000$ donde la TDD permitida es del 15 %.

Tabla N° 4.11

Limites de distorsión de corriente

Sistemas de distribución (120 V – 69 kV)						
$\frac{I_{sc}}{I_L}$	Tasa individual admisible en relación a I_L (%)					TD D (%)
	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	
$< 20^{(1)}$	4,00	2,00	1,50	0,60	0,30	5,00
$20 < 50$	7,00	3,50	2,50	1,00	0,50	8,00
$50 < 100$	10,00	4,50	4,00	1,50	0,70	12,00
$100 < 1000$	12,00	5,50	5,00	2,00	1,00	15,00
> 1000	15,00	7,00	6,00	2,50	1,40	20,00

Fuente: Autores

De acuerdo a la Tabla N° 4.11, indica los valores permitidos de la tasa de distorsión armónica por la norma IEEE 519, que de acuerdo a los valores analizados y calculados el valor permitido para el sistema de iluminación es del 15 %.

- **THD de Corriente (LED)**

Tabla N° 4.12

THD de corriente

	% THDI Total Medido			%THDI Total IEEE - 519	Cumple/No cumple
	%THDI mínimo	%THDI promedio	%THDI máximo		
Circuito 1	3,29	16,50	33,74	15.00	No Cumple
Circuito 2	3,10	16,05	32,20	15.00	No Cumple
Circuito 3	3,02	16,00	31,00	15.00	No Cumple

Fuente: Autores

Según los datos analizados el THD de corriente de la Tabla N° 4.12, es aproximadamente de 33,74 %, lo cual se encuentra fuera de los rangos establecidos por la norma. Con este valor se puede concluir que el sistema de luminarias LED tiene armónicos de Corriente, por lo tanto, es necesario realizar el análisis de los armónicos individuales de corriente.

4.5. Armónicos de Corriente individual (LED)

Tabla N° 4.13

Valores de armónicos de Corriente individual

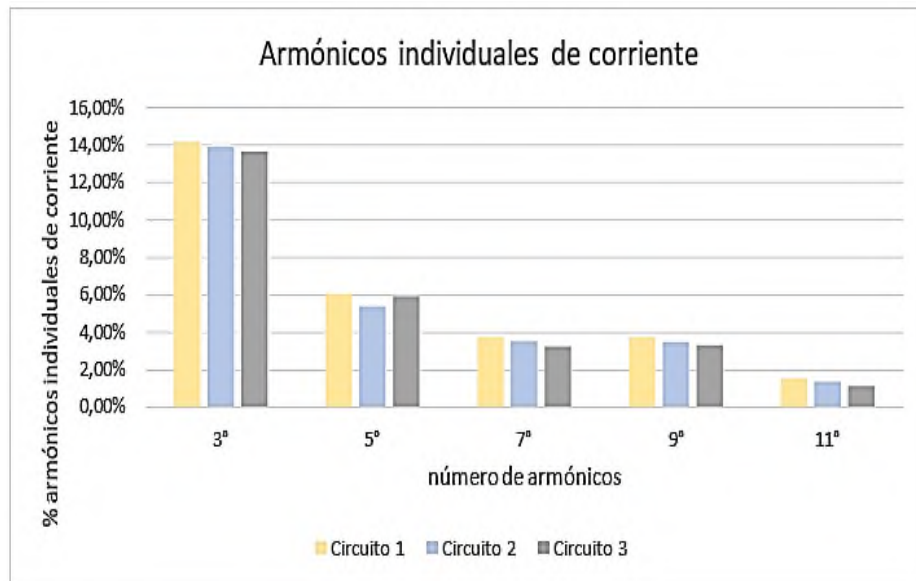
	% THDI Individual Medido					%THDI Total IEEE - 519	Cumple/No cumple
	3°	5°	7°	9°	11°		
Circuito 1	14,1 %	6,0 %	3,7 %	3,7 %	1,5 %	12.00	No Cumple
Circuito 2	13,85 %	5,35 %	3,48 %	3,45 %	1,32 %	12.00	No Cumple
Circuito 3	13,60 %	5,88 %	3,20 %	3,28 %	1,09 %	12.00	No Cumple

Fuente: Autores

Según la Tabla N° 4.13 el armónico más representativo del sistema es el tercero, con un porcentaje del 13,85 % el mismo que sobrepasa al 12 % establecido por la regulación, por lo tanto, existe armónicos de corriente, posteriormente se planteará soluciones para mitigar estos armónicos de corriente.

Gráfica N° 4.3

Armónicos individuales de corriente



Fuente: Autores

De acuerdo a la Gráfica N° 4.3, se analiza que el porcentaje de los armónicos de corriente individuales, se encuentran fuera del 12 %, por lo tanto, hay presencia de armónicos de corriente y se visualiza que solo el tercer armónico es el que sobrepasa la norma establecida.

Análisis de datos obtenidos a través de la simulación EASY POWER

Simulación Inicial de las luminarias tipo LED

Una vez teniendo la información inicial del sistema de iluminación tipo LED, se procede a ingresar los datos en el software, obtenidos en las mediciones.

Los datos ingresados en el software son los siguientes:

- Transformador de 13,8 kV a 220 V de 25 kVA
- Tres conductores de calibre 1/0 AWG
- Carga total conectada al transformador:

Circuito 1: 3,9 kW

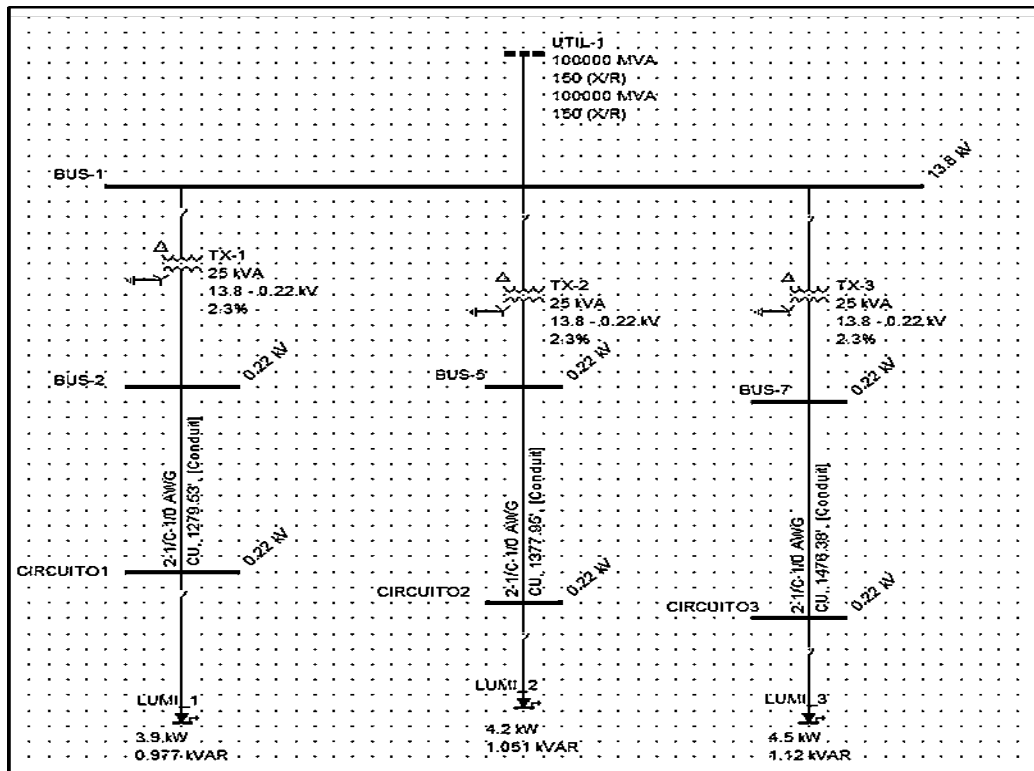
Circuito 2: 4,2 kW

Circuito 3: 4,5 kW

Estos datos se ingresan al software de simulación para determinar cuáles son los problemas y así plantear soluciones para mejorar el servicio de alumbrado público. A continuación, se indica el ingreso del diagrama al programa de simulación

Gráfica N° 4.4

Simulación inicial del sistema de alumbrado público

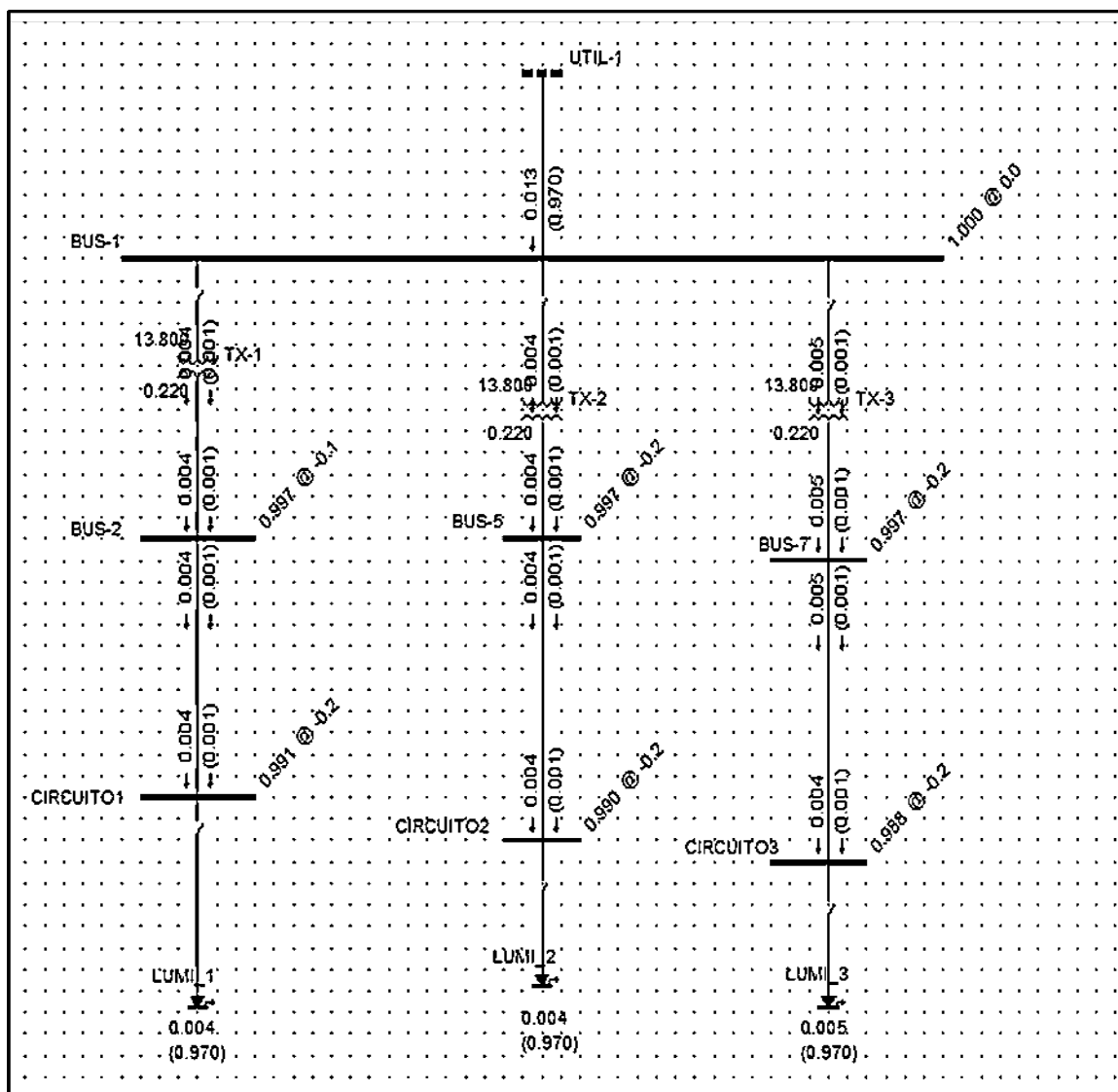


Fuente: Autores

En la Gráfica N° 4.4 se indica el diagrama unifilar de los tres circuitos de las luminarias tipo LED, en el software de simulación EASY POWER. Una vez ingresado los datos al software de simulación, se realiza la primera corrida de flujos de potencia, para encontrar los problemas del circuito, además de indican los reportes del software de la corrida de flujos.

➤ **Corrida de Flujo Inicial en el software EASY POWER****Gráfica N° 4.5**

Simulación de la corrida de flujo inicial del sistema de alumbrado público LED



Fuente: Autores

De acuerdo a la Gráfica N° 4.5 se indica la corrida de flujo de potencia inicial donde se indica el nivel de factor de potencia de cada circuito. El factor promedio que se visualiza en la figura 44 es de un promedio del 0,97, el mismo que concuerda con los datos del analizador de carga,

4.6. Problemas encontrados mediante la simulación (LED)

a) Factor de Potencia

Tabla N° 4.14

Análisis del factor de potencia de los circuitos

Nombre	Base kV	Factor de Potencia
CIRCUITO 1	0,220	0,970
CIRCUITO 2	0,220	0,970
CIRCUITO 3	0,220	0,970

Fuente: Autores

De acuerdo la Tabla N° 4.14 el factor de potencia del sistema, está en 0,97 el mismo que esta sobre el 0,92. El factor de potencia que arroja el simulador es por cada circuito, cada uno de ellos cumple con lo establecido por la norma.

Tabla N° 4.15

Análisis total del factor de potencia del sistema de iluminación

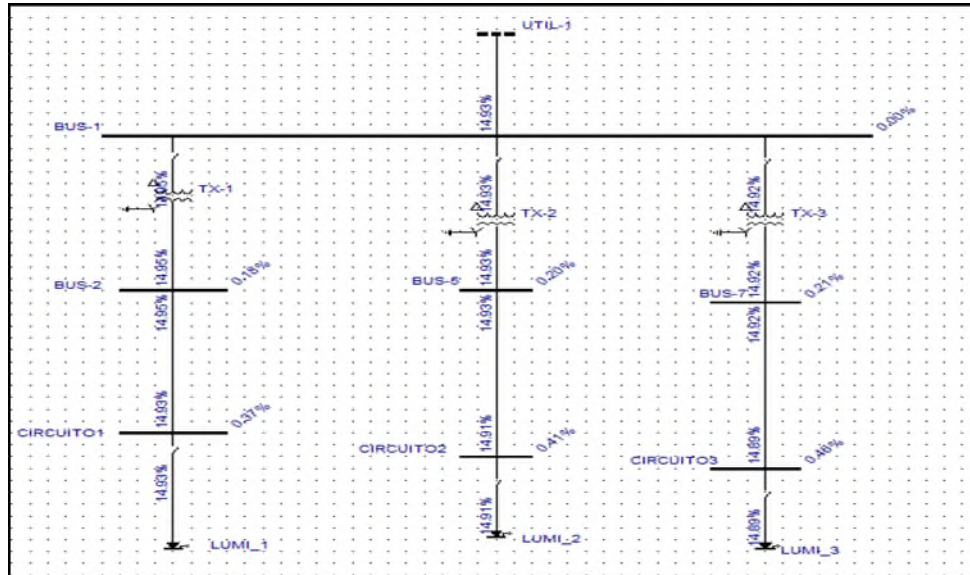
Total	PF
Generador	0,98
Carga	0,97

Fuente: Autores

En la Tabla N° 4.15 se indica el factor de potencia por el sistema de transformación (generador) y por la carga en total del sistema, el mismo que se encuentra dentro de lo establecido por la norma. Estos datos sirven como respaldo de los valores tomados por el analizador, estos valores concuerdan tanto en el analizador como en el simulador.

➤ **Corrida de Flujo Armónico Inicial en el software EASY POWER (LED)****Gráfica N° 4.6**

Simulación de la corrida de flujo de armónicos inicial del sistema de alumbrado público



Fuente: Autores

Según la Gráfica N° 4.6 se indica la corrida de flujos de armónicos tanto de voltaje como de corriente para las luminarias LED, en el grafico se puede observar que el nivel del THDV está por debajo del 3 %, los mismos que se encuentran dentro de la norma y los valores del THDI sobrepasa el 15 %, datos que concuerdan con el analizador de datos.

a) Armónicos de Voltaje

Después de realizar la corrida de armónicos del diagrama eléctrico del sistema de luminarias LED, se analiza el nivel de porcentaje del THD de voltaje en cada barra del diagrama:

Tabla N° 4.16

Análisis del THD de Voltaje del sistema de iluminación

BARRA	% THD VOLTAJE	%THDV Total IEEE - 519	Cumple/No cumple
CIRCUITO 1	1,98 %	3.0 %	Cumple
CIRCUITO 2	1,35 %	3.0 %	Cumple
CIRCUITO 3	2,15 %	3.0 %	Cumple

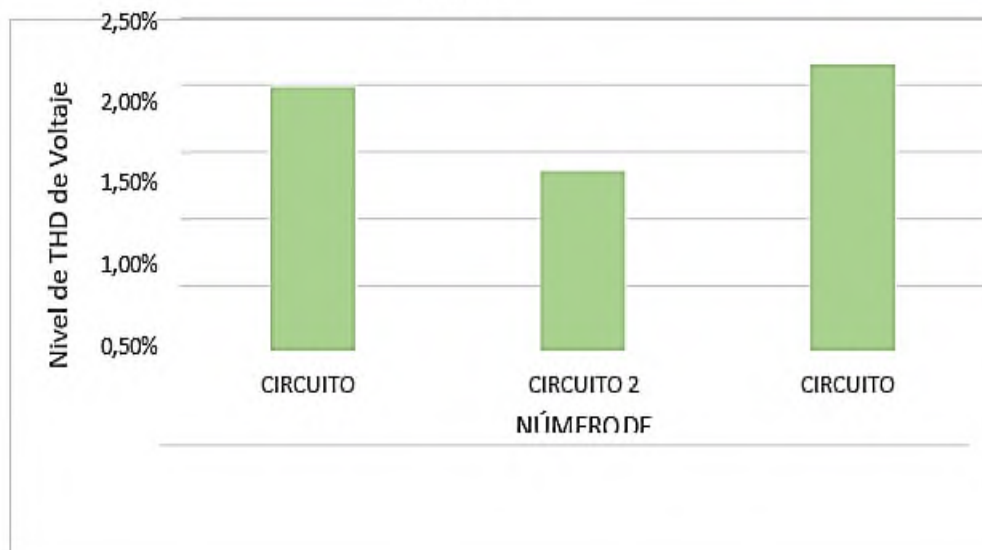
Fuente: Autores

Según la Tabla N° 4.16 se indica el nivel del THD de voltaje, que se representa en porcentaje el mismo que se encuentra por debajo del 5 % que señala la norma, estos datos que arroja son el total por cada circuito, donde se debe considerar que este porcentaje es tomado en cada barra.

Gráfica N° 4.7

% THD de Voltaje

% THD



Fuente: Autores

Según la Gráfica N° 4.7 se indica que el THD de voltaje se encuentra en un valor promedio de 1,83 %, dicho valor se encuentra dentro de lo establecido por la norma por lo tanto no existe armónicos de voltaje, valor que concuerda con los datos totales del analizador de carga por lo tanto estos datos son correctos.

b) Armónicos de Corriente

Después de realizar la corrida de armónicos del diagrama eléctrico del sistema de luminarias LED, se analiza el nivel de porcentaje del THD de corriente en las cargas del diagrama:

Tabla N° 4.17

Análisis del THD de Corriente del sistema de iluminación

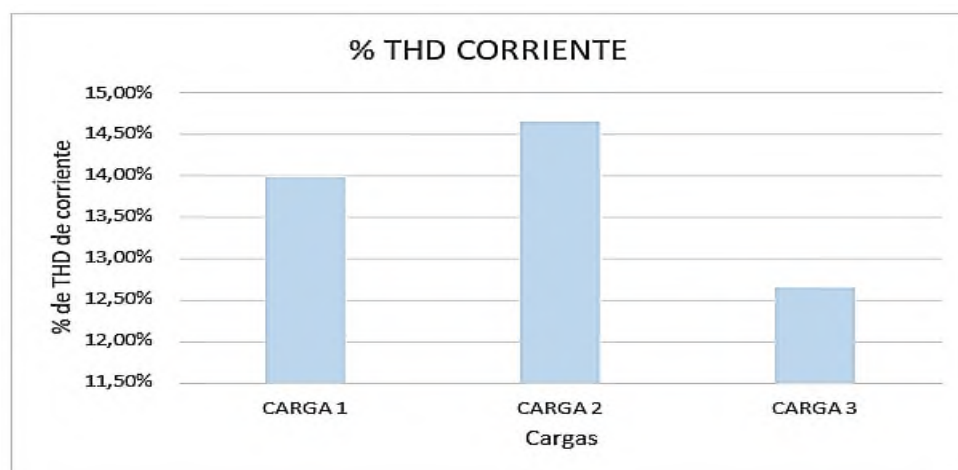
CARGA	% THD CORRIENTE	%THDI Total IEEE - 519	Cumple/No cumple
CARGA 1	13,98 %	15 %	Cumple
CARGA 2	14,65 %	15 %	Cumple
CARGA 3	12,65 %	15 %	Cumple

Fuente: Autores

Según la Tabla N° 4.17 se indica el nivel del THD de corriente, que se representa en porcentaje el mismo que se encuentra por encima del 15 % que señala la norma, estos datos que arroja son el total por cada circuito, donde se debe considerar que este porcentaje es tomado en cada carga.

Gráfica N° 4.8

Simulación del % THD de Corriente



Fuente: Autores

Según la Gráfica N° 4.8 se indica que el THD de corriente se encuentra en un valor promedio de 15,00 %, dicho valor se encuentra dentro de lo establecido por la norma por lo tanto no existe armónicos de voltaje, valor que concuerda con los datos totales del analizador de carga por lo tanto estos datos son correctos.

4.7. Soluciones Propuestas

a) Cálculo Para Diseño del Filtro Armónico de las luminarias tipo LED

➤ Circuito 1

Potencia consumida en las luminarias tipo LED= **4, 21 kW**

Lo primero que se procede a realizar es el cálculo de los ángulos, utilizado como datos el valor medido del factor de potencia y como segundo dato el valor al cual deseo llevar el factor de potencia.

$$fp1=0,97 \quad \theta1= \cos^{-1}(0,97) = 14,070$$

$$fp2=0,98 \quad \theta2= \cos^{-1}(0,98) = 11,478$$

Con los datos de los ángulos saco los KVAR efectivos (Qeff) $Q_{eff}=P (\tan \theta1 - \tan \theta2)$

$$Q_{eff}=4,21 (\tan (14.070) - \tan (11,478))$$

$$Q_{eff}=0,201 \text{ kVAR}$$

Este valor en KVAR es el que se deberá instalar en total del sistema en el punto de conexión del horno de inducción

El siguiente paso es calcular la reactancia efectiva del filtro

$$X_{eff} = \frac{(V_{ll \text{ sist}})^2}{Q_{eff}}$$

$$X_{eff} = \frac{(220 \text{ v})^2}{0,201 \times 10^3}$$

$$X_{eff}=1,09 \, \Omega \text{ x fase}$$

$$n = \frac{f_{\text{armonico}}}{f_{\text{fundamental}}}$$

$$h = \frac{180}{60} ; h=3; \quad 3*6\%=0,18; \quad 3-0,18=2,82$$

Cálculo de la reactancia capacitiva

$$X_c = \frac{(h \times 0,6)^2}{(h \times 0,6) - 1} * X_{eff}$$

$$C = \frac{1}{2 * \pi * f * X_c}$$

$$X_c = \frac{(2,82)^2}{(2,82) - 1} * 2.91$$

$$C = \frac{1}{2 * \pi * 60 * 3,33} = 7,97 \times 10^{-4} \text{ F} = 796,57 \times 10^{-6} \text{ F}$$

$$X_c = 3,33 \, \Omega$$

$$C = 796,57 \, \mu\text{F}$$

Debemos elegir un capacitor de valor comercial de 820 μF

Cálculo de la reactancia inductiva

$$X = \frac{X_c}{h^2}$$

$$r = \frac{X_L}{2\pi f}$$

$$\frac{3,33}{3,33}$$

$$\frac{0,37 \, \Omega}{2\pi \times 60}$$

$$X_L = 3^2$$

$$L = 2\pi \times 60$$

$$\frac{3,33}{9}$$

$$L = 9,815 \times 10^{-4} \text{ H}$$

$$X_L = 0,37 \, \Omega$$

$$L = 0,9815 \times 10^{-3} \text{ H}$$

$$L = 0,9815 \text{ mH}$$

Cálculo de la Resistencia del Filtro

$$R = \frac{X_L * h * 0.6}{Qf}$$

$$R = \frac{0,37 \, \Omega \times 2,82}{20}$$

$$R = 0,0522 \, \Omega$$

Cálculo de la Impedancia del Filtro

$$Z=R+j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)$$

$$Z=0,0522 \Omega + j \left(2 \times \pi \times 60 \times 0,9815 \times 10^{-3} - \frac{1}{2\pi \times 60 \times 0,79657 \times 10^{-3}} \right)$$

$$Z=0,0522\Omega + j (0,37-3,33)$$

$$Z=0,0522-j 2,96$$

Cálculo de los kVAR del Filtro

$$K_{var_{filtro}} = \frac{V^2 I^2 - I^2}{X_c - X_l}$$

$$K_{var_{filtro}} = \frac{(220)^2}{3,33-0,37}$$

$$K_{var_{filtro}}=16351,35$$

$$K_{var_{filtro}}=0,0164 \text{ MVA}$$

COMPROBACIÓN

Para que el filtro pasivo serie RLC se sintonice a la frecuencia requerida, se debe cumplir la siguiente condición:

$$X_c = X_l$$

$$X_L = X_C \times h$$

$$X_c = \frac{3,33}{2,82}$$

$$X_L = 0,37 \times 2,82$$

$$X_c = 1,18$$

$$X_L = 1,04$$

$$1,18=1,04$$

Corriente- El valor eficaz de la corriente en el filtro no debe sobrepasar los 135 % de la corriente fundamental.

Corriente Fundamental

$$I_{fund} = \frac{\frac{V_{ll\ sist}}{\sqrt{3}}}{X_c - X_l}$$

$$I_{fund} = \frac{\frac{220}{\sqrt{3}}}{3,33 - 0,37}$$

$$I_{fund} = 42,91 \text{ A}$$

Corrientes Armónicas

$$I_h = \% \times fund$$

$$I_{3\%} = 1\,410 = \frac{I_3}{I_{fund}} \times 100 = \frac{1\,410 \times 42,91 I_3}{100} \quad I_3 = 32,86 \text{ A}$$

$$I_{5\%} = 600 = \frac{I_5}{I_{fund}} \times 100 = \frac{600 \times 42,91 I_5}{100} \quad I_5 = 13,98 \text{ A}$$

$$I_{7\%} = 370 = \frac{I_7}{I_{fund}} \times 100 = \frac{370 \times 42,91 I_7}{100} \quad I_7 = 16,71 \text{ A}$$

$$I_{9\%} = 370 = \frac{I_9}{I_{fund}} \times 100 = \frac{370 \times 42,91 I_9}{100} \quad I_9 = 16,71 \text{ A}$$

$$I_{11\%} = 150 = \frac{I_{11}}{I_{fund}} \times 100 = \frac{150 \times 42,91 I_{11}}{100} \quad I_{11} = 3,50 \text{ A}$$

$$I_{total\ rms} = \sqrt{I_f^2 + I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + I_9^2 + I_{11}^2}$$

$$I_{total\ rms} = \sqrt{(42,91)^2 + (32,86)^2 + (13,98)^2 + (16,71)^2 + (16,71)^2 + (3,50)^2}$$

$$I_{total\ rms} = 60,722 \text{ A}$$

VERIFICACIÓN DE LA NORMA

$$\% \text{ margen de corriente} = \frac{I_{\text{total rms}}}{I_{\text{fundamental}}} \times 100 \% \leq 135 \% I_{\text{Fund}}$$

$$\% \text{ margen de corriente} = \frac{60,722}{42,91} \times 100 \% \leq 135 \%$$

$$I_{\text{total rms}} = 130,33 \% \leq 135 \%$$

SE ENCUENTRA DENTRO DE LA NORMA

El valor de voltaje pico del filtro no debe sobrepasar el 120 % del voltaje pico del sistema.

$$V_c = I_{\text{fund}} \times X_C$$

$$V_c = 42,91 \times 3,33$$

$$V_c = 142,89 \text{ V}$$

$$V_{c(h)} = \sum_h^n (v(h)) = \sum_h^n (I(h) \times \frac{X_C}{n})$$

$$V_{c(h)} = V_{(3)} + V_{(5)} + V_{(7)} + V_{(9)} + V_{(11)} + V_{(13)}$$

$$V_{c(h)} = (I_{(3)} \times \frac{0,57}{5}) + (I_{(5)} \times \frac{0,57}{5}) + (I_{(7)} \times \frac{0,57}{7}) + (I_{(11)} \times \frac{0,57}{11}) + (I_{(13)} \times \frac{0,57}{13})$$

$$V_{c(h)} = (32,86 \times \frac{3,33}{3}) + (13,98 \times \frac{3,33}{5}) + (16,71 \times \frac{3,33}{7}) + (16,71 \times \frac{3,33}{9}) + (3,50 \times \frac{3,33}{11})$$

$$V_{c(h)} = 36,47 + 9,31 + 7,95 + 0,67 + 6,18 + 1,06$$

$$V_{c(h)} = 61,64 \text{ V}$$

$$V_{c\text{ L-N total pico}} = \sqrt{2}(V_c + V_{c(h)})$$

$$V_{\text{L-N SISTEMA}} = \frac{V_{\text{ll sist}}}{\sqrt{3}}$$

$$V_{c\text{ L-N total pico}} = \sqrt{2}(142,89 + 61,64)$$

$$V_{\text{L-N SISTEMA}} = \frac{220\text{ V}}{\sqrt{3}}$$

$$V_{c\text{ L-N total pico}} = 289,25\text{ V}$$

$$V_{\text{L-N SISTEMA}} = 127,02\text{ V}$$

$$V_{\text{L-N pico sistema}} = \sqrt{2} \times V_{\text{L-N SISTEMA}}$$

$$V_{\text{L-N pico sistema}} = \sqrt{2} \times 127,02\text{ V}$$

$$V_{\text{L-N pico sistema}} = 179,63\text{ V}$$

VERIFICACIÓN DE LA NORMA

$$\frac{V_{c\text{ L-N total pico}}}{V_{\text{L-N pico sistema}}} \times 100 \% < 120 \%$$

$$\frac{179,63\text{ V}}{289,25\text{ V}} \times 100 \% \leq 120 \%$$

$$62,10 \% \leq 120 \% \quad \text{SI CUMPLE}$$

El valor eficaz del voltaje del filtro no debe sobrepasar EL 110 % del voltaje eficaz del sistema.

$$V_{c\text{ L-N total rms}} = \sqrt{(V_{c1})^2 + (V_{c3})^2 + (V_{c5})^2 + (V_{c7})^2 + (V_{c11})^2 + (V_{c17})^2}$$

$$V_{c\text{ L-N total rms}} = \sqrt{(142,89)^2 + (4,98)^2 + (1,48)^2 + (0,62)^2 + (0,88)^2 + (0,28)^2}$$

$$V_{c\text{ L-N total rms}} = 142,99\text{ V}$$

$$V_{\text{L-N rms SISTEMA}} = \frac{V_{\text{ll sist}}}{\sqrt{3}}$$

$$V_{\text{L-N rms SISTEMA}} = \frac{220\text{ V}}{\sqrt{3}}$$

$$V_{\text{L-N rms SISTEMA}} = 127,02\text{ V}$$

VERIFICACIÓN DE LA NORMA

$$\%_{\text{margen de voltaje}} = \frac{V_{\text{c L-N total rms}}}{V_{\text{L-N rms SISTEMA}}} \times 100 \% < 110 \%$$

$$\%_{\text{margen de voltaje}} = \frac{142,99 \text{ V}}{127,02} \times 100 \% \leq 110 \% V_{\text{L-N rms SISTEMA}}$$

$$\%_{\text{margen de voltaje}} = 104,18 \% \leq 110 \% V_{\text{L-N rms SISTEMA}}$$

SE CUMPLE_ DENTRO DE LA NORMA

El último factor evalúa el calentamiento del dieléctrico del filtro.

$$Q_{3\phi \text{ recalculado}} = \frac{(V_{\text{c L-N total rms}})^2}{X_c} \times 3 = \frac{(127,02\text{V})^2}{0,57} \times 3 =$$

$$Q_{3\phi \text{ recalculado}} = 84,92 \text{ kVAR}$$

$$\%_{\text{margen de voltaje}} = \frac{Q_{3\phi \text{ recalculado}}}{Q_{3\phi}} \times 100 \% < 135 \%$$

$$\%_{\text{margen de voltaje}} = \frac{84,92 \text{ kVAR}}{360,46 \text{ kVAR}} \times 100 \% \leq 135 \%$$

$$\%_{\text{margen de voltaje}} = 102,275 \% \leq 135 \% \quad \textbf{SI CUMPLE}$$

Calentamiento del Dieléctrico

$$\sum \downarrow h = (V(h) \times I(h)) \leq 1.35 Q_{3\phi \text{ recalculado}}$$

$$\sum \downarrow h = 3((264,62)(464,24) + (23,67)(1,36) + (18,11)(0,94) + (15,32)(0,67))$$

$$\sum \downarrow h = 3(12\,2961,11)$$

$$\sum \downarrow h = 368\,883 \text{ VAR}$$

$$\sum \downarrow h = 368,883 \text{ kVAR}$$

$$368,883 \leq 1,35 \times 368,66$$

$$368,883 \leq 497,691 \quad \textbf{SI CUMPLE}$$

Tabla N° 4.19

Datos de filtros para luminarias LED

	CIRCUITO 1	CIRCUITO 2	CIRCUITO 3
Resistencia (R)	0,0522 Ω	0,05221 Ω	0,052199 Ω
Inductancia (Xl)	0,37 Ω	0,369 Ω	0,371 Ω
Capacidad del filtro (Q)	0,22 MVAR	0,2199 MVAR	0,2211 MVAR

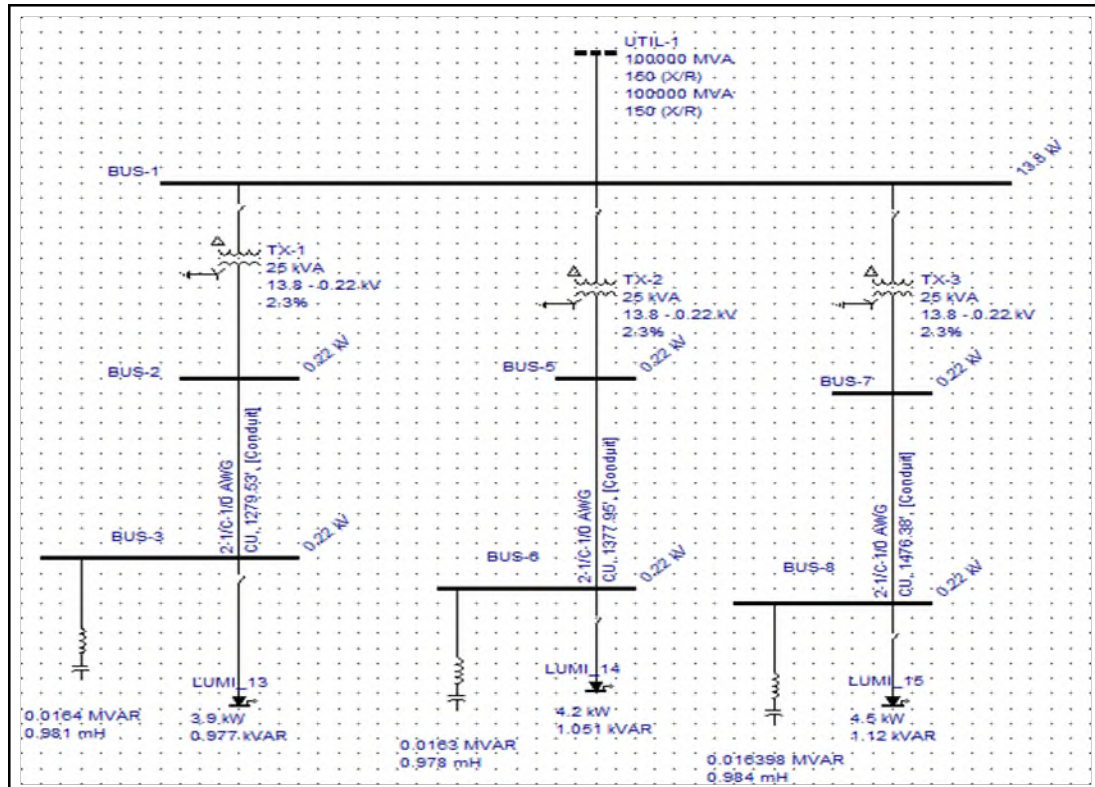
Fuente: Autores

El anterior procedimiento se debe realizar para todos los circuitos, en la Tabla N° 4.19 se especifica los datos del filtro que será ingresado en el simulador para corregir los armónicos de corriente. Los datos necesarios de calcular para el diseño de un filtro son: la resistencia, inductancia y capacidad del filtro.

Comprobación del filtro (LED)

Gráfica N° 4.9

Colocación del filtro



Fuente: Autores

El tipo de filtro que se instala en las luminarias LED, es pasivo el mismo que consta de una combinación de una bobina, una resistencia y un capacitor, dicho capacitor se coloca paralelo a la carga como se indica en la Gráfica N° 4.9.

a) Análisis de Armónicos de voltaje (LED)

Tabla N° 4.20

THD de Voltaje corregidos

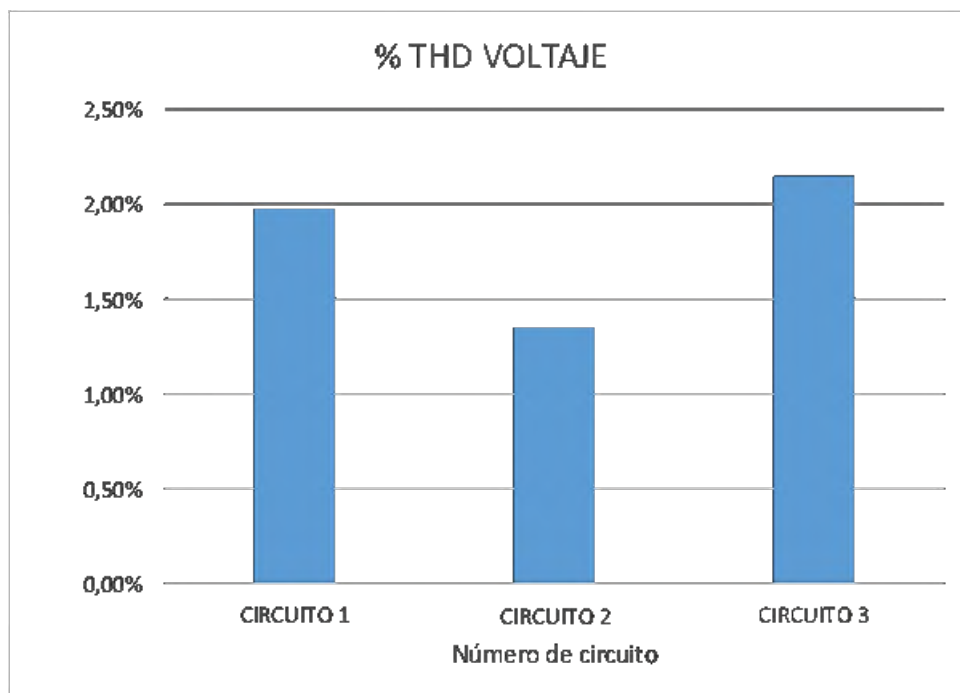
BARRA	% THD VOLTAJE	%THDV Total IEEE - 519	Cumple/No cumple
CIRCUITO 1	1,98 %	3.0 %	Cumple
CIRCUITO 2	1,35 %	3.0 %	Cumple
CIRCUITO 3	2,15 %	3.0 %	Cumple

Fuente: Autores

Una vez colocado el filtro se realiza la corrida de flujos armónicos y se obtiene los nuevos valores de los armónicos de voltaje, en la Tabla N° 4.20 se observa que el % de THD de Voltaje se reduce a menos del 3 %, valor que es altamente recomendado para un sistema de iluminación.

Gráfica N° 4.10

Simulación del %THD de Voltaje



Fuente: Autores

En la Gráfica N° 4.10 se indica los valores resultantes del porcentaje del THD de voltaje, una vez tomado los datos del THD de voltaje se realiza un diagrama de barras para identificar en qué porcentaje se encuentra los armónicos de voltaje. Donde se puede observar que en la gráfica se encuentra menos al 3 %, llegando a cumplir con la norma.

b) Análisis de Armónicos de corriente (LED)

Tabla N° 4.21

Análisis total del % THD de Corriente

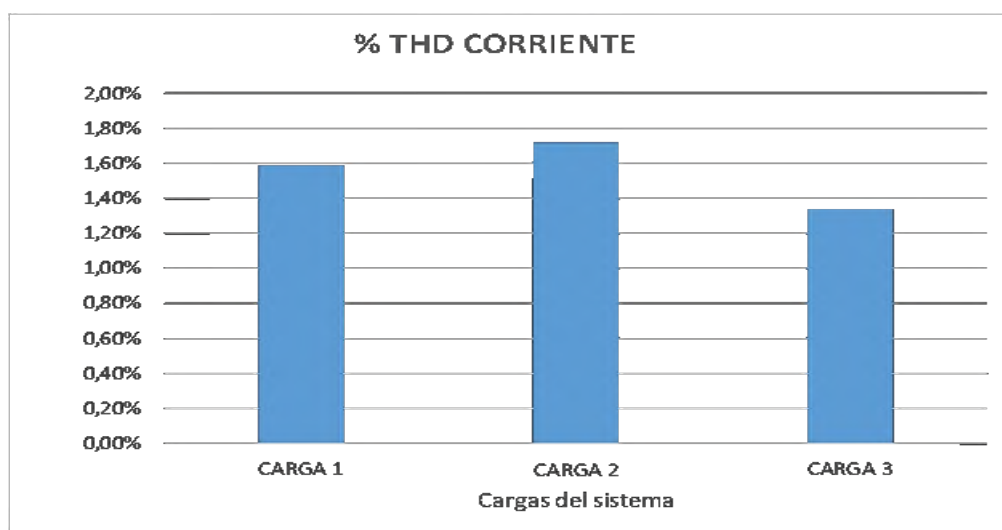
CARGA	% THD CORRIENTE
CARGA 1	1,59 %
CARGA 2	1,72 %
CARGA 3	1,34 %

Fuente: Autores

Se obtiene los nuevos valores de los armónicos de corriente, en la Tabla N° 4.21 se observa que el % de THD de Corriente se reduce a un 2 %, valor que es altamente recomendado para un sistema de iluminación, debido a que los armónicos de corriente afectan más a los circuitos eléctricos.

Gráfica N° 4.11

Simulación del %THD de Corriente



Fuente: Autores

De acuerdo a la Gráfica N° 50, se analiza que el porcentaje de los armónicos de corriente individuales, se encuentran dentro del 2 %, por lo tanto, no hay presencia de armónicos de corriente.

Análisis Técnico – Económico (LED)

➤ Ahorro energético al implementar las soluciones propuestas de luminarias LED

Cálculo de Pérdidas:

Pérdidas Iniciales=0,013 MW

Pérdidas finales=0,003 MW

$$0,013 \times 10^6 \text{ W} \times \frac{1 \text{ kW}}{1000 \text{ W}} = 13 \text{ kW}$$

$$0,003 \times 10^6 \text{ W} \times \frac{1 \text{ kW}}{1000 \text{ W}} = 3 \text{ kW}$$

Pérdidas Iniciales en hora pico=14 kW Pérdidas finales en hora pico= 5 kW

Pérdidas totales=Pérdidas Iniciales-Pérdidas finales (39) Pérdidas totales=13 kW-3 kW

Pérdidas totales= 10 kW

Cálculo de las pérdidas de energía

Perdidas de Energía=Perdidas en valor en kW*días*horas (40)

$$\# \text{ de horas de carga equivalentes (EH)} = \frac{\text{Energía total consumidas en un periodo (kWh)}}{\text{Carga máxima (kW)}}$$

Carga máxima=12,6 kW

Energía total consumidas en un periodo (kWh)=312,047 kWh

$$EH = \frac{312,047 \text{ kWh}}{12,6 \text{ kW}}$$

EH=24,76 h

Perdidas de Energía=Pérdidas totales en kW*semanas*horas

Perdidas de Energía= 10 kW*4 semanas* 24,76 horas

$$\text{Perdidas de Energía}= 990,4 \frac{\text{kWh}}{\text{mes}}$$

Se multiplica la Energía por el costo del kWh este valor es tomado del pliego tarifario

$$\text{Costo por perdidas}= 990,40 \frac{\text{kWh}}{\text{mes}} * 0,038 \frac{\text{USD}}{\text{kWh}}$$

$$\text{Costo por perdidas}= 37,64 \frac{\text{USD}}{\text{mes}} * \frac{12 \text{ meses}}{1 \text{ año}}$$

$$\text{Costo por perdidas}= 451,62 \frac{\text{USD}}{\text{año}}$$

$$\text{Ahorro económico}= 451,62 \frac{\text{USD}}{\text{año}}$$

Cálculo del TIR y el TMAR:

Para el cálculo de estos parámetros tomamos en consideración los siguientes datos:

- Inversión del Proyecto: 661,92 USD
- Ahorro económico por energía consumida anual: 451,62 USD
- Instalación de los equipos recomendados: 500,00 USD
- Mantenimiento de los equipos: 200,00 USD
- Además, se tomará en cuenta una tasa de inflación del 0,9%

Tabla N° 4.22

Flujos de carga

CUENTAS	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
INVERSIÓN	(661,92)										
AHORRO POR		451,62	470,00	489,13	509,04	529,76	551,32	573,76	597,11	621,41	646,70
INSTALACIÓN		500,00									
MANTENIMIENTO		200,00	208,14	216,61	225,43	234,60	244,15	254,09	264,43	275,19	286,39
FLUJO NETO	(661,92)	(248,38)	261,86	272,52	283,61	295,15	307,17	319,67	332,68	346,22	360,31

Fuente: Autores

- Cálculo del TIR: 23,33 %
- Cálculo del TMAR: 864,76
- Tiempo de recuperación: 5 años

De acuerdo a la Tabla N° 4.22 se visualiza que el proyecto es rentable puesto que el período de recuperación de la inversión de capital se da en un tiempo razonable de cinco años ya que el tiempo de vida útil de los equipos es de diez años, además de esto se debe considerar los beneficios que generan como el ahorro de energía y las luminarias funciona adecuadamente.

Descripción del sistema eléctrico de los circuitos de las luminarias Vapor de Sodio

El complejo Catiglata, dispone de alumbrado público de luminarias tipo vapor de sodio de 250 Watts. El sistema de iluminación está formado por una cámara de transformación es decir un solo circuito, cada transformador tiene una capacidad de 75 kVA, con un nivel del voltaje de 13,8 kV a 220 V. La alimentación consta con dos conductores de 1/0 AWG.

Tabla N° 4.23

Características del transformador

Marca:	INATRA
Voltaje de alta:	13 800 V
Voltaje de baja:	220 V
Capacidad:	75 kVA
Tipo de conexión:	DYn5
Nivel básico de aislamiento (BIL):	95 kV
Frecuencia:	60 Hz

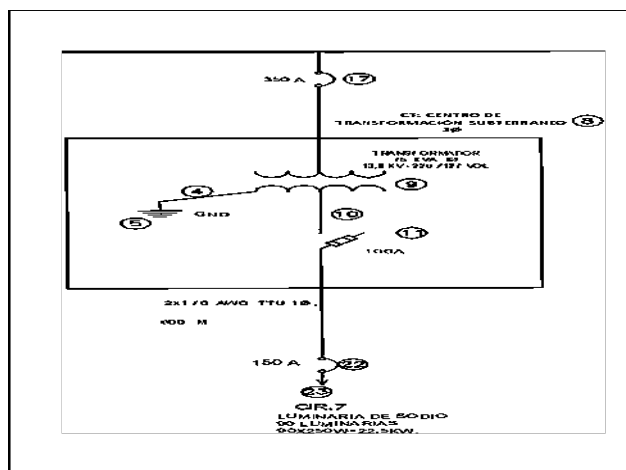
Fuente: Autores

El complejo Catiglata, donde se realizó el análisis de las luminarias de vapor de sodio dispone de alumbrado público que está conformado por luminarias de potencia de 250 Watts.

En la Tabla N° 4.23, se indica las características del sistema eléctrico de los circuitos de las luminarias vapor de sodio, donde el sistema de iluminación está formado por una cámara de transformación, el transformador tiene una capacidad de 75 kVA y con una impedancia del 2%, con un nivel del voltaje de 13,8 kV a 220 V. La alimentación consta con dos conductores de 1/0 AWG.

Gráfica N° 4.12

Diagrama Unifilar de luminarias Vapor de Sodio



Fuente: Autores

En la Gráfica N° 4.12, se indica el diagrama unifilar del sistema eléctrico de las luminarias de Vapor de Sodio, en el diagrama se visualiza un circuito en total, el mismo que esta alimentado con un transformador tipo Pad Mount. El diagrama unifilar completo se indica en el ANEXO 2, donde se especifica el número de luminarias conectadas a cada uno de los alimentadores.

Análisis de Parámetros eléctricos de las Luminarias Tipo Vapor de Sodio

Para el análisis de potencias se debe tomar en cuenta el periodo de trabajo de las luminarias en. De acuerdo a la regulación nacional de Calidad de Energía CONELEC 004/01 se considera los días de período de estudio de 7 días del 13 al 20 de noviembre del 2018, en periodos de estudio de 10 minutos, en horarios de 18H00 hasta las 06H00.

Tabla N° 4.24

Recopilación de Datos de Luminarias tipo Vapor de Sodio según FLUKE 435

Voltaje	Mínimo	Promedio	Máximo	Unidades
L 1- N	110,29	113,16	115,23	V
L 2-N	110,29	113,16	115,23	V
Corriente				
L 1	0,50	5,11	9,90	A
L 2	0,53	5,17	10,03	A
Frecuencia	59,91	60,00	60,08	Hz
Potencia Activa				
L 1	0,50	7,13	11,00	Kw
L 2	0,75	3,29	11,00	Kw
Total	1,25	10,42	22,00	Kw
Potencia Aparente				
L 1	0,10	2,34	9,67	Kva
L 2	0,50	5,88	11,48	Kva
Total	0,60	8,22	21,15	Kva
Potencia Reactiva				
L 1	0,13	6,92	10,01	Kvar
L 2	0,20	4,11	8,01	Kvar
Total	0,33	11,04	18,02	Kvar

Energía Activa				
L 1	210,80	220,10	220,60	KWh
L 2	310,18	330,15	350,40	kWh
Total	520,98	560,25	570,90	kWh

Fuente: Autores

En la Tabla N° 4.24 se indica el resumen de los datos arrojados por el analizador, para estos parámetros eléctricos permiten determinar los niveles de voltaje, corriente, potencias, factor de potencia de cada fase y total. La tabla representa los valores tomados para el circuito de las luminarias de vapor de sodio.

Después de indicar cada uno de los parámetros eléctricos de los circuitos de luminarias tipo Vapor de Sodio se procede a realizar el análisis del cumplimiento de los parámetros de calidad de energía de acuerdo a la regulación CONELEC 004/01.

a) Análisis del factor de Potencia (Vapor de Sodio)

Tabla N° 4.25

Valores de Factor de Potencia

Valores	MIN	MED	MAX	OBSERVACIONES
F.P L1	0,33	0,56	0,56	No cumple con la regulación
F.P L2	0,32	0,52	0,72	No cumple con la regulación
F.P. PROMEDIO	0,32	0,54	0,72	No cumple con la regulación

Fuente: Autores

Según la Tabla N° 4.25, se indica los datos registrados de los circuitos de luminarias vapor de Sodio, se indica un factor de potencia promedio de 0,54, según la regulación CONELEC 004/01 el factor de potencia debe ser mayor a 0,92; por lo tanto, el factor de potencia se encuentra fuera de los valores establecidos por la norma.

b) Análisis de Niveles de Voltaje (Vapor de Sodio)**Tabla N° 4.26**

Niveles de Voltaje min, med y max de las fases

	V1L RMS	V2L RMS
VOLTAJE MÍNIMO	0,26 %	0,26 %
VOLTAJE MEDIO	2,88 %	2,88 %
VOLTAJE MÁXIMO	4,75 %	4,75 %

Fuente: Autores

Se determina si existen desbalances de voltaje, en el circuito de luminarias de vapor de sodio, que no debe ser mayor al $\pm 8,0$ % establecido por CONELEC 004/01

En la Tabla N° 4.26, se aprecia que los valores de las líneas se encuentran dentro de los límites permitidos, la variación máxima que presenta el circuito está por debajo del $\pm 8,0$ %, por lo tanto, cumplen con la regulación no existe desniveles de voltaje.

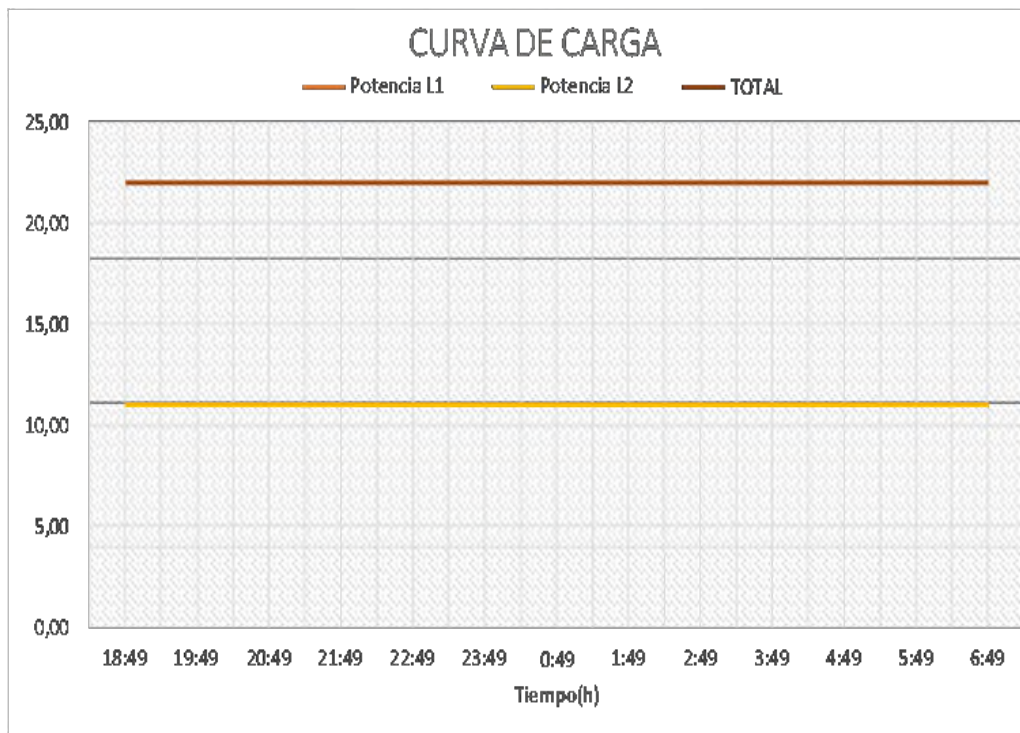
c) Análisis de la carga Diaria (Vapor de Sodio)

Para la elaboración de la curva de carga se trabajó con las potencias medidas durante siete días por el analizador de carga, para esto se analiza el día más representativo del funcionamiento de las luminarias que fue el día 14 de Noviembre del 2018. La curva de carga representa un comportamiento lineal característico, donde la demanda pico se presenta a las 23:49 pm.

En la representación gráfica indicada se puede observar que no varía la demanda o carga eléctrica en el intervalo de tiempo, la demanda es constante.

Gráfica N° 4.13

Curva de carga diaria



Fuente: Autores

De acuerdo a la Gráfica N° 4.13 se puede observar la curva típica del consumo de las luminarias tipo vapor de sodio, dicha curva es constante ya que no existen variaciones significativas de carga. Dicha curva es analizada en un periodo de tiempo de 24 horas, donde la potencia máxima es de 10 kW.

d) Análisis de los armónicos de Voltaje (Vapor de Sodio)

• THD de Voltaje total

Para el análisis de la presencia de armónicos de voltaje, se debe determinar si el nivel de THD de voltaje sobrepasa el límite establecido por la norma IEEE – 519, para cada circuito. Para esto se debe basar en la tabla de niveles de THDV, de acuerdo al nivel de voltaje de alimentación de las luminarias.

Tabla N° 4.27

Límites de la distorsión armónica de voltaje para sistemas de distribución según la norma IEEE.

Tensión	Distorsión armónica de tensión individual %	Distorsión de tensión total, THD [V_n]%
$U \leq 69 \text{ kV}$	3,0 %	5,0 %
$69 \text{ kV} < U \leq 161 \text{ kV}$	1,5 %	2,5 %
$U > 161 \text{ kV}$	1,0 %	1,5 %

Fuente: Autores

De acuerdo la Tabla N° 4.27 el nivel de THD de voltaje que se debe cumplir de acuerdo al nivel de voltaje de las luminarias que es menor a 69 kV es del 5,0 %, para esto se debe analizar los datos registrados de cada circuito.

Tabla N° 4.28

Valores de THD de voltaje

	THDV PROMEDIO	THDV L1	THDV L2	%THDV Total IEEE - 519	Cumple/No cumple
MÍNIMO	1,46	1,37	1,56	5,0 %	Cumple
MEDIO	2,26	2,20	2,33	5,0 %	Cumple
MÁXIMO	8,50	5,07	3,94	5,0 %	Cumple
OBSERVACIONES	El límite máximo del THD de las tres líneas es un 8,50 % donde excede el 5 % por lo que no cumple con la regulación				

Fuente: Autores

Según los datos presentados en la Tabla N° 4.28 el THD de voltaje es aproximadamente de 8,50 %, lo cual se encuentra fuera de los rangos establecidos por la norma. Con este valor se puede concluir que el sistema de luminarias vapor de sodio tiene armónicos de Voltaje.

- **THD de Voltaje individual (Vapor de Sodio)**

Una vez realizado el análisis del THD de voltaje Total, se estudia los armónicos individuales de voltaje, para esto se considera un porcentaje límite del 3 %, a continuación, en la tabla 54

se expone los datos de los armónicos individuales, se debe de considerar que los armónicos de voltaje se miden en las barras.

Tabla N° 4.29

Valores de armónicos de voltaje individual

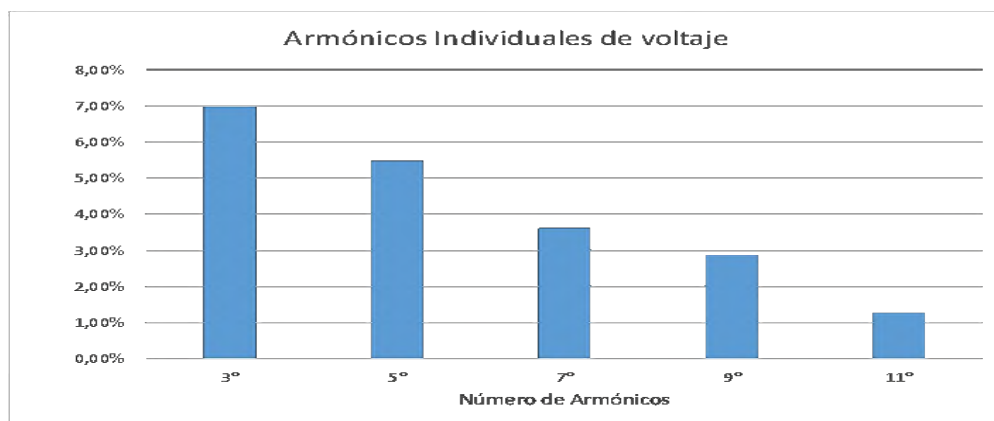
THD DE VOLTAJE INDIVIDUALES						%THDV Total IEEE - 519	Cumple/No cumple
	3°	5°	7°	9°	11°		
MÁXIMO	6,98 %	5,48 %	3,62 %	2,88 %	1,28 %	3.0 %	No cumple

Fuente: Autores

Según la Tabla N° 4.29 el porcentaje de los armónicos individuales de voltaje debe estar dentro del 3 %, para esto se considera los niveles totales de los armónicos individuales de voltaje de las barras del circuito, en la tabla 54 se indica el nivel de armónicos impares de voltaje que presenta el sistema eléctrico, donde se concluye que el armónico que afecta más al circuito es el tercero.

Gráfica N° 4.14

Armónicos individuales de voltaje



Fuente: Autores

De acuerdo a la Gráfica N° 4.14, se analiza que el porcentaje de los armónicos de voltaje individuales, se encuentran por debajo del 7 %, por lo tanto, hay presencia de armónicos de voltaje. Por lo tanto, se concluye que las luminarias led no presentan armónicos de voltaje, en cambio las luminarias vapor de sodio tiene porcentajes elevados de voltaje.

e) Análisis de los armónicos de Corriente (Vapor de Sodio)

Para el análisis de los armónicos de corriente, se debe realizar primero el análisis del THD de corriente, donde se debe realizar los cálculos correspondientes para determinar a qué nivel de THDI corresponde de acuerdo a la norma IEEE -519, se considera los siguientes datos:

Potencia de alimentación: 75 kVA

Nivel de Voltaje de funcionamiento: 220 V

Impedancia: 2,3 %

Con los datos expuestos anteriormente, se consideran para realizar el cálculo de armónicos de corriente para todos los circuitos de alimentación de la vía. El transformador es de 75 kVA y cuenta con un porcentaje de impedancia de 2,3 % o 0,023

$$I_{CC} = \frac{1}{x_{p.u}}$$

$$I_{CC} = \frac{1}{0,023}$$

$$I_{CC} = 43,48$$

Para obtener el valor de la relación $\alpha = \frac{I_{CC}}{I_{L.pu}}$ se calcula la corriente de carga I_L en amperios, para posteriormente obtener la corriente de carga en valores en por unidad $I_{L.pu}$. Para obtener la corriente de carga se emplea la siguiente ecuación:

$$S = V * I_L * \sqrt{3}$$

$$I_L = \frac{S}{V * \sqrt{3}}$$

La potencia que se considera es la del transformador 75 kVA, el voltaje es el del secundario del transformador 220 V.

$$I_L = \frac{75\,000}{220 \cdot \sqrt{3}} = 196,82 \text{ A}$$

$$\frac{I_{cc}}{I_L} = \frac{43,48}{196,82}$$

$$\alpha = \frac{I_{cc}}{I_L} = 0,221$$

Para el cálculo de la corriente de carga en por unidad se debe obtener los valores de corriente medidos por el analizador de carga:

Tabla N° 4.30

Valores de Corriente de la línea

	L1	L2
A RMS MÍNIMA	0,50	0,53
A RMS MEDIA	5,11	5,17
A RMS MÁXIMA	9,90	10,03

Fuente: Autores

De acuerdo a la Tabla N° 4.30 se indica el resumen de corrientes de las dos líneas, donde se indican valores mínimos, promedios y máximos por fase. Dichos valores servirán para calcular los niveles de la distorsión de armónicos de corriente.

A continuación, se debe calcular el TDD:

TDD: distorsión de demanda total, distorsión de corriente armónica en % de la máxima corriente de carga demandada.

Fase 1:

Obtenemos la corriente de carga en valores por unidad de la fase 1

$$I_{Lpu} = \frac{9,90}{196,82}$$

$$I_{Lpu} = 0,050$$

El factor α es igual a:

$$\alpha = \frac{I_{cc}}{I_L}$$

$$\alpha = \frac{43,48}{0.050} = \mathbf{864,40}$$

Fase 2:

Obtenemos la corriente de carga en valores por unidad de la fase 2 obtenemos la corriente de carga en valores por unidad de la fase 1

$$I_{Lpu} = \frac{10,03}{196,82}$$

$$I_{Lpu} = 0,051$$

El factor α es igual a:

$$\alpha = \frac{I_{cc}}{I_L}$$

$$\alpha = \frac{43,48}{0.051} = \mathbf{852,91}$$

A continuación, se presenta una tabla de los valores obtenidos y necesarios para el análisis del nivel de contenido de corrientes armónicas en el sistema:

Tabla N° 4.31

Cálculo de α para verificar los armónicos de corriente

Fases	X_{pu}	I_{cc}	I_{cc}/I_{Lpu}
I₁	0,023	43,48	864,40
I₂	0,023	43,48	852,91

Fuente: Autores

En la Tabla N° 4.31 se indica el resumen de la relación de (I_{cc}/I_{Lpu}) que está en un promedio de 138,92. De acuerdo a lo establecido en la norma IEEE-519, este valor que debe estar entre $100 < 1\ 000$ donde la TDD permitida es del 15 %.

Para comenzar con el análisis de la presencia del porcentaje total del THD de corriente y de los armónicos individuales. Se debe considerar el porcentaje permitido del THD establecido por la regulación IEEE – 519.

Tabla N° 4.32

Límites de distorsión de corriente

Límites de Distorsión de Corriente para Sistemas de Distribución en General (desde 120 V hasta 69.000 V)						
Máxima Distorsión de Corriente Armónica en Porcentaje de I_L						
Orden Armónico Individual (Armónicos Impares)						
$\frac{I_{sc}}{I_L}$	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
<20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20<50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50<100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,5	12,0
100<1 000	12,0	5,5	5,0	2,0	0,7	15,0
>1 000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

Donde: I_{sc} =máxima corriente de cortocircuito en el PCC I_L =máxima corriente de carga demandada (componente de frecuencia fundamental) en el PCC

Fuente: Autores

- **Análisis del THD de Corriente (Vapor de Sodio)**

Tabla N° 4.33

THD de corriente

THD VOLTAJE	THD PROMEDIO	THD L1	THD L2	%THDV Total IEEE - 519	Cumple/No cumple
THD mínimo	19,20	17,36	21,04	15,0 %	No cumple
THD promedio	26,84	24,90	28,78	15,0 %	No cumple
THD max	48,73	46,59	50,86	15,0 %	No cumple

Fuente: Autores

Según los datos analizados el THD de corriente de la Tabla 4.33, es aproximadamente de 48,73 %, lo cual se encuentra fuera de los rangos establecidos por la norma del 15 %. Con este valor se puede concluir que el sistema de luminarias tipo vapor de sodio tiene armónicos de Corriente, por lo tanto, es necesario realizar el análisis de los armónicos individuales de corriente.

- **Armónicos de Corriente individual (Vapor de Sodio)**

Tabla N° 4.34

Análisis de armónicos individuales de corriente

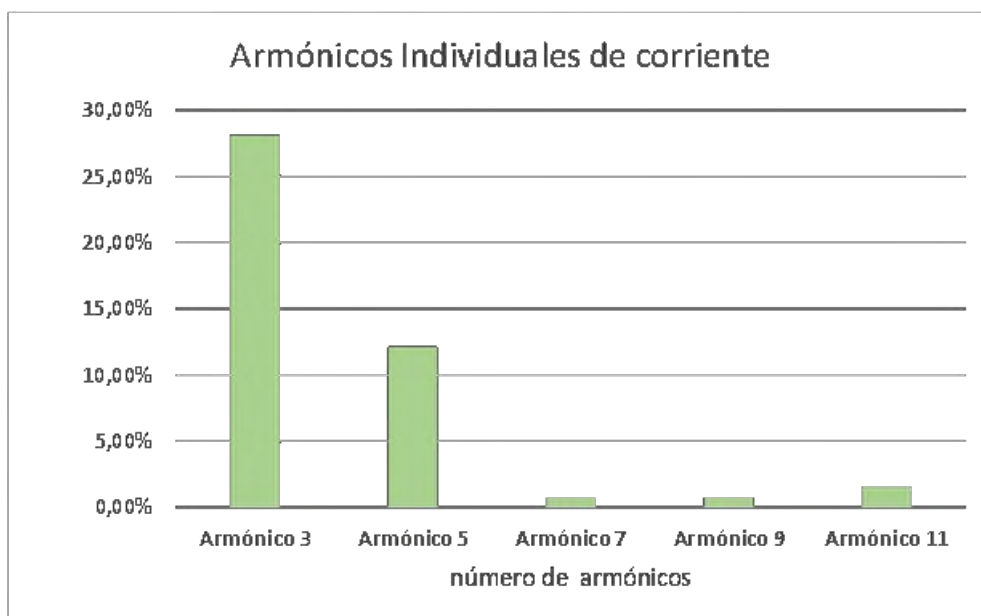
ARMÓNICOS DE CORRIENTE	CARGA	IEEE – 519	OBSERVACIONES
		Rangos Establecidos	
Armónico 3	28,14 %	12 %	No cumple
Armónico 5	12,18 %	12 %	No cumple
Armónico 7	0,71 %	12 %	Cumple
Armónico 9	0,71 %	12 %	Cumple
Armónico 11	1,61 %	12 %	Cumple

Fuente: Autores

Según la tabla 4.34 se indica el nivel del THD de corriente, que se representa en porcentaje el mismo que se encuentra por encima del 12 % que señala la norma, estos datos que arroja son el total por cada circuito, donde se debe considerar que este porcentaje es tomado en cada carga.

Gráfica N° 4.15

Armónicos individuales de corriente



Fuente: Autores

De acuerdo a la Gráfica N° 4.15, se analiza que el porcentaje de los armónicos de corriente individuales, se encuentran fuera del 12 %, por lo tanto, hay presencia de armónicos de corriente y se visualiza que solo el tercer armónico es el que sobrepasa la norma establecida.

a) Simulación Inicial de las luminarias tipo Vapor de Sodio

Una vez teniendo la información inicial del sistema de iluminación tipo Vapor de Sodio, se procede a ingresar los datos en el software, obtenidos en las mediciones.

Los datos ingresados en el software son los siguientes:

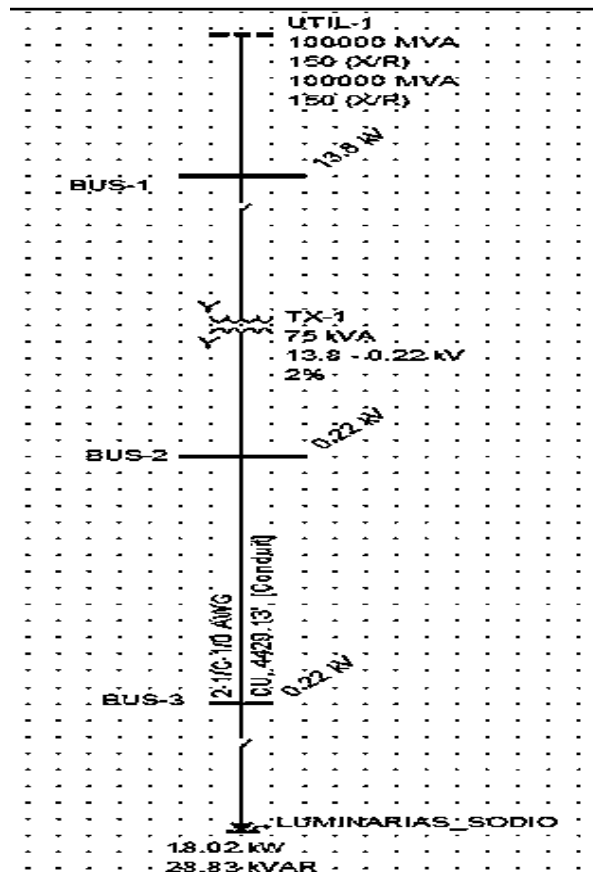
- Transformador de 13.8 kV a 220 V de 75 kVA
- Tres conductores de calibre 1/0 AWG
- Carga total conectada al transformador:

Circuito 1: 22,5 kW

Estos datos se ingresan al software de simulación para determinar cuáles son los problemas y así plantear soluciones para mejorar el servicio de alumbrado público. A continuación, se indica el ingreso del diagrama al programa de simulación

Gráfica N° 4.16

Simulación inicial del flujo de potencia de alumbrado público de luminarias de vapor de sodio



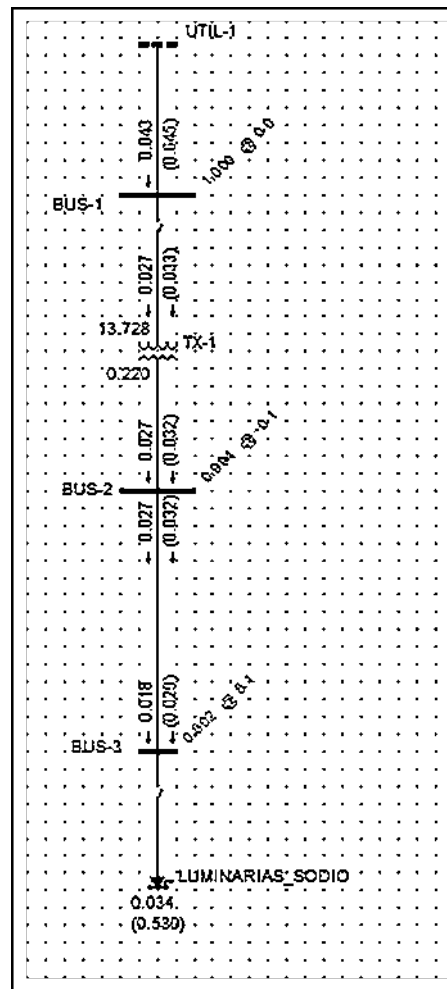
Fuente: Autores

En la Gráfica N° 4.16 se indica el diagrama unifilar del circuito de las luminarias tipo vapor de sodio, en el software de simulación EASY POWER. Una vez ingresado los datos al software de simulación, se realiza la primera corrida de flujos de potencia, para encontrar los problemas del circuito, además de indican los reportes del software de la corrida de flujos.

➤ **Corrida de Flujo Inicial en el software EASY POWER (Vapor de Sodio)**

Gráfica N° 4.17

Simulación de la corrida de flujo inicial del sistema de alumbrado público de vapor de sodio



Fuente: Autores

De acuerdo a la Gráfica N° 4.17 se indica la corrida de flujo de potencia inicial donde se indica el nivel de factor de potencia de cada circuito. El factor promedio que se visualiza en la figura 55 es de un promedio del 0,53, el mismo que concuerda con los datos del analizador de carga,

➤ Problemas encontrados mediante la simulación

b) Factor de Potencia

Tabla N° 4.35

Análisis del factor de potencia de los circuitos

Nombre	Base kV	Factor de Potencia
Barra 1	13,8	0,53
Barra 2	0,220	0,54
Barra 3	0,220	0,53

Fuente: Autores

De acuerdo la Tabla N° 4.35 el factor de potencia del sistema, está en 0,53 el mismo que está bajo el 0,92. El factor de potencia que arroja el simulador es por el circuito, este no cumple con lo establecido por la norma.

Tabla N° 4.36

Análisis total del factor de potencia del sistema de iluminación

Total	PF
Generador	0,645
Carga	0,530

Fuente: Autores

En la Tabla N° 4.36 se indica el factor de potencia por el sistema de transformación (generador) y por la carga en total del sistema, el mismo que se encuentra fuera de lo establecido por la norma. Estos datos sirven como respaldo de los valores tomados por el analizador, estos valores concuerdan tanto en el analizador como en el simulador.

c) Sobrecarga de barras

Tabla N° 4.37

Análisis de sobre carga del sistema de iluminación

Barra	Base kV	Vpu	kV
BUS-3	0,220	0,802	0,176

Fuente: Autores

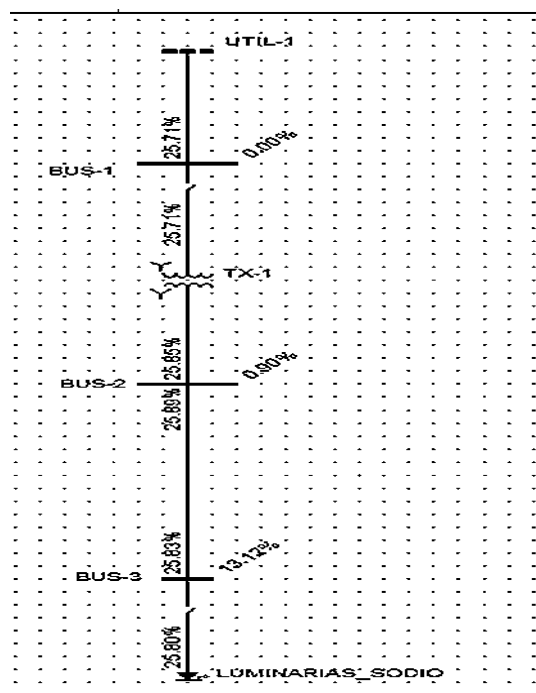
De acuerdo a la Tabla N° 4.37 los datos obtenidos en la simulación se pueden observar que la barra en la cual están conectado las cargas de iluminación, se encuentra sobrecargado, para aliviar la sobrecarga es necesario aumentar el calibre de conductor, lo que significa mayor inversión económica.

➤ Corrida de Flujo Armónico Inicial en el software EASY POWER (Vapor de Sodio)

La corrida de flujos armónicos permite conocer el porcentaje del THD de voltaje en cada una de las barras del sistema eléctrico

Gráfica N° 4.18

Simulación de la corrida de armónicos inicial del sistema de alumbrado público de vapor de sodio



Fuente: Autores

Según la Gráfica N° 4.18 se indica la corrida de flujos de armónicos tanto de voltaje como de corriente para las luminarias vapor de sodio, en el gráfico se puede observar que el nivel del THDV está sobre el 13 %, los mismos que se encuentran fuera de la norma y los valores del THDI sobrepasa el 15 %, datos que concuerdan con el analizador de datos.

d) Armónicos de Voltaje (Vapor de Sodio)

Después de realizar la corrida de armónicos del diagrama eléctrico del sistema de luminarias de Vapor de Sodio se analiza el nivel de porcentaje del THD de voltaje en cada barra del diagrama:

Tabla N° 4.38

Análisis total de los armónicos de voltaje del sistema de iluminación

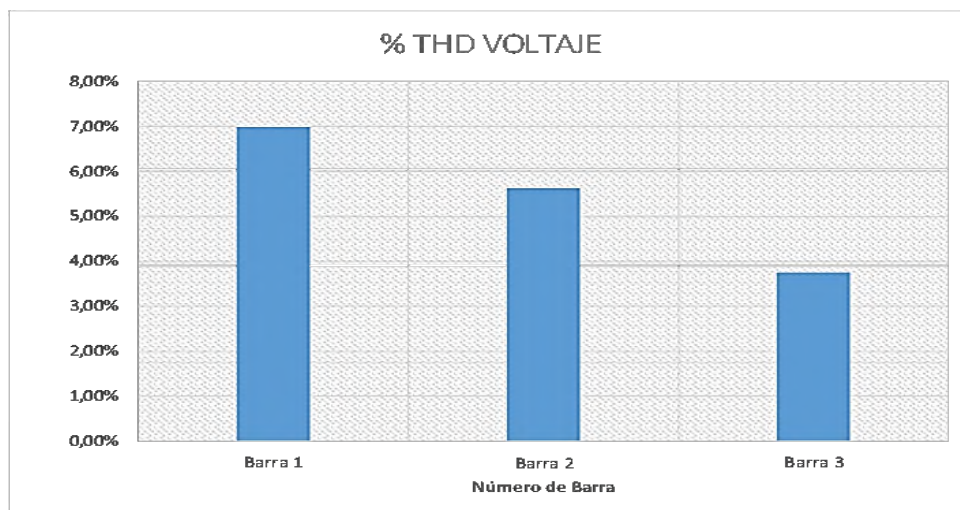
BARRA	% THD VOLTAJE	%THDV Total IEEE - 519	Cumple/No cumple
Barra 1	6,98 %	3.0 %	No Cumple
Barra 2	5,62 %	3.0 %	No Cumple
Barra 3	3,75 %	3.0 %	No Cumple

Fuente: Autores

Según la Tabla N° 4.38 se indica el nivel del THD de voltaje, que se representa en porcentaje el mismo que se encuentra por encima del 5 % que señala la norma, estos datos que arroja son el total por cada circuito, donde se debe considerar que este porcentaje es tomado en cada barra.

Gráfica N° 4.19

% THD de Voltaje



Fuente: Autores

Según la Gráfica N° 4.19 se indica que el THD de voltaje se encuentra en un valor promedio de 7 %, dicho valor se encuentra fuera de lo establecido por la norma por lo tanto existe armónicos de voltaje, valor que concuerda con los datos totales del analizador de carga por lo tanto estos datos son correctos.

e) Armónicos de Corriente (Vapor de Sodio)

Después de realizar la corrida de armónicos del diagrama eléctrico del sistema de luminarias vapor de sodio se analiza el nivel de porcentaje del THD de corriente en las cargas del diagrama:

Tabla N° 4.39

Análisis total de los armónicos de corriente del sistema de iluminación

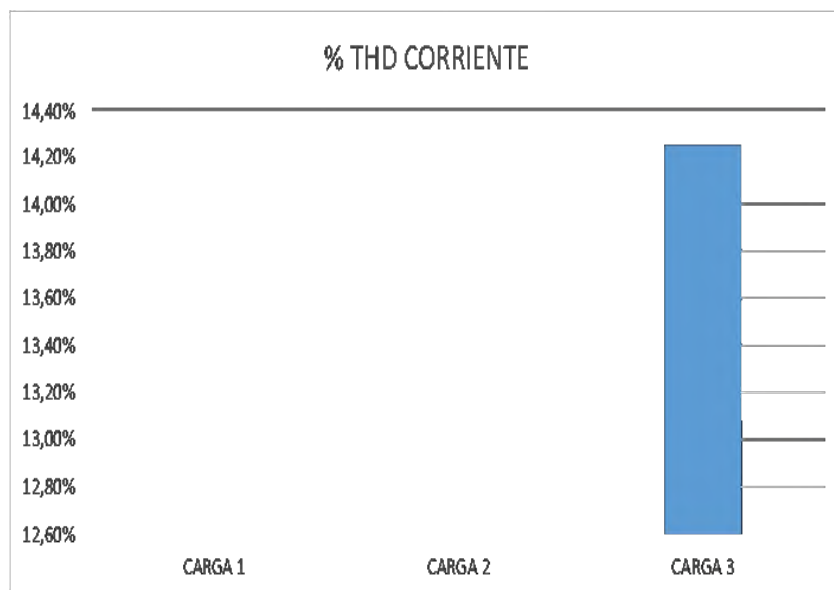
CARGA	% THD CORRIENTE	%THDI Total IEEE - 519	Cumple/No Cumple
CARGA 1	16,20 %	15 %	Cumple
CARGA 2	18,20 %	15 %	Cumple
CARGA 3	19,25 %	15 %	Cumple

Fuente: Autores

Se obtiene los nuevos valores de los armónicos de corriente, en la Tabla N° 4.39 se observa que el % de THD de Corriente se encuentra en un promedio del 17 % que se encuentra fuera de la norma y no es recomendable, debido a que los armónicos de corriente afectan más a los circuitos eléctricos.

Gráfica N° 4.20

Simulación del %THD de Voltaje



Fuente: Autores

De acuerdo a la Gráfica N° 4.20, se analiza que el porcentaje de los armónicos de corriente individuales, se encuentran fuera del 12 %, por lo tanto, hay presencia de armónicos de corriente y se visualiza que solo el tercer armónico es el que sobrepasa la norma establecida.

Presupuesto de Luminarias vapor de sodio

Tabla N° 4.40

Presupuesto para implementación del proyecto

ÍTEM	EQUIPO	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL
1	Filtro electrónico de paso bajo/pasivo/de armónico AFQ	1	\$ 370	\$ 370,00
2	Conductor calibre 2/0 AWG	1 350 m	\$ 5,35	\$ 7 222,50
SUB TOTAL				\$ 7 592,00
IVA 12 %				\$911,10
TOTAL				\$ 8 503,10

Fuente: Autores

➤ **Comparación de los resultados entre las luminarias tipo LED y las luminarias vapor de sodio**

Se realiza una comparación entre las luminarias LED y entre las luminarias vapor de sodio, para determinar cuáles de las dos tecnologías son mejores.

Tabla N° 4.41

Presupuesto para implementación del proyecto

	Luminarias LED	Luminarias Vapor de Sodio
Parámetros de Iluminación		
Flujo luminoso	89 076 lúmenes	5 330 lúmenes
Eficacia Luminoso	62,55 lm/W	43,17 lm/W
Uniformidad general de iluminancia	5,52	15,39
Parámetros eléctricos		
Desniveles de Voltaje	4,81 %	4,75 %
Factor de Potencia	0,97	0,54
% de THD de Voltaje	4,50 %	8,50 %
% de THD de Corriente	33,74 %	48,73 %

Fuente: Autores

Según la Tabla N° 4.41 se puede establecer las ventajas de la utilización de las luminarias LED frente a las luminarias vapor de sodio.

a) Factores de Iluminación

Para determinar la eficiencia de las luminarias se lo hace mediante el análisis de los parámetros de iluminación:

- Las luminarias tipo LED, poseen niveles de flujo luminoso en porcentajes más elevados a comparación de las luminarias vapor de mercurio.
- Los niveles de uniformidad de las luminarias tipo LED se encuentran dentro de los rangos permitidos, mientras que las luminarias vapor de sodio tienen rangos fuera de los valores nominales.

- Las luminarias tipo LED cuentan con una iluminación más uniforme y con un mayor ángulo de cobertura, además la separación de iluminación entre luminarias LED, es menor en comparación con el vapor de mercurio.

b) Niveles de parámetros eléctricos

- **Factor de Potencia:** El factor de potencia de las luminarias LED se encuentra dentro de la regulación, con un valor de 0,97 en cambio las luminarias vapor de sodio poseen un factor de potencia de 0,52 que es un valor muy bajo e incumple la norma.
- **Variaciones de Voltaje:** Las variaciones de voltaje se encuentran dentro del 8%, tanto en las luminarias tipo LED y tipo vapor de mercurio, debido a que las cargas son constantes.
- **Distorsión Armónica:** La Distorsión indica la cantidad de armónicos de corriente y de voltaje está fluyendo en las líneas de energía. De acuerdo a los estudios realizados, las luminarias tipo LED, presenta un menor porcentaje que las luminarias de vapor de sodio.
- **Niveles de Armónicos de Voltaje:** Los niveles de armónicos de voltaje en las luminarias LED, se encuentran dentro de la norma, en cambio las luminarias tipo vapor de Sodio están fuera de norma. Se concluye que las luminarias tipo vapor de mercurio inyectan armónicos de voltaje.
- **Niveles de Armónicos de Corriente:** Los niveles de armónicos de corriente en las luminarias LED, se encuentran fuera de la norma, en un porcentaje del 14 %, en cambio las luminarias tipo vapor de Sodio inyectan armónicos de corriente que están fuera de norma en un porcentaje del 17 %. Se concluye que las luminarias tipo vapor de mercurio inyectan mayor nivel de armónicos de corriente.
- **Factibilidad Económica:** Mediante una comparación entre luminarias LED y vapor de sodio, se concluye que económicamente es factible las luminarias tipo LED debido a que se invierte en un filtro de menor capacidad, mientras que en las luminarias tipo vapor de mercurio su inversión es más costosa, por el filtro de mayor capacidad y por el cambio de conductor.

BIBLIOGRAFÍA

- P. Acuña, Impacto de Alumbrado Público con LEDs en la Red de Distribución, Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2 011.
- G. M. Rosero,Bolaños, Evaluación técnica - Económica del Ahorro de energía en un sistema de Alumbrado público, Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2 016.
- L. E. M. Lara, C., E. M. Mondragón y D. S. Bautista, Estudio y Análisis de Ingeniería en Alumbrado Público con luminarios de LED en la periferia del reclusorio Norte, México, D.F: Instituto Politécnico Nacional, 2 009.
- P. Chantera y D. Tobar, Estudio de lámparas LED para alumbrado público y diseño de un sistema SCADA con control automático ON/OFF, Quito: Universidad Politécnica Salesiana sede Quito, 2 013.
- RALED, «Soluciones efectivas de iluminación,» ROY ALPHA, Bogotá, 2 017.
- S. López, Iluminación y Alumbrado Público, Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 2 015.
- Consejo Nacional de Energía, «Alumbrado Público,» Quito, 2 012.
- J. Carachure y A. Sandoval, Análisis comparativo sobre luminarias de LEDs contra vapor de sodio de alta presión y aditivos metálicos en Alumbrado Público, México, D.F: INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL, 2 012.
- J. G. Escobar Simancas, Análisis comparativo, técnico- económico entre un sistema de iluminación convencional y uno utili.
- L. L. Chabla, Auqui y D. F. Córdova, Erráez, Eficiencia energética en el alumbrado público del centro histórico de Cuenca: Telecgestión y sustitución de luminarias, Cuenca: Universidad de Cuenca, 2 015.
- G. Delgadillo, Ramirez y L. I. García Mancilla , Propuesta para el uso de LEDS en la iluminación de la Avenida Insurgentes Norte de la ciudad de México, México D.F:

Instituto Politécnico Nacional, 2 010.

CONELEC, Regulación No. CONELEC 008/01, Quito: El Directorio del Consejo Nacional de Electricidad, 2 012.

A. D. R. Gil De Castro, Estudio y Caracterización de la calidad de suministro eléctrico en los sistemas de alumbrado, Córdoba: Servicio de Publicaciones de la universidad de Córdoba, 2 012.

IEEE_519_1 992, Recomendaciones Prácticas y Requerimientos de la IEEE para el control de armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia, IEEE, 1 992.

A. Lamas, J. De los Reyes, J. Baez y S. Acevedo, «Comparación de filtros sintonizados y desintonizados,» IEEE, vol. II, nº 3, pp. 2-10, 2 015.

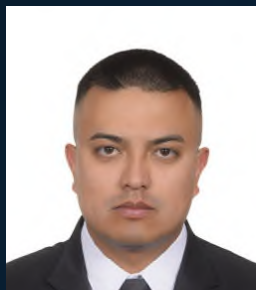
J. Mora y Y. Cevallos, Estudio y análisis de calidad de energía enfocado en nivel de armonicos en el sistema eléctrico de la subestacion enfriadora Holcim Ecuador Planta Guayaquil, Guayaquil - Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana, 2 014.

CIRCUITOR, «CIRCUITOR,» [En línea]. [Último acceso: Viernes Enero 2 019].

J. Arcila, «Ingeniería Especializada,» 2 017. [En línea]. Available: http://ingenieros.es/files/proyectos/Armonicos_en_sistemas_electricos.pdf.

A. Bravo y A. Pizano, Mejora del Alumbrado para Oficinas Nacionales del Inmueble Reforma de la Comisión Federal de Electricidad, Ciudad de México: Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y eléctrica, 2 016.

J. Gers, «Teoría y diseño de filtros de armónicos en sistemas eléctricos,» TECSUP, pp. 2-3, 2 008.



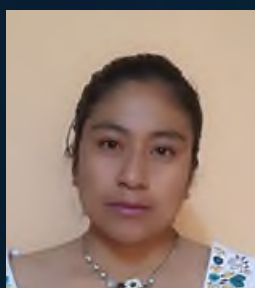
Carlos David Murillo Andrade

Ingeniero Eléctrico con experiencia en el diseño, planificación y gestión de sistemas de distribución eléctrica. Desde 2018 ha participado en proyectos de electrificación urbana y rural, mantenimiento de redes y fiscalización de obras eléctricas. Actualmente es Jefe del Área de Electrificación Urbana en la Empresa Eléctrica Ambato Regional Centro Norte S.A., donde lidera la planificación y ejecución de proyectos eléctricos. Paralelamente, se desempeña como docente en la Unidad Educativa Guayaquil, en las áreas de Instalaciones Eléctricas y Máquinas Eléctricas. Cursa estudios de maestría en Sistemas de Propulsión Eléctrica. Ambato - Ecuador



Cristian Patricio Marín Cajas

Ingeniero Eléctrico con una sólida trayectoria profesional, en el campo de la Distribución de Energía, ejerciendo cargos como jefe de Estudios Técnicos y Director de Distribución en la E.E. Ambato, adicionalmente cuenta con estudios de postgrados en energías renovables y movilidad eléctrica.



María Rebeca Tenenaula Cunduri

Ingeniera Electrónica en Telecomunicaciones y Redes, Máster en Matemática aplicada con mención a Matemática Computacional, Docente Unidad Educativa Guayaquil.



Ángel Medardo Tacoamán

Ingeniero industrial desde 2020 y máster universitario en prevención de riesgos laborales 2024. Con lo cual a reafirmado sus intereses por la investigación en las diferentes áreas de interés relacionadas tanto a la parte industrial, como a los temas de prevención de riesgos laborales que se van generando de las actividades. Participando en diferentes congresos y capacitación a los temas relacionados. Ambato, Ecuador.

ISBN: 978-9907-9504-1-0

