

OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO ENERGÉTICO DE ILUMINACIÓN HÍBRIDA
INTELIGENTE (NATURAL Y ARTIFICIAL) EN UN ENTORNO TROPICAL

EDWAR YESID IBAGUÉ RÍOS

NATHALIE TARAZONA ROJAS

MARIO ANDRÉS SERRANO DUARTE

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS

ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES

BUCARAMANGA

2015

OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO ENERGÉTICO DE ILUMINACIÓN HÍBRIDA
INTELIGENTE (NATURAL Y ARTIFICIAL) EN UN ENTORNO TROPICAL

EDWAR YESID IBAGUÉ RÍOS¹

NATHALIE TARAZONA ROJAS²

MARIO ANDRÉS SERRANO DUARTE²

¹Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Electrónico

²Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Electricista

Director:

MIE. GERMÁN ALFONSO OSMA PINTO

Codirector:

PhD. DANIEL ALFONSO SIERRA BUENO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES

BUCARAMANGA

2015



TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	16
1 MARCO TEÓRICO.....	19
1.1 ILUMINACIÓN.....	19
1.2 ILUMINACIÓN NATURAL.....	19
1.3 ILUMINACIÓN ARTIFICIAL.....	20
1.4 ILUMINACIÓN HÍBRIDA.....	21
1.5 MARCO REGLAMENTARIO.....	22
1.6 PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN.....	22
1.7 BÚSQUEDA POR FUERZA BRUTA.....	24
1.8 ALGORITMOS GENÉTICOS.....	25
1.9 DIALUX.....	28
2 MODELADO DEL SISTEMA DE ILUMINACIÓN.....	28
2.1 MODELADO DEL SISTEMA DE ILUMINACIÓN HÍBRIDO.....	29
2.2 MODELADO DEL SISTEMA DE ILUMINACIÓN NATURAL: VENTANA..	32
2.3 MODELADO DEL SISTEMA DE ILUMINACIÓN NATURAL: TUBO SOLAR 34	
2.4 MODELADO DEL SISTEMA DE ILUMINACIÓN ARTIFICIAL.....	39
3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN.....	44
3.1 NECESIDADES Y RECURSOS.....	46
3.2 PLANTEAMIENTO DE LA BÚSQUEDA POR FUERZA BRUTA PARA RESOLVER EL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN.....	56
3.3 PLANTEAMIENTO DE LA BÚSQUEDA POR ALGORITMO GENÉTICO PARA EL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN.....	57
4 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	61
4.1 FUERZA BRUTA.....	61
4.2 ALGORITMO GENÉTICO.....	71
4.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS: FUERZA BRUTA VS ALGORITMO GENÉTICO.....	80
5 ANÁLISIS DE TENDENCIAS.....	84
6 CONCLUSIONES.....	91
7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	93

BIBLIOGRAFÍA..... 94
ANEXOS 97

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Región de un problema de optimización que involucra a 2 variables	24
Figura 2 Entorno de la aplicación de optimización MatLab®.	27
Figura 3. Diagrama de bloques con las funciones que intervienen en la optimización del sistema de iluminación.	28
Figura 4. Puntos considerados para el análisis del sistema de iluminación de un salón.	30
Figura 5. Esquema de bloques de pasos optimización iluminación artificial	35
Figura 6. Iluminancia producida por un tubo solar.	37
Figura 7. Esquema de bloques con los pasos optimización iluminación artificial...	39
Figura 8. Distribución luminosa de luminarias.	40
Figura 9. Puntos de análisis.	41
Figura 10. Representación de elementos del sistema de iluminación.	45
Figura 11. Costo de Kw/h vs horas de un día.	46
Figura 12. Curva actividad humana.	47
Figura 13. Pasos para el desarrollo de AG	59
Figura 14. Resultados VPN vs TOP 10 de búsqueda de solución por fuerza bruta.	64
Figura 15. Resultados dimensiones de la ventana vs TOP 10 de búsqueda de solución por fuerza bruta	65
Figura 16. Consumo diario	67
Figura 17. Consumo diario	69
Figura 18. <i>Best Fitness</i> de las funciones de <i>Fitness Scaling</i>	81
Figura 19. Resultados de dimensiones de la ventana para las opciones de <i>Fitness scaling</i>	82
Figura 20. Tendencia de área de ventana vs VPN	85
Figura 21. Consumo energético vs diseño de iluminación artificial	87
Figura 22. Sistemas de control on/off y dimerizable vs costo de operación anual y costo de mantenimiento a 20 años.....	88
Figura 23. Tendencia tubos solares vs VPN.....	90

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Variables de <i>Light.H</i> y sus unidades.....	31
Tabla 2. Variables que intervienen en <i>Light.w</i> y sus unidades	32
Tabla 3 Parámetros que intervienen en <i>Light.w</i> y sus unidades.....	32
Tabla 4. Variables que intervienen en <i>Light.ts</i> y sus unidades	36
Tabla 5. Parámetros que intervienen en <i>Light.ts.unid</i> y sus unidades	37
Tabla 6. Ubicaciones óptimas para los tubos solares para cada número de tubos solares utilizados.	39
Tabla 7. Iluminación en puntos de análisis según tipo de luminaria.	42
Tabla 8. Notación de las funciones con su descripción y unidad	43
Tabla 9. Variables que intervienen en <i>Consumed.kW</i>	44
Tabla 10. Notación de las funciones con su descripción y unidad	48
Tabla 11. Variables que intervienen en <i>S.Inv</i>	49
Tabla 12. Parámetros que intervienen en <i>S.Inv</i>	49
Tabla 13. Especificaciones de costos de las luminarias	50
Tabla 14. Especificaciones de costos para control On/off y dimerizable	51
Tabla 15. Información de Costos financieros	51
Tabla 16. Variables que intervienen en <i>Cost.Maint(t)</i>	55
Tabla 17. Variables que intervienen en <i>S.Inv</i>	55
Tabla 18. Rango de las variables de entrada utilizadas en la solución del problema de optimización	61
Tabla 19. Resultados de tiempo de iteraciones	62
Tabla 20. TOP 10 de resultados por Fuerza Bruta.	63
Tabla 21. Resultados de costos utilizados en el proyecto	66
Tabla 22. Resultado de iteraciones	67
Tabla 23. Inversión inicial.....	67
Tabla 24. Costo y consumo de un día en kWh.....	68
Tabla 25 Inversión inicial.....	69
Tabla 26. Consumo y costo en un día	70
Tabla 27. Valores asignados a las funciones del <i>Toolbox</i>	73

Tabla 28. <i>Fitness Scaling: Rank</i>	74
Tabla 29. Top 10 de resultados por algoritmos genéticos con <i>Fitness Scaling: Rank</i>	75
Tabla 30. Top 10 de <i>Fitness Scaling: Proportional</i>	76
Tabla 31. Top 10 de resultados por algoritmos genéticos con <i>Fitness Scaling: Proportional</i>	77
Tabla 32. <i>Fitness Scaling: Top</i>	77
Tabla 33. Top 10 de resultados por algoritmos genéticos con <i>Fitness Scaling: Top</i>	78
Tabla 34. Top 10 de <i>Fitness Scaling: shift linear</i>	79
Tabla 35. Top 10 de resultados por algoritmos genéticos con <i>Fitness Scaling: shift linear</i>	80
Tabla 36. Resumen de algoritmos genéticos por <i>Fitness Scaling</i>	82
Tabla 37. Mejores valores de las funciones de <i>Fitness Scaling</i>	83
Tabla 38. Tendencias de ventana vs VPN	85
Tabla 39. Consumo de un día vs VPN.....	86
Tabla 40. Costos de operación vs Sistema de control	87
Tabla 41. Tendencia de tubos solares vs VPN	89

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A: Niveles de iluminación para salón de clases	94
ANEXO B: Ficha técnica de luminarias	95
ANEXO C: Posiciones de luminarias	99
ANEXO D: Cotización tubo solar	101
ANEXO E: Configuraciones aleatorias de variables de decisión	102

RESUMEN

TITULO: OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO ENERGÉTICO DE ILUMINACIÓN HÍBRIDA INTELIGENTE (NATURAL Y ARTIFICIAL) EN UN ENTORNO TROPICAL*

AUTORES: EDWAR YESID IBAGUÉ RÍOS, MARIO ANDRÉS SERRANO DUARTE, NATHALIE TARAZONA ROJAS**

PALABRAS CLAVE: OPTIMIZACIÓN, ILUMINACIÓN HÍBRIDA INTELIGENTE.

DESCRIPCIÓN:

En este trabajo de grado se presenta la optimización del diseño energético de iluminación híbrida inteligente (natural y artificial), de un salón de clases con dimensiones específicas y condiciones ambientales propias de una zona tropical. El modelo matemático del aula fue aportado por una tesis doctoral, en este modelo se consideran los aportes de iluminación provenientes de fuentes naturales, como las ventanas y los tubos solares, al igual que las fuentes artificiales iluminación, como las luminarias. También son tenidos en cuenta los costos de instalación, funcionamiento y mantenimiento, del sistema de iluminación. Adicionalmente se establecen restricciones al modelo, debido a las características reales de los componentes del sistema de iluminación. El modelo es codificado para ser optimizado en la herramienta de computo MATLAB, por medio de los dos métodos de optimización, el método de fuerza bruta y el método de algoritmos genéticos. Para posteriormente comparar los resultados obtenidos en cada uno de ellos, identificar el método que mejor resuelva el modelo, en este caso se refiere al que mejor minimice el índice financiero valor presente neto VPN, que se considera como la función objetivo del problema a optimizar. Finalmente se establecen tendencias de consumo energético y financiero a partir de comparar variables de decisión y modificarlas aleatoriamente para observar el comportamiento de los indicadores de consumo.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica Electrónica y de Telecomunicaciones. Director MSc. Germán Alfonso Osma Pinto. Codirector Dr. Daniel Alfonso Sierra Bueno

ABSTRACT

TITLE: OPTIMIZATION OF THE ENERGETIC DESIGN OF INTELLIGENT HYBRID LIGHTING (NATURAL AND ARTIFICIAL) IN A TROPICAL ZONE*

AUTHORS: EDWAR YESID IBAGUÉ RÍOS, MARIO ANDRÉS SERRANO DUARTE, NATHALIE TARAZONA ROJAS**

KEY WORDS: OPTIMIZATION, INTELLIGENT HYBRID LIGHTING.

DESCRIPTION:

This degree project presents the optimization of the energetic design of intelligent hybrid lighting (natural and artificial), of a classroom with specific dimensions and environmental conditions in a tropical zone. For this, two optimization methods are established: The brute-force method and the genetic algorithms method. One of them will provide the best answer to the objective function which refers to minimize the financial index net present value (NVP). In this study, the mathematical model of the classroom was provided by a doctoral thesis. Based on this model, it is taken into account some contributions coming from natural sources (windows, solar tubes), artificial sources (lighting, light) and the costs of installation, functioning and maintenance of the lighting system. Additionally, some restrictions are established to the model due to the real characteristics of the components of the lighting system. Then, it is codified to be optimized in the computer vision system toolbok *MATLab* by the two optimization methods previously mentioned (*The brute-force and the genetic algorithms method*), and the results obtained are compared in each of them. Finally, the energetic trends and financial consumption are set from comparing variable decisions and from modifying them randomly to observe the behavior of the consumption indicators.

* Undergraduate Dissertation.

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering, School of Electrical, Electronic and Telecommunication Engineering. Director: MSc. Germán Alfonso Osma Pinto. Codirector: Dr. Daniel Alfonso Sierra Bueno

INTRODUCCIÓN

La mayoría de las actividades humanas son realizadas en edificaciones donde se requiere un mínimo nivel de iluminación para satisfacer la necesidad visual de los ocupantes. La humanidad ha conseguido garantizar esta iluminación de forma artificial con el desarrollo tecnológico, que permite brindar los niveles de iluminación adecuados para cada sitio.

Por lo tanto, se puede decir que la iluminación ha evolucionado junto con la humanidad y ha permitido que los sistemas de iluminación hagan parte de las construcciones, convergiendo esa necesidad en un consumo de energía eléctrica que se estima en promedio es del 21% de la demanda mensual de un hogar en las principales ciudades del país [1].

Con lo anterior, el consumo de la iluminación y el crecimiento de la demanda energética, hace necesario diseñar mejores sistemas de iluminación para lograr el uso racional de los recursos, aprovechando la iluminación solar y regulando la utilización de la iluminación artificial, en búsqueda de la eficiencia energética de las nuevas edificaciones. Esto permitirá contribuir a la disminución del uso de combustibles fósiles, necesarios en cierta medida para producir la energía eléctrica y los costos monetarios que este consumo representa [2] [3] [4].

Los sistemas de iluminación presentan buenas oportunidades de implementar soluciones de eficiencia energética y desarrollar nuevos métodos que permitan hacer un ahorro de energía eléctrica para los usuarios. Estos sistemas permiten mejorar índices que miden el desempeño del sistema. Algunas veces esos índices son cuantificados y representados como variables algebraicas. Por tanto, se deben encontrar valores para esas variables que reduzcan los gastos [5].

Hoy en día, existen diversos métodos para controlar la iluminación que permiten programar el mando al apagar, encender y la regulación de la iluminación según la hora del día y el día de la semana [6].

Con base en lo anterior, se propone la optimización de un diseño energético basado en un modelo del comportamiento lumínico, aportado por una Tesis Doctoral¹ y del problema de optimización. Posteriormente, se busca la combinación de tecnologías tanto de iluminación natural como artificial que permitan una mejor contribución de la luz.

El problema de optimización está enfocado en técnicas de búsqueda por fuerza bruta y algoritmos genéticos, donde el objetivo principal del problema es encontrar la combinación de tecnologías (tubos solares, ventana y luminarias) más económicas y la cantidad necesarias de las mismas.

El desarrollo del proyecto inicia con la formulación del modelo a utilizar. Dicho modelo considera la iluminación natural aportada por la ventana y los tubos solares, además de la iluminación artificial. Se consideró un modelo matemático que permite determinar el aporte de cada componente lumínico al sistema, además de los costos correspondientes a inversión, operación y mantenimiento del sistema.

Se plantea el problema de optimización de menor consumo energético, teniendo en cuenta que el aporte de luz proveniente de la ventana (con características específicas), es representado por una función senoidal, que emula el comportamiento de la radiación solar durante las 24 horas del día, la cual es aportada por una Tesis Doctoral¹.

¹ Modelado y optimización del diseño energético de viviendas a partir de aplicaciones URE. MIE Germán Alfonso Osma Pinto

Adicionalmente, se propone optimizar la cantidad de tubos solares (en posiciones predispuestas para cada tubo) que complementen el aporte lumínico proveniente de la ventana. Este conjunto conforma la iluminación natural.

Respecto al componente artificial del sistema, se aplica la herramienta computacional DIALux, la cual permite simular y determinar el aporte lumínico en el espacio seleccionado, a partir de diferentes tipos de luminarias para usar estos resultados y seleccionar el mejor en el proceso de optimización.

Posteriormente, el modelo matemático permite relacionar los criterios involucrados en el sistema de iluminación, la función objetivo y las restricciones propias del problema de optimización. Las características de cada estrategia de optimización orientan el proceso al menor consumo energético dependiendo del comportamiento de los factores que intervienen en el sistema de iluminación, para finalmente establecer tendencias de consumo energético y costo financiero total.

Para obtener dichas tendencias, se inicia con la descripción gráfica del modelo que se adoptó, allí se muestran las funciones que se utilizan para llegar a la función objetivo empleada. Para ello, se utiliza el indicador financiero del valor presente neto (VPN) para encontrar el costo presente de una solución optada para 20 años.

Finalmente, se analiza el diseño propuesto a partir de la creación de códigos y simulaciones de los mismos por medio de MATLAB. Se determinaron factores como el valor de la función objetivo, tiempo de ejecución y la tendencia de la solución, esto con el fin de realizar una comparación de resultados que permitió evaluar el desempeño de los métodos de fuerza bruta y algoritmo genético.

1 MARCO TEÓRICO

En este capítulo se hace una descripción de la fundamentación teórica necesaria para el desarrollo del trabajo de grado.

1.1 ILUMINACIÓN

La iluminación se define como la cantidad de flujo luminoso por unidad de área, su unidad es el lux. Donde la luz es la energía en forma de radiación electromagnética capaz de afectar el órgano visual humano, compuesta de partículas energizadas llamadas fotones, cuyo grado de energía y frecuencia determinan la longitud de onda y el color [7].

1.2 ILUMINACIÓN NATURAL

La iluminación natural tiene gran influencia en el balance energético de los edificios y rendimiento de las actividades humanas. Por ello, se implementa el uso de ventanas, aberturas o superficies reflectantes, a fin de que durante el día la luz natural ofrezca una eficaz iluminación interior. El objetivo es maximizar el confort visual y reducir el uso de energía eléctrica [10].

La utilización de sistemas de iluminación que aprovechen la luz solar genera un aumento en la productividad del trabajo de entre el 6% y el 16%. Esto se debe a que el espectro de la luz solar influye en las células ganglionares, y así controlan los niveles de melatonina y cortisol que sincronizan el reloj biológico de las personas [12].

La luz natural llega al interior de un recinto directa o indirectamente, dispersada por la atmósfera y reflejada por las superficies del ambiente natural o artificial. La iluminación natural constituye una alternativa válida para la iluminación de interiores y su aporte es valioso no solo en relación a la cantidad, sino también a la calidad de la iluminación. La transmisión de la luz natural está influenciada por las características de las aberturas tales como su posición, su dimensión, su forma y el material de transmisión utilizado en ellas [10] [11].

El principal elemento arquitectónico transmisor de la luz es la ventana. Ésta permite iluminar, ventilar naturalmente y obtener ganancias solares. De hecho, las condiciones de luz natural y el confort térmico están a menudo en conflicto, es decir cuanto mayor es el área de ventanas, mayor es la cantidad de luz natural. Sin embargo, mayor es la pérdida y ganancia de calor, a menos que se introduzcan otros elementos para contrarrestar estos efectos [10].

1.3 ILUMINACIÓN ARTIFICIAL

Pese al aprovechamiento de la luz natural en la iluminación interior de edificios, se hace necesaria la utilización de luz artificial que brinde los niveles de iluminación adecuados para el desarrollo de las diferentes actividades de manera confortable y sin producir molestias o decadencia en la visión humana [7].

Entre las fuentes de iluminación artificial están las lámparas incandescentes, que suelen contener un filamento metálico sellado dentro de un tubo de vidrio y utilizan electricidad para calentar el metal hasta que se ilumina. Este es el caso de las bombillas tradicionales, utilizadas durante muchos años, pero cuyo uso se está reduciendo gradualmente en favor de luces de menor consumo energético. Las lámparas halógenas siguen el mismo principio pero el tubo contiene un gas que hace que la luz sea mucho más brillante y la lámpara más eficiente [7] [8] [9].

Hay lámparas que mantienen el gas a baja presión, siendo el ejemplo más común los fluorescentes. Las lámparas de descarga de alta presión producen una luz más brillante, se utilizan para iluminar edificios grandes, en la realización de televisión o cine y para el alumbrado público. La iluminación de estado sólido es una nueva tecnología que podría convertirse en la principal fuente de luz artificial en el futuro. Los conocidos diodos emisores de luz (LED) [7] [8] [9].

Las lámparas necesitan soporte y conexión eléctrica para una correcta distribución luminosa, las luminarias cumplen con esta función, pero para hacerlo de manera eficiente es necesario que posean determinadas características, tales como [10]:

- Color y distribución.

- Fácil instalación y mantenimiento.
- Economía y estética.
- Rendimiento de la luminaria.

Otro factor que influye en la calidad y el confort de la iluminación es el deslumbramiento, una sensación visual de brillo que se genera al entrar en contacto directo o reflejado de una fuente de luz, que puede resultar molesto para el observador e inhabilitarlo momentáneamente. En el deslumbramiento participan los siguientes factores [11]:

- Luminancia de la fuente de luz
- Ubicación de la fuente de luz
- Distribución de luminancias entre diferentes objetos y superficies
- Tiempo de exposición

1.4 ILUMINACIÓN HÍBRIDA

El objetivo fundamental de la iluminación de interiores es alcanzar un nivel de iluminación mínimo, de tal modo que satisfaga las necesidades visuales de los ocupantes. Además, debe garantizarse el confort visual de las personas de tal manera que tengan una sensación de bienestar [12].

Las estrategias de iluminación eficientes están dirigidas fundamentalmente al desarrollo de un mayor nivel de iluminación para una determinada tarea con el mínimo consumo energético [12].

Los sistemas de iluminación híbrida combinan las fuentes de iluminación natural y artificial para satisfacer las necesidades visuales. La integración adecuada de la iluminación natural ofrece una reducción en el consumo energético, mejora la distribución de la iluminación y genera un ambiente saludable [15].

La luz natural tiene una gran influencia sobre el balance energético de los edificios y sobre la propia actividad humana. Por ello se presta especial atención al uso de

iluminación natural en el diseño de los edificios, utilizar todos los medios necesarios para hacer uso racional y eficiente de los recursos [10].

Con un aprovechamiento óptimo de la luz natural se puede ahorrar energía, pero éste también tiene influencia sobre la energía usada para calentar y enfriar el edificio. El equilibrio entre estos factores debe ser estimado cuidadosamente y, por ello, el control de la iluminación natural se combina a menudo con el control térmico [10].

1.5 MARCO REGLAMENTARIO

El Ministerio de Minas y Energía, mediante el Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público RETILAP, establece los requisitos y medidas que deben cumplir los sistemas de iluminación y alumbrado público, a fin de garantizar el nivel y calidad de la energía lumínica requerida en la actividad visual, la seguridad en el abastecimiento energético, la protección del consumidor y la preservación del medio ambiente; previniendo, minimizando o eliminando los riesgos originados por la instalación y uso de sistemas de iluminación [12].

También establece las reglas generales que se deben tener en cuenta en los sistemas de iluminación interior y exterior, y dentro de estos últimos, los de alumbrado público en el territorio colombiano. Esto permite, el uso racional y eficiente de energía (URE) en iluminación. En tal sentido, señala las exigencias y especificaciones mínimas para que las instalaciones de iluminación garanticen la seguridad y confort con base en su buen diseño y desempeño operativo, así como los requisitos de los productos empleados en las mismas [7].

1.6 PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN

El planteamiento de un problema de optimización debe equilibrar dos características en el modelo a optimizar [13]:

- Precisión: Construir un modelo suficientemente preciso que describa apropiadamente el problema.

- Simplicidad: Construir un modelo tratable, que se pueda resolver mediante alguna técnica de solución.

- **Estructura de un problema de optimización**

Un problema de optimización puede dividirse en 3 partes fundamentales [14]:

- Función objetivo: Función matemática que genera una salida a partir de unas determinadas variables de entrada.
- Variables de decisión: Son el conjunto de variables cuya magnitud se determina resolviendo el modelo del problema de optimización.
- Restricciones: Conjunto de igualdades y desigualdades que limitan los valores que pueden tomar las variables de decisión de la solución.

Formalmente, se busca minimizar o maximizar la función objetivo en el espacio factible de solución matemáticamente [15]:

Minimizar o maximizar $f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$.

Función objetivo sujeto a:

$$H_k(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = 0 \quad k = 1, 2, 3, \dots, K \quad \text{Restricciones de igualdad.}$$

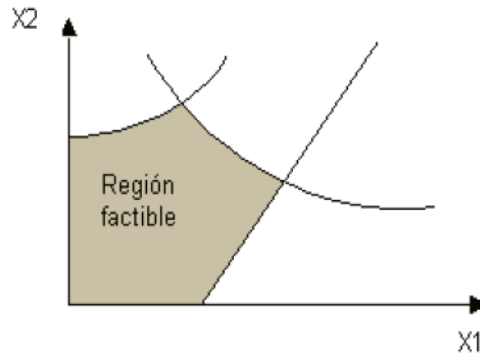
$$G_j(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \geq 0 \quad j = 1, 2, 3, \dots, J \quad \text{Restricciones de desigualdad.}$$

$$x_i^l \leq x_k \leq x_i^v \quad i = 1, 2, 3, \dots, I \quad \text{Restricciones de desigualdad.}$$

La región factible es el conjunto de valores de las variables independientes que satisfacen simultáneamente las restricciones de igualdad y de desigualdad. Así por ejemplo, las condiciones de igualdad solo se satisfacen en una curva, en el caso de que se traten solamente de dos variables y puedan representarse en el plano. Se aplica el mismo caso en una condición de desigualdad, separa el plano en dos zonas, una de valores factibles y la otra de valores no factibles. En la

Figura 1 se presenta un diagrama que muestra la región factible de un problema de optimización de dos variables [15].

Figura 1. Región de un problema de optimización que involucra a 2 variables



Fuente: "Diseño y Análisis de Algoritmos con Java" [15].

- Algoritmos iterativos y convergencia

Las computadoras de alta velocidad permiten una mayor capacidad para resolver en forma eficiente operaciones repetitivas que son ideales para ejecutar algoritmos iterativos [15]. Un ejemplo de un algoritmo iterativo genérico es el siguiente:

Objeto del algoritmo: La búsqueda de un vector óptimo x^* (solución)

- Selecciona un vector inicial x_0 .
- A partir de x_0 genera un vector mejorado x_1 .
- A partir de x_1 genera un vector mejorado x_2 y así sucesivamente encuentra una secuencia de puntos cada vez mejores $x_0, x_1, x_2, \dots, x_k, \dots, x_n$, que se aproximan a un punto solución x^* .

1.7 BÚSQUEDA POR FUERZA BRUTA

El algoritmo de fuerza bruta se caracteriza por falta de sofisticación en la solución. En general, se toma la ruta más directa, sin ningún intento de minimizar el número de operaciones necesarias para obtener la solución [15]. En otras palabras, con este algoritmo se debe encontrar todas las soluciones con las posibles

combinaciones de variables, para posteriormente encontrar la mejor solución de acuerdo al tipo de problema (búsqueda de máximos o mínimos).

La búsqueda por fuerza bruta es sencilla de implementar. Una de sus principales características es que siempre encuentra (desde que exista) el punto óptimo. Es útil como método base cuando se desea comparar el desempeño de otros algoritmos de optimización [15]. Este método suele ser utilizado cuando es necesaria una implementación sencilla sobre una mayor rapidez. Este puede ser el caso en aplicaciones críticas donde cualquier error en el algoritmo puede acarrear serias consecuencias [14].

1.8 ALGORITMOS GENÉTICOS

Los algoritmos genéticos son métodos adaptativos utilizados frecuentemente en problemas de búsqueda y optimización. Tienen como fundamento el comportamiento natural de los seres vivos en la búsqueda de pareja y alimento, siendo su base el principio de supervivencia del más apto. Fueron propuestos en el año de 1975 por John Holland, quién estructuró su trabajo empleando los procesos de selección natural enunciados por Darwin como herramientas para encontrar la solución a problemas de optimización en ingeniería [14].

Los algoritmos genéticos trabajan sobre una población de individuos, en donde cada uno de ellos representa una posible solución al problema a tratar. Todo individuo tiene asignado un ajuste de acuerdo a su capacidad de dar solución al problema [14].

Se parte de una población inicial de individuos escogida al azar. A partir de los ajustes propios de cada individuo se generan parámetros conocidos como probabilidad de selección y probabilidad de cruce [14].

La probabilidad de selección es alta cuando el individuo tiene las mejores capacidades adaptativas al problema, esto quiere decir que lo más seguro es que sea elegido para ser padre de una siguiente generación de soluciones, o probablemente, haga parte de este conjunto sin necesidad de reproducirse. La

probabilidad de cruce representa la posibilidad de que el individuo sea escogido para tener descendientes [14].

Cuando está probabilidad es baja, el individuo es desechado. De esta manera se eligen los más adaptados para la siguiente generación. Para crear una nueva generación se definen operadores de cruce, los cuales determinan en qué punto se debe partir la cadena binaria de los padres y como se distribuyen estos valores para sus descendientes. Siempre se producen dos hijos de cada cruce. De esta manera se obtiene una nueva población de posibles soluciones [14].

Adicionalmente, es necesario establecer unos parámetros conocidos como probabilidad de mutación y operador de mutación. El objetivo es evitar la homogenización de la población, ya que todos los individuos con el paso de las generaciones tienden a parecerse entre sí. Esto quiere decir que se puede llegar a una generación donde todos los individuos son similares pero ninguno de ellos representa una solución óptima al problema [14].

Generalmente, las probabilidades de mutación son bajas y la forma más simple de la operación de mutación es el cambio de uno de los bits de la codificación de un individuo. Este proceso se lleva a cabo apenas se generan los dos descendientes que van a ser parte de la siguiente población [14].

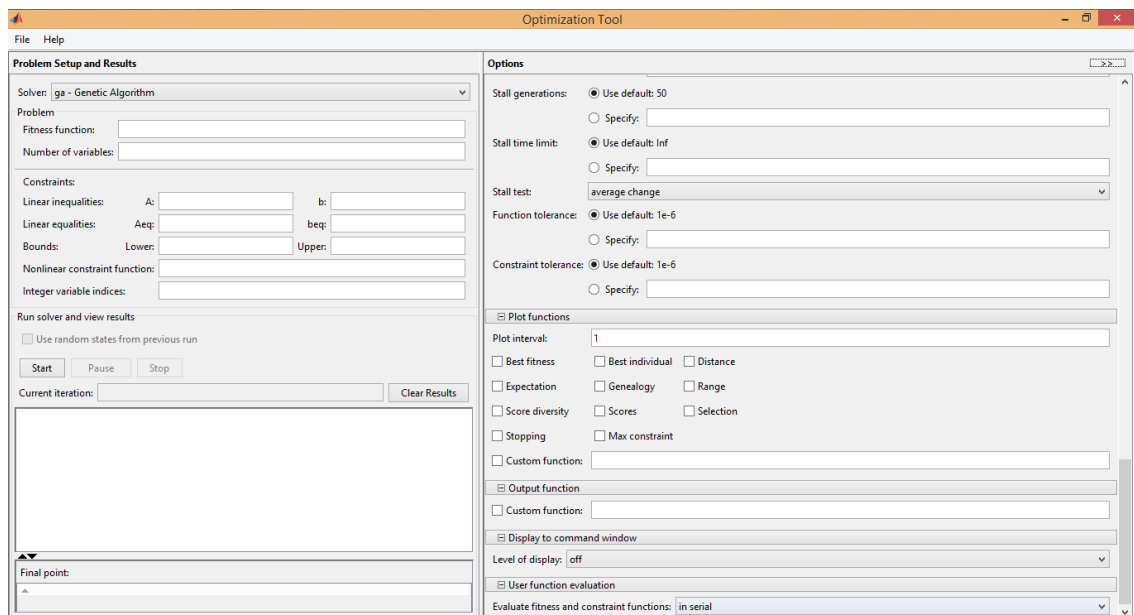
El procedimiento del algoritmo se repite las veces que sea necesario hasta que se encuentre una solución que cumpla todos los requerimientos del problema satisfactoriamente.

- **Algoritmos genéticos en MatLab**

MATLAB® es un lenguaje de alto nivel que ofrece un entorno interactivo de programación, visualización y computación numérica. Dentro de la variedad de aplicaciones que ofrece esta plataforma de computo se encuentran el procesamiento de señales y comunicaciones, procesamiento de imagen y vídeo, sistemas de control, pruebas y medidas, finanzas computacionales y biología computacional [16].

Dentro de las herramientas (ToolBox) de MatLab® se encuentran una colección de rutinas de programación que implementan las más importantes funciones para algoritmos genéticos [17]. Además ofrece una aplicación de optimización (optimtool) con un entorno gráfico, ilustrado en la Figura 2, que permite ingresar valores en cuadros de texto, escoger opciones en menús deslizantes, visualizar resultados en el tiempo de ejecución, exportar el proyecto en forma de código y muchas otras que la hacen una herramienta de fácil manejo y comprensión.

Figura 2 Entorno de la aplicación de optimización MatLab®.



Fuente: Autores.

Como muestra la Figura 2, la aplicación está dividida en dos partes. A la izquierda se encuentra el campo de configuración del problema que incluye definición de la función *fitness*, cantidad de variables y restricciones, en la parte inferior muestra los resultados junto con un control de ejecución incluida la opción de pausa.

En la parte derecha de la aplicación se encuentran las diversas opciones de los AG que serán modificados por el usuario para modelar el problema de optimización, las opciones que se encuentran son: Población, Escalado de Aptitud, Selección, Reproducción, Mutación, Cruce, Migración, Parámetros de Restricción,

Función Híbrida, Criterios de Parada, Gráfica de Funciones, Función de Salida, Muestra de Ventana de Comandos y Evaluación de la Función del Usuario.

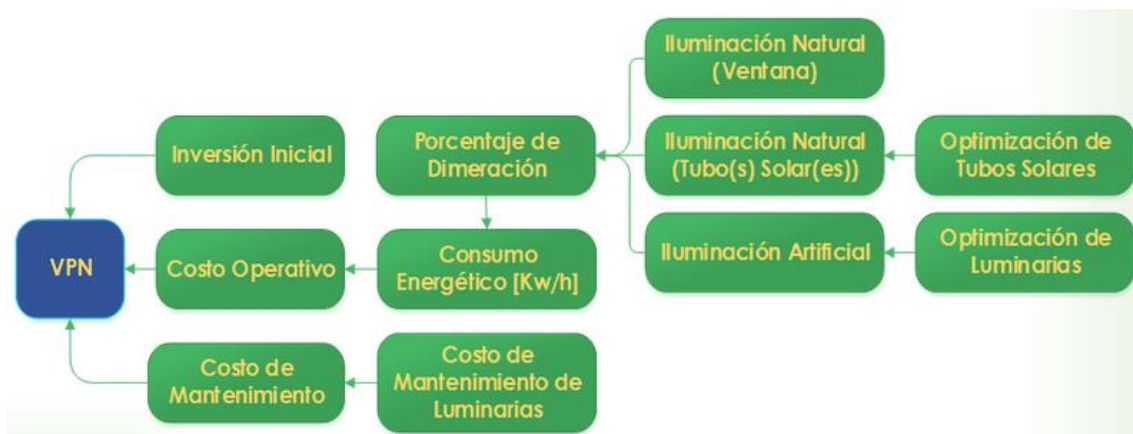
1.9 DIALUX

DIALux es un programa de diseño tridimensional con el que se puede recrear efectos luminosos reales en cualquier lugar. Es una herramienta muy interesante para los planificadores y diseñadores 3D que quieran practicar con efectos de luz y desarrollar sus propios proyectos. Determina en paralelo el consumo energético de una solución de iluminación, apoyándose en el cumplimiento de directrices vigentes a nivel nacional e internacional [18].

2 MODELADO DEL SISTEMA DE ILUMINACIÓN

En este trabajo de grado se plantea un esquema para optimizar el sistema de iluminación híbrido de un salón de clases en base al aporte de una Tesis Doctoral². Como se muestra en la Figura 3. En esta se observa un diagrama de bloques conformado por los procesos del modelo de iluminación.

Figura 3. Diagrama de bloques con las funciones que intervienen en la optimización del sistema de iluminación.



Fuente: Autores.

² Modelado y optimización del diseño energético de viviendas a partir de aplicaciones URE. MIE Germán Alfonso Osma Pinto

La Figura 3 presenta los bloques con las funciones utilizadas en el modelo a optimizar, donde se muestra la secuencia de la optimización para llegar a la función objetivo. La función de porcentaje de dimerización determina la dimerización del sistema a partir de la iluminación natural y artificial, con esta dimerización se procede a determinar el consumo de energía eléctrica, dicho consumo junto con el costo de la energía proporcionan el costo vinculado con la operación del sistema de iluminación. Se define el costo de trabajo del sistema, como la suma del costo de operación y el costo de mantenimiento. Finalmente el costo de trabajo, junto con el costo de inversión inicial de los componentes del sistema, conforman la función valor presente neto (VPN), la cual se constituye en la función objetivo a optimizar en este proyecto.

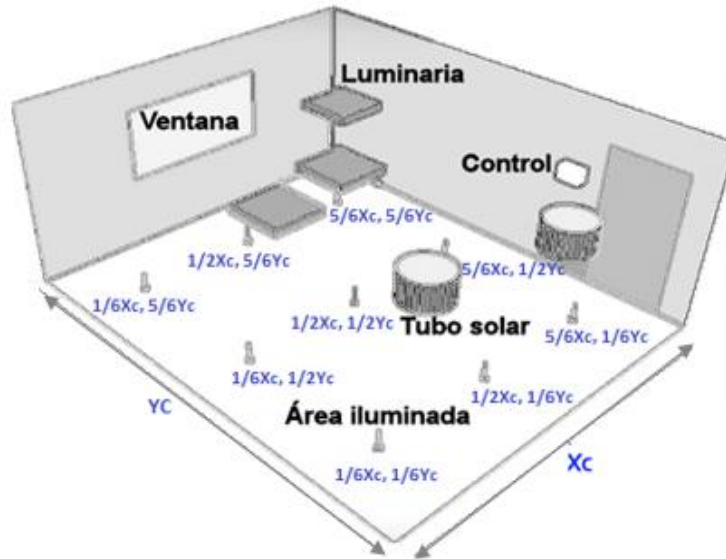
En este trabajo de grado se optimiza el costo total del sistema de iluminación para un periodo de 20 años, a partir de determinar inicialmente los componentes de iluminación natural (ventana y tubo solar) e iluminación artificial (tipo y cantidad de luminarias).

Lo anterior, se ve reflejado financieramente en la inversión inicial del proyecto, además sujeto al consumo de energía eléctrica de la iluminación artificial está el costo de operación del sistema. Estos costos junto con el mantenimiento componen la función objetivo a optimizar, representada por el valor presente neto VPN.

2.1 MODELADO DEL SISTEMA DE ILUMINACIÓN HÍBRIDO

El sistema de iluminación híbrido considerado en este trabajo de grado se basa en tres fuentes de luz: Ventana, tubo solar y luminarias. La evaluación del nivel de iluminación del espacio se realiza a partir de una matriz de 9 puntos según lo mostrado en la Figura 4, los cuales están en función de las dimensiones del espacio, ancho X_c y largo Y_c .

Figura 4. Puntos considerados para el análisis del sistema de iluminación de un salón.



Fuente: Autores.

Las coordenadas dentro del espacio son asignadas como muestran las siguientes expresiones:

$$Pos. X = \begin{bmatrix} \frac{1}{6} Xc & \frac{1}{2} Xc & \frac{5}{6} Xc \\ \frac{1}{6} Xc & \frac{1}{2} Xc & \frac{5}{6} Xc \\ \frac{1}{6} Xc & \frac{1}{2} Xc & \frac{5}{6} Xc \end{bmatrix} \quad Ec 3.1$$

$$Pos. Y = \begin{bmatrix} \frac{5}{6} Yc & \frac{5}{6} Yc & \frac{5}{6} Yc \\ \frac{1}{2} Yc & \frac{1}{2} Yc & \frac{1}{2} Yc \\ \frac{1}{6} Yc & \frac{1}{6} Yc & \frac{1}{6} Yc \end{bmatrix} \quad Ec 3.2$$

El nivel de iluminación proporcionado por cada fuente de iluminación es expresado como una matriz de 3x3; por tanto, la matriz de iluminación híbrida es el resultado de la suma de los aportes de todas las fuentes de iluminación en los puntos de análisis. Se tiene en cuenta el aporte natural debido a la radiación solar en la fachada (ventana), radiación solar en el techo (tubo solar) y la iluminación artificial proporcionada por las luminarias.

El valor de cada elemento de las matrices depende del tiempo; porque el aporte lumínico natural corresponde al comportamiento de la radiación solar diaria.

$$Light.H = Light.w + (Light.Ts * Bts) + (Light.Art.t * (D.Max * Bd + Bo)) \quad Ec 3.3$$

La Ecuación 3.3 describe la iluminación híbrida del sistema, que está conformada por la iluminación proveniente de la ventana, más la iluminación proveniente de los tubos solares (siempre y cuando existan), más la iluminación artificial proveniente de las luminarias (considerando sí el sistema será controlado con sistema dimerizable o sistema on/off).

En la Tabla 1 se describen las variables que intervienen en *Light.H*. Las variables binarias *Bts*, *Bd*, *Bo* determinan la existencia de tubo solar, control dimerizable y control On – Off, respectivamente, siendo mutuamente excluyentes las del control de las luminarias.

Tabla 1. Variables de *Light.H* y sus unidades.

	Variables	Valores
<i>Light.H</i>	Iluminación híbrida proveniente de todas las fuentes de luz (ventana, tubo solar y luminarias) en cada punto de análisis.	<i>Lux</i>
<i>Light.w</i>	Iluminación natural proveniente de la ventana en cada punto de análisis.	<i>Lux</i>
<i>Light.Ts</i>	Iluminación natural proveniente de los tubos solares en cada punto de análisis.	<i>Lux</i>
<i>Light.Art.t</i>	Iluminación artificial proveniente de las luminarias en cada punto de análisis.	<i>Lux</i>
<i>Bts</i>	Existencia de tubo solar.	1 o 0
<i>D.max</i>	Porcentaje máximo de dimerización del sistema.	%
<i>Bd</i>	Existencia de control dimerizable.	1 o 0
<i>Bo</i>	Existencia de control on – off.	1 o 0

Fuente: Autores.

2.2 MODELADO DEL SISTEMA DE ILUMINACIÓN NATURAL: VENTANA

El sistema cuenta con dos fuentes naturales de iluminación: ventana y tubo solar. Aquella que proviene de la ventana (*Light.w*) depende de la radiación solar difusa incidente en la fachada para una hora *h* específica del día, al igual depende del tamaño y posición de la ventana, la transmitancia del cristal y el índice de iluminación natural general del espacio.

$$Light.w = \begin{bmatrix} light.w_{1,1} & light.w_{1,2} & light.w_{1,3} \\ light.w_{2,1} & light.w_{2,2} & light.w_{2,3} \\ light.w_{3,1} & light.w_{3,2} & light.w_{3,3} \end{bmatrix} \quad Ec\ 3.4$$

$$light.w_{i,j} = \tau * f_c * s.rad * in.w_{i,j} \quad Ec\ 3.5$$

Las ecuaciones 3.4 y 3.5 describen la iluminación natural proveniente de la ventana, que depende entre otros del índice de iluminación natural, el cual se describe en las ecuaciones 3.6 a 3.12.

En las Tablas 2 y 3 se describen las variables y parámetros que intervienen en *light.w_{i,j}*.

Tabla 2. Variables que intervienen en *Light.w* y sus unidades

Variables	Unidades
Índice de iluminación natural para la ubicación y tamaño de la ventana en el punto (<i>pos. x_{i,j}</i> , <i>pos. y_{i,j}</i>)	%

Tabla 3 Parámetros que intervienen en *Light.w* y sus unidades

Parámetros	Unidades
τ	Transmitancia del vidrio %
f_c	Factor de conversión <i>lm/W</i>
<i>s.rad</i>	Radiación solar <i>W/m²</i>

Fuente: Autores.

- Índice de iluminación

El índice de iluminación distribuye proporcionalmente la radiación solar a través de todos los puntos de análisis.

$$In.w = \begin{bmatrix} in.w_{1,1} & in.w_{1,2} & in.w_{1,3} \\ in.w_{2,1} & in.w_{2,2} & in.w_{2,3} \\ in.w_{3,1} & in.w_{3,2} & in.w_{3,3} \end{bmatrix} \quad Ec 3.6$$

$$in.win_{i,1} = in.win_{i,3} = \alpha * in.win_{i,2} \quad Ec 3.7$$

La ecuación 3.7 indica que los índices de la primera y tercera columna de la matriz presentada en la ecuación 3.6 son iguales, mientras que son directamente proporcionales a los índices de la columna central de la misma matriz, donde α es la constante de proporcionalidad entre estos valores.

Entonces α es obtenida del índice de iluminación, producto de la instalación de la ventana con el índice de iluminación potencial obtenido de forma experimental. En la matriz que se muestra a continuación se presentan los valores porcentuales de radiación solar de la ventana cuando su dimensión es la máxima, es decir de igual tamaño al muro.

$$In.Pot[\%] = \begin{bmatrix} 30 & 40 & 30 \\ 16 & 20 & 16 \\ 8 & 10 & 8 \end{bmatrix}$$

La sumatoria de todos sus valores porcentuales se relacionan directamente con el área de la fachada que recibe la radiación solar como se describe en la Ecuación 3.8, debido a que la ventana se ubica centrada a lo ancho de la pared.

$$in.pot.t = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 in.pot_{i,j} \quad Ec 3.8$$

$$in.w.t = \frac{a * b}{Zc * Xc} * in.pot.t \quad Ec 3.9$$

$$in.w_{1,2} = in.pot_{1,2} * \frac{a}{Xc} * \frac{b}{Zc} * \frac{4 * Z}{Zc} * \left(1 - \frac{z}{Zc}\right) * \sqrt{2 - \frac{a}{Xc}} \quad Ec 3.10$$

$$in.win_{2,2} = in.pot_{2,2} * \frac{a}{Xc} * \frac{b}{Zc} * \sqrt{\frac{2 * z}{Zc}} * \sqrt{2 - \frac{a}{Xc}} \quad Ec 3.11$$

$$in.w_{3,2} = in.pot_{3,2} * \frac{a}{Xc} * \frac{b}{Zc} * \sqrt{\frac{2 * z}{Zc}} * \sqrt{2 - \frac{a}{Xc}} \quad Ec 3.12$$

Las ecuaciones 3.10 a 3.12 describen las relaciones que existen en los índices de iluminación natural en la columna central de la matriz presentada en la Ecuación 3.6. Se aprecia en estas ecuaciones que dependen de las dimensiones de la ventana (a, b, z) y las dimensiones de la pared en la cual se encuentra la ventana (Xc, Zc), y del índice potencial presentado en la Ecuación 3.8.

Combinando las ecuaciones 3.7 y 3.9, se puede despejar α como lo muestra la Ecuación 3.13.

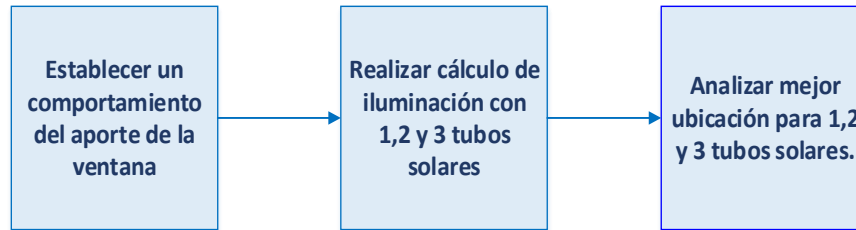
$$\alpha = \frac{1}{2} * \left(\frac{in.w.t}{in.w_{1,2} + in.w_{2,2} + in.w_{3,2}} - 1 \right) \quad Ec 3.13$$

2.3 MODELADO DEL SISTEMA DE ILUMINACIÓN NATURAL: TUBO SOLAR

Para analizar la distribución y cantidad de tubos solares requeridos en el sistema se recurrió al método de fuerza bruta. La optimización realizada para los tubos solares pretende obtener el mejor complemento a la iluminación natural proveniente de la ventana, es decir aportar iluminación en mayor medida los puntos de análisis que menos aporte tienen de la ventana.

El diagrama de flujo del proceso de optimización de los tubos solares se muestra en la Figura 5.

Figura 5. Esquema de bloques de pasos optimización iluminación artificial



Fuente: Autores.

- Establecer un comportamiento del aporte de la ventana:

Se establece las dimensiones de la ventana de forma que sea del mismo tamaño de la fachada con el fin de establecer un comportamiento de la iluminación proveniente de la ventana y obtener la iluminancia natural total óptima con el aporte de los tubos solares y con ello las ubicaciones para cada tubo solar.

- Realizar cálculo de iluminación con 1,2 y 3 tubos solares:

Para establecer las diferentes ubicaciones que tomarán los tubos solares en el análisis, se determina una separación de 0.6 [m] entre los puntos hacia lo ancho (x) y largo (y) del techo. Calculada la distancia entre la ubicación del tubo solar y el punto de análisis se determina la iluminancia en cada punto aportado por cada tubo solar. Se comienza el análisis con un tubo solar, luego con 2 y por último se prueba con 3 tubos, combinando todas las posibles ubicaciones.

- Analizar mejor ubicación para 1, 2 y 3 tubos solares:

Para cada cantidad de tubos solares se revisa el punto con menor iluminación en la matriz de análisis, luego se compara los resultados de cada caso y se escoge la ubicación de tubo(s) solar(es) que aporte la mayor iluminación entre los puntos de menor iluminación.

Las posiciones posibles en x y y para cada tubo solar se muestran en el vector $x.ts.op$ y $y.ts.op$ respectivamente, y se describen en la ecuación 3.14 y 3.15.

$$x.ts.op = [0,175 0,775 1,375 1,975 2,575 3,175 3,775 4,375 4,975] \quad Ec 3.14$$

$$y. ts. op = [0,175 \ 0,775 \ 1,375 \ 1,975 \ 2,575 \ 3,175 \ 3,775 \ 4,375 \ 4,975 \ 5,575] \quad Ec \ 3.15$$

Las ecuaciones 3.16 y 3.17 representan las distancias entre cada punto de análisis y cada tubo solar.

$$Dis. Ts(ts_k) = \begin{bmatrix} dis.ts_{1,1}(ts_k) & dis.ts_{1,2}(ts_k) & dis.ts_{1,3}(ts_k) \\ dis.ts_{2,1}(ts_k) & dis.ts_{2,2}(ts_k) & dis.ts_{2,3}(ts_k) \\ dis.ts_{3,1}(ts_k) & dis.ts_{3,2}(ts_k) & dis.ts_{3,3}(ts_k) \end{bmatrix} \quad Ec \ 3.16$$

$$dis.ts_{i,j}(ts_k) = \sqrt{|(pos.x_{i,j} - x.ts(ts_k))|^2 + |pos.y_{i,j} - y.ts(ts_k)|^2} \quad Ec \ 3.17$$

Se realiza entonces una combinación entre todos los valores posibles de posiciones de tubos solares para obtener el mínimo de cada posición para luego con estos resultados obtener el mejor de los casos. Para determinar el efecto de un tubo solar en cada punto de análisis, se calcula utilizando las ecuaciones 3.18 y 3.19.

$$Light.Ts = \begin{bmatrix} light.ts_{1,1} & light.ts_{1,2} & light.ts_{1,3} \\ light.ts_{2,1} & light.ts_{2,2} & light.ts_{2,3} \\ light.ts_{3,1} & light.ts_{3,2} & light.ts_{3,3} \end{bmatrix} \quad Ec \ 3.18$$

$$light.ts_{i,j}(ts_k) = f_c * solar.radh * i.ts_{i,j}(dis.ts_{i,j}(ts_k)) \quad Ec \ 3.19$$

En las Tablas 4. y 5. se describen las variables y parámetros que intervienen en $light.ts_{i,j}$.

Tabla 4. Variables que intervienen en $Light.ts$ y sus unidades

	Variables	Unidades
$light.ts_{i,j}$	Iluminación del tubo solar ts_k recibida en cada punto de análisis.	Lux
$i.ts(dis.ts(ts_k))$	Índice de iluminación natural para la ubicación del tubo solar en función de la distancia $dis.ts(ts_k)$ de los puntos de análisis.	%

Fuente: Autores.

Tabla 5. Parámetros que intervienen en *Light.ts.unid* y sus unidades

	Parámetros	Unidades
f_c	Factor de conversión	lm/W
$Solar.Rad_h$	Radiación solar horizontal	W/m^2

Fuente: Autores

Índice de iluminación:

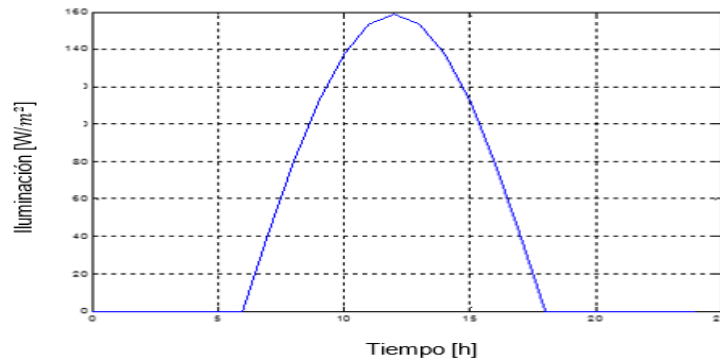
$$i.ts(dis.ts(ts)) = \begin{bmatrix} i.ts_{1,1}(dis.ts_{1,1}(ts_k)) & i.ts_{1,2}(dis.ts_{1,2}(ts_k)) & i.ts_{1,3}(dis.ts_{1,3}(ts_k)) \\ i.ts_{2,1}(dis.ts_{2,1}(ts_k)) & i.ts_{2,2}(dis.ts_{2,2}(ts_k)) & i.ts_{2,3}(dis.ts_{2,3}(ts_k)) \\ i.ts_{3,1}(dis.ts_{3,1}(ts_k)) & i.ts_{3,2}(dis.ts_{3,2}(ts_k)) & i.ts_{3,3}(dis.ts_{3,3}(ts_k)) \end{bmatrix} \quad Ec\ 3.20$$

$$i.ts_{i,j}(dis.ts_{i,j}(ts_k)) = 0.004 * e^{-0.75*dis.ts_{i,j}(ts_k)} \quad Ec\ 3.21$$

En la Figura 6 se observa el comportamiento de la radiación solar horizontal sobre el techo del salón. La radiación solar que origina la iluminancia en la superficie de trabajo parte de la Ecuación 3.22³.

$$SRh(t) = 700 * \text{sen} \left(\frac{\pi}{12} (h - 6) \right) \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad Ec\ 3.22$$

Figura 6. Iluminancia producida por un tubo solar.



Fuente: Autores.

³ Modelado y optimización del diseño energético de viviendas a partir de aplicaciones URE. MIE Germán Alfonso Osma Pinto

Se debe determinar la ubicación de los tubos solares dependiendo de la cantidad de tubos solares utilizados, se analizará cada caso: con 1, 2 y 3 tubos solares.

Para cada caso la suma del aporte de cada tubo solar se adiciona a la iluminación que proviene de la ventana para obtener la iluminancia natural total, como se registra en la Ecuación 3.23.

$$light.ts.op_{i,j}(n_{Ts}) = \sum_{k=1}^{n_{Ts}} light.ts_{i,j}(ts_k) + light.w_{i,j} \quad [Lux] \quad Ec \ 3.23$$

Para calcular el valor mínimo de iluminancia de cada iteración k que se produce al realizar las posibles combinaciones para el número de tubos solares n_{Ts} analizados se utiliza la Ecuación 3.24.

$$light.ts.op_k(n_{Ts}) = \min(light.ts.op_{i,j}(n_{Ts})) \quad [Lux] \quad Ec \ 3.24$$

Una vez se han determinado los menores valores de iluminancia para todas las configuraciones, se identifica el valor de mayor aporte obtenido en cada caso. Así se garantiza que ésta es la mejor configuración posible y se expresa en la Ecuación 2.25.

$$light.ts.op(n_{Ts}) = \max(light.ts.op_k(n_{Ts})) \quad [Lux] \quad Ec \ 3.25$$

Teniendo las posiciones en x y y de cada uno de los tubos solares en la combinación k óptima para cada caso se obtienen los valores mostrados en la Tabla 3.6

Tabla 6. Ubicaciones óptimas para los tubos solares para cada número de tubos solares utilizados.

# de Tubos Solares	Ubicación en x	Ubicación en y
1	$x.ts(ts_1) = 2,575$	$y.ts(ts_1) = 0,775$
2	$x.ts(ts_1) = 0,775$	$y.ts(ts_1) = 0,775$
	$x.ts(ts_2) = 3,775$	$y.ts(ts_2) = 0,775$
3	$x.ts(ts_1) = 0,775$	$y.ts(ts_1) = 0,775$
	$x.ts(ts_2) = 2,575$	$y.ts(ts_2) = 0,775$
	$x.ts(ts_3) = 4,375$	$y.ts(ts_3) = 0,775$

Fuente: Autores.

2.4 MODELADO DEL SISTEMA DE ILUMINACIÓN ARTIFICIAL

Para analizar la distribución de la iluminación artificial se ejecutaron tres pasos, los cuales se muestran en la Figura 7.

Figura 7. Esquema de bloques con los pasos optimización iluminación artificial



Fuente: Autores.

- Recopilación de la información:

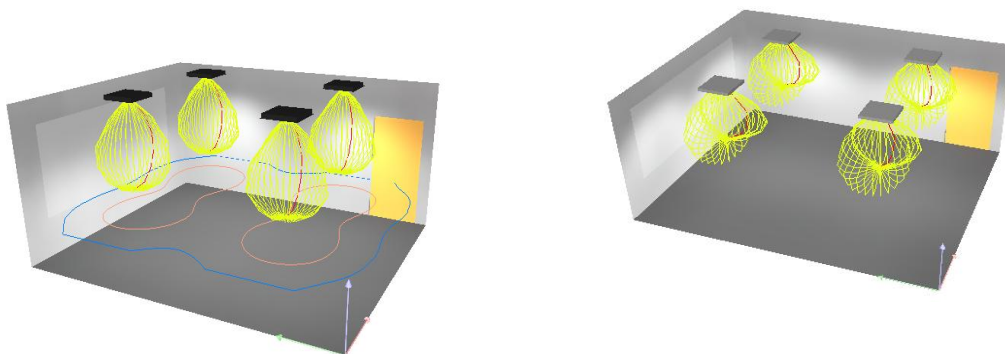
En esta etapa se investigó los diferentes tipos de luminaria recomendada para salones de clases, teniendo en cuenta la tecnología, la potencia y el número de lámparas por luminaria. En el Anexo B se presentan los datos técnicos de los tipos de luminaria utilizadas.

- Simulación en DIALux:

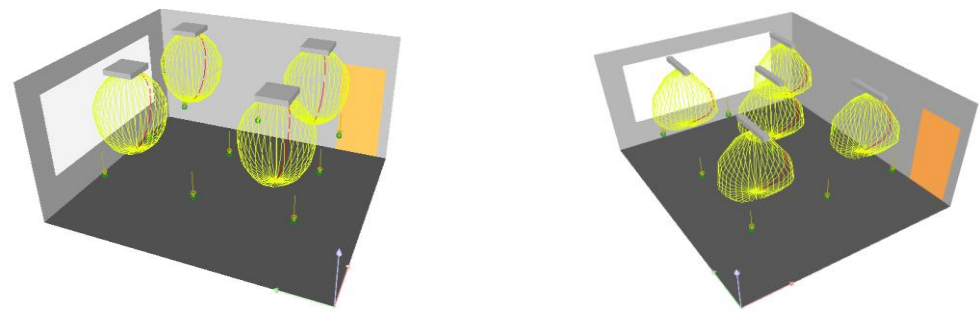
Por medio de simulaciones se determinaron las posiciones de las luminarias, junto con la iluminación que proporcionan en los puntos de análisis.

En la Figura 8 se presenta la distribución luminosa de cada una de las luminarias utilizadas y se muestran las isolíneas que representa gráficamente la iluminancia medida en el entorno de una luminaria. En el plano de trabajo, ubicado a 0,75 m paralelo a la superficie del piso, se muestra dos isolíneas, la de color azul delimita el área de trabajo que cuenta con 300 lux y la de color naranja delimita los 500 lux.

Figura 8. Distribución luminosa de luminarias.



a. Tipo 1 de TBS424 4xTL5-14W/830 HFP C5-H GT IP65 PHILIPS	b. Tipo 2 de Philips TBS165 K 4xTL5-14W HFS C6
--	--



c. Tipo 3 de Philips CR200B 4xTL5-24W HFP O	d. Tipo 4 de Philips TBS411 2xTL5-39W HFP C6
---	--

Fuente: Autores.

- Resultados:

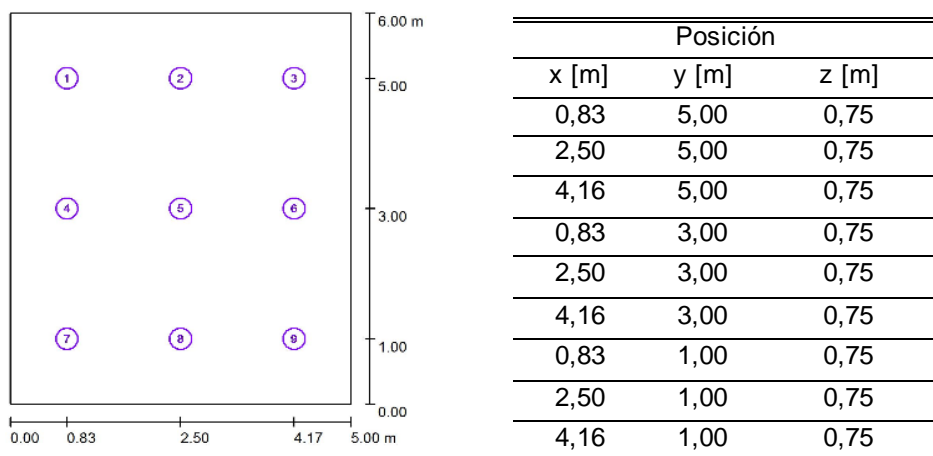
Por medio de DIALux se obtuvo la iluminación en los puntos de análisis, cumpliendo con la normatividad. El software dispone de una interfaz para catálogos de luminarias que ofrecen directamente la posibilidad de elegir la fuente de luz apropiada para el recinto. En este proyecto se estableció como fuente de luminarias, el catálogo de Philips.

Con la disposición de campo ofrecida por la herramienta mencionada, se permite realizar una distribución homogénea de la luminaria, que permita cumplir los requisitos reglamentarios de alumbrado e iluminación para interiores.

Se determina que las posiciones de las luminarias son fijas, gracias a DIALux se establecen las mejores posiciones para ellas. En el Anexo C se presentan las posiciones de cada tipo de luminaria.

En la Figura 9 se muestran las posiciones de los puntos de análisis empleados en DIALux, los cuales también representan los puntos de cálculo de la iluminación artificial, estos resultados se presentan en la Tabla 3.6 para cada tipo de luminaria.

Figura 9. Puntos de análisis.



Fuente: Autores.

Tabla 7. Iluminación en puntos de análisis según tipo de luminaria.

N°	Designación	Tipo 1: Philips TBS424	Tipo 2: Philips TBS165	Tipo 3: Philips CR200B	Tipo 4: Philips TBS411
		Valor [lux]	Valor [lux]	Valor [lux]	Valor [lux]
1	Punto de cálculo	496	352	361	402
2	Punto de cálculo	488	501	380	429
3	Punto de cálculo	497	353	362	403
4	Punto de cálculo	389	419	386	333
5	Punto de cálculo	385	704	587	341
6	Punto de cálculo	388	420	386	333
7	Punto de cálculo	509	362	375	409
8	Punto de cálculo	504	513	399	437
9	Punto de cálculo	510	363	377	410

Fuente: Autores.

Como resultado del proceso de optimización solo se selecciona una de las cuatro opciones presentadas, lo cual incluye el tipo, la potencia, el número y ubicación de la luminaria. Es decir, no se optimizan las variables mencionadas.

Por otra parte, se modela el control dimerizable de la iluminación artificial, con el fin de garantizar el cumplimiento del mínimo nivel de iluminación necesario en cualquier punto del espacio. Para ello es preciso hacer una relación entre la iluminación mínima, la iluminación natural y la iluminación total. Lo anterior ofrece el aporte de iluminación artificial necesario en cada punto de análisis para satisfacer el requerimiento reglamentario, como muestran las ecuaciones 3.22 y 3.23.

$$Dim.Perce = \begin{bmatrix} dim.perce_{1,1} & dim.perce_{1,2} & dim.perce_{1,3} \\ dim.perce_{2,1} & dim.perce_{2,2} & dim.perce_{2,3} \\ dim.perce_{3,1} & dim.perce_{3,2} & dim.perce_{3,3} \end{bmatrix} \quad Ec 3.22$$

$$dim.perce_{i,j} = \frac{Dim.min-light.n}{light.art.t} \quad Ec 3.23$$

Las ecuaciones 3.22 y 3.23 contienen todas las ecuaciones anteriores, presentadas en esta sección, es decir la iluminación natural proveniente de la ventana y tubos solares, al igual que la iluminación artificial proveniente de las luminarias.

Después de calcular la dimerización requerida en cada punto de análisis, se procede a determinar la mayor de ellas, porque al satisfacer la necesidad de esta iluminación artificial se garantiza satisfacer la de todos los puntos. Por tanto, este valor se denomina $D.max$ y es el valor que se utiliza en la Ecuación 3.3. En la Tabla 8 se describen las variables que intervienen en $Dim.Perce$.

Tabla 8. Notación de las funciones con su descripción y unidad

Notación	Descripción	Unidades
$Dim.Perce$	Porcentaje de iluminación artificial requerido en el punto ($pos.x_{i,j}$, $pos.y_{i,j}$)	%
$Dim.min$	Iluminación mínima permitida por el Retilap	Lux
$light.n$	Iluminación natural resultante de la suma de la iluminación natural aportada por la ventana y tubo solar.	Lux
$light.art.t$	Iluminación proveniente de las luminarias en cada punto de análisis.	Lux

Fuente: Autores.

Considerando la finalidad de un salón de clase, se determina que únicamente se requiere iluminación artificial cuando sea insuficiente el aporte natural.

Adicionalmente, debe existir presencia de usuarios en el recinto; es decir cuando se cumplan estrictamente estas dos condiciones se encenderán las luminarias. Una vez definido el horario de funcionamiento $Hours.Op(h)$, se determina la función de consumo energético por el aporte de iluminación artificial, como lo

indica la Ecuación 3.24. El resultado de la potencia nominal es el tomado de todo el diseño de iluminación artificial.

$$Cons.kW(h) = Power.l * (0,7 * ((D.max(h) * B_d) + B_o)) + 0,3 * Pre_{sen}(h) \quad Ec\ 3.24$$

La Ecuación 3.24 describe la función consumo de energía eléctrica, que depende del producto entre la potencia de las luminarias, la dimerización y la presencia de usuarios, dependiendo si el sistema tiene control dimerizable o control on/off.

En la Tabla 3.8 se describen las variables que intervienen en el consumo energético.

Las variables binarias B_d , B_o determinan la existencia de control dimerizable y control On – Off respectivamente, siendo mutuamente excluyentes.

Tabla 9. Variables que intervienen en *Consumed.kW*

	Variables	Unidades
$Cons.kW$	Consumo de energía eléctrica	kW
$Power.l(tl)$	Potencia nominal de las luminaria de tipo tl	kW
B_o	Existencia de control On/Off	–
B_d	Existencia de control dimerizable	–
$Pre_{sen}(h)$	Función del sensor de presencia de usuarios	–

Fuente: Autores.

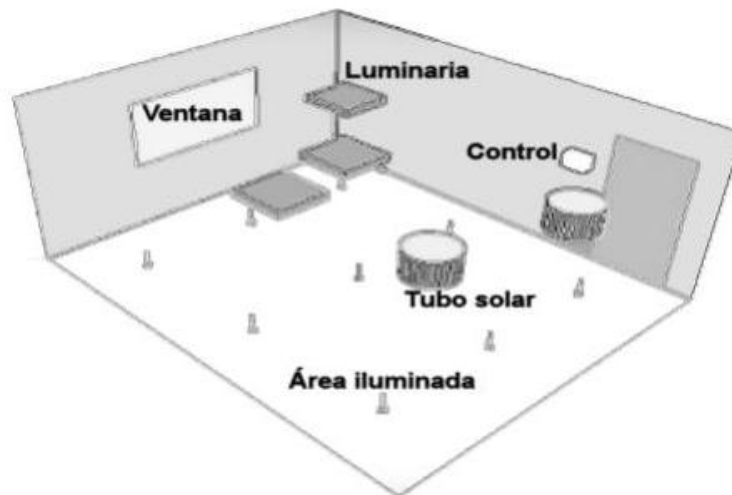
3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN

En diversas situaciones de ingeniería o en la industria se requiere establecer una solución óptima para resolver problemas existentes. Esto se hace con el fin de encontrar las condiciones que satisfagan el máximo o mínimo valor de una función; es decir alcanzar un punto óptimo o específico para determinadas circunstancias [19] [20].

Los métodos empleados para optimizar se conocen como técnicas de programación matemática, por ejemplo programación no lineal, geométrica, lineal, estocástica, multiobjetivo, entre otras. Estas técnicas de optimización son estrategias de solución matemáticas, que tienen como objetivo minimizar costos y maximizar beneficios. Para esto es necesario establecer el comportamiento del sistema a optimizar por medio de un modelo matemático [19] [20].

En este trabajo de grado se aborda el problema de optimización del diseño de un sistema de iluminación híbrida inteligente (natural y artificial) de un aula de clase. En la Figura 10 se presenta el modelo esquematizado con los elementos que intervienen en el estudio de iluminación del aula (ventana, luminaria, tubo solar) y su respectivo control.

Figura 10. Representación de elementos del sistema de iluminación.



Fuente: Autores.

En este capítulo se muestran los aspectos tenidos en cuenta para el planteamiento del problema de optimización del diseño energético de iluminación híbrida inteligente en un entorno tropical. La iluminación proporcionada por las luminarias será establecida según el tipo de luminaria instalado, gracias al previo análisis hecho en DIALux. La iluminación natural es el resultado de encontrar el

tamaño y la ubicación de la ventana y la cantidad de tubos solares que mejor complementen el aporte lumínico de dicha ventana.

3.1 NECESIDADES Y RECURSOS

Los aspectos necesarios para la implementación de un sistema de iluminación híbrida en un salón de clases son los siguientes:

- Costo de la energía eléctrica (kWh)

La demanda energética de un salón de clases varía dependiendo de factores como las horas de uso de la luminaria y el diseño de la estructura. Estos factores hacen que la demanda energética varíe considerablemente en cuanto a cantidad de energía. Para el análisis del modelo de salón de clases se utilizó una curva del costo de la energía vs las 24 horas del día. La Figura 11 muestra el costo del consumo de un salón de clases hora a hora.



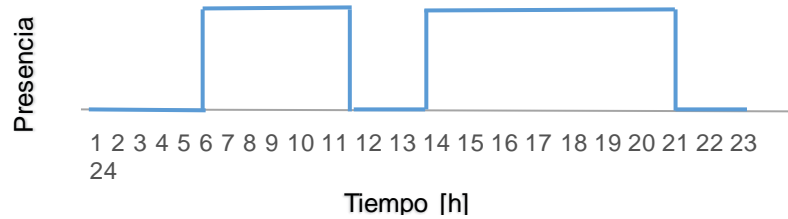
Fuente: Autores.

- Curva de actividad humana

La Figura 12 representa la presencia de los usuarios cuando se está realizando alguna actividad que requiera iluminación.

⁴ Suministrado por un experto en el tema.

Figura 12. Curva actividad humana⁵.



Fuente: Autores.

El plan de inversión será evaluado utilizando el indicador valor presente neto (VPN), con el fin de minimizar los costos, teniendo en cuenta la inversión inicial, los costos de operación y mantenimiento. Estos flujos de capital están sujetos a una tasa interna de retorno "int" y evaluados en una cantidad de años "years".

La expresión 4.1 representa la función objetivo.

$$\text{Minimize } VPN(t)_{t>0} \quad \text{Ec 4.1}$$

Donde $VPN(t)$ es la función objetivo, que se fundamenta en la búsqueda de la mejor solución, que minimice los costos de inversión, mantenimiento y operación, como se muestra en la Ecuación 4.2.

$$VPN(t)[\$] = S.Inv(a, b, n_{TS}, tl, B_{TS}, B_o, B_d) + \sum_{t=1}^{years} \frac{Cost.Work(t)}{(1 + int)^t} \quad \text{Ec 4.2}$$

En la Tabla 10 se describe la notación de las funciones que intervienen en $VPN(t)$ y sus unidades.

⁵ Autores

Tabla 10. Notación de las funciones con su descripción y unidad

Notación	Descripción	Unidades
<i>S.Inv</i>	Es la inversión inicial que representa los costos de implementación	\$
<i>Cost.Work</i>	Representa los flujos de capital producto del funcionamiento que contempla los costos de operación y mantenimiento del año <i>t</i>	\$

Fuente: Autores.

- Inversión inicial

La inversión inicial del proyecto se expresa en la Ecuación 4.3.

$$S.Inv = A_w * C_w + A_{wa} * C_{wa} + n_l(l) * C_l(l) + n_{la} * C_{la}(l) + n_t * C_t * b_T + b_o * C_o + B_d * C_d \quad Ec 4.3$$

La Ecuación 4.3 describe los componentes y el costo de cada uno de ellos, que intervienen en la inversión inicial del sistema de iluminación.

Siendo *A_w* y *A_{wa}* el área de la ventana y el muro respectivamente, cuya unidad es el metro cuadrado.

$$A_w = \frac{a * b}{10000} \quad Ec 4.4$$

$$A_{wa} = \frac{Xc * Zc - a * b}{10000} \quad Ec 4.5$$

En las ecuaciones 4.4 y 4.5 se describen el área de la ventana y muro respectivamente, que dependen de las dimensiones de la ventana y el muro donde se encuentra dicha ventana.

En las Tablas 11 y 12 se relacionan las variables y parámetros que intervienen en *S.Inv* y sus unidades.

Tabla 11. Variables que intervienen en $S.Inv$

	Variables	Unidades
a	Ancho de la ventana	cm
b	Alto de la ventana	cm
l	Diseño sistema de iluminación artificial	–
n_T	Número de tubos solares	$unid$
B_T	Existencia de tubo solar	–
B_o	Existencia de control On/Off	–
B_d	Existencia de control dimerizable	–

Fuente: Autores.

Tabla 12. Parámetros que intervienen en $S.Inv$

	Parámetros	Unidades
X_c	Longitud del lado del aula donde se ubica la ventana	m
Y_c	Longitud del lado del aula donde no se ubica la ventana	m
Z_c	Altura del aula	m
$n_l(l)$	Número de lámparas para el tipo de luminaria utilizada	$unid$
C_w	Costo de la ventana por unidad de área	$\$/m^2$
C_{wa}	Costo de la pared por unidad de área	$\$/m^2$
$C_{la}(l)$	Costo por lámpara	$\$/unid$
$C_l(l)$	Costo por luminaria	$\$/unid$
C_o	Costo por control On/Off	$\$/unid$
C_T	Costo por tubo solar	$\$/unid$
C_d	Costo por control dimerizable	$\$/unid$

Fuente: Autores.

- Costo financiero:

Los diseños de iluminación artificial incluyen el costo del montaje de la luminaria, ducto, cableado, luminaria y balasto dimerizable, el costo detallado de cada diseño se muestra en la Tabla 13.

El sistema de control dimerizable incluye el costo del montaje del sistema, ducto, cableado, sensor de presencia, fotosensor dimerizable, control remoto del fotosensor y un power pack para cada sensor. El sistema de control on/off incluye el costo del montaje del sistema, ducto, cableado, sensor de presencia, fotosensor on/off y un power pack para cada sensor, el costo detallado de cada control se muestra en la Tabla 14.

El material de la ventana es de aluminio y el material del muro es de ladrillo y cemento friso, estuco y pintura.

Las especificaciones de las luminarias utilizadas se muestran en el Anexo A y la cotización de los precios del tubo solar en el anexo D.

Tabla 13. Especificaciones de costos de las luminarias

Diseño	Luminaria	Balasto	Montaje	Total
1	123 600	191 400	75 000	390 000
2	133 600	191 400	75 000	400 000
3	168 600	191 400	75 000	435 000
4	52 300	95 700	75 000	223 000

Fuente: Autores.

Tabla 14. Especificaciones de costos para control On/off y dimerizable

Control	Sensor presencia	Power packs	Fotosensor	Montaje	Total
Dimerizable	88 800	308 400	493 200	100 000	990 400
On/off	88 800	308 400	222 000	100 000	719 200

Fuente: Autores.

En la Tabla 15, se presenta el resumen de los costos financieros utilizados.

Tabla 15. Información de Costos financieros

Componente	Cantidad	Valor unidad [\\$]	Valor total [\\$]
Diseño de iluminación artificial con luminaria Philips TBS424 4xTL5 (tipo 1)	4	390 000	1 560 000
Diseño de iluminación artificial con luminaria Philips TBS165 K 4xTL5 (tipo 2)	4	400 000	1 600 000
Diseño iluminación artificial con luminaria Philips CR200B 4xTL5-24W (tipo 3)	4	435 000	1 740 000
Diseño iluminación artificial con luminaria Philips TBS411 2XTL5 (tipo 4)	5	223 000	1 115 000
Lámpara TL5 para diseño de iluminación artificial tipo 1, 2, 3	16	5 900	94 400
Lámpara TL5 para diseño de iluminación artificial tipo 4	10	7 900	79 000
Control dimerizable	-	990 400	990 400
Control On/Off	-	719 200	719 200
Tubo solar	-	1 364 000	1 364 000
Construcción ventana (m^2) ⁶	-	120 000	120 000

⁶ La cotización m^2 de ventana de aluminio, suministrada por almacén “Acero y Aluminio” Bucaramanga.

Tabla 15. Información de Costos financieros

Construcción muro (m^2) ⁷	-	80 000	80 000
--	---	--------	--------

Fuente: Autores.

- Costos de funcionamiento

La función $Cost.Work(t)$ se proyecta como el flujo de capital anual producto de consumo energético de la iluminación artificial y los costos por mantenimiento asociados a los elementos en un tiempo t del sistema de iluminación, como se muestra en la Ecuación 4.6.

$$Cost.Work = Cost.Op(t) + Cost.Maint(t) \quad Ec\ 4.6$$

Así $Cost.Op(t)$ define los costos de operación y $Cost.Maint(t)$ los costos por mantenimiento.

- Costos de operación

Los costos de operación anual vincula la cantidad de kilowatt (kW) consumidos en cada hora (h) con el precio kilowatt-hora que varía cada hora (h), como se describe en la Ecuación 4.7.

$$Cost.Op(a, b, z, n_{TS}, tl, B_d, B_o, B_{TS}) = \sum_{d=1}^{365} \sum_{h=1}^{24} Price.kW(h) * Cons.kW(h) \quad Ec\ 4.7$$

Donde $Price.kW(h)$ es la tarifa de consumo y $Cons.kW(h)$ los kilowatts (kW) consumidos, donde esta demanda es calculada por medio de la ecuación 3.24.

El consumo de energía diario permite establecer la energía anual consumida por las luminarias. El control de la iluminación dependerá de un horario de permanencia de usuarios que puede ser On-Off o dimerizable. Las fuentes de iluminación híbrida provienen de la ventana, tubos solares y las luminarias; por lo

⁷ Cotización m^2 de construcción de muro, suministrada por maestros de obra.

tanto la ubicación, el tamaño de la ventana y la cantidad de tubos solares forman parte del estudio.

- Costos de mantenimiento

El mantenimiento defectuoso o la escasa limpieza de las luminarias pueden reducir anualmente un gran porcentaje de la iluminación. Si existen muchas luminarias puede resultar más económico cambiar todas las lámparas o tubos fluorescentes en periodos fijos de tiempo. Encender y apagar las luminarias a menudo desgasta los elementos, reduce su vida útil y provoca ruido durante el funcionamiento.

La Ecuación 4.8 describe una función auxiliar $Lum.on(h)$ que representa en cada hora del día cuando están encendidas o apagadas las luminarias. La función $Lum.on(h)$ toma el valor de 0 cuando la función de presencia de usuarios sea 0 y/o $D.max(h)$ sea 0, es decir cuando estén apagadas las luminarias. La función $Lum.on(h)$ toma el valor de 1 cuando las luminarias estén encendidas, es decir exista presencia de usuarios y $D.max(h)$ sea diferente de 0.

- Para $1 \leq h \leq 24$ horas del día

$$Lum.on(h) = \begin{cases} 0 & pre.sen(h) * D.max(h) = 0 \\ 1 & pre.sen(h) * D.max(h) \neq 0 \end{cases} \quad Ec\ 4.8$$

A partir de la función auxiliar $Lum.on(h)$ se establece la cantidad de conmutaciones que se realizan en un día, es decir, la cantidad de interrupciones de luz que el operador maniobra, como se muestra en la Ecuación 4.9. La función $sd(h)$ toma el valor de 0 al iniciar el día, a partir de esto mantiene el valor anterior cuando la función $Lum.on(h)$ no cambia en la siguiente hora, y le adiciona 1 cuando la función $Lum.on(h)$ cambia en la siguiente hora, es decir cuando se enciendan o apaguen las luminarias.

$$sd(h) = \begin{cases} 0 & h = 0 \\ sd(h-1) & Lum.on(h) = Lum.on(h-1) \\ sd(h-1) + 1 & Lum.on(h) \neq Lum.on(h-1) \end{cases} \quad Ec\ 4.9$$

La Ecuación 4.10 representa la cantidad de horas que están encendidas las luminarias en un día, esto se realiza a partir de la sumatoria de la función $Lum.on(h)$.

$$hd(h) = \left\{ \sum_{h=1}^{24} lum.on(h) \right\} \quad Ec\ 4.10$$

Con los valores de las anteriores funciones evaluadas en la hora 24, se obtiene la cantidad de horas que funcionan las luminarias y el número de conmutaciones que se realizan en el día, con esto se determina la función referente al costo de mantenimiento del sistema de iluminación artificial.

- Para $1 \leq y \leq 20$ años del proyecto

$$Ym = 1 + entero \left[\frac{1000 * \left(1 - \frac{50(24) - 2}{10}\right)}{365 * hy(24)} \right] \quad Ec\ 4.11$$

$$Cost.maint(y) = \begin{cases} n.lum(tl) * C_l(tl) * n_l(tl) & t = r * Ym \\ 0 & r = 1, 2, 3, \dots, y/Ym \end{cases}$$

La Ecuación 4.11 proporciona el valor de la variable Ym que indica el año en el cual se debe realizar el primer mantenimiento del sistema, el costo del mantenimiento será entonces el producto entre la cantidad de luminarias presentes y el costo de cada una de ellas. A partir del primer mantenimiento se realizarán tantos iguales a este, cómo veces se puedan hacer en el periodo del proyecto (20 años), cada Ym años uno de otro.

Tabla 16. Variables que intervienen en $Cost.Maint(t)$

	Variables	Unidades
$n.lum$	Número de luminarias	$unid$
n_l	Número de lámparas	$unid$
C_l	Costo por lámpara	$\$/unid$

Fuente: Autores.

El problema de optimización del sistema de iluminación híbrido depende del tiempo debido a que el costo de la energía eléctrica, la presencia de usuarios, la radiación solar sobre la fachada y la ventana también varían en cada hora del día.

- Restricciones del problema de optimización

En esta sección se presentan las restricciones asociadas al modelo matemático del sistema de iluminación. En la Tabla 17 se presentan las variables junto con las restricciones que intervienen en la inversión inicial.

Tabla 17. Variables que intervienen en $S.Inv$

Variables	Naturaleza	Restricción
a	Entero	$0 \leq a \leq Xc$
b	Entero	$0 \leq b \leq Zc$
n_{lum}	Entero	$0 \leq n_{lum} \leq Cons.nlum$
n_{TS}	Entero	$0 \leq n_{TS} \leq Cons.nts$
B_o	Binario	$B_o = 1 - B_d$
B_{cp}	Binario	$B_{cp} = 1 - B_{cc}$

Fuente: Autores.

Donde:

- *Cons.nlum*: Es el límite del número de luminarias proporcionado por el software Dialux, teniendo en cuenta que cubra con los requerimientos de iluminación en todos los puntos del salón.
- *Cons.nts*: Depende de la radiación solar horizontal en una hora y día específico a través del año.

3.2 PLANTEAMIENTO DE LA BÚSQUEDA POR FUERZA BRUTA PARA RESOLVER EL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN

El algoritmo de fuerza bruta se caracteriza por encontrar todas las soluciones utilizando valores discretos de las variables de decisión evaluadas en la función objetivo, obteniendo una cantidad de soluciones igual a la cantidad de combinaciones de dichas variables y encontrar la mejor solución de acuerdo a las condiciones del problema [14].

- Definición de la función objetivo y las variables de entrada

El desarrollo del problema utilizando el método de búsqueda por fuerza bruta implica la definición de una función objetivo y sus respectivas variables de decisión.

La función objetivo es una función matemática que genera un parámetro de salida para posteriormente optimizarlo. Este parámetro de salida depende directamente de las variables de decisión las cuales interactúan según el problema en cuestión. Para este caso en particular, el parámetro de salida es un valor que representa el costo financiero del sistema de iluminación híbrido en un período de 20 años.

La búsqueda por fuerza bruta se caracteriza por evaluar todas las combinaciones que se pueden realizar a partir de los límites y pasos establecidos para las variables de decisión, las cuales se relacionan a continuación:

- a : Ancho de la ventana : [0 : 0,05 : 5]
- b : Alto de la ventana : [0 : 0,05 : 2,2]
- z : Altura del punto medio de la ventana : [1 : 0,05 : 2,2]
- nts : Número de tubos solares : [1 : 1 : 3]
- tl : Diseño de iluminación artificial : [1 : 1 : 4]
- B_d : Existencia de control dimerizable : binario
- B_o : Existencia de control on – off : binario
- B_T : Existencia de tubo(s) solar(es) : binario

Cada variable se encuentra acotada en ciertos valores, las variables de la ventana están limitadas por las dimensiones de la pared, el número de tubos solares y el tipo de la luminaria son valores enteros y definidos previamente. Las variables de existencia son binarias.

La altura del salón de clase se considera de 2,7 metros, aunque el modelo matemático restringe la altura de la ventana, por tanto la altura máxima de la ventana es 2,2 metros, mientras que la altura del punto medio de la ventana es la diferencia entre la altura máxima de la ventana (2,2 metros) y la mitad de la altura de la ventana ($b/2$).

A partir de todas las combinaciones que se pueden formar con las variables, se inspecciona que cumplan con todas las restricciones. Una vez satisfecho esto, se procede a evaluar la función objetivo, en busca de la combinación que proporcione el mínimo el costo financiero del proyecto.

3.3 PLANTEAMIENTO DE LA BÚSQUEDA POR ALGORITMO GENÉTICO PARA EL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN

En esta sección se presenta la metodología que se adoptó para la solución del problema de optimización a través de una técnica heurística por medio de Algoritmos Genéticos.

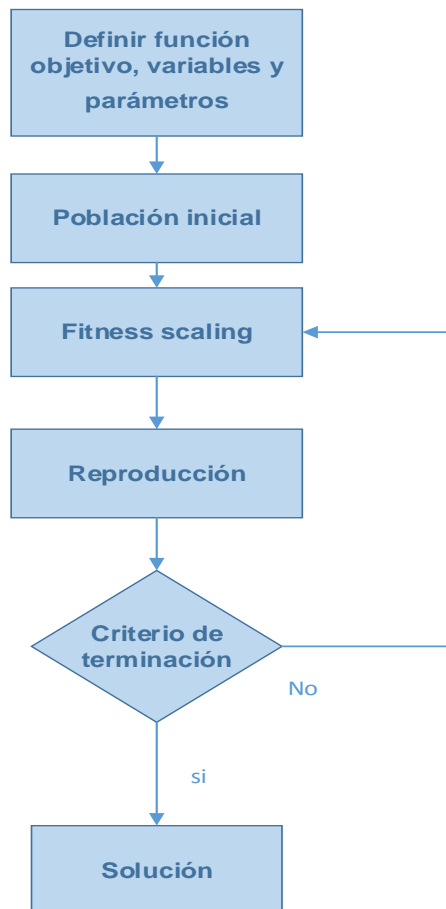
Esta técnica de optimización describe el proceso que se debe seguir, para dar solución a un problema por medio de pasos organizados. Están basados en el estudio genético de los seres vivos. A lo largo de generaciones, las poblaciones evolucionan de acuerdo a los principios de selección natural y supervivencia de los más fuertes. Por imitación de este proceso, los algoritmos genéticos son capaces de crear soluciones para el mundo real, dichas soluciones van encaminadas hacia valores óptimos del problema que dependen de una adecuada codificación de las mismas.

Para la realización de este método se utilizó la herramienta “optimtool”, un Toolbox de MatLab que permite utilizar varios métodos de optimización. Entre dichos métodos se encuentra la programación lineal, programación lineal entera mixta, programación cuadrática, optimización no lineal y no lineal de mínimos cuadrados y algoritmos genéticos. Con el fin de minimizar el valor de la una función objetivo establecida bajo unas restricciones.

Después de diversas pruebas realizadas en las cuales se variaron las diferentes opciones disponibles en “optimtool”, se obtuvo que opciones como selección, cruce y mutación no permiten ser modificadas porque este modelo es un problema de optimización con restricciones enteras. Además teniendo en cuenta los valores que tiene por defecto los parámetros y los resultados obtenidos en las pruebas, se propuso analizar este método bajo unas características especiales teniendo en cuenta la variación de tamaño de población, cantidad de individuos élite, proporción de individuos de cruce y la cantidad de generaciones analizadas para los diferentes tipos de escalado de aptitud de individuos.

Los pasos que se realizaron para el desarrollo de ésta técnica se muestran en la Figura 13, con el fin de solucionar el problema de optimización.

Figura 13. Pasos para el desarrollo de AG



Fuente: Autores.

- **Definición de función objetivo, variables y parámetros**

La función objetivo es el índice económico Valor Presente Neto que consta de 7 variables de tipos: Flotante, entera y binaria, que están limitadas y restringidas a ciertos valores.

- **Población**

Es importante considerar el tamaño idóneo que debe tener una población para que no sea poca o mucha. Parece intuitivo pensar que las poblaciones pequeñas corren el riesgo de no cubrir adecuadamente el espacio de búsqueda, mientras que el trabajar con poblaciones de gran tamaño puede acarrear problemas relacionados con el excesivo costo computacional. Pero el algoritmo crea múltiples subpoblaciones. Cada entrada del vector especifica el tamaño de una

subpoblación, el rango asignado para el tamaño de población va desde 50 individuos hasta llegar a 200 individuos a un paso de 25 individuos.

- ***Fitness scaling***

Esta función realiza el escalado de los individuos en un rango adecuado para la función de selección. Cuenta con varias opciones, de las que se analizaron las siguientes: *Rank* (rango), *proportional* (proporcional), *Top* (superior) y *shift lineal* (cambio lineal).

La convergencia del algoritmo genético se logra de acuerdo a la evolución de las generaciones, es decir el algoritmo correrá tantas generaciones como le sea asignado hasta conseguir que la respuesta cumpla con algunas condiciones, para que sea confiable y aceptable.

- **Reproducción**

Entre los criterios de reproducción se modificaron las opciones de individuos élite, son aquellos que por su valor de aptitud son enviados directamente a la siguiente generación, varía desde 5 hasta 20 individuos. Además se modificó el porcentaje de individuos que son enviados al proceso de cruce, con valores desde 40%, hasta 100% con pasos de 20 %.

- **Criterio de terminación**

El criterio que se definió para detener la simulación del método es la cantidad de generaciones en valores de 10 en 10 hasta 50. Sin embargo se cuenta con otro parámetro que detiene el algoritmo si el cambio promedio en el valor de la función de aptitud a través de 50 generaciones es menor que 1×10^{-6} .

- **Solución**

Obtenidos los valores de la solución se procede a la comparación en cada uno de las cuatro funciones de *Fitness scaling*, para encontrar el mejor resultado.

4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se realiza una presentación detallada de los resultados obtenidos con los métodos de fuerza bruta y algoritmos genéticos. La ejecución de los algoritmos fue realizada en el mismo equipo para garantizar la validez de la comparación de los resultados.

4.1 FUERZA BRUTA

A continuación se muestran los resultados obtenidos a partir del planteamiento utilizado para la solución del problema por el método de búsqueda por fuerza bruta.

- **Variables de entrada**

Durante la simulación, basado en el planteamiento propuesto en la Sección 4, se observó que los resultados difieren de acuerdo al valor tomado por las variables de entrada. Se define una hiper-rejilla para evaluar todos los puntos dentro de ésta y escoger el mejor, en la Tabla 18 se muestran los límites de las variables de entrada y el paso que define la hiper- rejilla de búsqueda.

Tabla 18. Rango de las variables de entrada utilizadas en la solución del problema de optimización

Variables de entrada	Min	Paso	Max
a [m]	0,1	0,05	5
b [m]	0,1	0,05	2,2
z [m]	1	0,05	2,2
nts	1	1	3
tl	1	1	4
B_T	0	1	1
B_d	0	1	1
B_o	0	1	1

Fuente: Autores.

- **Número de iteraciones**

El número máximo de iteraciones, es el número posible que permite el sistema para un cierto paso, es decir, si el ancho de la ventana por ejemplo es de 30 cm igual que el largo de la ventana, se realizan todas las posibles combinaciones según el rango y el paso que se le asigne a la variable y este valor es el que define el número máximo de iteraciones. Al sopesar la carga computacional y el nivel de exigencia determinado para el problema a optimizar, se cree conveniente el paso seleccionado para las variables de decisión.

Uniando todos los valores a considerar de cada variable se da un número total de iteraciones que resulta del producto de las mismas, siendo este el resultado de las iteraciones totales menos las restringidas.

- **Tiempos de iteración**

El tiempo que dura en realizar las iteraciones se presenta en la Tabla 19.

Tabla 19. Resultados de tiempo de iteraciones

Elemento	Fuerza Bruta
Tiempo iteraciones (segundos)	674
Tiempo iteraciones (minutos)	≈11,2

Fuente: Autores.

El tiempo de iteración que aparece en la Tabla 5.2 es el tiempo que tarda el código en recorrer la hiper-rejilla y encontrar los 10 mejores resultados en una sola simulación.

De acuerdo a los resultados mostrados en la Tabla 5.2, es posible concluir que utilizar el método de fuerza bruta es viable para el desarrollo de este proyecto de grado, porque su tiempo de solución no es mayor al tiempo que se tiene para finalizar este trabajo. Por lo tanto, con este método de solución se realizan las comparaciones correspondientes con el algoritmo genético en términos de solución.

En la Tabla 20 se presentan los resultados de las diez mejores soluciones del método por fuerza bruta, siendo el Top n° 1 el mejor.

Tabla 20. TOP 10 de resultados por Fuerza Bruta.

TOP	VPN (\$)	a	b	Dim. ventana (m ²)	z	Bt	nts	tl	Bd	Bo	Núm. De iteraciones
1	4 594 395	1,8	0,6	1,08	2,2	0	0	4	1	0	40 634
2	4 601 445	1,5	0,7	1,05	2,2	0	0	4	1	0	40 415
3	4 603 784	1,7	0,6	1,02	2,2	0	0	4	1	0	40 568
4	4 612 006	1,4	0,7	0,98	2,2	0	0	4	1	0	40 129
5	4 612 733	1	1	1	2,2	0	0	4	1	0	37 806
6	4 613 278	1,6	0,6	0,96	2,2	0	0	4	1	0	40 488
7	4 613 300	1,1	0,9	0,99	2,2	0	0	4	1	0	38 776
8	4 617 109	1,2	0,8	0,96	2,2	0	0	4	1	0	39 309
9	4 621 256	1,8	0,5	0,9	2,2	0	0	4	1	0	40 591
10	4 630 395	1,7	0,5	0,85	2,2	0	0	4	1	0	40 527

Fuente: Autores.

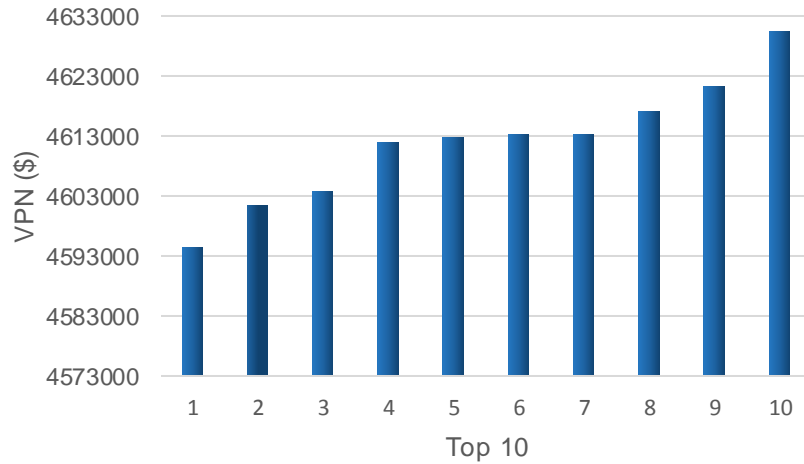
Se obtienen los resultados más óptimos con el diseño de iluminación artificial de luminaria tipo 4, que es de un precio asequible y el aporte de flujo luminoso al sistema es suficiente y uniforme, esto se debe a los datos proporcionados por el software DIALUX. Se presenta un ahorro de energía mediante la presencia de control dimerizable. El tiempo que dura el programa en seleccionar los mejores diez resultados es acorde y de corta duración debido a las restricciones del modelo.

El costo del VPN no es elevado, el sistema considera como ya se mencionó, que la opción más apropiada es el diseño de iluminación artificial de la luminaria tipo 4, siendo esta la más económica.

El optimizador arroja los resultados para minimizar la función y cumplir las restricciones declaradas, dando valores de ventana de una dimensión acorde, siendo el complemento de iluminación el diseño de iluminación artificial de luminaria tipo 4, que satisface en todos sus puntos de análisis la iluminación necesaria no requiriendo tubos solares.

Los valores de las Figuras 14 y 15 corresponden a resultados adquiridos por la Tabla 20.

Figura 14. Resultados VPN vs TOP 10 de búsqueda de solución por fuerza bruta.

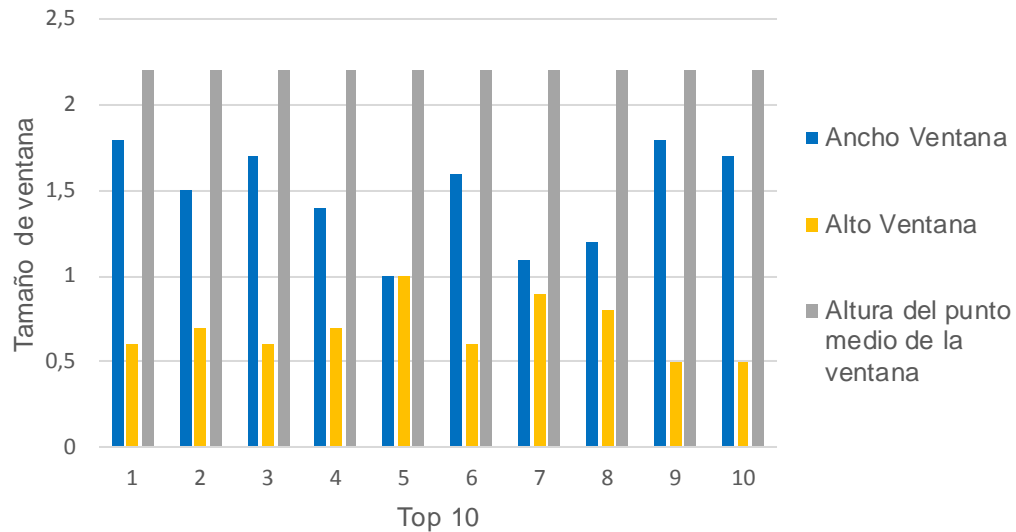


Fuente: Autores.

En la Figura 15 se aprecia una tendencia creciente en el VPN del TOP 10, el costo tiende a aumentar a lo largo de las iteraciones manteniendo el tipo de luminaria, haciendo énfasis que la mejor opción es el diseño de iluminación artificial de la luminaria tipo 4 y variando las dimensiones de la ventana. El VPN del mejor resultado es encontrado en la iteración 40 634 siendo el VPN de 4 594 395 COP.

Los resultados de las dimensiones de la ventana se presentan en la Figura 5.2, donde “z” (altura del punto medio de la ventana) es en todos los casos de $2,2 m^2$.

Figura 15. Resultados dimensiones de la ventana vs TOP 10 de búsqueda de solución por fuerza bruta.



Fuente: Autores.

Las dimensiones de la ventana son adecuadas y proporcionan al sistema una adecuada iluminación natural, siendo innecesario la utilización de tubos solares.

Las dimensiones de la ventana están en un rango de 0,85 a 1,08 m^2 y como se puede evidenciar por la Tabla 5.3, el costo del VPN varía por la dimensión de la ventana, ya que el sistema selecciona para el TOP 10 el diseño de iluminación artificial de luminaria tipo 4, con control dimerizable y sin tubos solares, solo diferenciándose en la dimensión de ventana.

La variable "z", toma el valor de 2,2 pues en todos los diez mejores resultados es la opción más favorable para la ventana, ya que entre más alta este la radiación solar aportará luz natural a los puntos de análisis opuestos a la ventana y a los puntos centrados, es directamente proporcional, entre menos altura tenga el aporte será para los puntos de análisis cercanos a la ventana.

Los resultados de inversión inicial, costos de operación y mantenimiento utilizados en el proyecto, se muestran en la Tabla 21, donde están representados los 10 mejores.

Tabla 21. Resultados de costos utilizados en el proyecto

Posición	Inversión inicial (\$)	Costo de operación anual (\$)	Costo de mantenimiento total (\$)
1	3 307 600	79 749	474 000
2	3 306 400	80 411	474 000
3	3 305 200	80 695	474 000
4	3 303 600	81 484	474 000
5	3 304 400	81 478	474 000
6	3 302 800	81 650	474 000
7	3 304 000	81 555	474 000
8	3 302 800	81 957	474 000
9	3 300 400	82 483	474 000
10	3 298 400	83 376	474 000

Fuente: Autores.

En la Tabla 21, la inversión inicial presenta poca variación a lo largo del TOP 10, ya que el diseño de iluminación artificial es el mismo y el costo de la inversión varía solo en la dimensión de la ventana y muro. EL costo de mantenimiento en todos los casos será igual debido a que se resume solo al cambio o reparación de luminarias y lámparas, que para el TOP 10 es el mismo por de diseño de iluminación artificial usada que es el tipo de luminaria 4, el costo de mantenimiento en la tabla anterior está evaluado a 20 años. El costo de operación se presenta para un año.

La Tabla 22, presenta el número de iteraciones totales, las realizadas y las rechazadas, donde se observa que se realizan el 83% y el porcentaje restante son las rechazadas debido a las restricciones del problema de optimización.

Tabla 22. Resultado de iteraciones

Elemento	Valor	Porcentaje (%)
Iteraciones Totales	686 400	100
Iteraciones Realizadas	40 673	6
Iteraciones rechazadas	645 727	94

Fuente: Autores.

A continuación se presenta un caso en particular (TOP 1: $a= 1,8$ m; $b= 0,6$ m; $z=2,2$ m; $B_d= 1$; $B_T=0$), especificando los valores de cada componente, como se muestra en la Tabla 23 para la inversión inicial.

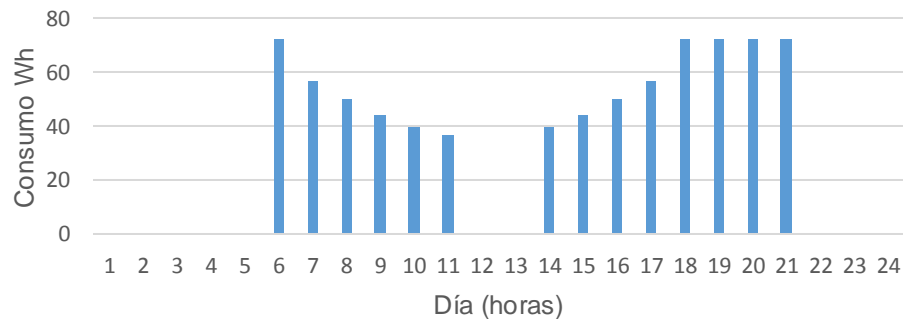
Tabla 23. Inversión inicial

Componente	Valor (\$)	Cantidad	Valor total (\$)
Diseño de iluminación artificial de luminaria tipo 4	223 000	5	1 115 000
Control dimerizable	990 400	1	990 400
Muro (m^2)	80 000	12,42	993 600
Ventana (m^2)	120 000	1,08	129 600
Lámparas	7 900	10	79 000
		Total	3 307 600

Fuente: Autores.

En la Figura 16 se puede apreciar el consumo al transcurso del día.

Figura 16. Consumo diario



Fuente: Autores.

En la Tabla 24 se presentan los costos y el consumo de un día con los datos de las variables asignadas en el TOP 1.

Tabla 24. Costo y consumo de un día en kWh

Horas	Consumo W	Costo (\$)
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	0	0
6	72,58	20,32
7	56,38	15,78
8	49,80	13,94
9	44,14	12,36
10	39,81	11,14
11	37,08	10,38
12	0	0
13	0	0
14	39,81	11,14
15	44,14	12,36
16	49,80	13,94
17	56,38	15,78
18	72,58	20,32
19	72,58	20,32
20	72,58	20,32
21	72,58	20,32
22	0	0
23	0	0
24	0	0

Fuente: Autores.

Como resumen de la tabla anterior, se obtiene que el consumo de un día es de 780,3 W aproximadamente, cuyo costo diario será de \$218,5 COP, el costo de operación es mínimo, porque la iluminación es eficiente y con luminarias tipo CFL. El consumo anual es de 284,82 kW y su costo anual se considera por \$79 749 COP.

A continuación se presenta un caso con las mismas dimensiones de ventana que se mostró anteriormente, con control On/Off y sin tubos solares, esto con el fin de comparar los diferentes casos que se podrían haber presentado.

En la Tabla 25 se presenta la inversión inicial desglosando cada uno de los componentes que intervienen.

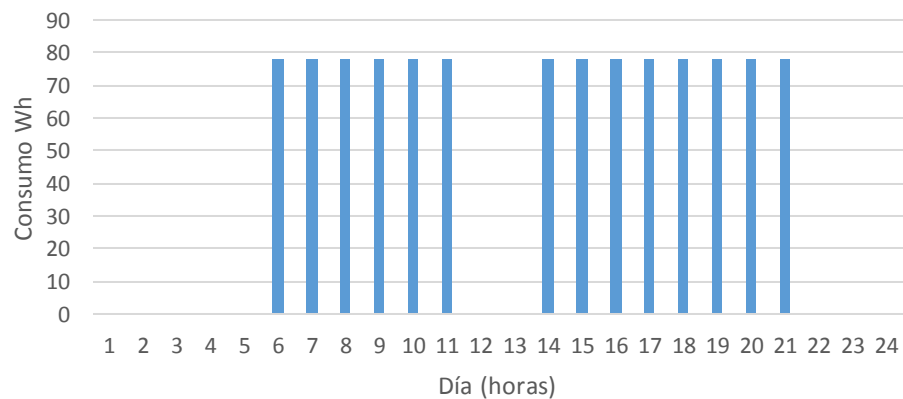
Tabla 25 Inversión inicial

Componente	Valor (\$)	Cantidad	Valor total (\$)
Diseño de iluminación artificial	4 223 000	5	1 115 000
Control on/off	719 200	1	719 200
Muro (m^2)	80 000	12,42	993 600
Ventana (m^2)	120 000	1,08	129 600
Lámparas	7 900	10	79 000
		Total	3 036 400

Fuente: Autores.

En la Figura 17 se muestra el consumo diario cuando se controla con On/Off y sin tubos solares.

Figura 17. Consumo diario



Fuente: Autores.

En la Tabla 26 se presentan los costos y el consumo de un día con los datos de las variables asignadas en el TOP 1.

Tabla 26. Consumo y costo en un día

Hora día (h)	Consumo (W)	Costo (\$)
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	0	0
6	78	21,84
7	78	21,84
8	78	21,84
9	78	21,84
10	78	21,84
11	78	21,84
12	0	0
13	0	0
14	78	21,84
15	78	21,84
16	78	21,84
17	78	21,84
18	78	21,84
19	78	21,84
20	78	21,84
21	78	21,84
22	0	0
23	0	0
24	0	0

Fuente: Autores.

De la tabla anterior, se obtiene que el consumo de un día es de 1 092 W aproximadamente, cuyo costo diario será de \$ 305 COP, el costo de operación es mínimo, ya que en este proyecto no se consideran el consumo de elementos como computadores, celulares y de más aspectos que incrementarían al costo de energía. No obstante, es más elevado el consumo de energía con el control on/off para el caso que se compara. El consumo anual es de 398 580 W y su costo se considera por \$111 602 COP.

Del método de fuerza bruta se deduce que los costos son inversamente proporcionales al área de la ventana, es decir el producto del ancho (a) y el alto (b) de la misma, para ventanas más grandes, el consumo de energía disminuye, por tanto disminuye el costo de operación y el VPN del proyecto.

4.2 ALGORITMO GENÉTICO

En esta sección se muestran las diferentes soluciones para cada una de las variables, se escogió la mejor opción que presenta el Toolbox de algoritmos genéticos para encontrar los mejores diez valores “*Top 10*”, asignando un paso, y comparándolos con las posibilidades que se desprenden en la *opción Fitness scaling*, que son: *Rank*, *top*, *proportional* y *shift linear* y al seleccionar la mejor opción de estas cuatro que se presentan, se compara con los resultados obtenidos en la búsqueda por fuerza bruta.

- **Metodología para la solución del algoritmo genético**

La metodología que se adoptó consistió en definir algunos de los parámetros que se encuentran en las opciones del solucionador ya mencionado.

A continuación se explican los valores y el procedimiento que se dieron en cada una de las opciones para la realización de todas las combinaciones:

1. El tamaño de población (*population size*): Se especifica cuantos individuos hay en cada generación, donde el algoritmo crea varias subpoblaciones. Cada entrada del vector especifica el tamaño de una subpoblación. Estos valores varían para las opciones de: *Rank*, *top*, *proportional* y *shift linear*, donde más adelante se presentan en tablas explicando más detalladamente.

2. *Fitness scaling*: Evalúa a los individuos de la función *Fitness* y estos valores son escalados dependiendo del tipo: *Rank*, *top*, *proportional* y *shift linear* y genera un rango que será el adecuado para la función de selección.
3. Selección (*Selection*): La función de selección elige los padres para la próxima generación basado en sus valores escalados de la función de *Fitness scaling*. Ignorando las restricciones enteras, por ende la única opción viable en la función de selección es: *Stochastic uniform*, puesto que las restricciones que se propusieron en este trabajo de grado son enteras, por esta razón para las cuatro opciones evaluadas se deja fija este parámetro en la función *selection*, esta función establece una línea en la que cada padre corresponde a una sección de la línea de longitud proporcional a su expectativa. El algoritmo se mueve a lo largo de la línea de los pasos de igual tamaño, un paso para cada padre. En cada paso, el algoritmo asigna un padre de la sección. El primer paso es un número aleatorio uniforme menor que el tamaño de paso.
4. Reproducción (*Reproduction*): En esta función existen dos opciones, *Elite count* que especifica y evalúa el número de personas que están garantizadas para sobrevivir a la siguiente generación, las cuales varían según la función de *Fitness scaling*. La otra opción a definir es *Crossover fraction* que especifica la fracción de la siguiente generación que pasa al cruce y el restante pasa a mutación, en las tablas presentadas para cada uno de las cuatro opciones de *Fitness scaling* se muestra el valor de la fracción que se seleccionó.
5. Mutación (*Mutation*): Se escogió por defecto *constraint dependent* en la función de mutación puesto que hacen pequeños cambios aleatorios en los individuos de la población, que proporcionan la diversidad.

6. Cruce (*Crossover*): En ésta función se asigna *Arithmetic* para todas las opciones de *Fitness scaling* como fija, pues las demás opciones no permiten las restricciones enteras arrojando error en las simulaciones.
7. *Stopping criteria*: Determina en que momento debe parar el algoritmo mediante la asignación de valores de generaciones, que en este caso se varía para todas las opciones a evaluar de *Fitness scaling*.

El tiempo de simulación que aparece en las tablas correspondientes a los resultados de las opciones de *Fitness Scaling*, hace referencia a lo que tarda en correr el código para encontrar la respuesta de cada TOP.

Con lo anterior, los valores asignados a las diferentes funciones para ser evaluadas y así encontrar el valor más óptimo de la función objetivo son:

Tabla 27. Valores asignados a las funciones del *Toolbox*.

Elemento	Desde	Cada	Hasta
<i>Population Size</i>	50	25	200
<i>Elite Count</i>	5	5	20
<i>Crossover Fraction</i>	0,6	0,2	1
<i>Generations</i>	20	20	200

Fuente: Autores.

- **Solución del algoritmo genético por *Fitness scaling: Rank***

La opción *Rank*, permite buscar el rango del individuo más apto, siendo el mejor el número 1, el siguiente más apto es 2 y así sucesivamente. Este escalamiento elimina el efecto a la propagación de valores con baja calidad.

Según la metodología planteada y los parámetros mostrados en la Tabla 5.10, se dan a conocer los resultados en la Tabla 28, teniendo en cuenta los valores asignados a las funciones del solucionador de algoritmos genéticos.

Tabla 28. *Fitness Scaling: Rank*

<i>TOP</i>	<i>Population size</i>	<i>Elite</i>	<i>Crossover Fraction</i>	<i>Generations</i>	<i>Simulation time [s]</i>
1	200	15	0,4	50	37,60
2	200	20	0,4	40	29,496
3	200	15	0,6	50	34,70
4	100	5	0,4	50	16,96
5	200	5	0,8	30	21,32
6	150	15	0,2	40	22,70
7	200	5	0,6	50	34,41
8	200	15	0,6	40	27,54
9	200	15	0,6	30	20,61
10	200	10	0,8	40	28,08

Fuente: Autores.

En el TOP 10 se observa que el mejor resultado se presenta cuando la población es de 200 individuos, al igual que la población se garantiza que el número de individuos que sobreviven es de 15 y la fracción de cruce que produce la siguiente generación es de 0,4 en la mejor opción, aunque la más recurrente es de 0,6. El algoritmo converge después de 50 generaciones de acuerdo a la mejor opción y este valor junto con 40 generaciones son los más recurrentes. La mejor opción tarda el mayor tiempo, por tanto se aprecia que más tiempo resulta en mejores respuestas.

Con lo anterior, se realiza la simulación para obtener los datos de la optimización del sistema y obtener los diez mejores resultados, mostrados en la Tabla 29.

Tabla 29. Top 10 de resultados por algoritmos genéticos con *Fitness Scaling: Rank*

Posición	VPN (\$)	a	b	z	Bt	nts	tl	Bd	Bo
1	4 585 366	2,11	0,531	2,199	0	0	4	1	0
2	4 585 409	2,11	0,530	2,199	0	0	4	1	0
3	4 585 813	2,10	0,532	2,198	0	0	4	1	0
4	4 586 264	2,10	0,529	2,199	0	0	4	1	0
5	4 586 294	2,10	0,530	2,199	0	0	4	1	0
6	4 586 335	2,11	0,530	2,195	0	0	4	1	0
7	4 586 554	2,07	0,538	2,198	0	0	4	1	0
8	4 586 792	2,08	0,535	2,197	0	0	4	1	0
9	4 586 860	2,10	0,533	2,194	0	0	4	1	0
10	4 587 060	2,10	0,530	2,194	0	0	4	1	0

Fuente: Autores.

El TOP 1 representa el mejor resultado, por ser el que genera menor VPN. Se conserva una tendencia entre las dimensiones de la ventana, siendo el ancho cercano a 2 metros y el alto cercano a 0,5 metros.

Los costos son inversamente proporcionales al área de la ventana, para ventanas más grandes, el consumo de energía disminuye, por tanto disminuye el costo de operación y el VPN del proyecto.

- **Solución del algoritmo genético por *Fitness scaling: Proportional*.**

Al igual que la opción Rank se dan a conocer los resultados en la Tabla 30, teniendo en cuenta los valores asignados a las funciones del solucionador de algoritmos genéticos.

Tabla 30. Top 10 de *Fitness Scaling: Proportional*

<i>TOP</i>	<i>Population size</i>	<i>Elite</i>	<i>Crossover</i>	<i>Generations</i>	<i>Simulation Time [s]</i>
1	200	15	0,8	50	34,48
2	200	20	0,6	50	37,00
3	150	20	0,8	50	26,55
4	100	15	0,4	50	16,98
5	200	20	0,2	40	26,27
6	150	10	0,2	50	28,15
7	200	20	0,4	50	30,63
8	150	10	0,4	50	28,05
9	200	20	1	50	34,48
10	200	5	0,4	30	22,69

Fuente: Autores.

En el TOP 10 se observa que el mejor resultado se presenta cuando la población es de 200 individuos, se garantiza que el número de individuos que sobreviven es de 15 y la fracción de cruce que produce la siguiente generación es de 0,8 en la mejor opción, que resulta ser el doble del cruce en la opción Rank. El algoritmo converge después de 50 generaciones de acuerdo a la mejor opción. La mejor opción tarda el mayor tiempo, al igual que en la opción Rank, aunque este es menor.

Con lo anterior, se realiza la simulación para obtener los datos de la optimización del sistema y obtener los diez mejores resultados, mostrados en la Tabla 31.

Tabla 31. Top 10 de resultados por algoritmos genéticos con *Fitness Scaling: Proportional*

Posición	VPN (\$)	a [m]	b [m]	z [m]	Bt	nts	tl	Bd	Bo
1	4 585 170	2,118	0,529	2,199	0	0	4	1	0
2	4 585 321	2,112	0,531	2,199	0	0	4	1	0
3	4 585 515	2,110	0,531	2,199	0	0	4	1	0
4	4 585 744	2,118	0,529	2,197	0	0	4	1	0
5	4 585 839	2,112	0,531	2,197	0	0	4	1	0
6	4 585 884	2,115	0,530	2,196	0	0	4	1	0
7	4 585 913	2,110	0,531	2,197	0	0	4	1	0
8	4 586 045	2,117	0,529	2,196	0	0	4	1	0
9	4 586 048	2,101	0,532	2,198	0	0	4	1	0
10	4 586 463	2,112	0,528	2,198	0	0	4	1	0

Fuente: Autores.

- **Solución del algoritmo genético por *Fitness scaling: Top***

Al igual que las opciones Rank y Proportional se dan a conocer los resultados en la Tabla 32, teniendo en cuenta los valores asignados a las funciones del solucionador de algoritmos genéticos.

Tabla 32. *Fitness Scaling: Top*

TOP	Population size	Elite	Crossover	Generations	Simulation Time [s]
1	150	15	0,6	50	29,28
2	150	10	0,8	50	26,79
3	100	15	0,8	50	18,17
4	100	10	1	40	14,69
5	100	20	1	50	17,98
6	100	15	0,4	50	16,94
7	150	5	0,2	50	26,14
8	200	20	0,4	50	34,69
9	100	5	0,2	40	15,25
10	200	10	0,2	40	30,45

Fuente: Autores.

En el TOP 10 se observa que el mejor resultado se presenta cuando la población es de 150 individuos, se garantiza que el número de individuos que sobreviven es de 15 y la fracción de cruce que produce la siguiente generación es de 0,6 en la mejor opción. El algoritmo converge después de 50 generaciones de acuerdo a la mejor opción. La mejor opción no tarda el mayor tiempo, a diferencia de las opciones Rank y Proportional, donde si lo es.

Con lo anterior, se realiza la simulación para obtener los datos de la optimización del sistema y obtener los diez mejores resultados, mostrados en la Tabla 33.

Tabla 33. Top 10 de resultados por algoritmos genéticos con *Fitness Scaling: Top*

Posición	VPN (\$)	a	b	z	Bt	nts	tl	Bd	Bo
1	4 585 090	2,11	0,52	2,19	0	0	4	1	0
2	4 585 306	2,11	0,529	2,19	0	0	4	1	0
3	4 585 339	2,115	0,53	2,19	0	0	4	1	0
4	4 585 507	2,10	0,532	2,19	0	0	4	1	0
5	4 585 886	2,10	0,532	2,19	0	0	4	1	0
6	4 585 964	2,10	0,532	2,19	0	0	4	1	0
7	4 586 136	2,11	0,529	2,19	0	0	4	1	0
8	4 586 334	2,10	0,532	2,19	0	0	4	1	0
9	4 586 460	2,11	0,529	2,19	0	0	4	1	0
10	4 586 803	2,05	0,542	2,19	0	0	4	1	0

Fuente: Autores.

- **Solución del algoritmo genético por *Fitness scaling: shift linear***

Al igual que las opciones Rank, Proportional y Top se dan a conocer los resultados en la Tabla 34, teniendo en cuenta los valores asignados a las funciones del solucionador de algoritmos genéticos.

Tabla 34. Top 10 de *Fitness Scaling: shift linear*

<i>TOP</i>	<i>Population size</i>	<i>Elite</i>	<i>Crossover</i>	<i>Generations</i>	<i>Simulation Time [s]</i>
1	200	20	0,6	40	28,55
2	200	5	0,6	50	32,46
3	200	15	0,8	40	27,85
4	150	20	1	50	25,99
5	200	15	0,2	40	30,04
6	100	15	0,6	50	17,21
7	150	15	0,4	30	15,42
8	200	15	0,8	50	34,39
9	150	15	0,2	50	28,34
10	150	20	0,4	50	25,75

Fuente: Autores.

En el TOP 10 se observa que el mejor resultado se presenta cuando la población es de 200 individuos, se garantiza que el número de individuos que sobreviven es de 20 y la fracción de cruce que produce la siguiente generación es de 0,6 en la mejor opción. El algoritmo converge después de 40 generaciones de acuerdo a la mejor opción. La mejor opción no tarda el mayor tiempo, pero tampoco es la que tarda menor tiempo.

Con lo anterior, se realiza la simulación para obtener los datos de la optimización del sistema y obtener los diez mejores resultados, mostrados en la Tabla 35.

Tabla 35. Top 10 de resultados por algoritmos genéticos con *Fitness Scaling: shift linear*

Posición	VPN (\$)	a	b	z	Bt	tl	Bd	Bo
1	4 585 252	2,118	0,52	2,19	0	4	1	0
2	4 585 385	2,112	0,53	2,19	0	4	1	0
3	4 585 520	2,105	0,53	2,19	0	4	1	0
4	4 585 635	2,106	0,53	2,19	0	4	1	0
5	4 585 718	2,115	0,53	2,19	0	4	1	0
6	4 586 228	2,081	0,53	2,19	0	4	1	0
7	4 586 407	2,108	0,53	2,19	0	4	1	0
8	4 586 623	2,090	0,53	2,19	0	4	1	0
9	4 586 638	2,082	0,53	2,19	0	4	1	0
10	4 586 667	2,118	0,52	2,19	0	4	1	0

Fuente: Autores.

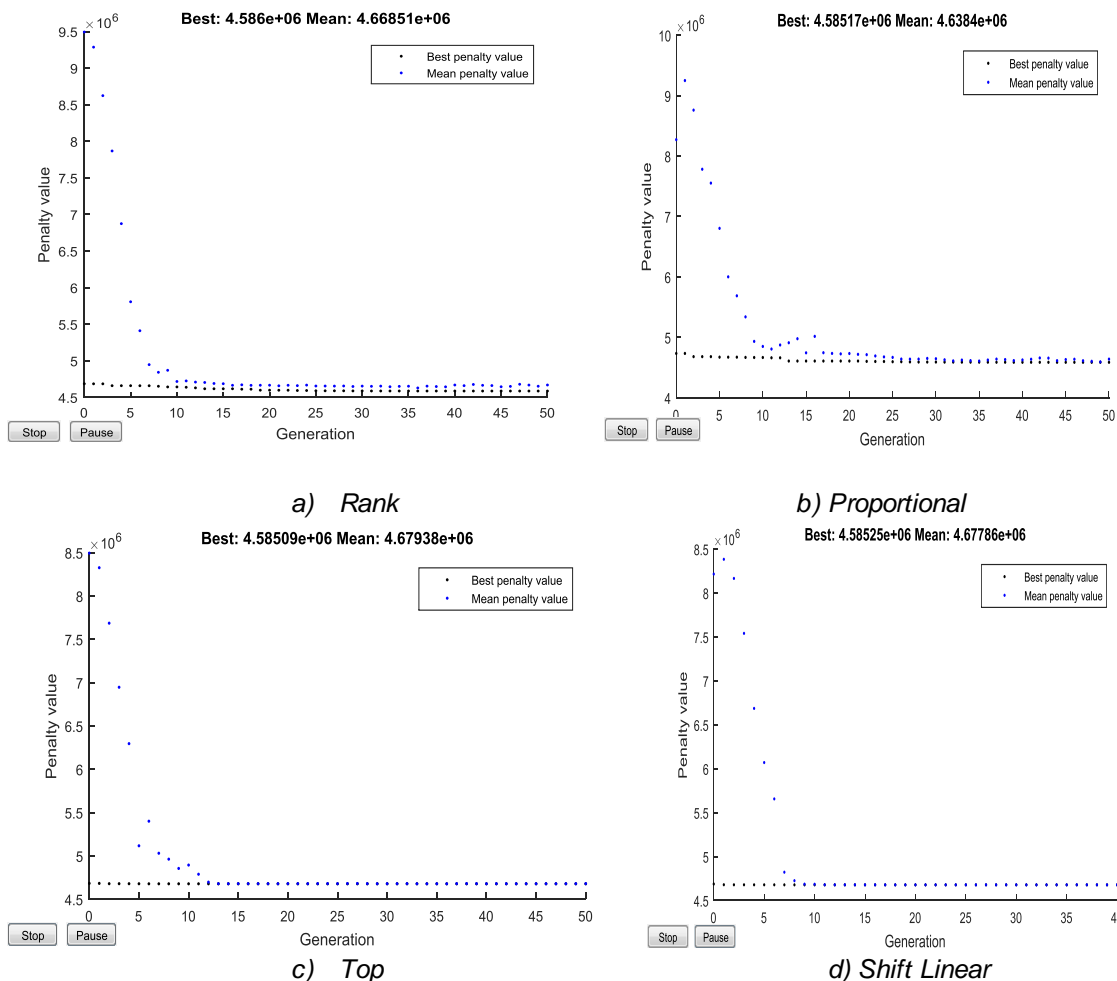
Con los resultados obtenidos por las cuatro opciones de *Fitness scaling*, se evidencia que los valores de algoritmos genéticos son mejores que los obtenidos por fuerza bruta, debido a que ésta última presenta un número de posibilidades limitadas por el paso que se le asigne. Con los algoritmos genéticos se revisa un universo de búsqueda más finamente que con la rejilla seleccionada para fuerza bruta.

4.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS: FUERZA BRUTA VS ALGORITMO GENÉTICO

De acuerdo a la selección de *Fitness Scaling* y a las cuatro opciones que ofrece, se realiza la comparación entre ellas, seleccionando la mejor.

En la la Figura 18 se observa la convergencia de las generaciones para cada una de las opciones de *Fitness Scaling*, los puntos negros muestran las mejores soluciones para las generaciones “Best Fitness”, mientras que los puntos azules muestran los valores promedios de la función objetivo de todos los individuos.

Figura 18. *Best Fitness* de las funciones de *Fitness Scaling*.



Fuente: Autores.

Con lo anterior, se tiene en cuenta la conveniencia financiera, al igual que las dimensiones posibles o reales comercialmente. Las tablas mostradas en la sección 6.2 presentan las dimensiones de la ventana, los cuales no se aproximan a las dimensiones encontradas con el método de fuerza bruta. Por lo tanto se procedió a realizar un filtro, el cual consistió en tomar los mejores valores de cada función de *Fitness scaling* y con ellos restringir un poco más los valores de la ventana.

Se concluye que “*Top*” es la mejor opción de *Fitness scaling* porque presenta el menor costo de VPN. Por lo tanto, la solución de la opción “*Top*” será la utilizada para comparar los resultados con el método de fuerza bruta.

En la Tabla 36 se puede apreciar un resumen del mejor resultado de cada una de las opciones de *Fitness scaling*.

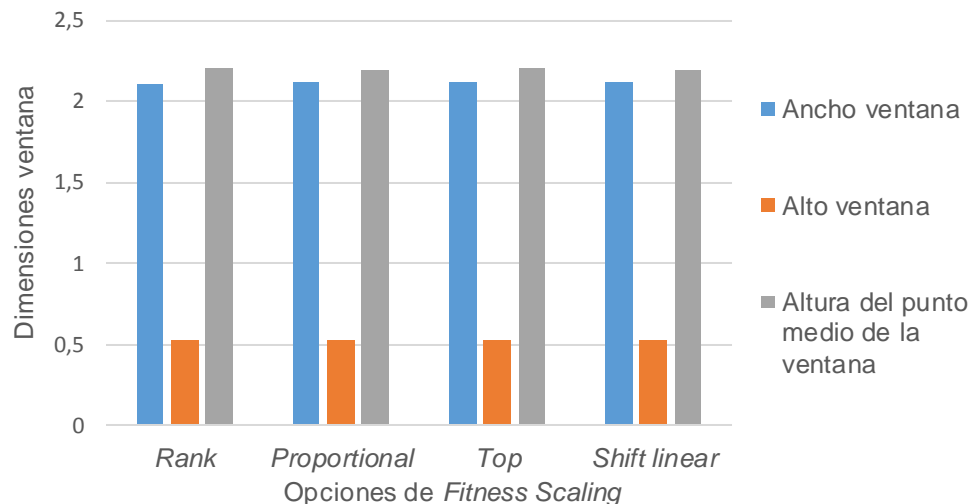
Tabla 36. Resumen de algoritmos genéticos por *Fitness Scaling*

<i>Option</i>	<i>Population size</i>	<i>Elite</i>	<i>Crossover</i>	<i>Generations</i>	<i>Simulation Time [s]</i>
<i>Rank</i>	200	15	0,4	50	37,60
<i>Proportional</i>	200	15	0,8	50	34,48
<i>Top</i>	150	15	0,6	50	29,28
<i>Shift Linear</i>	200	20	0,6	40	28,55

Fuente: Autores.

La solución obtenida para la optimización de la ventana a partir de las opciones presentadas por *Fitness scaling* se ilustran en la Figura 19, donde se muestra que la mejor opción es *Rank*, incluyendo el filtro realizado.

Figura 19. Resultados de dimensiones de la ventana para las opciones de *Fitness scaling*.



Fuente: Autores.

En la Tabla 37, se presentan con más detalles los valores del dimensionamiento de la ventana.

Tabla 37. Mejores valores de las funciones de *Fitness Scaling*

Función	a	b	z	Bt	nts	tl	Bd	Bo	Generaciones
<i>Rank</i>	2,111	0,531	2,19	0	0	4	1	0	50
<i>Proportional</i>	2,118	0,529	2,19	0	0	4	1	0	50
<i>Top</i>	2,119	0,529	2,19	0	0	4	1	0	50
<i>Shift linear</i>	2,118	0,529	2,19	0	0	4	1	0	40

Fuente: Autores.

La comparación está basada en los siguientes criterios:

- Costo: Se comparó el VPN de las soluciones obtenidas con los dos métodos. Los costos mostrados se calcularon utilizando una tasa de interés efectiva anual de 5%. En cuanto a viabilidad por costos, ambos métodos convergen al mismo valor, con diferencia entre ellos de menos del 1%.
- Tiempo de ejecución: se comparó la eficiencia del algoritmo genético con la búsqueda por fuerza bruta básica. Con ello se obtuvo que el tiempo de ejecución por algoritmo genético es menor al de fuerza bruta. Esto se da porque el método robusto de fuerza bruta hace tantas iteraciones como lo defina la rejilla de búsqueda, mientras que el Toolbox de algoritmo genético después de definida las opciones, revisa el universo de opciones más eficiente y finamente.

5 ANÁLISIS DE TENDENCIAS

De acuerdo con los resultados obtenidos y las variables de análisis, se realizó un estudio de tendencia que permitió identificar los lineamientos que se pueden considerar como criterios de diseño. Usando las variables de análisis se establecen tendencias que permiten observar el comportamiento del modelo de optimización, por medio de cambios en dichas variables para establecer en cada caso el VPN del proyecto.

Entre las variables que se analizaron están:

- Área de la ventana
- Diseño de iluminación artificial
- Sistema de control on/off y dimerizable
- Tubo solar

Con el análisis de las anteriores variables se establecen tendencias de

- Consumo energético de un día
- Costos de operación anual y costo de mantenimiento a 20 años
- Inversión inicial
- Valor presente neto

A continuación se presentan los resultados obtenidos una vez realizado el proceso de optimización de la técnica de fuerza bruta.

- ÁREA DE LA VENTANA

Para definir una posible tendencia se consideraron diferentes tamaños de ventanas buscando minimizar y maximizar el uso de la iluminación natural. Los valores que se tomaron se muestran en la Tabla 38.

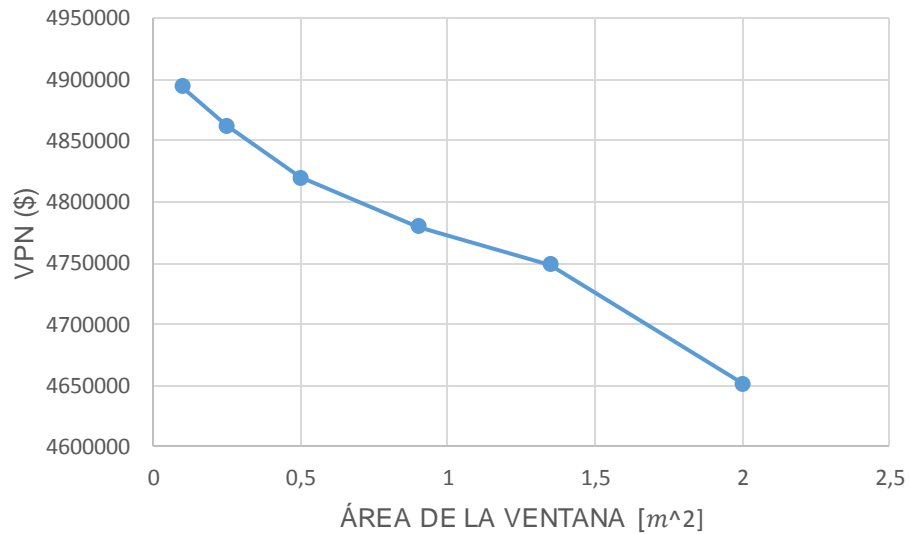
Tabla 38. Tendencias de ventana vs VPN

a[m]	b[m]	z[m]	Área Ventana [m^2]	Área Muro [m^2]	Π	Bd	Bo	Bts	nts	VPN (\$)
0,5	0,2	2,2	0,1	10,9	1	1	0	0	0	4 894 625
0,5	0,5	2,2	0,25	10,75	1	1	0	0	0	4 862 047
0,5	1	2,2	0,5	10,5	1	1	0	0	0	4 819 995
1,8	0,5	2,2	0,9	10,1	1	1	0	0	0	4 779 979
1,5	0,9	2,2	1,35	9,65	1	1	0	0	0	4 748 717
2	1	2,2	2	9	1	1	0	0	0	4 651 316

Fuente: Autores.

Se observa que los valores de VPN son inversamente proporcionales al tamaño de la ventana y el muro, esto demuestra que cuando decrece el área de la ventana se hace necesario el uso de iluminación artificial y/o tubos solares durante el día aumentando el costo de operación y el costo del muro para mantener los lux necesarios en el aula de clases; esto se observa con mayor detalle en la Figura 20.

Figura 20. Tendencia de área de ventana vs VPN



Fuente: Autores.

- CONSUMO ENERGÉTICO DE UN DÍA

Se varió el uso del control dimerizable y on/off para las mismas áreas que se presentaron anteriormente, variando la configuración del diseño de iluminación artificial y manteniendo el área de la ventana, los resultados están mostrados en la Tabla 39.

Tabla 39. Consumo de un día vs VPN

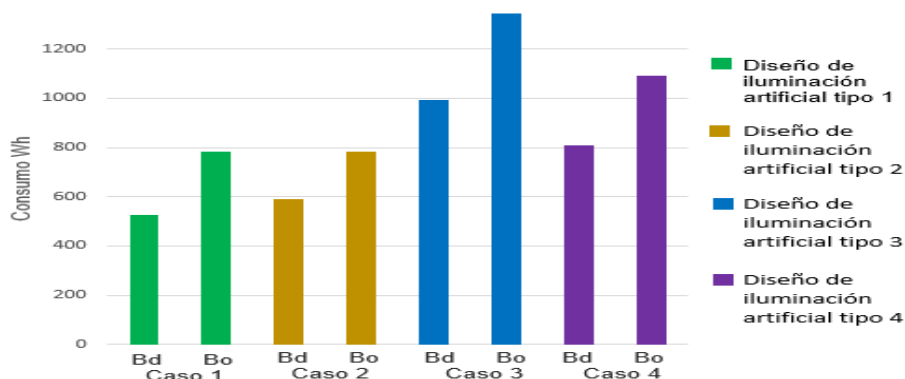
Caso	a[m]	b[m]	z[m]	tl	Bd	Bo	Bt	nts	Consumo día Wh	VPN (\$)
1	1,8	0,5	2,2	1	1	0	0	0	525	4 779 979
	1,8	0,5	2,2	1	0	1	0	0	784	4 838 170
2	1,8	0,5	2,2	2	1	0	0	0	590	4 903 247
	1,8	0,5	2,2	2	0	1	0	0	784	4 878 170
3	1,8	0,5	2,2	3	1	0	0	0	994	5 557 321
	1,8	0,5	2,2	3	0	1	0	0	1 344	5 731 408
4	1,8	0,5	2,2	4	1	0	0	0	807	4 621 256
	1,8	0,5	2,2	4	0	1	0	0	1 092	4 712 947
5	2	1	2,2	2	1	0	0	0	425	4 736 592
	2	1	2,2	2	0	1	0	0	616	4 708 199

Fuente: Autores.

Se deduce de la tabla anterior que al utilizar una misma dimensión de ventana, con un diseño de iluminación artificial específico, el consumo será más elevado utilizando el sistema de control on/off, pero el valor presente neto por esta razón no es mayor en todos los casos, como se observa en los dos últimos ejemplos el consumo en un día es mayor utilizando el sistema de control on/off pero su VPN es menor que con el uso del sistema de control dimerizable, esto se debe a que la inversión inicial del control on/off en este caso es más baja con relación al sistema de control dimerizable.

El consumo es directamente proporcional al costo de operación, en el cual interviene el tipo de diseño de iluminación artificial utilizado, el área de la ventana, en la Figura 21. Se evidencia lo anterior.

Figura 21. Consumo energético vs diseño de iluminación artificial



Fuente: Autores.

- COSTOS DE OPERACIÓN Y SISTEMA DE CONTROL

Se compararon combinaciones de variables de entrada con el fin de hacer un paralelo entre la conveniencia de emplear un sistema de control on-off o un sistema de control dimerizable. En la Tabla 40. Se muestran seis combinaciones diferentes.

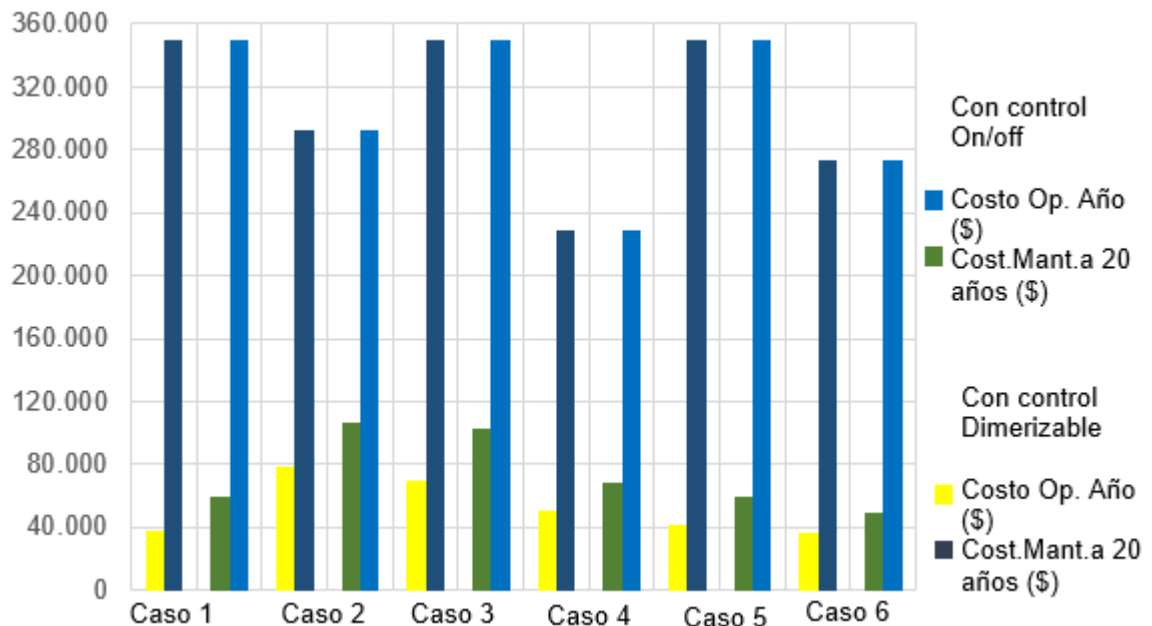
Tabla 40. Costos de operación vs Sistema de control

Caso	a[m]	b[m]	z[m]	tl	Bd	Bo	Bt	nts	Inv. Inicial (\$)	Costo Op. Año (\$)	Cos. mant. a 20 años (\$)	VPN (\$)
1	2	1	2,2	1	1	0	0	0	3 804 800	37 941	350 038	4 651 316
	2	1	2,2	1	0	1	0	0	3 533 600	59 957	350 038	4 668 199
2	2	0,7	1,5	4	1	0	0	0	3 320 400	78 379	292 934	4 638 958
	2	0,7	1,5	4	0	1	0	0	3 049 200	106 288	292 934	4 732 947
3	2	1	2,2	3	1	0	0	0	3 984 800	69 854	350 038	5 248 903
	2	1	2,2	3	0	1	0	0	3 713 600	102 784	350 038	5 408 600
4	2	1	2,2	4	1	0	1	1	4 708 400	50 713	228 419	5 600 424
	2	1	2,2	4	0	1	1	1	4 437 200	68 328	228 419	5 559 712
5	2	1	2,2	2	1	0	0	0	3 844 800	41 401	350 038	4 736 592
	2	1	2,2	2	0	1	0	0	3 573 600	59 957	350 038	4 708 199
6	2	1	2,2	2	1	0	1	1	5 208 800	36 067	272 946	5 953 697
	2	1	2,2	2	0	1	1	1	4 937 600	49 056	272 946	5 852 459

Fuente: Autores.

Se evidenció de esta comparación que los costos de mantenimiento son independientes del tipo de control que se implemente en el sistema, por tanto son iguales para una misma combinación como se presenta en la Figura 22. La diferencia está en la inversión inicial y el costo de operación anual, porque el sistema de control dimerizable es más costoso que el sistema de control on-off, aunque el dimerizable genera menor consumo energético y por ende menor costo de operación.

Figura 22. Sistemas de control on/off y dimerizable vs costo de operación anual y costo de mantenimiento a 20 años.



Fuente: Autores.

Se aprecia que los primeros tres ejemplos de la Tabla 40 el VPN es mayor cuando existe control on-off y los últimos tres ejemplos muestran que el VPN es mayor cuando existe control dimerizable. En todos los ejemplos se evidencia que la inversión inicial es \$ 271 200 mayor para control dimerizable que para control on-off, por tanto la diferencia del costo de operación anual determina cual sistema de control genera mayor o menor VPN.

Se encontró que si la diferencia entre el costo de operación anual para sistema de control on-off y dimerizable es inferior a \$ 20 700, será menor el VPN del sistema con control dimerizable, mientras que si esa misma diferencia es mayor a \$ 20 750, será menor el VPN del sistema con control dimerizable. Esto sucede porque el ahorro de consumo y costos energéticos en el período de análisis no alcanza a recuperar la inversión del sistema de control dimerizable. No se estableció relación con el consumo de energía, porque el precio de la energía varía con la hora del día y dificulta el análisis.

- TUBO SOLAR

El tubo solar es un sistema de iluminación natural a base de tubos reflectantes, que proporciona una sensación de confort y un ahorro energético. En la Tabla 41 se establecen casos donde el costo de los tubos solares varía un 25%, 50%,75% y 100% de su costo que es de \$1 364 000 COP, con el fin de observar la viabilidad del mismo.

Tabla 41. Tendencia de tubos solares vs VPN

Caso	a[m]	b[m]	z[m]	tl	Bd	Bo	Bt	nts	Inv. Inicial (\$)	Costo Op. Año (\$)	Cos. mant. a 20 años (\$)	VPN (\$)
25%	1,8	0,5	2,2	4	1	0	1	1	3 641 400	72 242	292 934	4 879 648
	1,8	0,5	2,2	4	0	1	1	1	3 370 200	106 288	292 934	5 053 947
50%	1,8	0,5	2,2	4	1	0	1	1	3 982 400	72 242	292 934	5 220 648
	1,8	0,5	2,2	4	0	1	1	1	3 711 200	106 288	292 934	5 394 947
75%	1,8	0,5	2,2	4	1	0	1	1	4 323 400	72 242	292 934	5 561 648
	1,8	0,5	2,2	4	0	1	1	1	4 052 200	106 288	292 934	5 735 947
100%	1,8	0,5	2,2	4	1	0	1	1	4 664 400	72 242	292 934	5 902 648
	1,8	0,5	2,2	4	0	1	1	1	4 393 200	106 288	292 934	6 076 947

Fuente: Autores.

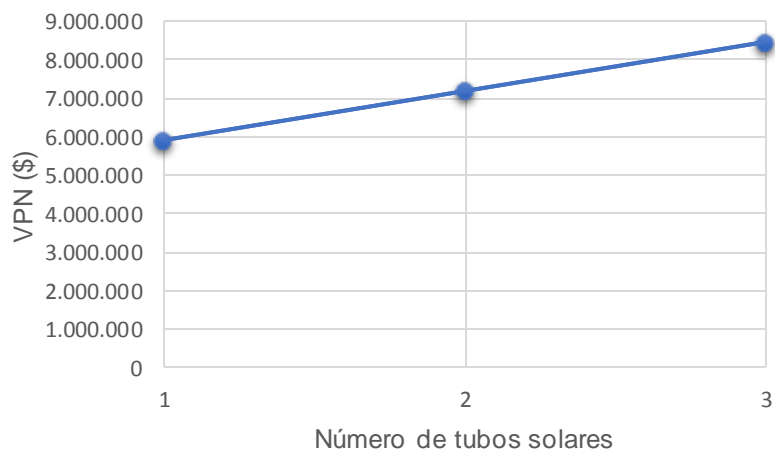
Se contempla que sería viable en cuanto al valor presente neto la instalación de un tubo solar al sistema, con la reducción de un 25 % de su costo, cumple con la norma RETILAP para todos los puntos de análisis, no saliéndose de sus límites de

750 lux como máximo. Entre más elevado sea el costo del tubo solar, mayor es la inversión inicial y su implementación sería poco viable.

La inversión inicial será superior con la existencia de un tubo solar y un sistema de control dimerizable que con el sistema de control on/off, claramente por el costo de éste último, pese al anterior, el consumo se hace más elevado con el sistema de control on/off haciendo más costoso el VPN.

En la Figura 23, se aprecia que entre más tubos solares existan en el aula de clases con una dimensión específica, con mismo tamaño de ventana, el VPN es directamente proporcional al número de tubos solares.

Figura 23. Tendencia tubos solares vs VPN



Fuente: Autores.

6 CONCLUSIONES

El planteamiento del problema de optimización permitió solucionar de manera eficiente el diseño de un sistema híbrido de iluminación (natural y artificial) en un entorno tropical. Técnica y financieramente se cumplen los requisitos en el diseño adecuado de un sistema de iluminación híbrido, la calidad del sistema es buena, es autónomo, sostenible y sustentable, siendo un aporte para la línea de investigación de uso racional de la energía (URE).

El mejor resultado de la optimización del modelo se determinó para un sistema de iluminación natural compuesta por una ventana de 2,11 metros de ancho por 0,52 metros de alto, ubicada a 2,19 metros de altura medida desde el piso hasta el punto medio de la ventana, además resultó innecesaria la existencia de tubo solar, porque el ahorro de costos energéticos no compensa la inversión del mismo. El sistema de iluminación artificial es el propuesto por el cuarto diseño, por ser más económica su inversión, automatizado por sistema de control dimerizable.

El tiempo en que resuelve el método de algoritmo genético el problema de optimización, es menor al tiempo que toma en solucionar el método de fuerza bruta (22 veces menor), siendo esto una razón para determinar que es más conveniente la solución del método de algoritmo genético. Adicionalmente las cuatro opciones de Fitness Scaling no representan diferencia considerable entre ellas (menos del 0,1%), para cualquiera, el resultado del problema será menor que el de fuerza bruta.

Se establecieron tendencias de consumo, a partir de los resultados de los métodos de optimización y los ejemplos anexos. Las dimensiones de la ventana no son mayores porque el RETILAP restringe esto al determinar el límite superior de iluminación. Sin embargo el área y la altura de la ventana son inversamente proporcionales al VPN del sistema. Aunque la inversión del sistema de control dimerizable es más costosa que la inversión del control on-off, resulta ser más

conveniente por el ahorro de consumo energético y disminución en costos de operación.

El desarrollo de este trabajo de grado fue de gran impacto en la formación profesional de los autores, para ampliar sus conocimientos en diseños de sistemas híbridos de iluminación, manejo de herramientas de modelado matemático, formulación de presupuestos de proyectos, análisis de resultados, formulación de tendencias de consumo energético con dichos resultados y medir objetivamente el tiempo de ejecución de un proyecto.

7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] UPME, “Caracterización de las bombillas para uso interior comercializadas en Colombia,” *Univ. Nac. Colomb.*, 2008.
- [2] MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, “Proyección de demanda de energía eléctrica en Colombia,” 2013.
- [3] UPME, “Informe mensual de variables de generación y del mercado eléctrico colombiano,” pp. 1–15, 2014.
- [4] L. ALEXANDER and S. ALLEN, “Fifth assesment report of the Intergovernmental panel on climate change,” 2013.
- [5] D. MANOTAS and D. OLIVEROS, “Energy supply optimization for unregulated consumers,” vol. 107, no. 1, pp. 97–107, 2014.
- [6] C. A. H. S, R. Romero, and D. Giral, “Optimization of the Use of Residential Lighting with Neural Network,” vol. 100, no. 1, 2010.
- [7] O. BARRERA and R. MARTINEZ, “Propuesta metodológica para la selección de tecnologías de iluminación mixtos (natural - artificial) para edificaciones,” Universidad Industrial de Santander. Trabajo de grado en ingeniería electrónica, 2012.
- [8] I. P. L. D. Y. A. D. L. E. COMITÉ ESPAÑOL DE ILUMINACIÓN, “Aprovechamiento de la luz natural de edificios,” 2005.
- [9] L. CORDOVA and J. VILLACÍS, “Diseño de un sistema de iluminación híbrida con fibra óptica solar e iluminación led para una construcción habitacional,” Universidad Técnica Particular de Loja. Trabajo de grado en ingeniería electrónica, 2011.
- [10] F. MOORE and G. ANDERSON, *CONCEPTS AND PRACTICE OF ARCHITECTURAL DAYLIGHTING*. Van Nostrand Reinhold, 1991.
- [11] A. CABASCANGO and E. LIMA, “Optimización del sistema de iluminación de la planta industrial Novopan del Ecuador S.A.,” Escuela Politécnica del Ejército. Trabajo de grado en ingeniería electrónica, 2005.
- [12] MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, *Reglamento técnico de iluminación y alumbrado público (RETILAP)*. 2010.

- [13] N. RODRÍGUEZ, “Informática Aplicada a la Ingeniería de Procesos I (Orientación I),” *Univ. Tecnológica Nac.*, 2001.
- [14] P. MURCIA and C. VALDMIESO, “Optimización de generación híbrida para el sector residencial,” *Univ. Ind. Santander*, 2014.
- [15] E. JELTSCH, “Diseño y Análisis de Algoritmos con Java,” *Univ. La Serena*, pp. 1–54.
- [16] “<http://www.mathworks.com/products/matlab/>. [Último acceso: 07 08 2014].”
- [17] A. CHIPPERFIELD, P. FLEMING, H. POHLHEIM, and C. FONSECA, “Genetic Algorithm,” *Univ. Sheff.*, 2001.
- [18] “DIALux 4.” [Online]. Available: <http://www.dial.de/DIAL/es/dialux/browse/12.html>.
- [19] S. RAO, *ENGINEERING OPTIMIZATION Theory and Practice*, Fourth. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 1996.
- [20] P. Sánchez and P. Linares, “Julián Barquín,” *Model. Matemáticos Optim.*, pp. 1–55, 2010.
- [21] MINISTRO DE MINAS Y ENERGÍA, “REGLAMENTO TÉCNICO DE INSTALACIONES ELÉCTRICAS (RETIE),” vol. Resolución, no. 18, p. 164, 2008.

BIBLIOGRAFÍA

“DIALux 4.” [Online]. Available: <http://www.dial.de/DIAL/es/dialux/browse/12.html>.

“<http://www.mathworks.com/products/matlab/>. [Último acceso: 07 08 2014].”

A. CABASCANGO and E. LIMA, “Optimización del sistema de iluminación de la planta industrial Novopan del Ecuador S.A.,” Escuela Politécnica del Ejército. Trabajo de grado en ingeniería electrónica, 2005.

A. CHIPPERFIELD, P. FLEMING, H. POHLHEIM, and C. FONSECA, “Genetic Algorithm,” *Univ. Sheff.*, 2001.

C. A. H. S, R. Romero, and D. Giral, “Optimization of the Use of Residential

Lighting with Neural Network,” vol. 100, no. 1, 2010.

D. MANOTAS and D. OLIVEROS, “Energy supply optimization for unregulated consumers,” vol. 107, no. 1, pp. 97–107, 2014.

E. JELTSCH, “Diseño y Análisis de Algoritmos con Java” *Univ. La Serena*, pp. 1–54.

F. MOORE and G. ANDERSON, *CONCEPTS AND PRACTICE OF ARCHITECTURAL DAYLIGHTING*. Van Nostrand Reinhold, 1991.

I. P. L. D. Y. A. D. L. E. COMITÉ ESPAÑOL DE ILUMINACIÓN, “Aprovechamiento de la luz natural de edificios,” 2005.

L. ALEXANDER and S. ALLEN, “Fifth assesment report of the Intergovernmental panel on climate change,” 2013.

L. CORDOVA and J. VILLACÍS, “Diseño de un sistema de iluminación híbrida con fibra óptica solar e iluminación led para una construcción habitacional,” Universidad Técnica Particular de Loja. Trabajo de grado en ingeniería electrónica, 2011.

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, “Proyección de demanda de energía eléctrica en Colombia,” 2013.

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, *Reglamento técnico de iluminación y alumbrado público (RETILAP)*. 2010.

MINISTRO DE MINAS Y ENERGÍA, “REGLAMENTO TÉCNICO DE INSTALACIONES ELÉCTRICAS (RETIE),” vol. Resolución, no. 18, p. 164, 2008.

N. RODRÍGUEZ, “Informática Aplicada a la Ingeniería de Procesos I (Orientación I),” *Univ. Tecnológica Nac.*, 2001.

O. BARRERA and R. MARTINEZ, “Propuesta metodológica para la selección de tecnologías de iluminación mixtos (natural - artificial) para edificaciones,” Universidad Industrial de Santander. Trabajo de grado en ingeniería electrónica, 2012.

P. MURCIA and C. VALDIVIESO, “Optimización de generación híbrida para el sector residencial,” *Univ. Ind. Santander*, 2014.

P. Sánchez and P. Linares, “Julián Barquín,” *Model. Matemáticos Optim.*, pp. 1–55, 2010.

S. RAO, *ENGINEERING OPTIMIZATION Theory and Practice*, Fourth. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 1996.

UPME, “Caracterización de las bombillas para uso interior comercializadas en Colombia,” *Univ. Nac. Colomb.*, 2008.

UPME, “Informe mensual de variables de generación y del mercado eléctrico colombiano,” pp. 1–15, 2014.

ANEXOS

ANEXOS A: Niveles de iluminancia para salón de clases

Tabla A-1. Niveles de iluminancia para diferentes áreas y actividades


INSTITUTOS EDUCATIVOS	NIVELES DE ILUMINANCIA (lx)		
	Min.	Medio	Máx.
<i>Salones de clase</i>			
Iluminación general	300	500	750
Tableros para emplear con tizas	300	500	750
Elaboración de planos	500	750	1000
<i>Salas de conferencias</i>			
Iluminación general	300	500	750
Tableros	500	750	1000
Banco de demostración	500	750	1000
<i>Laboratorios</i>	300	500	750
<i>Salas de arte</i>	300	500	750
<i>Talleres</i>	300	500	750
<i>Salas de asamblea</i>	150	200	300

Para efectos del RETIE, en lugares de trabajo se debe asegurar el cumplimiento de los anteriores niveles de iluminancia, adoptados de la norma ISO 8995. El valor medio de iluminancia, relacionado en la Tabla A-1. “Niveles de iluminancia aceptados para diferentes áreas y actividades”, debe considerarse como el objetivo de diseño, pero el requisito exigible es que el valor medido a la altura del sitio de trabajo se encuentre entre el rango del valor mínimo y el valor máximo [21].

ANEXO B: Ficha técnica de luminarias

ANEXO B-1: TIPO 1

Tabla B-1. Philips TBS424 4xTL5-14W/830 HFP C5-H GT IP65

MODELO DE LUMINARIA	DESCRIPCIÓN
	<p>Para entornos que están sujetos a especialmente altas exigencias en cuanto a la limpieza, los clientes desean una solución de iluminación fácil de limpiar y fácil de instalar. Con TBS424, instalación y mantenimiento son sencillos y rápidos. La luminaria puede instalarse sin abrirse, y el montaje sin tornillos hace que la superficie fácil de limpiar. Con una selección de tamaños, colores de lámpara y conectores, TBS424 también puede ser afinado a las necesidades de cada cliente.</p>

DATOS DEL PRODUCTO

Información general

Código de familia de producto: TBS424 [TBS424]

Cantidad de luz: 4 [4 pcs]

Tipo de la lámpara: TL5 [TL5]

Potencia de lámpara: 14 W [14 W]

Color de la fuente de luz: 830 [830 blanco cálido]

Equipo HFP

Tipo Óptico: C5-H [alto brillo óptico, doble alta reflectancia]

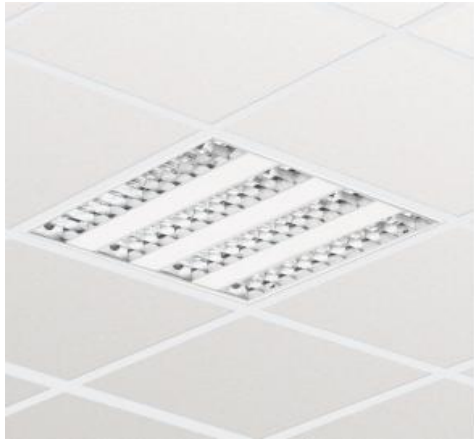
Tipo: GT [El vidrio templado]

Protegido por la penetración: IP65 [Polvo, chorros de agua]

Prueba del hilo incandescente 850/5 [850 ° C de temperatura, duración 5 s]

ANEXO B-2: TIPO 2

Tabla B-2. Philips TBS165 K 4xTL5-14W HFS C6

MODELO DE LUMINARIA	DESCRIPCIÓN
	<p>Diseñado para hacer frente a la necesidad de iluminación básica de alta eficiencia energética, permite ahorrar energía mediante la sustitución de instalaciones electromagnéticas obsoletas con tecnología de Philips TL5.</p> <p>Con innovadoras ópticas TL5 especiales, una selección de los balastos, sensores (detección de presencia, regulación de luz natural) y la iluminación de emergencia, se puede utilizar para la iluminación general en una amplia variedad de aplicaciones, incluyendo oficinas, escuelas y tiendas.</p>

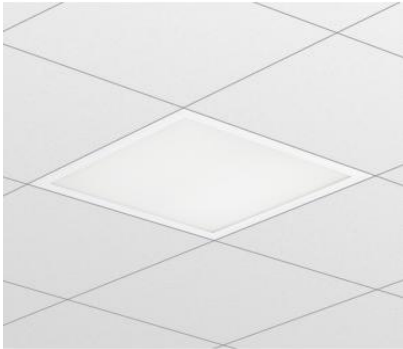
DATOS DEL PRODUCTO

Información general

Código de familia de producto:	TBS165 [TBS165]
Cantidad de luz:	4 [4 pcs]
Tipo de la lámpara:	TL5 [TL5]
Potencia de lámpara:	14 W [14 W]
Color de la fuente de luz:	830 [830 blanco cálido]
Equipo HFP	
Tipo Óptico:	C6 [Alto brillo óptica doble parabólica cerrada]
Protegido por la penetración:	IP20 [Protegido contra los dedos]
Prueba del hilo incandescente	850/5 [850 ° C de temperatura, duración 5 s]

ANEXO B-3: TIPO 3

Tabla B-3. Philips CR200B 4xTL5-24W HFP O

MODELO DE LUMINARIA	DESCRIPCIÓN
	En aplicaciones donde la higiene es de vital importancia, como los hospitales y las instalaciones de producción de alimentos, los clientes quieren una luminaria IP65 probado que es seguro de usar y viene en un atractivo precio. Este accesorio compacto representa verdadero valor para el dinero: la lámpara T5 ofrece una excelente calidad de luz y la cubierta plana sin tornillos hace que la luminaria extremadamente fácil de limpiar.

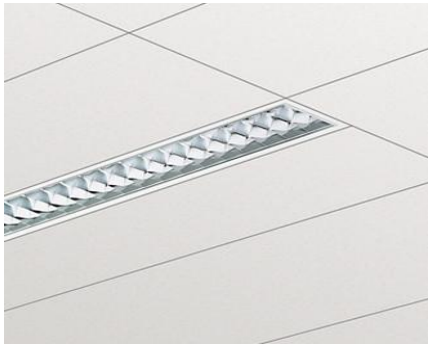
DATOS DEL PRODUCTO

Información general

Código de familia de producto:	CR200B [CR200B]
Cantidad de luz:	4 [4 pcs]
Tipo de la lámpara:	TL5 [TL5]
Potencia de lámpara:	24 W [24 W]
Color de la fuente de luz:	830 [830 blanco cálido]
Equipo HFP Tipo Óptico:	O [Opal]
Protegido por la penetración:	IP65 [Polvo, chorros de agua]
Prueba del hilo incandescente	650/5 [650 °C de temperatura, duración 5 s]

ANEXO B-4: TIPO 4

Tabla B-4. Philips TBS411 2XL5 39W HFP C6

MODELO DE LUMINARIA	DESCRIPCIÓN
	<p>Este tipo de lámpara puede también sistemas de techo con un apoyo visible e invisible. Fácil de instalar. Por otra parte, el TBS411 puede instalar en techos de rejilla utilizado (versiones extendidas). La óptica es altamente eficiente.</p>

DATOS DEL PRODUCTO

Información general

Código de familia de producto: TBS411 [TBS411]

Cantidad de luz: 2 [2 pcs]

Tipo de la lámpara: TL5 [TL5]

Potencia de lámpara: 39 W [39 W]

Color de la fuente de luz: 840 [840 blanco neutro]

Equipo HFP

Tipo Óptico: C6 [Alto brillo óptica doble parabólica cerrada]

Protegido por la penetración: IP65 [Polvo, chorros de agua]

Prueba del hilo incandescente IP20 [Protegido contra los dedos]

ANEXO C: Posiciones de las luminarias

Anexo C-1: Tipo 1 Philips TBS424 4xTL5-14W HFP C5-H GT

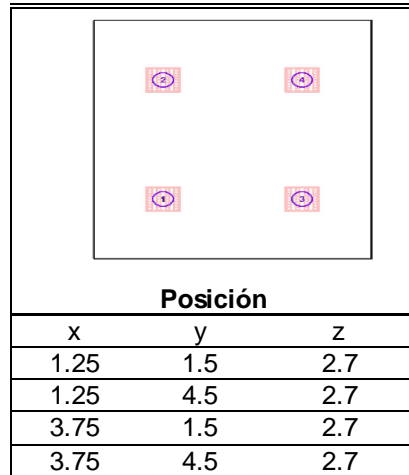


Figura C-1. Lista de coordenadas Tipo 1

Anexo C-2: Tipo 2 Philips TBS165 K 4xTL5-14W HFS C6

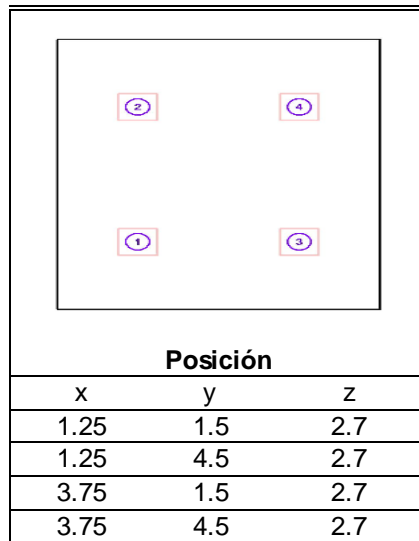


Figura C-2. Lista de coordenadas Tipo 2

Anexo C-3: Tipo 3 Philips CR200B 4xTL5-24W HFP O

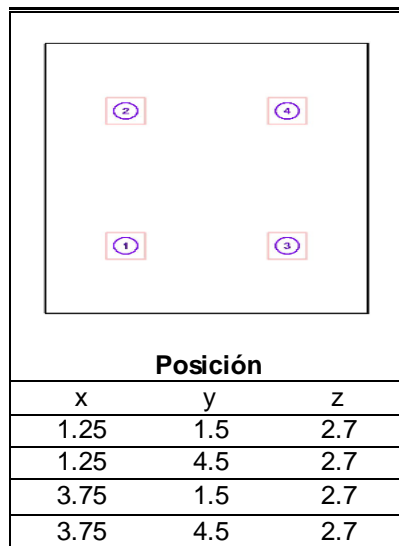


Figura C-3. Lista de coordenadas Tipo 3

Anexo C-4: Tipo 4 Philips TBS411 2xTL5 39W HFP C6

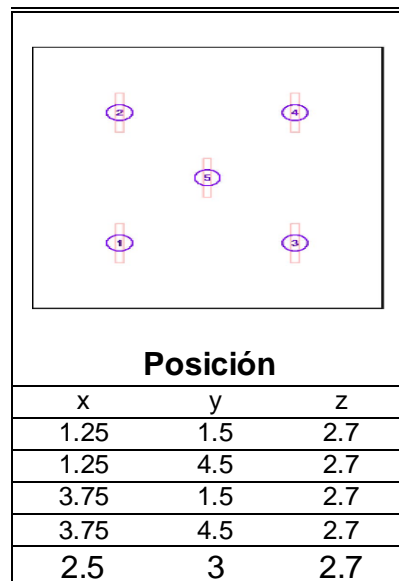


Figura C-4. Lista de coordenadas Tipo 4

ANEXO D: COTIZACIÓN TUBO SOLAR

Tabla D-1. Cotización tubo solar⁸

ITEM	DESCRIPCION	UN	CANT.	VALOR UNIT. (\$)	VALOR TOTAL (\$)
1	KIT SOLATUBE 290 DS 14" QUE INCLUYE: DOMO + FLASHING METALICO 6" + TUBO A + TUBO B + DIFUSOR VUSION	1	1	1 364 000	1 364 000

⁸ Cotización de Solatube del día 30 de marzo de 2015

ANEXO E: CONFIGURACIONES ALEATORIAS DE VARIABLES DE DECISIÓN

En la Tabla E-1 se presentan los resultados de consumo energético diario [W], costos de inversión inicial, costos de operación anual, costos de mantenimiento a 20 años y VPN del proyecto. Al igual que los valores aleatorios adoptados por las variables de decisión del problema de optimización, las cuales se relacionan a continuación.

- a : Ancho de la ventana [m]
- b : Alto de la ventana [m]
- z : Altura del punto medio de la ventana [m]
- nts : Número de tubos solares [unidades]
- tl : Tipo de diseño de iluminación artificial [1 a 4]
- Bd : Existencia de control dimerizable [binario]
- Bo : Existencia de control on – off [binario]
- Bts : Existencia de tubo(s) solar(es) [binario]

Tabla E-1.

a[m]	b[m]	z[m]	tl	Bd	Bo	Bts	nts	Inv. Inicial (\$)	Cons. Día [W]	Costo Op. Año (\$)	Cos. mant. a 20 años (\$)	VPN (\$)
0,7	0,5	1,2	1	1	0	0	3	3 738 800	616	62 952	566 400	4 873 365
0,9	0,6	1	4	1	0	1	2	6 014 000	825	84 347	474 000	7 358 079
0,1	1,1	1,8	1	1	0	1	3	7 821 200	582	59 494	566 400	8 912 668
0,9	0,7	2,2	3	1	0	1	3	8 022 000	927	94 748	566 400	9 552 813
0,5	0,2	1	4	0	1	1	2	5 725 200	1092	111 602	474 000	7 408 948
0,1	0,9	1	4	1	0	0	1	3 268 000	997	101 911	474 000	4 830 972
0,2	0,6	2	4	0	1	0	2	2 998 000	1092	111 602	474 000	4 681 748
0,4	0,3	1,6	1	1	0	0	3	3 729 600	645	65 931	566 400	4 901 280
1,1	0,4	1,9	4	1	0	1	2	6 010 000	831	84 922	474 000	5 678 821
1,1	0,6	1,7	3	1	0	1	2	6 659 200	916	93 617	566 400	7 321 600
0,1	1,5	1	2	1	0	1	1	5 134 800	649	66 357	566 400	6 311 787
1,2	0,4	1,2	1	1	0	0	1	3 744 000	598	61 069	566 400	6 189 248
1,1	0,4	1,8	4	1	0	0	3	3 282 000	913	93 271	474 000	8 953 662
0,3	1	1,4	3	1	0	0	3	3 916 800	1133	115 824	566 400	5 710 264
0,7	0,3	1,6	1	0	1	0	2	3 462 000	784	80 125	566 400	4 810 571

0,1	1,3	1,2	3	1	0	1	2	6 638 000	1101	112 564	566 400	8 390 831
0,3	0,3	2,1	3	0	1	1	2	6 365 200	1344	137 357	566 400	8 427 008
0,9	0,9	2,1	2	1	0	1	2	6 525 200	490	50 067	566 400	7 499 189
0,7	0,2	1,8	4	1	0	0	3	3 270 000	983	100 485	474 000	4 815 196
1,1	0,5	1,1	2	1	0	1	1	5 150 800	600	61 365	566 400	6 927 743
0,5	0,4	1,3	4	0	1	0	1	3 001 200	1092	111 602	474 000	4 684 948
0,1	0,3	2,1	2	1	0	1	2	6 494 000	683	69 839	566 400	7 714 387
0,8	0,3	1,8	3	1	0	1	3	8 006 400	1054	107 673	566 400	9 698 283
1	0,5	1,6	4	1	0	0	2	3 284 400	910	93 036	474 000	4 736 773
0,5	0,6	2	3	1	0	1	1	5 280 800	1058	108 111	566 400	6 978 139
0,6	0,6	1,7	2	1	0	0	2	3 779 200	668	68 288	566 400	4 980 259
0,6	0,4	1,9	3	1	0	1	3	8 006 400	1057	108 049	566 400	9 702 971
0,3	0,1	1,5	3	0	1	0	1	3 634 800	1344	137 357	566 400	5 696 608
0,5	0,4	1,2	4	0	1	0	3	3 001 200	1092	111 602	474 000	4 684 948
0,1	1,6	1,7	2	1	0	1	1	5 135 200	657	67 163	566 400	6 322 244
0,5	1,1	1,1	4	1	0	1	3	7 378 400	792	80 934	474 000	8 679 956
0,1	0,3	1,7	1	1	0	0	2	3 726 000	657	67 118	566 400	4 912 474
0,2	0,6	1,8	3	1	0	0	2	3 909 600	1152	117 776	566 400	5 727 389
0,1	0,4	1,9	2	1	0	1	2	6 494 400	681	69 558	566 400	7 711 287
0,1	0,8	2,2	3	0	1	0	3	3 636 800	1344	137 357	566 400	5 698 608
0,7	0,6	1,6	3	1	0	0	3	3 921 600	1117	114 147	566 400	5 694 164
0,5	0,9	1,1	2	1	0	1	2	6 510 800	566	57 887	566 400	7 582 234
0,2	1	1,7	3	1	0	0	2	3 912 800	1143	116 771	566 400	5 718 063
1,1	0,3	1,8	3	1	0	1	2	6 646 000	1024	104 653	566 400	4 866 893
0,1	0,3	2	2	1	0	1	1	5 130 000	689	70 448	566 400	6 357 981
0,3	0,5	1,5	4	0	1	0	3	2 999 200	1092	111 602	474 000	4 682 948
0,2	2,1	1	1	1	0	1	3	7 833 600	538	54 977	566 400	8 868 779
0,6	0,7	2	1	1	0	1	1	5 105 600	567	57 969	566 400	6 178 056
0,7	0,2	2,2	4	1	0	0	2	3 270 000	970	99 125	474 000	4 798 253
0,1	1,8	1,7	4	0	1	1	2	5 728 400	1092	111 602	474 000	7 412 148
0,3	1	2,2	2	1	0	0	1	3 776 800	662	67 705	566 400	4 970 590
0,3	0,6	1,1	4	0	1	0	2	3 000 400	1092	111 602	474 000	4 684 148
0,5	0,3	1,4	1	1	0	1	2	6 458 800	598	61 081	566 400	7 570 046
0,5	1,2	1,1	4	1	0	1	2	6 016 400	819	83 683	474 000	7 352 214
0,6	0,6	1,1	1	1	0	1	3	7 831 200	546	55 836	566 400	8 877 078
0,2	0,6	1,7	3	0	1	0	2	3 638 400	1344	137 357	566 400	5 700 208
0,5	0,6	2,1	1	0	1	0	3	3 465 600	784	80 125	566 400	4 814 171
0,5	0,4	1,2	1	0	1	0	2	3 461 600	784	80 125	566 400	4 810 171
0,1	1,5	1,6	1	0	1	0	2	3 459 600	784	80 125	566 400	4 808 171
0,1	1	2,2	4	0	1	0	1	2 997 200	1092	111 602	474 000	4 680 948

0,3	1,2	1,3	3	1	0	0	1	3 919 200	1127	115 158	566 400	5 704 368
1,1	0,5	1,2	2	1	0	1	1	5 150 800	601	61 441	566 400	6 180 878
0,2	1,3	1,2	1	1	0	0	3	3 735 200	628	64 225	566 400	4 885 630
0,4	0,7	1,5	4	1	0	0	2	3 275 600	959	97 987	474 000	4 789 665
0,2	0,2	1,1	3	1	0	0	1	3 906 400	1166	119 185	566 400	5 741 744
0,6	0,5	1,9	3	1	0	1	2	6 644 800	1044	106 655	566 400	8 324 001
0,2	0,4	1,8	4	1	0	0	3	3 267 600	998	101 991	474 000	4 831 569
0,3	1,3	1,5	3	1	0	1	2	6 648 400	998	102 000	566 400	8 269 582
0,5	0,9	2	1	1	0	0	3	3 742 800	587	59 968	566 400	4 840 174
0,9	0,3	2,1	1	1	0	0	1	3 735 600	611	62 398	566 400	4 863 260
1,1	0,5	1	1	1	0	1	2	6 474 800	541	55 284	566 400	7 561 231
0,4	0,3	1,7	3	0	1	0	1	3 638 400	1344	137 357	566 400	5 700 208
0,1	1,2	2	1	1	0	0	3	3 729 600	641	65 536	566 400	4 896 361
0,1	1,4	1	4	1	0	1	2	5 998 000	915	93 492	474 000	7 456 051
0,2	0,4	2,1	4	1	0	0	2	3 267 600	993	101 486	474 000	4 825 276
0,7	1	2,2	3	1	0	1	2	6 660 800	915	93 523	566 400	8 176 346
0,2	0,4	1,8	1	0	1	0	1	3 456 800	784	80 125	566 400	4 805 371
0,7	0,5	1,1	4	1	0	0	3	3 278 400	942	96 288	474 000	4 771 293
0,2	0,3	1,9	4	0	1	1	1	4 359 600	1092	111 602	474 000	6 043 348
1	0,4	1,7	4	1	0	0	2	3 280 400	925	94 547	474 000	4 751 600
0,2	1,4	1,6	4	0	1	0	3	3 004 400	1092	111 602	474 000	4 688 148
0,1	2	1,3	4	1	0	0	3	3 272 400	977	99 810	474 000	4 809 184
0,2	0,4	1,4	1	0	1	0	2	3 456 800	784	80 125	566 400	4 805 371
0,4	1,1	2,1	3	1	0	0	1	3 922 400	1096	111 979	566 400	5 667 943
0,3	0,8	2,2	1	0	1	0	3	3 463 200	784	80 125	566 400	4 811 771
0,2	1,4	1,9	1	1	0	0	3	3 736 000	619	63 215	566 400	4 873 839
0,7	0,7	2	4	1	0	1	2	6 012 000	811	82 907	474 000	7 338 134
0,4	0,7	1,5	4	1	0	0	2	3 275 600	959	97 987	474 000	4 789 665
0,4	0,3	2	4	1	0	0	1	3 269 200	984	100 577	474 000	4 815 549
0,9	1	2,2	3	1	0	1	3	8 032 800	806	82 418	566 400	9 409 947
0,2	0,7	1,6	4	0	1	1	2	5 726 800	1092	111 602	474 000	7 410 548
0,6	0,6	1,6	2	1	0	0	2	3 779 200	669	68 394	566 400	4 981 579
0,6	0,6	1	2	1	0	0	1	3 779 200	669	68 350	566 400	4 981 025
0,2	2	1,6	4	1	0	1	1	4 644 400	896	91 541	474 000	6 078 137
0,4	0,5	1,7	2	1	0	1	2	6 500 800	640	65 448	566 400	7 666 464
0,1	0,7	1,2	3	1	0	1	1	5 271 600	1140	116 532	566 400	7 073 891
0,1	0,5	1,4	2	1	0	0	3	3 766 800	692	70 759	566 400	4 998 649
0,4	0,2	1,1	1	1	0	1	2	6 456 000	606	61 955	566 400	7 578 136
0,6	1	1,9	3	1	0	0	1	3 928 800	1084	110 802	566 400	5 659 681

1	0,5	1,6	2	1	0	1	3	7 876 800	552	56 388	566 400	8 929 552
0,1	1,2	1	3	0	1	1	1	5 002 400	1344	137 357	566 400	7 064 208
0,4	0,5	1,8	3	0	1	0	3	3 641 600	1344	137 357	566 400	5 703 408
0,3	0,8	1,7	4	1	0	1	1	4 638 000	927	94 701	474 000	6 111 125
0,1	0,1	2,2	3	0	1	0	2	3 634 000	1344	137 357	566 400	5 695 808
0,2	1,2	2	4	0	1	0	1	3 002 800	1092	111 602	474 000	4 686 548