



Control inteligente para el ahorro de energía eléctrica en alumbrado publico

Autor- Yesid Alexis Salazar Romo

Resumen - El alto consumo de energía eléctrica en los alumbrados públicos, viene derivada fundamentalmente por la diversidad y autonomía de sus titulares públicos, como la elevada inversión económica necesaria para aplicar las medidas correctivas para la eficiencia energética Este proyecto se realiza con el fin de optimizar el consumo de energía eléctrica en los alumbrados públicos de una zona determinada de la ciudad de Pasto. Por esto es importante reducir este consumo porque otorga innumerables beneficios, como el ahorro económico y la protección del ambiente.

I. INTRODUCTION

. Con los sistemas de control se han logrado múltiples avances tecnológicos al momento de optimizar el ahorro de energía eléctrica, un sistema de control está definido como un conjunto de componentes que pueden regular su propia conducta o la de otro sistema con el fin de lograr un funcionamiento predeterminado. (Díaz, s.f.) El sistema de iluminación representa dentro del consumo energético de una instalación, un porcentaje significativo, con un peso relativo entre el 25Space | Iluminación Eficiente, s.f.). La automatización del encendido, apagado y atenuación que está establecido por el flujo de personas en un espacio determinado, permite un control cómodo y remoto con lo cual es posible optimizar dicho consumo y tener mayor eficiencia. (Nieves y Javier, s.f.) Para prestar un servicio de alumbrado público, además de energía, se requiere administración, operación y mantenimiento del sistema, de esto parte un buen servicio para el confort y seguridad de los peatones y vehículos, y una mayor eficiencia en el consumo de energía eléctrica; también se necesita conocer todos los factores que influyen a la hora de realizar un diseño de iluminación como tipología de la vía, necesidades lumínicas del lugar, elección de las luminarias de acuerdo a nivel de potencia y flujo luminoso, y las dimensiones de las partes que conforman la vía. etc. (Arias, s.f.). Por lo anterior, el objetivo de este proyecto consiste en mejorar la iluminación y consumo de energía eléctrica en alumbrados públicos de una zona determinada de la ciudad de Pasto, estableciendo una metodología que consiste en reunir aspectos técnicos y variables físicas. Realizando, además, un modelo matemático del sistema de iluminación para así diseñar y simular un sistema de control inteligente, haciendo uso de herramientas

de simulación y por ultimo obtener 2 conclusiones de la eficiencia.

II. ANÁLISIS

En el desarrollo de este trabajo se analizó la iluminación de la avenida Mijitayo, tiene una longitud aproximadamente 1036 metros aproximadamente, medidos a través de google earth. La avenida tiene dos sentidos para circulación vehicular, las vías están separadas por zonas verdes de aproximadamente un 1.5 metros, a cada lado de la vía hay un andén por el cual circulan peatones constantemente.

La iluminación se realiza a través de lámparas duales ubicadas al centro de la avenida, con brazos dobles de aproximadamente 2 metros lo que permite estar más al centro de cada una de las vías, además están ubicadas a una altura de aproximadamente 8 metros y una separación entre lámparas de 50 metros.

III. ANÁLISIS MATEMÁTICO SIN INCLUIR LA DINÁMICA

MODELO MATEMÁTICO DE ILUMINACIÓN

El modelo matemático ampliamente utilizado en diferentes trabajos de investigación es el planteado en la ecuación 1, este describe la iluminación percibida en un punto que se ubica bajo la fuente que la produce, en esta ecuación también tiene en cuenta la contribución que hacen las lámparas adyacentes.

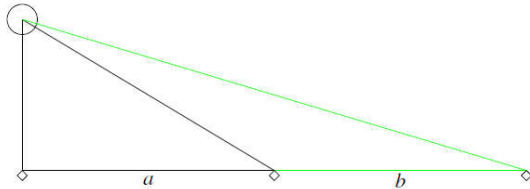
$$E_i(p) = \sum_{j=1}^N E_{ij} = \sum_{j=1}^N \frac{n_j p_j}{d_{ij}^2}$$

(ecuacion 1)

Donde N es el número total de fuentes luminosas, i representa el sensor y j se relaciona a la lámpara y E_{ij} es la iluminación percibida por el i-ésimo sensor la cual es producida por la j-ésima lámpara, p_j es la potencia aplicada a la j-ésima lámpara, n_j es el factor de proporcionalidad el cual depende de las condiciones de fabricación de la lámpara. Referenciando el sitio analizado en secciones anteriores se puede evidenciar que hay una distancia considerable de fuente de iluminación a otra, para el caso que se está analizando es aproximadamente 50 metros, por lo tanto, la contribución de

las lámparas $i = 1$ hacia $i = 3$ es casi imperceptible.

En la Figura 1 muestra la distribución de tres sensores marcados con un rombo y una fuente luminosa identificada con un círculo, también se muestran dos figuras geométricas, triángulos, formados entre los diferentes elementos. La hipotenusa de los triángulos rectángulos es la distancia al sensor 2 y 3, usando las ecuaciones de Pitágoras se puede calcular las distancias en mención.



(figura 1)

Las distancias a y b son iguales a 50m y con una altura es de 8 metros, la suma de $a+b$ es igual a 100m, por lo tanto, se tiene que el sensor $i = 3$ está ubicado a 100.3 metros de distancia de la lámpara $j = 1$. Usando la ecuación 2, que relaciona la componente vertical de iluminancia se tiene que

$$EV = I \cos^2(\alpha) \sin(\alpha) / h^2$$

(ecuación 2)

$$\cos(\alpha) = 8 / 100,3195 \alpha = 85,4287$$

Considerando una fuente de 100 cd se tiene

$$EV = 100 \cos^2(85,4) \sin(\alpha) / 8^2 = 1,05$$

Por otro lado, cuando para el sensor $i=1$ se tiene

$$EV = 100 / 8^2 = 1,05$$

Después de evaluar los parámetros se puede ver que el signo es negativo, esto se debe a que el aporte de esta lámpara al sensor $i=3$ es nulo, por lo tanto para el modelo se tendrá en cuenta sólo la lámpara que se encuentra contigua a la que se está analizando.

Con base en el anterior análisis y tomando en cuenta la estructura física de la avenida Mijitayo, se plantea el siguiente escenario para el análisis, utilizar dos filas de lámparas cada una con tres elementos, lo que se tiene un arreglo de 6 elementos.

Para el sensor $i = 1$ las lámparas $j = -1$, que sería la antecesora a $j = 1$, y $j = 2$, $j = 3$ no tendrá aporte para este sensor, para el caso del sensor $i = 2$, la contribución se realiza por medio de la lámpara $j = 1$, $j = 2$ y $j = 3$, y finalmente para el sensor $i = 3$, se relaciona el aporte de la lámpara $j = 2$ y la $j = 3+1$.

por lo tanto al desarrollar las ecuaciones para cada uno de los elementos se tiene las siguientes expresiones.

$$E1(p) = E1_{j-1} + E11 + E12$$

$$E2(p) = E21 + E22 + E23$$

$$E3(p) = E32 + E33 + E3_{j+1}$$

Hasta el momento se ha considerado que las fuentes luminosas son la lámpara que están ubicadas en puntos fijos, se asume que los valores son constantes, es decir se deprecia el aporte que realiza otro tipo de fuentes luminosas, como por ejemplo la lámpara de los automóviles que circulan por la avenida. Ahora se incluye fuentes móviles, pero se considera que los vehículos no siempre estarán haciendo uso de las vías de la avenida en cuestión, por lo tanto, no se consideran en el modelo, pero si se tiene en cuenta al momento de realizar el análisis.

Según RETILAB, en la tabla de clases de iluminación en la descripción menciona que las vías primarias o colectoras son de velocidad reducida de aproximadamente 30 km/h y se las puede clasificar como clase de iluminación M4 y su luminancia promedio mínima es de 0.8 cd/m. Revisando las condiciones que se han planteado a lo largo del documento, donde el aporte solo se realiza de lámparas adyacentes cercanas, las cuales para efecto de análisis serían 6 lámparas fijas y también se debe tener en cuenta el aporte realizado por fuentes de iluminación de los automóviles que transitan sobre la avenida. La fuente móvil producida por un automóvil en movimiento se modela bajo las siguientes condiciones: la velocidad será constante y su nivel de iluminancia se mantiene constante. Por lo tanto, se puede modelar con la expresión que modela una línea recta el intercepto con el eje y se toma como referencia el origen 0, para el cálculo de la pendiente se asume que la velocidad es de 30 km/h. La velocidad recorrida en un m/s del automóvil, entonces 50 metros se recorrerá en 6s.

$$Vel = 30 \text{ km/h} * 1\text{h}/3600\text{s} * 1000/1\text{km} = 8,3 \text{ m/s}$$

Considerando que el flujo luminoso de un automóvil está alrededor de 3200 se procede a estimar la ecuación de la recta, cabe aclarar que se considera una fuente ideal.

$$m = (y_2 - y_1) / (x_2 - x_1)$$

$$m = (3200 - 0) / (50 - 0) = 64$$

Por otro lado, las lámparas están en una posición fija por lo cual su contribución depende de la distancia entre el sensor de análisis y las lámparas, en este trabajo se tomará este aporte como perturbaciones al sistema las cuales se integran al sistema.

FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DE LAS LÁMPARAS.

Retomando la ecuación de eficiencia luminosa se tiene que es la relación que hay entre el flujo luminoso producido y la potencia eléctrica consumida, se asume que la función de transferencia es de primer orden se puede expresar mediante la ecuación.

$$F = lm / w$$

$$G = kl / \tau s S + 1$$

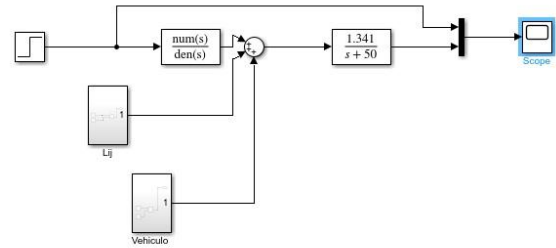


La eficiencia luminosa (lm/w) para una lámpara LED es de 90 y el tiempo de estabilización es de 80 ms por lo tanto $k_l = 90$, $\tau = 80\text{ms}$.

$$GL = 90 / 0,08S + 1$$

Reescribiendo

$$GL = 1125 / S + 12,5$$



(figura 2)

IV. FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL SENSOR

El sensor se modela a través de una función de transferencia de primer orden, el cual relaciona el flujo lumínico y la iluminación percibida por el sensor.

$$G_s = \text{lum}(s) / \text{lum}(s) = k_s / \tau_s S + 1$$

$$k_s = E_{p\max} d^0 / P_{\max} \eta$$

$$E_{p\max} = \phi L_{\max} C_u F_m / A / n$$

Dónde: $E_{p\max}$ es la iluminancia promedio máxima de una lámpara. ϕL_{\max} es el flujo luminoso máximo requerido por lámpara. F_m es el factor de mantenimiento. A es el área a iluminar en m^2 . n es número de lámparas. C_u es el coeficiente de utilización. Los valores de C_u, F_m son tomados de RETILAB.

$$k_s = 0,7$$

Finalmente la función de transferencia total del sistema será

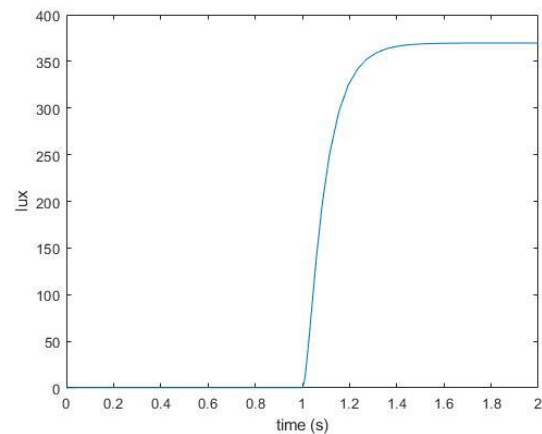
$$G_t = \text{lum}(s) / p(s) * \text{lum}(s) / \text{lum}(s) = \text{lum}(s) / p(s)$$

V. SISTEMA DE CONTROL INTELIGENTE

EVALUACIÓN EN LAZO ABIERTO

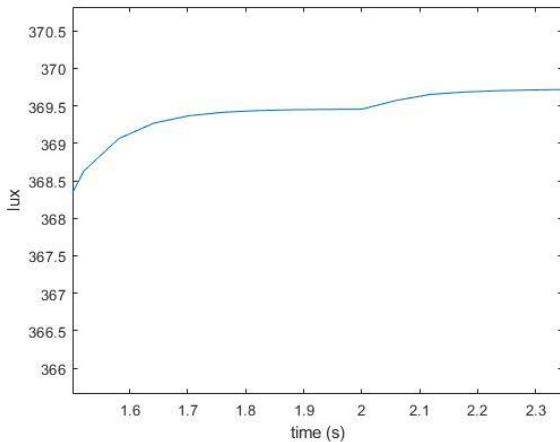
La Figura 2 muestra el esquema de control implementado en simulink para evaluar las condiciones de la función de transferencia frente a perturbaciones. Se observa las dos funciones de transferencia de la lámpara y del sensor, en la entrada se ubica la función escalón unitario, en la salida se cuenta con un elemento que permite la visualización, función scope de MatLab, de la señal controlada, también se cuenta con dos bloques que permiten simular el aporte de las otras lámparas y la lámpara móvil, que simula el paso de un automóvil.

En la Figura 3 se muestra la respuesta que tiene el sistema frente a una entrada escalón unitario, es importante mencionar que la función escalón unitario inicia en $t = 1\text{s}$. El sistema coordinado está representado así: en las abscisas se ubica el tiempo en segundos y en las ordenadas la cantidad de lux, se puede observar que el error en estado estable es grande aproximadamente 349 veces la referencia, el tiempo de establecimiento es de 0.4 segundos, para valores de entrada 0 se observa que la salida es también 0 como se puede observar en $t < 1\text{s}$.



(figura 3)

La Figura 4 muestra la perturbación de las lámparas adyacentes, esta se realiza a los dos segundos y es un dato constante, como resultado de esta perturbación se tiene que un incremento en la salida.



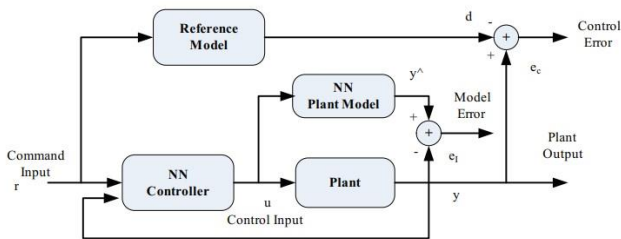
(figura 4)

ENTRENAMIENTO DE LAS REDES NEURONALES

Para entrenar la red neuronal se hace uso del aprendizaje supervisado, es decir, se debe conocer el par (entrada -salida) del comportamiento deseado el cual debe estar organizado en un dataset, también hay que tener en cuenta que para realizar este tipo de entrenamiento se debe contar con un volumen grande de información con el propósito que el entrenamiento sea bueno.

ESTRUCTURA DE CONTROL.

En la Figura 5 se observa el bloque de control implementado, el bloque denominado reference Model hace referencia al modelo prototipo de segundo orden deseado, el bloque planta es el proceso que se quiere controlar, una planta alterna modelada a través de redes neuronales y finalmente el bloque de control también construido con capas de redes neuronales.



(figura 5)

MODELO REFERENCIA

La función de transferencia de la planta está dada por la ecuación 2, descrita en secciones anteriores, se puede observar que es de segundo orden, por lo tanto, la ecuación de referencia también tiene que ser del mismo orden. Para ello se elige el modelo prototipo planteado en la ecuación 3 el cual es ampliamente usado en la literatura de control.

$$G = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

(Ecuacion 2)

Donde: ζ es el factor de amortiguamiento. ω_n es la frecuencia natural. Para obtener el comportamiento deseado, se debe calcular los coeficientes de la ecuación 2 usando las siguientes ecuaciones.

$$\zeta = -\ln(Mp) / \sqrt{\pi^2 + (\ln(Mp))^2}$$

Dónde: Mp es el sobrepeaso máximo.

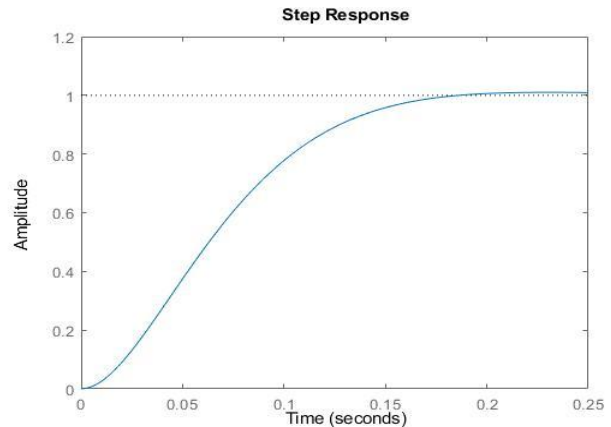
$$\omega_n = 4 / \zeta t_s$$

Dónde: t_s tiempo de asentamiento. En esta investigación el tiempo de asentamiento se toma como $t_s = 0,2s$ y el sobrepeaso máximo $Mp = 1\%$, reemplazando en las ecuaciones se tiene los siguientes resultados: $\zeta = 0,8261$ $\omega_n = 24,21$ Reemplazando en la ecuación 3 se tiene la ecuación 4.

$$G_{pro} = \frac{586,2}{s^2 + 40s + 586,2}$$

(ecuacion 4)

La Figura 6 muestra la respuesta del sistema deseado a una entrada escalón unitario que cambia de cero a uno en $t = 0s$, se puede observar que su respuesta es la deseada, es decir, cumple con los parámetros de diseño Mp y t_s .

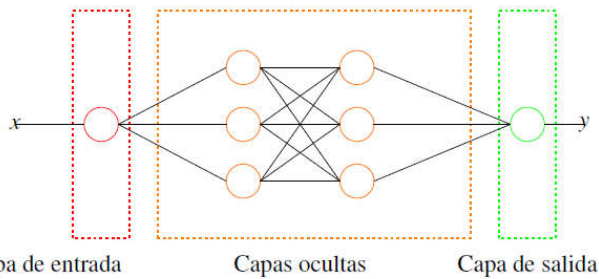


(figura 6)

REDES NEURONALES CONVOLUSIONAL

En este trabajo se usaron redes neuronales convolucionales y el entrenamiento, evaluación y prueba se realizaron a través de la técnica de validación cruzada que es ampliamente usada. En la Figura 7 se muestra la red neuronal usada, las capas ocultas

se establecieron en 12, y para entrenamiento se usaron 300 épocas.

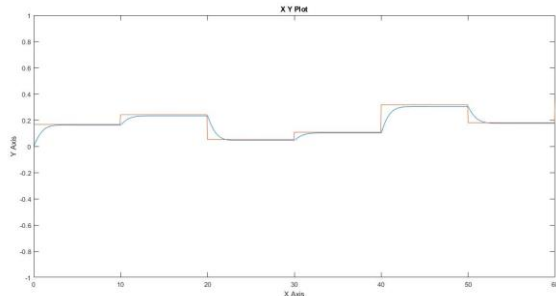


(Figura 7)

En la identificación de la planta usando redes neuronales se usa las tres etapas para ajustar los parámetros del modelo, la primera se encarga de calcular los pesos a esto se le conoce como entrenamiento, es donde se calculan los valores de los coeficientes para obtener valores deseados; la siguiente fase es la validación que usa una porción del Dataset para evaluar; finalmente, se encuentra la prueba (test) que se encarga de evaluar el modelo con datos que diferentes a los de entrenamiento y validación.

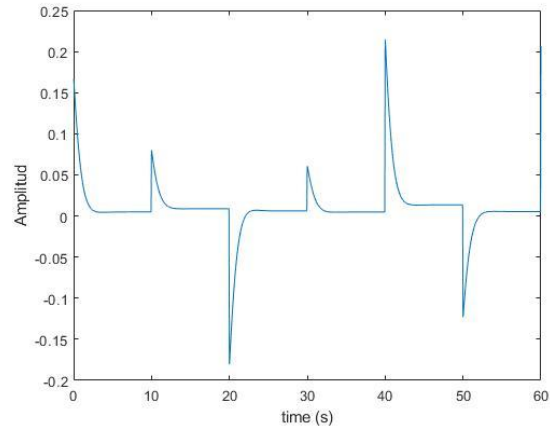
VI. EVALUACIÓN EN LAZO CERRADO

Finalmente se realiza la evaluación de todo el sistema con el fin de determinar el comportamiento del controlador frente a cambios producidos por perturbaciones, en la Figura 8 se ubica en el eje y valores de amplitud, estos están normalizados con el fin de disminuir errores en la simulación, así como también atenuar el costo computacional, el eje y representa el tiempo en segundos. la señal de color rojo es la señal de referencia la cual presenta cambios cada 10 segundos. La señal de color azul es la respuesta del sistema con el controlador implementado, se puede observar que sigue la referencia presentando errores en el estado transitorio lo cual es consecuente con los sistemas de control, también se observa que en estado estable presenta error.



(Figura 8)

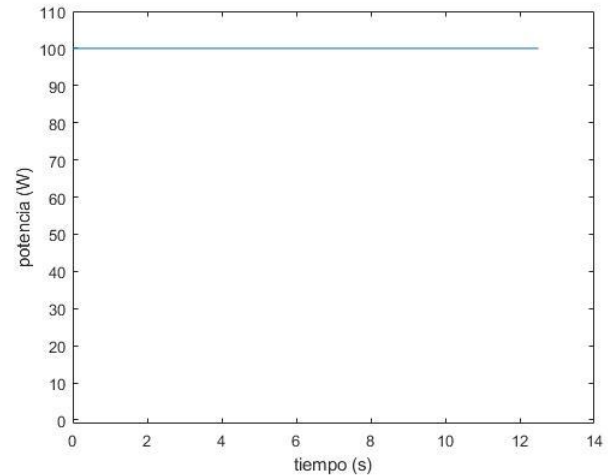
La Figura 9 muestra el error de seguimiento, es decir, aquí se presenta la diferencia entre la entrada y salida, se puede inferir que el error es grande en los cambios de dirección de la señal, así como también el error en estado estable.



(Figura 9)

ANÁLISIS DE CONSUMO DE POTENCIA

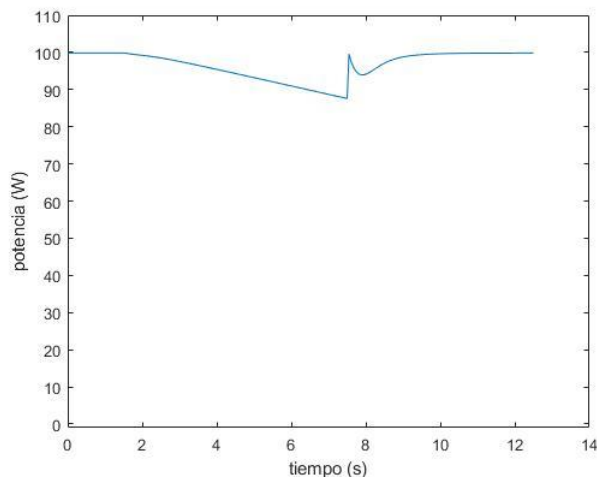
Según el reglamento técnico RETILAP establece la cantidad de lux que debe medir el instrumento para avenidas con movilidad reducida, también se conoce el consumo de potencia de la lámpara, así como sus demás parámetros. Por lo que se puede estimar el consumo de potencia en determinado tiempo. Usando métodos de cálculo numérico se puede estimar el valor del área, para este caso tiene un valor de 25100, en un tiempo de 12.5, entonces, la potencia media será igual a 2008 W. (ver Figura 10).



(Figura 10)

En este trabajo se propuso un control inteligente que está modelado por una red neuronal, esta busca mantener la referencia que para este caso es la cantidad de lux, medida por el sensor, su valor es el planteado por RETILAP para avenidas. Cuando una fuente luminosa externa impacta sobre el sensor el control propuesto debe ser capaz de mantener la referencia, teniendo en cuenta que la perturbación es positiva el aporte de la lámpara disminuye lo que lleva a que también disminuya el consumo de energía. Ahora considere que, una fuente luminosa proveniente de un automóvil que viaja a velocidad constante 30 Km/h perturba el sensor la acción de control responde realizando cambios en la potencia que es

suministrada a la lámpara como se puede ver en la Figura 11 donde se ve que el comportamiento de la potencia.



(Figura 11)

Realizando el cálculo aproximado en el tiempo de análisis se tiene que el área bajo la curva es de 24500 en un tiempo de 12.5, la potencia media es igual a 1960 w. Comparado con una potencia suministrada constantemente es de 48 W. Se puede inferir que cuando hay aporte de iluminación de un automóvil el consumo de energía disminuye, si este ahorro se propaga en todas las luminarias y en un tiempo de 12 horas, la disminución diaria es significativa.

V. CONCLUSIÓN

Minimizar el consumo energético de la iluminación en interiores y en exteriores siempre estará vigente, esto debido a que el consumo energético es alto. En la literatura reportada se han presentado diversas ópticas de investigaciones que van desde sistemas híbridos integrando energías limpias y sistemas convencionales, sistemas de control que permiten optimizar el consumo de potencia a través de control inteligente, entre otras investigaciones.

La iluminación en zonas peatonales y vías de la ciudad de San Juan de Pasto es relativamente buena tomando como base la inversión en sistemas de iluminación desplegados a lo largo y ancho de la ciudad. En la avenida Mijitayo es una zona iluminada que presenta su distribución de lámparas constante, las luminarias utilizadas en la zona mencionada es de tecnología led y están controladas por un sistema de fotocelda, es decir, el control es on-off para la potencia, lo cual se puede inferir que el gasto energético es aproximadamente igual en todas las lámparas y constante en su rango de funcionamiento.

El modelo matemático realizado en esta investigación se basa en ecuaciones diferenciales de primer orden que representan la lámpara y el sensor, el aporte o la relación que hay con las lámparas contiguas se identifica como perturbaciones. Finalmente, El sistema de iluminación

planteado presenta que el tiempo de establecimiento es menor a 0.3 segundos, también se observa que no hay sobrepaso considerando un nivel de referencia ampliado, es decir, hay error en estado estable grande, pero se mantiene a través del tiempo.

Las redes neuronales han tenido un auge bastante considerable en los últimos años, esto gracias a la evolución de la computación. La obtención de los datasets para realizar el entrenamiento, validación y test son fundamentales, esto debido a que se realiza aprendizaje supervisado donde se debe conocer el par entrada salida. En este trabajo se usó redes neuronales convolucionales, validadas usando técnicas de validación cruzada. Finalmente se observó que el diseño implementado muestra que hay seguimiento a la referencia y que los tiempos están acordes al diseño, pero también presenta errores en estado estable.

REFERENCES

- [1] Jagadeesh, Y., Akilesh, S., Karthik, S., y cols. (2015). Intelligent street lights. *Procedia Technology*, 21, 547–551.
- [2] Kovács, A., Bátai, R., Csáji, B. C., Dudás, P., Háy, B., Pedone, G., . . . Váncza, J. (2016). Intelligent control for energy-positive street lighting. *Energy*, 114, 40–51
- [3] Marino, F., Leccese, F., y Pizzuti, S. (2017). Adaptive street lighting predictive control. *Energy Procedia*, 111, 790–799.
- [4] Mohandas, P., Dhanaraj, J. S. A., y Gao, X.-Z. (2019). Artificial neural network based smart and energy efficient street lighting system: A case study for residential area in hosur. *Sustainable Cities and Society*, 48, 101499.
- [5] Rimal, B. P., Putro, I. E., Budiyo, A., Min, D., y Choi, E. (2011). System identification of nn based model reference control of ruav during hover. *Artificial Neural Networks-Industrial and Control Engineering Applications, InTech*, 395–420s.
- [6] Shahzad, G., Yang, H., Ahmad, A. W., y Lee, C. (2016). Energy-efficient intelligent street lighting system using traffic-adaptive control. *IEEE Sensors Journal*, 16(13), 5397–5405. doi: 10.1109/JSEN.2016.