



EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL ALUMBRADO PÚBLICO

J. Tapia Garzón¹, E. Manzano², S. Gao³, M. Rojas², M. De Nobrega²

^{1,2} Depto. Luminotecnia Luz y Visión, FaCEyT, Universidad Nacional de Tucumán, Av. Independencia 1800 - T4002BLR Tucumán - Argentina - Tel./Fax: +54 381 4361936 - 4364093 int. 7785 / 7715. emanzano@herrera.unt.edu.ar

³ Sub-Dirección de Alumbrado Público, Municipalidad de San Miguel de Tucumán, Paso de los Andes 50 - CP 4000 Tucumán - Argentina - Tel +54 381 4232424 - 4238468

Aceptado:03-05-09; Recibido:03-06-09.

RESUMEN.- Un estudio sobre la optimización de la eficiencia energética en el alumbrado público de la Municipalidad de S. M. de Tucumán fue efectuado basado en la aplicación de relojes astronómicos, balastos electrónicos dimerizables para lámparas de descarga de Sodio de alta presión de 150W/100W y luminarias de alta eficiencia. Durante 45 días, 273 puntos de luz conectados a 6 redes de alumbrado independientes fueron monitoreados, registrando el consumo, tiempos de funcionamiento, apagados nocturnos, encendidos diurnos y parámetros eléctricos de calidad. Los resultados indican que es posible una importante reducción en el consumo, entre un 11% y un 43% mejorando la calidad del servicio y reduciendo el contenido de armónicos que se introducen a la red de alumbrado a TDH A \leq 6,5%. El trabajo describe la experiencia y el análisis de los resultados obtenidos.

Palabras claves: Eficiencia energética, alumbrado urbano.

STREET LIGHTING ENERGY EFFICIENCY

ABSTRACT.- A study of street lighting energy efficiency was carried out in S. M. Tucumán City, based on the application of astronomical clocks, electronic ballasts (control gear) for high pressure sodium 150W/100W lamps and high efficiency luminaires. During 45 days, 273 luminaires connected to 6 independent electric networks were monitored recording: energy consumption, switching on/off times, night lamps outages, day on lamps and electrical quality parameters. The results indicate that it is possible a significant reduction in consumption, between 11% and 43% while improving service quality and reducing the harmonic content being introduced to the network lighting by TDH A \leq 6.5%. The paper describes the experience and the analysis of the results.

Key words: Energy efficiency, Street lighting

1. INTRODUCCIÓN

Las limitaciones de los recursos energéticos y las consecuencias que sufre el medio ambiente con la utilización sobredimensionada e indiscriminada de la energía, pone a nuestra sociedad en la discusión de consumirla en forma sostenible. También es necesario entender que esta sociedad tampoco está dispuesta a disminuir su "calidad de vida" en detrimento del consumo energético. Estos puntos de vista parecen antagónicos, pero en realidad no lo son si tenemos en cuenta conceptos como: "la revolución de la eficiencia" descrito en el libro *Factor 4* (Weizsäcker, et al, 1997).

Factor 4 es un informe que encargó el Club de Roma y define claramente: "la introducción en todos los procesos de producción y servicios de las nuevas tecnologías que tengamos a nuestro alcance a los efectos de conseguir disminuir el consumo de energía como así también la minimización de necesidades de recursos naturales por unidad de energía consumida, conservando la calidad de vida de las personas". Es posible demostrar que se puede duplicar el bienestar mundial usando la mitad de los recursos naturales. En el presente trabajo se demuestra que

es posible reducir significativamente el consumo de energía mejorando la calidad del servicio de iluminación.

Teniendo en cuenta estos planteamientos, en el municipio de la ciudad de San Miguel de Tucumán se ejecutó una experiencia piloto de aplicación de nuevas tecnologías en el Alumbrado Público la cual permite afianzar conceptos y analizar resultados técnicos y económicos. La experiencia fue realizada con el aval de la Intendencia de la ciudad, interesada en aplicar políticas de ahorro energético. A tales fines puso a disposición sus instalaciones e inspectores para el seguimiento. A ello se sumó el aporte de capital privado con especialistas y técnicos y la supervisión del Departamento de Luminotecnia Luz y Visión de la U.N.T.

El presente artículo, resume la experiencia realizada, la metodología empleada y los resultados obtenidos.

2. OBJETIVOS

El objetivo de la experiencia fue estudiar el rendimiento de nuevos dispositivos a incorporar en las instalaciones de alumbrado con el fin de reducir el consumo de energía en el

alumbrado público optimizando la eficiencia y calidad de la energía. Los dispositivos involucrados fueron:

- relojes astronómicos para el encendido y apagado de las instalaciones (ver figura 1) que actúan de acuerdo a la duración de la noche, la cual depende de la fecha y latitud de la ciudad.
- balastos electrónicos (ver figura 2) con estabilización de tensión de salida y regulación de flujo luminoso (dimerizables) en tres escalones de potencia de salida para lámpara SAP 150W y dos escalones para SAP 100W.
- luminarias más eficientes, con mayor rendimiento y lámpara SAP 100W (figura 3).

Dado que las nuevas tecnologías, en particular los balastos electrónicos estaban diseñados para un elevado Factor de Potencia (FP) y filtrado de armónicos, era de interés evaluar también el impacto sobre la calidad de la energía en las redes eléctricas de iluminación.



Fig. 1: Reloj astronómico con encendido y apagado programable de acuerdo a la ubicación geográfica (latitud, longitud y uso horario)



Fig. 2: Bandeja porta equipo auxiliar de la luminaria equipada con Balasto electrónico con regulación de tensión de salida y flujo luminoso escalonado pre-ajustado.



Fig. 3: Luminaria cerrada con cubierta de policarbonato y reflector de una pieza de aluminio con lámpara sodio AP 100W Fig. 3: Luminaria cerrada con cubierta de policarbonato y reflector de una pieza de aluminio con lámpara sodio AP 100W.

2. METODOLOGÍA APLICADA

Seis redes de iluminación con 273 puntos luminosos en total fueron seleccionadas para la experiencia piloto como muestra representativa. Las mismas están ubicadas en zonas residenciales, que representan más del 60% del total de las instalaciones iluminación de la ciudad (30.000 puntos de luz). Las redes fueron relevadas para determinar características técnicas, disposición, cantidad de luminarias, potencia etc.

En la experiencia, cada red fue configurada para producir cuatro variantes con el fin de valorar diferencias en el consumo de energía y evaluar el comportamiento de los parámetros eléctricos, tomando como referencia las redes originales.

Las variantes para cada red fueron las siguientes:

- Redes de iluminación originales sin modificar, con luminarias existentes para lámparas SAP de 150 W, con balasto inductivo con compensación del FP individual (BIC) y conmutación de encendido y apagado con célula fotoeléctrica ubicada en el puesto de encendido. Esta variante se empleó como referencia.
- Redes de iluminación modificadas, con luminarias existentes para lámparas SAP de 150 W con BIC. El dispositivo de encendido y apagado por célula fotoeléctrica fue reemplazado un reloj astronómico (RA) en el puesto de encendido. Esta variante permitió determinar las diferencias en el consumo energético por el uso de reloj astronómico.
- Redes de iluminación modificadas, con luminarias existentes para lámparas SAP de 150 W. Los BIC fueron reemplazados por balastos electrónicos (BE) y como dispositivo de encendido y apagado se empleó un RA en el puesto de encendido. Esta variante permitió determinar las diferencias en el consumo energético por el uso de BE. Los BE para lámpara de SAP de 150W disponían de regulación de flujo luminoso (dimerizables) en tres escalones de potencia de salida:
 - 100% entre el encendido y hasta las 23:00h,
 - 85% entre las 23:00h y 24:00h y
 - 78% desde las 24:00h hasta el apagado.
- Las instalaciones de iluminación se modificaron, cambiando las luminarias originales, por luminarias más eficientes, con lámparas SAP 100 W, BE y control de encendido con RA. Esta variante permitió determinar las

diferencias en el consumo energético por el uso de luminarias más eficientes. Los BE para lámpara de SAP de 100W disponían de regulación de flujo luminoso (dimerizables) en dos escalones de potencia de salida:

- 100% entre el encendido y hasta las 24:00h y
- 84,4% entre las 24:00h y el apagado

Durante 45 días aproximadamente las redes fueron monitoreadas. El tiempo de medición de cada alternativa fue el mismo en todos los casos y las condiciones ambientales y eléctricas eran las situaciones reales esperadas.

Mediciones de consumo de energía activa para cada alternativa fueron registrados en el periodo anterior al encendido de las lámparas y posterior al apagado junto a los horarios de encendido y apagado. Esta rutina se realizó en forma diaria y durante 8 días consecutivos. Se realizaron además, inspecciones regulares de cada red, para detectar lámparas apagadas durante la noche o encendidas durante el día, cortes de energía nocturnos y todo aquello que pudiera inducir diferencias en las mediciones, como así también tener indicadores para comprobar la consistencia de resultados. Como ejemplo, en tabla 1, se indican los registros efectuados en el puesto de encendido 1 (PE1).

Tabla 1: Mediciones de consumo de energía en PE1 para la configuración original (variante a) con lámpara SAP 150W, balastos inductivos compensados y control por fotocélula.

IDENTIFICACIÓN DE PUNTO DE MEDICIÓN								
PUESTO DE ENCENDIDO		1		Nº DE MEDIDOR:	2232683			
PUESTO DE MEDICIÓN	ESTEBAN DE ECHEVERRIA ESQ. SAN JUAN							
EQUIPAMIENTO EXISTENTE								
ARTEFACTO	STRAND JC TUC 250							
LÁMPARA	SODIO AP OVOIDAL - E40 - 150W							
EQUIPO AUXILIAR	BALASTO INDUCTIVO - IGNITOR - CAPACITOR							
CONTROL ENCENDIDO	FOTOCELULA							
PUNTOS DE LUZ	30							
DISPOSICIÓN	LATERAL - COLUMNAS METÁLICAS - ALTURA 7 MTS - BRAZO 3 MTS							
MEDICIONES DE CONSUMO DE ENERGIA EN kWh - CON BALASTO EXISTENTE								
MEDICION	1	2	3	4	5	6	7	8
FECHA	27/08/2008	28/08/2008	29/08/2008	30/08/2008	31/08/2008	01/09/2008	02/09/2008	03/09/2008
HORA	09:00	09:00	09:00	08:50	09:00	08:50	08:50	08:50
Encendido		28/08 18:50	29/08 18:45	30/08 18:50	31/08 18:50	01/09 18:50	02/09 18:55	03/09 18:55
Apagado			29/08 7:30	30/08 7:30	31/08 7:30	01/09 7:30	02/09 7:30	03/09 7:25
Periodo			12:40	12:45	12:40	12:40	12:40	12:30
Lectura kWh	42123.4	42180.0	42237.5	42293.5	42349.5	42405.0	42460.5	42516.5
Lamp. Apag. de noche	1	1	1	1	1	1	1	1
Lamp. Enc. de día	0	0	0	0	0	0	0	0
Consumo kWh		56.6	57.5	56	56	55.5	55.5	56
Pot./lamp estimada W		154.1	155.5	152.5	152.5	151.1	153.1	154.5
perdidas estimadas		3%	4%	2%	2%	1%	2%	3%

Tabla 2: Valores en cada variante de Pot. de salida/Pot. nominal, Emed, % de Emed respecto de la Emed del escalón inicial y reducción de la eficacia de las lámparas respecto del primer escalón.

Parámetro	Escalón	Variante		
		a: Lum. original - SAP 150W y BIC	c: Lum. original - SAP 150W y BE	d: Lum. eficiente - SAP100W y BE
Pe/Pn		100%	100%	100%
E _{med} (Ix)	E1	19,9	24,9	21,4
E _{med} % de E1		100%	100%	100%
Eficacia reduc.		0%	0%	0%
Pe/Pn				85%
E _{med} (Ix)	E2	NC	18,2	17,2
E _{med} % de E1			73,0%	80,3%
Eficacia reduc.			14%	4,8%
Pe/Pn				78%
E _{med} (Ix)	E3	NC	14,3	NC
E _{med} % de E1			57,4%	
Eficacia reduc.			26,4%	

NC: No corresponde; Eficacia reduc.: % de reducción de eficacia de lámpara respecto del escalón inicial

Pe/Pn: Potencia medida de la instalación respecto a la Potencia en escalón inicial

Emed % de E1: Emed como porcentaje respecto de la Emed del escalón inicial.

Se realizaron además mediciones de parámetros eléctricos para obtener valores por fase de potencias, tensiones, corrientes, factor de potencia, y contenido de armónicos. También se realizaron mediciones de iluminancias en calzada y veredas, para garantizar que el valor medio y las uniformidades cumplan con las recomendaciones de la norma IRAM-AADL J2022-2 (1995) para la clasificación de zonas residenciales: Iluminancia media inicial Emed \geq 10lux, y uniformidades: Emín/Emed \geq 1/4, Emín/Emax \geq 1/8.

Los valores obtenidos de iluminancia media Emed, para cada escalón de regulación de flujo de los balastos en cada variante se indican en tabla 2.

3. RESULTADOS

Los registros obtenidos durante la experiencia de campo para las cuatro variantes fueron procesados y los resultados obtenidos observaron lo siguiente:

- El reemplazo de las células fotoeléctricas por relojes astronómicos, produce en promedio un 11% de ahorro de energía, debido a un mejor ajuste de los tiempos necesarios de funcionamiento.
- El reemplazo de los balastos inductivos compensados en FP por balastos electrónicos con salida estabilizada de tensión y reducción de flujo programada (BE) produce un 28% de ahorro energético.
- Diferencias de consumo del 21% se observaron debido al uso de luminarias más eficientes con lámparas de menor potencia (SAP 100W)
- El reemplazo de las luminarias originales (SAP 150W) por luminarias más eficientes con lámparas de menor potencia (SAP 100W) combinadas con balastos electrónicos y el encendido por reloj astronómico (variante d), produce un ahorro del 43% respecto de los consumos de las instalaciones originales.
- Para las instalaciones originales con balastos inductivos (variante a), el contenido de armónicos de tensión de las redes por fase mas desfavorable, es menor al indicado como límite por el ENRE 184/2000 el cual a su vez esta basado en la norma IEC 61000-2-2, siendo el TDH $V \leq 2,8\%$. En cuanto al contenido de armónicos de corriente según ENRE 99/97, superan los límites (consumidores T1, T2 y T3) con TDH $A \leq 28,4\%$ (Manzano et al. (2009)).
- Con los balastos electrónicos contenido de armónicos de corriente según ENRE 99/97, esta por debajo de los límites (consumidores T1, T2 y T3) con TDH $A \leq 6,5\%$ aún en el caso más desfavorable con el escalón del 70% de regulación de potencia (Manzano et al. (2009)).
- La reducción máxima de la iluminancia media, con el escalonamiento mas bajo de potencia de salida de los balastos electrónicos, se produce a las 24:00h cuando el trafico es reducido y la presencia de peatones ocasional. Aún siendo éste el caso, la Emed y las uniformidades observadas estaba por arriba de la mínima recomendada por IRAM AADL J2022-2 como puede se puede observar. en tabla 2. Generalmente ocurre que las instalaciones están sobre dimensionadas con valores de FM (factor de mantenimiento) por

debajo de 0,7 posiblemente debido a la necesidad de normalizar el número de puntos de luz por calle o a la poca difusión de lámparas de menor potencia.

- La eficacia de las lámparas (Lumenes/Watts) estimada en base a la Emed y a la potencia registrada se ve reducida en los escalones de reducción, lo cual es de esperar en los dispositivos reductores de flujo. Sin embargo para el mayor escalón se observó una reducción del 26,4% (ver tabla 2) lo cual no invalida los importantes ahorros energéticos observados.

4. CONCLUSIONES

El estudio demuestra que la optimización de la eficiencia energética de las instalaciones de alumbrado municipales producirá efectos en los siguientes niveles:

4.1. Nivel General

- Disminución del uso de los recursos naturales.
- Reducción de las emisiones de gases contaminantes debido a la menor producción de energía.

4.2. Nivel Municipio

- Mejora la calidad de la prestación de servicio al reducir las averías (Deco & Manzano, 2006) por variaciones de tensión con lo cual mejora la imagen del municipio.
- Reduce los costos de mantenimiento, disminuyendo el gasto Municipal, posibilitando su realimentación al sistema.
- Reduce los residuos de lámparas de descarga (Manzano & San Martín (2004)) al prolongar su vida útil al mantener la tensión de salida constante.

4.3. Nivel Tecnológico

- La aplicación del Reloj Astronómico (RA) contribuye a la eficiencia de la instalación con ahorro de energía por su precisión en la operación de comando, encendido y apagado de las instalaciones del Alumbrado Público. Contribuye a la seguridad del servicio por su prestación, prácticamente sin mantenimiento, siendo totalmente independiente de las condiciones ambientales o ubicación física (días nublados, sombras de un árbol o edificio, polución ambiental). No requiere reprogramación por cambios estacionales. También es importante destacar que al disminuir la cantidad de horas acumuladas de funcionamiento, contribuye a la disminución de los costos de mantenimiento programado por reposición de lámparas y equipos asociados. Su instalación es simple y de reemplazo directo de la célula fotoeléctrica sin ningún otro agregado.
- La aplicación del Balasto Electrónico dimerizable (BE) contribuye a la eficiencia de la instalación con el ahorro de energía en varios aspectos:
 - Disminuye las pérdidas por efecto Joule un 12% respecto del Balasto Inductivo (BI)
 - Estabilidad en la tensión de salida +/- 1% ante las variaciones de la tensión de red, esto contribuye a que la lámpara no se agote prematuramente.
 - La dimerización permite disminuir porcentualmente la potencia de salida a las necesidades de iluminación. Esto contribuye al ahorro de energía y al alargamiento de la vida útil de las lámparas.

- La aplicación de luminarias de mayor eficiencia contribuye a disminuir la potencia instalada de acuerdo a las necesidades de iluminación.

4.4. Nivel Económico

- En la aplicación de las nuevas tecnologías para instalaciones nuevas, el porcentaje de incremento de costos es del 15% respecto de una instalación convencional, debemos considerar también que una instalación nueva debe durar 25 años.
- En la aplicación de nuevas tecnologías para instalaciones existentes, debe realizarse un análisis de su estado y considerar que la amortización de la inversión únicamente con el ahorro de energía es de 3 (tres) años. Esto es teniendo en cuenta las tarifas actuales y sin considerar que las mismas no responden a la realidad.
- En todos los casos se debe considerar también la disminución de costos de mantenimiento, el cual requiere un estudio más detallado y estadístico; Deco, Manzano (2006).

Finalmente cabe indicar que en el caso de instalaciones donde los niveles sean ajustados a los recomendados (generalmente están considerablemente sobre dimensionadas) habrá que evaluar posibles efectos en la seguridad ciudadana en el caso de áreas de riesgo delictivo. Aún así, si bien la iluminación causa un efecto disuasivo y de sensación de seguridad, no resuelve los posibles problemas sociales ni económicos.

El impacto ambiental que producimos en todos los niveles de consumo de energía hace necesaria crear una conciencia ecológica que involucre al alumbrado público. No basta con tener tarifas de energía no subsidiadas para crear conciencia en los funcionarios municipales y en la población, hace falta también un trabajo de formación técnica del personal involucrado, difusión y aplicación responsable.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo ha sido realizado con subsidio de los proyectos CIUNT 26/E430 y Agencia FONCYT BID 1728/OC AR - PICT 2006.

REFERENCIAS

- Deco F, Manzano E. (2006). Evaluación de la calidad del servicio de alumbrado urbano mediante el índice de apagado. Actas de Lux América 2006, VIII Congreso Panamericano de Iluminación. Octubre de 2006 Montevideo, Uruguay.
- IRAM-AADL J 2022-2 (1995).
- Manzano E., Deco F., Gagliardi I. (2007). Considerations about quality management for urban lighting. *Proceedings of 26th Session of the Commission Internationale de L'Eclairage*, Beijing, China. ISBN 978 3901 906 596. July 2007.
- Manzano E., San Martín R. (2004). Waste disposal impact from street lighting. *Light & Engineering*, Znack Publishing House ISSN: 0236-2945, Vol. 12 No. 4 pp 60-65
- Manzano E.R., Carlorosi M., Tapia Garzón M. (2009) Performance and measurement of power quality due to harmonics from street lighting networks. *Proceedings of International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'09)* ISBN: 978 84 612 8010 8. April, 2009.
- Norma de Alumbrado público. Vías de tránsito. Clasificación y niveles de iluminación.
- von Weizsäcker E.U., Lovins A.B. Lovins L.H. (1997) Faktor Vier - Doppelter Wohlstand, *halbierter Naturverbrauch*. Editorial: Galaxia Gutenberg-Círculo de Lectores, Barcelona.