

OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DEL SISTEMA DE ILUMINACIÓN DEL METRO  
DE MEDELLÍN

JUAN ERNESTO LÓPEZ VÉLEZ  
DIOMAR ALEJANDRO OLARTE MIRA  
DAVID ALEJANDRO RENDÓN PULGARÍN

INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
TECNOLOGÍA EN ELECTROMECAÁNICA  
MEDELLÍN  
2012

OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DEL SISTEMA DE ILUMINACIÓN DEL METRO  
DE MEDELLÍN

JUAN ERNESTO LÓPEZ VÉLEZ  
DIOMAR ALEJANDRO OLARTE MIRA  
DAVID ALEJANDRO RENDÓN PULGARÍN

Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de  
Tecnólogos Electromecánicos

Asesor  
Adolfo León Montoya  
Ingeniero Electricista  
Especialista en Telemática

INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO  
FACULTAD DE INGENIERIAS  
TECNOLOGÍA EN ELECTROMECAÁNICA  
MEDELLÍN  
2012

Nota de aceptación.

---

---

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Medellín; \_\_\_ de \_\_\_\_\_ del 2012

## AGRADECIMIENTOS

El momento decisivo llegó y con él se han congregado tantas experiencias tanto positivas como negativas, experiencias que al fin y al cabo nos han servido para nuestra realización en cada uno de los aspectos más fundamentales para el desarrollo personal y profesional.

En primer lugar, agradecemos a Dios, motor, guía y testigo de tantos años de esfuerzos y luchas constantes por llegar a este momento tan anhelado por todos y cada uno de nosotros. Del mismo modo agradecemos a nuestras familias por el acompañamiento constante e incondicional en cada uno de los proyectos y trabajos que realizamos en las distintas etapas de nuestra formación profesional y así mismo, por ese apoyo que fue fundamental para que el camino recorrido realmente valiera la pena y se cumpliera con los objetivos personales y grupales.

Los educadores, responsables directos de nuestra formación profesional también tienen espacio en este reconocimiento. Agradecemos especialmente al MSc. Ing. Mario Arrieta Paternina y (título profesional) Adolfo Montoya, quienes nos brindaron los conocimientos que serán primordiales en el desempeño laboral y que aportaron en gran medida en que este momento fuese posible.

A la Institución Universitaria Pascual Bravo que nos brindó la oportunidad para una educación de calidad con espacios destinados a la investigación y el desarrollo de proyectos formativos.

Finalmente, damos nuestra gratitud a ELECTROCONTROL S.A por habernos proporcionado los recursos necesarios para el desarrollo de este proyecto de grado, sobre todo en lo concerniente al estudio fotométrico que sentó las bases para la culminación de la investigación.

## CONTENIDO

	Pág
INTRODUCCIÓN	15
1 EL PROBLEMA	16
2 JUSTIFICACIÓN	17
3 OBJETIVOS	18
3.1 OBJETIVO GENERAL	18
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
4 REFERENTES TEÓRICOS	19
4.1 ILUMINACIÓN ARTIFICIAL	19
4.2 BENEFICIOS Y APLICACIÓN DE LA ILUMINACIÓN	21
4.3 CONCEPTOS BÁSICOS DE LA ILUMINACIÓN	25
4.3.1 Luz	25
4.3.2 Flujo luminoso	25
4.3.3 La intensidad luminosa	25
4.3.4 Exitancia	25
4.3.5 Luminancia. Intensidad luminosa reflejada por una superficie	29
4.3.6 Rendimiento luminoso.	30
4.4 HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS DE CALIDAD DE LA ENERGÍA Y DE CORRECCIÓN DE FACTOR DE POTENCIA	30
4.5 ANTECEDENTES	31
4.6 PERTURBACIONES DE LA CALIDAD DE ENERGÍA	31
4.6.1 Huecos de tensión (Sags):	31
4.6.2 Elevaciones de tensión (Swells)	33
4.6.3 Interrupciones de larga duración (duración > 1 min)	35
4.6.4 Variaciones de tensión de estado estable	35
4.6.5 Desbalance de tensión	36
4.6.6 Variaciones de frecuencia	37
4.6.7 Muecas de tensión (notches)	37
4.6.8 Variaciones de tensión de larga duración	39
4.6.9 Flicker.	42
4.6.10 Armónicos de tensión	42
4.6.11 Armónicos de corriente	44
4.7. CAMPO MAGNÉTICO – REGLAMENTO RETIE	46
4.7.1 Definición de campo magnético	46
4.8 LUMINARIA METAL HALIDE	47
4.8.1 Luminaria por inducción magnética	47

4.8.2	Luminaria metal halide	54
4.8.3	Ventajas y desventajas entre luminarias por inducción	61
4.8.4	Paralelo entre los Aditivos Metálicos e inducción	62
5	METODOLOGÍA	66
5.1.	TIPO DE ESTUDIO	66
5.2.	METODO	66
5.3.	POBLACION	66
5.4.	MUESTRA	66
5.5	FUENTES DE INFORMACION	66
6.5.1	Fuentes primarias.	66
6.5.2	Fuentes secundarias	66
6.	RESULTADOS DEL PROYECTO	67
6.1	PRUEBAS REALIZADAS	67
6.2	CAMPO MAGNÉTICO	86
6.3	ANÁLISIS DE RESULTADOS	92
7.	CONCLUSIONES	94
8.	BIBLIOGRAFIA	94

## LISTA DE FIGURAS

		Pág
Figura 1.	Proporción de luz visible en el espectro visible humano.	20
Figura 2.	Iluminación – Seguridad, comodidad, productividad y calidad	23
Figura 3.	Intensidad Luminosa	25
Figura 4.	Iluminancia	26
Figura 5.	Exitancia	26
Figura 6.	Reflexión difusa	27
Figura 7.	Luminancia	27
Figura 8.	Rendimiento luminoso	28
Figura 9.	Forma de onda típica de un sag de tensión	29
Figura 10.	Parámetros característicos de un swell de tensión	31
Figura 11.	Muesca de tensión causada por la operación de un Convertidor	32
Figura 12.	Luminaria por inducción magnética	37
Figura 13.	Elementos constitutivos luminaria	40
Figura 14.	Principio de funcionamiento	47
Figura 15.	Lámpara de inducción: Construcción mecánica	48
Figura 16.	Modelo del transformador	49
Figura 17.	Luminaria Metal Halide 250W	50
Figura 18.	Balasto tipo reactor	51
Figura 19.	Arrancadores: Pulso de voltaje	53
Figura 20.	Excitación de un átomo	56
Figura 21.	Radiaciones electromagnéticas emitidas por un átomo	57
Figura 22..	Metodología pruebas realizadas	58
Figura 23.	Esquema de Conexión Luminaria	58
Figura 24..	Fuente Philips HPI 250w	67
Figura 25..	Esquema de Operación Luminaria por Inducción	58
Figura 26.	Esquema de Prueba para Luminarias	68
Figura 27.	Distribución fotométrica de las luminarias	72
Figura 28.	Simulación: comparativo Luminaria MH 250W vs Luminaria LVD 200W	73
Figura 29.	Vista superior, Estación San Antonio del Metro de Medellín	73
Figura 306.	Vista lateral. Estación San Antónimo del Metro de Medellín	74
Figura 31.	Vista de Planta. Estación San Antonio del Metro de Medellín Entrada Suroriental	74
Figura 32.	Modelado en Dialux, acceso SOR estación San Antonio del Metro de Medellín	75
Figura 33.	Superficies de cálculo	75
Figura 34.	Simulación del sistema de iluminación → MH	76

Figura 35.	Lista de superficies de cálculo, luminaria MH	77
Figura 36.	Simulación del sistema de iluminación → LVD	77
Figura 37.	Lista de superficies de cálculo, luminarias LDV	78
Figura 38.	asa de Distorsión Armónica Total de Voltaje y Corriente	78
Figura 39.	Tasa de Distorsión Armónica Total, luminaria de inducción	79
Figura 40.	Armónicos de voltaje y de corriente	79
Figura 41.	Armónicos de voltaje y corriente, luminaria de inducción	80
Figura 42.	Forma de onda de voltaje y corriente, luminaria MH	80
Figura 43.	Valores de corriente y voltaje (RMS), luminaria MH	81
Figura 44.	Valores de corriente y voltaje (RMS), luminaria de inducción	81
Figura 45.	Potencias Activa y Reactiva / Corriente: Fase, Luminaria de Inducción	82
Figura 46.	Factor de potencia, luminaria MH	82
Figura 47.	Factor de potencia. Luminaria de inducción	83
Figura 48.	Características de decrecimiento de iluminación en luminarias LVD y MH durante 21000 horas	83
Figura 49.	Potencias Activa y Reactiva / Corriente: Fase, Luminaria de inducción	84
Figura 50.	Factor de potencia, luminaria MH	84
Figura 51.	Factor de potencia. Luminaria de inducción	85
Figura 52.	Decrecimiento de Iluminación en luminarias MH e Inducción Magnética	89
Figura 53.	Características de decrecimiento de iluminación en luminarias LVD y MH durante 21000 horas	90



## LISTA DE TABLAS

	Pág
Tabla 1. Factor de conversión entre flujo luminoso convencional y el flujo luminoso de pupila	22
Tabla 2. Valores de luminancia	28
Tabla 3. Límites de distorsión recomendados por la NTC-5000	30
Tabla 4. Valores de referencia de la distorsión individual y total de Tensión	43
Tabla 5. Valores límites de exposición a campos electromagnéticos	46
Tabla 6. Inducción vs Aditivos Metálicos	63
Tabla 7. Características	70
Tabla 8. Valores de reflectancias de las superficies	76
Tabla 9. Mediciones de campo magnético	85
Tabla 10. Tabla de conversiones: Tesla – Gauss	86
Tabla 11. Mediciones de campo magnético ( $\mu\text{T}$ )	89
Tabla 12. Decrecimiento de Iluminación en luminarias MH e Inducción Magnética	90
Tabla 13. Conclusiones: Comparativo técnico entre las luminarias de inducción y las luminarias metal halide enfocado al Metro de Medellín.	93

## GLOSARIO

**Armónicos:** son ondas sinusoidales cuyas frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental 60Hz; representa una distorsión de la forma de onda producida por cargas no lineales.

**Calidad de energía eléctrica:** conjunto de características de la electricidad en un punto dado de un sistema de potencia y en un momento determinado, que permiten satisfacer las necesidades requeridas por el usuario. Estas características son evaluadas con respecto a un conjunto de parámetros de referencia.

**Carga no lineal:** es una carga eléctrica cuya característica de tensión/corriente es no lineal, es decir que la señal de corriente no sigue la misma forma de onda de la señal de tensión, de la cual se está alimentando la carga.

**Desequilibrio:** en un sistema polifásico, es el estado en el cual el valor eficaz de las tensiones de las fases o los ángulos entre fases consecutivas no son todos iguales. También se conoce como desbalance.

**Dips:** es una bajada súbita de la tensión en un punto de la red de energía eléctrica. También se conoce como sag.

**Flicker:** efecto producido sobre la percepción visual humana por una emisión cambiante de luz debido a iluminación sujeta a fluctuaciones pequeñas de tensión.

**Interarmónicos:** componente sinusoidal cuya frecuencia se sitúa entre las frecuencias de los armónicos, es decir donde la frecuencia no es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental.

**Interrupciones:** suceden cuando la tensión desciende notablemente por debajo de valor nominal.

**Swells:** aumento súbito del valor eficaz de tensión por encima del 110% de la tensión de referencia.

**Transitorio:** sobretensión oscilatoria o no oscilatoria de corta duración generalmente fuertemente amortiguada y que dura como máximo algunos milisegundos.

**Valor Medio Cuadrático (RMS, por sus siglas del inglés, Root - Mean - Square):** raíz cuadrada de la media aritmética de los valores instantáneos elevados al cuadrado, de una cantidad tomada sobre un intervalo de tiempo específico y con un ancho de banda determinado.

Valor eficaz de tensión y corriente: valor medio cuadrático de la tensión o corriente.

Dimmer: sirven para regular la energía en una o varias lámparas, con el fin de variar la intensidad de la luz que emiten (siempre y cuando las propiedades de la luminaria lo permitan).

Bricolaje: es la actividad manual que realiza una persona como aficionada, sin recurrir a los servicios de un profesional, para la creación, mejora, mantenimiento o reparación en especialidades como albañilería, carpintería, electricidad, fontanería, etc.

## ABREVIATURAS

CPE. Calidad de la Potencia Eléctrica.

RETIE. Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas.

MH. Metal Halide.

Lm. Lumen.

Cd. Candela.

C.W. posición del pulso con balasto regulado.

C.W. Aposición del pulso con balasto autoregulado.

OMS. Organización Mundial de la Salud.

ICNIRP (International Commission on Non- ionizing Radiation Protection)  
Comisión Internacional sobre Protección Frente a Radiaciones No Ionizantes.

AC. (Alternating Current) Corriente Alterna.

CREG. Comisión Reguladora de Energía y Gas.

DC. (Direct Current) Corriente Directa.

IEC (International Electrotechnical Commission) Comisión Electrotécnica Internacional.

IEEE. (Institute of Electrical and Electronics Engineers) Instituto de Ingenieros Electricistas y Electrónicos.

NTC. Norma Técnica Colombiana.

PF. Factor de Potencia.

PLC. (Programmable Logic Controller) Controlador lógico programable.

PWM(Pulse-Width Modulation) Modulación por ancho de pulsos.

TDD Distorsión Total de Demanda.

THD (Total Harmonic Distortion) Coeficiente de Distorsión Armónica Total.

## RESUMEN

El proyecto se realizo en convenio con el Metro de Medellín y el Pascual Bravo, el cual consistía en hacer una investigación comparativa de la iluminación para la estación de San Antonio ( acceso SOR) comparando una luminaria tipo Metal Halide de 200w con una luminaria de Indicción Magnética de 200w.

Inicialmente se realizaron unas pruebas de campo a la estación San Antonio para tomar las luces de cada luminaria y se levantan los planos a maño alzada de la estación, luego ambas luminarias fueron llevadas al laboratorio de maquinas II del la Institución Universidad Pascual Bravo donde Se realizo una identificación y caracterización de las mismas desde dos puntos de vista, los cuales se representan por los datos característicos facilitados por el fabricante y el análisis de Calidad de Energía realizado.

Posterior a esto son llevadas al laboratorio de fotometria de la empresa Electrocontrol donde se le realiza un estudio fotometrico.

Finalmente se recopila toda esta información y se sacan las conclusiones correspondientes a dicha investigación y se hace una simulación en Dialux para comparar ambas luminarias y observar los niveles de iluminación de cada una.

## INTRODUCCIÓN

Actualmente, el Sistema de Transporte Masivo de la ciudad de Medellín (Metro de Medellín Ltda.) cuenta con un sistema de iluminación conformado principalmente por luminarias de Metal-Haluro y lámparas fluorescentes. Las luminarias de Metal-Haluro presentan tiempos lentos en su respuesta ante variaciones de tensión, consumo elevado de potencia para un mismo nivel de iluminación con respecto a las tecnologías actuales, lo que ocasiona alto impacto en la eficiencia energética del sistema de iluminación y por ende del sistema eléctrico. Para dar solución a esta problemática la empresa realiza un proyecto denominado Optimización energética del sistema de iluminación del metro de Medellín, el cual enmarca la caracterización y modelado de luminarias metal halide y luminarias por inducción magnética, como uno de los objetivos principales del proyecto.

En la actualidad, los sistemas de iluminación experimentan un crecimiento acelerado en el diseño de nuevos prototipos acorde a las tecnologías y tendencias de iluminación como lo son: *Pulse- Star* (Haluro-Metálico), LED's, Inducción, lumiductos, entre otras. Todas ellas apuntan a mejorar la eficiencia de un sistema de iluminación, desde el punto de vista del ahorro energético, es decir, con ellas se busca conservar y/o mejorar el nivel de iluminación de un área determinada disminuyendo la potencia consumida; aunque cada sistema tiene aplicaciones específicas y comunes entre ellas. Es importante resaltar que cada sistema de iluminación impacta directamente la Calidad de la Potencia Eléctrica (CPE) del sistema al cual pertenecen, este impacto puede ser analizado desde los fenómenos asociados al estudio de la CPE como lo son *Sag's*, *Swell's*, *flicker*, interrupciones de corta y larga duración, desbalance de tensión, variaciones de frecuencia, *notches*, sobretensiones transitorias, variaciones de tensión de larga duración y armónicos de tensión y corriente.

Acorde al sistema de arranque que utilice el sistema de iluminación impactaría el medio con la presencia de campos magnéticos no deseables ni permisibles para el ser humano, según el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE) y los estándares ANSI e IEC. En este sentido, para diseñar e instalar un sistema de iluminación u otro, primero se deben satisfacer principalmente condiciones permisibles para el ser humano, técnicas y económicas; dentro de las técnicas se destaca la importancia de la caracterización y modelado de luminarias.

## 1. EL PROBLEMA

Actualmente, el Sistema de Transporte Masivo de la ciudad de Medellín (Metro de Medellín Ltda.) cuenta con un sistema de iluminación conformado principalmente por luminarias de metal-haluro y lámparas fluorescentes.

Las luminarias de metal-haluro presentan tiempos lentos en su respuesta ante variaciones de tensión, consumo elevado de potencia para un mismo nivel de iluminación con respecto a las tecnologías actuales, lo que ocasiona alto impacto en la eficiencia energética del sistema de iluminación y por ende del sistema eléctrico.

Para dar solución a esta problemática la empresa realiza un proyecto denominado optimización energética del sistema de iluminación del metro de Medellín, el cual enmarca la caracterización y modelado de luminarias metal Halide y luminarias por inducción, como uno de los objetivos principales del proyecto.

## 2. JUSTIFICACIÓN

En la actualidad, los sistemas de iluminación experimentan un crecimiento acelerado en el diseño de nuevos prototipos acorde a las tecnologías y tendencias de iluminación como lo son: *Pulse- Star* (Haluro-Metálico), LED's, Inducción, lumiductos, entre otras. Todas ellas apuntan a mejorar la eficiencia de un sistema de iluminación, desde el punto de vista del ahorro energético, es decir, con ellas se busca conservar y/o mejorar el nivel de iluminación de un área determinada disminuyendo la potencia consumida; aunque cada sistema tiene aplicaciones específicas y comunes entre ellas.

Es importante resaltar que cada sistema de iluminación impacta directamente la Calidad de la Potencia Eléctrica (CPE) del sistema al cual pertenecen, este impacto puede ser analizado desde los fenómenos asociados al estudio de la CPE como lo son *Sag's*, *Swell's*, *flicker*, interrupciones de corta y larga duración, desbalance de tensión, variaciones de frecuencia, *notches*, sobretensiones transitorias, variaciones de tensión de larga duración y armónicos de tensión y corriente.

Acorde al sistema de arranque que utilice el sistema de iluminación impactaría el medio con la presencia de campos magnéticos no deseables ni permisibles para el ser humano, según el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE) y los estándares ANSI e IEC. En este sentido, para diseñar e instalar un sistema de iluminación u otro, primero se deben satisfacer principalmente condiciones permisibles para el ser humano, técnicas y económicas; dentro de las técnicas se destaca la importancia de la caracterización y modelado de luminarias.



### 3. OBJETIVOS

#### 3.1 OBJETIVO GENERAL

Caracterizar y modelar luminarias Metal Halide (MH) y luminarias por inducción, mediante el desarrollo de pruebas típicas de laboratorio y simulaciones de software, con el fin de establecer criterios que conlleven a identificar la selección definitiva del sistema de iluminación del Metro de Medellín.

#### 3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Analizar el impacto que presentan las luminarias MH y luminarias por Inducción ante los fenómenos de la Calidad de la Potencia Eléctrica y Del Campo Magnético producido por ellas hacia el medio ambiente, con el fin establecer criterios que mitiguen estos dos aspectos.

Establecer el estado del arte de las luminarias más utilizadas acorde a las áreas de aplicación en el Metro de Medellín con el fin de seleccionar la más adecuada para el sistema de iluminación.

Proponer un sistema de iluminación acorde a los criterios, caracterización y modelado de luminarias con el fin de implementarlo en el Metro de Medellín.

## 4. REFERENTES TEÓRICOS

### 4.1 ILUMINACIÓN ARTIFICIAL

En la historia de la civilización, la evolución del concepto de iluminación artificial juega un papel muy importante, que originalmente obedece a la necesidad de cambiar el ritmo impuesto por la naturaleza, para llegar a prolongar el tiempo en que se puede llevar a cabo cierto tipo de actividades que la oscuridad impide realizar. También responde a la búsqueda de una sensación de seguridad, tanto dentro de una habitación como afuera, en la calle, haciendo posible percibir objetos y personas que se acercan en la penumbra, mientras que contribuye a ambientar el espacio interno para que se acople a las necesidades de sus moradores.

Desde el descubrimiento del fuego, con el que el ser humano primitivo pudo ahuyentar a los animales salvajes, mitigar el frío y cocinar sus alimentos, la posibilidad de refugiarse en una oscura cueva también le permitió dar los primeros pasos en el arte, por medio de las pinturas rupestres. Antorchas, lámparas de aceite, velas de cera, el quinqué industrial que al principio usaba aceite de ballena en el depósito de combustible, la lámpara de queroseno y el alumbrado de gas, fueron todos precursores de la invención de la luz eléctrica por Thomas Alva Edison en 1879, que tantos beneficios le ha aportado a la humanidad.

Actualmente, la capacidad técnica de transformar espacios, desde el comercio hasta los hogares, por medio de la iluminación, está al alcance de todos y no se trata solo de buscar la última tecnología de punta, lo mejor en avances tecnológicos, simplemente basta con usar la imaginación y los recursos existentes, con sensibilidad, comprendiendo las ventajas de ejecutar un buen diseño de iluminación.

Es difícil sobrestimar la importancia de un sistema de iluminación bien planificado. De noche, solo cuando se prenden las luces, las habitaciones llegan a existir en términos visuales. El contraste entre luz y sombra constituye el sostén de la forma que la hace visible. Es en el diseño de la iluminación, la naturaleza de las fuentes de luz, su posición estratégica, color e intensidad, que los espacios cobran realidad y se reaniman a través de efectos especiales, con todo tipo de ventajas prácticas, estéticas y psíquicas.

La planificación es clave, porque un sistema de iluminación mal concebido es más difícil de corregir que la fuga en una tubería, las goteras en un techo e incluso los problemas de ventilación. Obviamente, las ventajas de una buena iluminación no se pueden cuantificar sólo en términos económicos, como tampoco podría afirmarse que lo invertido en un equipo de sonido ofrece mayor placer que una obra de arte, pero en los tres casos se está hablando del disfrute.

Según Insagro Solar, de Honduras, a la hora de calcular el tipo de iluminación, lo más importante es conocer la superficie a iluminar, para determinar la estética, procurar un ahorro energético y seleccionar la que requiera un menor mantenimiento. El Sistema Metro de Medellín cuenta con estructuras que requieren luminarias de grandes alturas para la iluminación general que proporciona una luz completa en los andenes, escaleras y plataformas de las estaciones que permiten definir fielmente un espacio. A favor se cuenta con un excelente aporte por concepto de iluminación natural que minimiza el uso de la iluminación artificial viéndose reflejada en un ahorro energético importante.

Para Lumideco, de Costa Rica, los sistemas de iluminación deben tener una capacidad de adaptación constante o sea una intensidad variable. En este caso, lo ideal son los sistemas incandescentes, que son muy fáciles de atenuar por medio del dimmer y tienen bajo costo, aunque su consumo energético es alto. Tanto la tecnología de halogenuros metálicos actual como la de inducción no son dimmerizables, pero a pesar de esto, la iluminación por inducción trae unas características muy llamativas que se tocarán someramente y que más adelante se tratarán con propiedad: Encendido instantáneo, vital para lugares con alta aglomeración de personas, poca sensibilidad a las perturbaciones eléctricas y menor consumo energético para un mismo nivel de iluminación, entre otras cosas que hacen superior a la iluminación por inducción respecto a la iluminación Metal Halide.

Sylvania, de Costa Rica, considera que el estilo arquitectónico determina la temperatura de color de la fuente de luz que se deberá seleccionar. Por ejemplo, si se trata de un espacio contemporáneo, lo ideal será utilizar 4100 a 5000 K (luz blanca), pero si el estilo es neocolonial, se recomienda emplear de 3500 a 2700 K (luz cálida). Espacio contemporáneo. Aplica para Iluminación por inducción y Metal Halide.

Según General Electric, antes de definir la estrategia de iluminación es importante considerar no solo las dimensiones, el decorado, la disposición de los muebles y las instalaciones eléctricas disponibles, sino también la presencia o ausencia de ventanas, domos, tragaluces y cualquier otra fuente de luz natural durante el día. La empresa señala que es conveniente instalar interruptores independientes para cada uno de los tipos de iluminación, ya que permiten crear efectos especiales y acentuar espacios, además de ahorrar energía, pues se encienden solo algunas a la vez. Como las distribuciones lumínicas de ambas lámparas que son objetos de esta investigación son equivalentes y como las instalaciones son ya existentes, se considera que la nueva opción en iluminación en estudio cumple con esta recomendación.

Para tener en cuenta se busca conseguir el ambiente deseado, a un costo accesible y con gran ahorro de energía. Es importante resaltar que la iluminación no solo contribuye a revelar y resaltar los colores y texturas, sino que puede

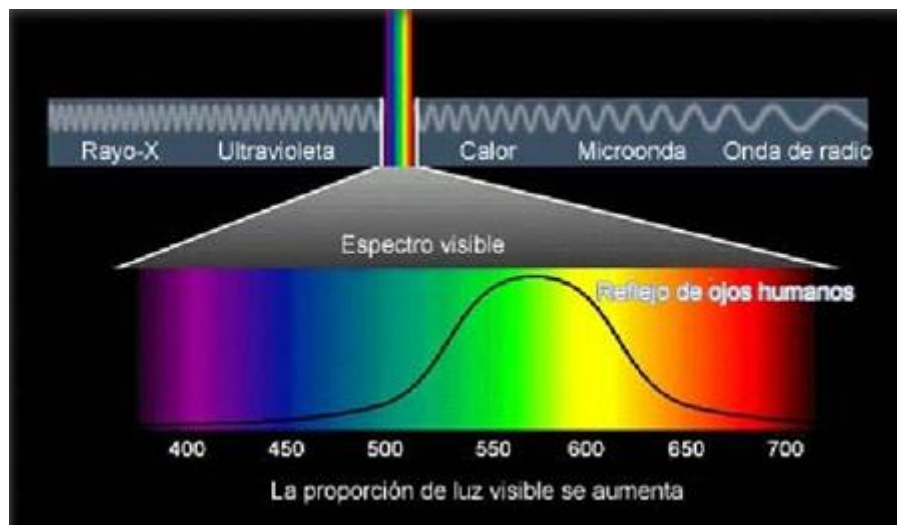
cambiar el ambiente de uno o varios espacios e influenciar psicológicamente el estado de ánimo de los usuarios.

La empresa Phillips indica que es posible personalizar la iluminación a través de las diferentes opciones de luminarias y temperaturas de color, así como mediante el uso de sistemas con dimmers. El estudio previo de la arquitectura de la edificación a intervenir permite encontrar los elementos más interesantes que puedan ser realzados con la iluminación.<sup>1</sup>

#### 4.2 BENEFICIOS Y APLICACIÓN DE LA ILUMINACIÓN

Los aspectos prácticos que conciernen a la visión en términos de iluminación artificial, incluyen el desempeño, el confort y la seguridad de los sistemas. En los sistemas de transporte masivos es vital garantizar la seguridad y crear un ambiente cómodo que se ve reflejado en una mayor calidad del sistema. El espectro visual abarca desde 400 hasta 700nm y la lámpara de inducción puede emitir el espectro total, ofreciendo una rica gama de tonos de luz (2.700 a 6.500 K), aportando una elevada reproducción del color ( $R_a > 85$ ) lo que conduce a un mayor confort lumínico con una aportación en lúmenes (lm) igual o inferior, pero superior en lúmenes pupila (ver figura 1).

Figura 7. Proporción de luz visible en el espectro visible humano.



Fuente: [www.venalson.com](http://www.venalson.com)

<sup>1</sup> Fuente: Aportes integrantes basados en las recomendaciones tomadas de la página web <http://www.revistaconstruir.com/instalaciones/491-iluminacion-artificial>

La tecnología de la iluminación avanza, evolucionando las luminarias de diversos tipos y colores, la simple medida del flujo luminoso en lúmenes no puede pronosticar cómo las personas ven realmente. Como un ejemplo una lámpara de Metal Halide puede generar muchos lúmenes, pero con una luz amarillosa. Con esta luminaria, sólo se puede apreciar la forma de un objeto sin definir, lo más importante, el detalle del objeto. Las diversas luminarias producen la luz en diferentes espectros, las lámparas de descarga ponen a nuestra disposición un rango de espectro muy ancho.

La visión humana se ve afectada por muchos factores, desde la intensidad luminosa, distribución, color, contraste, reflexión, deslumbramiento, calidad aérea, etc. Nuestros ojos usan diferentes partes para ver un objeto en condiciones de escasa o excesiva luz.

El ojo humano tiene receptores: los conos y los bastones que están especializados en trabajar en condiciones contrarias. Los conos proveen de la visión de color y detalle en condiciones de mucha luz (fotópica) y los bastones lo hacen en condiciones de poca luz (escotópica). En la condición fotópica, nuestras pupilas se contraen, observando más detalles del objeto, mientras tanto, la profundidad de campo y el brillo percibido también aumentan.

En condiciones de poca luz, las pupilas se dilatan para que entre más luz y como los bastones se encuentran en la periferia de la retina, es una percepción visual periférica (ver tabla 1).

Tabla 1. Factor de conversión entre flujo luminoso convencional y el flujo luminoso de pupila<sup>2</sup>

Luminaria	Convencional lm/W	Factor de corrección	Flujo luminoso de pupila(Plm/W)
Lámpara de sodio de baja presión	165	0.38	63
5000K T5 Lámpara fluorescente	104	1.83	190
4100K T8 Lámpara fluorescente	90	1.62	145
Lámpara de metal halide	85	1.49	126
5000-K Lámpara de inducción sin electrodo	80	1.62	129
5,000-K Puro lámpara fluorescente trifósforo	70	1.58	111
3500-K Lámpara fluorescente trifósforo	69	1.24	85
50W Lámpara de sodio de alta presión	65	0.76	49
2900K Lámpara fluorescente de color blanco cálido	65	0.98	64
Lámpara de luz diurna	55	1.72	95
35W Lámpara de sodio de alta presión	55	0.57	31
5000 90 CRI Lámpara fluorescente	46	1.7	78
Lámpara de vapor de mercurio de alta presión	40	0.86	34
Lámpara incandescente normal	15	1.26	19
Lámpara de tungsteno-halógeno	22	1.32	29

Fuente: [www.venalson.com](http://www.venalson.com)

La lámpara de inducción básicamente equivale a una lámpara fluorescente con el índice de color cromático de 80 y cromaticidad de 4100K. La tabla de Berman muestra que en cuanto a una lámpara fluorescente de cromaticidad de 4100K, su eficiencia luminosa convencional es 90 lm/W, y su flujo luminoso de pupila (eficaz) equivale a 145 Plm/W. Si el contraste y la distribución se controlan, este sugiere que con poca electricidad se puede proveer de un mejor confort lumínico de gran definición.

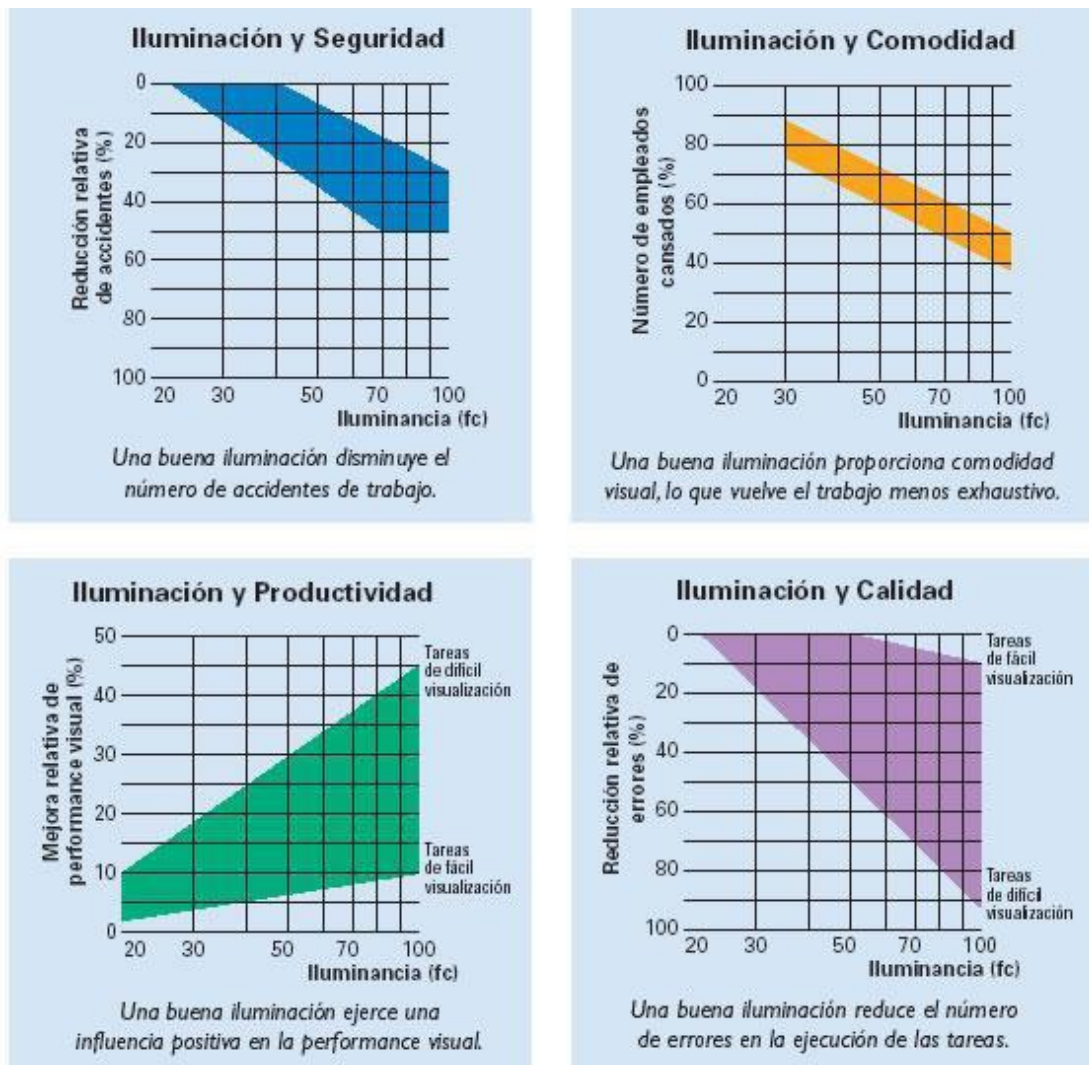
El factor de corrección se aplica en la conversión del lumen convencional por vatio en lumen de pupila por vatio, el cual es un método de cómo los ojos humanos ven

<sup>2</sup> Tabla Berman: Sam Berman, antiguo miembro del grupo de investigación de sistemas de alumbrado en el laboratorio de Lawrence Berkeley, es uno de los investigadores que insisten en aplicar la razón F/E en selección de luminaria. Aplicando la razón F/E, desarrolló un factor de conversión para obtener una eficacia en lumen percibida por el ojo humano para diferentes tamaños de pupila y efectos visuales según la luz producida por distintas luminarias.

con más eficiencia la luz emitida. La pupila es más receptiva a luz azul en la banda ancha del espectro de luz.

El aspecto de la seguridad no solo se refiere a la iluminación exterior, para evitar la aproximación de extraños indeseados, sino a detalles tan sencillos pero importantes, como la adecuada iluminación diagonal en una escalera interna o externa, para que las huellas proyecten sombra sobre las contrahuellas y los cambios de nivel sean fáciles de distinguir. La adecuada cantidad de luz en el área de trabajo de una fábrica también contribuye a evitar accidentes, por ejemplo, con máquinas cortantes.

Figura 2. Iluminación – Seguridad, comodidad, productividad y calidad



Fuente: [www.venalson.com](http://www.venalson.com)

El confort es difícil de definir, porque hasta cierto punto, es subjetivo. En términos generales, el ser humano posee una enorme capacidad de adaptación y es capaz de realizar ciertas tareas bajo condiciones desfavorables, no obstante, el objetivo de un buen diseño es evitar estas situaciones y facilitar las condiciones adecuadas para realizar determinada tarea. Evitar el deslumbramiento o encandilamiento también es importante, no solo en cuanto a la dirección de la luminaria, sino al contraste entre la luz y sus alrededores, como por ejemplo el reflejo en paredes, vidrios o superficies brillantes.

Distanciar demasiado la fuente de luz del área que requiere la iluminación es tan nocivo como colocar la luminaria demasiado cerca, lo que puede producir una irritación en los ojos, que además necesitan tiempo para adaptarse a los cambios de luz, por lo que una transición brusca de la penumbra a un espacio brillantemente iluminado puede producir un efecto negativo. No es recomendable colocar un cuadro muy próximo a una ventana, porque el brillo de esta impedirá que se aprecie durante el día.

Los bombillos fluorescentes son más eficientes que los incandescentes, pero el sistema de inducción lo es aún más. Diversas fuentes de bajo voltaje son más recomendables para iluminar una misma habitación, que el empleo de un solo bombillo de muchos watts ubicado en el centro del cielo raso.

#### 4.3 CONCEPTOS BÁSICOS DE LA ILUMINACIÓN.

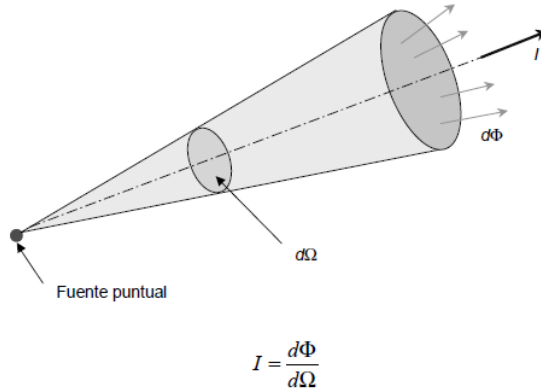
4.3.1 Luz. La luz es una manifestación de energía que puede obtenerse calentando hasta la incandescencia sólidos o gases. Puede definirse como la energía radiante que incide sobre la retina del ojo humano produciendo la sensación visual.

4.3.2 Flujo luminoso. En los manantiales luminosos se produce la transformación de un tipo de energía en energía luminosa. Se define el Flujo Radiante como la energía radiante emitida por una fuente luminosa por unidad de tiempo. El Flujo luminoso es la parte del flujo radiante que sensibiliza al ojo humano. Lo representaremos por el carácter. Su unidad es el Lumen (lm), el cual se define como el flujo luminoso emitido por una fuente puntual de intensidad luminosa uniforme de una candela, dentro de un ángulo sólido de un estereorradián.

4.3.3 La intensidad luminosa. De una fuente puntual de luz en una dirección determinada es el cociente entre el flujo luminoso que abandona la fuente y se propaga en un elemento de ángulo sólido que contiene la dirección en cuestión y dicho elemento de ángulo sólido. (ver figura 3).



Figura 3. Intensidad Luminosa

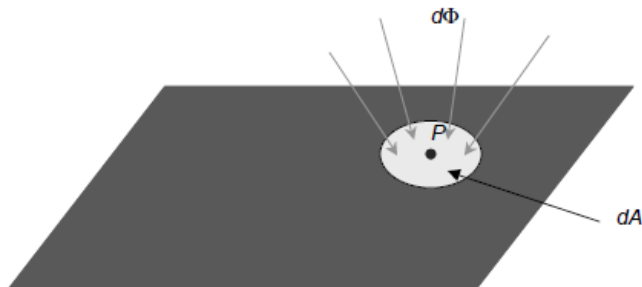


Fuente: [http://issuu.com/malaluz/docs/gt\\_ee\\_iluminacion\\_alumbrado\\_publico](http://issuu.com/malaluz/docs/gt_ee_iluminacion_alumbrado_publico)

Su unidad es la Candela (cd), la cual se define como un sesentavo de parte de la intensidad luminosa de 1 cm<sup>2</sup> de platino fundido a una temperatura de 2046 °K. Es importante observar que para una fuente puntual, la intensidad luminosa en una dirección determinada es independiente de la distancia a la fuente.

- Iluminancia: Considérese un punto (P) en una superficie y alrededor de ese punto un diferencial de área de la superficie en cuestión (ver figura4).

Figura 4 Iluminancia



Fuente: [http://issuu.com/malaluz/docs/gt\\_ee\\_iluminacion\\_alumbrado\\_publico](http://issuu.com/malaluz/docs/gt_ee_iluminacion_alumbrado_publico)

La Iluminancia en un punto de una superficie es el flujo incidente por unidad de área de la superficie en dicho punto.

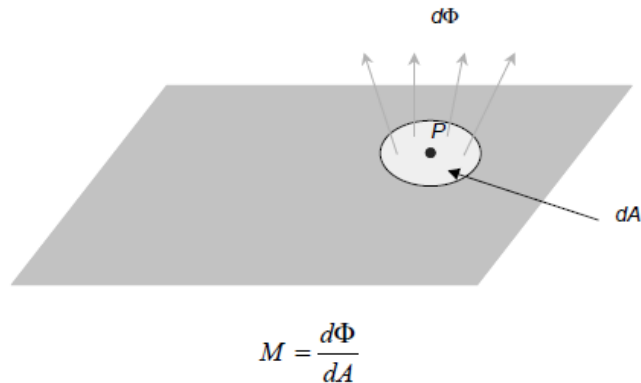
$$E = \frac{d\Phi}{dA}$$

Su unidad es el Lux (lx).

Obsérvese que no se trata de la radiación absorbida o reflejada por la superficie sino sólo del flujo luminoso que llega o incide en la misma. De aquí que la iluminancia sea independiente del tipo de superficie sobre la cual incide el flujo luminoso y por lo tanto independiente de sus propiedades reflectoras, transmisoras o absorbentes.

4.3.4 Exitancia. Es una medida del flujo luminoso que abandona una superficie. La exitancia se define como el cociente entre el flujo luminoso que abandona un elemento de superficie y el área de ese elemento. (ver figura 5)

Figura 5. Exitancia



Fuente: [http://issuu.com/malaluz/docs/gt ee iluminacion alumbrado publico](http://issuu.com/malaluz/docs/gt+ee+iluminacion+alumbrado+publico)

La unidad es la misma que la de iluminación (o iluminancia).

El flujo luminoso emitido puede originarse en la propia superficie como en el caso de un filamento de tungsteno a una determinada temperatura o en una reflexión o transmisión sobre o a través de la superficie.

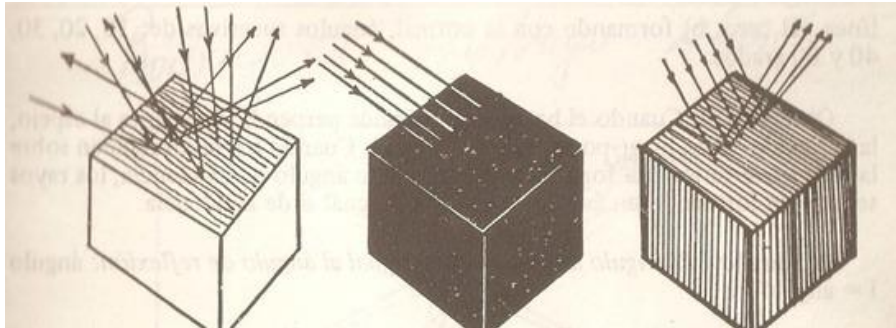
Obsérvese que siempre se trata de un flujo que abandona la superficie. La exitancia es independiente del tipo y propiedades de la superficie emisora.

En el caso de reflexión son de interés los conceptos de Reflectancia difusa y Reflexión difusa, que se definen a continuación.

- Reflexión difusa. Es el fenómeno que se produce, cuando un haz de rayos paralelos incide sobre una superficie ordinaria y son desviados en todas las direcciones. Un papel, una pared, la superficie de una mesa difunden la luz y

por tal motivo vemos estos objetos. Los haces de luz que atraviesan una rendija, los vemos dentro de una habitación, porque las partículas de polvo que flotan en el aire difunden también la luz. (ver figura 6)

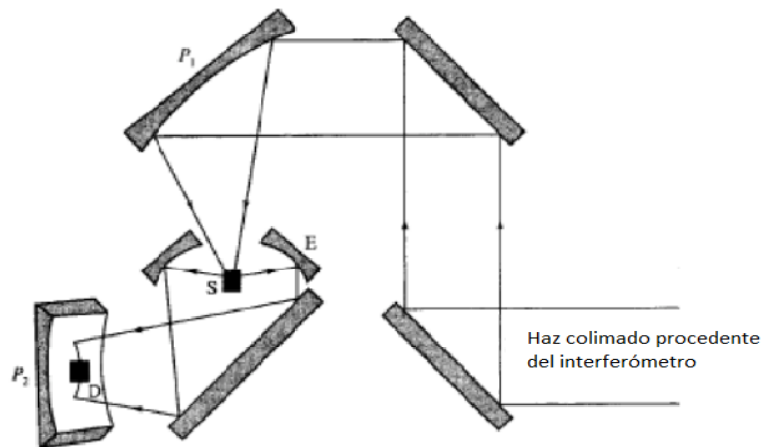
Figura 6. Reflexión difusa



Fuente: [http://issuu.com/malaluz/docs/gt\\_ee\\_iluminacion\\_alumbrado\\_publico](http://issuu.com/malaluz/docs/gt_ee_iluminacion_alumbrado_publico)

- Reflectancia difusa: Proceso Complejo producido al chocar un haz de radiación con la superficie de un polvo finamente dividido. Se produce una reflexión especular en cada superficie plana, al haber muchas superficies y encontrarse aleatoriamente orientadas la radiación es reflejada en todas las direcciones y la intensidad de la radiación reflejada, es independiente del ángulo de visión (ver figura 7).

Figura 7. Reflectancia difusa



Fuente: [http://issuu.com/malaluz/docs/gt\\_ee\\_iluminacion\\_alumbrado\\_publico](http://issuu.com/malaluz/docs/gt_ee_iluminacion_alumbrado_publico)

4.3.5 Luminancia. Intensidad luminosa reflejada por una superficie. Su valor se obtiene dividiendo la intensidad luminosa por la superficie vista por el ojo en una dirección determinada. Su unidad es candelas/ $m^2$ .

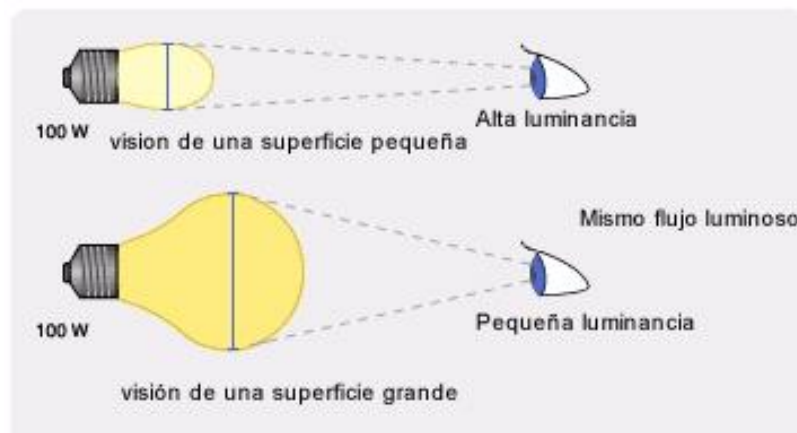
Luminancia L es la impresión de claridad que un observador tiene del brillo que desprende una fuente de luz o una superficie iluminada. El ojo puede distinguir muy bien entre diferentes valores de luminancia (ver tabla 2 figura 8))

Tabla 2. Valores de luminancia

Fuente de luz	Luminancia media (cd/m <sup>2</sup> )	Fuente de luz	Luminancia media (cd/m <sup>2</sup> )
Lámpara de xenón de arco corto	200.000 - 5.000.000.000	Candela	7.500
Sol	1.600.000.000	Cielo azul	5.000
Lámpara halogenuros metálicos	10.000.000 - 60.000.000	Luminaria especular louvre	100
Lámpara incandescente	2.000.000 - 26.000.000	Valores habituales en iluminación interior	50 - 500
Lámpara fluorescente compacta	20.000 - 70.000	Papel blanco a 500 lx	100
Lámpara fluorescente	5.000 - 30.000	Papel blanco a 5 lx	1
Nubes iluminadas por el sol	10.000		

Fuente: [http://issuu.com/malaluz/docs/qt\\_ee\\_iluminacion\\_alumbrado\\_publico](http://issuu.com/malaluz/docs/qt_ee_iluminacion_alumbrado_publico)

Figura 8. Luminancia



Fuente: [http://issuu.com/malaluz/docs/qt\\_ee\\_iluminacion\\_alumbrado\\_publico](http://issuu.com/malaluz/docs/qt_ee_iluminacion_alumbrado_publico)

4.3.6 Rendimiento luminoso. No toda la energía eléctrica consumida por una lámpara (bombilla, fluorescente, etc.) se transforma en la luz visible. Parte se pierde por calor (ver figura 9), parte en forma de radiación no visible (infrarrojo o ultravioleta), etc.

Figura 9. Rendimiento luminoso



Fuente: [http://issuu.com/malaluz/docs/qt ee iluminacion alumbrado publico](http://issuu.com/malaluz/docs/qt+ee+iluminacion+alumbrado+publico)

El rendimiento luminoso ( $\eta$ ) de una fuente de luz es la relación entre el flujo total emitido por esa fuente y el suministro total de potencia de la fuente. En el caso de una lámpara eléctrica, el rendimiento se expresa en lúmenes por watt (lm/w).

#### 4.4 HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS DE CALIDAD DE LA ENERGÍA Y DE CORRECCIÓN DE FACTOR DE POTENCIA

El aumento acelerado en la utilización de equipos electrónicos altamente sensibles a las perturbaciones electromagnéticas, ha incitado a que los consumidores y operadores de red se planteen un nuevo paradigma relacionado con la calidad en la prestación del servicio de energía, el cual está intrínsecamente asociado a ciertos parámetros como son: la amplitud, la frecuencia y forma de onda de las señales de tensión y corriente.

Cuando se estudia la calidad del servicio de energía se hace necesario profundizar en el estudio de las perturbaciones que ocasionan la mala calidad del servicio y la reglamentación asociada a cada una de ellas, a través del estudio de normatividad nacional e internacional, como lo es la norma NTC-5000, IEC e IEEE respectivamente; adicionalmente, se explica el concepto de energía reactiva y la importancia de su compensación, al igual que los métodos de compensación utilizando bancos de condensadores.

## 4.5 ANTECEDENTES

La creciente utilización de equipo electrónico sensible a las perturbaciones electromagnéticas y el uso de equipos que presentan un comportamiento no lineal ante las ondas de tensión y corriente, han generado entre los consumidores y operadores de red un progresivo interés por la calidad en la prestación del servicio de energía eléctrica; así mismo, en el caso particular de Colombia, la implementación de nuevas leyes y normativas relacionadas con los servicios públicos, en especial, la Ley 143 de 1994 o Ley Eléctrica, dieron un giro al servicio de energía al introducir el concepto de competencia en este sector económico, lo cual ha permitido al usuario exigir al proveedor unas condiciones óptimas en la prestación del servicio. A pesar de lo anterior, en Colombia son escasos los estudios relacionados con el tema.

A nivel internacional, la normativa relacionada con la calidad de la energía eléctrica se encuentra más avanzada, gracias a instituciones como la IEC y la IEEE que han implementado normas y estándares como son IEC-61000-4-30 e IEEE 1159.

Otras instituciones que se han apropiado del tema de calidad del suministro energético son las empresas fabricantes de equipos eléctricos, que se han encargado de construir equipos capaces de medir las perturbaciones de la energía y construir equipos para contrarrestarlas.

## 4.6 PERTURBACIONES DE LA CALIDAD DE ENERGÍA

“Las perturbaciones electromagnéticas hacen referencia a cualquier fenómeno que pueda degradar el funcionamiento de un dispositivo, equipo o sistema eléctrico, electrónico o de comunicaciones”<sup>3</sup>; específicamente en los sistemas eléctricos, las perturbaciones electromagnéticas varían los parámetros de frecuencia, amplitud y forma de onda y en consecuencia reducen la calidad del servicio de energía eléctrica. Las perturbaciones pueden ser causadas por fenómenos de tipo natural como: las descargas atmosféricas, las descargas electrostáticas y las radiaciones naturales o por fenómenos provocados o artificiales como: el funcionamiento de otros equipos eléctricos, maniobras y fallas en la red, radiaciones de radio y TV, cargas no lineales o puestas a tierra mal instaladas (Ramírez Torres, 2009).

A continuación se mencionarán algunas de las perturbaciones más relevantes que se presentan en un Sistema Eléctrico de Potencia – SEP.

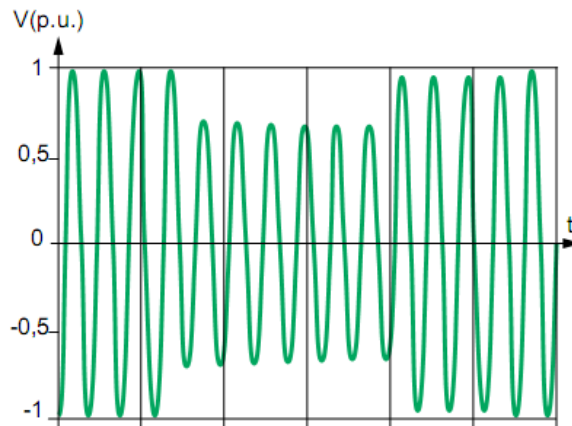
4.6.1 Huecos de tensión (Sags): Los hundimientos de tensión (Sags) son reducciones súbitas del valor eficaz de la tensión por debajo del 90% y por encima

---

<sup>3</sup> <sup>2</sup>Ramírez Torres, Francy. Proyecto de Norma Técnica Colombiana NTC 5000.

del 10% de la tensión declarada, seguido por un retorno a un valor más alto que el 90% de la tensión declarada, en un tiempo que varía desde los 8,33 milisegundos (medio ciclo a 60 Hz) hasta un (1) minuto. Ellos se caracterizan por su duración y La forma típica de un sag de tensión se presenta en la siguiente figura.

Figura 10. Forma de onda típica de un sag de tensión



Fuente: Cuaderno técnico Schneider CT199-2004-CEE

Los hundimientos de tensión son generalmente causados por corrientes elevadas, generadas por cortocircuitos, conexión u operación de cargas que exijan una elevada demanda de potencia. Los hundimientos son impredecibles y de comportamiento aleatorio. Este tipo de perturbación es una de las que están causando mayor impacto en los equipos instalados en el sistema eléctrico y depende en gran medida de la configuración del sistema, del punto de medida, de las condiciones operativas y del mantenimiento. Su comportamiento durante un periodo de tiempo (por ejemplo un año) puede ser muy irregular.

Algunas causas características son:

- Fallas en la fuente de alimentación del sistema de potencia o del sistema eléctrico propio o de vecinos.
- Arranque de motores.
- Cortocircuitos en el sistema de alimentación originados por fenómenos naturales como: árboles, rayos, acciones de terceros, entre otros.

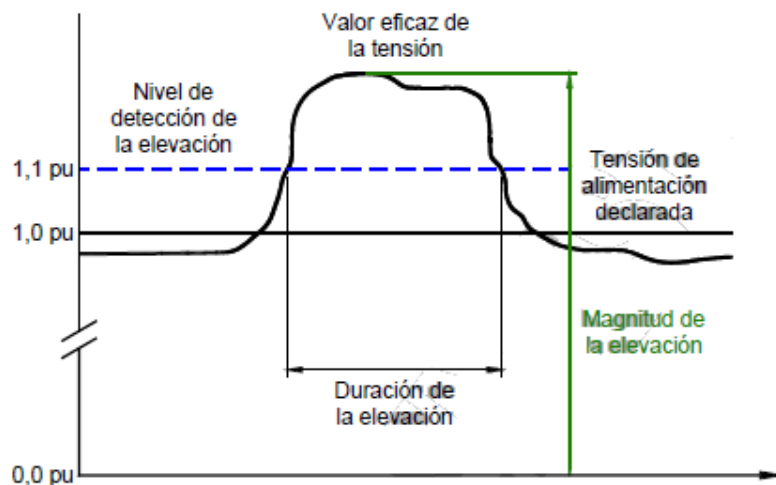
Efectos

- Paradas de procesos.
- Reducción de luz visible de algunos dispositivos de iluminación.
- Caída de sistemas telefónicos.
- Disparo de protecciones.

- Funcionamiento defectuoso de equipos.
- Salida de operación de controladores de motores.
- Incremento en las pérdidas por calentamiento en los motores de inducción debido al aumento en la corriente.
- Cambios de velocidad en maquinas de inducción.
- Salida de operación de dispositivos electrónicos como computadores y controladores electrónicos.
- Reducción de la potencia de salida en bancos de condensadores.
- En algunos equipos electrónicos se puede presentar pérdida de datos, cuando la profundidad del hundimiento es grande.
- Cuando se presentan hundimientos con una magnitud inferior al 70 %, los sistemas de transferencia pueden operar.

4.6.2 Elevaciones de tensión (Swells): Las elevaciones de tensión (swells) son aumentos súbitos del valor eficaz de la tensión por encima del 110 % de la tensión declarada. Las sobretensiones temporales pueden durar entre 8.33 milisegundos (medio ciclo de la onda a 60Hz) y 1 min. Se caracterizan por la medida de su duración por encima de un umbral definido y por la magnitud de la elevación, como se ilustra en la Figura 11.

Figura 11. Parámetros característicos de un swell de tensión



Fuente: NTC-5000 Documento en estudio

Entre los efectos de las sobretensiones se encuentran:

- Falla de los componentes de un equipo, dependiendo de la frecuencia de ocurrencia del evento.



- Reducción de la vida útil en dispositivos electrónicos, incluyendo variadores de velocidad, computadores, conductores, barrajes, transformadores de tensión y corriente así como maquinaria rotativa.
- Operaciones no deseadas en relés de protección.
- Incremento de luz visible de algunos dispositivos de iluminación.
- Degradación de algunos dispositivos de protección (como varistores o diodos de avalancha de silicio).
- Protuberancias en la carcasa de los condensadores en bancos de control de reactivos.
- Falla inmediata en dispositivos electrónicos.
- Pérdida de vida útil de los equipos.
- Incremento en la potencia de salida en bancos de condensadores.

La mayoría de las interrupciones de corta duración en redes de media tensión son causadas por la acción de dispositivos diseñados para proteger el sistema de cortocircuitos. En líneas de media tensión es una práctica común hacer recierres automáticos de interruptores, para restaurar el suministro de potencia tan pronto como sea posible en una línea afectada por una falla transitoria.

El tiempo muerto para el recierre es ajustado en general entre 300 ms y 500 ms y en la mayoría de los casos menor a 1 s. En el caso de un recierre exitoso el cual aclara la falla, los usuarios suministrados por la línea son afectados por una profunda caída de tensión (el cual dura el tiempo de operación del interruptor) seguido por una interrupción que dura el tiempo muerto ajustado para el recierre. Las otras líneas o circuitos conectados a la misma barra de la línea en la cual ocurre la falla experimentarán una caída de tensión que durará el tiempo de operación del interruptor y cuya profundidad dependerá de la distancia de la localización de la falla hasta la barra de la subestación. Por supuesto, cualquier recierre automático afectará todos los usuarios de media y baja tensión conectados en la línea afectada.

Se resalta que el recierre automático es usado para asegurar una mejor continuidad del servicio, evitándose interrupciones prolongadas debido a fallas transitorias.

Los efectos serian:

- Interrupción de procesos y equipos.
- Salida y reinicio de sistemas.
- Desprogramación de PLC's y equipo electrónico.
- Apagado de sistema de iluminación.
- Falla de sistemas telefónicos.

Las interrupciones menores a 1 min pueden afectar equipos electrónicos y de iluminación, causando mala operación o falla. El equipo electrónico incluye controladores electrónicos y de potencia, computadores, y mandos electrónicos de maquinaria rotativa.

4.6.3 Interrupciones de larga duración (duración > 1 min): Las interrupciones de larga duración o interrupciones sostenidas describen caídas del valor eficaz de la tensión de alimentación a niveles inferiores al 10 % de la tensión declarada  $V_c$ , con una duración mayor a 1 min. Una interrupción de alimentación puede tener como causas la programación de trabajos en la red o la ocurrencia de un accidente; el primer caso el objetivo de la interrupción es generalmente realizar labores de mantenimiento, modificación o ampliación a la red de distribución y los clientes deben ser informados con anterioridad; en el segundo caso, se puede presentar debido a defectos permanentes o temporales en la red, la mayoría de las veces asociados a eventos o daños externos que están más allá del control de las empresas de energía; algunos ejemplos de fallas accidentales son las siguientes:

- Fallas en la fuente del sistema de potencia.
- Problemas en las transferencias automáticas o manuales.
- Apertura o cierre de los interruptores de protección.
- Fallas en cableado.
- Disparo de protecciones del sistema eléctrico.

El efecto de una interrupción sostenida es la salida de operación o reinicio del equipo y/o proceso que se realice, esto se observa en fenómenos como la mala operación y desenergización de los contactores de los motores de inducción, o en otros casos, como el daño de equipos de arranque suave electrónicos o la desprogramación de PLC's por causa de las interrupciones del suministro eléctrico. Las interrupciones también originan apagado de sistemas de iluminación o caída de sistemas telefónicos. Una manera de evitar los sucesos anteriores es la protección de las cargas por medio de sistemas de UPS (*UninterruptiblePowerSupply*) u otras formas de dispositivos de almacenamiento de energía.

4.6.4. Variaciones de tensión de estado estable: "Las variaciones de tensión de estado estable son desviaciones de larga duración del valor eficaz de la tensión de alimentación a la frecuencia de la red (60 Hz)."<sup>4</sup> Estas variaciones deben ser previstas y corregidas en la etapa de diseño de un sistema eléctrico y un ejemplo de ellas son los problemas de regulación, variaciones de grandes cargas eléctricas y otras variaciones a las cuales se ve sujeto el sistema. Uno de los métodos utilizados para la corrección de las variaciones de estado estable es el uso de

---

<sup>4</sup>Ramírez Torres, Francly. Proyecto de Norma Técnica Colombiana NTC 5000.

intercambiadores automáticos de taps en los transformadores de las subestaciones del operador de red o de los mismos usuarios.

Las consecuencias generadas en el sistema eléctrico a partir de una variación de estado estable son las siguientes:

- Salida de operación de motores.
- Cambios de velocidad en máquinas de inducción.
- Los computadores y los controladores electrónicos pueden dejar de operar durante esta condición.
- Reducción o aumento de la potencia de salida del banco de condensadores.
- La luz visible de algunos dispositivos de iluminación puede ser reducida o aumentada, a dicha fluctuación luminosa se le llama parpadeo o flicker y representa una molestia fisiológica (cansancio visual y nervioso) para las personas; el grado de molestia depende de la amplitud de las fluctuaciones, de la cadencia de repetición de las variaciones, de la composición espectral y de la duración de la perturbación (Schneider Electric, 2004).

Existe una clasificación para las variaciones de tensión en estado estable de acuerdo al comportamiento que presenten: Las variaciones lentas de tensión, que son causadas por la variación lenta de las cargas conectadas a la red y las fluctuaciones de tensión, que son debidas principalmente a las variaciones rápidas de las cargas industriales, como las máquinas de soldar, los hornos de arco, las laminadoras (Schneider Electric, 2004).

4.6.5 Desbalance de tensión: El índice de desbalance de tensión describe la magnitud y asimetrías del ángulo de fase de las tensiones trifásicas en operación de estado estable, es decir, un sistema trifásico está desequilibrado cuando las tres tensiones no son iguales en amplitud y/o no están desfasadas unas respecto a otras  $120^\circ$ , el factor de desbalance de tensión es definido usando la teoría de componentes simétricas, como la relación entre la componente de secuencia negativa de la tensión y la componente de secuencia positiva, como se muestra en la ecuación.

$$\Delta U_i = \frac{|U_{neg}|}{|U_{pos}|}$$

Este problema de calidad de energía puede ser originado principalmente por asimetría de la impedancia de línea o por la presencia de cargas desbalanceadas en el sistema eléctrico, como es el caso de las cargas monofásicas no balanceadas instaladas en un sistema trifásico, otra de las posibles causas puede ser el resultado de anomalías en los bancos de condensadores, tales como quema de fusibles sobre una fase del banco trifásico. A nivel industrial es importante tener un correcto balance de las cargas en los circuitos trifásicos para mantener el desbalance de tensión dentro de límites razonables.

Los desbalances de tensión tienen las siguientes consecuencias:

- En rectificadores con tecnología PWM se aumenta la distorsión de corriente armónica, incrementan los reactivos de la carga y se generan rizados de corriente en la etapa de continua.
- Reducción de capacidad de carga en motores.
- Reducción de vida útil del aislamiento en motores por sobrecalentamiento, que es el principal efecto de los desbalances sobre las máquinas asíncronas trifásicas.

“En efecto, la reactancia inversa de una máquina asíncrona es equivalente a su reactancia durante la fase de arranque. La tasa de desequilibrio en corriente será por tanto varias veces la de la tensión de alimentación. Entonces, las corrientes de fase pueden diferir considerablemente, lo que aumenta el calentamiento de la o de las fases recorridas por la corriente más elevada y reduce la esperanza de vida de la máquina.”<sup>5</sup>

4.6.6 Variaciones de frecuencia: La frecuencia nominal de la tensión de suministro en Colombia es 60 Hz. Este valor es determinado por la velocidad de los alternadores en las estaciones de generación; sin embargo, mantener la frecuencia del sistema depende del balance entre la carga y la potencia producida por las estaciones de generación, a medida que éste balance cambia sobre el tiempo, vemos pequeñas variaciones de frecuencia cuya magnitud y duración depende de las características de la carga y la respuesta de los generadores ante las variaciones de ella. Adicionalmente, el sistema puede estar sujeto a variaciones más grandes, que se salen de los límites aceptados para una operación normal y que son resultado de fallas en el sistema de transmisión de energía, como cortocircuitos o resultado de cambios de carga o generación; la magnitud y la duración de estas variaciones temporales dependen de la severidad de la perturbación.

Las variaciones de frecuencia pueden producir interrupción del servicio y variaciones de tensión por deslastre de carga, así como, errores de sincronización de frecuencia en usuarios que tienen cargas de grandes rectificadores. Otras consecuencias de las variaciones de frecuencia son los efectos en la operación de máquinas rotatorias que no admiten cambios en la velocidad de rotación o los errores en el funcionamiento de equipos electrónicos que requieren temporizadores sincronizados con la red de alimentación.

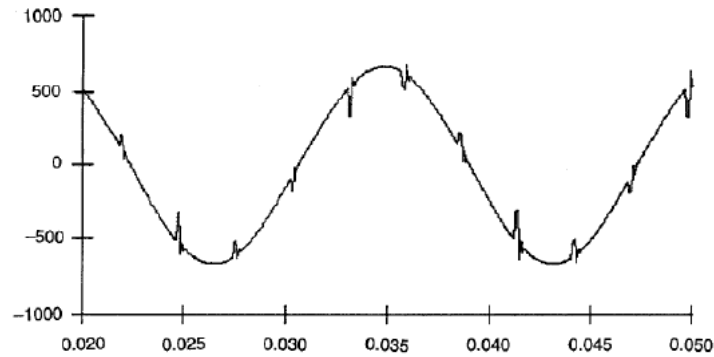
4.6.7 Muestras de tensión (notches). “Las muescas de tensión son un disturbio electromagnético periódico que afecta la forma de onda de voltaje reduciendo su valor instantáneo durante intervalos que generalmente no sobrepasan los 0,5

---

<sup>5</sup>Schneider Electric. La calidad de la energía eléctrica. [aut. libro] Philippe Ferracci. Cuaderno Técnico nº 199. Barcelona: s.n., 2004. p. 19.

ciclos”,<sup>6</sup> como muestra la figura 12. Este fenómeno se genera por la operación normal de dispositivos electrónicos operados con conmutación.

Figura 12. Muesca de tensión causada por la operación de un convertidor.



Fuente: IEEE Std. 1159-1995

Los convertidores trifásicos que producen corriente DC son la causa más importante de muescas de tensión, estas ocurren cuando las corrientes son conmutadas de una fase a otra. Durante este periodo hay un cortocircuito momentáneo entre las dos fases que acerca el valor instantáneo de la tensión a cero tanto como se lo permita la impedancia del sistema.

Las muescas de tensión pueden producir fallas de funcionamiento en los dispositivos de control asociados a los equipos, debido a que producen variaciones rápidas de la tensión (dv/dt), lo que afecta componentes inductivos del sistema (Ramírez Torres, 2009). Además, pueden producirse oscilaciones de alta frecuencia que induzcan tensiones en otros circuitos.

Las muescas generan una distorsión armónica total que definida en la ecuación

$$THD = 0,074 \sqrt{\frac{AN}{\rho}} \%$$

Donde:

$\rho$ : es la relación de la inductancia total con respecto a la del sistema.

AN: es el área de la muesca medida en voltios–microsegundos.

Para caracterizar una muesca de tensión se tienen en cuenta. Para analizar se tienen en cuenta los parámetros establecidos por la NTC-5000: límites de la

<sup>6</sup>Ramírez Torres, Francy. Proyecto de Norma Técnica Colombiana NTC 5000. p. 26.

profundidad de la muesca, distorsión armónica total y área de la muesca, los cuales se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Límites de distorsión recomendados por la NTC-5000

<b>Límites de distorsión</b>			
	<b>Aplicaciones Especiales*</b>	<b>Sistema General</b>	<b>Sistema Dedicado†</b>
Profundidad de la muesca	10 %	20 %	50 %
THD (Tensión)	3 %	5 %	10 %
Área de la muesca (AN)††	16400 V·µs	22800 V·µs	36500 V·µs
NOTA: El valor de AN para sistemas diferentes a 480 V debe ser multiplicado por V/480			
*Hospitales y aeropuertos			
†Un Sistema Dedicado es exclusivamente dedicado al rectificador de carga			
††En Voltios-microsegundos			
Fuente: Ramírez Torres, 2009. NTC-5000 Documento en estudio			

Fuente: IEEE Std. 1159-1995

Estos límites son recomendados para sistemas de baja tensión en la cual el área de la muesca es fácil de medir en un osciloscopio.

4.6.8 Variaciones de tensión de larga duración (subtensiones y sobretensiones): Los eventos en tensión de larga duración, es decir, que permanecen por más de 1 min, pueden ser sobretensiones o subtensiones dependiendo de si el valor eficaz de la tensión está por encima o por debajo del  $\pm 10$  % de la tensión de alimentación declarada, respectivamente. Las sobretensiones y subtensiones de estado estable no son generalmente consecuencia de fallas en el sistema de potencia. Las sobretensiones pueden ser el resultado de maniobras en la carga, por ejemplo, la desconexión de una carga grande o por variaciones en la compensación reactiva del sistema, por ejemplo, la energización de un banco de condensadores. Una mala regulación de la tensión en el sistema de suministro, así como un ajuste inadecuado de los taps de los transformadores también puede generar una condición de sobrevoltaje. Las subtensiones son el resultado de eventos contrarios a los que ocasionan las sobretensiones. La energización de una carga grande o la desconexión de un banco de condensadores pueden producir a la ocurrencia de una subtensión, hasta que el equipo de regulación de tensión pueda llevar de nuevo el voltaje dentro de las tolerancias permitidas. Circuitos sobrecargados también pueden exhibir condiciones de subtensiones.

En un sistema eléctrico, la magnitud de la tensión de estado estable depende de las características de diseño, cambios de carga y operaciones de maniobra en el

sistema. Es una práctica común corregir la tensión de estado estable en varios puntos sobre el sistema, por ejemplo, usando cambiadores de taps automáticos en la subestación de transformación y sobre algunos alimentadores de distribución. Las variaciones de tensión de larga duración presentan los siguientes efectos en el sistema eléctrico:

Con las sobretensiones pueden existir:

- Fallas en los equipos.
- Los equipos electrónicos pueden experimentar fallas inmediatas.
- Perforación del dieléctrico, que destruye el material sensible (componentes electrónicos).
- Degradación de material por envejecimiento (sobretensiones no destructivas pero repetidas).
- Corte largo provocado por la destrucción de material (pérdida de facturación para los distribuidores de energía, pérdidas de producción para los industriales).
- En transformadores, cables, barras, transformadores de potencial y de corriente, máquinas rotativas, generalmente, no muestran fallas de manera inmediata, pero disminuyen su vida útil si las sobretensiones son de muy larga duración.
- En dispositivos de protección se pueden originar operaciones no deseadas.
- La potencia reactiva de un banco de condensadores aumentará, ya que varía proporcionalmente con el cuadrado del voltaje, por lo tanto, se debe desconectar todos o parte de los condensadores cuando hay poca carga.
- En dispositivos de iluminación, se tendrá un incremento en la luz visible generada.

Con las subtensiones:

- Puede causar un funcionamiento inadecuado en los equipos.
- Pueden ocasionar paradas de procesos.
- Los dispositivos de control de motores pueden salir de operación.
- Incremento de las pérdidas por calentamiento en motores de inducción debido al aumento en el consumo de corriente del motor.
- Cambios de velocidad en la operación de motores de inducción.
- Los equipos electrónicos como los computadores y los controladores electrónicos pueden suspender su operación.
- La potencia reactiva de un banco de condensadores disminuirá, ya que varía proporcionalmente con el cuadrado del voltaje.
- En transformadores, cables, barras, transformadores de potencial y de corriente, máquinas rotativas, medidores y transductores, generalmente, no se presentan problemas.
- En dispositivos de iluminación, se tendrá una reducción en la luz visible generada.

Para llevar a cabo estudios relacionados con las variaciones de tensión de larga duración se deben tener presente los dos parámetros que las caracterizan, que

son su magnitud y duración. La duración se define como la diferencia entre el tiempo inicial y el tiempo final de la variación.

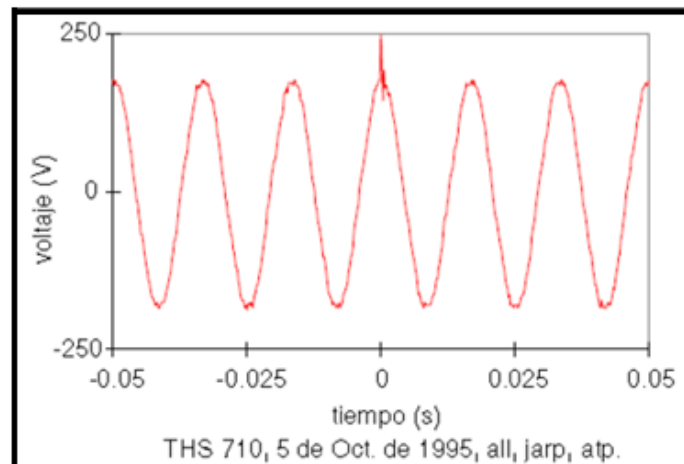
El tiempo inicial es el momento en el cual alguna de las fases está por fuera de los umbrales de detección de variaciones de tensión de larga duración.

Tiempo final: En sistemas polifásicos, es el momento en que los valores eficaces de todas las fases están por dentro de los umbrales de detección.

Para evaluar las variaciones de tensión de larga duración ocurridas en un punto de conexión común, deben compararse estas perturbaciones ocurridas con las curvas de inmunidad ante variaciones de larga duración del usuario que está siendo evaluado o con las de los equipos que el usuario tenga instalados. Según lo establecido por la NTC-5000 (documento en estudio), para las variaciones de tensión de larga duración aún no existen valores de referencia a nivel normativo, esto se debe a que dichos valores dependen de la aplicación específica que se tenga conectada a la red y que se pretenda evaluar.

- Sobretensiones transitorias: Son perturbaciones de muy corta duración, con duración típica de menos de medio ciclo, por lo que su duración está entre unos pocos microsegundos ( $\mu\text{s}$ ) hasta unos varios milisegundos (ms). Las sobretensiones transitorias pueden ser de impulso (ver figura 13) u oscilatorias y son causales del deterioro del aislamiento de los equipos o componentes electrónicos.

Figura 13. Sobretensión transitoria de impulso



Fuente: A. Llamas, J de los Reyes - ITESM Campus Monterrey

Instrumentación para determinar la calidad del suministro eléctrico.



4.6.9 Flicker. Es el efecto producido sobre la percepción visual humana por la fluctuación de la luminosidad emitida por las lámparas (“parpadeo en lámparas”), como consecuencia de variaciones en la tensión de suministro en baja tensión; estas variaciones deben ser rápidas y espaciadas lo bastante cerca en el tiempo para simular la respuesta del ojo-cerebro definida como parpadeo o flicker.

El flicker representa una molestia fisiológica que genera cansancio visual y nervioso y su intensidad depende de la amplitud y de la cadencia de repetición de las fluctuaciones, así como de la composición espectral y de la duración de la perturbación.

Las variaciones repetitivas de tensión que producen el fenómeno del flicker son causadas por ciertas cargas industriales, que consumen grandes corrientes de manera pulsante, tales como máquinas soldadoras, grandes motores con cargas variables y hornos de arco.

El flicker causa principalmente los siguientes efectos:

- Sensación de inestabilidad visual.
- Irritabilidad y cansancio visual.
- Variaciones de niveles de iluminación en bombillas incandescentes y bombillas de descarga.
- Reducción de vida útil de bombillas de descarga.
- Efecto estroboscópico.

4.6.10 Armónicos de tensión. Los armónicos de tensión son ondas senoidales cuyas frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental (60 Hz), también llamada componente del primer armónico; estas ondas, los armónicos y la componente fundamental de tensión, se superponen, generando distorsión en la forma de onda de tensión.

Para caracterizar los niveles de distorsión armónica se utiliza el espectro armónico completo con las magnitudes y ángulos de fase de cada componente armónica individual o se utiliza un único valor: la distorsión armónica total, como una medida de la deformación de la señal.

Las corrientes armónicas son causadas por cargas cuya característica tensión/corriente es no lineal, es decir, absorben una corriente que no tiene la misma forma que la tensión que las alimenta.

“Al circular a través de las impedancias de la red, estas corrientes armónicas crean las tensiones que pueden perturbar el funcionamiento de otros usuarios conectados a la misma fuente: tensiones armónicas. La impedancia de la fuente a las diferentes frecuencias armónicas tiene pues un papel fundamental en la

gravedad de la distorsión en tensión. Hay que observar que, si la impedancia de la fuente es baja (Pcc elevada), la distorsión en tensión es menor.”<sup>7</sup>

Los armónicos de tensión generan los siguientes problemas en la red:

- Aumento de pérdidas y calentamiento en equipo eléctrico.
- Registros incorrectos en equipos de control y monitoreo.
- Sobrecalentamiento del equipo rodante, transformadores y conductores eléctricos.
- Aumento en niveles de ruido audible de equipos eléctricos.
- Fallas en aislamientos de equipos eléctricos.
- Dificultad en arranques de procesos.
- Fallas u operación prematura de dispositivos de protección.
- Condiciones de resonancia armónica en el sistema de Potencia eléctrico del usuario, deteriorando la operación y confiabilidad del sistema y los equipos.
- Fallas de sincronización de disparo en equipos tales como variadores de velocidad.
- Sobre o sub facturación de energía por alteración del valor rms de la tensión y/o corriente que pasa por el medidor de energía.

La distorsión armónica individual de tensión ( $D_V$ ) y la distorsión armónica total de tensión ( $THD_V$ ), son calculadas con las ecuaciones 1.5 y 1.6 respectivamente.

Distorsión armónica individual de tensión:

Distorsión armónica

$$D_V = \frac{V_h}{V_1} \times 100\%$$

Total de tensión:

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} V_h^2}}{V_1} \times 100\%$$

en donde:

$V_h$ : magnitud de la componente armónica individual (Voltios rms).

$h$ : orden del armónico (a menos que aplique una condición específica,  $h$  será como mínimo igual a 40).

$V_1$ : magnitud de la componente fundamental (Voltios rms).

Los valores de  $D_V$  y  $THD_V$  calculados para cada fase no deben sobrepasar los valores de referencia indicados por la Tabla 4.

---

<sup>7</sup>Schneider Electric. La calidad de la energía eléctrica. [aut. libro] Philippe Ferracci. Cuaderno Técnico nº 199. Barcelona: s.n., 2004. p. 11.

Tabla 4. Valores de referencia de la distorsión individual y total de tensión

<b>Rango de Tensión</b>	<b>Distorsión Armónica Individual (%)</b>	<b>Distorsión Armónica Total - THDv (%)</b>
1 kV < Vn ≤ 69 kV	3,0	5,0
69 kV < Vn ≤ 161 kV	1,5	2,5
Vn ≥ 161 kV	1,0	1,5
Fuente: Ramírez Torres, 2009. NTC-5000 - Documento en estudio		

Fuente: A. Llamas, J de los Reyes - ITESM Campus Monterrey

4.6.11 Armónicos de corriente. Los armónicos de corriente son ondas senoidales cuyas frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental (60 Hz), estas ondas: los armónicos y la componente fundamental de la corriente, se superponen generando distorsión en la forma de onda de la corriente. Las corrientes armónicas son causadas por cargas no lineales conectadas al sistema de suministro eléctrico y se propagan al sistema de potencia y causan distorsiones armónicas de tensión que afectan a otros usuarios. Ejemplo de estas cargas son los convertidores electrónicos de potencia para variadores de velocidad de motores, los rectificadores y los hornos de arco.

Algunas causas características de los armónicos son:

- Conmutación a alta frecuencia en las fuentes de alimentación.
- Utilización de cargas controladas por tiristores.
- Grandes sistemas de UPS.
- Alta impedancia de las fuentes de alimentación.
- Alta impedancia en el cableado eléctrico.
- Utilización de cargas que conmuten mucho sobre la red (equipos de soldadura, Equipos de cómputo, UPS).

La presencia de armónicos de corriente en el sistema eléctrico puede ocasionar:

- Sobrecalentamiento y daños en transformadores con baja carga, motores, generadores y balastos electrónicos.
- Corrientes excesivas en neutros.
- Operación de protecciones sin causa aparente.
- Ruido audible excesivo en centros de distribución.
- Fallas en equipos electrónicos, especialmente con THD de tensión altos.
- Pérdida de datos en equipos de memoria.
- Fallas en UPS en operaciones de transferencia.

- Aumento de pérdidas de energía en los equipos eléctricos.
- Riesgos de incendio y explosiones por existencia de resonancias eléctricas en el sistema eléctrico.

La NTC-5000 indica que el período de evaluación será de una (1) semana. En condiciones normales de operación, los percentiles que se calculan a continuación para la distorsión individual de corriente ( $D_h$ ) y la distorsión total de demanda (TDD), para cada fase, no deben sobrepasar los valores de referencia.

La distorsión individual de corriente ( $D_h$ ) y la distorsión total de demanda (TDD), son calculadas como sigue:

Distorsión Armónica Individual de Corriente ( $D_h$ ):

$$D_h = \frac{I_h}{I_L} \times 100\%$$

La Distorsión Armónica Total de Corriente THDi se define como:

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \times 100\%$$

en donde:

$I_h$ : magnitud de la componente armónica individual (corriente rms).

$h$ : orden del armónico (amenos que aplique una condición específica,  $h$  será como mínimo igual a 40).

$I_1$ : magnitud de la componente fundamental (corriente rms).

Por tanto la Distorsión Total de Demanda (TDD), definida como la Distorsión de Corriente Armónica en porcentaje de la corriente de carga de demanda máxima, se define como:

Ec. 1.9

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \times 100\%$$

en donde

$I_h$ : magnitud de la componente armónica individual (corriente rms).

$h$ : orden del armónico (a menos que aplique una condición específica,  $h$  será como mínimo igual a 40).

IL: corriente de carga de demanda máxima en el PCC (componente de frecuencia fundamental - amperios rms).

#### 4.7. CAMPO MAGNÉTICO – REGLAMENTO RETIE

El Reglamento RETIE, define los requisitos para la densidad de flujo magnético para las zonas donde pueda permanecer público, independientemente del tiempo, basado en criterios de la OMS y la institución internacional ICNIRP para la protección de la población y el medio ambiente frente a las radiaciones no-ionizantes y en particular, proporciona guías y recomendaciones para evitar la exposición a dichas radiaciones.

4.7.1 Definición de campo magnético. Es una alteración del espacio que hace que en las cargas eléctricas en movimiento se genere una fuerza proporcional a su velocidad y a su carga. Es producido por imanes o por corrientes eléctricas. Su intensidad en un punto depende de la magnitud de la corriente y de la distancia a ésta o de las propiedades del imán y de la distancia. Este campo también se conoce como magnetostático debido a que su intensidad en un punto no depende del tiempo.

En la superficie de la tierra la inducción del campo magnético natural es máxima en los polos magnéticos (cerca de 70  $\mu\text{T}$ ) y mínima en el ecuador magnético (cerca de 30  $\mu\text{T}$ ).

El campo magnético es originado por la circulación de corriente eléctrica. Por tanto, todas las instalaciones y equipos que funcionen con electricidad producen a su alrededor un campo magnético que depende de la magnitud de la corriente y de la distancia a ésta, así: a mayor corriente, mayor campo magnético y a mayor distancia menor densidad de campo magnético.

En teoría, se debería hablar de intensidad de campo magnético, pero en la práctica se toma la densidad de flujo magnético, que se representa con la letra B y se mide en teslas (el gauss ya no se toma como unidad oficial), la cual tiene la siguiente equivalencia:

Ecuación de: Equivalencias Teslas – Gauss – N/A\*m

$$1 \text{ tesla} = 1 \frac{N}{A \cdot m} = 1 V \cdot \frac{s}{m^2} = \frac{1 Wb}{m^2} = 10.000 \text{ gauss}$$

4.7.2 Valores límites de exposición a campos electromagnéticos para seres humanos. Se deben tener en cuenta el tiempo y tipo de personas que son expuestas a campos electromagnéticos generados en la instalación eléctrica y la frecuencia de la señal eléctrica.

Las personas que por sus actividades están expuestas a campos electromagnéticos o el público en general, no debe ser sometido a campos que superen los valores establecidos en la siguiente tabla:

Tabla 5. Valores límites de exposición a campos electromagnéticos

Tipo de exposición	Densidad de flujo magnético [μT]
Exposición ocupacional en un día de trabajo de 8 horas	500
Exposición del público en general hasta 8 horas continuas	100

Fuente: A. Llamas, J de los Reyes - ITESM Campus Monterrey

El reglamento exige: “En las instalaciones objeto del presente reglamento se deben evaluar los valores de campo eléctrico a la mayor tensión de la instalación y la densidad de flujo magnético a la mayor corriente de operación y si los valores calculados en sitios donde pueda estar expuesto el público o una persona durante varias horas, superan los establecidos en la Tabla 4, se deben tomar las medidas para corregir tal situación.”

#### 4.8.CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS Y MAGNÉTICAS DE LAS LUMINARIAS POR INDUCCIÓN MAGNÉTICA Y METAL HALIDE.

Después de mencionar algunos conceptos básicos de iluminación, normatividad e iluminación artificial enfocada al Sistema de Transporte Masivo del Valle de Aburrá, se analizarán las lámparas de Inducción Magnética y Metal Halide las cuales son el punto de partida de este proyecto de grado, enfocándose en determinar cuál de las dos tecnologías es la más viable técnicamente, en el caso puntual de la iluminación general para el Sistema de Transporte Masivo del Metro de Medellín.

4.8.1 Luminaria por inducción magnética. Elementos Constitutivos de la luminaria: Fue Michael Faraday (1791-1867), físico y químico inglés, quien descubrió la inducción electromagnética, al relacionar el movimiento mecánico y el magnetismo con la corriente eléctrica. En 1831 descubrió las corrientes inducidas, al observar el fenómeno en un circuito provisto de un galvanómetro al abrir y cerrar otro circuito contiguo conectado a una batería, los cuales compartían un núcleo de hierro dulce. Ese mismo año descubrió que al acercar y al alejar un imán a una bobina, también se generaba una corriente inducida. Faraday demostró que la condición esencial para que se produzca la inducción magnética de una corriente eléctrica es que el circuito conductor corte el sistema de líneas que representan la fuerza magnética que emana de un imán o de otra corriente.

La Lámpara de Inducción Electromagnética “sin electrodos” es un nuevo concepto de muy alta tecnología para el ahorro energético en la iluminación, basado en el principio de gas de descarga de las lámparas fluorescentes y en el principio de la inducción electromagnética de alta frecuencia.

Se denomina como "la lámpara sin electrodos" (*electrodless*), ya que no tiene filamentos ni electrodos como el común de las lámparas. El filamento de incandescencia o el electrodo es el elemento fundamental para fuentes comunes de luz y la vida útil de estas depende de la vida útil del filamento de incandescencia o de los electrodos utilizados. La vida útil de la lámpara (sin electrodos) es ilimitada por no existir elementos que se desgasten, por lo que la vida útil puede prolongarse de manera indefinida. La vida útil de las lámparas es sólo determinada por el nivel de calidad, el diseño de los circuitos y demás componentes electrónicos.

Las lámparas de inducción usan una bobina de inducción sin filamentos y una antena acopladora, la cual consiste en tecnología de aplicar una descarga de frecuencia para proveer soluciones de iluminación.

A continuación en la Figura 14 se puede observar el tipo de luminaria que utilizamos durante toda la investigación.

Figura 14. Luminaria por inducción magnética



Fuente: Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público, RETILAP

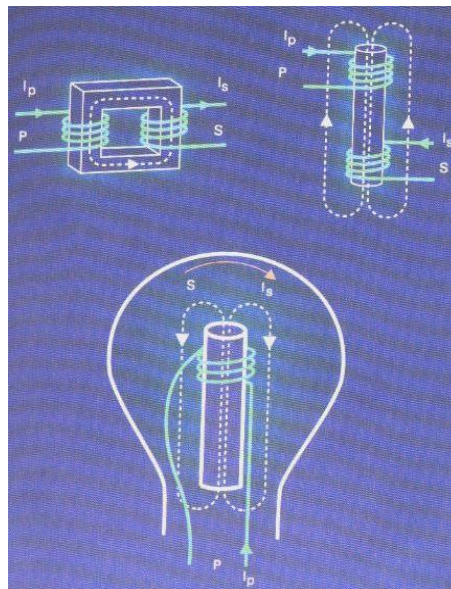
- Principio de Funcionamiento de Luminaria por Inducción Magnética: La iluminación por inducción funciona de manera similar a los tubos fluorescentes, que utilizan gases para producir luz blanca; lo que cambia es la forma en que estos gases se unen.

Mientras los tubos fluorescentes utilizan electrodos para unir los gases, la iluminación por inducción magnética se produce cuando la energía se transmite por un campo magnético o lo que se denomina “inducción magnética”.

El centro de la lámpara es la bobina de inducción a la cual le provee potencia un generador de alta frecuencia. El ensamble de vidrio circundante contiene un material electrón-ión plasma y esta relleno con un gas inerte. La porción interior del vidrio está recubierta con un recubrimiento de fósforo el cual es similar al que se encuentra en las lámparas fluorescentes. La antena transmite la energía generada por el primario de la bobina de un sistema de inducción al gas que se encuentra dentro de la lámpara, por lo cual se crea una radiación ultravioleta, la cual es luego transformada a fuentes visibles de luz por medio del recubrimiento de fósforo en la superficie de vidrio.

A continuación en Figura 15, se presentan los elementos constitutivos de la luminaria por inducción magnética.

Figura 15. Elementos constitutivos luminaria



Fuente: Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público, RETILAP

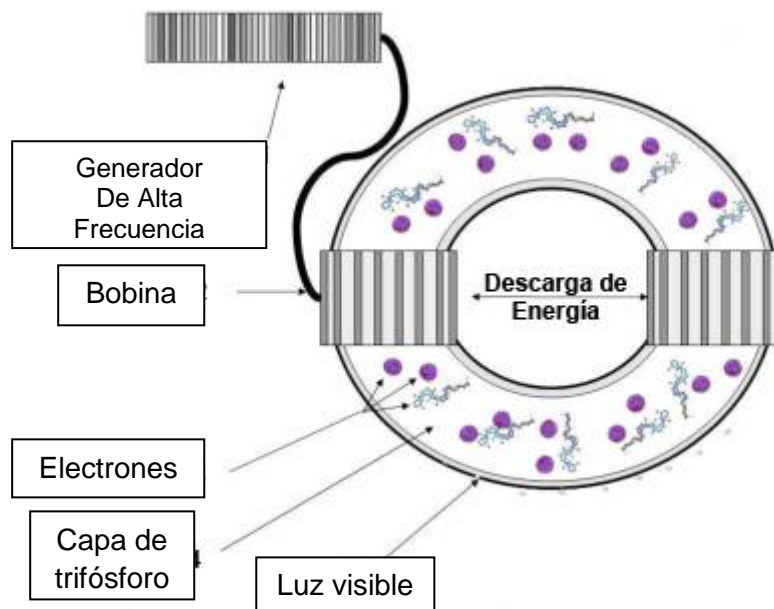
Basados en estos bien conocidos principios, se puede generar luz vía descarga eléctrica en gas a través de simple magnetismo. Transformadores electromagnéticos que consisten de aros con bobinas metálicas, crean un campo electromagnético alrededor del tubo de vidrio que contiene el gas, usando una alta frecuencia generada por un inductor electrónico. El camino de descarga, inducido por las bobinas, forma un ciclo cerrado causando la aceleración de los electrones libres, que chocan con los átomos de Mercurio y excitan sus electrones. Según



estos electrones excitados de los átomos regresan de este estado de alta excitación a un nivel estable, emiten radiación ultravioleta. Esta radiación ultravioleta creada es convertida en luz visible al pasar a través del recubrimiento de Fósforo en la superficie del tubo. La forma de la lámpara de inducción maximiza la eficiencia de los campos que son generados.

En la figura 16 se puede observar de una manera más simple los diferentes elementos que componen la luminaria por Inducción Magnética y la función que cada uno desempeña.

Figura 16. Principio de funcionamiento

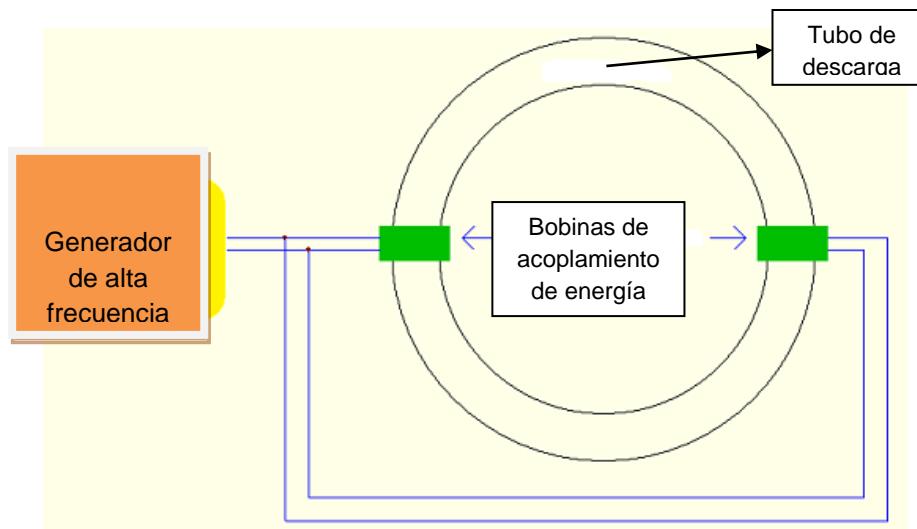


- Generador de Alta Frecuencia: El generador produce una corriente alterna de 236 KHz que es suministrada a la antena. Contiene un oscilador, que se ajusta a las características de la bobina primaria.
- Bobina de Inducción sin Electrodo: La bobina descarga la energía producida por el generador de alta frecuencia a una ampolla de cristal, utilizando para esto una antena –conformada por una bobina primaria de inducción y un núcleo de ferrita. Este equipo consta además de un soporte para la antena, un cable coaxial y anillos magnéticos termoconductores.
- Electrones: Ion Plasma y Gas Inerte: El choque de gas argón con las moléculas controladas de mercurio en estado gaseoso, transforma la energía en radiación ultravioleta (0,2%).
- Capa de Trifósforo: La capa de trifósforo convierte la radiación ultravioleta producida (0,4%) en luz visible.
- Luz Visible.

- Generador de alta frecuencia: La alta corriente (230Khz a la potencia nominal) es creada por el generador de alta frecuencia. Las dos bobinas energizantes están en paralelo unos con otros, tal como se muestra en la (Figura 17).

La transferencia de energía de la bobina de energización a la descarga de plasma puede ser considerado como el modelo de transformador. La bobina de energización es el bobinado primario y el tubo de descarga es el bobinado secundario.

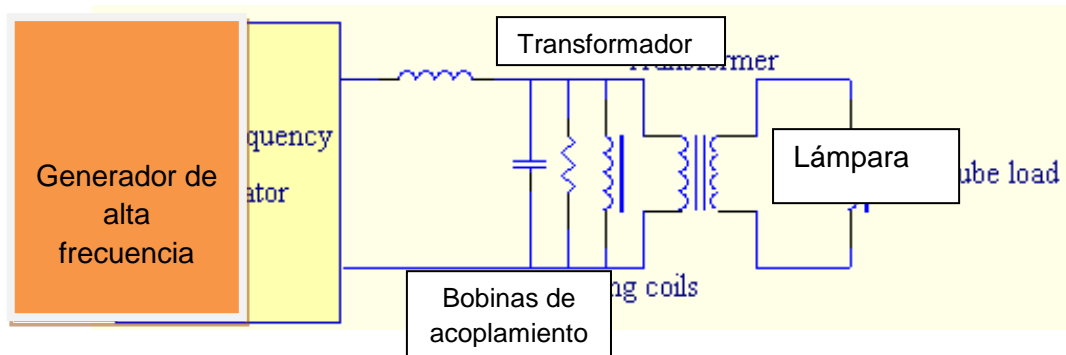
Figura 17. Lámpara de inducción: Construcción mecánica



Fuente: Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público, RETILAP

El generador de alta frecuencia se utiliza para generar la corriente de alta frecuencia que se necesita para conducir la descarga acoplada inductivamente. Otra función es proporcionar la protección en el sistema en algunas situaciones excepcionales, tales como un cortocircuito, circuito abierto y sobrecalentamiento. En esas condiciones, la señal de activación se corta. Entonces, el inversor estará fuera del trabajo, de modo que el generador puede cumplir con la auto-protección. En la Figura 18 se observa el esquema del generador.

Figura 18. Modelo del transformador



Fuente: Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público, RETILAP

- Aplicaciones y usos: La lámpara de inducción ha sido exitosamente utilizada en decenas de miles de proyectos mundiales, incluye el gran puente Nanpu de Shanghai, túneles de América Latina, aeropuerto Charles de Gaulle de Francia, puente en Austria. Los productos son utilizados ampliamente en los países de los Estados Unidos, Gran Bretaña, Alemania, Chile, Turquía, Japón, Corea del Sur, Brasil, India, México, Australia, Pakistán etc. Se cubren con ella los subsectores: aeropuertos, puertos, carreteras, estaciones de autobús, ferrocarril, plantas industriales, construcción, oficinas, hoteles, aparcamientos, campos de fútbol, gasolineras, pabellones feriales, restaurantes, etc. La tecnología de la lámpara de inducción permite mejorar los proyectos de iluminación y ahorrar energía.

También es empleada como iluminación general y en aplicaciones especiales donde es exigida una alta calidad de luz blanca, con mantenimiento reducido y costos relativos tales como:

- Predios públicos y tiendas.
  - Iluminación general integral con luminarias localizadas.
  - Iluminación funcional o decorativa para embellecimiento de áreas residenciales.
  - Aplicaciones industriales.
  - Áreas especiales como túneles, señalización, ambientes limpios y aplicaciones a prueba de explosión.
- Fabricantes a nivel mundial: Esta tecnología ha crecido considerablemente y ya son bastantes las compañías en el mundo que se han encargado de la fabricación, distribución y comercialización de esta tecnología, a continuación mencionaremos algunas de las empresas:

- Gescom S.A. Es una compañía especializada en proveer soluciones de ahorro energético en iluminación, bajo los más altos estándares de calidad, seguridad y protección de medio ambiente.  
Gescom S.A mantiene una estrecha alianza con importantes proveedores y fabricantes especializados en productos de ahorro energético para uso industrial y comercial.  
Gescom S.A es representante exclusivo para América Latina de una de las empresas de mayor prestigio y calidad entre los fabricantes de lámparas de inducción Electromagnética.  
Además, tenemos presencia en Argentina y Brasil a través de la empresa WegaLighting.
- MHT Lighting. Es pionero en el desarrollo e implementación de sistemas de iluminación y ahorro de energía para el uso de alumbrado público, industrial y comercial mediante equipos de inducción magnética. Nuestra fábrica como empresa es una de las más importantes en la fabricación, distribución y comercialización de productos de iluminación y ahorro de energía de uso urbano, industrial y comercial y nuestro equipo técnico está altamente calificado para asistirle en sus proyectos suministrándole soluciones para todas sus necesidades de iluminación y ahorro de energía de manera personalizada.
- ShanghaiHongyuan Iluminación & Equipos Eléctricos S.L (LVD). Fue fundada en 1989. Desde hace 20 años, Hongyuan ha ganado unos cientos honores y fue premiado "Las 100 Mejores Empresas de Shanghai" y "Top Ten de Contribuyentes" cuatro veces consecutivas, "Compañías Civilizadas de Shanghai" y "Shanghai AAA Empresa Fiel de Contrato y Crédito" cinco veces consecutivas. Hongyuan es considerado por el gobierno como "Alto-Tec Compañía de Shanghai", "Ciencia y Tecnología Bases de demostración de Shanghai" y "Empresas de Patentes Experimental de Shanghai", mientras que nuestros productos fueron otorgados el primer puesto de "Nacional de la Ciencia y la Innovación Tecnológica y de ahorro de energía y de Reducción de Emisiones". Hemos atraído la inversión de Goldman Sach sentando las bases para la plena aplicación de la estrategia de internacionalización. Hasta ahora, Hongyuan ha sido el mayor centro de la investigación y la fabricación de las lámparas de inducción en el mundo.
- WwestMexico. cuenta con su planta productiva fuera de México en la cual produce su propia marca de lámparas de Inducción que posteriormente importa a los destinos de mercado. La Marca registrada en México de las lámparas de inducción es W-Energy Lux®. Las lámparas de inducción W-Energy Lux®, también llamadas lámparas de inducción de alta eficiencia, están integradas con la más avanzada tecnología de poder electrónico, plasma y material magnético. Lo cual permite que operen sin ningún electrodo, en su lugar utilizan un campo magnético de alta frecuencia. Este funciona induciendo a los átomos de plasma con energía eléctrica, los cuales al pasar rápidamente una y otra vez por las paredes del tubo del vidrio de la lámpara, generan la luz eléctrica.

- Philips. Royal Philips Electronics de los Países Bajos (NYSE: PHG, AEX: PHI) es una de las compañías más grandes del mundo de la electrónica y la mayor de Europa, con unas ventas de 29 mil millones en 2003. Se trata de un líder mundial en televisores en color, iluminación, afeitadoras eléctricas, sistemas de diagnóstico por imagen y monitorización de pacientes, y un chip de productos de TV. Sus 165.300 empleados en más de 60 países y participa en las áreas de iluminación, electrónica de consumo, electrodomésticos, semiconductores y sistemas médicos.

Nota: Esta compañía también fabrican las luminarias de Meta Halide.

#### 4.8.2 Luminaria metal halide

- Estructura de la luminaria. Las lámparas de haluro metálico, también conocidas como lámparas de aditivos metálicos, lámparas de halogenuros metálicos, lámparas de mercurio halogenado o METALARC, son lámparas de descarga de alta presión, del grupo de las lámparas llamadas HID (High Intensity Discharge). Son generalmente de alta potencia y con una buena reproducción de colores, además de la luz ultravioleta. Originalmente fueron creadas en los años 1960 para el uso industrial de estas pero hoy se suelen aplicar en la industria tanto como el hogar.

En la Figura 19 se aprecia el tipo de luminaria Metal Halide que empleamos durante las pruebas de medición del proyecto.

Figura 8. Luminaria Metal Halide 250W



Fuente: Manual de luminotecnia – asociación argentina de luminotecnia.

Los principales componentes de la lámpara de haluro metálico son los siguientes. Tienen una base metálica (a veces una en cada extremo), que permita la conexión eléctrica. La lámpara es recubierta con un cristal protector externo (llamado bulbo) que protege los componentes internos de la lámpara (a veces también es dotado de un filtro de radiación ultravioleta, provocada por el vapor de mercurio). Dentro de la cubierta de cristal, se encuentran una serie de soportes y alambres de plomo que sostienen el tubo de cuarzo fundido (donde se forma el arco voltaico y la luz), y a su vez este se encaja en los electrodos de tungsteno. Dentro del tubo de cuarzo fundido, además del mercurio, contiene yoduros, bromuros de diferentes metales y un gas noble. La composición de los metales usados define el color y la temperatura de la luz producida por la lámpara.

Otros tipos tienen el tubo donde se forma el arco de alúmina en vez de cuarzo fundido, como las lámparas de vapor de sodio.). Algunas lámparas son recubiertas internamente con fósforo para difundir la luz.

Las lámparas de metal halide o de metal arc, son más sensibles a las fluctuaciones de voltaje que las de sodio y las de mercurio. Su tiempo de encendido es de 5 minutos aproximadamente, mientras que su tiempo de reencendido puede llegar casi al doble. El principio de funcionamiento de una lámpara de metal halide es muy similar a la de una de sodio.

Dado que estas lámparas no emiten radiaciones ultravioleta, eliminan la necesidad de la capa fluorescente, por lo que se suelen construir en ampollas cilíndricas y transparentes.

Los tipos de lámparas existentes en el mercado son muy diversos y dependen principalmente del tipo de halogenuro introducido. Tanto la temperatura de color proporcionada, como la eficacia luminosa obtenida dependen de este concepto. Así, cuando se utilizan aditivos de sodio, talio e indio, se obtiene una eficacia luminosa del orden de 95 Lm/W. y una temperatura de color de unos 4.200 °C. Cuando se utilizan aditivos a base de estaño, el rendimiento luminoso es de unos 45 Lm/W. y la temperatura de color del orden de 5.000 °C.

- **Balastos.** Las lámparas de haluro metálico requieren balastos para regular el flujo continuo del arco y proporcionar el voltaje apropiado a la lámpara. Algunas lámparas grandes contienen un electrodo especial de encendido para generar el arco cuando la lámpara es encendida, generando un parpadeo leve al momento del encendido. Las lámparas más pequeñas no requieren un electrodo de encendido, y en lugar de este utilizan un circuito especial de encendido, que se encuentra dentro del balasto, generando un pulso de alto voltaje entre los electrodos de funcionamiento.

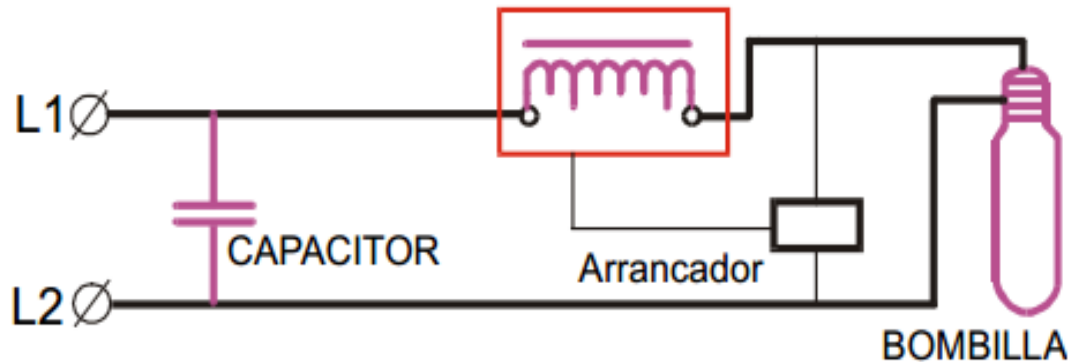
En el caso de los balastos electrónicos, algunos están disponibles para las lámparas de haluro metálico. La ventaja de estos balastos es que tienen un control más preciso y exacto de la potencia, proporcionando un color más consistente y una vida más larga de la lámpara. En algunos casos se dice que los balastos electrónicos incrementan la eficiencia de la lámpara, reduciendo el consumo eléctrico, pero hay excepciones, por ejemplo las lámparas de alta frecuencia (High Output) o muy alta frecuencia (Very High Output) donde el rendimiento no aumenta con el uso de balastos electrónicos.

El tiempo de vida de estas lámparas va desde las 20.000 a 22.000 h. El tipo de balastro empleado en la prueba es de tipo reactor. Las características principales del Balastro reactorson las siguientes:

- Bajas pérdidas de potencia.
- Dimensiones y peso reducido.
- Bajos costos.
- Bajo factor de cresta de corriente (garantiza alta durabilidad de la bombilla).
- Mínimo ruido.
- Adecuados para instalar en redes cuyos voltajes pueden presentar variaciones en la alimentación de +/- 5%, lo que genera en la bombilla variaciones máximas de potencia del +/- 12%.
- Baja distorsión de la onda de corriente.
- Presenta corriente de arranque más alta que la de funcionamiento estable, (se debe tener en cuenta para el dimensionamiento de los alimentadores y de las protecciones). Lo anterior garantiza un calentamiento rápido de la bombilla, permitiendo que en poco tiempo la bombilla suministre el flujo luminoso normal.
- El voltaje nominal de alimentación al balastro debe ser mínimo de 198 V.

Las luminarias con bombillas de mercurio y/o metal halide y balastro tipo reactor, tienen un factor de potencia normal (no corregido) entre 40% y 50% pero éste puede ser corregido agregándole un capacitor a través de la línea, según se indica en la figura 20 (véase figura). Con el capacitor no se afecta el circuito de la bombilla, por el contrario aumenta el factor de potencia del sistema a un valor superior al 90%, lo cual se traduce en una reducción de la corriente de línea tanto en el arranque como en funcionamiento estable. Esto permite usar un mayor número de balastos con conductores de un calibre determinado.

Figura 20. Balasto tipo reactor



Fuente: Manual de luminotecnia – asociación argentina de luminotecnia.

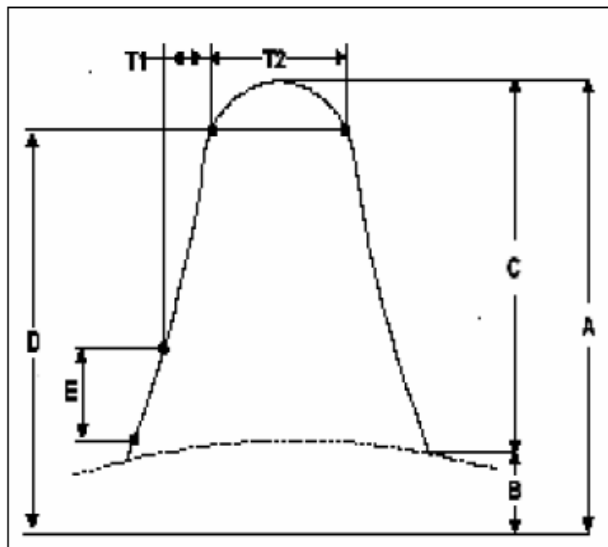
Arrancadores. Las bombillas de sodio y de metal halide, a diferencia de las de mercurio, necesitan para el arranque, un dispositivo adicional, denominado arrancador, que se encarga de generar en asocio o no con el balasto, un pulso de voltaje alto para así lograr encender la bombilla.

Las características eléctricas de los arrancadores son las Siguietes (ver figura 21):

- Suministran un pulso de voltaje con una altura mínima de 2.500 voltios y un máximo de 4.500 voltios para lámparas (bombillas) de sodio de 100W, 150W, 250W y 400W. Una altura mínima de 1.800 voltios y un máximo de 2.500 voltios para lámparas de sodio 70W. (Véase figura 30).
- Ancho del pulso: un microsegundo mínimo medido a 2.250 voltios. (Véase figura 30), para lámparas de sodio 100W – 400W y de 2 microsegundos medido a 1.680 voltios para lámparas de sodio 70W.
- Repetición del pulso, uno por ciclo para balastos tipo reactor y dos por ciclo para balastos tipo regulado y autorregulado.
- La posición del pulso con balasto reactor debe ocurrir durante el tiempo en el que la tensión de circuito abierto esté arriba del 90% de su pico y no debe ocurrir después de 20 grados eléctricos más allá del centro del medio ciclo (110 grados y/o 290 grados).
- La posición del pulso con balasto regulado (C.W.) y autorregulado (C.W.A.) debe ocurrir durante el tiempo en que la tensión de circuito abierto esté arriba del 90% de su pico y no debe ocurrir después de 15 grados eléctricos más allá del centro del medio ciclo (105 grados y/o 285 grados).
- El pulso se debe aplicar al terminal central de la bombilla.



Figura 21. Arrancadores: Pulso de voltaje



- A** = Pico del impulso (altura).
- B** =  $\sqrt{2}$  por el valor eficaz de la tensión de ensayo.
- C** = A menos B.
- D** = 90 % de A.
- E** = 30 % de C.
- T1** = Tiempo de elevación.
- T2** = Duración.

Fuente. Manual del Instalador de Electrocontrol.

- Principio de Funcionamiento de Luminaria Metal Halide. En las lámparas incandescentes, la corriente eléctrica recorre el filamento produciendo la incandescencia. En una lámpara de descarga (halogenuros metálicos), la corriente debe atravesar un gas o vapor metálico. (ver figura 22 y 23)

Las lámparas de halogenuros metálicos se basan en el fenómeno de la luminiscencia.

- Luminiscencia. Cuando un electrón con una velocidad elevada choca contra un átomo es capaz de excitar ese átomo, haciendo pasar alguno de sus electrones a un nivel de energía superior

Los electrones elevados de nivel (que han ganado energía) en el átomo excitado retornan rápidamente a su posición inicial, devolviendo la energía que habían adquirido en forma de radiaciones electromagnéticas .

Las radiaciones de los electrones pertenecientes a los átomos de algunos gases son visibles.

Figura 22. Excitación de un átomo

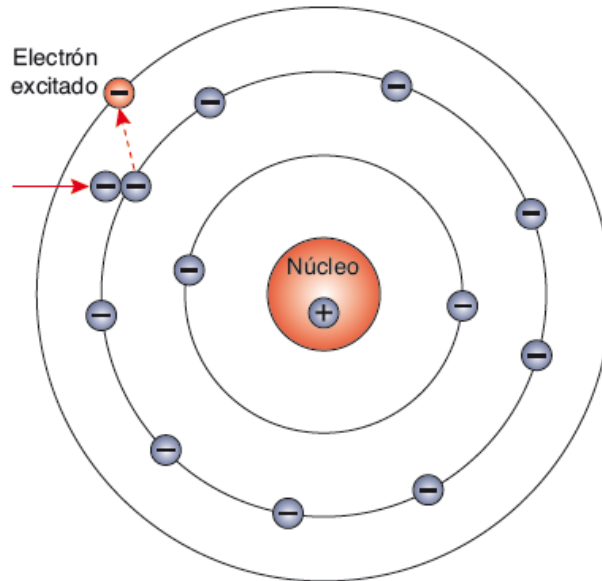
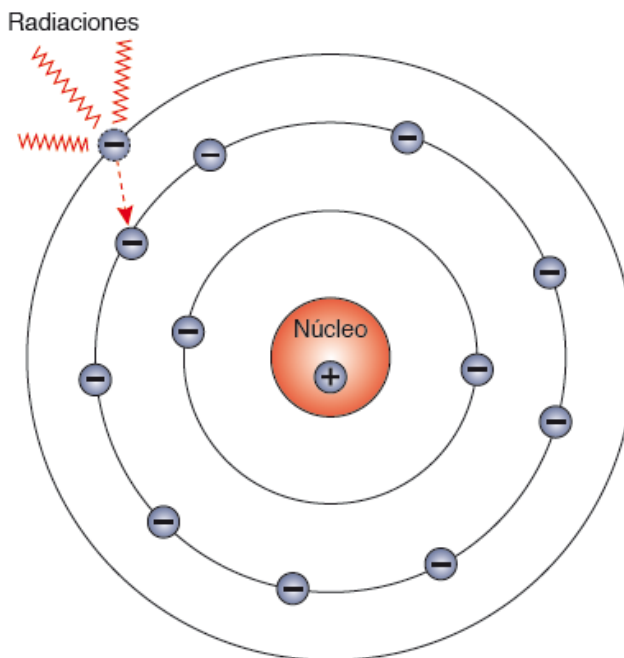


Figura 23. Radiaciones electromagnéticas emitidas por un átomo



Fuente. Manual del Instalador de Electrocontrol.

Como otras lámparas de descarga de gas eléctrica, por ejemplo las lámparas de vapor de mercurio (muy similares a la de haluro metálico), la luz se genera pasando un arco eléctrico a través de una mezcla de gases. En una lámpara de haluro metálico, el tubo compacto donde se forma el arco contiene una mezcla de argón, mercurio y una variedad de haluros metálicos. Las mezclas de haluros metálicos afecta la naturaleza de la luz producida, variando correlacionadamente la temperatura del color y su intensidad (por ejemplo, que la luz producida sea azulada o rojiza). El gas argón se ioniza fácilmente, facultando el paso del arco voltáico pulsante a través de dos electrodos, cuando se le aplica un cierto voltaje a la lámpara. El calor generado por el arco eléctrico vaporiza el mercurio y los haluros metálicos, produciendo luz a medida que la temperatura y la presión aumentan.

Aplicaciones y usos. Las luminarias de Metal Halide son de uso industrial tanto como de uso doméstico. Generalmente se le suele usar en estaciones de combustible, plazas y alumbrado público. También se le suele usar en la iluminación de acuarios. Por su amplio espectro de colores, se le suele usar en lugares donde se requiere una buena reproducción de colores, como estaciones de televisión y campos deportivos.

Alumbrado interior para naves altas, como por ejemplo talleres industriales, salas de exposición, supermercados, calles comerciales, grandes almacenes de bricolaje, iglesias, antecorredores de aeropuertos y salas de espera de estaciones.

#### Fabricantes a nivel mundial

- Changzhou Ding-ming Co Ltd. Fue fundado en septiembre de 1996, es una compañía que se especializa en producir productos de la iluminación. Está situada en el changzhou, jiangsu, provincia. China.
- AniqngChengxinImp&Exp Co LTD. Está situado en la ciudad de Anqing, la ciudad costera hermosa. Produce principalmente todas las clases de fuente de luz avanzada, por ejemplo: la lámpara ahorro de energía, la iluminación del LED, la fibra, las luces de la Navidad, etc.
- YizhengRisingsun que enciende la aplicación eléctrica Co., Ltd. Está situado en el área del paisaje de Longshan de la provincia de Jiangsu de la ciudad de Yizheng. Nuestra compañía se especializa en la fabricación y la distribución de las varias fuentes de luz eléctricas. Somos una compañía del grupo con más de 30 años de experiencia profesional desde 1976. Nuestros productos principales son lámpara ahorro de energía, lámpara fluorescente y series de intensidad alta de la lámpara de descarga del gas. Tenemos un equipo fuerte de la explotación de la reforma y de los productos de la tecnología. Las tecnologías fotoeléctricas han sido ampliamente utilizadas en nuestros productos.
- CEIEC Sichuan Hualong Co Ltd. Es uno de los fabricantes y exportadores más importantes de China, especializándose en varias fuentes de las iluminaciones

y accesorios de iluminación por ejemplo: Proyector llevado, bulbo llevado, tubo llevado, lámparas de haluro de metal de cerámica, lámparas de haluro de metal, mercurio de alta presión/lámparas del sodio, lámparas ahorros de energía, lámparas del halógeno. Nuestra compañía proporciona productos de calidad en los precios competitivos, la entrega rápida y el servicio profesional.

- HavellsSylvania. Es una empresa líder en soluciones de iluminación profesional con más de 100 años de experiencia en la producción de fuentes de luz y accesorios que van desde bombillos ahorradores (CFL), bombillos halógenos, tubos fluorescentes, bombillas HID y la nueva tecnología LED
- Osram. Es uno de los tres mayores fabricantes de lámparas del mundo. La fuerte implantación internacional queda reflejada en sus 41.000 empleados. La compañía tiene su sede central en Munich. Su facturación mundial en la actualidad asciende a 5.000 millones de Euros.

#### 4.8.3 Ventajas y desventajas entre luminarias por inducción magnética y metal halide

A continuación mencionaremos algunas de las principales características que según los fabricantes de cada una de las luminarias nos garantizan, pero posteriormente todos estos datos los vamos a comparar con la fotometría que se le realizaron a las dos luminarias y así concluiremos si en verdad todos los beneficios expuestos por los fabricantes son reales.

- Ventajas de la luminaria por Inducción Magnética. Estas lámparas tienen grandes ventajas entre las cuales destacamos.
  - Las Lámparas de Inducción Electromagnética tienen un factor de potencia muy alto, sobre 0.98. Este factor de potencia implica que no hay derroche de energía transformada en calor.
  - Genera baja temperatura. Por el alto factor de potencia de las Lámparas de Inducción Electromagnética la temperatura que generan no sobrepasa los 85°C, en pleno régimen de operación.
  - Mayor seguridad contra incendio. Dado que las Lámparas de Inducción Electromagnética no se calientan más allá de los 85°C, sus elementos no se funden ni tampoco los cables de conexión. Su bombilla no explota producto del cambio de temperatura ambiente dentro del amplio rango en la que puede operar.
  - Mayor tolerancia a cambios de voltajes. Las Lámparas de Inducción Electromagnéticas pueden funcionar en rangos de voltaje desde 165V a 270V, lo que las hace más seguras. Además, cuenta con un sistema de seguridad contra cortocircuitos.
  - Funcionamiento en un alto rango de temperatura ambiente. Las Lámparas de Inducción Electromagnética funcionan en rangos de variación de temperatura

- ambiente muy altos. Pueden ser usadas en ambientes de temperaturas de -20°C a 50°C, lo que las hace muy versátiles en ambientes exigentes.
- Colores verdaderos. Su factor CRI >80 (CRI es la medición de color natural. El máximo valor es 100, que equivale a la luz solar). Las Lámparas de Inducción Electromagnética permiten ver los objetos con colores más verdaderos, similar a los percibidos con la luz solar.
  - Encendido instantáneo. A diferencia de las lámparas de Haluro Metal, las Lámparas de Inducción electromagnética tienen encendido instantáneo, sin necesidad de esperar su enfriamiento ante cortes de energía.
  - Menor degradación. La degradación de la luminosidad de las lámparas de Haluro Metal alcanza a un 70% entre las 5.000 y 7.000 horas. Las Lámparas de Inducción Electromagnética llegan al 70% de su capacidad lumínica entre las 60.000 a 80.000 horas. En otras palabras, a las 5.000 horas las lámparas de Haluro Metal están dando un 70% de luminosidad y consumiendo el 100% de watts, en circunstancia que en las Lámparas de Inducción Electromagnética esta situación se produce después de las 60.000 horas.
  - Mejor luz. Las Lámparas de Inducción Electromagnética trabajan entre los 4.200°K y los 6.500°K (grados Kelvin) dando como resultado una luz blanca llena que no cansa la vista del ser humano ni le produce stress.
  - Sin efecto estroboscópico. Dado que las Lámparas de Inducción Electromagnética funcionan a alta frecuencia, no producen el efecto estroboscópico típico de los tubos fluorescentes convencionales, lo que se traduce en una reducción de tensión y cansancio visual del ser humano.
  - Ahorro de hasta el 60% en el consumo de energía eléctrica.
  - No requiere reactancia, usa generador de frecuencia de una 100 000 horas de vida útil.
  - Mantenimiento casi nulo.
  - Prende con voltaje desde 85 V hasta 320 V.
  - Alta eficiencia luminosa: ofrece de 80-95 lúmenes/watt.
  - Buen rendimiento cromático de 86-92%.
  - Disponibles para funcionar con energía solar.
  - Es una lámpara segura, con los Índices de Protección correspondientes.
  - Antiexplosiva debido a que no tiene filamentos.
  - Las vibraciones no las afectan (por no tener filamentos).
  - Compactas y ligeras de peso.
  - Recurso lumínico: TriPhosphoro.
  - Baja emisión de luz Ultra Violeta (menor al 0.5%).
  - Baja emisión de luz Infra Roja (menor al 0.4%).
  - No contiene bifenilos ni difenilopoliclorados.
  - Generador elaborado con elementos reciclables (Aluminio y Cobre).
  - Al consumir poca energía contribuye con el no calentamiento global, colaborando a la disminución de la producción del bióxido de carbono.

- Desventajas de la luminaria por inducción. Inversión Inicial alta
- Ventajas de la luminaria de Meta Halide.
  - Luz blanco puro.
  - Excelente representación de colores (CRI 70 - 85)
  - Presenta el mejor índice de reproducción del color entre los sistemas de HID.
  - Su eficiencia oscila entre 55 a 90 lm/W.
  - Aplicable en interiores y exteriores.
  - Es la mejor opción para la transmisión de eventos televisados.
  - Bulbo exterior ovoide con recubrimiento fluorescente.
  - Alta eficacia luminosa, durante toda la vida de la lámpara.
  - Temperatura de color blanco neutro y blanco frío estable hasta el final de la vida de la lámpara.
  - Los tipos "S" son directamente intercambiables con lámparas de vapor de mercurio.
  - Los tipos "P" incorporan una protección de teflón y pueden utilizarse en luminarias abiertas.
  - El excelente mantenimiento del flujo y la larga duración garantizan altos niveles de iluminación y mínimos costes de mantenimiento.
  - La buena reproducción cromática crea un ambiente agradable con alto grado de confort visual.
  - La excelente estabilidad cromática garantiza la uniformidad del color durante toda la vida de la lámpara incluso con recambios puntuales de lámparas.
  - El concepto "Plus", mayor flujo luminoso, permite conseguir importantes ahorros energéticos y de inversión.
- Desventajas de la luminaria de Metal Halide.
  - Vida útil un poco más corta que las HID.
  - Alto costo de las lámparas.
  - Sensitivas a la orientación vertical-Horizontal.
  - Color cambia al final de la vida útil.
  - Algunas lámparas están especificadas para trabajar en luminarias selladas.

#### 4.8.4 Paralelo entre los Aditivos Metálicos e inducción

Tabla 6. Inducción vs Aditivos Metálicos

INDUCCION	ADITIVOS METALICOS
40 W	80 W
80 W	150 W
100 W	250 W
150 W	300 W – 325 W
200 W	400 W
400 W	1000 W

- Económico
  - La depreciación de la luz es mucho menor en comparación con la tasa de depreciación en un haluro metálico.
  - Ahorro de hasta de un 60 % a 70% en el consumo de energía eléctrica.
  - No requiere Balastro, usa generador de frecuencia 100,000 horas de vida útil
  - Mantenimiento casi nulo.
  - 7 años de Garantía de fábrica.
- Técnico y lumínico
  - Encendido Instantáneo.
  - Prende con Voltaje desde 85 v. hasta 320 v.
  - <10 % de distorsión armónicos.
  - Factor de Potencia de 95%.
  - Eficiencia Luminosa: ofrece de 80-95 lúmenes/watt.
  - Rendimiento Cromático de 86-92%.
  - Se cuenta con modelos que funcionan con Energía Solar.
- Seguridad
  - Es una lámpara segura con los Índices de Protección correspondientes.
  - Anti Explosiva debido a que no tiene filamentos.
  - Compatibilidad Electro Magnética, (estándar EN55105 y GB17743-1999).
  - Por el hecho de no tener filamentos, las vibraciones no le afectan.
  - Peso Ligero.

- Ecológico
  - Recurso lumínico: TriPhosphoro.
  - Emisión de luz Ultra Violeta: menor a 0.5%
  - Emisión de luz Infra Roja: menor a 0.4%
  - No contiene bifenilos ni difenilospoliclorados.
  - Generador elaborado con Aluminio y Cobre (elementos reciclables).
  - Generador muy ligero.
  - Al generar poco calor y consumir poca energía contribuye con el no calentamiento global, coadyuvando a la disminución de la producción del bióxido de carbono.



## 5. METODOLOGÍA

### 5.1. TIPO DE ESTUDIO

La metodología se fundamenta en la investigación de mejores soluciones para todo el tema relacionado con la iluminación del sistema de transporte masivo metro de Medellín Ltda. Para la cual se tiene en cuenta mediante pruebas y ensayos los siguientes temas: campo magnético generado por las luminarias, eficiencia lumínica de los diferentes tipos de luminarias, los cuales son: luminarias de haluro metálico, haluro metálico con balastro autorregulado y luminarias de inducción. Haciendo un paralelo entre estos tipos de iluminación para llevar a cabo respuestas como: tiempo de arranque, eficiencia lumínica y campo electromagnético y optimización energética generados por cada tipo de luminaria.

### 5.2. METODO

Este proyecto se realizó con el siguiente orden:

- Se llevan a cabo en primer lugar mediciones a todas las plataformas de la estación san Antonio, para poder obtener los resultados de eficiencia luminosa, se escoge la estación San Antonio como estación modelo.
- Corroborar las mediciones en los laboratorios de nuestra institución, luego de habernos enriquecido de información mediante investigaciones, tales como laboratorios de fotometría, libros, catálogos, internet.

### 5.3. POBLACION

La población a la cual va dirigido este proyecto es a todos los usuarios del sistema de transporte masivo Metro de Medellín Ltda.

### 5.4. MUESTRA

- Estación San Antonio.
- Laboratorio de Maquinas II.

### 5.5 FUENTES DE INFORMACION

6.5.1 Fuentes primarias. Profesor Mario Arrieta Paternina (grupo de investigación tecnológico pascual bravo), estudiantes de Electromecánica y personal del Sistema masivo Metro de Medellín.

6.5.2 Fuentes secundarias. Laboratorio fotometría (Electrocontrol), catálogos de iluminación, internet, libros.

## 6. RESULTADOS DEL PROYECTO

En la actualidad la empresa Metro de Medellín Ltda, empresa líder en el sistema de transporte masivo de la ciudad del Valle de Aburrá dentro de su sistema eléctrico cuenta con un sistema de iluminación conformado principalmente por luminarias de Metal-Haluro (MH) y lámparas fluorescentes.

Este proyecto consiste en la caracterización y modelado de luminarias Metal Halide y, luminarias por inducción con balastros MH Inadisa y MH autorregulado para el sistema de transporte masivo de la ciudad de Medellín. Se procede haciendo visitas de campo a la estación San Antonio para la toma de datos con el luxómetro a cada una de las diferentes luminarias de los accesos nororiental y suroriental de la estación.

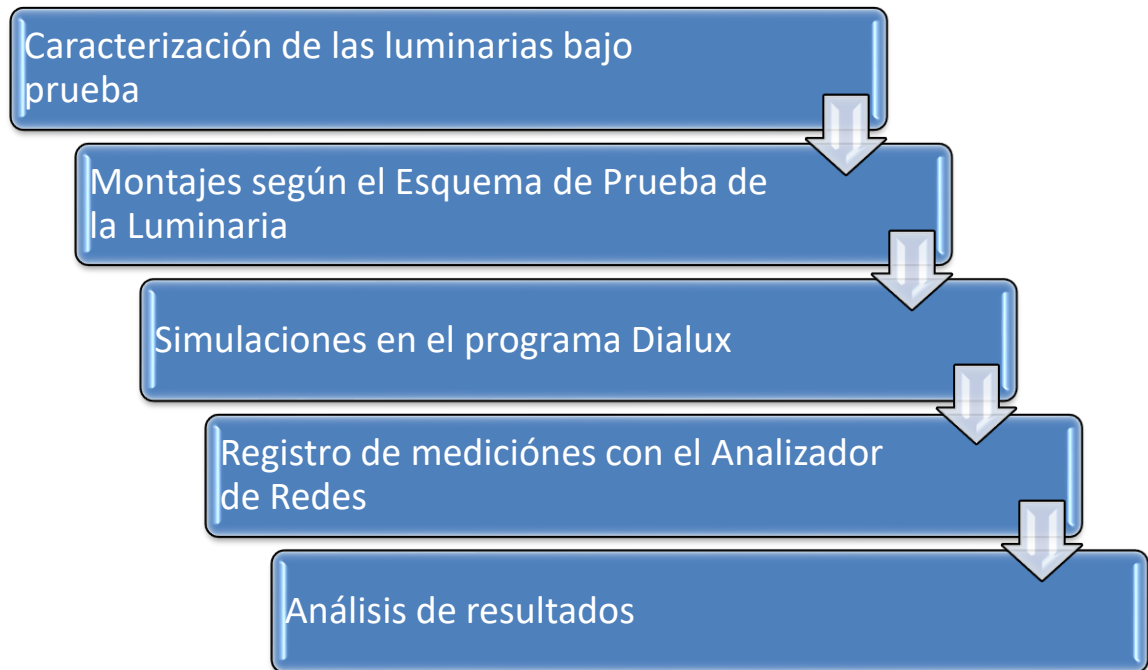
Posteriormente se procede a la simulación en el software Dialux comparando el nivel lumínico de ambas opciones y determinar si el número de luminarias es el adecuado para cada nivel de la estación, luego son llevadas las luminarias a un laboratorio de la Universidad Pascual Bravo para hacerles los estudios pertinentes como lo son la potencia consumida, vida útil de cada luminaria, armónicos de tensión y corriente, el campo magnético emitido, entre otros.

Las luminarias por inducción magnética que fueron motivo de estudio durante el presente proyecto se encuentran bajo prueba, ubicadas en la estación San Antonio del Metro de Medellín. Se realizó una identificación y caracterización de las mismas desde dos puntos de vista, los cuales se representan por los datos característicos facilitados por el fabricante y se realizan pruebas para determinar problemas asociadas a la calidad de la energía (PQ, por sus siglas del inglés PowerQuality) en luminarias MH y por Inducción Magnética.

### 6.1 PRUEBAS REALIZADAS

Para la realización de las pruebas de luminarias MH y por Inducción se procedió acorde a la siguiente metodología (ver figura 24):

Figura 24.. Metodología pruebas realizadas



Fuente: realizado por los integrantes del proyecto

- Caracterización de luminarias bajo prueba. Inicialmente se identificó y caracterizó con datos de placa del fabricante, para cada una de las luminarias (ver figura 25 y 26).
- Luminaria MH. Datos Característicos:

Marca: Inadisa.

País: Hecho en Colombia.

Modelo: B52101E.

Tipo: Balastro Reactor.

Clase: Mercurio 250w, MH 250w (2,1A).

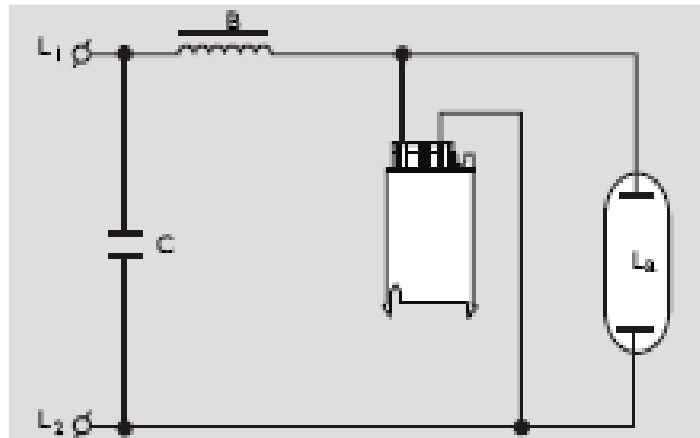
Tensión nominal: 208V / 220V.

Frecuencia: 60hz.

Otra especificación:tw 130 (D69).

Fuente: Philips HPI 250w

Figura 25. Esquema de Conexión Luminaria



Fuente: [http://issuu.com/malaluz/docs/gt\\_ee\\_iluminacion\\_alumbrado\\_publico](http://issuu.com/malaluz/docs/gt_ee_iluminacion_alumbrado_publico)

Figura 26.. Fuente Philips HPI 250w



Fuente: [http://issuu.com/malaluz/docs/gt\\_ee\\_iluminacion\\_alumbrado\\_publico](http://issuu.com/malaluz/docs/gt_ee_iluminacion_alumbrado_publico)

- Características de la fuente Philips HPI 250w. MASTER HPI Plus 250W/745 BU E40 1SL

Referencia: 18114515  
EAN: 8711500181145

## Lámparas de halogenuros metálicos con envoltura exterior de cristal opalizado

### Características

- Bulbo exterior ovoide con recubrimiento fluorescente
- Alta eficacia luminosa, durante toda la vida de la lámpara
- Temperatura de color blanco neutro y blanco frío estable hasta el final de la vida de la lámpara
- Los tipos "S" son directamente intercambiables con lámparas de vapor de mercurio
- Los tipos "P" incorporan una protección de teflón y pueden utilizarse en luminarias abiertas

### Beneficios

- El excelente mantenimiento del flujo y la larga duración garantizan altos niveles de iluminación y mínimos costes de mantenimiento
- La buena reproducción cromática crea un ambiente agradable con alto grado de confort visual
- La excelente estabilidad cromática garantiza la uniformidad del color durante toda la vida de la lámpara incluso con recambios puntuales de lámparas
- El concepto "Plus", mayor flujo luminoso, permite conseguir importantes ahorros energéticos y de inversión

### Solicitud

- Alumbrado interior para naves altas, como por ejemplo talleres industriales, salas de exposición, supermercados, calles comerciales, grandes almacenes de bricolaje, iglesias, antesalas de aeropuertos y salas de espera de estaciones, (ver tabla 7)

Tabla 7. Características

Temperatura de la Lámpara	350 C
Temperatura Base/Casquillo	250 C
Diámetro D	91 mm
Longitud Total C	226 mm
Flujo lum EM 25°C, nominal	18000 Lm
LLMF EM 2.000 h nominal	90 %
LLMF EM 4.000 h nominal	82 %
LLMF EM 6.000 h nominal	77 %
LLMF EM 8.000 h nominal	73 %
LLMF EM 12.000 h nominal	68 %
LLMF EM 16.000 h nominal	63 %
LLMF EM 20.000 h nominal	60 %
Eficacia lum nominal EM 25°C	72 Lm/W
Coordenada Cromática Y	363 -
Coordenada Cromática X	365 -
Temperatura Técnica de Color	4380 K
Temperatura de Color	4500 K
Designación de Color	Blanco Frío
Índice Reproducción Cromática	69 Ra8
Código de Color	745
Contenido de mercurio (Hg)	47 mg
Potencia lámpara EM 25°C, nom	250 W
Potencia lámpara EM 25°C, nom	253 W
Regulable	No
Cor. Lámpara con Bal. Convenc.	2.2 A
Voltaje de la Lámpara	128 V
Pot. de la Lámpara Estimada	250 W
LSF EM 8.000h nom, ciclo 12 h	88 %
LSF EM 6.000 h nom, ciclo 12 h	93 %
LSF EM 4.000 h nom, ciclo 12 h	96 %
LSF EM 2.000h nom, ciclo 12 h	99 %
LSF EM 20.000h nom, ciclo 12 h	50 %
LSF EM 16.000h nom, ciclo 12 h	63 %
LSF EM 12.000h nom, ciclo 12 h	76 %
Vida al 50% de Fallos	20000 hr
Vida al 20% de Fallos	11000 hr
Vida al 10% de Fallos	7500 hr
Vida al 5% de Fallos	5000 hr
Posición de Funcionamiento	h15
Acabado de la Lámpara	Opalizada
Forma de la lámpara	BD90
Base/Casquillo	E40
Descripción del Sistema	Base Arriba
Código de pedido	181145 15
Código de producto	871150018114515

Nombre de Producto	MASTER HPI Plus 250W/745 BU E40 1SL
Nombre de pedido del producto	MASTER HPI Plus 250W/745 BU E40 1SL/12
Piezas por caja	1
Configuración de embalaje	12
Cajas por caja exterior	12
Código de barras del producto	8711500181145
Código de barras de la caja exterior	8711500181152
Código logístico - 12NC	928076709830
ILCOS code	ME-250/45/2A-H-E40-/V
Peso neto por pieza	0.192 kg

- Luminaria por Inducción: Datos Característicos

Fabricante: LVD.

Tipo: LVD - DQ.

Tensión Nominal: 220V.

Frecuencia: 50HZ.

Potencia: 200W.

Datos Balastro:

W	70	125	150	250	400	1000	
V	120	208	220	240	260	277	480

1 polvo 1 2 3 4 5 6      balastro  
P agua 1 2 3 4 5 6      R – CWA

Operario

Año 1 3 4 5      mes      EFMAMJ  
9                      JASOND  
9 6 7 8

Registro: sig ci- 3839- 25

Vencimiento: julio 1998

Tipo: Electronic Ballast for LVD induction lamp 200w y 220 VAC.

Tensión: 220V.

Frecuencia: 50-60 Hz.

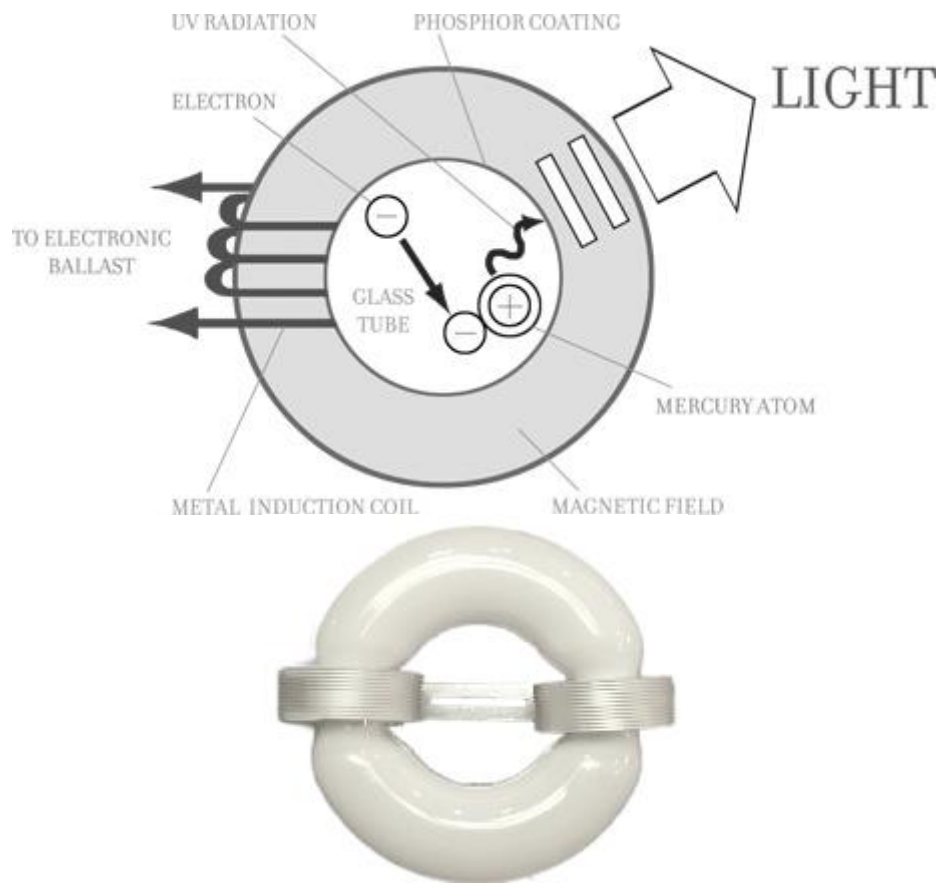
Corriente: 1.06A - 0.98 A

Temperatura ambiente: 50°C

Temperatura de operación: 70° C

Compañía: CE Shanga: Hongyuan lighting& Electric Equipmentcoltda

Figura 27.. Esquema de Operación Luminaria por Inducción



Fuente Luminaria por Inducción, Serie Saturno LVD

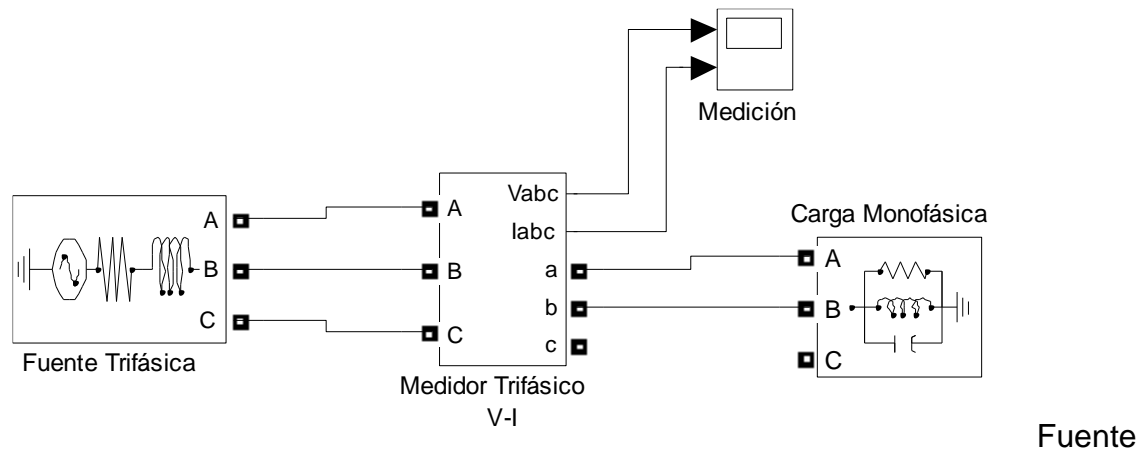
.Características Fuente, Serie Saturno LVD – 200w.

Model	Warranty	Voltage	Lumens	Color Temperature	Dimensions (mm)
LVD-GY-TX-200W	10 YR	120/220/277	17000~19400	3500/4100 5000/6500	D314 x H50

- Montaje según esquema de prueba para luminarias. Para el montaje se utilizó una fuente variable de voltaje, un medidor trifásico analizador de redes CIRCUTOR AR5, medidores convencionales de voltaje y corriente y la carga monofásica que está constituida por cada luminaria (ver figura 27 y 28).



Figura 28. Esquema de Prueba para Luminarias



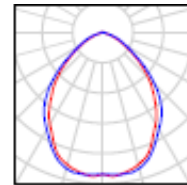
Luminaria por Inducción, Serie Saturno LVD

- Simulaciones en Dialux. A continuación con la ayuda de un potente simulador de iluminación llamado Dialuxy según los archivos IES fotométricos de las simulaciones de las luminarias en estudio hechas por Electrocontrol S.A., se procede a hacer una simulación con el objetivo de comparar en iguales condiciones las fuentes de iluminación correspondientes al presente estudio. Seguidamente se extrapolará lo encontrado a condiciones según planos de la Estación San Antonio del Metro de Medellín (ver figura 29)

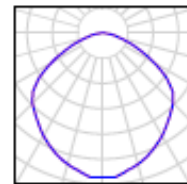
Figura 29. Distribución fotométrica de las luminarias<sup>8</sup>

IO:#jT45gFwUUCwSPO^ LVD-CF01  
 1xLVD200W  
 N° de artículo:  
 Flujo luminoso de las luminarias: 18000 lm  
 Potencia de las luminarias: 202.2 W  
 Clasificación luminarias según CIE: 100  
 Código CIE Flux: 64 93 100 100 73  
 Lámpara: 1 x LVD200W (Factor de corrección 1.000).

Dispone de una imagen de la luminaria en nuestro catálogo de luminarias.



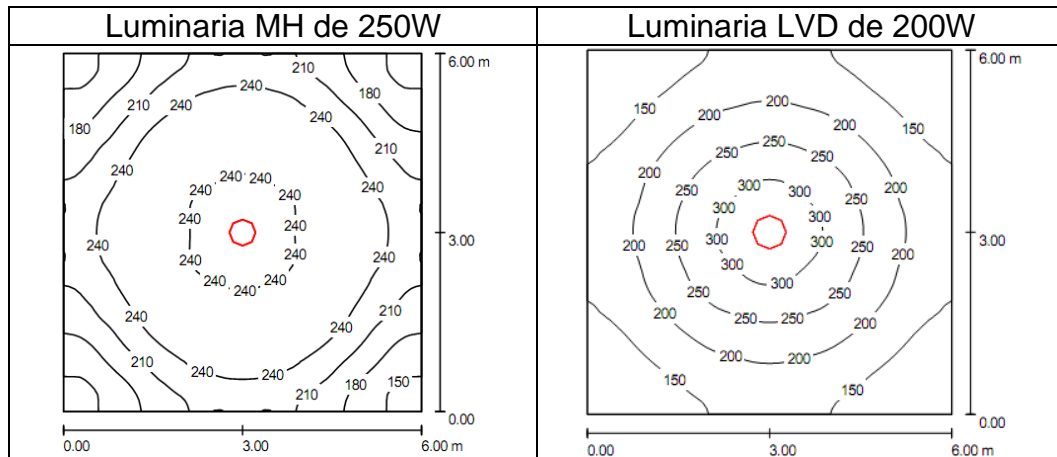
Philips MPK110 1xHPI-P250W-BU P-NB +GPK110 E-WB  
 N° de artículo:  
 Flujo luminoso de las luminarias: 18000 lm  
 Potencia de las luminarias: 274.0 W  
 Clasificación luminarias según CIE: 100  
 Código CIE Flux: 49 84 97 100 77  
 Lámpara: 1 x HPI-P250W-BU/743 (Factor de corrección 1.000).



<sup>8</sup> Las luminarias en cuestión fueron llevadas y analizadas en los laboratorios fotométricos de la empresa Electrocontrol S.A., Quien entrega los archivos fotométricos respectivos con los que se proceden a hacer las simulaciones

- Simulación luminaria Inadisa 250W de Metal Halide vs luminaria LVD 200W por Inducción. En la siguiente simulación se procede a comparar ambas luminarias de acuerdo a los archivos IES entregados por los fabricantes. Para esto, se hace una simulación individual en las mismas condiciones con el objetivo de observar su rendimiento lumínico (ver figura 30).

Figura 30. Simulación: comparativo Luminaria MH 250W vs Luminaria LVD 200W



En esta prueba se observa un mayor nivel lumínico en piso de la luminaria de inducción, corroborando según las fotometrías entregadas que la luminaria LVD consume menos energía y entrega mayores niveles lumínicos.

- Modelado Estación San Antonio (Acceso Suroriental)

Figura 31. Vista superior, Estación San Antonio del Metro de Medellín

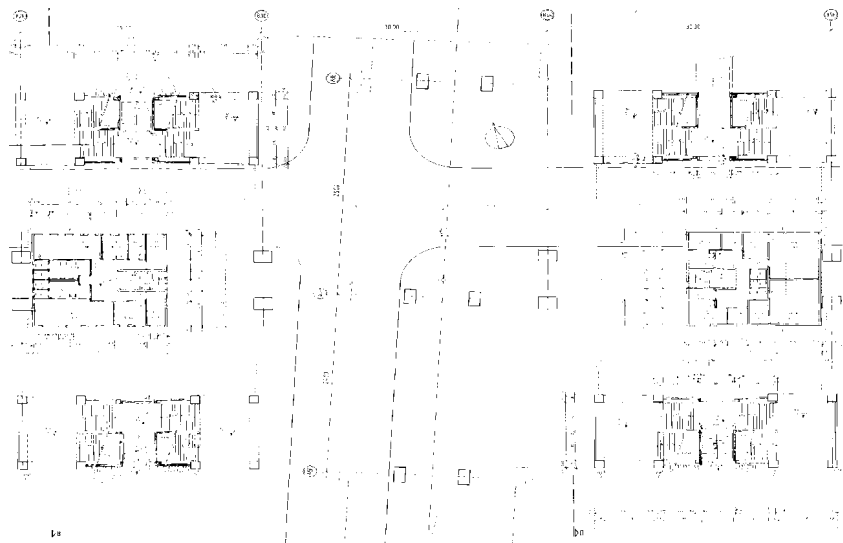


Figura 32. Vista lateral. Estación San Ant3nimo del Metro de Medell3n

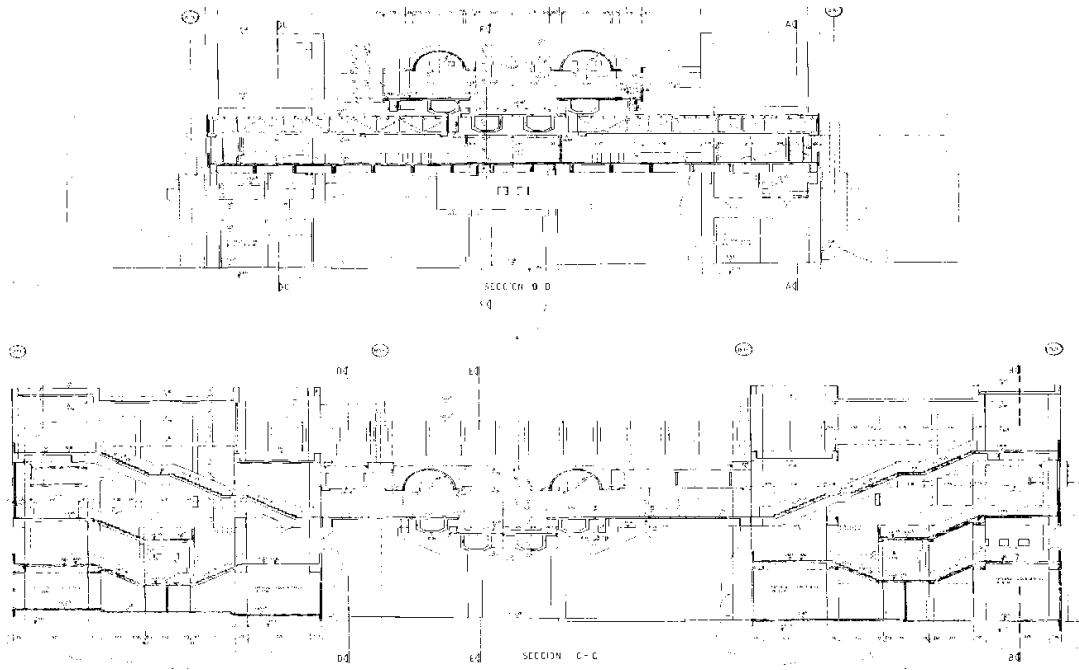
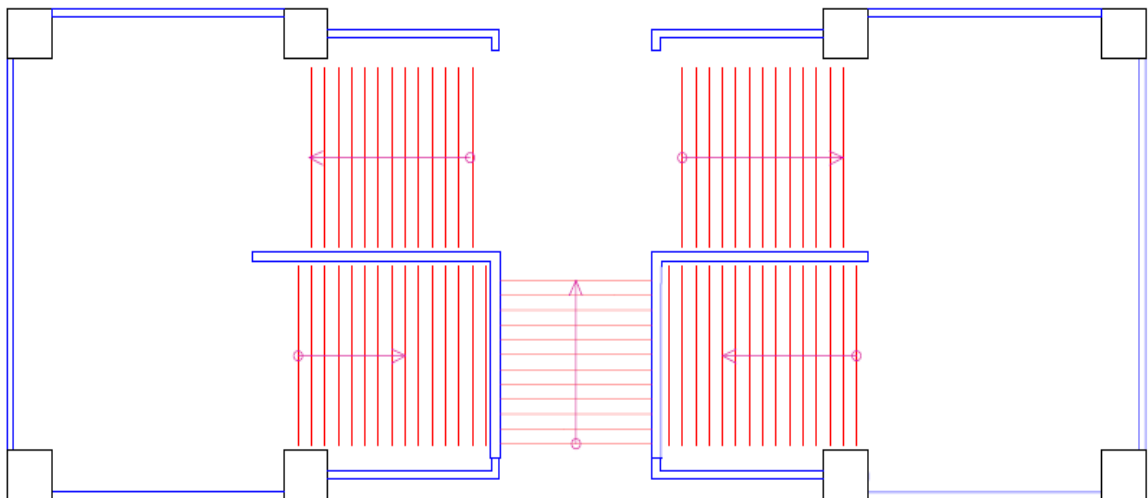


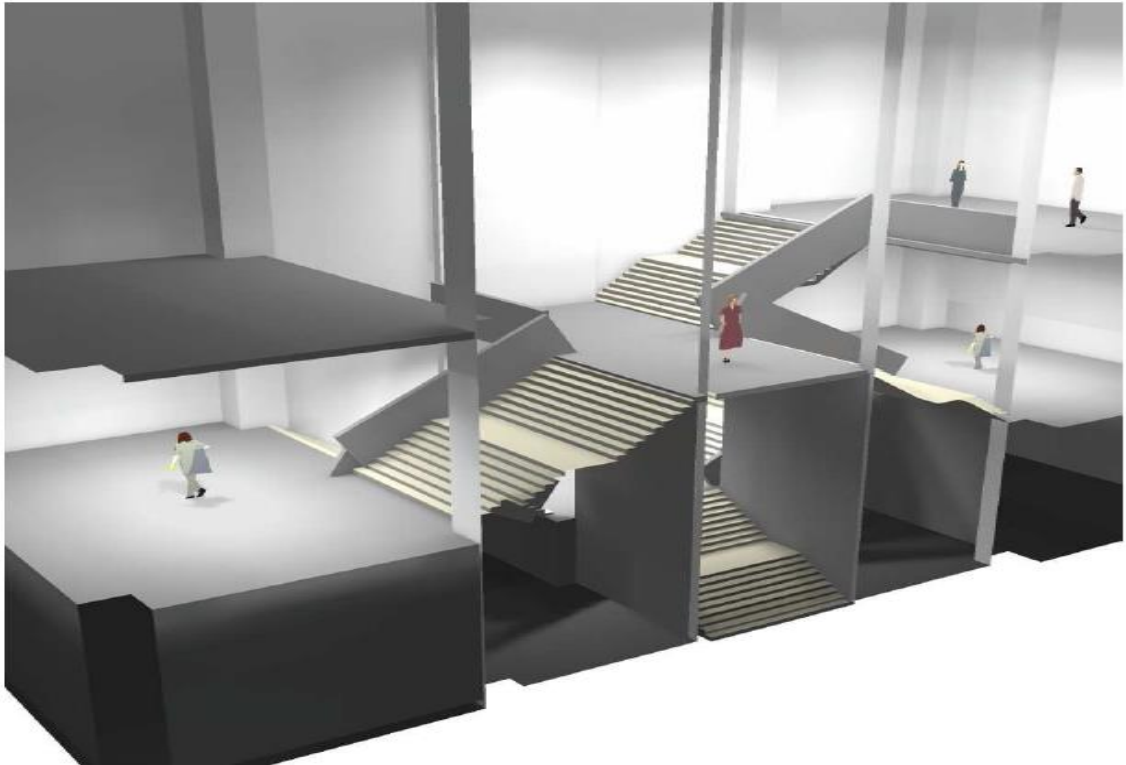
Figura 33.. Vista de Planta. Estaci3n San Antonio del Metro de Medell3n. Entrada Suroriental

### PLANTA ESTACION SAN ANTONIO



- Simulación del sistema de iluminación en Dialux. Estación del Metro de Medellín. Acceso SOR

Figura 34. Modelado en Dialux, acceso SOR estación San Antonio del Metro de Medellín



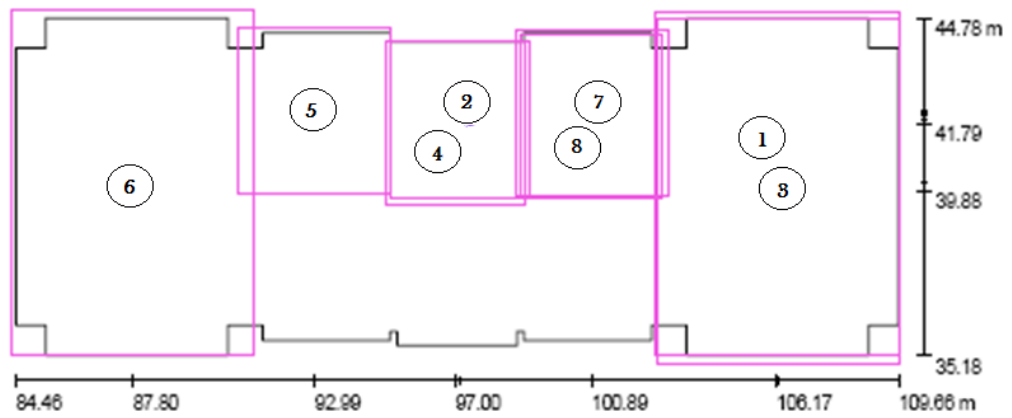
Fuente: Ing. Mario Arrieta

Donde los valores de las reflectancias se escogen de acuerdo a las características de las paredes, suelo y techo de la estación (ver tabla 8):

Tabla 8. Valores de reflectancias de las superficies

SUPERFICIE	REFLECTANCIA [%]
Suelo	20
Paredes	70
Techo	50

Figura 35. Superficies de cálculo



Escala 1 : 181

Figura 36. Simulación del sistema de iluminación → MH

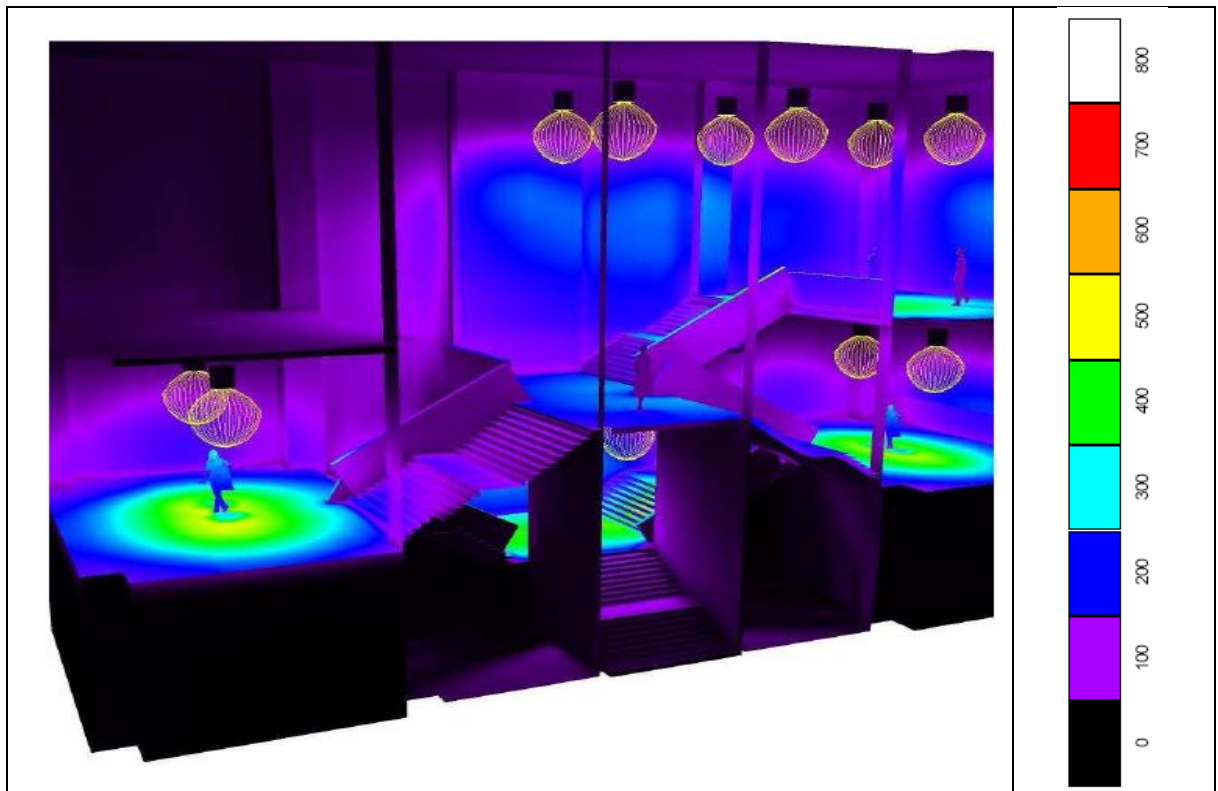


Figura 37.. Lista de superficies de cálculo, luminaria MH

Lista de superficies de cálculo

Nº	Designación	Tipo	Trama	$E_m$ [lx]	$E_{min}$ [lx]	$E_{max}$ [lx]	$E_{min} / E_m$	$E_{min} / E_{max}$
1	Superficie de cálculo 1	perpendicular	128 x 128	302	9.48	475	0.031	0.020
2	Superficie de cálculo 5	perpendicular	128 x 128	454	283	893	0.622	0.408
3	Superficie de cálculo 4_2	perpendicular	128 x 128	274	4.42	647	0.016	0.007
4	Superficie de cálculo 5_2	perpendicular	16 x 16	243	168	304	0.689	0.552
5	Superficie de cálculo 7	perpendicular	128 x 128	286	16	918	0.056	0.018
6	Superficie de cálculo 4	perpendicular	128 x 128	289	3.77	678	0.013	0.008
7	Superficie de cálculo 7_2	perpendicular	64 x 64	202	13	599	0.085	0.022
8	Superficie de cálculo 8	perpendicular	64 x 64	281	29	410	0.103	0.071

Resumen de los resultados

Tipo	Cantidad	Media [lx]	Min [lx]	Max [lx]	$E_{min} / E_m$	$E_{min} / E_{max}$
perpendicular	8	288	3.77	918	0.01	0.00

Figura 38. Simulación del sistema de iluminación → LVD

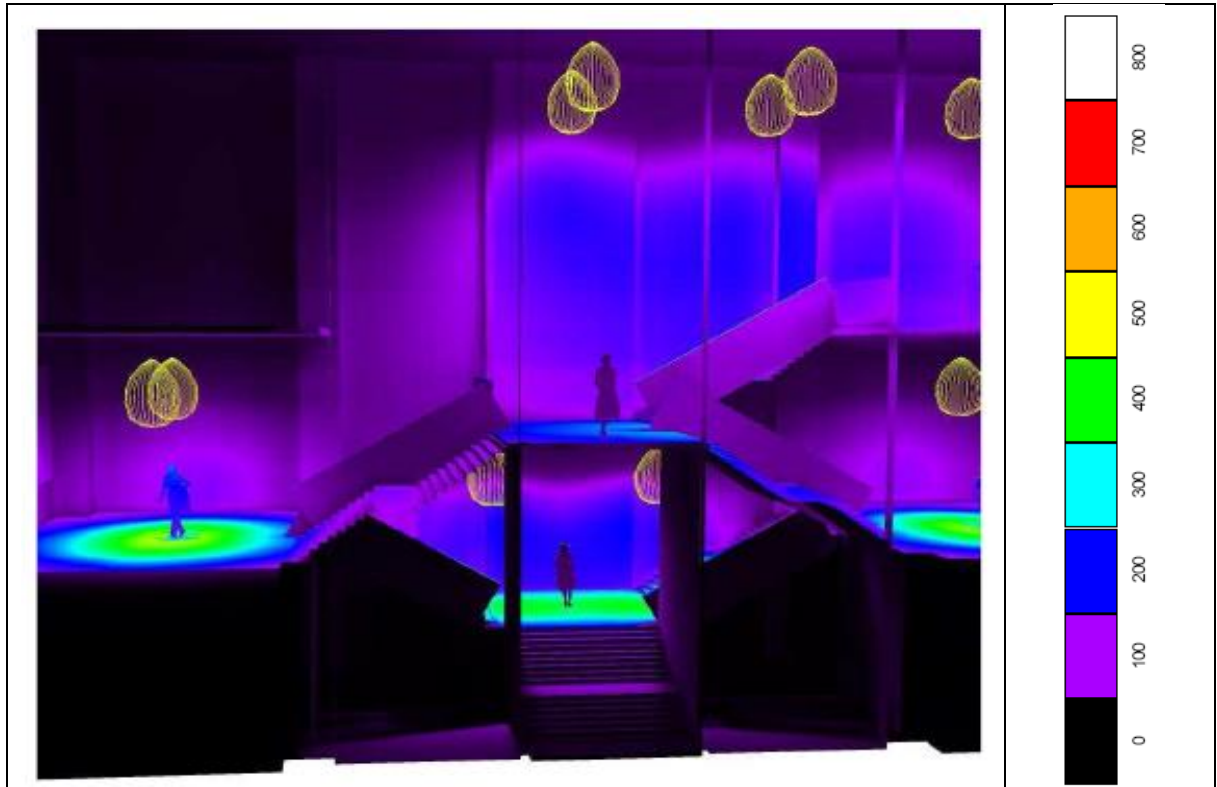


Figura 39 Lista de superficies de cálculo, luminarias LDV

Lista de superficies de cálculo

Nº	Designación	Tipo	Trama	$E_m$ [lx]	$E_{min}$ [lx]	$E_{max}$ [lx]	$E_{min} / E_m$	$E_{min} / E_{max}$
1	Superficie de cálculo 1	perpendicular	128 x 128	274	8.12	449	0.030	0.018
2	Superficie de cálculo 5	perpendicular	128 x 128	403	92	573	0.227	0.160
3	Superficie de cálculo 4_2	perpendicular	128 x 128	244	3.71	591	0.015	0.008
4	Superficie de cálculo 5_2	perpendicular	16 x 16	234	154	301	0.658	0.512
5	Superficie de cálculo 7	perpendicular	128 x 128	248	18	756	0.073	0.024
6	Superficie de cálculo 4	perpendicular	128 x 128	254	2.88	613	0.011	0.005
7	Superficie de cálculo 7_2	perpendicular	64 x 64	237	9.73	532	0.041	0.018
8	Superficie de cálculo 8	perpendicular	64 x 64	267	24	366	0.089	0.062

Resumen de los resultados

Tipo	Cantidad	Media [lx]	Min [lx]	Max [lx]	$E_{min} / E_m$	$E_{min} / E_{max}$
perpendicular	8	263	2.88	756	0.01	0.00

- Calidad de la Energía: Registro de mediciones con el Analizador de Redes. Según el esquema de prueba presentado, se realizó la captura de datos con el analizador de redes CIRCUTOR AR5, obteniéndose los siguientes datos para cada una de las luminarias:

Figura 40 Tasa de Distorsión Armónica Total de Voltaje y Corriente

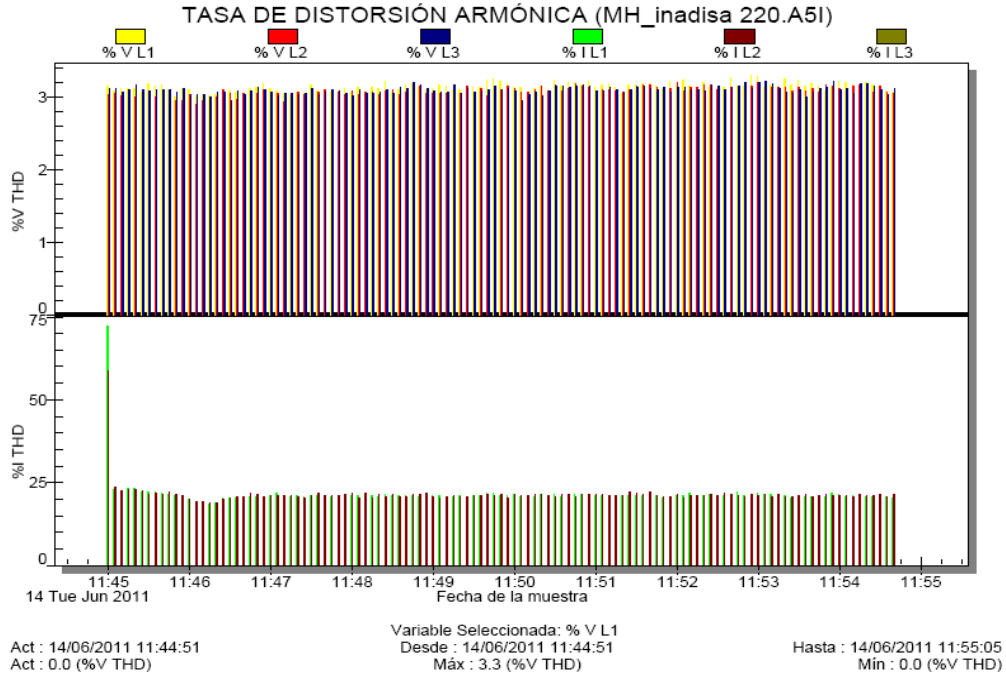


Figura 41. Tasa de Distorsión Armónica Total, luminaria de inducción

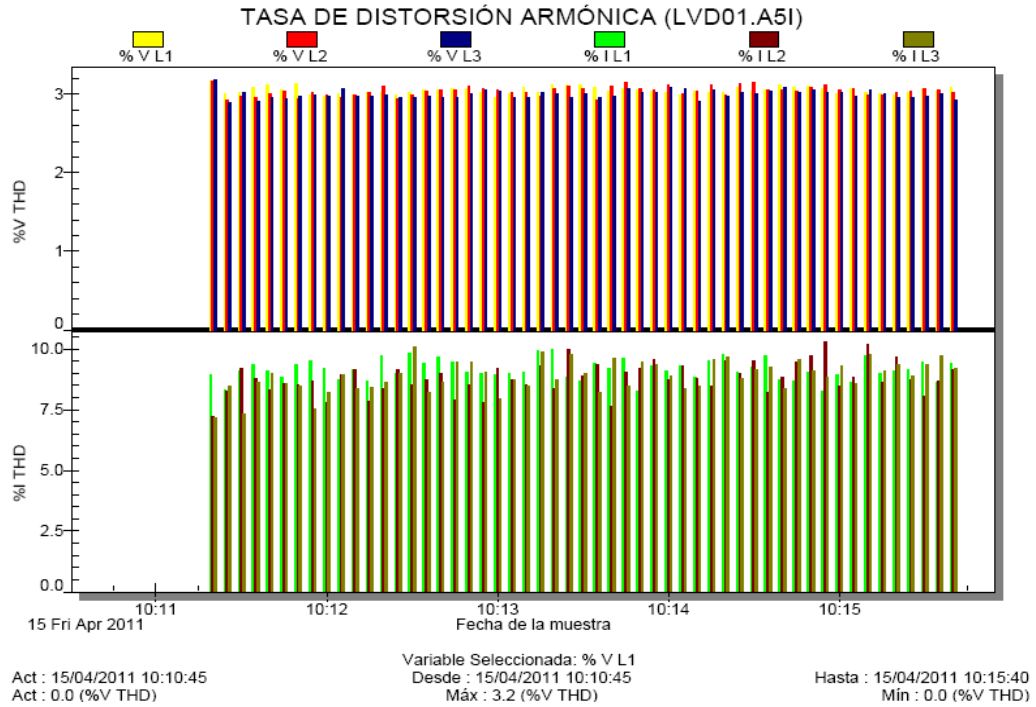


Figura 42. Armónicos de voltaje y de corriente

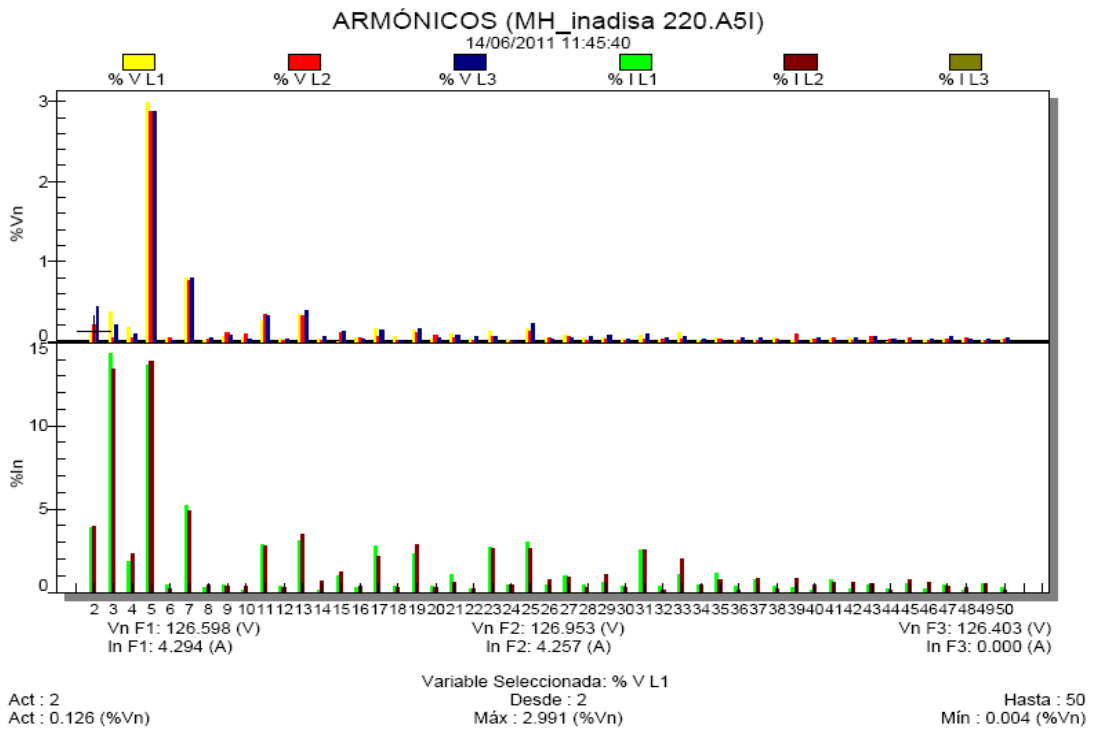




Figura 43. Armónicos de voltaje y corriente, luminaria de inducción

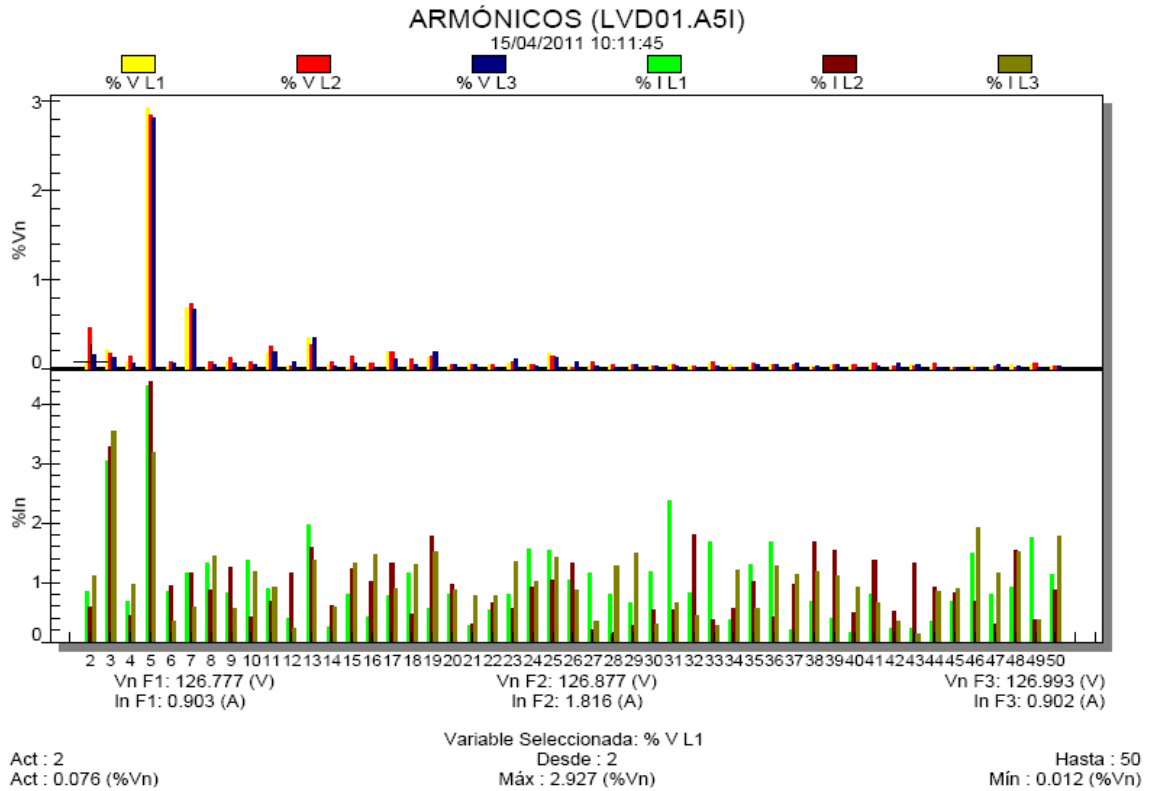


Figura 449. Forma de onda de voltaje y corriente, luminaria MH

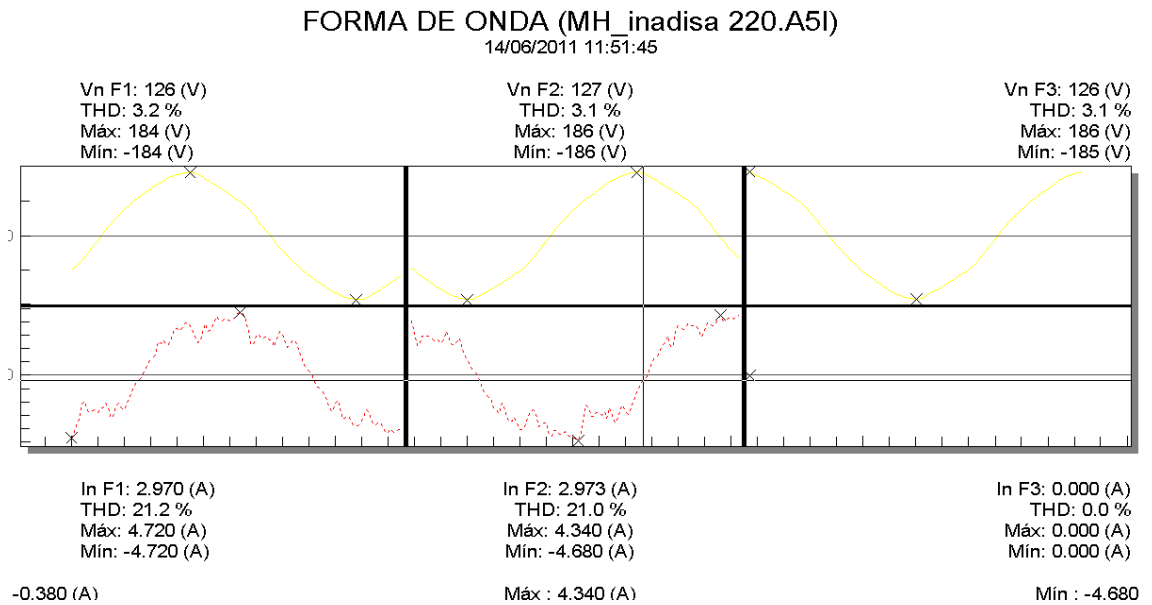




Figura 47. Valores de corriente y voltaje (RMS), luminaria de inducción

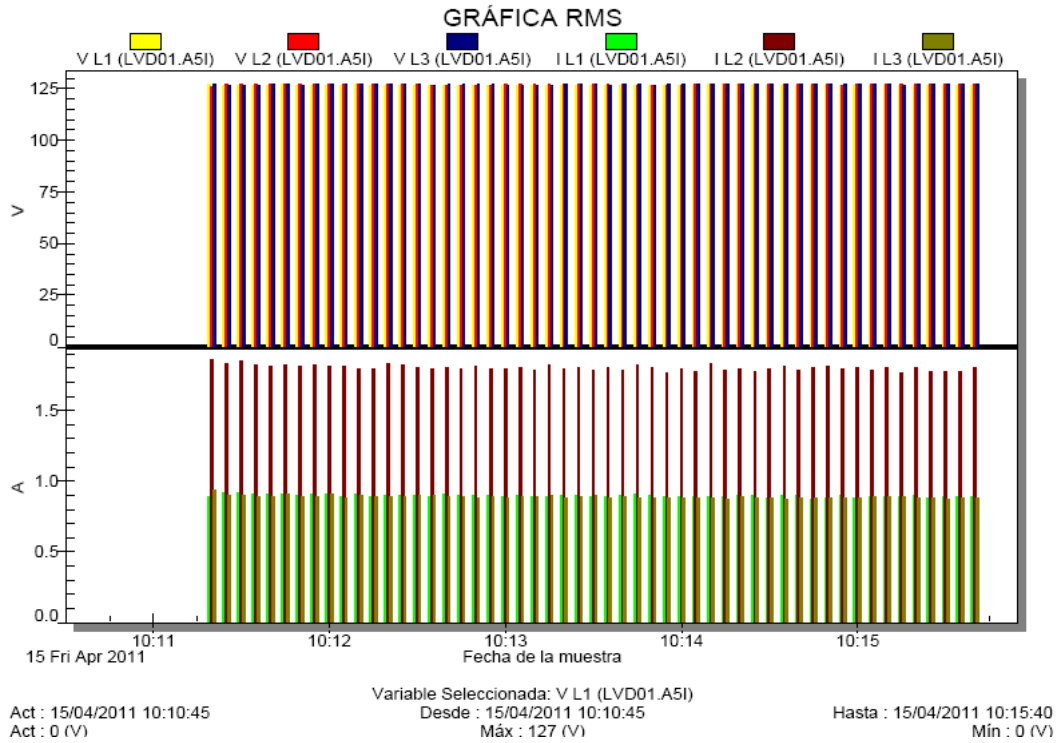


Figura 48. Potencias Activa y Reactiva / Corriente: Fase, luminaria MH

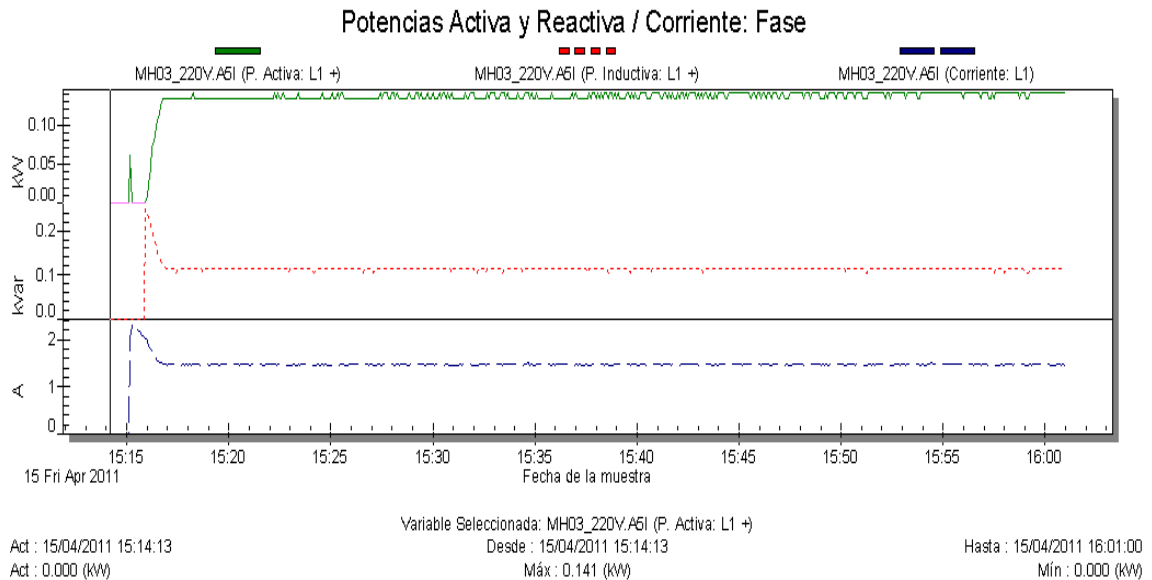


Figura 49. Potencias Activa y Reactiva / Corriente: Fase, Luminaria de inducción

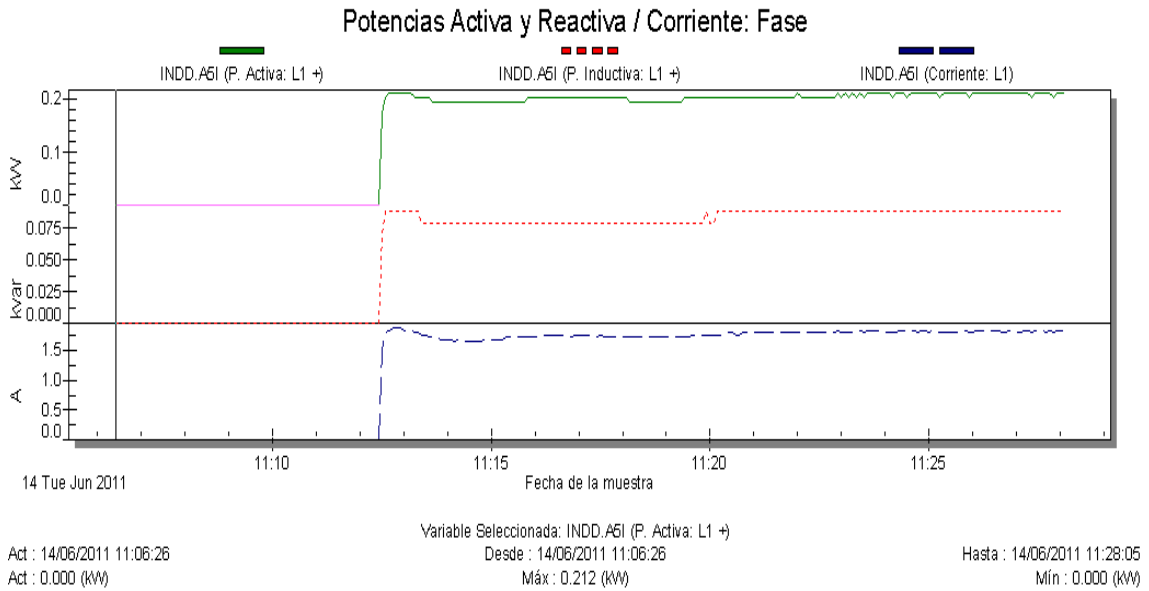


Figura 50. Factor de potencia, luminaria MH

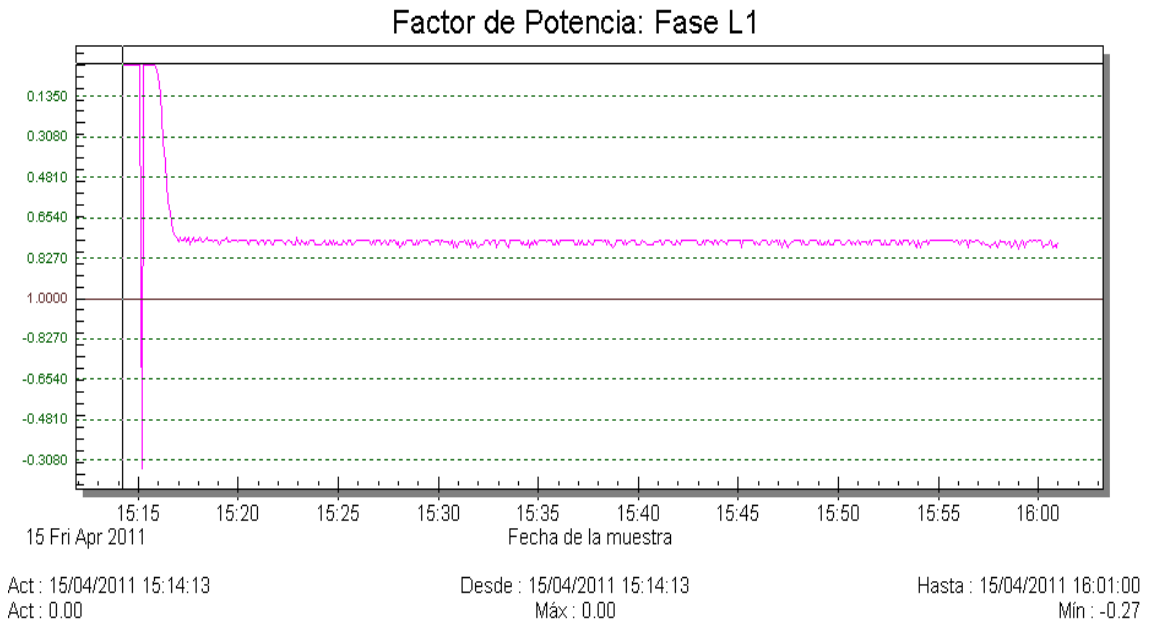
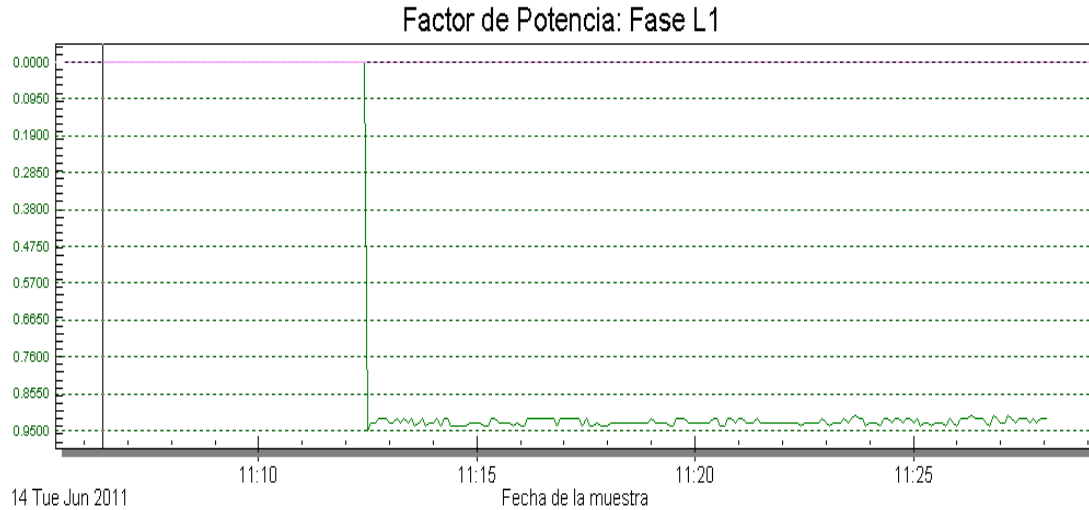


Figura 51. Factor de potencia. Luminaria de inducción



## 6.2 CAMPO MAGNÉTICO<sup>9</sup>

En la experimentación se tomaron las pruebas de campo magnético a las luminarias de Metal Halide e Inducción electromagnética en el laboratorio de la Universidad Pascual Bravo. Se procedió de la siguiente manera:

Se hicieron dos mediciones de campo, una a nivel del haz de luz de la lámpara (medición 1) y otra tomada en la periferia (medición). Estas mediciones se realizaron con el medidor de campo HI-3604 y se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 9. Mediciones de campo magnético

Medición de campo magnético	Luminaria de inducción magnética	Luminaria de Metal Halide
Medición 1 (a nivel de haz de luz)	5 A/M, min: 13.9 mA/m	69 A/m, min 14.9 mA/m
Medición 2 ( en la periferia de la lámpara)	70 A/M, min: 24.8 mA/m	Medición 2: 5 A/m

Como el referente del reglamento técnico (Tabla 5. Valores límites de exposición a campos electromagnéticos) tiene unidades de  $\mu\text{T}$  entonces se procede a hacer la respectiva conversión. Para ello se recurrirá a la *Ecuación* y a la siguiente tabla de conversiones:

<sup>9</sup> Tomado del Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas RETIE, Cap 14.

Tabla 10. Tabla de conversiones: Tesla – Gauss

TESLA (T)	MICROTESLA ( $\mu$ T)	GAUSS (G)	MILIGAUSS (MG)
1	1.000.000	10.000	10.000.000
0,000001	1	1.000	10
0,001	0,001	1	1000
0,0000001	0,1	0,001	1

$$1 \text{ MG} = 80 \text{ MA/M}$$

$$1 \text{ MT} = 0,001 \text{ T}$$

$$1 \text{ MT} = 800 \text{ A/M}$$

Medición 1 inducción. CONVERTIR  $\rightarrow$  5 A/M  $\mu$ T.

$$800 \text{ A/M} \rightarrow 1 \text{ MT}$$

$$5 \text{ A/M} \rightarrow X$$

$$X = \frac{5 \text{ A/M}}{800 \text{ A/M}} * 1 \text{ MT} = 6,25 * 10^{-3} \rightarrow 0,00625 \text{ MT}$$

$$\frac{5 \text{ A/M}}{800 \text{ A/M}}$$

$$0,00625 \text{ MT} * 0,001 \text{ T} = 6,25 * 10^{-6} \rightarrow 0,000006,25 \text{ T}$$

$$1 \text{ MT}$$

$$0,00000625 \text{ T} * 1.000.000 \mu\text{T} = 6,25 \mu\text{T}$$

$$\frac{6,25 \mu\text{T}}{1 \text{ T}}$$

Medición 1 inducción: . CONVERTIR  $\rightarrow$  13,9 mA/m  $\mu$ T

$$80 \text{ MA/M} \rightarrow 1 \text{ MG}$$

$$13,9 \text{ MA/M} \rightarrow X$$

$$X = \frac{13,9 \text{ MA/M}}{80 \text{ MA/M}} * 1 \text{ MG} = 0,17375 \text{ MG}$$

$$\frac{13,9 \text{ MA/M}}{80 \text{ MA/M}}$$

$$0,17375 \text{ MG} * 0,0000001 \text{ T} = 1,7375 * 10^{-8} \text{ T}$$

$$\frac{0,17375 \text{ MG}}{1 \text{ MG}} = 0,000000017375 \text{ T}$$

$$0,000000017375 \text{ T} * 1000.000 \mu\text{T} = 0,017375 \mu\text{T}$$

$$\frac{0,017375 \mu\text{T}}{1 \text{ T}}$$

Medición 2 inducción. CONVERTIR 70 A/M → μT

$$800 \text{ A/M} \rightarrow 1 \text{ MT} \quad X = 70 \text{ A/M} * 1 \text{ MT} = 0,0875 \text{ MT}$$

$$70 \text{ A/M} \rightarrow X \quad \frac{\quad}{800 \text{ A/M}}$$

$$0,0875 \text{ MT} * 0,001 \text{ T} = 8,75 * 10^{-5} \rightarrow 0,0000875 \text{ T}$$

$$\frac{\quad}{1 \text{ MT}}$$

$$0,0000875 \text{ T} * 1.000.000 \text{ μT} = 87,5 \text{ μT}$$

$$\frac{\quad}{1 \text{ T}}$$

Medición 2 inducción. CONVERTIR 24.8 MA/M → μT

$$80 \text{ MA/M} \rightarrow 1 \text{ MG}$$

$$24,8 \text{ MA/M} \rightarrow X$$

$$X = 24,8 \text{ MA/M} * 1 \text{ MG} = 0,31 \text{ MG}$$

$$\frac{\quad}{80 \text{ MA/M}}$$

$$0,31 \text{ MG} * 0,0000001 \text{ T} = 3,1 * 10^{-8} \text{ T}$$

$$\frac{\quad}{1 \text{ MG}} = 0,000000031 \text{ T}$$

$$0,000000031 \text{ T} * 1.000.000 \text{ μT} = 0,031 \text{ μT}$$

$$1 \text{ T}$$

Medición 1 MH. CONVERTIR 69 A/M → μT

$$800 \text{ A/M} \rightarrow 1 \text{ MT}$$

$$69 \text{ A/M} \rightarrow X$$

$$X = 69 \text{ A/M} * 1 \text{ MT} = 0,08625 \text{ MT}$$

$$\frac{\quad}{800 \text{ A/M}}$$

$$0,08625 \text{ MT} * 0,001 \text{ T} = 8,625 * 10^{-5}$$

$$\frac{\quad}{1 \text{ MT}} = 0,00008625 \text{ T}$$

$$0,00008625 \text{ T} \cdot \frac{1.000.000 \mu\text{T}}{1 \text{ T}} = 86.25 \mu\text{T}$$

1 T

Medición 1 MH. CONVERTIR 14,9 MA/M  $\rightarrow$   $\mu\text{T}$

80 MA/M  $\rightarrow$  1 MG

14,9 MA/M  $\rightarrow$  X

$$X = \frac{14,9 \text{ MA/M} \times 1 \text{ MG}}{80 \text{ MA/M}} = 0,18625 \text{ MG}$$

80 MA/M

$$0,18625 \text{ MG} \cdot \frac{0,0000001 \text{ T}}{1 \text{ MG}} = 1,8625 \cdot 10^{-8} \text{ T}$$

$$= 0,000000018625 \mu\text{T}$$

$$0,000000018625 \text{ T} \cdot \frac{1.000.000 \mu\text{T}}{1 \text{ T}} = 0,018625 \mu\text{T}$$

1 T

Medición 1 MH. CONVERTIR 5 A/M  $\rightarrow$   $\mu\text{T}$

800 A/M  $\rightarrow$  1 MT

5 A/M  $\rightarrow$  X

$$X = \frac{5 \text{ A/M} \times 1 \text{ MT}}{800 \text{ A/M}} = 6,25 \cdot 10^{-3}$$

$$= 0,00625 \text{ MT}$$

$$0,00625 \text{ MT} \cdot \frac{0,001 \text{ T}}{1 \text{ MT}} = 6,25 \cdot 10^{-6}$$

$$= 0,00000625 \text{ T}$$

$$0,00000625 \text{ T} \cdot \frac{1.000.000 \mu\text{T}}{1 \text{ T}} = 6,25 \mu\text{T}$$

1 T



Tabla 11.. Mediciones de campo magnético ( $\mu\text{T}$ )

Medición de campo magnético	Luminaria de inducción magnética	Luminaria de Metal Halide
Medición 1 (a nivel de haz de luz)	6,25 $\mu\text{T}$ , min: 0,017375 $\mu\text{T}$	86.25 $\mu\text{T}$ , min 0,018625 $\mu\text{T}$
Medición 2 ( en la periferia de la lámpara)	87,5 $\mu\text{T}$ , min: 0,031 $\mu\text{T}$	6.25 $\mu\text{T}$

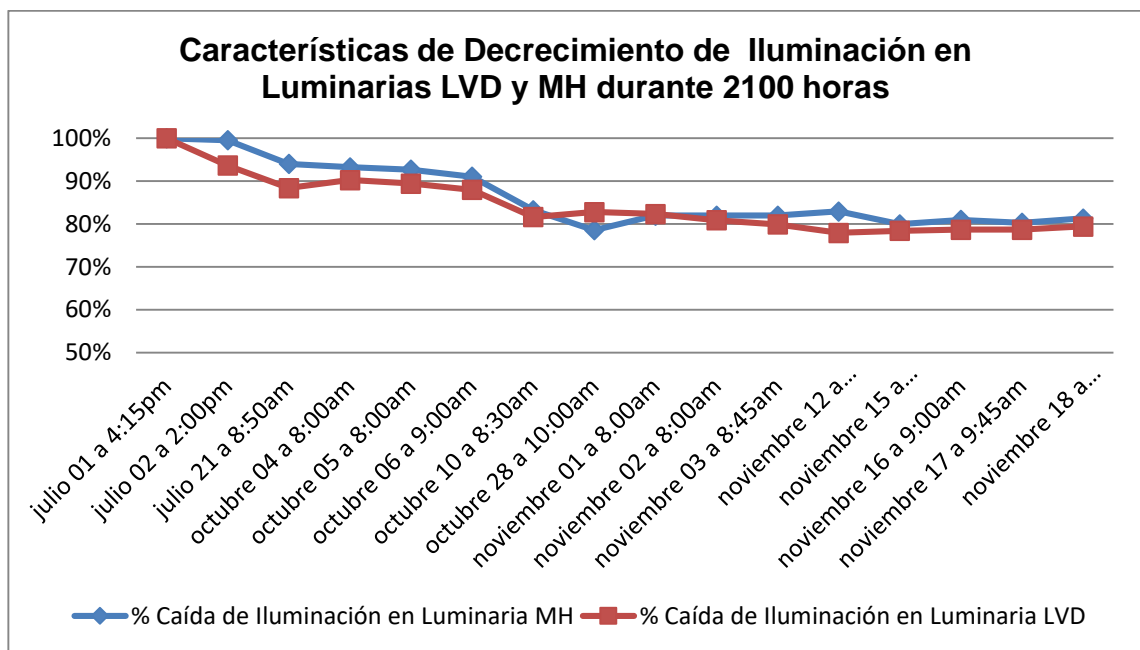
Figura 52. Decrecimiento de Iluminación en luminarias MH e Inducción Magnética

Objetos comparativos	LVD lámparas	Lámpara de metal halide	Lámpara de sodio de alta presión	Lámpara de vapor de mercurio de alta presión
Garantías	5 años	Nada	Nada	Nada
Vida	Compacta: 60,000 hrs Partida: 100,000 hrs	6,000~20,000hrs Por el cambio del estado físico cuando el electrodo trabaja en temperatura alta, va coincidiendo peor a la balastro paso a paso, acortando la vida.	24,000 hrs la causa igual a la anterior	3,000~6,000 hrs La causa igual a la anterior
Rendimiento de ahorro de energía	Excelente	Poco mal, consume mucho	Poco mal, consume mucho	Muy mal, consume mucho
Eficiencia luminosa de pupila	Llega a 150 Plm/W	110~140 Plm/W	90 Plm/W	43 Plm/W
Decaimiento del flujo luminoso(%)	Muy poco, 5%(2000hrs)	Mucho, 40%(2000hrs)	Mucho, 30%(2000hrs)	Muchísimo, 45%(2000hrs)
Objetos comparativos	LVD lámparas	Lámpara de metal halide	Lámpara de sodio de alta presión	Lámpara de vapor de mercurio de alta presión
Temperatura de lámpara	Muy baja, <80°C, ahorra el consume de energía de aire acondicionado	Alta, >300 °C, aumenta el consume de energía de aire acondicionado	Muy alta, >350 °C, aumenta el consume de energía de aire acondicionado	Alta, >300 °C, aumenta el consume de energía de aire acondicionado
Rendimiento de color	>80, excelente	65~90, bien	60, más o menos	45, mal
Encendido caliente	Instantáneo	No puede	No puede	No puede
Estroboscopia	Nada	Sí	Sí	Sí
Deslumbramiento	Nada	Sí	Sí	Sí
Saneamiento ambiental	Sin reciclaje de lámpara y contaminación de mercurio	Problema del reciclaje de lámpara	Problema del reciclaje de lámpara	Problema del reciclaje de lámpara y la contaminación de mercurio

Tabla 12. Decrecimiento de Iluminación en luminarias MH e Inducción Magnética

Objetivos comparativos	LVD lámparas	Lámpara de Metal Halide	Lámpara de sodio de alta presión	Lámpara de vapor de mercurio de alta presión
Garantías	5 años	Nada	Nada	Nada
Vida	Compacta: 60000 hrs Partida: 100000 hrs	6000~20000 hrs	24000 hrs	3000~6000 hrs
Rendimiento de ahorro de energía				

Figura 53. Características de decrecimiento de iluminación en luminarias LVD y MH durante 21000 horas



### 6.3 ANÁLISIS DEL RESULTADOS DEL PROYECTO

Simulaciones. Las simulaciones mostraron una gran compatibilidad del sistema de inducción con el sistema de iluminación actual usado en el Metro de Medellín, esto es muy importante porque no se necesitarían realizar intervenciones importantes en las instalaciones eléctricas y en las distribuciones si se pensara en un posible recambio, siendo una opción adecuada desde el punto de vista técnico. La distribución lumínica es mejor, los niveles lumínicos más adecuados y su efecto se hace más notorio con la temperatura del color que es más adecuada para el espectro de visión humana que la de Metal Halide, por lo que no se requerirían demasiados lúmenes para garantizar una visión segura, lo que da pie para pensar que con el recambio a la tecnología de inducción se necesitaría menor número de luminarias. Cabe anotar que ambas opciones están dentro de lo mínimo exigido en la norma.

Pruebas de Calidad de la Energía. De acuerdo a los resultados experimentales obtenidos para cada una de las luminarias y teniendo en cuenta los parámetros establecidos por la NTC 5000, se encontraron comportamientos permisibles por esta norma para cada uno de los experimentos. Aunque es importante resaltar que el experimento se realizó para una y sólo una luminaria de las tipificadas. No obstante, se debe tener en cuenta que en la globalidad del sistema de iluminación de un centro de carga específico como lo es la Estación San Antonio del Metro de Medellín, la cual cuenta con un gran número de luminarias, es posible que los efectos sobrepasen los límites estipulados por la NTC 5000 a mayor escala.

En promedio, para la luminaria por Inducción se presentó un índice de THD de voltaje y corriente del 3% y 9%, respectivamente. Se debe resaltar que aunque un 9% en THD de corriente es un índice alto, este no es perjudicial para el sistema dado que la magnitud de la corriente no es significativamente grande. Mientras que, para la luminaria MH se obtuvieron THD de voltaje similar, pero el THD de corriente se disparó demasiado alcanzando valores promedio del 25%); afortunadamente para el sistema con una sola luminaria que absorbe una corriente de 2A, no es significativo; pero para escala si puede ser representativo.

Según la medición de los primeros cincuenta armónicos en las luminarias, estas arrojaron resultados en los que se evidenció alta influencia de los armónicos 3°, 5°, 7°, 13° y 21°; armónicos altamente perjudiciales para la operación de cualquier Sistema Eléctrico de Potencia a gran escala debido a la mala calidad en el servicio que generan

En general, los problemas más significativos durante el análisis se evidencian en la caótica forma de onda de corriente del sistema bajo prueba para ambas luminarias, debido a la alta no linealidad de sus componentes. Para la luminaria MH es el caso más crítico; ya que la mayoría del sistema de iluminación de las

zonas de circulación de personas sobre las estaciones del Sistema Masivo de Transporte de Medellín está conformado por este tipo de luminarias, lo cual representa un caso que puede evidenciarse a gran escala y producir consecuencias al sistema eléctrico. De acuerdo a los valores RMS de voltaje y corriente, se presentan comportamientos esperados en las señales de voltaje para cada luminaria, dado a que existe un nivel contante en ellos. Sin embargo, para la corriente en el experimento con luminaria MH se notó un decrecimiento en los primeros segundos, este decrecimiento es propio de las luminarias MH; posteriormente, se estabiliza la señal de corriente de manera constante.

Pruebas de Campo Magnético. Las pruebas realizadas a las luminarias muestran que los niveles medidos son menores al valor límite que recomienda la norma (ver *Tabla* ). Los campos generados por ambas luminarias inclusive, con una distancia mínima como se realizaron las pruebas arrojaron valores inferiores a lo recomendado. Las estaciones del Metro de Medellín son lugares de alto flujo de personas, que ingresan y típicamente se demoran el tiempo que tarda en llegar un tren, por lo que la exposición a campos por un tiempo prolongado se hace remota, sólo algún personal de las estaciones está expuesto a estos campos hasta 8 horas continuas, de lo que habla la norma, pero teniendo en cuenta que las luminarias se encuentran a grandes alturas, no se considera riesgoso para la salud de las personas, esto en lo referente a la seguridad de las personas a lo cual está enfocado el reglamento RETIE.

Si se hiciera un enfoque a equipos que pudieran ser susceptibles a interferencias por campos magnéticos, tampoco sería problemático, por no contar con este tipo de dispositivos en las estaciones.

Decrecimiento lumínico. Una de las grandes desventajas de la tecnología MH es el de crecimiento paulatino y acelerado de la intensidad lumínica, envejeciéndose y acercándose al final de su vida útil alrededor del 40~50% de su intensidad inicial. Un comparativo ofrecido por el fabricante de las luminarias de inducción, muestra que el decrecimiento lumínico es mucho menor que el de las luminarias MH entre otras. Se procedió entonces a hacer una prueba de laboratorio, donde se observó que en el tiempo que duró la prueba, la caída de la iluminación fue mayor en la luminaria LVD la mayoría del tiempo. Como la duración de las luminarias MH está alrededor de 20000 horas, se considera que la prueba no fue concluyente ya que no se cuenta con el tiempo suficiente para apreciar los detrimentos lumínicos de ambas opciones, además las vidas útiles de ambas opciones son muy diferentes, las luminarias de inducción tienen una vida útil de aproximadamente cuatro veces lo que una de metal halide. Otra posible causa que hace dudar de los resultados de la prueba, es el tipo de instrumento utilizado para la prueba y la escogencia de la fuente de luz, ya que estos usan un factor de corrección según el tipo de iluminación en estudio.

## 7. CONCLUSIONES

De acuerdo a la literatura, a los estudios, pruebas de laboratorio y simulaciones para el caso particular del Metro de Medellín, se concluye que la opción de luminarias de inducción es viable técnicamente y representa una buena opción para un posible recambio de tecnología. A continuación se hace un paralelo de las principales características que ratifican a las luminarias de inducción como una mejor opción:

Tabla 13. Conclusiones: Comparativo técnico entre las luminarias de inducción y las luminarias metal halide enfocado al Metro de Medellín.

	Viabilidad técnica de la luminaria de inducción
Eficiencia	Menor derroche de energía transformada en calor, por ende mayor eficiencia
Factor CRI <sup>10</sup>	>80. Índice de reproducción del color mejorado, que para lugares de alto flujo de personas es recomendable porque permite distinguir fielmente los colores.
Encendido y reencendido instantáneo	No requiere de un tiempo de enfriamiento para el encendido y reencendido <sup>11</sup> de la luminaria. Esto es sumamente importante para la seguridad de las personas por el alto flujo de personas, riesgos latentes para la integridad física (riesgos por caídas en escaleras, caídas a los rieles del Metro y delincuencia común entre otras). Un reencendido instantáneo podría evitar situaciones de pánico que pueda generar la oscuridad
Mejor luz	Las lámparas de inducción producen una luz blanca llena que no cansa la vista del ser humano ni le produce estrés
Ahorro energético significativo	No solo la lámpara de inducción posee mejores características, sino que además, puede generar un ahorro energético de hasta un 60% en consumo de energía eléctrica. Muy conveniente para el Metro de Medellín por el alto número de luminarias con las que cuenta con un tiempo de uso prolongado diario.
Mantenimiento	Mucho menor que el requerido con luminarias MH
Medio ambiente	Amigable con el medio ambiente por estar elaborada con elementos reciclables, además, al consumir poca energía contribuye con el no calentamiento global, colaborando a la

<sup>10</sup> CRI es la medición de color natural. El máximo valor es 100, que equivale a la luz solar

<sup>11</sup> Las luminarias MH requieren de un tiempo de enfriamiento para volverse a encender de alrededor de 10~15 minutos.

	disminución de la producción de bióxido de carbono.
Seguridad	La lámpara de inducción es anti explosiva ya que no tiene filamentos
Compatibilidad con las instalaciones actuales	Los resultados de las simulaciones demuestran una alta compatibilidad de las instalaciones eléctricas en el caso de un recambio, por lo que no se tendrían que hacer intervenciones en ellas significativas. Además, por los resultados fotométricos obtenidos se puede pensar en la colocación de menor número de luminarias garantizando un nivel seguro de iluminación.
Calidad de la energía	De acuerdo a los resultados experimentales para cada una de las luminarias, se encontraron comportamientos permisibles por la norma NTC 5000 para cada uno de los experimentos, siendo una fuente más limpia en cuestión de armónicos la luminaria por inducción.
Campos magnéticos	Niveles permisibles por el reglamento RETIE. Ambas opciones tuvieron comportamientos similares, con niveles de exposición de campo despreciables y no dañinos para la seguridad de las personas ni de los equipos existentes.
Decrecimiento lumínico	Hay una gran brecha en cuanto a rendimiento lumínico entre la luminaria de inducción y de Metal Halide, para el diseño del sistema inicialmente se sobredimensionaba el sistema teniendo en cuenta el detrimento acelerado del Metal Halide por su envejecimiento, que hacía que se necesitaran niveles más altos al inicio de operación para que al final de su vida útil el nivel lumínico aun fuera seguro. La tecnología de inducción minimiza enormemente este efecto permitiendo conservar un nivel lumínico cuasi uniforme a lo largo de su vida útil. El Metal Halide baja su nivel lumínico aproximadamente a un 70% entre las 5000~7000 horas. Las lámparas de inducción llegan al 70% de su capacidad lumínica entre las 60000~80000 horas.

## 8. BIBLIOGRAFIA

LIGHTING HANDBOOK, Reference and Application – ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY OF NORTH AMERICA. 8ª Edición (Capítulo 9).

TECHNICAL REPORT, CALCULATION AND MEASUREMENT OF LUMINANCE AND ILLUMINANCE IN ROAD LIGHTING – INTERNATIONAL COMMISSION ON ILLUMINATION. (Pub. N° CIE 30-2 1982).

TECHNICAL REPORT, GLARE AND UNIFORMITY IN ROAD LIGHTING INSTALLATIONS – INTERNATIONAL COMMISSION ON ILLUMINATION. (Pub. N° CIE 31 1976)

TECHNICAL REPORT, CALCULATIONS FOR INTERIOR LIGHTING – INTERNATIONAL COMMISSION ON ILLUMINATION. (Pub. N° CIE 40 1978).

FISICA – PAUL A. TIPLER.

MANUAL DE LUMINOTECNIA – ASOCIACION ARGENTINA DE LUMINOTECNIA.

## 10. CIBERGRAFIA

[http://issuu.com/malaluz/docs/gt\\_ee\\_iluminacion\\_alumbrado\\_publico](http://issuu.com/malaluz/docs/gt_ee_iluminacion_alumbrado_publico)

[http://issuu.com/legissa/docs/ir07\\_web](http://issuu.com/legissa/docs/ir07_web)

[http://issuu.com/legissa2010/docs/iluminacion\\_2](http://issuu.com/legissa2010/docs/iluminacion_2)

[http://issuu.com/marcoo/docs/iluminacion\\_n\\_4](http://issuu.com/marcoo/docs/iluminacion_n_4)

<http://www.revistaconstruir.com/instalaciones/491-iluminacion-artificial>

<http://www.venalsol.com/?gclid=CPOupcjDuK8CFcqA7QodZxmQkA>

Manual de Analizador de Redes (AR5) y Programación de Armónicos- 50.

Manual De Dialux.

Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público, RETILAP.