



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA DE
VALPARAÍSO



Héctor Eduardo Sepúlveda Cariaga

Método de Goodbar. Proyectos de alumbrado público. Fundamentos y aplicaciones.

Informe Proyecto de Título de Ingeniero Eléctrico



**Escuela de Ingeniería Eléctrica
Facultad de Ingeniería**

Valparaíso, 18 de junio de 2018



Método de Goodbar. Proyectos de alumbrado público. Fundamentos y aplicaciones.

Héctor Eduardo Sepúlveda Cariaga

Informe Final para optar al título de Ingeniero Eléctrico,
aprobada por la comisión de la
Escuela de Ingeniería Eléctrica de la
Facultad de Ingeniería de la
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
conformada por

Sr. Enrique Piraino Davidson
Profesor Guía

Sr. Iván Kopaitic Otero
Segundo Revisor

Sr. Sebastián Fingerhuth Massmann
Secretario Académico

Valparaíso, 18 de junio de 2018

Agradecimientos

Quisiera mencionar, en primera instancia, a quienes guiaron y entregaron las herramientas necesarias para la realización de este trabajo, mi profesor guía Enrique Piraino D. y mi profesor correferente Iván Kopaitic O. Gracias a su ayuda y disposición, para conmigo y el proyecto, ya que siempre tuvieron las palabras y consejos necesarios para alentarme a conseguir los objetivos propuestos.

Tampoco quisiera dejar de mencionar a cada uno de los docentes que tuve en mi etapa de alumno, sin duda que cada uno de ellos significó un aporte importante para mi desarrollo como persona y profesional. También a mis compañeros, al personal administrativo, personal de servicio, etc., cada una de las personas que conforman la escuela de ingeniería eléctrica y la PUCV, pues harán que mi paso por la universidad lo recuerde por siempre como una de las mejores etapas en mi vida.

Y finalmente como no agradecer a mis padres, Héctor Sepúlveda Casanova y Solange Cariaga Gutiérrez, quienes fueron el sostén fundamental en todo este proceso, sin ellos nada de esto hubiera sido posible. A mí amada hija Magdalena Sepulveda Astudillo, ya que ella fue el motor que me hizo luchar cada día para poder llegar hasta aquí. A mis hermanos, mi familia en general, amigos, a todos aquellos que de una u otra forma aportaron en que esto sea posible, a todos ellos muchas gracias, ya que me dieron las fuerzas necesarias para superar todos los momentos de flaqueza que aparecieron en el camino.

Valparaíso, 18 de junio de 2018

Héctor Sepúlveda C.

Resumen

Si se menciona el nombre de Isaac Goodbar, lo más probable es que el común de la gente no sepa de quien se habla. Pero éste, fue un reconocido ingeniero, de nacionalidad argentina, que realizó importantes aportes en la ingeniería eléctrica. Es así como nace la inquietud, de investigar y comprender los fundamentos que él utilizó, en el desarrollo de un método de alumbrado público.

El método de Goodbar, es un método que sirve para diseñar sistemas de iluminación vial, que basa su funcionamiento en la generación de contrastes en la vía, con la finalidad de obtener mayores índices de visibilidad al usuario. Es ahí la importancia de investigar sobre este método, y ver si algunas de sus características de diseño, o metodologías, pudieran ser un aporte a lo que hoy se está realizando en el ámbito de la iluminación vial.

Los objetivos principales de este proyecto, son poder reconocer e identificar los fundamentos y conceptos utilizados en el método de Goodbar, para luego realizar una síntesis clara de todos los datos obtenidos, generando una adecuada comprensión de lo estudiado.

La metodología de trabajo, se centró principalmente en el estudio y análisis de dos documentos. Estos son las "Normas para el alumbrado público de la ciudad de Buenos Aires" [1], y "The specification of Street lighting needs" [2]. El primero de ellos, contiene todo lo referente al método de Goodbar, y el segundo son unas especificaciones realizadas en EE.UU. que muestran una metodología de diseño similar, y del cual se obtienen datos complementarios. Luego se realizó una síntesis de las gráficas y tablas expuestas en tales documentos.

Sistematizados y traspasados los datos análogos de las gráficas y datos incluidas en el documento de estudio, a ecuaciones y tablas con la ayuda de Excel, se procedió a realizar un ejemplo práctico en el cual se pusieron a prueba los resultados obtenidos de manera computacional, en comparación con los resultados obtenidos de manera análoga.

Las conclusiones que se pueden rescatar del estudio realizado, tienen que ver con la posibilidad real que hoy en día existe de utilizar los conceptos de diseño propuestos por Goodbar, principalmente porque se asegura que un obstáculo en la vía sea siempre visible, requiriendo de menores niveles de luminancia promedio, lo que finalmente originará ahorros en el ámbito energético y económico.

Palabras clave: Isaac Goodbar, Método de Goodbar, alumbrado público, contraste, luminancia.

Abstract

If you mentioned the name of Isaac Goodbar, chances are that the ordinary people do not know who is talked about. But this was a renowned engineer, of Argentine nationality, who made important contributions in electrical engineering. This is how the concern, investigate and understand the fundamentals he used, in the development of a method of lighting was born.

Goodbar method, is a method used to design systems of roadway lighting, which bases its operation in the generation of contrasts in the way, in order to obtain highest rates of visibility to the user. That is the importance of research on this method and see if certain characteristics of design, or methodologies, may be a contribution to what today is doing in the field of road lighting.

The main objectives of this project are to be able to recognize and identify the fundamentals and concepts used in the method of Goodbar, then make a clear summary of all the data, generating an adequate understanding of the studied.

The methodology, mainly focused on the study and analysis of two documents. These are the "rules for the public lighting of the city of Buenos Aires" [1], and "The specification of Street lighting needs" [2]. The first of them, contains everything related to the method of Goodbar, and second they are made in the USA specifications that show a methodology of similar design, and which additional data are obtained. Then was a synthesis of the graphs and tables outlined in such documents.

Systematized and pierced the analogues of graphic data and data included in the study document, equations and tables with the help of Excel, proceeded to make a practical example in which were tested the results in a way Computational, compared with the results obtained in a similar way.

Conclusions that can rescue from the study have to do with the real that possibility on day there is to use design concepts proposed by Goodbar, mainly because it ensures that an obstacle on the track is always visible, requiring lower levels of luminance average, that finally will create savings in energy and economic.

Key words: Isaac Goodbar, Goodbar method, street lighting, contrast, luminance.

Índice general

Introducción.....	1
1 Capítulo 1.....	3
1.1 Objetivos.....	3
1.1.1 Objetivos Generales.....	3
1.1.2 Objetivos específicos.....	3
1.2 Metodología de investigación.....	3
1.2.1 Estudio explicativo.....	4
1.3 Generalidades del método de Goodbar.....	4
1.3.1 Isaac Goodbar.....	4
1.3.2 Aplicaciones del método.....	4
1.4 Magnitudes Fotométricas.....	5
1.4.1 Iluminancia.....	5
1.4.2 Luminancia.....	6
1.5 Variables que intervienen en la visión.....	8
1.5.1 Tamaño visual.....	9
1.5.2 Contraste.....	9
1.5.3 Tiempo.....	12
1.5.4 Deslumbramiento.....	12
1.6 Conclusión del capítulo.....	13
2 Capítulo 2.....	14
2.1 Fundamentos del estudio.....	14
2.2 Objetivos del estudio.....	15
2.3 Desarrollo del método.....	15
2.3.1 Índice de Visibilidad.....	15
2.3.2 Directrices de diseño para el uso del concepto de visibilidad.....	19
2.4 Conclusión del capítulo.....	21
3 Capítulo 3.....	22
3.1 Consideraciones técnicas de la Norma.....	22
3.1.1 Relación entre contraste y luminancia.....	22
3.1.2 Factor de limitación del deslumbramiento.....	26
3.1.3 Efecto del deslumbramiento.....	27

3.1.4 Efecto de las variaciones de luminancia en el campo visual.....	28
3.1.5 Relación entre el contraste mínimo que debe percibirse y la variación de luminancia requerida para que el mismo sea visible.....	29
3.2 Conclusión del capítulo.....	31
4 Capítulo 4.....	32
4.1 Preparación de ábacos MR y ABR.....	32
4.2 Aplicación de nomogramas.....	36
4.3 Digitalización de los nomogramas.....	37
4.3.1 Nomogramas para una velocidad de 40 km/h.....	39
4.3.2 Nomogramas para una velocidad de 60 km/h.....	41
4.3.3 Nomogramas para una velocidad de 80 km/h.....	43
4.4 Conclusión del capítulo.....	44
5 Capítulo 5.....	45
5.1 Síntesis del metodo de Goodbar.....	45
5.1.1 Fundamentos del método.....	45
5.1.2 Explicación del método.....	46
5.2 Presentación resultados obtenidos.....	49
5.2.1 Tabla resumen.....	49
5.2.2 Ejemplo práctico.....	51
5.3 Conclusión del capítulo.....	52
Discusión y conclusiones.....	54
Bibliografía.....	56

Introducción

El presente informe de proyecto de título, se basa en la investigación y estudio de un método de iluminación de alumbrado público, desarrollado en la década de los '70 por el ingeniero argentino Isaac Goodbar. Este trabajo, buscará encontrar y averiguar los fundamentos en los cuales se basó el ingeniero, a la hora de plantear y desarrollar esta innovadora idea de iluminación, y además, encontrar la forma de aplicar este método con las herramientas informáticas que existen actualmente.

Se debe saber que el alumbrado público es el servicio de iluminación de las vías públicas, parques y demás espacios de libre circulación, que no se encuentran a cargo de ninguna persona natural o jurídica, distinta del municipio. El objetivo fundamental del alumbrado público es proporcionar la visibilidad necesaria para el normal desarrollo de las actividades dentro de estas.

Tan importante es esta área para la vida cotidiana, que a lo largo de la historia se han desarrollado diferentes métodos y normas de iluminación, las cuales se han ido modernizando y perfeccionando para asegurar siempre, los niveles óptimos necesarios para la comodidad y seguridad de los usuarios.

El método de alumbrado público que se estudiará en este informe se denomina "Método de Goodbar", y basa principalmente sus aplicaciones en la iluminación vial. Esto, producto de que su desarrollo y objetivos, están dirigidos fundamentalmente a proporcionar y asegurar los niveles de visibilidad adecuados en los automovilistas.

El ingeniero planteó que se puede implementar un sistema, en el cual, generando contrastes de iluminación, sea posible asegurar que un obstáculo en el camino, pueda ser observado por cualquier conductor, con el tiempo y distancia suficiente para realizar el frenado del vehículo, evitando así un accidente de tránsito.

Si bien el método pudo haber sido utilizado y perfeccionado con el tiempo, y haber hecho de él un suceso importante en el desarrollo de la iluminación vial, este solo se implementó explícitamente de forma práctica, en una avenida de la ciudad de Buenos Aires, y en las Normas para proyectos de alumbrado público de la misma ciudad. Posteriormente, esas aplicaciones fueron sustituidas por otras.

Con el tiempo, las nuevas tecnologías en el ámbito de la iluminación siguieron otra línea evolutiva, las cuales basaron su funcionamiento en la uniformidad de la iluminación, un hecho contrario a lo planteado por Goodbar. Es por eso que su método se presenta como visionario, pues se verán en el desarrollo de este informe, las ventajas que tiene diseñar sistemas basados en la visibilidad, y como en

la actualidad, las tecnologías están volviendo a aferrarse a la visibilidad como principal objetivo de diseño.

Es por eso que nace la necesidad de investigar acerca de lo propuesto por el ingeniero, quien por lo demás fue reconocido internacionalmente por sus aportes en el ámbito de la iluminación, donde además fue distinguido por la sociedad de ingeniería de iluminación de los Estados Unidos, en reconocimiento a su contribución al desarrollo del arte y ciencia de la iluminación.

Como principal documento oficial a disposición, están las “Normas para el alumbrado público de la ciudad de Buenos Aires” [1], implementadas en el año 1972, por lo tanto, estas serán la fuente fundamental de información y análisis para realizar los estudios del proyecto.

Otro documento importante con el que se cuenta, es un reporte internacional desarrollado en Estados Unidos, llamado “The specification of Street lighting needs” [2], que son las especificaciones de las necesidades de alumbrado público, desarrollado por la Administración Federal de carreteras de la ciudad de Washington, EE.UU. ¿Por qué es importante este documento? Principalmente porque da una idea, de un método para encontrar los índices de visibilidad necesarios para diversas velocidades de un automóvil, por lo tanto sus contenidos son similares y complementarios a los que se plantean en el método de Goodbar.

Por tanto, la investigación se realizará en consecuencia al estudio de estos dos documentos, involucrando los respectivos análisis, y tratando siempre de seleccionar los aspectos más relevantes, con la finalidad de cumplir con todos los objetivos del proyecto.

Una vez claros los objetivos, se espera seguir una línea de investigación acorde a las necesidades del proyecto. Luego, finalizado el desarrollo de este informe, se deberán generar las respectivas evaluaciones, las cuales se espera sean positivas, teniendo en cuenta que el trabajo realizado viene a saldar una deuda histórica, del medio de la ingeniería en iluminación, con un personaje tan importante como Isaac Goodbar.

1 Capítulo 1

Como primer paso en todo proyecto, deben definirse los principales objetivos con los cuales se espera cumplir una vez finalizado el trabajo. Es por eso que en este primer capítulo, además de definirse las metas, también se proponen las metodologías de estudio, junto con las primeras temáticas importantes a tener en cuenta, para la comprensión y desarrollo de este trabajo de título.

1.1 Objetivos.

1.1.1 Objetivos Generales

- Identificar los conceptos utilizados en el método de Goodbar.
- Sistematizar estos conceptos para lograr una adecuada comprensión de lo propuesto en este método.

1.1.2 Objetivos específicos

- Estudiar y conocer las características principales de un sistema de alumbrado público vial.
- Identificar los conceptos utilizados en el método de Goodbar, junto con su métrica y origen.
- Proyectar las gráficas utilizadas en términos de ecuaciones que permitan su utilización en programas basados en Excel.

1.2 Metodología de investigación

Con el fin de alcanzar los objetivos planteados anteriormente, se propone la siguiente metodología de estudio e investigación:

En principio se realizarán estudios y análisis a documentos que aporten la información necesaria para la comprensión de los fundamentos ocupados en el método de Goodbar. Estos documentos a investigar serán principalmente las “Normas para el alumbrado público de la ciudad de Buenos Aires” [1], y un reporte internacional realizado en EE.UU. llamado “The specification of Street lighting needs” [2].

Una vez analizados y recopilados los conceptos fundamentales utilizados en el método de Goodbar, se procederá a realizar una síntesis práctica de la información obtenida. Con esto se podrán confeccionar las planillas y gráficas de Excel, que por su parte, serán la base para obtención de los resultados esperados.

1.2.1 Estudio explicativo

El estudio representativo de este trabajo de título, será del tipo explicativo. Esto debido a que el aspecto que se investigará, es un modelo que ya se presentó y ejecutó en la década de los '70, por lo tanto, se inspeccionará un documento y un método ya existente.

Un estudio explicativo busca encontrar las razones o causas que ocasionan ciertos fenómenos. Su objetivo último es explicar por qué o cómo ocurre un fenómeno, que en este caso será el modelo de iluminación que será investigado.

1.3 Generalidades del método de Goodbar

1.3.1 Isaac Goodbar

Isaac Goodbar fue un ingeniero nacido en Argentina. Se graduó de la Universidad de Buenos Aires como Ingeniero Eléctrico en el año 1942. También posee el mismo título obtenido en el Instituto Tecnológico de Massachusetts, en Cambridge, USA.

Las principales contribuciones de Isaac Goodbar se dan en el ámbito de la iluminación, desarrollando estudios desde su época universitaria.

Desarrolló métodos que cubren una gran variedad de descubrimientos en el campo eléctrico y en el de la iluminación. Los más conocidos están referidos a los proyectos de iluminación de alta eficiencia y bajo brillo, controles para alumbrado público, tomando como base los fenómenos atmosféricos, y lentes plásticos que producen efectos laterales en la distribución de iluminación.

Isaac Goodbar, fue elegido en el año 1968 por la Sociedad de Ingeniería de Iluminación de Norteamérica (IESNA), entre los seis distinguidos miembros de la Sociedad, con el grado de Fellow, en reconocimiento a su contribución al desarrollo del arte y ciencia de la iluminación.

1.3.2 Aplicaciones del método

En el año 1972, se comienzan a implementar las nuevas "Normas para proyectos de Alumbrado Público" [1], de la ciudad de Buenos Aires, las cuales se basan en el trabajo realizado por el ingeniero Goodbar, y por tanto, son la principal aplicación de éste método.

El objetivo de estas normas es asegurar en todos los casos una visibilidad adecuada al tráfico a circular. Para ello, los valores de luminancia deberán hacer posible la detección de un obstáculo de cualquier valor de luminancia, y de dimensiones aproximadas a las de una persona, con un tiempo suficiente para evitar un accidente.

El método de Goodbar logró eliminar prácticamente el encandilamiento y la contaminación lumínica producida por las luces de los edificios, asegurando que un conductor que viaje a la velocidad permitida, pueda percibir a un peatón u otro obstáculo de dimensiones similares, y de cualquier color y reflexión, a una distancia suficiente para permitirle frenar a tiempo.

1.4 Magnitudes Fotométricas

La Fotometría es la ciencia que se encarga de la medida de la luz, estudia la capacidad que tiene la radiación electromagnética de estimular la percepción del ojo humano. Por lo tanto, y debido a que en este trabajo se estudiarán conceptos que tienen que ver principalmente con el sistema visual y el medio externo, es que se presentan algunas de las principales magnitudes fotométricas que serán de utilidad para comprender de mejor manera los conceptos propuestos por Isaac Goodbar en su método.

1.4.1 Iluminancia

Una magnitud fundamental es la Iluminancia (E), se define como el flujo luminoso que incide por unidad de área de una superficie dada. Se mide en lux ($\text{lux} = \text{lm}/\text{m}^2$). En general, cuando se mide la iluminancia sobre el plano de trabajo o Iluminancia Horizontal, se fija convencionalmente una altura de 0,85m. Cuando se necesita especificar la iluminancia sobre paredes o pantallas de video, las mediciones se hacen sobre planos verticales, lo que se conoce como Iluminancia Vertical. Su aplicación práctica es cuantificar la cantidad de luz que llega a una superficie. La iluminancia sigue la ley inversa de los cuadrados, que en el caso de una fuente puntual toma la forma:

$$E = \frac{I (cd)}{d^2 (m^2)} \quad (1-1)$$

Donde "I" es la intensidad luminosa medida en candelas, "d" es la distancia desde la fuente luminosa a la superficie que llega el flujo luminoso, y la superficie es perpendicular a la dirección de propagación de la radiación incidente. Estos aspectos se representan en la figura 1-1.

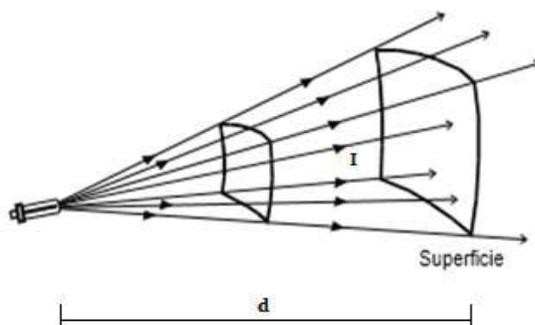


Figura 1-1: Iluminancia para una superficie perpendicular (fuente: <https://www.edutecne.utn>)

Cuando la superficie no es perpendicular a la dirección de propagación del flujo luminoso la ecuación debe ser modificada y se obtiene:

$$E = \left(\frac{I}{d^2} \right) \cdot \cos \theta \quad (1-2)$$

Donde θ es el ángulo de inclinación de la superficie, el cual se muestra en la figura 1-2.

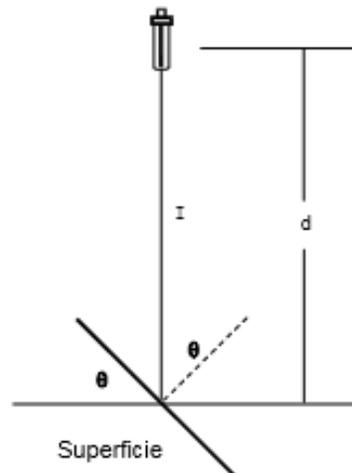


Figura 1-2: Iluminancia para una superficie no perpendicular (fuente: <https://www.edutecne.utn>)

1.4.2 Luminancia

La luminancia (L), de una fuente o de una superficie, se define como la intensidad luminosa emitida, por la fuente o la superficie, en la dirección de un observador, dividida por el área de la fuente o la superficie vista por el observador, es decir por unidad de área proyectada. Su unidad es la candela por metro cuadrado (cd/m^2) o el nits. Esta magnitud se ilustra en la Figura 1-3-a, para el caso de una lámpara fluorescente compacta. La línea de visión, desde el observador a la lámpara, forma un ángulo α con la línea perpendicular al frente de la lámpara. La luminancia en la dirección del observador (L_α) se calcula de la siguiente manera:

$$L_\alpha = \frac{I_\alpha}{A \cdot \cos \alpha} \quad (1-3)$$

Donde I_α es la intensidad de la fuente en la dirección del ángulo α , y el producto de A por $\cos(\alpha)$ es el área proyectada perpendicular a la dirección de visión.

En la Figura 1-3-b, se ilustra un ejemplo similar para una superficie que refleja luz. La dirección de visión del observador forma un ángulo α con la normal.

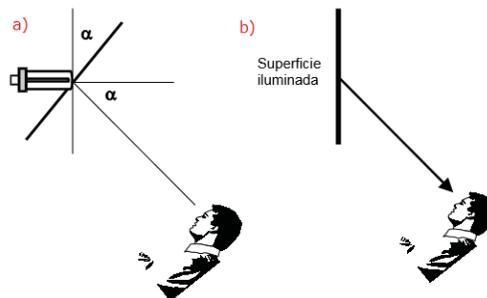


Figura 1-3: a) Una lámpara fluorescente compacta. b) Superficie que refleja luz (fuente: www.edutecne.utn)

En el caso de una superficie difusora perfecta la luminancia es independiente de la dirección de observación. Si se simboliza con I_0 a la intensidad según la normal, y con I_α a la que presenta en la dirección α de observación, se tiene que:

$$I_\alpha = I_0 \cdot \cos \alpha \quad (1-4)$$

Es decir, que en los emisores y difusores perfectos, la intensidad varía con el coseno del ángulo que forma la dirección de emisión con la normal, y se dice que emite según una ley del coseno o ley de Lambert. Los metales fundidos cumplen con la ley del coseno con bastante aproximación por lo que se suele usar como difusor patrón al óxido de magnesio. También son buenos difusores los vidrios esmerilados, las porcelanas blancas esmeriladas, el yeso, etc. Cuando se supone un emisor o un difusor perfecto se emplea para el valor de luminancia constante el símbolo L , sin necesidad de especificar el ángulo. En la Figura 1-4 se representan las distintas posibilidades, en a) la situación de una superficie que refleja en forma especular, en b) el caso de un difusor perfecto y en c) la de un reflector que en parte es especular y en parte difusor.

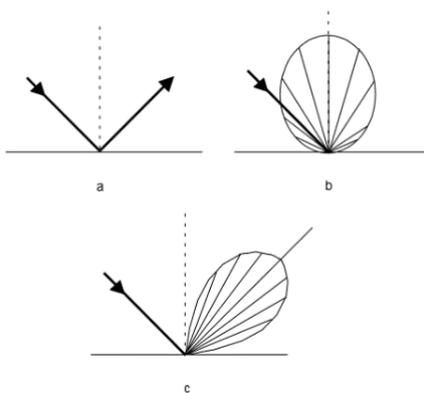


Figura 1-4: a) reflector especular. b) reflector difuso. c) reflector mixto (fuente: www.edutecne.utn)

En el caso de una superficie que refleja perfectamente en forma difusa se puede demostrar que, si su factor de reflectancia es ρ , la relación entre la iluminancia (E), es decir la radiación de luz incidente, y la luminancia, es decir la reflejada desde ella, viene dada por la expresión:

$$L = \rho \cdot E / \pi \quad (1-5)$$

Si la superficie no es perfectamente difusora en lugar del factor de reflectancia se usa el factor de luminancia (q) que es el cociente entre la luminancia de la superficie reflectora, vista desde una dada dirección, a la luminancia de una superficie blanca difusora iluminada idénticamente, en este caso la ecuación es:

$$L = q \cdot E \quad (1-6)$$

La luminancia es una magnitud fotométrica de excepcional importancia por ser la variable que aprecia el ojo. La luminancia de una superficie tiene su correlato perceptual en la claridad de la misma, aunque la relación no es directa ni independiente de otras variables, como la composición espectral de la

radiación o las condiciones de adaptación. Es la magnitud que mejor permite indicar la calidad de la iluminación desde el punto de vista del usuario, la cual, junto a la iluminancia son las dos magnitudes más usadas por los diseñadores de sistemas de iluminación para cuantificar fotométricamente el medio ambiente visual.

De forma no rigurosa, se puede considerar que el equivalente psicológico de la luminancia es el "brillo". Por ejemplo, considerando el caso de la emisión o reflexión de luz por parte de superficies planas y difusas, la luminancia indicaría la cantidad de flujo luminoso que el ojo percibiría para un punto de vista particular. En este caso, el ángulo sólido que interesa es el subtendido por la pupila del ojo.

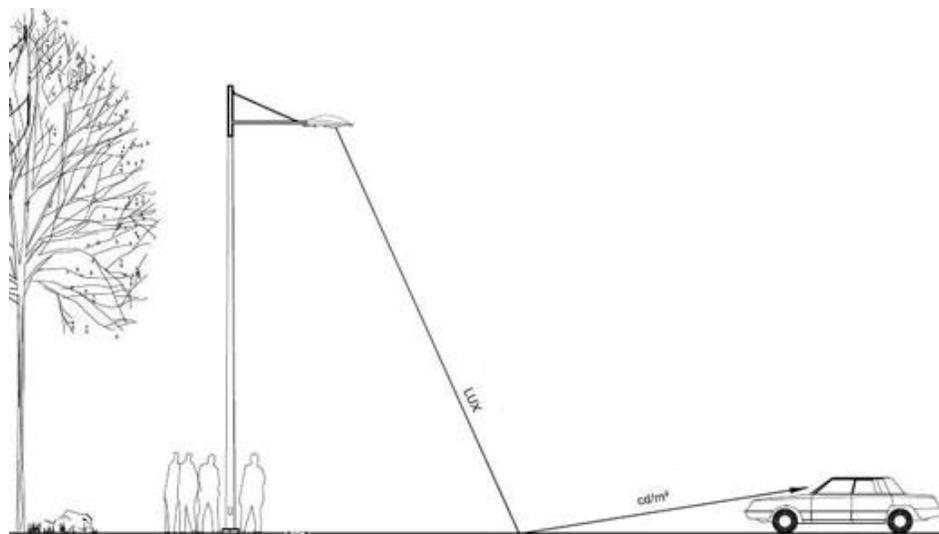


Figura 1-5: Ejemplo de Iluminancia (lux) vs Luminancia (cd/m²) (fuente: <https://www.edutecne.utn>)

1.5 Variables que intervienen en la visión

Los factores externos que influyen sobre la formación de una buena imagen en la retina pueden dividirse en dos clases: los subjetivos y los objetivos.

Los primeros dependen del propio individuo como su salud visual (depende de la edad y del deterioro de la vista), el nivel de atención en lo que mira, si está en reposo o en movimiento, o la comodidad visual (nivel de iluminación y deslumbramiento). Mientras que los segundos dependen de lo que estemos mirando, del objeto visual. Son los factores objetivos y son el tamaño, la agudeza visual, el contraste y el tiempo.

A continuación, se presentan algunas variables y estímulos que afectan en la visual, y que son necesarios de conocer para el futuro estudio del método de alumbrado vial que se analizará.

1.5.1 Tamaño visual

La percepción visual del tamaño se encuentra fundamentada en los mecanismos de adaptación del ojo a la distancia -acomodación y convergencia-, con la adición del tamaño de la imagen del objeto en la retina. Resulta obvio que la percepción del tamaño no puede limitarse al tamaño de la imagen del objeto en la retina, puesto que la distancia del objeto afecta al tamaño, por lo que es necesaria la participación de la información proporcionada por los mecanismos que abarcan lo referente a la distancia.

Por su parte, la percepción de la distancia está relacionada con el ángulo visual del objeto, así como también el ángulo visual está afectado por el tamaño y la distancia del mismo. Por lo tanto, si el ángulo visual es mayor, el objeto se encuentra a menor distancia.

En la figura 1-6, se puede apreciar como varía el tamaño y el ángulo visual en relación a las distancias, en donde se observa que objetos del mismo tamaño, a diferentes distancias, tienen ángulos distintos. Por el contrario, objetos de diferentes tamaños y distancias, pueden tener el mismo ángulo.

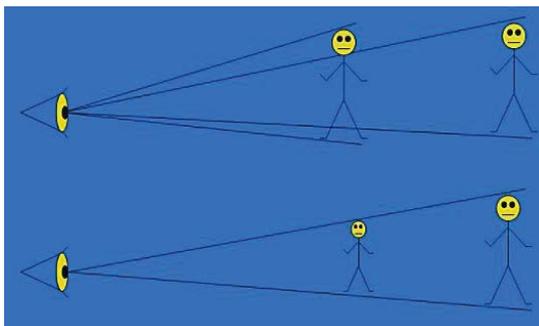


Figura 1-6: Ejemplo ilustrativo del tamaño visual en función de la distancia (fuente: <https://recursos.citcea.upc.edu>)

1.5.2 Contraste

El contraste se produce por diferencias entre colores o luminancias entre un elemento del campo visual y el fondo. Mientras mayor sea el contraste, mejor veremos el objeto, más detalles distinguiremos y menos fatigaremos la vista. Una buena iluminación ayudará bastante y puede llegar a compensar bajos niveles de contraste en colores, aumentando la luminancia.

Esta es la idea principal en la que se basa el método de Goodbar, desarrollando entonces un sistema en el cual, con mayor contraste, obtiene mejores resultados de visibilidad.

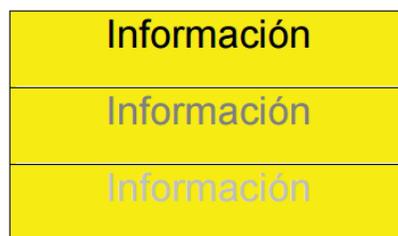


Figura 1-7: Diferencia de contrastes (fuente: <http://www.scielo.br>)

El contraste de luminancia de un objeto es una medida de su luminancia, relativa al fondo sobre el cual es visto. Cuánto más grande es el contraste de luminancia, más fácil es detectar el estímulo. Hay, en términos generales, dos formas diferentes de definir el contraste de luminancia. Para estímulos que son vistos sobre un fondo uniforme, el contraste de luminancia se define por convención como:

$$C = \frac{L_o - L_f}{L_f} [-] \quad (1-7)$$

Donde C representa el contraste de luminancia, L_f la luminancia del fondo y L_o la luminancia del objeto o detalle. Esta ecuación es ampliamente usada para estímulos que tienen detalles más oscuros que el fondo, como por ejemplo para textos impresos, y se obtienen valores de contrastes entre 0 y 1.

Cuando los detalles son más claros que el fondo esta definición de contraste da valores desde 0 hasta infinito. Para estímulos que tienen patrones periódicos de luminancias, por ejemplo, redes, el contraste de luminancia o modulación, en general se define por:

$$C = \frac{(L_{max} - L_{min})}{(L_{max} + L_{min})} [-] \quad (1-8)$$

Donde L_{max} es la luminancia máxima y L_{min} es la luminancia mínima. Esta fórmula da valores de contrastes de luminancia que varían desde 0 a 1. La iluminación puede cambiar el contraste de luminancia de un estímulo si produce deslumbramiento fisiológico en el ojo, o reflexiones de velo sobre el objeto, o modificando la radiación espectral incidente cuando están involucrados estímulos de colores.

Un objeto con contraste de luminancia cero o muy bajo, puede ser detectado si difiere en color del fondo, es decir, si tiene contraste cromático. La iluminación puede acentuar, o disminuir, el contraste cromático de un estímulo, según la composición espectral de la emisión de la fuente de luz utilizada.

Como todos los sistemas que procesan imágenes, el sistema visual trabaja mejor cuando la imagen es clara y nítida. La nitidez del estímulo puede ser cuantificado por la distribución de frecuencia espacial del estímulo - una imagen nítida presenta componentes de frecuencias espaciales altas, mientras que una imagen borrosa las ha perdido.

Umbral de contraste

El umbral de contraste se refiere a la habilidad del sistema visual para detectar, discriminar o reconocer diferencias de luminancias entre el objeto y el fondo contra el cual es presentado. El umbral de contraste es el **contraste mínimo perceptible** para una adaptación dada del ojo, o sea, la menor cantidad de contraste necesario para poder ver un objeto.

Sensibilidad al contraste relativo (RCS)

La sensibilidad al contraste relativo, es la capacidad que tiene el sistema visual para discriminar un objeto del fondo en el que se encuentra situado. Se puede definir como la inversa del umbral de contraste. Por tanto, una persona que necesite mucho contraste para poder distinguir un objeto presentará un valor de sensibilidad al contraste relativo (RCS) muy bajo y viceversa.

La Figura 1-8, muestra la dependencia de la función sensibilidad al contraste a la luminancia de adaptación.

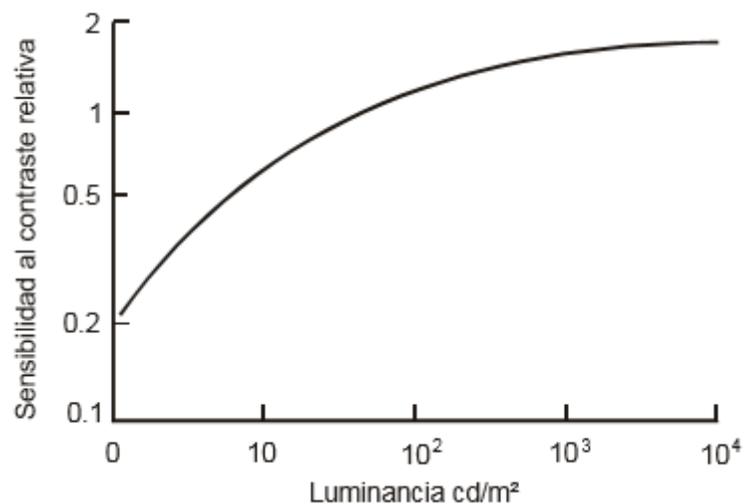


Figura 1-8: Función de Referencia. Sensibilidad al contraste relativo (RCS) (fuente: <http://www.elsevier.es>)

Se puede apreciar que a medida que la luminancia aumenta, la capacidad del sistema visual para detectar diferencias de luminancias mejora, hasta alcanzar un valor asintótico.

Una regla práctica y útil en el diseño de iluminación es que, para que una tarea sea fácilmente visible, es necesario que el contraste de luminancia sea al menos dos veces el umbral de contraste (o contraste mínimo).

1.5.3 Tiempo

El tiempo del que se dispone para ver algo, va a determinar la nitidez o no de una percepción. La percepción de las imágenes no es instantánea, requiere cierto tiempo para poder ser transmitida hasta su interpretación cerebral. Cuanto más tiempo tengamos para ver un objeto, mayor facilidad habrá a la hora de apreciar sus detalles, sobre todo si la iluminación es escasa. Para una visión rápida se requiere más luz. Por ejemplo: se requiere más luz para ver un partido de pingpong que para ver uno de tenis.

1.5.4 Deslumbramiento

Es el efecto visual que se produce cuando el ojo humano recibe repentinamente una intensidad lumínica superior a la acostumbrada (2000 lux por ej.), generando una fatiga visual. Generalmente todos conocen comúnmente este fenómeno como encandilamiento, pero en términos técnicos se le denomina deslumbramiento.

El deslumbramiento es un fenómeno de la visión que produce molestia o disminución en la capacidad para distinguir objetos, o ambas cosas a la vez, debido a una inadecuada distribución de luminancias, o como consecuencia de contrastes excesivos en el espacio o en el tiempo.

Este fenómeno actúa sobre la retina del ojo en la cual produce una enérgica reacción fotoquímica, insensibilizándola durante un cierto tiempo, transcurrido el cual, vuelve a recuperarse.

Los efectos que originan el deslumbramiento pueden ser de tipo psicológico (molesto) o de tipo fisiológico (perturbador). En cuanto a la forma de producirse puede ser directo como el proveniente de lámparas, luminarias o ventanas, que se encuentren situadas dentro del campo visual, o reflejado por superficies de gran reflectancia, especialmente superficies especulares como las del metal pulido.

Los principales factores que intervienen en el deslumbramiento son:

- La luminancia de la fuente de luz o de las superficies iluminadas. A mayor luminancia corresponde mayor deslumbramiento.
- Las dimensiones de la fuente de luz en función del ángulo subtendido por el ojo a partir de los 45º con respecto a la vertical
- La situación de la fuente de luz. Cuanto más lejos se encuentre la fuente en la línea de visión, menor deslumbramiento produce. También disminuye el deslumbramiento a medida que la fuente queda más por encima del ángulo visual.
- El contraste entre la luminancia de la fuente de luz y la de sus alrededores. A mayor contraste de luminancia, mayor deslumbramiento.
- El tiempo de exposición. Una luminancia de valor bajo puede producir deslumbramiento si el tiempo de exposición es largo. Dado los efectos tan perjudiciales que produce el deslumbramiento, deben tomarse todas las medidas posibles para evitarlo.

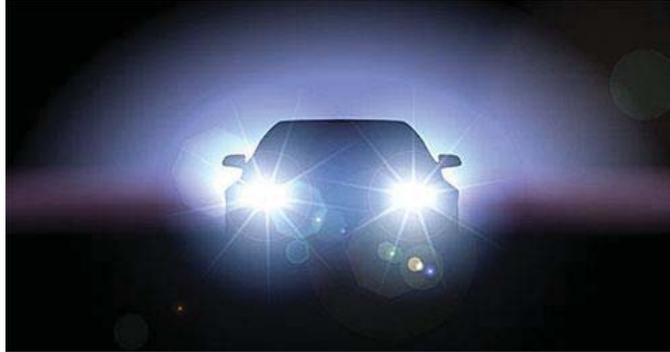


Figura 1-9: Ejemplo de deslumbramiento (fuente: <https://www.geico.com>)

1.6 Conclusión del capítulo

El conocer hacia dónde va dirigido el estudio, permitirá centrar los esfuerzos en analizar solo las temáticas realmente influyentes en la idea central del proyecto, entregando así una ruta de investigación clara, por la cual se deba transitar para llegar a cada uno de los objetivos planteados.

Además se puede apreciar, que para generar un sistema de alumbrado público eficiente e integrado, se deben manejar ciertas magnitudes básicas y variables, que influyen al momento de diseñar o proponer un método de iluminación como el propuesto por Goodbar.

2 Capítulo 2

En este capítulo se mostrarán de manera resumida, unas especificaciones de iluminación de alumbrado público, realizadas en Estados Unidos por la Administración Federal de Carreteras. Este ejercicio tiene por objetivo analizar un documento oficial e internacional, que propone y utiliza las mismas ideas o conceptos propuestos por el ingeniero Goodbar en su método, por lo tanto, se podrán hallar ciertos factores que ayuden a identificar con más claridad, la idea central desarrollada en el método de Goodbar.

2.1 Fundamentos del estudio

Hacia fines de la década de los '60, se había avanzado mucho hacia la estandarización en la iluminación de interiores, por lo que parecía deseable explorar esas nuevas tecnologías para el uso del entorno vial. El principal motivo impulsor para realizar cambios, fue en parte, el reconocimiento de las limitaciones del sistema ampliamente aceptado hasta ese momento, el cual se basaba en especificar las necesidades de iluminación, en unidades de luz incidente.

Las especificaciones de iluminación se daban típicamente como unidades de flujo promedio con límites de uniformidad o dispersión,

La especificación de iluminación siempre sufrió una larga historia de debate, especialmente cuando se intentaban proporcionar estándares internacionales, pues hubo mucho desacuerdo sobre la eficacia de algunos de criterios justificativos; pero a su vez estos criterios generalmente se reconocieron abiertos a la discusión y al compromiso de encontrar mejoras y soluciones.

Como se dijo anteriormente, la fuente fundamental de desacuerdo se daba en cuestiones de unidades de flujo, pues muchos grupos de la época, responsables de establecer dichos estándares, apoyaban la idea de expresar estos requisitos en términos de la luminancia del pavimento.

Luego, y dado que el ojo humano requiere de luz reflejada para la detección de objetos en el espacio, este enfoque se relacionó directamente con las necesidades de los conductores. Además, se sabe que la mayoría de los estudios científicos sobre los requisitos visuales de un conductor, se debían realizar en términos similares, o sea en términos de luminancia. Pero ese hecho, presentaba un gran dilema, y era principalmente que la luminancia del pavimento no era fiable de conocer a partir del solo hecho del conocimiento de la distribución de salida de flujo de las distintas luminarias, fundamentalmente debido a la difusión poco uniforme de la luz reflejada en las distintas superficies de pavimentación.

Por otra parte, el mecanismo de percepción visual humana responde sutilmente a pequeñas diferencias en la intensidad de luminancia y la duración de esta exposición. Por lo tanto es fundamental que las limitaciones de este sistema de procesamiento de la información, tuvieran en cuenta el contexto de la operación humana al momento de comenzar los estudios.

En consecuencia, se hizo fundamental y necesario abordar este problema en términos de información del conductor y las necesidades de visibilidad.

2.2 Objetivos del estudio

Asimismo como este trabajo tiene por objetivo la comprensión de los conceptos utilizados por el ingeniero en su método de iluminación de alumbrado público, en su tiempo, los realizadores de estas especificaciones, también buscaron desarrollar modelos matemáticos y cuantitativos, a partir de las nociones propuestas por Isaac Goodbar unos años antes.

Fue así entonces, que se definieron los siguientes 5 objetivos para la realización de estos estudios.

1. Identificar un método para la cuantificación de la visibilidad, que tenga una base de rendimiento visual válida y que sea adecuada para el uso en el diseño de sistemas de alumbrado vial.
2. Determinar la precisión de este método como una medida del rendimiento visual de los automovilistas, en un entorno real de carretera.
3. Desarrollar un método para la especificación de las necesidades de visibilidad de los automovilistas.
4. Desarrollar un método para la predicción de la distribución de visibilidad a lo largo de una carretera, basada en el conocimiento de la geometría de la carretera, el tipo de pavimento y la luminaria, incluyendo consideraciones de: espaciado, alero, altura de montaje y distribución de la potencia de las luminarias.
5. Desarrollar un método para la especificación de condiciones justificadas, que afecten el nivel de visibilidad requerido para una variedad de factores situacionales comunes a las vías urbanas.

2.3 Desarrollo del método

A continuación se explica cómo se fue desarrollando este método en particular.

2.3.1 Índice de Visibilidad

Primero, con el fin de determinar las necesidades de visibilidad de los automovilistas para la tarea de detectar un obstáculo en las carreteras, se requiere un control rígido de la variable independiente, que en este caso será la visibilidad. Además, es esencial un método preciso para medir las respuestas de una gran muestra imparcial de automovilistas.

Se llevaron a cabo experimentos en un lugar con bajo volumen de tráfico, y el propósito de los experimentos fue determinar la brecha de separación de tiempo a la que respondieron los automovilistas a un problema visual de características fotométricas conocidas.

La hipótesis básica que rige esta investigación es que la separación o brecha de tiempo que caracteriza las respuestas a objetivos de baja visibilidad debe ser altamente restringida y por lo tanto correspondientemente más corta que la brecha que caracteriza las respuestas a un objetivo de mayor visibilidad.

A partir de esas condiciones, se diseñó un método para controlar la velocidad y la ubicación del vehículo, que permitieron tener un seguimiento preciso de las respuestas de los automovilistas desprevenidos al problema visual. Las respuestas de más de 1300 conductores des alertados bajo 23 condiciones de visibilidad de tareas visuales, se controlaron y registraron electrónicamente.

La medida de rendimiento básica fue el tiempo de intercepción con el objetivo, denominado tiempo para llegar al objetivo (TIME-TO-TARGET). Esta es la separación temporal entre el vehículo y el objetivo, en el punto de una maniobra evasiva.

La figura 2-1 muestra e ilustra esta relación a partir de los resultados obtenidos, donde se aprecia claramente que con índices mayores de visibilidad, se podrán ver con antelación las tareas visuales, es decir, el tiempo desde que se ve el objeto, hasta que se llega a él, es mayor.

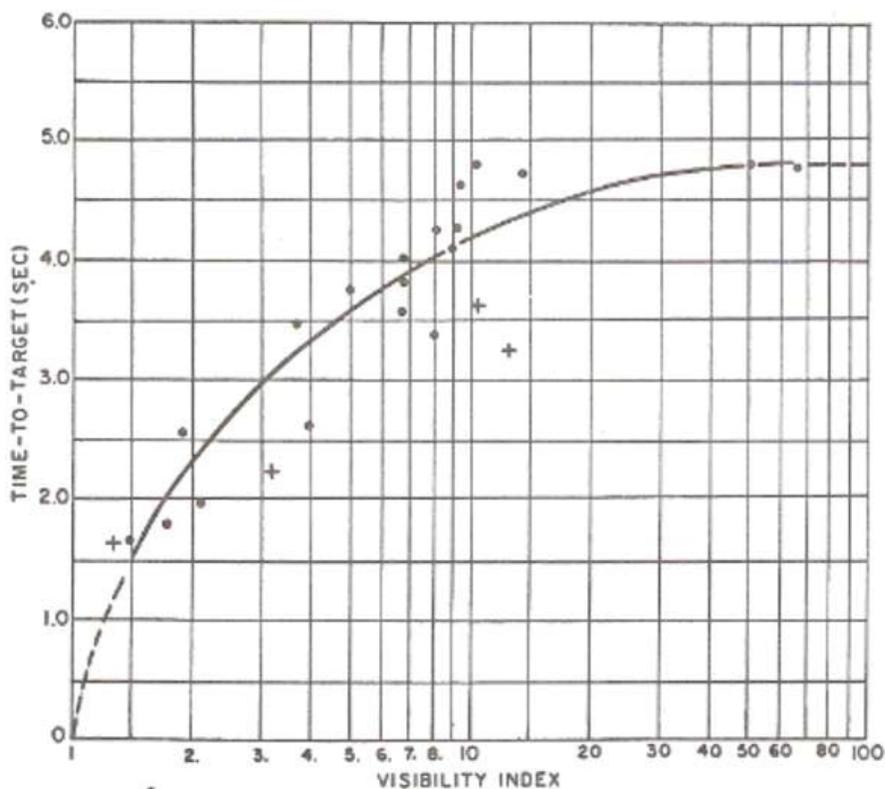


Figura 2-1: Línea de regresión para las respuestas medias del conductor (datos brutos) y el índice de visibilidad (fuente: Federal highway administration, Effectiveness of highway arterial lighting)

El índice de visibilidad (%) utilizado como una medida de visibilidad del objeto, está determinado por la ecuación 2-1, donde C (-) es el contraste mínimo deseable y se calcula como muestra la ecuación 2-2.

$$VI = C \cdot (RCS_{lf}) \cdot DGF \quad (2-1)$$

$$C = \frac{L_o - L_f}{L_f} = \frac{\Delta L}{L_f} \quad (2-2)$$

Donde:

C : Contraste físico (similar al contraste mínimo calculado en las normas de Isaac Goodbar).

RCS_{Lf} : Sensibilidad al contraste relativo para conductores adaptados al nivel de luminancia de fondo.

L_o : Luminancia del objeto o tarea visual.

L_f : Luminancia de fondo.

DGF : Factor de deslumbramiento por discapacidad.

$$DGF = \frac{L_f}{L_f'} \cdot \frac{(RCS_{L_f'})}{(RCS_{L_f})} \quad (2-3)$$

Donde:

L_f' : Luminancia de fondo (L_f), más Luminancia de velo (L_v) dividida por una corrección para el deslumbramiento de la esfera base.

El principal hallazgo fue que las respuestas de los conductores a objetivos cuantificados fotométricamente, fueron predichas con un alto grado de precisión. Sin embargo, queda por determinar cómo se puede incorporar esta información en un sistema para la especificación de la iluminación. La pregunta más difícil de responder, dada la realidad del requerimiento económico y energético, es: ¿cuánta visibilidad es suficiente? En este contexto, es útil observar la distancia de parada del conductor o los requisitos de tiempo, ya que la métrica utilizada se basa principalmente en el tiempo de respuesta del conductor.

La principal conclusión de esta fase del proyecto fue que las necesidades de visibilidad del conductor podrían deducirse del conocimiento de la velocidad y los requisitos de frenado relacionados. Es decir, la visibilidad puede y debe prescribirse para proporcionar una distancia de frenado segura.

La figura 2-2 proporciona la condición de visibilidad mínima prescrita requerida por los conductores promedio y del percentil 15 (en términos de rendimiento visual) para responder a un objetivo estandarizado con tiempo suficiente para ejecutar una respuesta de frenado segura.

Se ha recomendado 11 fps² (3,35 m/s²) como tasa de desaceleración adecuada, a considerar cuando se utiliza la Figura 2-2.

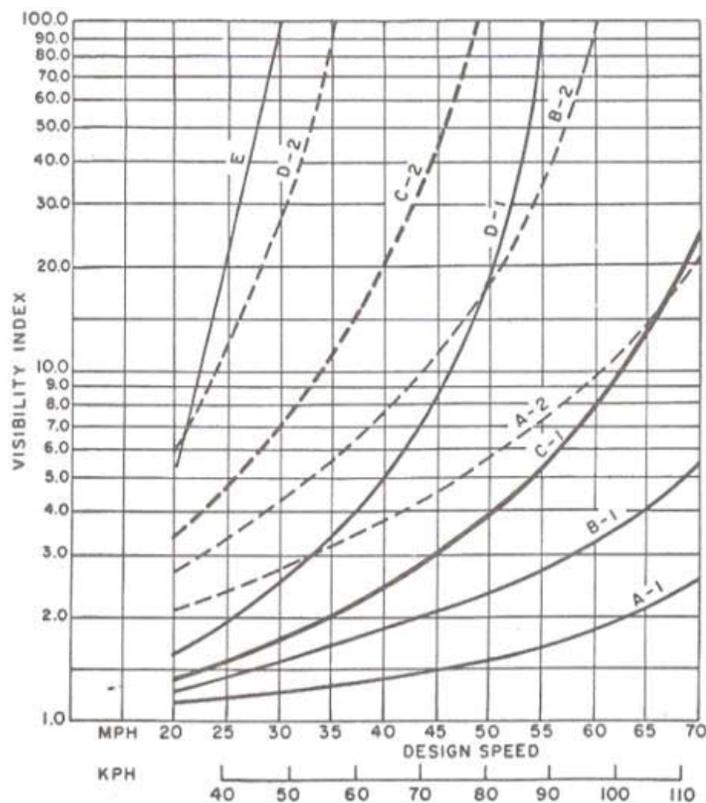


Figura 2-2: Relación entre los requisitos de visibilidad, velocidad de diseño y varias estimaciones de la tasa de desaceleración (fuente: Federal highway administration, Effectiveness of highway arterial lighting)

El detalle de las curvas mostradas en la figura 2-2, se muestra en la tabla 2-1, presentada a continuación:

Tabla 2-1: Curvas de la gráfica Visibilidad mínima.

CURVA	PERCENTIL DE CONDUCTORES	TASA DE DESACELERACION
A-1	50°	20 fps ²
A-2	15°	20 fps ²
B-1	50°	14 fps ²
B-2	15°	14 fps ²
C-1	50°	11 fps ²
C-2	15°	11 fps ²
D-1	50°	8 fps ²
D-2	15°	8 fps ²
E	50°	4 fps ²

Realizados y revisados estos estudios, y considerando los distintos niveles de porcentaje de conductores, se pueden definir los índices de visibilidad necesarios para un conductor, en virtud de las velocidades y distancias de frenado, con tal de asegurar que el vehículo alcance a detenerse con antelación ante un obstáculo en la carretera.

Estos valores son fundamentales para más adelante obtener los requerimientos a la hora de diseñar un sistema de alumbrado público, con las ideologías planteadas por el ingeniero Goodbar.

2.3.2 Directrices de diseño para el uso del concepto de visibilidad

El método que se utilizó en la época de estas investigaciones, relacionó un conjunto de especificaciones de uniformidad, y un nivel promedio de iluminación o luminancia, mantenido una combinación integrada de lámparas, luminarias, equipo de montaje y detalles de diseño geométrico. Esto se debe realizar independiente de si la intención de diseño se basa en un criterio de iluminación o en un criterio de luminancia.

Antiguamente, las especificaciones de iluminación se proporcionaban en dos partes; la primera referida a una medida del flujo luminoso en el pavimento, y la segunda a una medida de la variación de este flujo a lo largo de la calzada iluminada.

Esa técnica promovía el análisis de especificaciones alternativas para diferentes componentes del sistema como lámparas, luminarias, alturas de montaje, espaciado de luminarias y consumo de energía, entre otros.

Sin embargo, el método de predicción de luminancia tiene aplicación directa a una metodología para diseñar sistemas en donde el objetivo fundamental es encontrar valores óptimos de iluminación para la visibilidad, y no se basa en criterios de uniformidad, por lo tanto aquí se observa claramente que los conceptos propuestos por Goodbar, un par de años antes, están desarrollados e implementados en estas especificaciones, y que este método funciona bajo las mismas concepciones.

El procedimiento que describe este método en su totalidad, se presenta resumido en los siguientes pasos:

1. Determinar el tiempo de intercepción (IT) apropiado para el diseño de velocidad y modificar IT según corresponda basado en el conocimiento de operaciones de tráfico, política o ubicación urbana.
2. Leer el índice de visibilidad recomendado correspondiente al tiempo de intercepción elegido usando tablas y figuras.
3. Estimar el DGF y RCS L_f , y calcular el contraste mínimo necesario para proporcionar el índice de visibilidad seleccionado, de acuerdo con:

$$C = \frac{VI}{DGF \cdot RCS_{L_f}} \quad (2-4)$$

4. Determinar valores alternativos mínimos y máximos de Luminancia del objeto y Luminancia de fondo, calculados por C de acuerdo a la relación:

$$C = \frac{L_o - L_f}{L_f} \quad (2-5)$$

5. Determinar un diseño de sistema de iluminación apropiado que produzca los valores de luminancia L_o y L_f deseados.

6. Calcule el índice de visibilidad (VI) real producido por este sistema.
7. Ajustar los parámetros del sistema según sea necesario para producir VI deseado, determinando y recalculando VI para cada conjunto de ajuste de parámetros. En su defecto especificar un sistema de iluminación alternativo para analizar.
8. Evaluar alternativas satisfactorias para la implementación.

La Figura 2-3 es un diagrama de flujo de los conceptos clave del procedimiento de diseño.

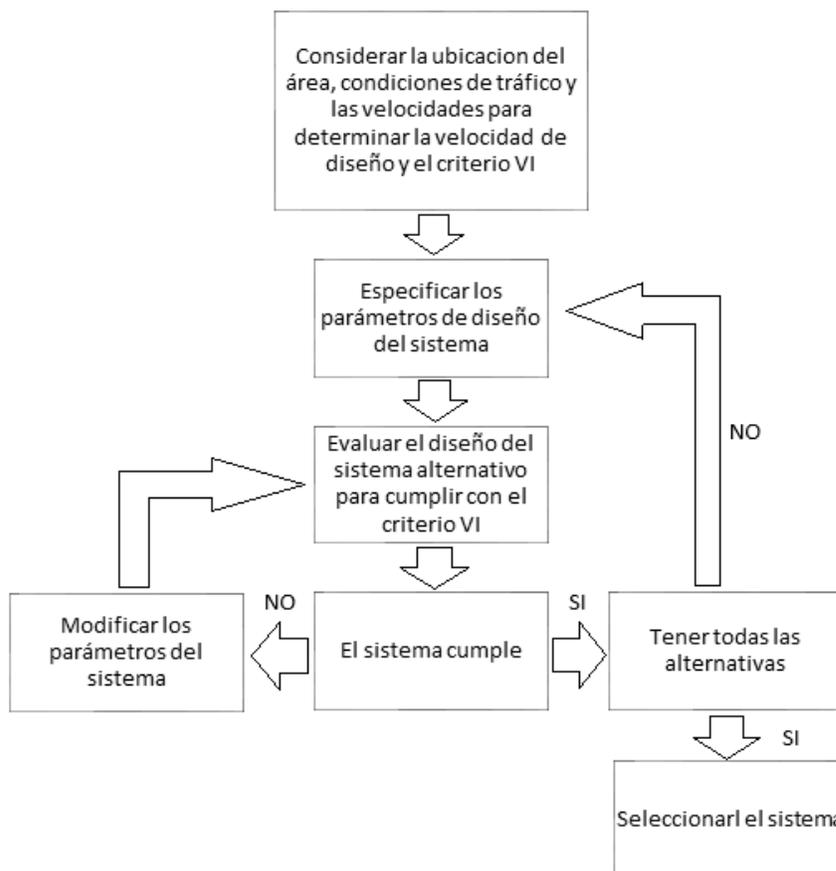


Figura 2-3: Carta flotante que refleja áreas conceptuales clave, relacionadas con el diseño de sistemas de iluminación para satisfacer un criterio de visibilidad (fuente: Federal highway administration, Effectiveness of highway arterial lighting)

Uno de los problemas difíciles de responder, fue la necesidad de tener mayor visibilidad en la carretera cuando la carga de la tarea de conducción aumente, es decir, cuando factores como el cansancio por tiempos de conducción prolongados se hagan presentes.

Se propusieron varios métodos, algunos de ellos críticos, otros empíricos, pero en cualquiera de estos casos, el diseñador de iluminación, se encontrará en una posición difícil para justificar dichos niveles de iluminación recomendados. Claramente hoy en día esas interrogantes y niveles se deben encontrar normados y ajustados a un sistema internacional que regulen las necesidades visuales reales de los conductores.

Rescatando las experiencias realizadas para obtener un buen sistema de iluminación, se puede decir con toda certeza que los determinantes básicos de una buena visibilidad son el **contraste**, las **condiciones de adaptación**, el **tamaño del objeto o tarea visual** y el **tiempo** disponible para su detección. Estos factores fueron abordados en el desarrollo del índice de visibilidad, y además serán conceptos claves en las consideraciones técnicas de las normas para la ciudad de Buenos Aires, que se explicarán en el capítulo siguiente.

De acuerdo a lo anterior, y producto de los diversos métodos de calificación para determinar las garantías de visibilidad, se derivan los demás factores influyentes en este método, los cuales son:

- Velocidad: que hace hincapié en el mecanismo de procesamiento de la información y afecta directamente los requisitos de distancia de parada.
- Deslumbramiento: que influyen directamente en la pérdida de visibilidad.
- Alcance de la vista: que es el límite físico de visibilidad en términos de distancia.

Finalmente, es difícil y quizás sin sentido intentar cuantificar la contribución exacta y precisa de cada uno de estos factores, a las necesidades de visibilidad. Incluso los resultados del modelo más sofisticado en el análisis final, son una estimación cruda de la influencia de estos factores estresantes.

Por tanto, la complejidad del procedimiento de cálculo indica que existe una necesidad de un enfoque automatizado tanto para la predicción de la luminancia como para el diseño del sistema en función de la visibilidad.

2.4 Conclusión del capítulo

Por lo realizado en estos estudios, se entiende que la metodología presentada en este capítulo, utiliza técnicas de interpolación de datos tabulados, cálculos repetitivos de variables definidas y un enfoque iterativo para el diseño del sistema, que es en sí, la misma forma de proceder que propone el ingeniero Isaac Goodbar para encontrar los valores de contraste mínimo requerido y las variaciones de luminancia de fondo en su método de alumbrado público.

Obviamente cada una de estas técnicas se realiza y desarrollan de manera más eficiente y precisa a través de herramientas informáticas, con las cuales se pueden confeccionar gráficas y curvas que permitan predecir valores intermedios que entreguen información generalizada y resumida.

Cabe señalar además, que uno de los requisitos importantes dentro de estas metodologías que resaltaron en la época, son los tiempos de frenado, por lo tanto, cobra importancia el conocer estos valores para las distintas velocidades estudiadas. Es por eso que en las normas del ingeniero Goodbar se presentarán curvas, tablas y nomogramas considerando las velocidades típicas de la época.

Al analizar estas especificaciones, se puede rescatar principalmente que la teoría propuesta por el ingeniero Isaac Goodbar, en la modelación de su metodología, sentó ciertas bases que más adelante organismos internacionales, tomarían para realizar estudios más acabados y actualizados.

Finalmente y como observación fundamental, se presenta el hecho de que los estudios realizados por la administración federal de carreteras de EE.UU. siguen la idea principal del ingeniero Goodbar, que era mejorar los valores de visibilidad, en referencia al contraste mínimo que debe existir en la calzada y la variación de los valores de luminancia del objeto y la luminancia de fondo.

3 Capítulo 3

En vista y consideración que en los capítulos anteriores se fundaron las bases sobre las temáticas principales en las que se basará este estudio, en adelante se comenzará a analizar lo propuesto por el ingeniero, en el método desarrollado para las Normas de Alumbrado Público de la ciudad de Buenos Aires [1]. Este será el primer paso de análisis, en el cual se estudiarán las ecuaciones y las magnitudes involucradas, con las cuales se elaboraron las tablas y curvas que definen los resultados y exigencias respectivas a esta norma.

3.1 Consideraciones técnicas de la Norma

3.1.1 Relación entre contraste y luminancia

Contraste y luminancia, como se mencionó anteriormente, serán 2 de los conceptos más utilizados y requeridos en esta norma. Ambos se explicaron en el capítulo 2, y específicamente también se desarrolló la idea de sensibilidad al contraste relativo (RCS), ítem que será la primera consideración de esta norma, pues se hace referencia a estudios realizados respecto a la capacidad de distinguir los contrastes presentes en el medio.

En la tabla 3-1, se muestra un resumen de la “tabla 1”, adjuntada al documento de las normas en cuestión, la cual muestra valores estándar de sensibilidad al contraste relativo, en función de la luminancia de fondo. Esta tabla es el resultado de estudios exhaustivos que se realizaron con la finalidad de obtener dichos datos, los cuales fueron aprobados por la Comisión Internacional de Iluminación.

Esta capacidad, llamada sensibilidad de contraste relativo, esta tabulada en términos de porcentaje de RCS a un nivel de fondo de 10.000 nits (candelas por metro cuadrado).

Tómese en cuenta, que ese nivel de luminancia (10.000 nits) es posible de obtener solo de día, a pleno sol, y se tiene que a ese nivel, la sensibilidad al contraste relativo es máxima (100%).

Tabla 3-1:
Valores estándar de sensibilidad al contraste relativo, RCS (%), en función de la luminancia, L (cd/m²)

RCS (%)	L (cd/m ²)						
100	10000	78	558	56	53,6	34	8,46
99	7230	77	502	55	48,5	33	7,76
98	6000	76	452	54	43,9	32	7,13
97	5040	75	406	53	39,7	31	6,54
96	4400	74	364	52	36,1	30	6,04
95	3840	73	324	51	33	29	5,59
94	3370	72	287	50	30,5	28	5,19
93	2970	71	258	49	28,2	27	4,79
92	2630	70	235	48	26	26	4,39
91	2350	69	212	47	23,9	25	3,99
90	2105	68	190	46	22	24	3,59
89	1895	67	169	45	20,2	23	3,19
88	1690	66	150	44	18,6	22	2,87
87	1515	65	134	43	17	21	2,57
86	1360	64	120	42	15,6	20	2,27
85	1215	63	109	41	14,3	19	1,99
84	1087	62	98,2	40	13,2	18	1,78
83	970	61	88,6	39	12,2	17	1,58
82	868	60	80,2	38	11,3	16	1,4
81	778	59	72,3	37	10,6	15	1,23
80	698	58	65,5	36	9,85	14	1,07
79	623	57	59,3	35	9,15	13,5	1,0

Los valores de sensibilidad de contraste relativo (RCS), obtenidos en la tabla 3-1, permiten determinar los **contrastes mínimos detectables (C)**, por medio de la siguiente fórmula:

$$C = \frac{F}{RCS} \quad (3-1)$$

Donde:

F: factor que se determinará teniendo en cuenta las distintas circunstancias del caso.

Por lo tanto el primer paso será determinar las condiciones para las cuales se requiere diseñar el sistema, con la finalidad de poder obtener el valor del factor F.

¿Cuáles circunstancias influyen en el valor del factor “F”?

- El ángulo subtendido por la tarea visual (tamaño del objeto).
- Tiempo disponible para la detección de la tarea visual.
- Condiciones de fondo.
- Porcentaje de la población considerada.
- Edad de la población.

Los valores incluidos en la tabla 3-2, muestra factores que, multiplicados por el valor del factor F calculado, permitirán incluir mayores porcentajes de población y mayores edades.

Tabla 3-2: “Tabla B-1”
(Multiplicadores de contraste para varios miembros de la población normal)

Edad promedio	Porcentaje de la población a incluir					
	50	60	70	80	90	95
20	1.00	1.09	1.20	1.34	1.56	1.76
25	1.00	1.09	1.20	1.34	1.56	1.76
30	1.03	1.12	1.24	1.38	1.61	1.81
35	1.09	1.19	1.31	1.46	1.70	1.92
40	1.17	1.28	1.40	1.57	1.82	2.06
45	1.33	1.45	1.60	1.78	2.08	2.34
50	1.58	1.72	1.90	2.12	2.46	2.78
55	1.94	2.12	2.32	2.60	3.02	3.42
60	2.30	2.51	2.76	3.08	3.58	4.05
65	2.66	2.90	3.19	3.56	4.15	4.68

Luego, en la curva de la figura 3-2, se pueden determinar (para niveles de luminancia del orden de los utilizados en alumbrado público), el factor F para diferentes ángulos subtendidos por la tarea visual, con las siguientes características:

- 1/5 de segundo de tiempo disponible para la detección del objeto
- Fondo uniforme
- 95% de observadores
- Población considerada hasta los 65 años

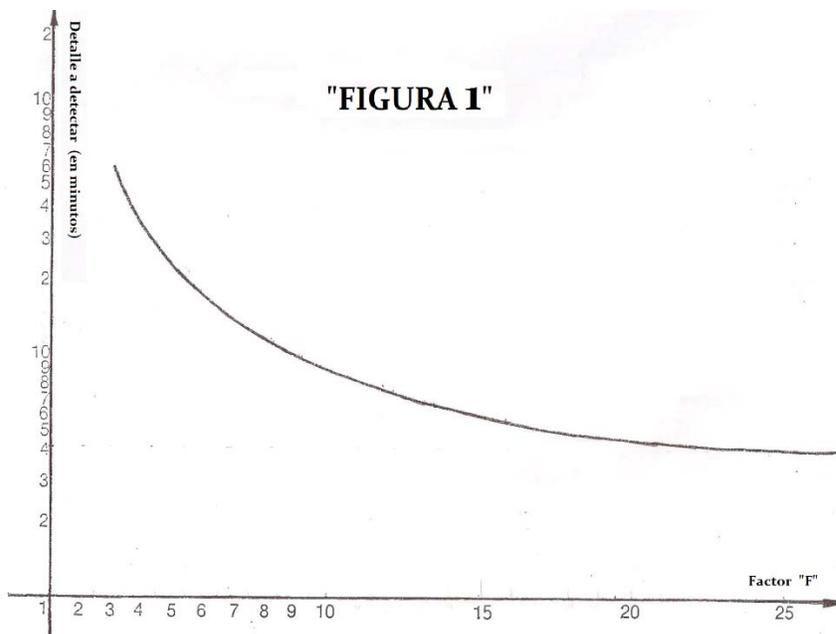


Figura 3-1: Curva para determinar el factor F (fuente: Normas para el alumbrado público de la ciudad de Bs. Aires)

Donde el eje vertical indica: el detalle a detectar -diámetro angular- (en minutos).
Y el eje horizontal indica: el valor del factor F.

Un quinto de segundo es el tiempo con el cual dispone un automovilista para detectar un objeto, ya que su vista normalmente va barriendo el campo visual, y se posa en cinco lugares diferentes cada segundo. Por lo tanto, ese obstáculo podrá ser visto o detectado únicamente durante alguna de esas pausas.

Si se deseara incluir solo algún otro porcentaje de observadores hasta otra edad, bastará con multiplicar el factor F determinado por medio de la curva de la figura 4-2, por la relación entre el factor dado por la tabla B-1 y 4,68.

Una vez aplicados todos estos antecedentes, será posible, una vez establecidas las condiciones básicas, tales como detalle, el nivel de fondo, etc., determinar el **contraste mínimo** que puede ser percibido por los observadores que se decidan incluir.

Ejemplo

Determinar los contrastes que puedan percibirse por un 50% de las personas entre 20 y 25 años de edad, a diferentes luminancias de fondo, cuando la tarea visual (objeto), es un disco visto a un diámetro aparente de 4 minutos de arco, el fondo es uniforme sin encandilamiento y el tiempo de que se dispone para detectar la tarea es un quinto de segundo.

Solución

Utilizando la curva de la figura 3-2, se tiene que para un objeto de 4' de diámetro, se obtiene un valor de $F = 26,9$ (-)

Luego y dado que el valor del porcentaje de población incluida es distinto al de la curva, se utiliza la tabla 3-2, para obtener el valor del multiplicador, que multiplicado por 26,9 dará el valor final del factor F.

En la figura 3-2, se muestran los datos seleccionados para obtener el multiplicador.

Edad promedio	Porcentaje de la población a incluir					
	50	60	70	80	90	95
20	1.00	1.09	1.20	1.34	1.56	1.76
25	1.00	1.09	1.20	1.34	1.56	1.76
30	1.03	1.12	1.24	1.38	1.61	1.81
35	1.09	1.19	1.31	1.46	1.70	1.92
40	1.17	1.28	1.40	1.57	1.82	2.06
45	1.33	1.45	1.60	1.78	2.08	2.34
50	1.58	1.72	1.90	2.12	2.46	2.78
55	1.94	2.12	2.32	2.60	3.02	3.42
60	2.30	2.51	2.76	3.08	3.58	4.05
65	2.66	2.90	3.19	3.56	4.15	4.68

Figura 3-2: Datos para obtener el valor del multiplicador, que permita incluir el porcentaje de población correcta.

Con lo cual se obtiene el siguiente valor del factor F:

$$F = \frac{1,00}{4,68} \cdot 26,9 = 5,74 \quad (3-2)$$

Y finalmente se podrán calcular los contrastes mínimos detectables, para las condiciones del ejemplo, como muestra la ecuación 3-3.

$$C = \frac{5,74}{RCS} \quad (3-3)$$

3.1.2 Factor de limitación del deslumbramiento

El deslumbramiento es un estado de la visión con molestia o reducción en la capacidad de percibir objetos significativos, a causa de una mala distribución de luminancias o a contrastes extremos en el espacio o en el tiempo dentro del escenario iluminado.

El deslumbramiento puede ser:

- Deslumbramiento molesto, que es el deslumbramiento que causa molestias, sin reducir necesariamente la visión de los objetos.

- Deslumbramiento perturbador, que son los deslumbramientos que reducen la visión de los objetos.

El deslumbramiento se puede evaluar a través de los siguientes indicadores:

- Luminancia de velo (L_v), que es una Luminancia uniforme equivalente a la cantidad de luz que incide sobre el ojo del observador con capacidad de producir el velado de la imagen percibida en la retina, reduciendo la capacidad de percibir los contrastes que definen con precisión el objeto visualizado.
- El Incremento de Umbral de Contraste TI. Un objeto que es visible cuando no se produce deslumbramiento (umbral de contraste), no se puede apreciar bien cuando se produce el deslumbramiento a menos que se aumenten los contrastes reales de brillo del objeto. La cantidad de contraste extra que hace falta para apreciar un objeto cuando se produce deslumbramiento, medido en referencia al contraste que tiene el objeto, cuando no hay deslumbramiento, recibe el nombre de Incremento de Umbral de Contraste TI.

3.1.3 Efecto del deslumbramiento

El efecto del deslumbramiento sobre la visibilidad es equivalente al de la superposición de una luminancia de velo sobre todo el campo visual.

El aumento de la luminancia del fondo resulta en una reducción teórica del contraste mínimo perceptible, pero el aumento simultáneo de la luminancia de la tarea resultará en una reducción aun mayor del contraste a percibir.

La luminancia de velo puede calcularse por medio de la fórmula:

$$L_v = \frac{9,55 E_v}{t (1,5 + t)} \quad (3-4)$$

Donde:

L_v : Luminancia de velo en nits.

t : Angulo (en grados) entre la visual normal (dirigida hacia el horizonte) y la visual dirigida hacia la fuente lumínica.

E_v : Iluminancia en los ojos del observador (en un plano vertical) en Lux.

Por medio de esta fórmula puede evaluarse directamente la luminancia de velo producida por cualquier fuente lumínica. Además, esta fórmula se aplicará sucesivamente a cada fuente de deslumbramiento y luego se sumaran estos resultados para obtener el valor total.

Según el estudio del ingeniero, se adoptaron los siguientes valores de luminancia de velo:

- Tráfico en dirección opuesta (faros con luz baja): 1,5 nits.
- Letreros luminosos y otros: 0,2 nits.
- Luminarias de distribución corta: 15% de la luminancia media del pavimento.

- Luminarias de distribución larga (en calles arboladas): 30% de la luminancia media del pavimento.

Al momento de continuar con los cálculos, estos valores se sumarán tanto a la luminancia del fondo como al de la tarea visual.

3.1.4 Efecto de las variaciones de luminancia en el campo visual

Si las luminancias en distintas partes de la calle, delante del observador, varían entre un valor máximo y otro mínimo, la sensibilidad al contraste se reducirá, y por defecto el umbral de contraste aumentará, es decir, el contraste mínimo necesario para que el conductor detecte el objeto, aumentará.

La reducción de sensibilidad al contraste se expresará por medio de un factor Fr , dado por la siguiente fórmula:

$$Fr = 1 - 0,315 \log(U) \quad (3-5)$$

Donde:

U : es la variación aparente de luminancia, o uniformidad. Acepta valores menores que 10.

A continuación en la figura 3-3 se muestra la representación gráfica de la fórmula 3-5, la cual permite la determinación directa de Fr en función de la variación aparente de luminancia (U).

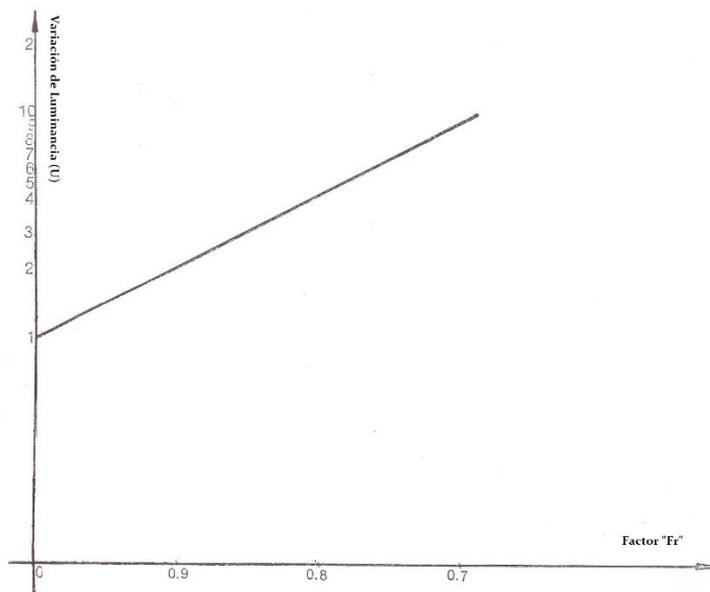


Figura 3-3: Curva para determinar el factor Fr (fuente: Normas para el alumbrado público de la ciudad de Bs. Aires)

Donde el eje vertical indica: La variación de luminancia o uniformidad (U).

Y el eje horizontal indica: El valor del factor Fr .

3.1.5 Relación entre el contraste mínimo que debe percibirse y la variación de luminancia requerida para que el mismo sea visible.

El obstáculo que puede aparecer frente a un automovilista puede tener cualquier valor de luminancia entre 0 y un máximo que dependerá de la reflexión del obstáculo y de su posible posición geométrica en relación con las luminarias.

Si para la luminancia L del fondo y las demás condiciones expuestas, el contraste mínimo que puede percibirse es C , entonces las diferencias mínimas de luminancia que se podrán percibir son:

$$\Delta L = C \cdot L \quad (3-6)$$

Por lo tanto, todos los obstáculos cuyas luminancias estén comprendidas entre L_a y L_f resultaran imposibles de detectar por todos o por algunos de los observadores considerados.

Donde:

$$L_a = L + \Delta L = L(1 + C) \quad (3-7)$$

Y,

$$L_f = L - \Delta L = L(1 - C) \quad (3-8)$$

Si, con el fin de hacer estos obstáculos visibles, se hace variar la luminancia de fondo en la proporción "U", se perderá capacidad de percibir contraste en la proporción F_r , y será necesario que después de esta pérdida, se detecte y calcule un nuevo valor del mínimo contraste necesario.

Si el contraste detectable antes de la pérdida era C , después de la pérdida se detectará un contraste $\frac{C}{F_r}$, es decir, una diferencia mínima de luminancia:

$$\Delta L = \frac{C \cdot L}{F_r} \quad (3-9)$$

Luego, para que todos los obstáculos sean visibles es necesario que la luminancia alta sea por lo menos:

$$A = L + \Delta L \quad (3-10)$$

Y que la baja sea igual o menor que:

$$B = L - \Delta L \quad (3-11)$$

Finalmente, de esta forma contra A se podrán distinguir todos los objetos con luminancias menores que:

$$A - \Delta L = L + \Delta L - \Delta L = L \quad (3-12)$$

Y contra B se podrán distinguir todos los obstáculos con luminancias mayores que:

$$B + \Delta L = L - \Delta L + \Delta L = L \quad (3-13)$$

Lo que necesariamente hará posible distinguir objetos con cualquier valor de luminancia.

Y la variación U será:

$$U = \frac{A}{B} = \frac{L + \Delta L}{L - \Delta L} = \frac{L + \frac{CL}{F_r}}{L - \frac{CL}{F_r}} = \frac{1 + \frac{C}{F_r}}{1 - \frac{C}{F_r}} \quad (3-14)$$

Luego reemplazando con el valor de Fr, según la ecuación (4-4):

$$U = \frac{1 + C \cdot \frac{1}{1 - 0,315 \cdot \log U}}{1 - C \cdot \frac{1}{1 - 0,315 \cdot \log U}} = \frac{1 - 0,315 \cdot \log U + C}{1 - 0,315 \cdot \log U - C} \quad (3-15)$$

Y, despejando C:

$$C = \frac{U - 1 - 0,315 \cdot (U - 1) \cdot \log U}{U + 1} \quad (3-16)$$

De esta manera, la ecuación (3-16) da una relación directa entre el contraste mínimo que puede detectarse y la variación de luminancia de fondo, que asegura que una tarea de cualquier luminancia sea siempre visible.

La representación gráfica de esta ecuación, se muestra en la figura 3-4, donde la curva muestra claramente que no siempre puede resolverse el problema de la visibilidad con solo variaciones de luminancia por encima y debajo de la media, pues cuando el contraste mínimo detectable es igual o mayor que 0.56, no es posible proveer visibilidad solo con variaciones de luminancia y resulta indispensable aumentar la luminancia media a fin de reducir el contraste detectable.

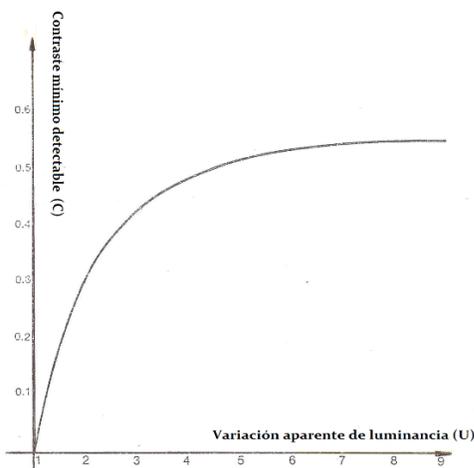


Figura 3-4: Relación entre Contraste mínimo detectable y Variación de luminancia de fondo (fuente: Normas para el alumbrado público de la ciudad de Bs. Aires)

Donde el eje vertical indica: El contraste mínimo detectable (C).

Y el eje horizontal indica: La variación aparente de luminancia (U).

También cabe destacar que el gráfico indica que variaciones superiores a 4, no son muy efectivas para el aumento de la capacidad de percibir contraste.

3.2 Conclusión del capítulo

En primer lugar, es importante indicar que estos estudios han sido confirmados y aprobados experimentalmente en Estados Unidos, lo cual confirma lo planteado en el capítulo 3, en donde se mencionó que el estudio realizado por la administración federal de carreteras, basaba sus principales ideales en conceptos ya propuestos y publicados por el ingeniero Goodbar, lo cual le da un valor agregado a los estudios que se están realizando en este trabajo, ya que además se valoriza el trabajo ejecutado por don Isaac.

Por otra parte, en este capítulo se mostraron los pasos que siguió el ingeniero, los parámetros que consideró, y como los trabajó, para poder calcular los valores de **contraste mínimo** necesario que se deberán implementar en el diseño. Como ya se sabe, su método se basa en la utilización de estos contrastes, para lograr una visibilidad necesaria para poder detectar un objeto a tiempo prudente para poder realizar el frenado del vehículo, por lo tanto, es fundamental conocer cómo el ingeniero obtuvo los datos con los cuales realizó las tablas y curvas que conformarán la parte final de su método.

4 Capítulo 4

Hasta esta etapa del informe, se han desarrollado y explicado los métodos utilizados por el ingeniero Isaac Goodbar, para la realización y aplicación de sus principales ideas en el ámbito del alumbrado público.

Como se ha mencionado con anterioridad, el método creado por el ingeniero, para el cálculo de las luminancias necesarias en una vía automovilística, tuvo aplicación en las normas para el alumbrado público de la ciudad de Buenos Aires. De ese documento se han extraído las principales ideas para comprender la metodología de cálculos propuestos por don Isaac, además, estos ya se han presentado y desarrollado en los capítulos precedentes, por lo cual la siguiente etapa del proyecto será comprender sus resultados gráficos y aplicaciones.

Si se recuerda, los objetivos finales de este estudio apuntan a sintetizar y proyectar las gráficas utilizadas en términos de ecuaciones, para un uso más cómodo de ellas y para que se puedan utilizar en tablas o planillas Excel.

Es por eso que en el presente capítulo se expondrá la aplicación de los nomogramas que conforman las normas, junto con el análisis para obtener los resultados en términos de ecuaciones para cada una de ellas.

4.1 Preparación de ábacos MR y ABR

Como ya se sabe, las formulas, tablas y ecuaciones presentadas principalmente en el capítulo 4, permiten la realización de ábacos o nomogramas MR y ABR, que nos entregarán la información necesaria para determinar la luminancia media requerida, así como también la luminancia alta y baja requerida.

En vista y consideración de que estos estudios se realizaron en la época de los 70, la Asociación Americana de Funcionarios de Carreteras (AASHO), decía que será necesario detectar un obstáculo a las siguientes distancias, dependiendo de la velocidad de recorrido, las cuales se muestran en la tabla 4-1:

Tabla 4-1: Velocidades y distancias de la norma.

VELOCIDAD	DISTANCIA
40 km/h	40 m
60 km/h	80 m
80 km/h	110 m

Por lo tanto, si a cada una de estas distancias se ubicara una persona, según su luminancia, esta deberá ser vista contra una zona de alta o baja luminancia.

Una vez definidas las distancias correspondientes a cada velocidad, se puede calcular el ángulo subtendido por la tarea visual -este caso una persona-, de acuerdo a un factor de equivalencia, ya que la curva de la figura 1 del documento está referida a una referencia circular.

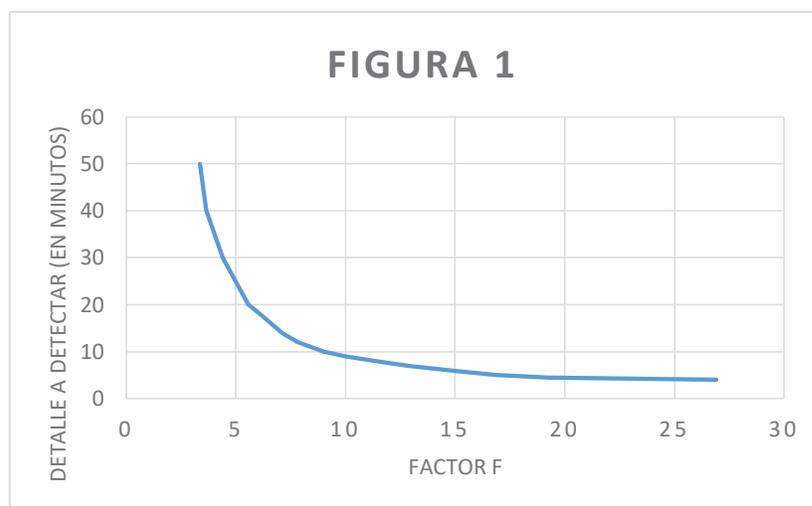


Figura 4-1: Digitalización de la figura 1 del documento.

Para la figura 4-1, se obtuvo la ecuación de la curva, con la cual se podrá calcular el valor (estimado) del factor F, a partir de un ángulo determinado.

Por lo tanto para un valor del ángulo de la tarea visual, expresada en minutos (A), corresponderá un determinado valor de F igual a:

$$F = 59,494 * (A)^{-0.775} \quad (4-1)$$

Una vez obtenido el ángulo pertinente para cada caso, será posible obtener el Factor F, con el cual se harán todos los cálculos siguientes para obtener los nomogramas MR y ABR correspondientes a cada nivel de velocidad.

Estos nomogramas nos entregarán los valores de luminancia alta y baja necesarios para hacer posible la detección del obstáculo, con el tiempo suficiente para evitar un accidente, es decir, a una distancia en la cual el conductor pueda realizar el frenado completo del vehículo.

Además se entenderá por luminancia alta, baja y media lo siguiente:

- **Luminancia alta:** Será el promedio de luminancia más alta, medida en una zona de 4m de ancho, con centro en el conductor, y de una longitud (paralela al sentido del tráfico) no menor que 1/5 parte de la distancia entre luminarias.
- **Luminancia Baja:** Será el promedio de luminancia más baja, medida en una zona similar a lo descrito para luminancia alta.
- **Luminancia Media:** Será el promedio de luminancia en toda la calzada.

Por otra parte, se debe tener en cuenta que para comenzar a realizar los cálculos, tienen que ser necesariamente conocidos los valores del factor F, de velocidad, de luminancia media y los factores de encandilamiento existente.

A continuación se explican en forma resumida, los pasos para obtener las magnitudes, con las cuales se podrán confeccionar las curvas de cada nomograma:

1. Se calcula la luminancia de velo (L_v) producida por los diversos agentes externos.
2. Ese valor se suma a la luminancia media, obteniéndose el valor total de luminancia aparente de fondo. Luego este valor se multiplica por el porcentaje de visibilidad producto del efecto del parabrisas, obteniéndose el valor de luminancia media aparente.
3. Con el valor obtenido, se busca en la tabla I del documento (tabla 3-1), el valor de la sensibilidad al contraste relativa (RCS).
4. Se calcula el valor del contraste mínimo detectable (C), dividiendo el factor F por RCS.
5. Con el valor de contraste, es posible determinar el valor de la variación necesaria de la luminancia aparente (U).
6. A partir de la variación (U) se puede obtener el factor F_r , con el cuál y mediante la ecuación (3-9) se calcula el valor de diferencia de luminancia mínima detectable (ΔL).
7. Luego, sumando y restando este valor a la luminancia de fondo aparente, se obtienen los valores de luminancia alta y baja aparentes.
8. Se dividen esos valores por el porcentaje de transmisión del parabrisas, y se les resta el valor de la luminancia de velo, obteniéndose así las luminancias alta y baja reales correspondientes al valor de luminancia media inicial.
9. Estos son los valores que se marcan en el ábaco ABR sobre una línea vertical que corresponde al valor de la luminancia media.
10. Se expresan también en el ábaco ABR las líneas Z y T que se obtienen tomando luminancias 25% y 50% más altas que las luminancias altas obtenidas, y las líneas Y y L, que por el contrario, corresponden a luminancias 25% y 50% más bajas que las luminancias bajas obtenidas.
11. Finalmente, la relación entre las luminancias 50% más alta y 50% más baja (Z/Y), marcan la relación real que se expresa en el nomograma MR.

A modo de ejemplo se muestran un nomograma MR y otro ABR, ambos realizados para una velocidad de 80 km/h, y con los cuales se trabajará de manera de extraer los modelos matemáticos correspondientes.

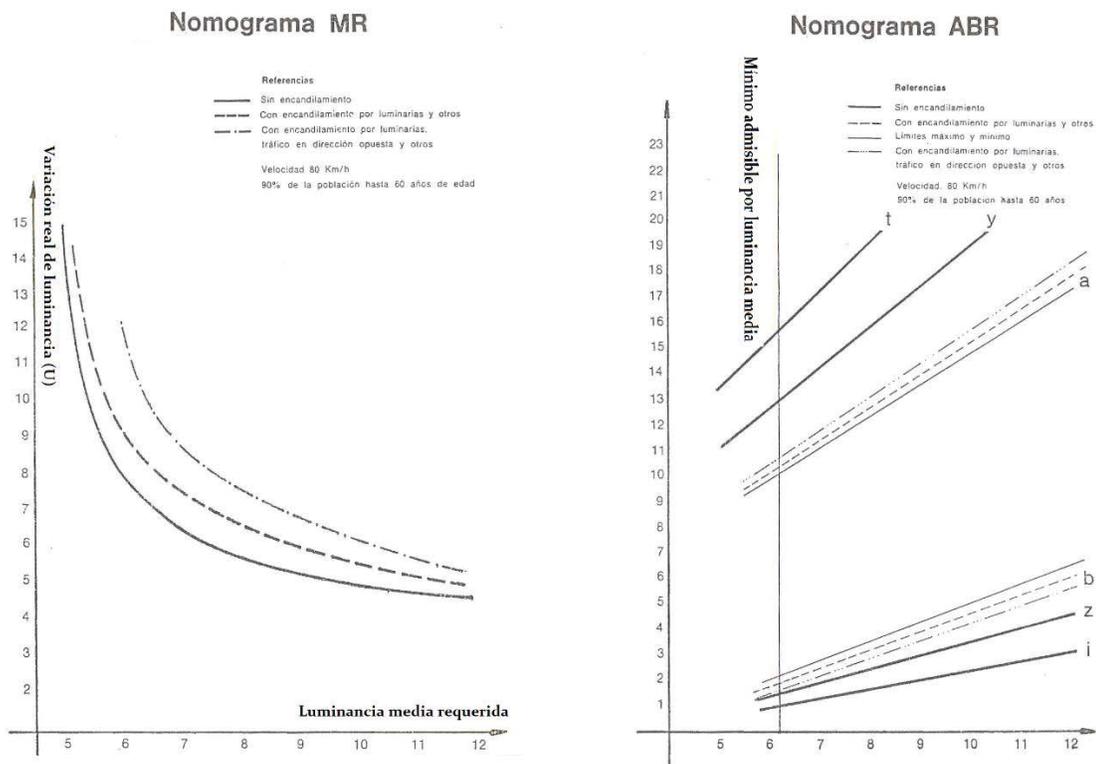


Figura 4-2: Ejemplos de nomograma. MR y ABR (fuente: Normas para el alumbrado público de la ciudad de Bs. Aires)

De la imagen anterior se puede ver que el nomograma MR, muestra diversas curvas, para distintos niveles de deslumbramiento. Cada una de estas curvas representa en sí, la luminancia media requerida para un determinado valor de variación real de luminancia.

También se muestra un nomograma ABR, del cual se podrán obtener los valores de luminancia Alta y Baja, dependiendo del valor de Luminancia media requerida, obtenida del nomograma MR.

4.2 Aplicación de nomogramas.

El documento principal de este estudio, contiene diversos nomogramas de Luminancia media requerida, y de luminancias alta y baja requeridas. Estos a su vez, se sabe que vienen referidos a 3 niveles de velocidad, y en adelante se explicaran como se utilizan y se presentarán sus respectivas representaciones computacionales y matemáticas.

Para comenzar a utilizar estas herramientas, es esencial conocer la distribución fotométrica de las luminarias consideradas, y las características reflectivas del pavimento.

Con estos datos se podrá saber el valor de la variación real de luminancia o uniformidad (U), proporcionada por dichas luminarias y por lo tanto, el ábaco MR permitirá determinar el nivel medio de luminancia requerida, teniendo en cuenta que se deberá utilizar la curva correspondiente al deslumbramiento que se está considerando. Estos niveles de deslumbramiento pueden ser:

- Sin deslumbramiento.
- Con deslumbramiento por luminarias y otros.
- Con deslumbramiento por luminarias, tráfico en sentido opuesto y otros.
- Con deslumbramiento por luminarias en calles arboladas y otros.

Luego se deberá usar el nomograma ABR correspondiente a las mismas condiciones del ábaco MR, en el cual se ubicara en el eje X, el valor de luminancia obtenido anteriormente. En ese punto se traza una línea vertical que interceptará diversas curvas, las cuales entregaran los valores de luminancia Alta y Baja, correspondientes a cada nivel de deslumbramiento.

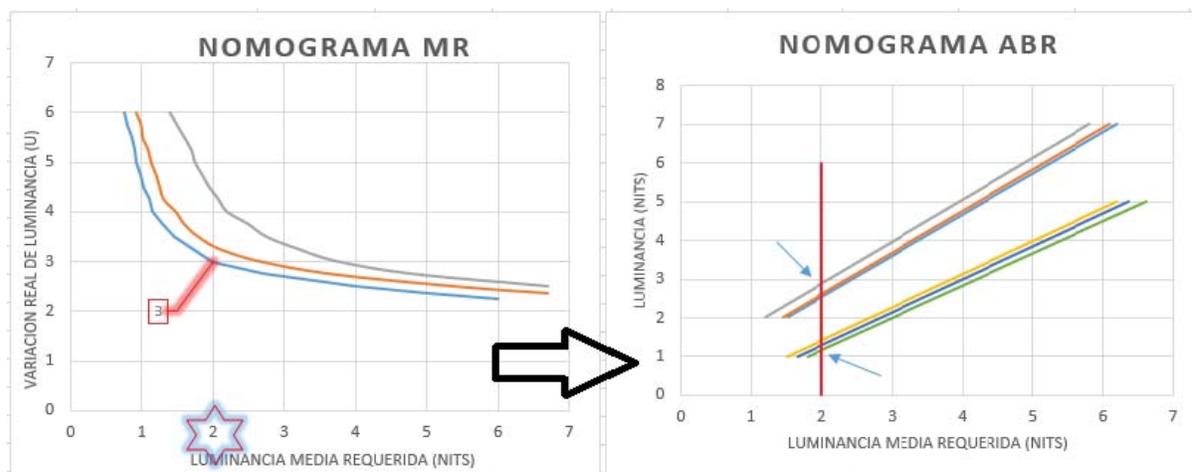


Figura 4-3: Ejemplo de aplicación de los nomogramas

4.3 Digitalización de los nomogramas.

En esta etapa del proyecto, se presentarán en términos de tablas y gráficos de Excel, las principales curvas expuestas en los nomogramas MR y ABR de las normas para el alumbrado público de la ciudad de Buenos Aires. Al mismo tiempo para cada una de estas curvas, se buscó su debida aproximación con el fin de encontrar las expresiones matemáticas que más fielmente las representen.

Para cada una de las velocidades a las cuales se confeccionaron los nomogramas, se presentaran cada una de las características de diseño. Además por términos prácticos, se utilizaron los 3 niveles principales de deslumbramiento, y cada uno de ellos se representará de acuerdo a los siguientes colores:

Tabla 4-2: Diferenciación de las curvas.

Nivel de deslumbramiento	Color de la curva
Sin deslumbramiento	Rojo
Con deslumbramiento por luminarias y otros	Verde
Con deslumbramiento por luminarias, tráfico en sentido opuesto y otros	Azul

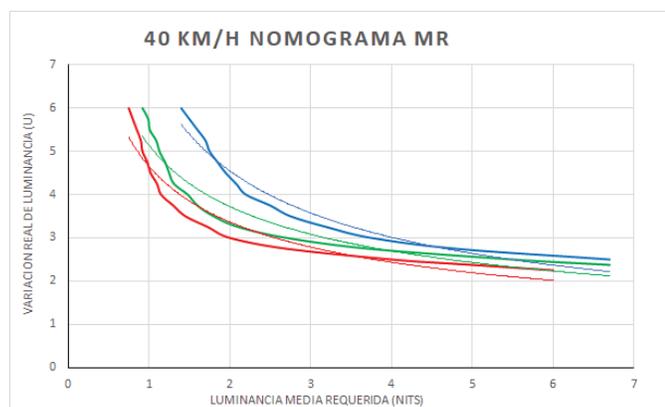
El proceso de digitalización comenzó con la realización de una tabla que representara punto a punto las coordenadas de cada una de las curvas de los nomogramas de luminancia media requerida.

Obtenida la tabla, el siguiente paso sería representar esos datos en forma de curvas por medio de las herramientas existentes en Excel. Luego se obtienen las líneas de tendencia generadas por cada curva, con lo cual se obtienen las ecuaciones matemáticas que representan a cada una de ellas.

Finalmente estas ecuaciones se tabulan en una tabla para ser ocupadas más adelante en una tabla final que reunirá todos los datos obtenidos para cada una de las velocidades en estudio.

Este proceso se ilustra en la figura 4-4, la cual muestra el resultado de los 3 pasos señalados.

NIVEL DE ENCANDILAMIENTO (nits) o (cd/mt2)			
Variación real de luminancia (U)	Sin encandilamiento	C/encandilamiento por luminarias y otros	C/encandilamiento por luminarias, trafico op. Y otros
6	0,75	0,92	1,4
5,75	0,8	0,99	1,5
5,5	0,85	1,01	1,6
5,25	0,9	1,09	1,7
5	0,92	1,13	1,75
4,75	0,98	1,2	1,85
4,5	1,02	1,25	1,95
4,25	1,1	1,31	2,08
4	1,15	1,48	2,2
3,75	1,3	1,6	2,5
3,5	1,45	1,8	2,75
3,25	1,73	2,11	3,2
3	2	2,7	3,75
2,75	2,7	3,72	4,8
2,5	4	5,5	6,7
2,375	5	6,7	
2,25	6		



CURVAS	Ecuaciones características
Sin encandilamiento	$L = 21,778 U^{-1,983}$
C/encandilamiento por luminarias y otros	$L = 26,843 U^{-1,983}$
C/encandilamiento por luminarias, trafico op. Y otros	$L = 22,795 U^{-1,6}$



Figura 4-4: Digitalización de curvas de luminancia media requerida.

Un proceso similar se realiza para el grupo de curvas de los nomogramas de Luminancia Alta y Baja Requeridas, con la ventaja que ahora las curvas características, son rectas, por ende se necesitan de menos puntos cartesianos para describir cada una de ellas, y además la ecuación matemática obtenida será una representación más fiel de cada curva. Este proceso se ilustra en la figura 4-5.

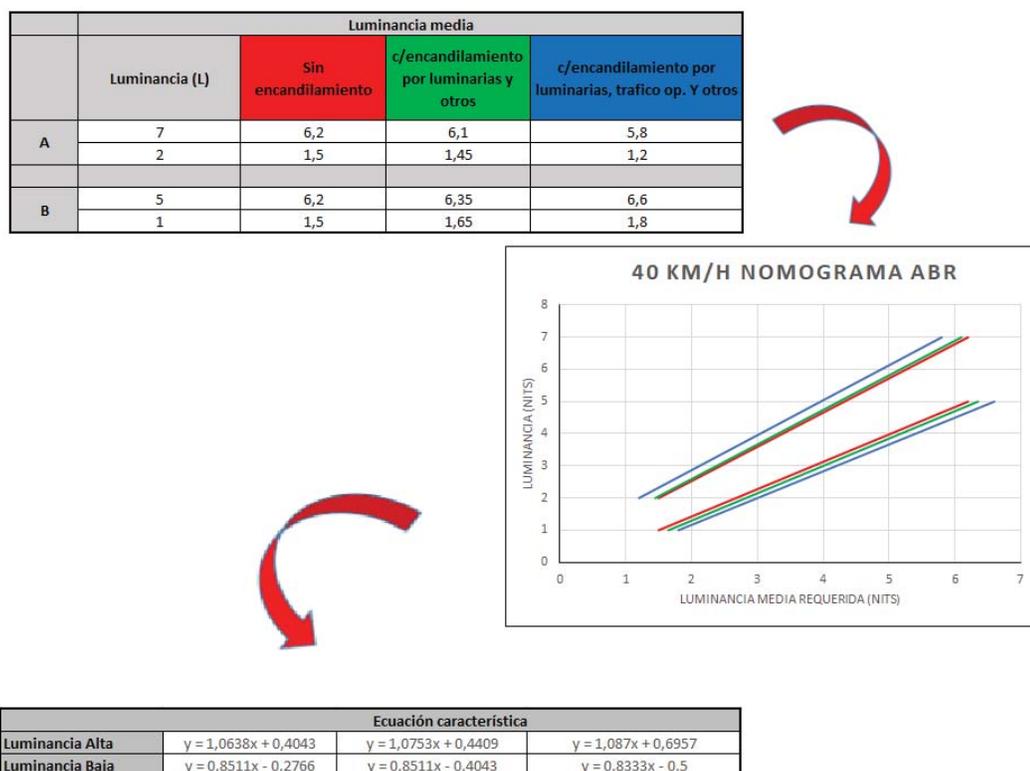


Figura 4-5: Digitalización de curvas de luminancia Alta y Baja requerida

Estos procesos se realizaron para cada una de las velocidades involucradas en este estudio, y en adelante se mostraran solo los resultados obtenidos para cada una de ellas.

4.3.1 Nomogramas para una velocidad de 40 km/h.

Velocidad:	40 km/h.
Población incluida:	95% de la población hasta 65 años de edad
Detalle a detectar:	19,5'
Factor F:	5,15

A continuación se muestran las curvas logradas por medio de la evaluación de punto a punto de cada curva, junto con sus respectivas ecuaciones matemáticas.

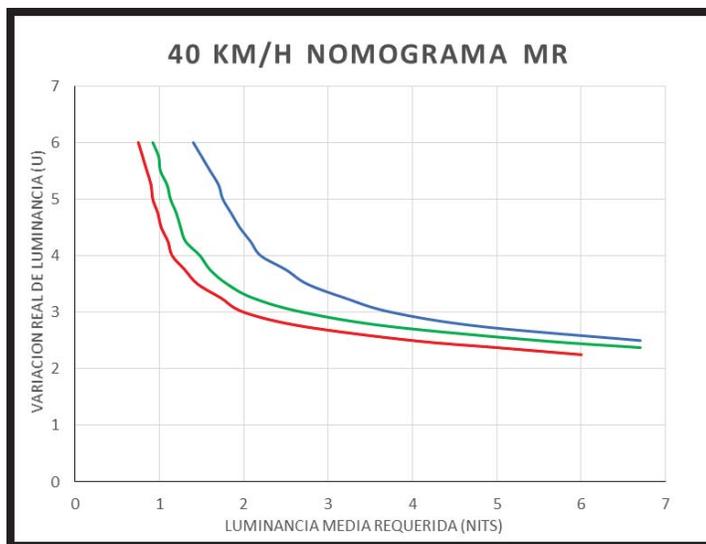


Figura 4-6: Nomograma MR para 40 km/h

Tabla 4-3: Ecuaciones características de cada curva MR.

CURVAS	Ecuaciones características
Sin encandilamiento	$L = 21,778 U^{-1,983}$
C/encandilamiento por luminarias y otros	$L = 26,843 U^{-1,983}$
C/encandilamiento por luminarias, trafico op. y otros	$L = 22,795 U^{-1,6}$

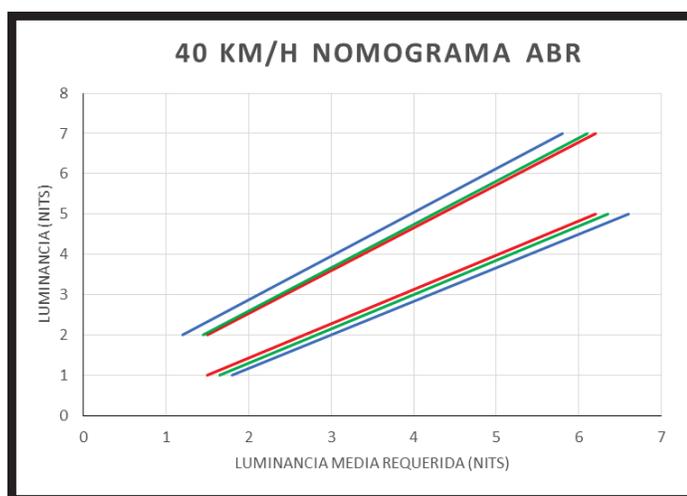


Figura 4-7: Nomograma ABR para 40 km/h.

Tabla 4-4: Ecuaciones características de cada curva ABR.

	Ecuación característica		
	Sin encandilamiento	C/encandilamiento por lum. Y otros	C/encandilamiento por luminarias tráfico op. Y otros
Luminancia Alta	$y = 1,0638x + 0,4043$	$y = 1,0753x + 0,4409$	$y = 1,087x + 0,6957$
Luminancia Baja	$y = 0,8511x - 0,2766$	$y = 0,8511x - 0,4043$	$y = 0,8333x - 0,63$

4.3.2 Nomogramas para una velocidad de 60 km/h.

Velocidad: 60 km/h.

Población incluida: 95% de la población hasta 60 años de edad

Detalle a detectar: 8,3'

Factor F: 9,02

A continuación se muestran las curvas logradas por medio de la evaluación de punto a punto de cada curva, junto con sus respectivas ecuaciones matemáticas.

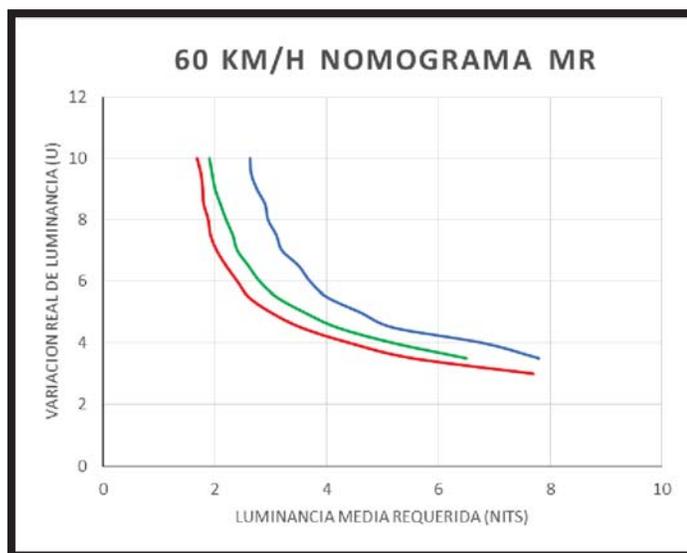


Figura 4-8: Nomograma MR para 60 km/h.

Tabla 4-5: Ecuaciones características de cada curva MR.

CURVAS	Ecuaciones características
Sin encandilamiento	$L = 23,532 U^{-1,212}$
C/encandilamiento por luminarias y otros	$L = 23,634 U^{-1,139}$
C/encandilamiento por luminarias, trafico op. Y otros	$L = 25,272 U^{-1,026}$

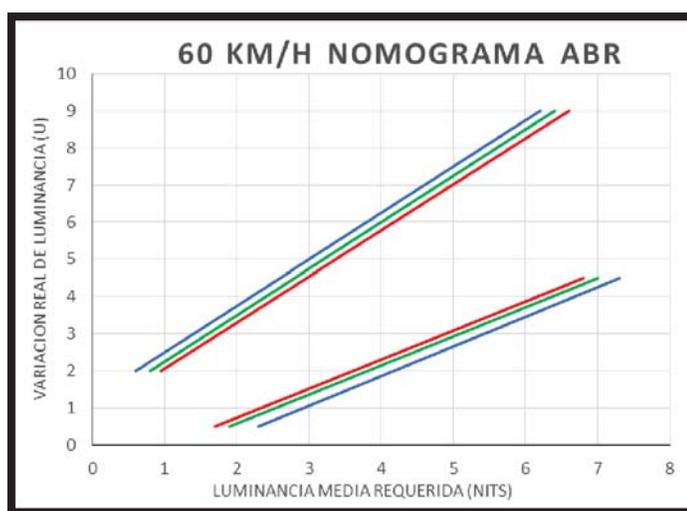


Figura 4-9: Nomograma ABR para 60 km/h.

Tabla 4-6: Ecuaciones características de cada curva ABR

	Ecuación característica		
	Sin encandilamiento	C/encandilamiento por lum. Y otros	C/encandilamiento por luminarias Tráfico op. Y otros
Luminancia Alta	$y = 1,2389x + 0,823$	$y = 1,25x + 1$	$y = 1,25x + 1,25$
Luminancia Baja	$y = 0,7843x - 0,8333$	$y = 0,7843x - 0,9902$	$y = 0,8x - 1,34$

4.3.3 Nomogramas para una velocidad de 80 km/h.

Velocidad:	80 km/h.
Población incluida:	90% de la población hasta 60 años de edad
Detalle a detectar:	4,42'
Factor F:	14,7

A continuación se muestran las curvas logradas por medio de la evaluación de punto a punto de cada curva, junto con sus respectivas ecuaciones matemáticas.

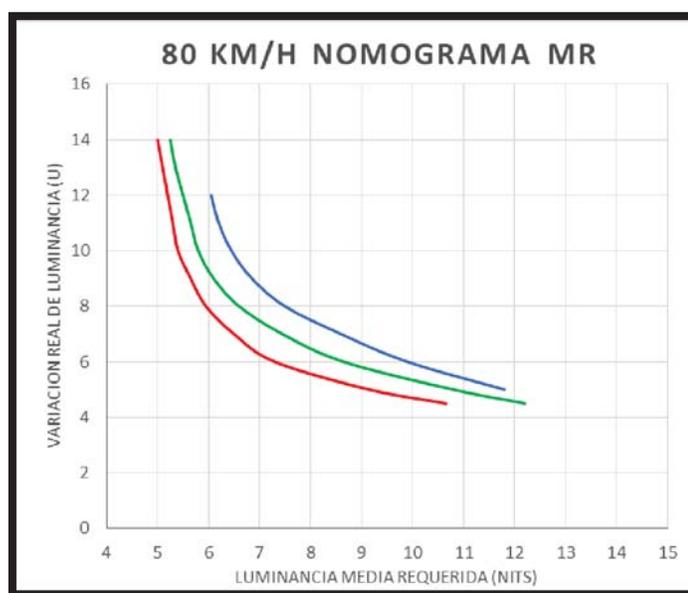


Figura 4-10: Nomograma MR para 80 km/h.

Tabla 4-7: Ecuaciones características de cada curva MR

CURVAS	Ecuaciones características
Sin encandilamiento	$L = 23,851 U^{-0,625}$
C/encandilamiento por luminarias y otros	$L = 33,429 U^{-0,737}$
C/encandilamiento por luminarias, tráfico op. y otros	$L = 40,116 U^{-0,785}$

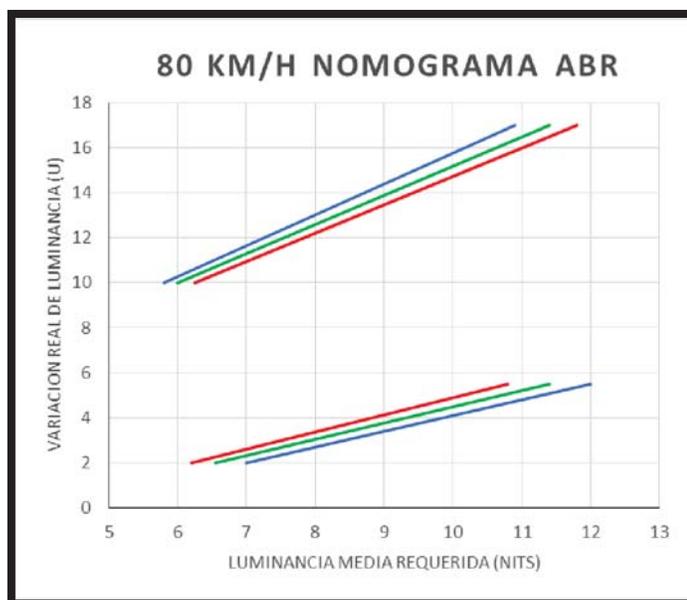


Figura 4-11: Nomograma ABR para 80 km/h.

Tabla 4-8: Ecuaciones características de cada curva ABR

	Ecuación característica		
	Sin encandilamiento	C/encandilamiento por lum. Y otros	C/encandilamiento por luminarias Tráfico op. Y otros
Luminancia Alta	$y = 1,2613x + 2,1171$	$y = 1,2963x + 2,2222$	$y = 1,3725x + 2,0392$
Luminancia Baja	$y = 0,7609x - 2,7174$	$y = 0,7216x - 2,7268$	$y = 0,7x - 2,9$

4.4 Conclusión del capítulo

Considerando todas las áreas estudiadas hasta este momento, y sumando lo ejecutado en este capítulo, se puede ver que se han cumplido en gran parte los objetivos fundamentales que planteaba la realización de este proyecto de estudio.

Uno de esos objetivos se centraba en sistematizar esos conceptos, tratando de lograr una adecuada comprensión de lo propuesto en este método. Eso es lo que se ha hecho en este capítulo, utilizando las herramientas computacionales con el fin de obtener las gráficas utilizadas en términos de ecuaciones que permitan su utilización en programas basados en Excel.

Cabe mencionar, que dichas gráficas y ecuaciones obtenidas aceptarán obviamente ciertos niveles de aproximación, por un tema lógico cuando se traspasan datos análogos a digitales, pero se espera que dichas variaciones sean marginales en consideración a los valores de los resultados finales.

5 Capítulo 5

En vista y consideración que a continuación se presenta el último capítulo de este proyecto de titulación, en el mismo se espera sistematizar y resumir los conceptos estudiados en profundidad en capítulos anteriores, de manera de lograr una adecuada comprensión de lo propuesto por Isaac Goodbar en el método. Además y para dar por terminado este trabajo, se presentará un ejemplo práctico utilizando las herramientas computacionales y matemáticas, para realizar las comparaciones y consideraciones finales respecto al trabajo realizado

5.1 Síntesis del metodo de Goodbar

En esta primera etapa del capítulo, se expondrán y repasarán algunas ideas o conceptos que son relevantes para la comprensión del método en sí, y que si bien fueron explicados con anterioridad en un plano general, ahora se verá cómo influyen ellos en los procesos de cálculo que realizó el ingeniero Goodbar. Además se explicará de manera simple y resumida la idea central propuesta por el ingeniero en su método de alumbrado público.

5.1.1 Fundamentos del método

Este método propuesto por el ingeniero, como bien se sabe se implementó en el año 1972, en las “Normas para proyectos de Alumbrado Público de la ciudad de Buenos Aires” [1], por lo tanto este mismo es un mecanismo que propone las condiciones que debe cumplir un diseño de iluminación de carreteras, pero también servirá para comprobar si diseños ya implementados cumplen con los requerimientos exigidos por el método.

El objetivo de este método es asegurar en cualquier circunstancia, un apropiado nivel de visibilidad al tráfico que circule por la vía, además de permitir la detección de un obstáculo de cualquier valor de luminancia, y con dimensiones similares a las de una persona, con el tiempo suficiente para evitar un accidente.

Para dicho objetivo, el ingeniero buscó en primer lugar definir las principales condiciones físicas que afectarían al momento de detectar un obstáculo. Estas variables principalmente son la **velocidad** del vehículo en tránsito, las **dimensiones** del obstáculo o tarea visual, y los valores de **luminancia** existentes en la calzada.

Con el estudio de esas variables, se podrán definir las características o condiciones de iluminación que deben existir, según este método, para eliminar en gran medida los efectos producidos por el

deslumbramiento, y permitir así que un conductor que viaje a la velocidad recomendada, pueda percibir a un peatón de cualquier nivel de color y reflexión, a una distancia suficiente para permitir el frenado.

Cabe señalar, que el principio fundamental de este método se basa en la existencia de contrastes. Es por eso que los resultados finales que entrega, están dados en valores de luminancia alta y baja, que finalmente son los que entregan los niveles de contraste y uniformidad del sistema.

5.1.2 Explicación del método

La principal misión que se busca en esta etapa del proyecto es explicar de manera un poco más práctica o simple, todo lo visto hasta el momento. En capítulos anteriores ya se definieron en profundidad la mayoría de los conceptos tratados y necesarios para comprender el método, así como también se mostraron los pasos matemáticos y las ecuaciones utilizadas para llegar a las tablas y nomogramas que conforman las normas en estudio.

Por lo tanto ahora se presentará una explicación más menos breve, en la cual se refuercen algunos conceptos, y además se expliquen que influencia tienen cada uno de ellos en el diseño del método.

Primer paso

La primera tarea que busca el ingeniero, para hacer efectivo su método, es determinar el **contraste mínimo** que puede ser percibido por los conductores que transiten por la carretera entre la luminancia del objeto y la luminancia de fondo.

Este contraste se logra calcular por medio de la fórmula (3-1), la cual se muestra a continuación:

$$C = \frac{F}{RCS}$$

Donde vemos que aparece un factor F, dividido por la sensibilidad de contraste relativo.

Bueno ese factor F es muy importante, ya que él representará en principio, las circunstancias o condiciones para las cuales se realiza el cálculo.

Estas condiciones son: la edad de la población que se considera en el estudio, el porcentaje de esa misma población que será capaz de detectar el contraste mínimo, el tiempo que se dispone para detectar el objeto y finalmente el tamaño del objeto o tarea visual (en este caso las dimensiones de una persona promedio).

Además en el documento se adjunta la “tabla I”, representada en este informe por la tabla 3-1, la cual entrega los distintos valores de sensibilidad al contraste relativo, en función de distintos valores de luminancia de fondo.

Recordando que la sensibilidad al contraste relativo es la capacidad que tiene el sistema visual para discriminar entre un objeto y el fondo en el cual se encuentra situado. En términos simples si una persona necesita mucho contraste para poder distinguir un objeto, presentará un valor de RCS bajo, y viceversa.

Esta variable es importante ya que el método basa su ideología en términos de contraste, y además porque la RCS depende directamente de la luminancia, pues a mayor nivel de luminancia, aumentan los niveles de RCS.

Segundo paso

Una vez calculado el contraste mínimo detectable por el conjunto de observadores en cuestión, se analiza el efecto producido por el deslumbramiento sobre la visibilidad. En este caso se sabe que es equivalente al de la superposición de una luminancia de velo sobre todo el campo visual.

Esto produce un aumento de la luminancia de fondo y por ende una reducción teórica del contraste mínimo perceptible, pero como la luminancia de velo afecta a todo el campo visual, también se incrementa el valor de la luminancia de la tarea visual u objeto, lo cual da como resultado una reducción mayor del contraste a percibir.

Finalmente se calcula el valor de luminancia de velo total, el cual es producido por los diversos agentes externos como el tráfico en dirección opuesta, las luminarias, y los letreros luminosos y otros.

Tercer paso

Ahora se analiza el efecto que produce la variación de luminancia en el campo visual, ósea se analiza la existencia de los contrastes.

Se tiene que si las luminancias en distintas partes de la calzada, varían entre un valor máximo y otro mínimo, la sensibilidad al contraste relativo se reducirá.

Esta reducción de sensibilidad al contraste relativo se representa como un factor llamado "Fr", el cual se puede calcular matemáticamente de acuerdo a la ecuación 3-5, presentada en el capítulo 3, y la cual dependerá directamente de la variación real de Luminancia, denominada en este caso (U).

Este valor del factor Fr es el efecto real producido por los contrastes presentes en la calzada, en los cuales basa su hipótesis el ingeniero Isaac Goodbar para asegurar la percepción de objetos de cualquier valor de luminancia.

Pero ¿Qué se entiende por variación real de luminancia?

El ingeniero define la variación real de luminancia como un criterio de uniformidad, en donde U es la relación entre la luminancia alta y la luminancia baja como muestra la siguiente ecuación:

$$U = \frac{L_A}{L_B} \quad (5-1)$$

Cuarto paso

El último paso será comprender de manera lógica cómo influyen estas variaciones de luminancia, en la capacidad para poder percibir obstáculos de cualquier valor de luminancia.

Estos mismos pasos se explicaron de manera detallada y apoyada en ecuaciones matemáticas, en las consideraciones técnicas de la norma, expuestas en el capítulo 3 de este informe, pero ahora se da una explicación corta y breve con la finalidad de lograr una simple comprensión de lo propuesto.

Se tiene que para un cierto valor de luminancia de fondo (L), y condiciones externas ya definidas, se obtiene el contraste mínimo que puede percibirse (C), y con ello también las diferencias mínimas de luminancia que a su vez se podrán percibir (ΔL).

Además frente al automovilista podrá aparecer un obstáculo con cualquier valor de luminancia entre cero y un máximo dependiendo de las condiciones de reflexión de este y su posible posición geométrica respecto a las luminarias.

Suponiendo que el nivel de luminancia del objeto es similar al nivel de luminancia de fondo, este será imposible de detectar por todos o la mayoría de los conductores por no cumplir con los niveles de contraste requeridos. Por lo tanto todos los obstáculos cuyas luminancias estén comprendidas entre " L_a " y " L_b ", serán imposibles de detectar.

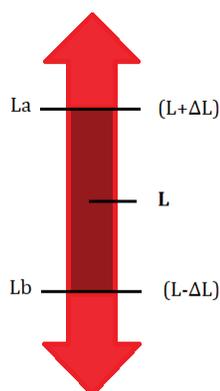


Figura 5-1: Espectro de luminancias del objeto que no serán posibles de detectar.

Luego, con la finalidad de hacer estos obstáculos visibles, es que se hace variar la luminancia de fondo en la proporción U , con lo cual se perderá capacidad de percibir contraste en la proporción Fr , y se determinará un nuevo valor para la diferencia mínima de luminancia que puede percibirse, igual a $\Delta L'$. Con $\Delta L' > \Delta L$.

Finalmente y en concordancia con lo que hemos estudiado, para que todos los obstáculos sean visibles será necesario que la luminancia alta sea por lo menos:

$$A = L + \Delta L'$$

Y que la luminancia baja sea igual o menor que:

$$B = L - \Delta L'$$

Haciendo posible que contra A se puedan distinguir todos los objetos con luminancias menores que L , y contra B se puedan distinguir todos los obstáculos con luminancias mayores que L , resultando visible todo el espectro de luminancias que antes eran imposibles de distinguir.

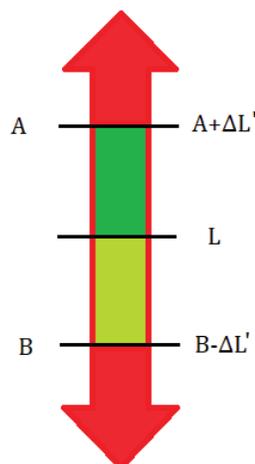


Figura 5-2: Espectro de luminancias del objeto que serán posibles de detectar.

Esto es en sí, la idea básica y fundamental que propone el método del ingeniero Isaac Goodbar, la cual muestra claramente que se puede aprovechar la ventaja que brinda tener distintos niveles de luminancia en la calzada, con el fin de proporcionar los contrastes necesarios para proveer a los conductores de una visibilidad clara y segura. Esto además hace posible distinguir objetos con cualquier nivel de luminancia y a una distancia que permita el frenado completo del vehículo, evitando así posibles accidentes de tránsito.

5.2 Presentación resultados obtenidos

El objetivo final de este proyecto también busca demostrar que los estudios hechos junto con los resultados obtenidos, en términos de tablas y ecuaciones de Excel, deben ser utilizables y confiables a la hora de plantearse un ejemplo práctico. Es por eso que en esta parte del capítulo se hará una demostración o ejemplo utilizando las herramientas obtenidas gracias al estudio realizado.

5.2.1 Tabla resumen

A continuación, en la figura 5-3, se presenta la tabla final de Excel que resume todas las gráficas traspassadas anteriormente a ecuaciones, y que permitirá calcular los valores de luminancia alta y baja requeridos, para una calle o calzada, en función de la variación real de luminancia.

A modo de demostración, se incluyen en las celdas de la tabla Excel, las formulas correspondientes a cada nivel de velocidad y deslumbramiento, con la cuales el programa trabajará para entregar los resultados finales.

Velocidad (Km/hr)	Condiciones del Camino	Variación real de luminancia (U)	Luminancia Media Requerida (nits)	Luminancia Alta Requerida (nits)	Luminancia Baja Requerida (nits)	LAR + 25% (nits)	LBR - 25% (nits)
40	Sin deslumbramiento	DATO	$21,778 U^{-1,983}$	$1,0638x + 0,4043$	$0,8511x - 0,2766$		
	Con deslumbramiento por luminarias y otros		$26,843 U^{-1,983}$	$1,0753x + 0,4409$	$0,8511x - 0,4043$		
	Con deslumbramiento por luminarias, tráfico opuesto y otros		$22,795 U^{-1,6}$	$1,087x + 0,6957$	$0,8333x - 0,63$		
60	Sin deslumbramiento	DATO	$23,532 U^{-1,212}$	$1,2389x + 0,823$	$0,7843x - 0,8333$		
	Con deslumbramiento por luminarias y otros		$23,634 U^{-1,139}$	$1,25x + 1$	$0,7843x - 0,9902$		
	Con deslumbramiento por luminarias, tráfico opuesto y otros		$25,272 U^{-1,026}$	$1,25x + 1,25$	$0,8x - 1,34$		
80	Sin deslumbramiento	DATO	$23,851 U^{-0,625}$	$1,2613x + 2,1171$	$0,7609x - 2,7174$		
	Con deslumbramiento por luminarias y otros		$33,429 U^{-0,737}$	$1,2963x + 2,2222$	$0,7216x - 2,7268$		
	Con deslumbramiento por luminarias, tráfico opuesto y otros		$40,116 U^{-0,785}$	$1,3725x + 2,0392$	$0,7x - 2,9$		

Figura 5-3: Tabla resumen de ecuaciones características

En la figura 5-4 que se muestra en adelante, se puede ver que para cada nivel de velocidad, ingresando el valor de la variación real de luminancia, se entregarán los valores de luminancia alta y baja requeridos, para las 3 distintas condiciones de deslumbramiento del camino.

Solo bastará con ingresar el valor de U, y cada tabla se completará automáticamente con los valores que arrojaron los diseños matemáticos.

Velocidad (Km/hr)	Condiciones del Camino	Variación real de luminancia (U)	Luminancia Media Requerida (nits)	Luminancia Alta Requerida (nits)	Luminancia Baja Requerida (nits)	LAR + 25% (nits)	LBR - 25% (nits)
40	Sin deslumbramiento	DATO					
	Con deslumbramiento por luminarias y otros						
	Con deslumbramiento por luminarias, tráfico opuesto y otros						
60	Sin deslumbramiento	DATO					
	Con deslumbramiento por luminarias y otros						
	Con deslumbramiento por luminarias, tráfico opuesto y otros						
80	Sin deslumbramiento	DATO					
	Con deslumbramiento por luminarias y otros						
	Con deslumbramiento por luminarias, tráfico opuesto y otros						

Figura 5-4: Tabla final de cálculo de luminancias.

5.2.2 Ejemplo práctico

A continuación se hará la comparación entre los valores obtenidos de forma práctica en un ejemplo adjunto en el documento de las normas de alumbrado público para la ciudad de Buenos Aires, vs el cálculo directo ocupando las tablas de Excel que se crearon en función de los nomogramas propuestos para las normas.

- I. El ejemplo se realiza para las siguientes condiciones de diseño:
 - Velocidad: 40 Km/h
 - Con deslumbramiento por luminarias, tráfico en dirección opuesta y letreros luminosos.
 - Detalle a detectar en minutos: 19,5'
 - 95% de la población hasta 65 años de edad
 - Factor F: 5,15 (-)
 - Variación real de luminancia (U) provista por las luminarias : 4,5 (-)
- a) Los resultados obtenidos de manera análoga, en el ejemplo presente en el documento son:

Luminancia media requerida: 2 nits

Luminancia Alta requerida: 2,918 nits

Luminancia Baja requerida: 1,083 nits

- b) Ahora se muestran los resultados obtenidos de manera computacional, obtenidos por la tabla correspondiente a las condiciones del ejemplo.

Velocidad (Km/hr)	Condiciones del Camino	Variación real de luminancia (U)	Luminancia Media Requerida	Luminancia Alta Requerida	Luminancia Baja Requerida	LAR + 25%	LBR - 25%
40	Sin deslumbramiento	4,5	1,103	1,578	0,662	1,973	0,497
	Con deslumbramiento por luminarias y otros		1,360	1,903	0,753	2,379	0,565
	Con deslumbramiento por luminarias, tráfico opuesto y otros		2,054	2,929	1,082	3,661	0,811

Figura 5-5: Resultados para el ejemplo práctico.

De la tabla se obtienen los siguientes resultados:

Luminancia media requerida: 2,054 nits

Luminancia Alta requerida: 2,929 nits

Luminancia Baja requerida: 1,082 nits

Se puede ver que en este caso los resultados son prácticamente similares, por ende las diferencias que se presentan son marginales. Además se aprecia que con el simple hecho de ingresar el valor de la variación real de luminancia (U), que proveen las luminarias en cuestión, la tabla entrega de forma inmediata todos los demás resultados referidos a las demás condiciones de deslumbramiento de la calzada.

Con este ejemplo práctico, en vista y consideración que los resultados obtenidos han sido concordantes con los estudios y análisis vistos previamente, se da por finalizado esta etapa del proyecto, habiéndose cumplido todos los objetivos trazados en un principio del estudio.

5.3 Conclusión del capítulo

Para finalizar, se da por hecho la concreción de los principales objetivos planteados, estimándose que se han comprendido los principales conceptos aplicados por el ingeniero, y que en materia de la sistematización de datos, de acuerdo a los resultados obtenidos, se ha logrado una apropiada aproximación, ya que a la hora de su aplicación, no generará mayores inconvenientes.

Se puede apreciar que finalmente las ideas y concepciones propuestas por el ingeniero, hoy en día están resurgiendo ya que las nuevas tecnologías están centrando sus objetivos nuevamente en la visibilidad, y no tanto en la uniformidad, obteniendo así los ahorros energéticos y económicos que son tan importantes en el mundo actual.

Además, como consideración fundamental, se presenta que el objetivo del método es crear una desuniformidad de luminancias en la vía, creando una especie de manchas que varían entre dos valores de luminancia, generando así que el objeto o tarea visual pueda ser visto simultáneamente, contra la luminancia “Alta” y contra la luminancia “Baja”. Esto se hace posible debido a que el objeto siempre será visto contra el fondo en perspectiva.

Este viene siendo el último “secreto” que trae consigo el método propuesto por el ingeniero, ya que al producirse estas manchas, el objeto siempre será visible, ya que pasa de la situación en que este aparece como un objeto oscuro sobre fondo claro, a inmediatamente un objeto claro sobre fondo oscuro, creando simultáneamente ambas condiciones.



Figura 5-6: Ejemplo de contrastes en la iluminación de carreteras (fuente: <https://www.esmartcity.es>)

Discusión y conclusiones

A continuación, se presentarán todas las conclusiones y resultados referentes al trabajo realizado durante la elaboración de este informe.

Se puede partir mencionando que el trabajo realizado se centró plenamente en la investigación y análisis del método propuesto por el ingeniero Isaac Goodbar, del cual se rescataron y extrajeron la mayor cantidad de datos posibles, con la finalidad de responder a las inquietudes planteadas en el principio de este trabajo.

Uno de los objetivos tácitos que conllevaba la realización de este trabajo, era también, sacar del anonimato un trabajo que se había realizado hace bastante tiempo atrás, y que por consecuencia, no había permitido el justo reconocimiento hacia su autor intelectual, en este caso el sr. Isaac Goodbar. Claramente el trabajo realizado por él, y las metodologías propuestas para el alumbrado público, fueron hechos que claramente tienen una incidencia importante en la historia de la iluminación vial, y por ende se justificaba el realizar un trabajo como este, pues su propuesta de diseño basado en la visibilidad del conductor, y en los contrastes producidos por las diferencias de luminancias presentes en la vía, aún siguen vigentes.

Obviamente se espera que lo realizado en este trabajo, sea un aporte en cuanto a la difusión y el conocimiento por parte del medio, para con un modelo de iluminación creado hace muchos años, pero que marcó un cambio importante en la manera de diseñar modelos de alumbrado público.

Uno de los resultados obtenidos, fue que la metodología implementada por el ingeniero Goodbar, es totalmente realizable, es por eso que años más tarde organismos internacionales, basaron sus metodologías en las bases propuestas por el ingeniero en su método, las cuales tienen que ver con el hecho de asegurar, que los diseños sean basados principalmente en términos de visibilidad.

Lo que logra finalmente el método de Goodbar, es que el obstáculo o tarea visual sea siempre visible, contraponiéndose a modelos que basan su diseño en la uniformidad de iluminación. Los modelos que normalmente se usan y que basan su diseño en la uniformidad, tendrán siempre el inconveniente que en un nivel de luminancia del objeto, este desaparecerá visualmente cuando su nivel de luminancia sea igual al de la luminancia del fondo. Esto claramente generará pérdidas energéticas y económicas, ya que para lograr dichos estándares de uniformidad, se necesitará de mayores niveles de luminancia, y a mayor luminancia, mayor energía.

Es por eso que es tan valorable lo propuesto por Goodbar, ya que a partir de su metodología, se pueden realizar diseños que traigan como beneficio no solo mejoras visuales, sino también ahorros considerables en términos de energía, producto de la disminución en el promedio de la luminancia total requerida por el sistema, lo que a su vez generará los correspondientes beneficios económicos.

Hoy en día se sabe que nuevas tecnologías de diseño de alumbrado público, están basando sus metodologías en las mismas premisas propuestas en el método de Goodbar, por lo tanto todo lo estudiado e investigado en este trabajo, no solo cumple con desenterrar un método olvidado, sino que además, este pudiera ser aplicado en cualquier circunstancia en la cual se desee realizar un diseño actualizado de iluminación vial.

Por lo tanto, así como se pueden realizar diseños, partiendo de las características físicas presentes en la calzada, también se podrán hacer mediciones y estudios a sistemas ya diseñados, con el fin de verificar si las condiciones actuales de los mismos, cumplen o no con lo especificado por este método. Es por eso que la principal aplicación de este método de iluminación de alumbrado público, fue en las normas para la ciudad de Buenos Aires, las cuales fueron presentadas como bien se sabe en el año 1972.

Sin embargo cabe mencionar que una segunda parte referente a este proyecto, pudiera ser como implementar o realizar el diseño acabado de un sistema, utilizando este método, y definiendo todas las demás características como lo son las distancias entre luminarias y las alturas de montaje, para lograr los valores de luminancia requeridos. Claramente esa parte de la investigación, no estuvo dentro de los alcances de este trabajo, pero perfectamente podría ser la continuación del mismo.

Así, se da por terminado el informe del proyecto de título, del cual se obtuvieron grandes enseñanzas referidas a la historia de la iluminación, la importancia de la misma y como se observa que siempre la ingeniería en iluminación está en constante progreso y avance.

Además se cree que este es un pequeño gesto, de rendición de honores para un gran personaje en la historia de la ingeniería, como lo fue Isaac Goodbar, quien realizó un sinnúmero de contribuciones al desarrollo de la iluminación.

Bibliografía

- [1] I. Goodbar, «Normas para el alumbrado público de la ciudad de Buenos Aires,» Buenos Aires, 1972.
- [2] Administration Federal Highway, "Effectiveness of highway arterial lighting," Washington, 1975.
- [3] R. Gregory, *Eye and brain: the psychology of seeing*, Oxford, 1997.
- [4] O. Boix, *Luminotecnia, iluminación de interior y exteriores*, Cataluña, 2011.
- [5] E. Gómez, «Guía Básica de conceptos de radiometría y fotometría,» Sevilla, 2006.
- [6] J. Murdoch, *Illuminating Engineering: From Edison's lamp to the LED*, New York, 2003.