

# ALTERNATIVAS PARA LA RACIONALIZACIÓN ENERGÉTICA DEL SISTEMA DE ALUMBRADO DE LA AUTOPISTA PANAMERICANA (ACCESO NORTE A BUENOS AIRES)

Alberto J. Cabello<sup>1</sup>

Departamento de Luminotecnia, Luz y Visión "H.C.Bühler". Fac. de Cs. Exactas y Tecnología, Univ. Nacional de Tucumán  
Av. Independencia 1800 - 4000 Tucumán - Tel/fax: +54 381 4361936 - e-mail: [acabello@herrera.unt.edu.ar](mailto:acabello@herrera.unt.edu.ar)

## RESUMEN

Se analizan las características del Sistema de Alumbrado Público de la Autopista Panamericana, en el Acceso Norte a la Ciudad de Buenos Aires, y las distintas alternativas de optimización del consumo de energía eléctrica en horario de escasa circulación de vehículos. Las posibles alternativas comprenden desde una reconversión que modifica el tipo de lámparas actualmente en uso, hasta un estudio de prefactibilidad del uso de diferentes sistemas economizadores del flujo luminoso para lámparas de descarga gaseosa.

## 1.-INTRODUCCIÓN

En este trabajo abordamos el análisis de las distintas alternativas para encarar la gestión del alumbrado en términos de racionalización energética, pero sin descuidar el aspecto de seguridad vial, o sea sin menoscabo de los parámetros luminotécnicos que están directamente relacionados con la performance visual del conductor. El objetivo es mantener adecuadas condiciones de visibilidad y confort para los conductores de vehículos con equilibrados costos de instalaciones y de consumo.

Como base de comparación para las diferentes posibilidades de ahorro de energía, hemos elegido la nueva Autopista Panamericana, en el tramo comprendido entre la Avenida General Paz y la Avenida Márquez, en el Acceso Norte a la Ciudad de Buenos Aires<sup>[1]</sup>. Este tramo de la autopista está iluminado por 162 columnas, con dos luminarias dobles por columna, con cuatro lámparas de vapor de Sodio de alta presión de 400w por columna, dos por cada lado. La separación promedio entre columnas es de 45 metros, con una altura libre de las luminarias de 16 metros respecto de la calzada (ver Figura 1A).

## 2.- CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA INSTALACIÓN

El Sistema de Alumbrado de la calzada principal de la Autopista Panamericana posee disposición central-bilateral, o sea, una columna en el centro de la vía, con dos brazos soporte de las luminarias a ambos lados. El sistema de alimentación eléctrica está diseñado de modo tal de proveer energía a toda la carga en horas de tránsito intenso, y a la mitad de la carga en horario de tránsito reducido. Esta modalidad recibe alimentación eléctrica desde los denominados "circuitos de medianoche".

Se trata de una vía de tránsito muy rápido, con velocidad máxima de hasta 130 Km/h, con calzada de manos separadas por una baranda New Jersey central, desde dos carriles por mano hasta un máximo de seis carriles; libres de cruces a nivel, con control de accesos y salidas y sin presencia de peatones. Según estas características corresponde clasificarla como vía de tránsito Clase A, según norma IRAM-AADL J 2022-2<sup>[4]</sup>.

### Geometría de la instalación:

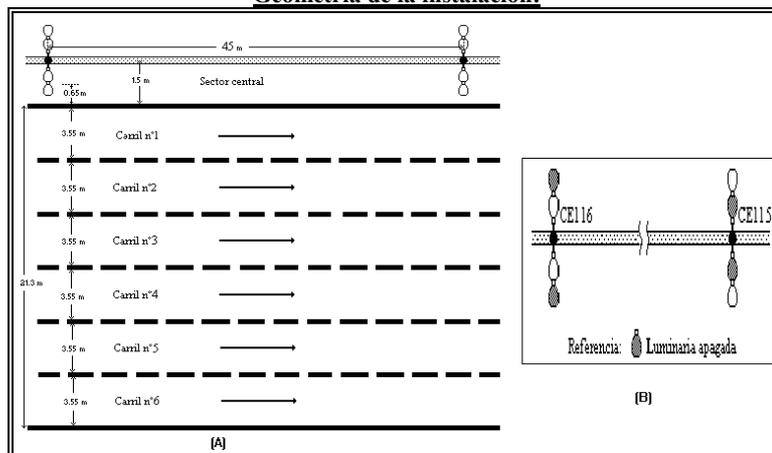


Figura 1.- Vista de planta de una mano de la calzada principal, con sus dimensiones.

<sup>1</sup> Ing. - Magister en Luminotecnia - jefe de Trabajos Prácticos, DE

Los parámetros luminotécnicos que debe respetar el Sistema de Alumbrado son, según la Norma antes mencionada los siguientes:

**Tabla 1.- Comparación entre valores recomendados y calculados**

|   | $L_{med}$<br>[cd/m <sup>2</sup> ] | $U_o$<br>$L_{min} / L_{med}$ | $U_L$<br>$L_{min} / L_{max}$ | $E_{med}$<br>[lux] | <b>G1</b><br>$E_{min} / E_{med}$ | <b>G2</b><br>$E_{min} / E_{max}$ | <b>TI</b><br>[%] | <b>G</b> |
|---|-----------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------|----------------------------------|----------------------------------|------------------|----------|
| Parámetros mínimos recomendados por la norma IRAM-AADL J2022-2 para la Clase A. Valores iniciales | 2.7                               | 0.4                          | 0.7                          | 35 <sup>(*)</sup>  | 0.33 <sup>(*)</sup>              | 0.17 <sup>(*)</sup>              | 10               | 6        |
| Parámetros Calculados para la geometría actual. Valores iniciales                                 | 3.78                              | 0.37                         | 0.72                         | 42.85              | 0.42                             | 0.21                             | 5.7              | 3.4      |

**Referencias:**

$L_{med}$  [cd/m<sup>2</sup>]: Luminancia promedio de la calzada

$U_o$ : corresponde a los valores de uniformidad general

$E_{med}$  [lux]: Iluminancia horizontal promedio sobre la calzada

**TI**: Incremento del umbral de percepción (deslumb. fisiológico)

$U_L$ : corresponde a los valores de uniformidad longitudinal de cada carril

**G**: Deslumbramiento molesto (deslumbramiento psicológico)

(\*): valores exigidos por el ente regulador (OCRABA)

### 3.- EVALUACIÓN DEL “CIRCUITO MEDIANOCHÉ” DE LA INSTALACIÓN

El circuito medianoche es una alternativa de ahorro energético que consiste en encender solamente la mitad de los puntos luminosos en los períodos horarios en los que el tráfico disminuye notablemente, por lo general entre las 0:00 horas y 5:00 AM, con reducción del flujo sobre el tramo de calzada evaluada mediante el apagado de cuatro de las ocho luminarias presentes en columnas CE115 y CE116 (Ver Figura 1B).

En la Figura 1B hemos visto el arreglo típico para la instalación de referencia. Si calculamos la energía consumida a plena potencia durante el período total de 10 horas de encendido, tenemos que para 162 columnas (Calzada Principal entre Av. Gral.Paz y Distribuidor Márquez) de 4 luminarias disipando 480W cada una, se consume un total de energía de 3.11 Mwh por día. Si se aplica el circuito medianoche durante 5 horas la energía consumida será de 2.33 Mwh, o sea se produce un ahorro del 25% en el consumo, y por lo tanto en los costos de explotación.

En el caso de la instalación (Av. Panamericana con seis carriles iluminada con circuito medianoche) los resultados del cálculo indican el cumplimiento del nivel promedio de luminancia sobre la calzada ( $L_{med} = 2.04$  cd/m<sup>2</sup>), y de la uniformidades de iluminancia G1 y G2. Respecto de la uniformidad general el valor obtenido está apenas por debajo del límite mínimo establecido ( $0.37 < 0.4$ )<sup>[1]</sup>. Un parámetro crítico desde el punto de vista de la perfomancia visual del conductor es la uniformidad longitudinal, y este valor está significativamente por debajo del mínimo estipulado ( $0.44 < 0.7$ ), por lo que esta solución resulta en una reducción de las condiciones visuales óptimas para el conductor.

Antes de considerar algún otro sistema de reducción del consumo aplicado a la instalación, consideraremos una alternativa de reconversión de la instalación para cumplir este objetivo.

### 4.- RECONVERSIÓN DEL SISTEMA DE ALUMBRADO DE LA INSTALACIÓN

Se trata de aprovechar la infraestructura en columnas y luminarias de la calzada principal de la Autopista Panamericana en los tramos de seis carriles, donde se encuentran instalados en cada columna dos luminarias de dos lámparas cada una.

La reconversión consiste en reemplazar de las luminarias interiores (la más cercanas a la columna) lámparas de 400W por lámparas NaV-T Súper 600W. En cada columna habría instaladas entonces dos lámparas exteriores de 400W y dos lámparas interiores de 600W, todas del tipo NaV-T Súper, que poseen un flujo nominal casi un 16% por encima de las lámparas estándar<sup>[5]</sup>. El sistema debería funcionar de la siguiente manera:

**A) Período de mayor volúmen de tráfico (5 primeras horas):** Solamente se encenderían las luminarias interiores equipadas con lámparas NaV-T 600W Súper. Para el tramo de referencia el consumo a razón de 1400W por columna sería de 1.1 Mwh por día. Los correspondientes niveles mínimos en servicio (mantenidos) de los parámetros luminotécnicos bajo estas condiciones serían los siguientes:

**Tabla 2.-Valores en Servicio calculados con método de cálculo punto por punto - dos luminarias por columna**

| Potencia lámpara [W] | consumo diario [Mwh] | $L_{med}$ [cd/m <sup>2</sup> ] | $U_o$<br>$L_{min} / L_{med}$ | $U_L$<br>$L_{min} / L_{max}$ | $E_{med}$ [lux] | <b>G1</b><br>$E_{min} / E_{med}$ | <b>G2</b><br>$E_{min} / E_{max}$ | <b>TI</b> [%] | <b>G</b> |
|----------------------|----------------------|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------|----------|
| 600                  | 1.1                  | 2.6                            | 0.36                         | 0.75                         | 28.0            | 0.43                             | 0.21                             | 5.6           | 3.2      |

Según los resultados la instalación tiene un comportamiento aceptable respecto de los valores de Tabla 1, con un ahorro del 29% en el consumo. Desde el punto de vista de la seguridad del conductor, se obtiene una buena uniformidad longitudinal.

**B) Período de tráfico reducido (5 horas restantes):** En este caso se conmuta el encendido a las luminarias exteriores que estarían equipadas con lámparas NaV-T 400W Súper (55.5 Klm). El tramo de referencia tendría un consumo de 0.78 Mwh en esas condiciones. Los niveles de los parámetros luminotécnicos serían los siguientes:

**Tabla 3.-Valores en Servicio calculados con método de cálculo punto por punto - dos luminarias por columna**

| Potencia lámpara [W] | consumo diario [Mwh] | $L_{med}$ [cd/m <sup>2</sup> ] | $U_o$ $L_{min} / L_{med}$ | $U_L$ $L_{min} / L_{max}$ | $E_{med}$ [lux] | G1 $E_{min} / E_{med}$ | G2 $E_{min} / E_{max}$ | TI [%] | G   |
|----------------------|----------------------|--------------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------|------------------------|------------------------|--------|-----|
| 400                  | 0.78                 | 1.3                            | 0.42                      | 0.64                      | 15.0            | 0.50                   | 0.27                   | 5.5    | 3.0 |

Estos resultados indican una buena performance en las uniformidades, tanto de luminancias como de iluminancias.

Sumando los consumos de las modalidades A) y B) llegamos a un total de 1.9 Mwh por día, inferior al consumo con la modalidad del circuito medianoche (2.33 Mwh). Con esta reconversión se ahorrarían 430 Kwh diarios, o bien 156950 Kwh por año. Si suponemos un costo del Kwh de 0.12\$, el ahorro en el consumo anual de esas 162 columnas sería del orden de 19000\$. El costo de reconversión, teniendo en cuenta que equipo auxiliar más lámpara NaV-T 600W Súper cuestan aproximadamente 100\$ sería el siguiente: 162 col x 2 lum/col x 100\$ + 162 col x 2 lum/col x 30\$ = 42120\$. Si suponemos el costo de instalación de componentes en un 20% del costo de materiales tendremos que agregar 9000\$. Entonces el costo total de la reconversión ascendería, para ese tramo de referencia a 51000\$, lo que nos indica que la inversión se amortizaría al cabo de 2.7 años, solamente con el ahorro de energía respecto al circuito medianoche.

## 5.-ANÁLISIS DE OTRAS TECNOLOGÍAS DISPONIBLES EN CONTROLADORES DE FLUJO LUMINOSO PARA ALUMBRADO PÚBLICO

En la actualidad, podemos encontrar en el mercado argentino cuatro sistemas economizadores del flujo luminoso que analizamos a continuación.

### 5.1.- Reducción del flujo luminoso con balasto bipotencia.

**Principio de funcionamiento:** Se trata de balastos de doble nivel de iluminación (bipotencia) con circuito electrónico de conmutación incorporado. El balasto con dos niveles de potencia posee dos arrollamientos, el de funcionamiento normal y el arrollamiento adicional. Al introducirse una inductancia adicional en el circuito de la lámpara se consigue una reducción de la tensión en bornes de la lámpara, limitándose en consecuencia aún más la corriente y por lo tanto el flujo luminoso. Los principales fabricantes estiman la reducción de potencia en el orden del 40%.

**Ahorro energético y Costos de Inversión:** Teniendo en cuenta un ahorro del 40% declarado por el fabricante, y siguiendo con la instalación de referencia de 162 columnas, la potencia se reduce de 1920W por columna a 1152W. Siguiendo con el esquema de 5 horas a flujo pleno y 5 horas a flujo reducido, el ahorro diario en consumo de energía resultaría ser del orden de 0.62 Mwh, ahorrándose por año la cantidad de 27156\$. Debido a que desconocemos el costo de cada equipo, podemos estimar el mismo en alrededor de 350\$ para NaV-T 400W teniendo en cuenta la tecnología incorporada. Entonces se precisaría una inversión en equipos de alrededor de \$227000 para reequipar el tramo de referencia (648 equipos), además del costo de instalación. Se precisarían entonces alrededor de 8.7 años para amortizar el costo de reequipamiento solamente con el ahorro en energía.

### 5.2.-Reducción del flujo luminoso con reguladores de tensión estabilizada controlados por microprocesadores

**Principio de funcionamiento:** Se trata de conectar por cada fase en cada circuito de alumbrado en cada tablero seccional reguladores de tensión estabilizada, pudiéndose disminuir la misma hasta 175 Voltios (por debajo de ese nivel se produce el apagado de la lámpara). Cada regulador de tensión es controlado mediante salidas a relés por un dispositivo programable. El aparato toma lectura de las tensiones de salida y las compara, fase por fase con un valor de consigna almacenado en su memoria. Como resultado, el controlador acciona las salidas de relé subiendo o bajando la tensión de cada fase. El controlador puede ser programado in situ mediante una PC portátil, o bien en forma remota a través de un modem que lo conecta con un dispositivo (microprocesador). Dicho dispositivo posee una memoria RAM que almacena determinada cantidad de registros de parámetros eléctricos y registros de eventos y alarmas. Posee además un reloj astronómico que controla el encendido y apagado del alumbrado público. Dispone además contadores de energía activa y reactiva. Según el fabricante, con este control centralizado se puede producir un ahorro de hasta el 30% en los costos de mantenimiento al disponer la información en forma centralizada y al instante. Además asegura una economía en el consumo de hasta el 40%.

**Ahorro Energético y Costos de Inversión:** El ahorro en consumo de energía es similar al de §5.1, o sea de 27000\$ por año, para el tramo de referencia de 162 columnas. Respecto del costo del equipo el fabricante no suministró la información requerida, motivo por el cual no se pudo estimar la amortización de la inversión.

### 5.3.-Control del flujo luminoso mediante microprocesadores y balastos bipotencia

**Principio de funcionamiento:** Similar al anterior (ver §5.2). Se instala en cada luminaria un módulo de control y comando de lámpara que es básicamente un receptor-transmisor a onda portadora para lámparas de hasta 250W. El módulo analiza el funcionamiento interno del circuito de la lámpara detectando posibles fallas del mismo. La reducción del flujo a nivel Impara

puede ser efectuada solamente si ésta está conectada a un balasto bipotencia (ver §5.1), encargándose el módulo de control y comando de efectuar la conmutación del balasto bipotencia entre sus dos niveles, en base a la señal recibida de un módulo de comando seccional instalado en el tablero seccional que contiene el circuito de alumbrado de la lámpara. Este módulo de comando seccional comanda el encendido del sistema de iluminación, el estado de todas las partes del tablero. Interroga por onda portadora el módulo de control de cada luminaria adquiriendo el estado de cada punto luminoso. Memoriza la información recibida y la transmite al centro de control vía módem, y presente también en cada tablero. En el centro de control general del sistema un software para la gestión centralizada controla y visualiza el estado de los eventos de todo el sistema de iluminación, programando el encendido y apagado de cada punto luminoso en forma diaria, semanal o anual. Desde el punto de vista tecnológico, puede decirse que esta solución es una combinación de los sistemas vistos en §5.1 y §5.2

**Ahorro Energético y Costos de Inversión:** El fabricante no lo especifica, pero teniendo en cuenta el tipo de tecnología (simple reducción de la tensión al límite admisible), puede lograrse hasta un 40% de ahorro en el consumo, siendo válida la cifra anual de ahorro estimada en §5.1. En este caso, al igual que en el anterior, el representante técnico en el país no suministró información relativa a costos del equipo.

#### **5.4.- Sistema a base de reguladores electronicos de la tensión de lámpara (dimerizado)**

**Principio de funcionamiento:** Se trata de un dimerizado de lámparas de descarga. Emplea un arreglo modificado de conmutadores triac, conocido como NCWI (Non Critical Wave form Intersection) o Intersección de Forma de Onda No Crítica, donde la tensión de la lámpara es recortada en fase no crítica con la corriente. Esto efectivamente reduce la corriente por la carga de manera suave y simétrica, asegurando condiciones apropiadas y estables para que la lámpara reduzca la luminosidad resultante. Debido a esta técnica el controlador produce cantidades mínimas de armónicas. El conjunto de controladores SC de cada tablero se conecta a un módulo CCU provisto de un reloj con el que se programan los escalones de reducción del flujo y la hora de actuación. Así por ejemplo se puede programar de modo tal que desde el encendido hasta las 23hs el circuito de lámparas trabaje con el 100% del flujo luminoso; luego, desde las 23:01 hasta las 01:00hs el flujo se reduce al 75%; luego, desde la 01:01 hasta las 03:00hs con el 50%; y finalmente, desde la 03:01 hasta la 05:00 con el 30% del flujo.

**Ahorro Energético y Costos de Inversión:** Suponiendo que queremos controlar la carga de uno de los tableros seccionales correspondiente a las luminarias de la calzada central (son 16 columnas del tramo de referencia de 162, o sea el 10%). Dicho tablero alimenta con dos circuitos trifásicos, el CE5 y el CE5M las 64 lámparas de NaV-T 400W. Para el circuito CE5 la carga por fase es de 11x400W, 10x400W y 11x400W (fases R,S,T respectivamente) y para el circuito CE5M la carga por fase es de 10x400W, 11x400W y 11x400. O sea que debemos instalar 6 unidades SC con una capacidad de carga de 45A, 10.3KVA. El precio de cada módulo es de 1500\$; por su parte una unidad de control con posibilidad de efectuar una regulación en 4 escalones cuesta 770\$; siendo entonces el total a invertir en dicho tablero la cantidad de aproximadamente 10000\$. A esto hay que agregarle el costo de la compensación en grupo del factor de potencia, estimado en 2000\$ para esa cantidad de lámparas. En total tenemos que la inversión por tablero, para esas 16 columnas es de 12000\$, por lo tanto la inversión para el tramo de referencia es del orden de los 120000\$. Para las cuatro etapas de reducción del flujo, el ahorro en el consumo es del 29%, por lo tanto en todo un período diario de encendido la instalación consume solamente 2.21 Mwh, siendo el ahorro en energía durante un año la cantidad de 39000\$. Por lo tanto la amortización de la inversión llevará un tiempo de aproximadamente 3 años. No olvidar que en esta estimación no se consideraron gastos de instalación ni tasas de importación del producto.

La gran ventaja del dimerizado de lámparas en general es que se mantienen invariables las uniformidades sobre la calzada, y que mediante una regulación continua podemos incrementar el flujo de las lámparas a medida que envejecen, manteniendo así los niveles de iluminación dentro de los límites estipulados por normas. Su gran desventaja es que al efectuar compensación del factor de potencia por grupo, aumenta la sollicitación térmica de los conductores entre lámparas y el tablero.

#### **6.- CONCLUSIÓN**

De todas las posibilidades de reconversión con fines de ahorro energético analizadas con datos fehacientes, la que produce un mayor ahorro en el consumo por año, con una alta tasa de retorno y un bajo período de amortización de la inversión, es la correspondiente al sistema de dimerizado electrónico<sup>[6]</sup> (ver §5.4), siguiéndole la alternativa correspondiente al reemplazo de lámparas NaV-T 400W por NaV-T 600W súper (ver §4). En las demás tecnologías, para ser tenidas en cuenta, hay que efectuar un detallado estudio de costos.

#### **7.-REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

[1] Cabello A.J., "Informe sobre Evaluación Fotométrica de la Iluminación del Sistema de Autopistas del Acceso Norte a la Ciudad de Buenos Aires y la Avenida General Paz". Asesoramiento Técnico a Autopistas del Sol SA del LANAIS-LMN, Tucumán, Diciembre 1998.

[2] Van Bommel W.J.M. , de Boer J.B, "ROAD LIGHTING". Capítulo 10. Philips Technical Library, 1980.

[3] COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE. "Dépréciation et entretien des installations éclairage public". CIE Publication N° 33A. Viena: Bureau Central de la CIE, 1977.

[4] Norma IRAM-AADL J 2022-2,"Alumbrado Público. Vías de Tránsito. Clasificación y Niveles de Iluminación", Buenos Aires, septiembre 1995.

[5] OSRAM Argentina SACI. "Una luz en el camino. Osram en la Autopista del Oeste". Revista Actualidad OSRAM, N°26, pág.11, Buenos Aires, Abril 1998.

[6] Catálogo INTELUX. "Intelligent Lighting Control", Hauptstrasse 76, CH-9422 Staad - Switzerland, Página web: www.intelux.com, Diciembre 1998.