

Caracterización eléctrica y lumínica de bombillas de sodio a alta presión de uso convencional para vías tipo V2 en Bogotá¹

RESUMEN

En este artículo se presentan los resultados de la caracterización de bombillas de sodio a alta presión de 250 W, mediante la medición de sus características eléctricas y lumínicas. En este proceso se implementa un estudio de la población de bombillas en las vías tipo V2, para determinar una muestra representativa, y así, realizar las pruebas pertinentes. Se efectúa una comparación de los resultados obtenidos con los datos de los fabricantes y la normatividad aplicable, para verificar el nivel de cumplimiento de las bombillas utilizadas en el alumbrado público de Bogotá.

Palabras clave: Bombillas de sodio a alta presión 250 W, muestreo, normatividad, pruebas eléctricas y lumínicas.

1. Introducción

Una de las conclusiones más importantes de la “I Jornada Nacional de Alumbrado Interior y Exterior”, organizada por la Universidad Nacional de Colombia y la Facultad Tecnológica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, con el auspicio de la UPME, es la de invitar a la comunidad académica local y nacional a participar en el tema de la iluminación, mediante la investigación y apropiación de los conceptos concernientes.

En este sentido, el Proyecto curricular de Tecnología en Electricidad se vincula a esta tarea mediante el desarrollo de un proyecto de grado, aprovechando el convenio entre la Universidad Nacional de Colombia y la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. En este proceso, “el Laboratorio de Ensayos Eléctricos Industriales Fabio Chaparro” (LABE) de la Universidad Nacional (sede Bogo-

Autores

Edwin Hernández²

Jeisson Ortiz³

Jhon Jairo Ramírez⁴

¹ Proyecto Curricular de Tecnología en Electricidad. El trabajo de grado recibió mención meritoria.

² Tecnólogo en electricidad, correo electrónico: bullbrave@gmail.com

³ Tecnólogo en electricidad, correo electrónico: jeissonortiz@gmail.com

⁴ Tecnólogo en electricidad, correo electrónico: john.jairo.ramirez@gmail.com

tá), brinda la posibilidad de realizar las pruebas eléctricas y lumínicas, suministrando el personal calificado y los equipos necesarios para efecto de las mismas.

Acorde con el compromiso de confidencialidad firmado con LABE, las marcas de las bombillas utilizadas en las pruebas no se mencionan y son identificadas aleatoriamente en forma alfanumérica. Debido al desconocimiento de la información sobre la distribución de marcas de las bombillas instaladas, se adopta una metodología de muestreo, en la cual se tiene una distribución

uniforme de bombillas por marca. Paralelamente, se consulta la normatividad vigente aplicable como guía para realizar las pruebas mencionadas. Los resultados obtenidos son comparados con los parámetros entregados por los fabricantes y las normas aplicables.

2. Marco teórico

En la tabla 1 se aprecia la normatividad nacional e internacional adoptada y los criterios utilizados.

Tabla 1. Criterios del marco normativo utilizados

| Marco normativo | Criterio utilizado |
|---|--|
| NTC 2859-1. Procedimiento de muestreo para inspección por atributos | Determinar el tamaño de muestra |
| NTC 900. Reglas generales, especificaciones para el alumbrado | Envejecimiento de bombillas de sodio a una tensión entre el 92% al 106% de la tensión nominal |
| NTC 2243. Electrotecnia. Bombillas de sodio a alta presión | Temperatura de operación: $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ Envejecimiento: 100 h Desconexión del arrancador para toma de medidas Las bombillas deben cumplir con los parámetros del fabricante |
| NTC 3282. Electrotecnia. Bombillas de sodio a alta presión. Métodos para medir sus características | $\text{DAT}_v < 3\%$ de la onda fundamental. Tensión regulada $\pm 0,1\%$ Potencia fuente ≥ 5 veces potencia de la bombilla Se debe garantizar la estabilización para toma de medidas Se puede realizar calentamiento con balasto comercial |
| NTC 4363. Electrotecnia. Bombillas de sodio a alta presión. Límites de eficacia | (Eficacia luminosa para bombillas de sodio de 250 W) $\geq 104\text{ lm/W}$ |
| NTC 2119. Electrotecnia. Bombillas de vapor de mercurio a alta presión | Flujo luminoso $\geq 90\%$ del valor nominal dado por el fabricante |
| MUAP. Manual único de alumbrado público | (Flujo luminoso para bombillas de sodio 250 W) $\geq 32000\text{ lm}$ |
| ANSI C82.77-2002. Harmonics emission limits related power quality requirements for lighting equipment | $\text{DAT}_i < 20\%$ |
| CREG 070-1998. Reglamento de distribución de energía eléctrica | Factor de Potencia $\geq 0,90$ |

3. Metodología del muestreo y de las pruebas realizadas

A. Determinación de la muestra

Se determina una muestra representativa de la población de bombillas tomando como referencia la norma NTC 2859-1, [1]. De esta forma, se garantiza la confiabilidad de que los resultados obtenidos representan las características de la población.

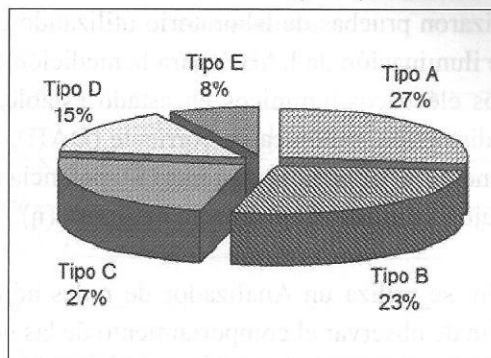
1) Se garantiza una población de bombillas homogéneas. Todas presentan las mismas características como: tecnología constructiva (HID), tipo de bulbo (E40), potencia (250W) y tensión de operación (220V). En la tabla 2 se observan los datos utilizados para determinar el tamaño de la población.

Tabla 1. Tamaño de población determinado

| | |
|--|-----------------|
| Longitud total de vías V2 ⁵ | 1077 km-carril |
| Distancia entre postes ⁶ | 0,03 km |
| Número de calzadas | 2 |
| Tamaño de la población | 71800 bombillas |

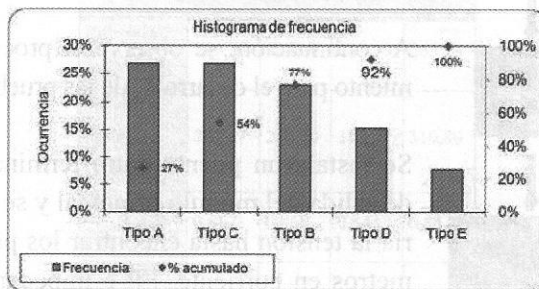
2) Teniendo en cuenta aspectos como: alcance tecnológico, tamaño de la población, costos y disponibilidad de LABE, y según la NTC 2859-1, [1], el tamaño de muestra corresponde a trece bombillas. Se realiza un estudio de mercado telefónicamente, a los 30 distribuidores más representativos de Bogotá, con el fin de encontrar las marcas más comercializadas. Los resultados de dicha encuesta se presentan en la gráfica 1.

Gráfica 1. Comercialización por tipo de bombilla



En la gráfica 1 se observa que las bombillas más comercializadas en la ciudad de Bogotá, son la tipo A, B, C y D, además, de acuerdo con el *diagrama de Pareto* (gráfica 2), estas cuatro marcas corresponden al 92% de las bombillas comercializadas en Bogotá. Por lo tanto y según el *teorema de Pareto*, se toman estos cuatro tipos para determinar la muestra representativa de la población.

Gráfica 2. Diagrama de Pareto de comercialización por marcas



Se adoptan tres bombillas por cada marca, para un total de doce bombillas acorde con la disponibilidad de bombillas de LABE. Este tamaño de muestra se aproxima al recomendado por la NTC 2859-1, [1]. Por tanto, doce bombillas es una *muestra representativa de la población*.

5 Instituto de Desarrollo Urbano IDU, [5].

6 Codensa S.A. E.S.P., [2].

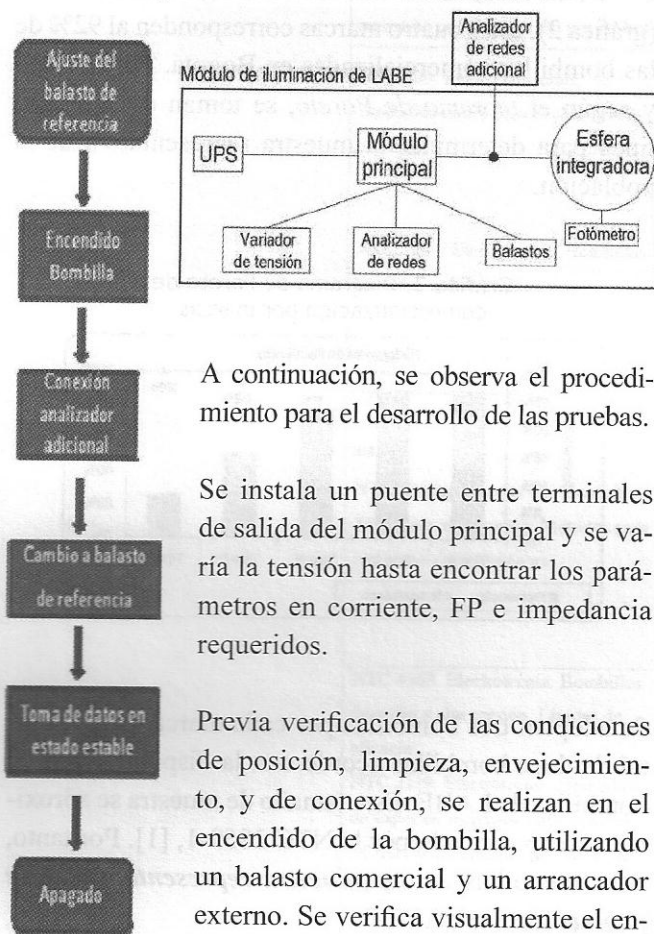
B. Metodología de las pruebas realizadas

Se realizaron pruebas de laboratorio utilizando el módulo de iluminación de LABE, para la medición de parámetros eléctricos-lumínicos en estado estable, tales como: distorsión armónica en corriente (DATi), factor de potencia (FP), potencia aparente (S), potencia activa (W), flujo luminoso (ϕ) y eficacia luminosa (η).

También, se utiliza un Analizador de redes adicional con el fin de observar el comportamiento de las bombillas desde el encendido, hasta el final de la prueba.

En la figura 1 se observa el esquemático del módulo iluminación.

Figura 1. Módulo de iluminación LABE



A continuación, se observa el procedimiento para el desarrollo de las pruebas.

Se instala un puente entre terminales de salida del módulo principal y se varía la tensión hasta encontrar los parámetros en corriente, FP e impedancia requeridos.

Previo verificación de las condiciones de posición, limpieza, envejecimiento, y de conexión, se realizan en el encendido de la bombilla, utilizando un balasto comercial y un arrancador externo. Se verifica visualmente el encendido de la bombilla para retirar el arrancador.

Se inicia la medida del comportamiento de las bombillas en cada uno de los parámetros durante toda la prueba. Los parámetros lumínicos se efectúan manualmente con los datos registrados en el fotómetro.

Pasados 45 minutos, se cambia en forma automática el balasto comercial por el balasto de referencia y garantizar igualdad a las bombillas bajo prueba.

Una hora después de iniciada la prueba, se toman tres datos consecutivos cada 10 minutos en los parámetros eléctricos y lumínicos de la bombilla; con estos tres datos, se determina la estabilidad de la bombilla. Además, durante este proceso se verifican las condiciones ambientales. Una vez finalizada la prueba se varía la tensión a cero y se espera un tiempo de enfriamiento previo al retiro de la bombilla.

4. Resultados obtenidos

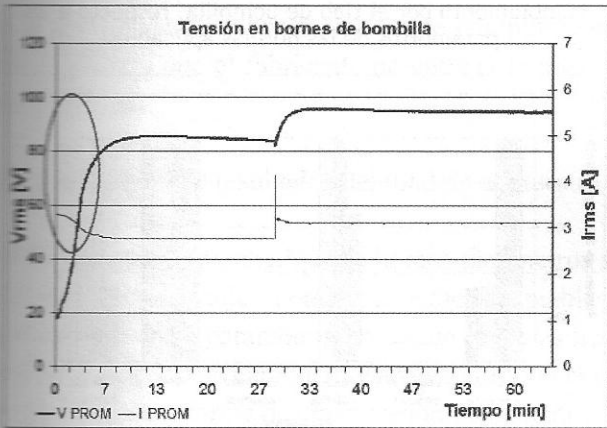
Tanto el comportamiento de las bombillas como los datos en estado estable, y los diferentes parámetros medidos, se presentan en las siguientes líneas:

A. Datos de comportamiento

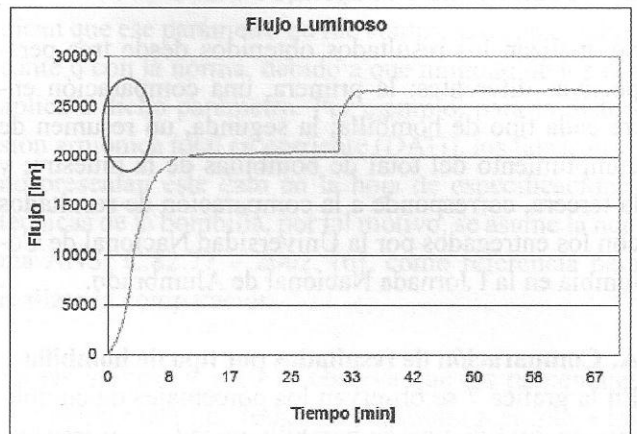
En las gráficas 3 a 6 se encuentran los resultados obtenidos para la bombilla tipo B, en ellas se puede observar el comportamiento medido en bornes. Además en dichas gráficas, se denota con un ovalo el momento en el cual se realiza el cambio del balasto comercial por el balasto de referencia.

Es importante resaltar, que no se decide medir el pico inicial de tensión (aproximadamente 5kV), debido a que supera el límite de aislamiento establecido por el fabricante del equipo analizador de redes adicional.

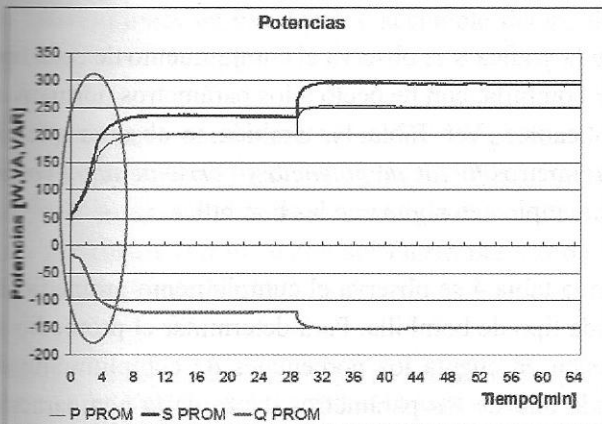
Gráfica 3. Tensión y corriente



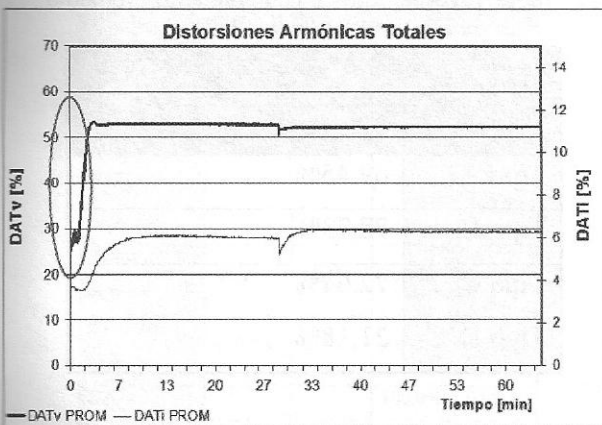
Gráfica 6. Tensión y corriente



Gráfica 4. Potencia activa, aparente y reactiva



Gráfica 5. Distorsiones armónicas totales en tensión y corriente



No se muestran las gráficas de factor de potencia y frecuencia, debido a que su variación en el tiempo es menor al 1%.

B. Datos en estado estable

En la tabla 3 se observan los promedios de los resultados obtenidos para cada parámetro por tipo de bombilla.

Tabla 3. Resultados promedios por tipo de bombilla

| Parámetro | Tipo de Bombilla | | | |
|--------------------------|------------------|--------|--------|--------|
| | A | B | C | D |
| Potencia activa [W] | 243,27 | 246,10 | 262,50 | 263,23 |
| Potencia aparente [VA] | 282,47 | 286,20 | 311,27 | 310,80 |
| Factor de potencia | 0,862 | 0,860 | 0,843 | 0,847 |
| Tensión objetivo [V] | 90,67 | 92,61 | 108,74 | 107,77 |
| Corriente objetivo [A] | 3,12 | 3,09 | 2,86 | 2,89 |
| DAT en corriente [%] | 5,99 | 6,17 | 7,97 | 7,86 |
| Flujo luminoso [lm] | 25194 | 27421 | 27730 | 26051 |
| Eficacia luminosa [lm/W] | 103,71 | 111,47 | 105,65 | 98,91 |

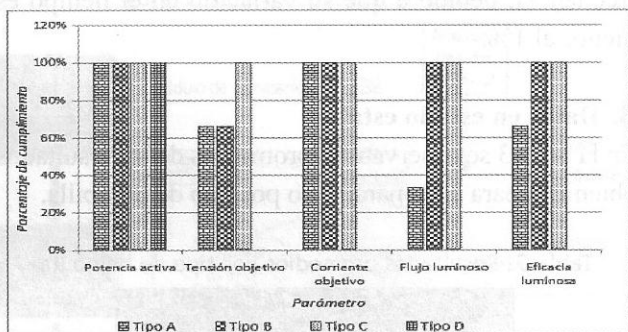
5. Análisis de resultados

Se analizan los resultados obtenidos desde tres perspectivas diferentes: la primera, una comparación entre cada tipo de bombilla; la segunda, un resumen de cumplimiento del total de bombillas de la muestra; y la tercera, corresponde a la comparación de resultados con los entregados por la Universidad Nacional de Colombia en la I Jornada Nacional de Alumbrado.

A. Comparación de resultados por tipo de bombilla

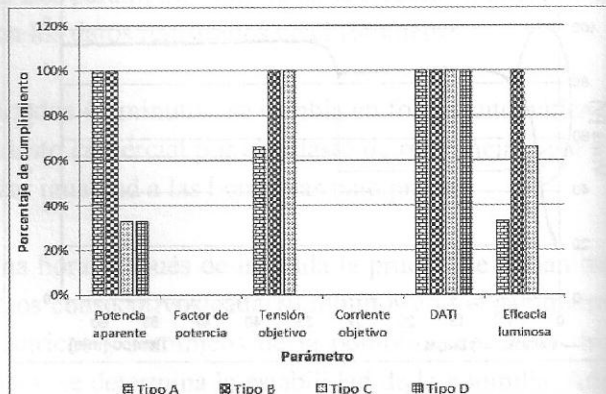
En la gráfica 7 se observan los porcentajes de cumplimiento de cada tipo de bombilla medida, con respecto a los parámetros dados por los fabricantes.

Gráfica 7. Comparación de resultados por tipo de bombilla



En la gráfica 7, por ejemplo, se analiza el parámetro correspondiente a potencia activa, se encuentra que todos los tipos de bombillas tienen un cumplimiento del 100%, lo cual significa que los valores medidos no presentan una variación porcentual mayor al 10% de lo declarado en la hoja de datos técnicos. Se debe aclarar que para el tipo de bombilla D, en los parámetros de tensión objetivo, corriente objetivo, flujo luminoso y eficacia luminosa, el fabricante no entrega la hoja técnica de dicha bombilla, por lo tanto, estos parámetros aparecen con un cumplimiento del 0%.

Gráfica 8. Comparación de los porcentajes de cumplimiento por el tipo de bombilla, respecto a los parámetros de las normas aplicables



En la gráfica 8 se observa el cumplimiento de cada tipo de bombilla, con respecto a los parámetros normativos aplicables (Ver Tabla 1); también se observa que los parámetros *factor de potencia* y *corriente objetivo*, no se cumplen en alguna de las bombillas.

En la tabla 4 se observa el cumplimiento promedio de cada tipo de bombilla. Para determinar el promedio se tienen en cuenta los porcentajes de cumplimiento de cada uno de los parámetros, tanto de la comparación realizada con los parámetros de los fabricantes, como con los de la normatividad aplicable.

Tabla 4. Porcentaje de cumplimiento promedio por tipo de bombilla

| Bombilla | Cumplimiento promedio |
|----------|-----------------------|
| Tipo A | 69,45% |
| Tipo B | 78,73% |
| Tipo C | 72,64% |
| Tipo D | 21,18% |

Se observa en la tabla 4, que la bombilla que presenta el promedio más elevado de cumplimiento es la bombilla

tipo B. También se observa que la bombilla de tipo D es la que presenta menor promedio de cumplimiento, esto se debe a que el fabricante no entrega la hoja de datos técnicos.

2) Comparación de resultados del total de la muestra

Debido a que, los resultados de algunos parámetros se encuentran clasificados como excelente, aceptable o deficiente, y otros parámetros presentan una clasificación de "cumple o no cumple"; se acoplan los porcentajes de la primera forma de clasificación de manera que puedan ser representados en forma de "cumple o no cumple". En este sentido, las diferencias porcentuales menores al 10%, se toman como "cumple", quedando las calificaciones de excelente y aceptable dentro del calificativo de "cumple".

En la tabla 5, se encuentran los resultados globales de todos los parámetros medidos en las bombillas. Se encuentran organizados de acuerdo a la comparación de cada parámetro con los datos del fabricante y/o de la norma aplicable (tabla 1).

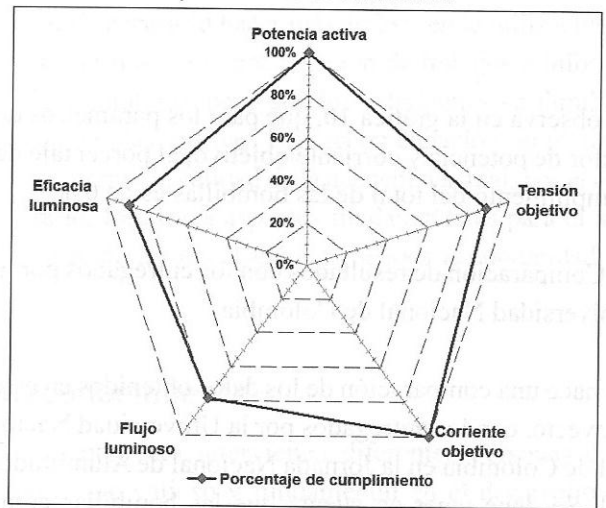
Tabla 5. Resumen de porcentajes de cumplimiento por parámetro de las bombillas bajo prueba

| Parámetro | Parámetro de fabricante | | Parámetro de norma | |
|--------------------|-------------------------|---------------|--------------------|---------------|
| | Cumple [%] | No cumple [%] | Cumple [%] | No cumple [%] |
| Potencia activa | 100,0% | 0,0% | - | - |
| Potencia aparente | - | - | 58,3% | 41,7% |
| Factor de potencia | - | - | 0,0% | 100,0% |
| Tensión objetivo | 88,9% | 11,1% | 88,9% | 11,1% |
| Corriente objetivo | 100,0% | 0,0% | 0,0% | 100,0% |
| DATi | - | - | 100,0% | 0,0% |
| Flujo luminoso | 77,8% | 22,2% | - | - |
| Eficacia luminosa | 88,9% | 11,1% | 50,0% | 50,0% |

Las celdas de la tabla 5 que aparecen con una línea, indican que ese parámetro no fue comparado con el fabricante o con la norma, debido a que ninguno de los dos aplica a dicho parámetro. Por ejemplo, para la distorsión armónica total en corriente (DATi), los fabricantes no presentan este dato en la hoja de especificaciones técnicas de la bombilla, por tal motivo, se asume la norma ANSI C.82.77 - 2002, [6], como referencia para realizar la comparación.

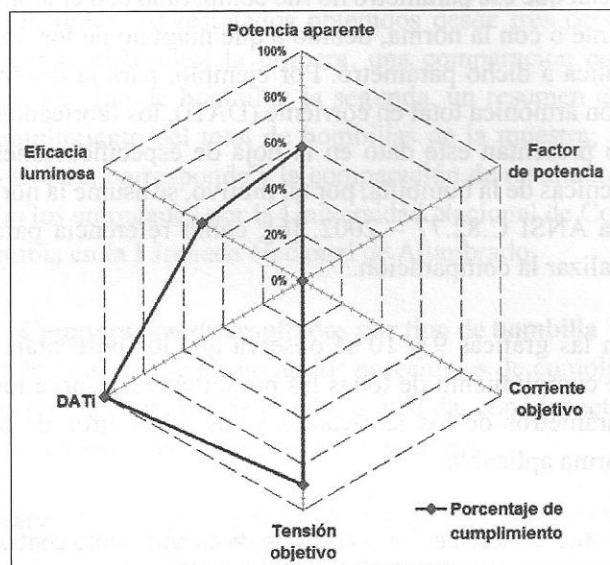
En las gráficas 9 y 10 se observa que los porcentajes de cumplimiento de todas las bombillas respecto a los parámetros de los fabricantes y los parámetros de la norma aplicable.

Gráfica 9. Resumen de porcentaje de cumplimiento contra parámetros de fabricante



Se observa en la gráfica 9, que para el parámetro de potencia activa, el 100% de las bombillas cumplen, indicando que no presentan una diferencia porcentual mayor al 10%, con respecto a 250 W.

Gráfica 10. Resumen de porcentaje de cumplimiento contra parámetros de normas aplicables



Se observa en la gráfica 10, que para los parámetros de factor de potencia y corriente objetivo, el porcentaje de cumplimiento del total de las bombillas es de 0%.

3) Comparación de resultados con los entregados por la Universidad Nacional de Colombia

Se hace una comparación de los datos obtenidos en este proyecto, con los entregados por la Universidad Nacional de Colombia en la Jornada Nacional de Alumbrado, [7]. Se debe tener en cuenta que las bombillas comparadas corresponden a las mismas bombillas que la Universidad Nacional utilizó para sus pruebas.

Se puede observar en la tabla 6, el resumen de la comparación con los parámetros reportados por la Universidad Nacional de Colombia. Estos porcentajes son el resultado global de las bombillas bajo prueba.

Tabla 6. Comparación de resultados con los datos entregados por la Universidad Nacional de Colombia

| Parámetro | Resultados Universidad Nacional de Colombia | Resultados Proyecto de grado | Variación |
|---------------------------------------|---|------------------------------|-----------|
| Potencia nominal máxima diferencia | 13,20% | 8,60% | -4,60% |
| Flujo luminoso 90% del flujo nominal | 87,5% | 77,8% | -9,70% |
| Eficacia luminosa promedio | 107 lm/W | 107 lm/W | 0 lm/W |
| Tensión objetivo dentro del rango 15% | 87,5% | 88,9% | 1,40% |
| Corriente objetivo máxima diferencia | 8,15% | 8,83% | 0,68% |

Se observa en la tabla 6, que la mayor diferencia porcentual se presenta en el flujo luminoso, indicando una disminución del 9,7%. Aunque, la eficacia luminosa depende directamente del flujo de la bombilla, el valor comparado se mantiene estable en 107 lm/W.

6. Conclusiones

- El tamaño de muestra debe ser representativo, confiable y al mismo tiempo, se encuentre en concordancia con el alcance del proyecto. Por tanto, en este proyecto se toman los criterios utilizados por la NTC 2859-1 [1], para un muestreo por inspección de tributos, garantizando una muestra representativa del lote o población, y a su vez, está de acuerdo con los objetivos y la acotación del proyecto.

- Es importante observar que el comportamiento eléctrico de las bombillas depende directamente del balasto utilizado para su funcionamiento. Esto se evidencia en las gráficas 2 a 5, donde se observa que los datos medidos sobre los bornes de las bombillas cambian de acuerdo al balasto que se esté utilizando. En promedio, el flujo luminoso y las potencias (S, P, Q) aumentaron un 20% respecto a las medidas realizadas antes del cambio de balasto comercial por balasto de referencia; la tensión y la DATi de operación aumentaron un 15% y la corriente de la bombilla aumentó en un 5%, mientras, el factor de potencia y la frecuencia de operación tienen cambios menores al 1%.
- Se observa en las gráficas 2 a 5, que las bombillas al inicio de la prueba se estabilizan aproximadamente en siete minutos. Este dato es de gran importancia debido a que esta es la condición de operación esperada para la bombilla, pues, en este instante se encuentra energizada por medio de un balasto comercial. Este tiempo de encendido es mayor que el tiempo dado por la guía de alumbrado público exterior —en su página 11— [8], para bombillas de sodio a alta presión.
- Al realizar las comparaciones finales se observa que en términos de cumplimiento (diferencia porcentual menor al 10% de lo declarado por el fabricante y por la normatividad aplicable), el tipo de bombilla que más desempeño presenta es la tipo B.
- Las bombillas de sodio utilizadas en las vías V2 en Bogotá cumplen con los requisitos normativos, y por ende confirma que es una buena alternativa frente a las bombillas de mercurio.
- Aunque, las bombillas utilizadas en las pruebas fueron almacenadas por más de 1 año antes de realizar las mediciones para el proyecto de grado, la diferencia en los parámetros comparados con los resultados de la Universidad Nacional de Colombia, es menor al 10%. Por tanto, se evidencia la estabilidad en sus características cuando las bombillas son utilizadas y luego almacenadas por largos periodos de tiempo.

- La temática de iluminación artificial abarca un aspecto de vital importancia en el desarrollo de las diferentes actividades de los seres humanos, por ello, se debe prestar más atención desde la academia a este tema, pues, es un área de estudio que avanza constantemente y tiene muchos aspectos interesantes por descubrir. Como estudiantes, se propone la creación de un grupo de investigación y un laboratorio en los cuales se generen avances tecnológicos y nuevos conocimientos en iluminación.
- En la realización del proyecto se tiene la necesidad de la apropiación del marco normativo vigente para bombillas de sodio, pues, se nota la dificultad en la interpretación de los conceptos normativos debido a un deficiente trabajo con normatividad en el desarrollo de las clases y laboratorios durante la carrera universitaria. Es necesario hacer más énfasis en la utilización de las normas, en la presentación de trabajos e informes de laboratorio, para que los estudiantes se familiaricen con las mismas. Esta recomendación no pretende desmeritar la calidad de la academia actual, por el contrario, fortalezca aspectos fundamentales para el adecuado desarrollo académico de toda la comunidad.

Reconocimiento

En el proyecto intervienen diferentes personas cuyo aporte fue valioso y fundamental en el desarrollo del mismo. Sinceros agradecimientos al ingeniero Mario Erwin Quiroga R., encargado del módulo de iluminación en LABE de Universidad Nacional de Colombia, por su asesoría y documentación.

El equipo operativo: Paola Galindo y demás auxiliares técnicos de LABE de la Universidad Nacional de Colombia, por su aporte en las pruebas realizadas.

Los ingenieros Mario Alberto Rodríguez B. y a Clara Inés Buriticá, docentes de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad Tecnológica, por sus valiosas orientaciones académicas.

Referencias

- [1] NTC ISO 2859-1. Versión 2002-04-03.. *Procedimientos de muestreo para inspección por atributos*, segunda versión. Bogotá.
- [2] Codensa. *Generalidades 6.2, 24-11-03*. Bogotá.
- [3] NTC 2243. *Electrotecnia. Bombillas de sodio a alta presión*. Bogotá.
- [4] NTC 3282. *Electrotecnia. Bombillas de sodio a alta presión. Métodos para medir sus características*. Bogotá.
- [5] Instituto de Desarrollo Urbano. (2008, 11, 24). *Inventario de malla vial*. Bogotá: [En línea] Disponible: http://www.idu.gov.co/web/guest/malla_inventario
- [6] ANSI C 82.77-2002. *Harmonics emission limits related power quality requer documentation iments for lighting equipment*. Bogotá.
- [7] Jornada Nacional de Alumbrado Interior y Exterior. [CD-ROM], (2008) Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- [8] Ministerio de Minas y Energía. Colombia (2007). *Guía didáctica para el buen uso de la energía*. Bogotá: Unidad de Planeación Minero Energética. UPME.