



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUOLA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIERÍA
INDUSTRIAL VALENCIA

Curso Académico:

AGRADECIMIENTOS

Quiero aprovechar la ocasión para agradecer el apoyo, paciencia y motivación recibido por parte de mi familia, pareja y amigos/as durante la realización del presente Trabajo de Final de Grado y durante estos 4 años. Han sido unos años intensos llenos de ilusión, trabajo, motivación, aprobados, suspensos, aprendizajes, experiencias y gente nueva que jamás podré olvidar. Asimismo, agradecer a mis compañeras Paula, Aida y Sara, que más que eso, son mi segunda familia, por estos maravillosos años de grado, ya que sin ellas no habría sido lo mismo.

No puedo olvidarme de agradecer también a mi tutora M^a Cristina Santamarina Siurana por el compromiso y dedicación tanto tutorizando este trabajo como de docente. A pesar de la situación complicada que se está viviendo a nivel mundial, ha conseguido transmitirme tranquilidad y comprensión durante todo este proceso.

RESUMEN

En el presente trabajo se diseña un sistema pasivo de instalaciones, basado en iluminación natural, en las edificaciones de una planta industrial, dedicada a la fabricación de papel.

Contiene la justificación de la propuesta técnica, así como el estudio, análisis y determinación de sus limitaciones en la eficiencia energética de la planta.

Incluye la simulación de los sistemas de iluminación natural del sector productivo, así como la estimación, mediante software específica, de los niveles de iluminación en los planos de trabajo, coeficientes de uniformidad e índices de eficiencia energética de la planta industrial.

Palabras Clave: Eficiencia energética, Iluminación natural

Diseño y simulación de un sistema de iluminación natural energéticamente eficiente de la planta industrial dedicada a la fabricación de papel en Utiel (Valencia)

RESUM

En el present treball es dissenya un sistema passiu d'instal·lacions, basat en il·luminació natural, en les edificacions d'una planta industrial, dedicada a la fabricació de paper. Conté la justificació de la proposta tècnica així com l'estudi, anàlisi i determinació de les seues limitacions en l'eficiència energètica de la planta.

Inclou la simulació dels sistemes d'il·luminació natural del sector productiu, així com l'estimació, mitjançant software específica, dels nivells d'il·luminació en els plànols de treball, coeficients d'uniformitat i índexs d'eficiència energètica de la planta industrial.

Paraules clau: Eficiència energètica, Il·luminació natural

ABSTRACT

In the present work a passive system of facilities is designed, based on natural lighting, in the buildings of an industrial plant, dedicated to the manufacture of paper.

It contains the justification for the technical proposal as well as the study, analysis and determination of its limitations in the energy efficiency of the plant.

It will include the simulation of natural lighting systems of the productive sector, as well as the estimation, through specific software, of the levels of illumination in the work planes, uniformity coefficients and energy efficiency indices of the industrial ship.

Keywords: Energy efficiency, Natural lighting

Diseño y simulación de un sistema de iluminación natural energéticamente eficiente de la planta industrial dedicada a la fabricación de papel en Utiel (Valencia)

ÍNDICE

DOCUMENTOS CONTENIDOS EN EL TFG

- I. Memoria
- II. Presupuesto
- III. Planos

ÍNDICE DE LA MEMORIA

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. OBJETIVOS	1
1.2. SECTOR DEL PAPEL	2
CAPÍTULO 2. PROCESO DE PRODUCCIÓN DE CELULOSA.....	5
2.1. MAQUINARIA Y PROCESO	5
2.1.1. Descortezadora, cortadora y lavado	5
2.1.2. Horno de cocción y circuito de recuperación	5
2.1.3. Espesador	5
2.1.4. Blanqueador y escurridor	5
2.1.5. Extractor	5
2.1.6. Prensa.....	6
2.1.7. Rulos.....	6
2.1.8. Bobinadora y cortadora	6
2.2. DIAGRAMA DE BLOQUES.....	6
2.3. DISTRIBUCIÓN EN PLANTA DEL SISTEMA PRODUCTIVO	6
CAPÍTULO 3. ILUMINACIÓN.....	9
3.1. INTRODUCCIÓN	9
3.2. TIPOS DE ILUMINACIÓN	9
3.2.1. Iluminación natural	10
3.2.2. Iluminación artificial.....	11
3.3. MÉTODO ANALÍTICO PREDIMENSIONADO	11
3.4. DISEÑO SISTEMA ILUMINACIÓN NATURAL	13
3.4.1. Cálculos previos.....	13
3.4.2. Hipótesis de partida	15
CAPÍTULO 4. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	17
4.1. REQUISITOS A CUMPLIR	17
4.2. PROPUESTA 1	18
4.2.1. Isolíneas E Propuesta 1	20

Diseño y simulación de un sistema de iluminación natural energéticamente eficiente de la planta industrial dedicada a la fabricación de papel en Utiel (Valencia)	
4.2.2. Isolíneas D Propuesta 1	22
4.3. PROPUESTA 2	24
4.3.1. Isolíneas E Propuesta 2	26
4.3.2. Isolíneas D Propuesta 2	28
4.4. PROPUESTA 3	30
4.4.1. Isolíneas E Propuesta 3	32
4.4.2. Isolíneas D Propuesta 3	34
4.5. COMPARACIÓN Y ANÁLISIS DE PROPUESTAS.....	36
4.6. ANÁLISIS DETALLADO UNIFORMIDAD.....	37
4.7. AUMENTO GRADO DE REFLEXIÓN AL 50%.....	41
CAPÍTULO 5. ILUMINACIÓN ARTIFICIAL	43
5.1. CÁLCULO EFICIENCIA ENERGÉTICA.....	43
5.2. CASO 1: ILUMINACIÓN ARTIFICIAL 100%	43
5.3. CASO 2: ILUMINACIÓN ARTIFICIAL 30%	44
5.4. CASO 3: ILUMINACIÓN ARTIFICIAL 10%	44
CAPÍTULO 6. ANÁLISIS ECONÓMICO	47
6.1. CONSUMO ENERGÉTICO	47
6.2. TÉRMINO DE POTENCIA Y ENERGÍA	50
6.3. ILUMINACIÓN ARTIFICIAL 100%.....	51
6.4. ILUMINACIÓN ARTIFICIAL 30%.....	53
6.5. ILUMINACIÓN ARTIFICIAL 10%.....	54
6.6. ILUMINACIÓN NATURAL 100%.....	55
6.7. AHORRO Y RENTABILIDAD.....	56
6.7.1. Ahorro	56
6.7.2. Rentabilidad	57
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES	61
CAPÍTULO 8. BIBLIOGRAFÍA.....	63

Índice de Figuras

<i>Figura 1. Objetivo principal y objetivos secundarios</i>	2
<i>Figura 2. Celulosa (Robosup, 2019)</i>	2
<i>Figura 3. Principales fabricantes de celulosa y papel de la UE (Asociación Española de Fabricantes de Pasta, Papel y Cartón, 2018)</i>	3

<i>Figura 4. Diagrama bloques del proceso de producción del papel.....</i>	<i>6</i>
<i>Figura 5. Distribución en planta del sistema productivo estudiado</i>	<i>7</i>
<i>Figura 6. Distribución en planta del sistema productivo detallada.....</i>	<i>7</i>
<i>Figura 7. Iluminación lateral (Santamarina Siurana, 2021)</i>	<i>10</i>
<i>Figura 8. Iluminación cenital (Santamarina Siurana, 2021).....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 9. Iluminación combinada lateral y cenital (Santamarina Siurana, 2021).....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 10. Vista en planta de la distribución de lucernarios de la propuesta 1 sin maquinaria</i>	<i>18</i>
<i>Figura 11. Vista 3D de la distribución de lucernarios de la propuesta 1 sin maquinaria</i>	<i>19</i>
<i>Figura 12. Vista en planta de la distribución de lucernarios de la propuesta 1 con maquinaria</i>	<i>19</i>
<i>Figura 13. Vista 3D de la distribución de lucernarios de la propuesta 1 con maquinaria</i>	<i>20</i>
<i>Figura 14. Gráfico de valores E de la propuesta 1 a 21 de diciembre 2021 a las 9h.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 15. Gráfico de valores E de la propuesta 1 a 21 de diciembre 2021 a las 12h.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 16. Gráfico de valores E de la propuesta 1 a 23 de junio 2021 a las 12h.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 17. Gráfico de valores D de la propuesta 1 a 21 de diciembre 2021 a las 9h</i>	<i>22</i>
<i>Figura 18. Gráfico de valores D de la propuesta 1 a 21 de diciembre 2021 a las 12h</i>	<i>23</i>
<i>Figura 19. Gráfico de valores D de la propuesta 1 a 23 de junio 2021 a las 12h</i>	<i>23</i>
<i>Figura 20. Vista en planta de la distribución de lucernarios de la propuesta 2 sin maquinaria</i>	<i>24</i>
<i>Figura 21. Vista 3D de la distribución de lucernarios de la propuesta 2 sin maquinaria</i>	<i>25</i>
<i>Figura 22. Vista en planta de la distribución de lucernarios de la propuesta 2 con maquinaria</i>	<i>25</i>
<i>Figura 23. Vista 3D de la distribución de lucernarios de la propuesta 2 con maquinaria</i>	<i>26</i>
<i>Figura 24. Gráfico de valores E de la propuesta 2 a 21 de diciembre 2021 a las 9h.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 25. Gráfico de valores E de la propuesta 2 a 21 de diciembre 2021 a las 12h.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 26. Gráfico de valores E de la propuesta 2 a 23 de junio 2021 a las 12h.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 27. Gráfico de valores D de la propuesta 2 a 21 de diciembre 2021 a las 9h</i>	<i>28</i>
<i>Figura 28. Gráfico de valores D de la propuesta 2 a 21 de diciembre 2021 a las 12h</i>	<i>29</i>
<i>Figura 29. Gráfico de valores D de la propuesta 2 a 23 de junio 2021 a las 12h</i>	<i>29</i>
<i>Figura 30. Vista en planta de la distribución de lucernarios de la propuesta 3 sin maquinaria</i>	<i>30</i>
<i>Figura 31. Vista 3D de la distribución de lucernarios de la propuesta 3 sin maquinaria</i>	<i>31</i>
<i>Figura 32. Vista en planta de la distribución de lucernarios de la propuesta 3 con maquinaria</i>	<i>31</i>
<i>Figura 33. Vista 3D de la distribución de lucernarios de la propuesta 3 con maquinaria</i>	<i>32</i>
<i>Figura 34. Gráfico de valores E de la propuesta 3 a 21 de diciembre 2021 a las 9h.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 35. Gráfico de valores E de la propuesta 3 a 21 de diciembre 2021 a las 12h.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 36. Gráfico de valores E de la propuesta 3 a 23 de junio 2021 a las 12h.....</i>	<i>33</i>

Diseño y simulación de un sistema de iluminación natural energéticamente eficiente de la planta industrial dedicada a la fabricación de papel en Utiel (Valencia)

<i>Figura 37. Gráfico de valores D de la propuesta 3 a 21 de diciembre 2021 a las 9h</i>	34
<i>Figura 38. Gráfico de valores D de la propuesta 3 a 21 de diciembre 2021 a las 12h</i>	35
<i>Figura 39. Gráfico de valores D de la propuesta 3 a 23 de junio 2021 a las 12h</i>	35
<i>Figura 40. Señalización zonas a analizar Propuesta 1</i>	38
<i>Figura 41. Señalización zonas a analizar Propuesta 2</i>	39
<i>Figura 42. Señalización zonas a analizar Propuesta 2</i>	40

Índice de Tablas

<i>Tabla 1. Iluminación y superficie áreas de trabajo (Comisión de Normalización Europea, 2002)</i>	13
<i>Tabla 2. Datos para el cálculo de la superficie de lucernarios</i>	14
<i>Tabla 3. Hipótesis de partida</i>	15
<i>Tabla 4. Resumen parámetros E propuesta 1</i>	22
<i>Tabla 5. Resumen parámetros D propuesta 1</i>	24
<i>Tabla 6. Resumen parámetros E propuesta 2</i>	28
<i>Tabla 7. Resumen parámetros D propuesta 2</i>	30
<i>Tabla 8. Resumen parámetros E propuesta 3</i>	34
<i>Tabla 9. Resumen parámetros D propuesta 3</i>	36
<i>Tabla 10. Resumen propuestas con grado de transmisión del 45%</i>	36
<i>Tabla 11. Valores límites</i>	36
<i>Tabla 12. Análisis propuestas con grado de transmisión del 45%</i>	37
<i>Tabla 13. Valores de la uniformidad propuesta 1</i>	38
<i>Tabla 14. Valores de la uniformidad propuesta 2</i>	39
<i>Tabla 15. Valores de la uniformidad propuesta 3</i>	40
<i>Tabla 16. Análisis propuestas con grado de transmisión del 50%</i>	41
<i>Tabla 17. Análisis nuevas escenas de luz</i>	42
<i>Tabla 18. Resumen propuesta 1</i>	42
<i>Tabla 19. Valor VEEI para el caso 1</i>	44
<i>Tabla 20. Valor VEEI para el caso 2</i>	44
<i>Tabla 21. Valor VEEI para el caso 3</i>	45
<i>Tabla 22. Resumen valores VEEI</i>	45
<i>Tabla 23. Elementos que utilizan energía eléctrica</i>	47
<i>Tabla 24. Cálculo potencia total a contratar</i>	48

Diseño y simulación de un sistema de iluminación natural energéticamente eficiente de la planta industrial dedicada a la fabricación de papel en Utiel (Valencia)

Tabla 25. Tarifa 3.1a (IBERDROLA, 2021).....	48
Tabla 26. Tarifa 3.1a (Colón Cortegoso, 2016).....	49
Tabla 27. Periodos durante la jornada laboral.....	49
Tabla 28. Horas mensuales de cada periodo	50
Tabla 29. Consumos para iluminación 100% artificial	52
Tabla 30. Gasto anual para iluminación 100% artificial	52
Tabla 31. Tabla resumen coste anual para iluminación 100% artificial	53
Tabla 32. Consumos para iluminación 30% artificial	53
Tabla 33. Gasto anual para iluminación 30% artificial	54
Tabla 34. Tabla resumen coste anual para iluminación 30% artificial	54
Tabla 35. Consumos para iluminación 10% artificial	54
Tabla 36. Gasto anual para iluminación 10% artificial	55
Tabla 37. Tabla resumen coste anual para iluminación 10% artificial	55
Tabla 38. Consumo para iluminación 100% natural	55
Tabla 39. Gasto anual para iluminación 100% natural.....	56
Tabla 40. Tabla resumen coste anual para iluminación 100% natural	56
Tabla 41. Tabla resumen ahorro eléctrico.....	57
Tabla 42. Resultados VAN	58
Tabla 43. Valores TIR.....	59
Tabla 44. Unidad de obra 1.1	67
Tabla 45. Unidad de obra 1.2	68
Tabla 46. Mediciones de cada unidad de obra.....	68
Tabla 47. Obtención PEM	68
Tabla 48. Presupuesto de Inversión instalación lucernarios	69
Tabla 49. Unidad de obra 1.3, presupuesto mantenimiento lucernarios (10 años).....	69
Tabla 50. Presupuesto anual mantenimiento lucernarios	70
Tabla 51. Unidad de obra 1.4	70
Tabla 52. Presupuesto mantenimiento 100% luminarias	70
Tabla 53. Presupuesto anual mantenimiento 100% luminarias	71
Tabla 54. Presupuesto mantenimiento 30% luminarias.....	71
Tabla 55. Presupuesto anual mantenimiento 30% luminarias	71
Tabla 56. Presupuesto mantenimiento 10% luminarias.....	71
Tabla 57. Presupuesto anual mantenimiento 10% luminarias	71

Diseño y simulación de un sistema de iluminación natural energéticamente eficiente de la planta industrial dedicada a la fabricación de papel en Utiel (Valencia)

Índice de Ecuaciones

<i>Ecuación 1. Expresión para el cálculo de la iluminación requerida</i>	11
<i>Ecuación 2. Expresión cálculo de la iluminación media</i>	12
<i>Ecuación 3. Cálculo parámetro f</i>	12
<i>Ecuación 4. Cálculo superficie de ventanas</i>	13
<i>Ecuación 5. Cálculo VEEI por cada 100 luxes</i>	43
<i>Ecuación 6. Cálculo VEEI caso 1 por cada 100 luxes</i>	44
<i>Ecuación 7. Cálculo VEEI caso 2 por cada 100 luxes</i>	44
<i>Ecuación 8. Cálculo VEEI caso 3 por cada 100 luxes</i>	45
<i>Ecuación 9. Cálculo término de potencia (T_p)</i>	50
<i>Ecuación 10. Cálculo del término de energía (T_E)</i>	51
<i>Ecuación 11. Cálculo impuesto sobre electricidad</i>	51
<i>Ecuación 12. Cálculo del VAN</i>	57
<i>Ecuación 13. Cálculo del TIR</i>	57
<i>Ecuación 14. Cálculo PEM</i>	68
<i>Ecuación 15. Cálculo Gastos Generales</i>	69
<i>Ecuación 16. Cálculo Beneficio Industrial</i>	69
<i>Ecuación 17. Cálculo PEC</i>	69
<i>Ecuación 18. Cálculo Presupuesto de Inversión</i>	69

ÍNDICE DEL PRESUPUESTO

1.1. PRESUPUESTO INSTALACIÓN LUMINARIAS.....	67
1.2. PRESUPUESTO LÁMPARAS.....	70
1.2.1. Presupuesto 100% luminarias.....	70
1.2.2. Presupuesto 30% luminarias.....	71
1.2.3. Presupuesto 10% luminarias.....	71

DOCUMENTO I:

MEMORIA DESCRIPTIVA

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. OBJETIVOS

El objetivo principal del Trabajo de Final de Grado (TFG) es estudiar, diseñar y simular un sistema de iluminación natural que sea energéticamente eficiente para una planta destinada a la producción de papel.

Los objetivos secundarios son los siguientes:

- ❖ Estudiar y aplicar la normativa de iluminación natural a la planta diseñada para obtener diferentes propuestas de iluminación.
- ❖ Obtener el ahorro energético combinando un sistema de iluminación natural con artificial.
- ❖ Modelar la nave industrial con la herramienta DIALux
- ❖ Plantear y simular diferentes propuestas de iluminación natural en DIALux, tanto en invierno como en verano, con la finalidad de comprobar si se cumplen los valores mínimos de iluminación que exige la normativa.
- ❖ Estudiar una solución para las horas en las cuales la iluminación natural es insuficiente. En este caso, se optaría por una iluminación mixta.
- ❖ Realizar un análisis económico para observar la viabilidad de utilizar luz artificial, natural o mixta. Para ello, se analizan el VAN y el TIR.
- ❖ Plantear un presupuesto económico de la iluminación de la nave industrial.



Figura 1. Objetivo principal y objetivos secundarios

1.2. SECTOR DEL PAPEL

El papel es un material compuesto por celulosa, la cual se transforma en pasta mediante procesos mecánicos o químicos. La celulosa es un biopolímero que forma parte de las paredes de las células de las plantas y de los tejidos que les dan sostén y estructura a estas. Se puede obtener de árboles como el pino o el eucalipto.

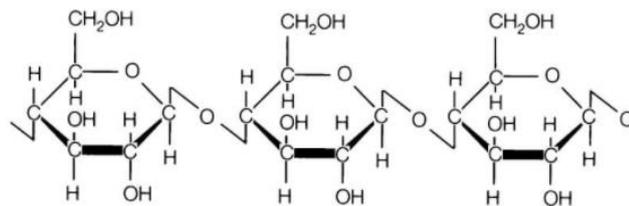


Figura 2. Celulosa (Robosup, 2019)

Se atribuye la invención del papel al año 105 d.C. en China, pero no fue hasta el siglo XI cuando llegó a Europa con las invasiones árabes en Sicilia y España. La primera fábrica de papel europea se estableció en Játiva (Valencia). (Cantavalle, 2019)

El papel se consideró un material de peor calidad que el pergamino y se prohibió su uso para documentos públicos. No fue hasta la aparición de la imprenta, de Gutenberg, en el siglo XV cuando aumentó su uso considerablemente y se produjo una escasez de este material. La invención de la máquina de papel y el descubrimiento de la celulosa obtenida a partir de la pulpa de madera en el siglo XIX trajeron consigo la producción masiva de productos de papel. En 1840 se introdujo el primer proceso mecánico y posteriormente, en el año 1850 el primer proceso químico. (Cantavalle, 2019)

Diseño y simulación de un sistema de iluminación natural energéticamente eficiente de la planta industrial dedicada a la fabricación de papel en Utiel (Valencia)

Actualmente, la industria papelera española se ha convertido en uno de los grandes productores europeos de papel y celulosa. Por este motivo, se distribuyen 81 plantas por toda España, las cuales tienen un papel clave en la generación de sitios de trabajo y riqueza. (Asociación Española de Fabricantes de Pasta, Papel y Cartón, 2018)

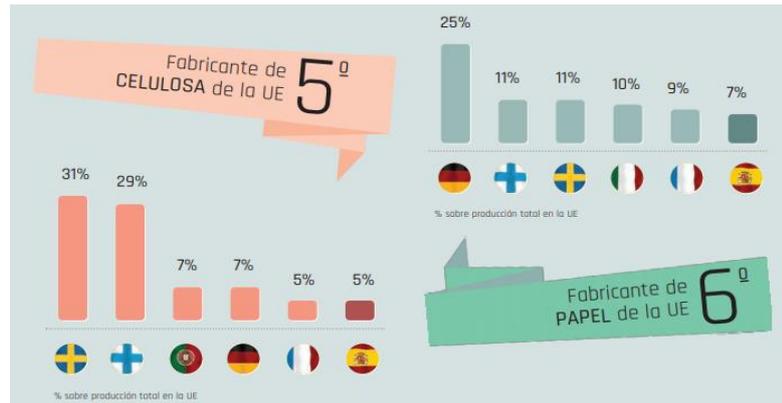


Figura 3. Principales fabricantes de celulosa y papel de la UE (Asociación Española de Fabricantes de Pasta, Papel y Cartón, 2018)

Como se puede observar en la Figura 3, con un 7% de la producción total europea, España es el sexto productor de papel y con un 5% es el quinto productor de celulosa de la UE. (Asociación Española de Fabricantes de Pasta, Papel y Cartón, 2018)

La industria papelera es un sector importante de la economía española, ya que la cadena de valor de la celulosa, papel y cartón aporta de forma global el 4.5% del PIB aproximadamente. Esta cadena de valor genera uno de cada 50 empleos en el país y supone el 8,8% de facturación industrial. (Atabal, 2019)

En España se consumen unos 170-175 kg por habitante al año aproximadamente. Sin embargo, la industria del papel protege la biodiversidad y la regeneración de los bosques, además de incrementar simultáneamente su tasa de reciclaje, la cual llega al 71%. (Interempresas, 2020)

CAPÍTULO 2. PROCESO DE PRODUCCIÓN DE CELULOSA

2.1. MAQUINARIA Y PROCESO

2.1.1. Descortezadora, cortadora y lavado

El proceso que se realiza en la planta comienza con la recepción de la materia prima en camiones. A continuación, se realiza un control de calidad a la madera.

Una vez pasado el control de calidad, la materia prima se vierte en una descortezadora, donde se elimina la corteza de los troncos. Esta operación dura unos 20 minutos aproximadamente. Mediante una cinta mecánica los troncos llegan a la siguiente máquina donde se cortan en trozos más pequeños, formando astillas. Éstas se amontonan y se dejan en el exterior tanto en invierno como en verano. El siguiente paso es reducir los trozos de madera a pasta mediante un lavado.

2.1.2. Horno de cocción y circuito de recuperación

Posteriormente a la etapa anterior, empieza la cocción alcalina. Se cuece la madera durante varias horas a una temperatura de 160°C aproximadamente. Se recuperan productos fundidos como lava y se genera un residuo de la madera quemada de color negro que se utilizará posteriormente para producir vapor.

2.1.3. Espesador

La pasta marrón que se obtiene de la etapa anterior pasa nuevamente por un lavado y a continuación, se envía al espesador donde se comprueba su calidad.

2.1.4. Blanqueador y escurridor

Posteriormente, hay que blanquear la pasta. Para ello se introduce en una torre de extracción alcalina donde entra en contacto con dióxido de cloro. Una vez finalizada la fase de blanqueo, se lleva la pasta a un escurridor y se extrae parte del agua.

2.1.5. Extractor

A continuación, un tornillo sin fin despezada la pasta y la lleva hasta la etapa de extracción de agua. Se produce la eliminación prácticamente total del agua. Entre la entrada y la salida de la máquina la concentración de agua en la pasta desciende del 95% al 5%.

Diseño y simulación de un sistema de iluminación natural energéticamente eficiente de la planta industrial dedicada a la fabricación de papel en Utiel (Valencia)

2.1.6. Prensa

En el prensado, la hoja de papel obtenida en la prensa es sometida a un control de calidad para analizar los parámetros de calidad del papel y eliminar aquellos que tengan algún defecto.

2.1.7. Rulos

En los rulos se enrolla el papel mediante un rodillo que produce grandes bobinas. El peso de un rollo puede ser de unas 35 toneladas y contiene 60 kilómetros de papel.

2.1.8. Bobinadora y cortadora

Finalmente, la bobinadora corta las bobinas principales en rollos más pequeños y estrechos. Algunos se almacenan de esta forma, mientras que otros se llevan a las cortadoras.

2.2. DIAGRAMA DE BLOQUES

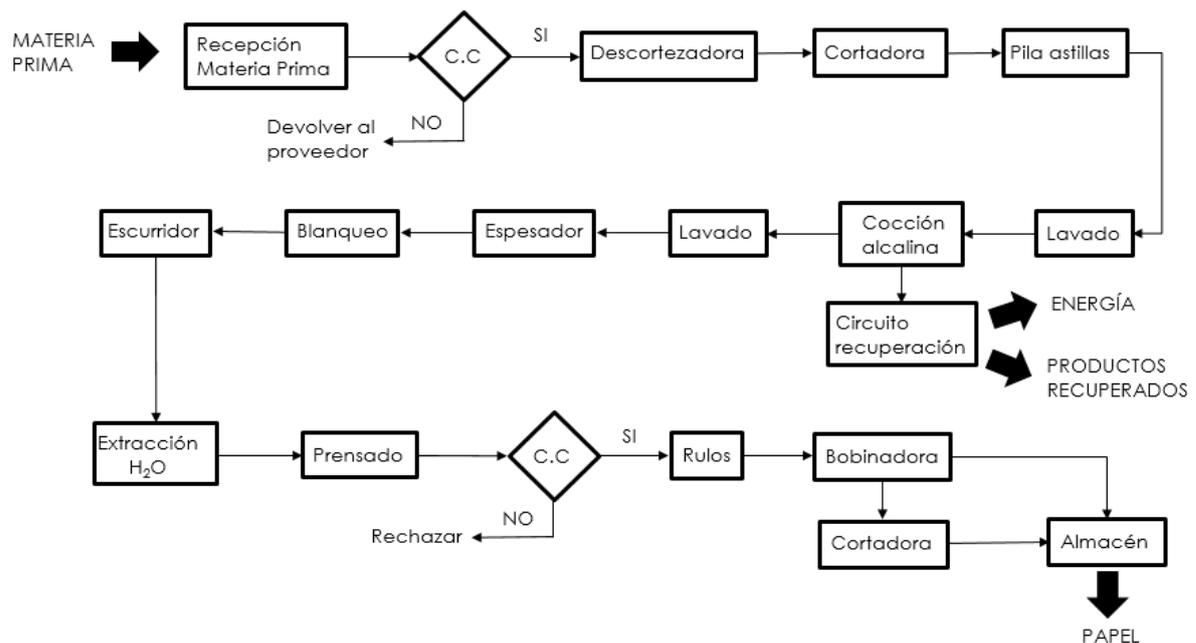


Figura 4. Diagrama bloques del proceso de producción del papel

2.3. DISTRIBUCIÓN EN PLANTA DEL SISTEMA PRODUCTIVO

La obtención del papel sigue una distribución en planta en cadena o serie ya que toda la maquinaria y equipos necesarios para la fabricación de un determinado producto se agrupan en una misma zona, siguiendo la secuencia de las operaciones que deben realizarse sobre el material.

Diseño y simulación de un sistema de iluminación natural energéticamente eficiente de la planta industrial dedicada a la fabricación de papel en Utiel (Valencia)

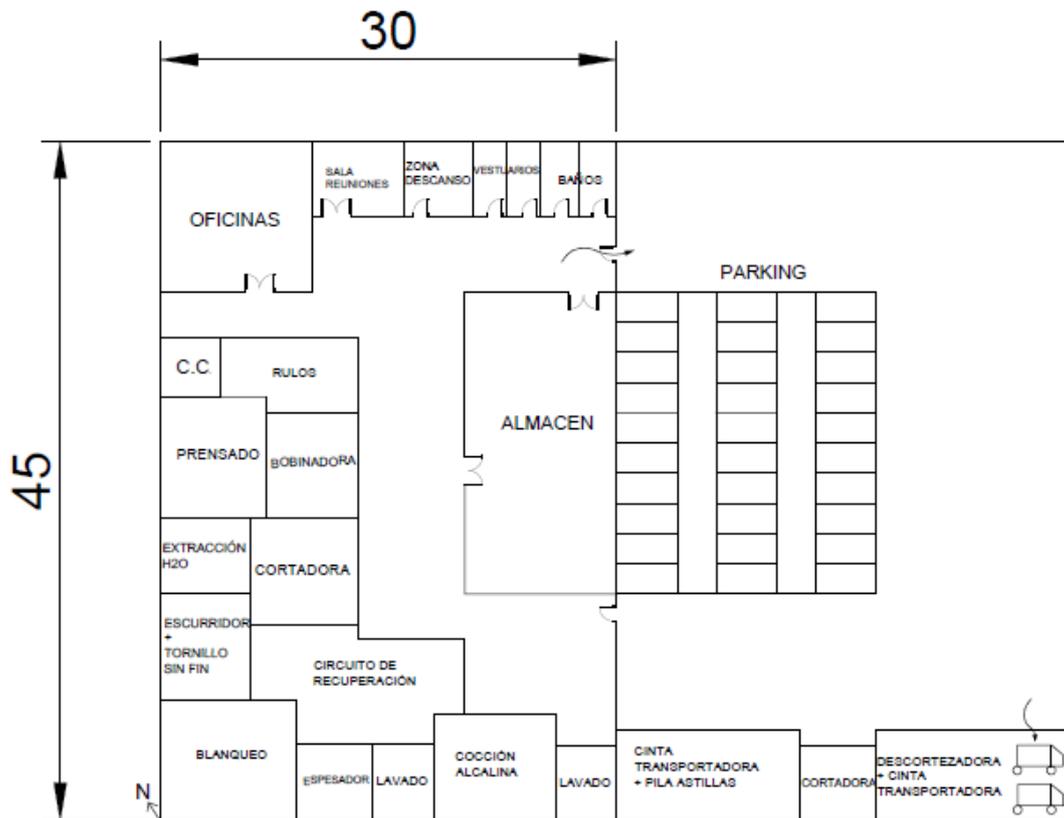


Figura 5. Distribución en planta del sistema productivo estudiado

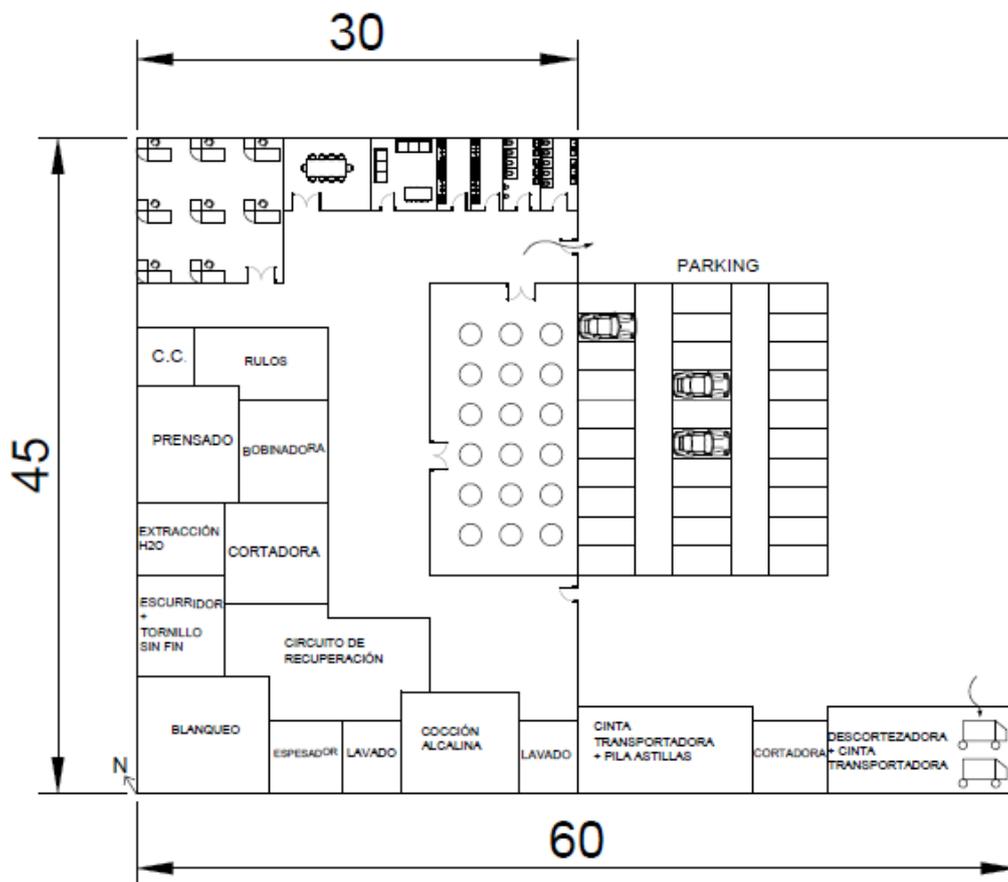


Figura 6. Distribución en planta del sistema productivo detallada

Diseño y simulación de un sistema de iluminación natural energéticamente eficiente de la planta industrial dedicada a la fabricación de papel en Utiel (Valencia)

Como se puede observar, el proceso productivo empieza en la zona exterior de la nave con la recepción de la materia prima. Una vez se ha introducido ésta en la descortezadora y posteriormente, en la cortadora, las astillas se transportan hasta el interior de la nave gracias a una cinta transportadora. El resto del proceso productivo se lleva a cabo en la zona suroeste de la nave siguiendo una distribución en cadena.

En la zona norte de la nave se disponen las oficinas, la sala de reuniones, la zona de descanso, los vestuarios y servicios, mientras que en la zona este se encuentra el almacén del producto acabado.

CAPÍTULO 3. ILUMINACIÓN

3.1. INTRODUCCIÓN

La luz es una necesidad básica que puede condicionar el bienestar y la salud humana. La finalidad de una correcta iluminación es, por un lado, conseguir un consumo óptimo de energía generando así un ahorro y, por otro lado, ofrecer unas condiciones de trabajo que generen seguridad y bienestar al trabajador.

Por tanto, es importante diseñar una nave industrial cuyas condiciones de iluminación sean las más favorables posibles para conseguir unas condiciones de trabajo óptimas, ya que la falta de luz o su mala colocación provoca que el trabajador tenga que forzar la vista, generando fatiga ocular y disminuyendo, por tanto, su productividad.

Se utiliza la Norma Europea sobre Iluminación en interiores (UNE 12464.1), la cual contiene los valores de iluminación requeridos en función del proceso productivo que se desarrolle en la nave industrial.

3.2. TIPOS DE ILUMINACIÓN

Se distinguen dos tipos de iluminación dependiendo de su origen:

- ❖ Luz natural: suministrada de la luz diurna procedente del sol. Entre los beneficios que presenta esta iluminación destacan los siguientes: permite definir los colores perfectamente, genera un ahorro energético y, por tanto, económico, y tiene beneficios notorios para la salud de los trabajadores, ya que produce menor fatiga visual. Por este motivo, se considera que presenta ciertas ventajas con respecto a la luz artificial.
- ❖ Luz artificial: aquella no procedente del sol y que ha sido creada de forma artificial por el ser humano.

A su vez, se diferencian dos tipos de luz en función de la zona iluminada:

- ❖ Iluminación general: Hace referencia a la entrada de luz repartida sobre todas las zonas de trabajo.
- ❖ Iluminación localizada: Utilización de luz adicional en aquellas zonas donde la iluminación general es insuficiente. Se realiza en función de la actividad a desarrollar.

Se utilizará preferentemente la iluminación general, complementada a su vez con una localizada (natural o artificial) cuando en zonas concretas se requieran niveles de iluminación elevados.

3.2.1. Iluminación natural

La iluminación natural es la más utilizada en todos los ámbitos, ya que genera beneficios tanto a nivel económico como para la salud del trabajador.

Las necesidades de iluminación son función del sistema productivo que se desee instalar. Por tanto, al diseñar el edificio debe prestarse gran atención a la correcta distribución de los medios de producción con la finalidad de conseguir un máximo aprovechamiento de la iluminación natural. La forma y el volumen de la nave, así como el desarrollo de sus cerramiento y coberturas se hallan esencialmente influidos por la distribución de las superficies acristaladas diseñadas a fin de conseguir una adecuada iluminación natural. De esta misma forma, la disposición de los lucernarios debe realizarse de forma que la iluminación procedente del sol en el interior de la nave sea óptima.

En una nave industrial se utiliza la iluminación natural, apoyándose en la iluminación artificial cuando la primera de éstas sea insuficiente. Esto ocurre en determinadas franjas horarias durante el año, siendo más frecuente en invierno debido a la disminución de horas de sol durante el día.

La iluminación natural en la nave puede realizarse localizando las aberturas en distintas ubicaciones.

- ❖ Iluminación lateral: aberturas en las fachadas o cerramientos laterales.



Figura 7. Iluminación lateral (Santamarina Siurana, 2021)

- ❖ Iluminación cenital: aberturas en la cubierta.



Figura 8. Iluminación cenital (Santamarina Siurana, 2021)

Diseño y simulación de un sistema de iluminación natural energéticamente eficiente de la planta industrial dedicada a la fabricación de papel en Utiel (Valencia)

- ❖ Iluminación combinada (lateral y cenital): combinación de iluminación lateral y cenital.



Figura 9. Iluminación combinada lateral y cenital (Santamarina Siurana, 2021)

3.2.2. Iluminación artificial

La iluminación artificial se usa únicamente en los casos en los que la iluminación natural no es suficiente para conseguir los valores mínimos en materia de seguridad y salud en los centros de trabajo.

Existen los siguientes sistemas de iluminación artificial: directa, semi-directa, uniforme, semi-indirecta e indirecta.

3.3. MÉTODO ANALÍTICO PREDIMENSIONADO

El objetivo planteado es establecer un sistema de iluminación natural que sea eficiente, en este caso, para una planta de producción de papel. A continuación, se explica la metodología a seguir. (Santamarina Siurana, 2021)

El primer paso para obtener la iluminación requerida es determinar las necesidades de iluminación en las diferentes áreas de trabajo y para ello, se recurre a la Norma Europea sobre Iluminación en interiores (UNE 12464.1). Dependiendo de la actividad realizada, los niveles de iluminación varían.

Debido a la existencia de áreas con diferentes necesidades de iluminación media, la iluminación requerida ($E_{requerida}$) se obtiene utilizando la siguiente expresión:

$$E_{requerida} = \frac{\sum s_i \cdot E_i}{\sum s_i}$$

Ecuación 1. Expresión para el cálculo de la iluminación requerida

Donde

s_i : Superficie de cada área (m^2).

E_i : Iluminación media necesaria en cada área (luxes).

Diseño y simulación de un sistema de iluminación natural energéticamente eficiente de la planta industrial dedicada a la fabricación de papel en Utiel (Valencia)

A continuación, es necesario determinar la superficie de ventanas (S_v) necesaria para la iluminación de la nave mediante la siguiente expresión:

$$E_{med} = E_a \cdot f \cdot f' \cdot \eta \cdot \frac{S_v}{S_s}$$

Ecuación 2. Expresión cálculo de la iluminación media

Donde:

- ❖ E_{med} : Nivel de iluminación horizontal media proporcionada por la abertura, donde $E_{med} = E_{requerida}$ (Ecuación 1).
- ❖ E_a : La E_a representa la iluminación teórica que recibiría un plano horizontal al aire libre en el centro de gravedad de la edificación. Se ha considerado un valor de 3000 luxes utilizando las condiciones más restrictivas, es decir, el nivel de iluminación el día del año que menos luz hay (21 de diciembre a las 9:00h con un modelo de cielo cubierto en la localización donde está ubicada la nave).
- ❖ f : Parámetro que tiene en cuenta la reducción de la bóveda celeste que capta una ventana en función de su disposición en la edificación. En el caso de ser una ventana lateral el valor de f es 0.5, mientras que, si es un lucernario el valor se obtiene utilizando la siguiente expresión:

$$f = \frac{180 - \arctg \alpha}{180}$$

Ecuación 3. Cálculo parámetro f

El parámetro α hace referencia a la pendiente generada por la inclinación del techo.

- ❖ f' : El factor característico de reducción ventana-muro (f') tiene en cuenta la reducción del paso de la radiación solar como consecuencia del canto del cerramiento de fachada. Esta disminución es mayor cuanto menor es la relación entre la altura y longitud de la ventana y el espesor del cerramiento, respectivamente. Tiene un valor de 1, ya que el canto de los cerramientos siempre es mucho más pequeño respecto al resto de dimensiones de las aberturas.
- ❖ η : El rendimiento del recinto tiene en cuenta que no todo el flujo luminoso que entra por la ventana incide sobre el plano de trabajo, sino que parte de este incide sobre otras superficies y posteriormente, se reflejan sobre el plano de trabajo. Por este motivo su valor oscila entre 45-50%. En este caso, se ha estimado un rendimiento del 50% para realizar la propuesta del sistema de iluminación.

Diseño y simulación de un sistema de iluminación natural energéticamente eficiente de la planta industrial dedicada a la fabricación de papel en Utiel (Valencia)

- ❖ s_v : Superficie total que ocupara toda la iluminación natural dispuesta en la nave (ventanales y lucernarios). Se obtiene despejando la *Ecuación 1*:

$$s_v = \frac{E_{med} \cdot s_s}{E_a \cdot f \cdot f' \cdot \eta}$$

Ecuación 4. Cálculo superficie de ventanas

- ❖ s_s : Superficie de la nave diseñada.

3.4. DISEÑO SISTEMA ILUMINACIÓN NATURAL

En primer lugar, previo a la realización de los cálculos, se deben saber las coordenadas exactas donde se ubica la nave industrial, ya que es un punto clave a la hora de seleccionar la distribución de las ventanas. La nave se encuentra en Nuevo Tollo (Utiel) y sus coordenadas son las siguientes: Longitud -1.20º, Latitud 39.57º.

A continuación, se calculan los parámetros mencionados en el apartado anterior.

3.4.1. Cálculos previos

Siguiendo la norma UNE 12464.1 se calcula la iluminación requerida mediante la *Ecuación 1*. Para ello es necesario tener los niveles de iluminación y la superficie de cada área de trabajo.

Tabla 1. Iluminación y superficie áreas de trabajo (Comisión de Normalización Europea, 2002)

ZONAS	E_m (LUXES)	m^2
LAVADO	300	20
COCCIÓN ALCALINA	300	56
CIRCUITO DE RECUPERACIÓN	300	92
LAVADO	300	20
ESPESADOR	300	25
BLANQUEO	300	72
ESCURRIDOR	300	42
EXTRACCIÓN H2O	300	30
PRENSADO	300	56
CONTROL DE CALIDAD (C.C)	300	16
RULOS	500	42
BOBINADORA	500	42
CORTADORA	500	49
ALMACEN	0	200
OFICINAS	0	100
SALA REUNIONES	0	30
ZONA DESCANSO	0	22,5
VESTUARIOS	0	22,5
BAÑOS	0	25

Diseño y simulación de un sistema de iluminación natural energéticamente eficiente de la planta industrial dedicada a la fabricación de papel en Utiel (Valencia)

En el almacén, oficinas, sala de reuniones, zona de descanso, vestuarios y baños la iluminación media es 0, es decir, no se tiene en cuenta. Esto es debido a que son zonas compartimentadas y, por tanto, no van a ser iluminadas con la iluminación general de la nave.

$$E_{req} = \frac{300 \cdot (20 + 56 + 92 + 20 + 25 + 72 + 42 + 30 + 56 + 16) + 500 \cdot 42 + 500 \cdot 42 + 500 \cdot 49}{20 + 56 + 92 + 20 + 25 + 72 + 42 + 30 + 56 + 16 + 42 + 42 + 49 + 200 + 100 + 30 + 22 + 22.5 + 25}$$

$$E_{req} = 202.91 \text{ luxes}$$

Una vez obtenido el valor de la iluminación requerida, se procede a calcular la superficie de ventanas. Para calcular dicha superficie se ha optado por utilizar únicamente lucernarios, ya que las máquinas están dispuestas de forma que la utilización de iluminación lateral no sería factible, ya que algunas de las máquinas podrían obstaculizar la entrada de la luz. De este modo, el parámetro f debe calcularse con la *Ecuación 3*.

La nave diseñada presenta una estructura de pórticos a dos aguas y, por tanto, tendrá una pendiente (α). Dicho valor de pendiente es imprescindible para obtener el valor de f . En este caso, α tiene un valor de 0.156.

$$f = \frac{180 - \arctg(0.156)}{180} = 0.95$$

A continuación, se muestra una tabla resumen con los parámetros necesarios para la obtención de la superficie de ventanas (s_v).

Tabla 2. Datos para el cálculo de la superficie de lucernarios

PARÁMETROS	VALOR
$E_{requerida}$	202,91
E_a	3000
f	0,95
f'	1
η	0,5
s_s	1350

Sustituyendo en la *Ecuación 4* se obtiene la superficie de lucernarios necesaria.

$$s_v = \frac{E_{requerida} \cdot s_s}{E_a \cdot f \cdot f' \cdot \eta} = \frac{202.91 \cdot 1350}{3000 \cdot 0.95 \cdot 1 \cdot 0.5} = 192.23 \text{ m}^2$$

3.4.2. Hipótesis de partida

Una vez obtenido el valor de la superficie de ventanas necesaria, es importante introducir en DIALux las hipótesis de partida establecidas. Para ello se introducen los siguientes parámetros:

- ❖ El grado de reflexión, el cual indica la intensidad luminosa emitida por una superficie.
- ❖ El factor de contaminación, el cual hace referencia al grado de contaminación en función de la ubicación de la nave.
- ❖ El factor de división con travesaños indica el valor asociado a una ventana de metal fija.

Tabla 3. Hipótesis de partida

	Grado reflexión (%)
Techo	45
Paredes	65
Suelo	27
Maquinaria	30

Factor contaminación	0,5
Factor de división con travesaños	0,9

A continuación, debe modelarse la nave con la correspondiente maquinaria y establecer las escenas de luz con sus respectivas fechas y horas. Para la selección de las escenas de luz se ha optado por las fechas más desfavorables del año: fecha de más iluminación (23 de junio) y fecha de más ausencia de luz (21 de diciembre). Con esta elección se pretende ser lo más eficiente energéticamente posible.

Cada propuesta debe simularse en tres situaciones diferentes: invierno (21 de diciembre) a las 9:00h y a las 12:00h y verano (23 de junio del 2021) a las 12:00h.

Mediante esta elección de escenas de luz, se pretende conseguir que, si el día de más ausencia de luz se cumple el valor de la iluminación media, la nave no requerirá luz artificial. Por otro lado, si el día de más exceso de luz la iluminación máxima es inferior a 2000 luxes indica que el resto del año no sobrepasará el límite.

Diseño y simulación de un sistema de iluminación natural energéticamente eficiente de la planta industrial dedicada a la fabricación de papel en Utiel (Valencia)

CAPÍTULO 4. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez se tiene la superficie de ventanas necesaria y los parámetros de partida introducidos en el programa DIALux, hay que distribuir los lucernarios de forma uniforme en la cubierta. Para ello, se han planteado tres modelos diferentes con la finalidad de seleccionar el que dé mejores resultados.

- ❖ Propuesta 1: 4 lucernarios de 40mx1,25m ubicados en el techo.
- ❖ Propuesta 2: 18 lucernarios de 1,6mx7m ubicados en el techo.
- ❖ Propuesta 3: 54 lucernarios de 3mx1.25m ubicados en el techo.

4.1. REQUISITOS A CUMPLIR

Una vez presentadas las tres propuestas y simuladas en la herramienta DIALux, para seleccionar la propuesta más favorable hay que fijarse en los siguientes parámetros:

- ❖ Nivel de iluminación medio (E_m): Parámetro que debe oscilar entre el valor de $E_{requerida}$ (202.91 luxes) y 2000 luxes.
- ❖ Uniformidad (U): Hace referencia al cociente entre el valor mínimo de iluminación y el valor medio.

$$U = \frac{E_{min}}{E_m} \cdot 100$$

A pesar de tener una iluminación media correcta, puede darse la situación de una diferencia de iluminación en las zonas de trabajo, lo cual generaría una buena media, pero no habría uniformidad en la nave. Por tanto, para asegurar el confort y la visión del trabajador, dicho parámetro debe ser superior al 30-40%.

- ❖ Deslumbramientos: Los deslumbramientos son un factor importante a tener en cuenta a la hora de ubicar las aberturas. Estos se producen normalmente cuando se tienen luminarias laterales. En estos casos la radiación solar incide sobre el plano horizontal en el ojo del operario con un ángulo igual o inferior al 30º, lo cual produce molestias y pérdida de visión. Sin embargo, en el caso de la nave diseñada únicamente se han distribuido las ventanas en el techo, por tanto, la probabilidad de que se produzcan deslumbramientos disminuye considerablemente.

Diseño y simulación de un sistema de iluminación natural energéticamente eficiente de la planta industrial dedicada a la fabricación de papel en Utiel (Valencia)

- ❖ Factor de luz diurna (D): Relación constante entre el nivel de iluminación interior y el nivel de iluminación exterior. Este parámetro es determinante para el bienestar psicológico del trabajador y, por tanto, para que su trabajo sea lo más efectivo posible. Por este motivo, su valor debe ser aproximado al 2%.

En cada una de las propuestas planteadas se evaluarán los parámetros descritos. Para ello se analiza cada una de ellas a continuación.

4.2. PROPUESTA 1

Como se ha comentado anteriormente, el valor de la superficie de abertura debe ser como mínimo 192.23 m^2 . En la primera de las propuestas se han utilizado cuatro lucernarios de $40\text{m} \times 1,25\text{m}$, lo cual da una superficie de aberturas de 200 m^2 .

A continuación, se muestra la distribución de lucernarios en DIALux.



Figura 10. Vista en planta de la distribución de lucernarios de la propuesta 1 sin maquinaria

Diseño y simulación de un sistema de iluminación natural energéticamente eficiente de la planta industrial dedicada a la fabricación de papel en Utiel (Valencia)

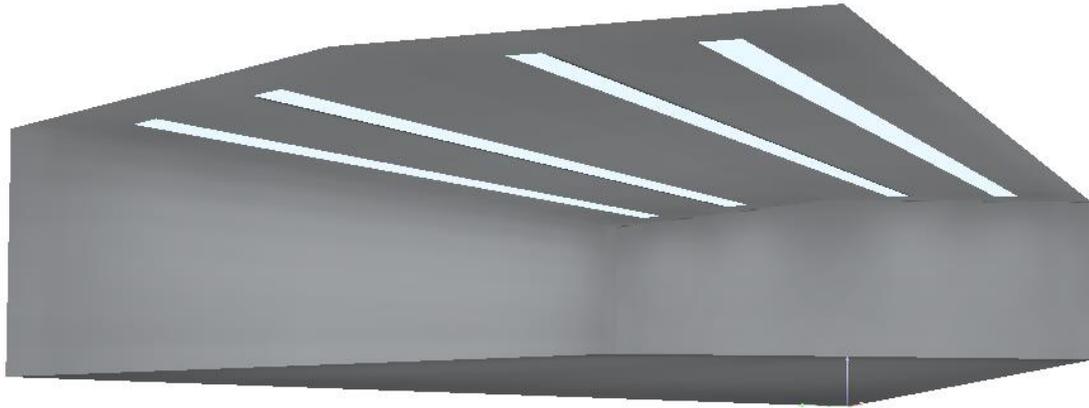


Figura 11. Vista 3D de la distribución de lucernarios de la propuesta 1 sin maquinaria

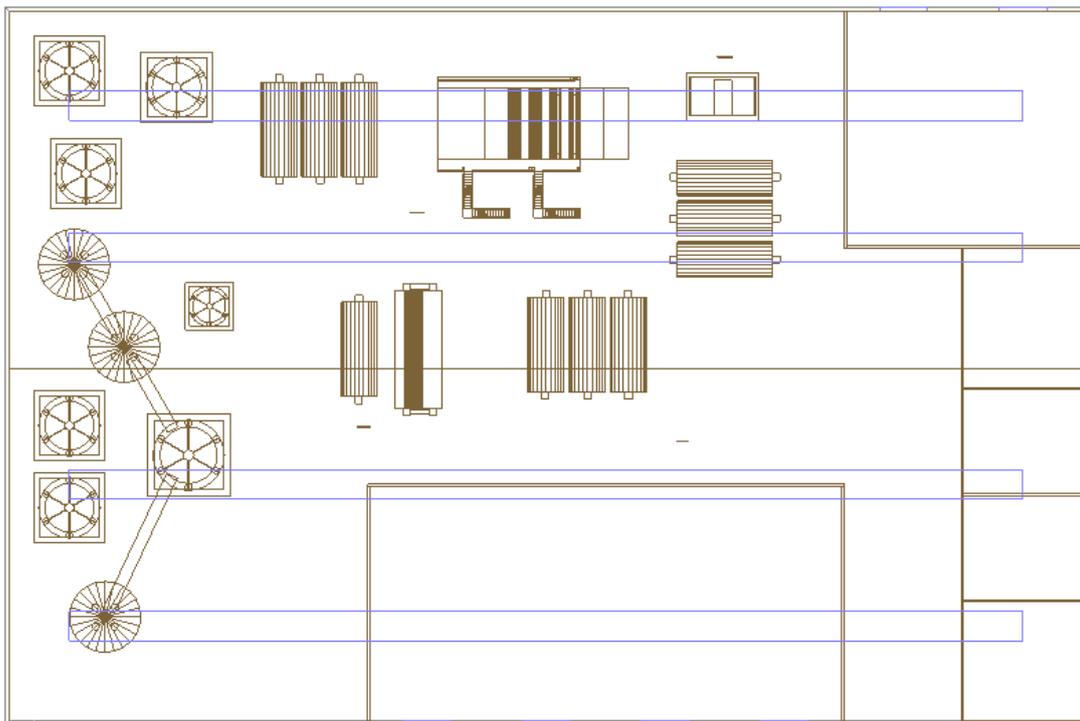


Figura 12. Vista en planta de la distribución de lucernarios de la propuesta 1 con maquinaria

Diseño y simulación de un sistema de iluminación natural energéticamente eficiente de la planta industrial dedicada a la fabricación de papel en Utiel (Valencia)

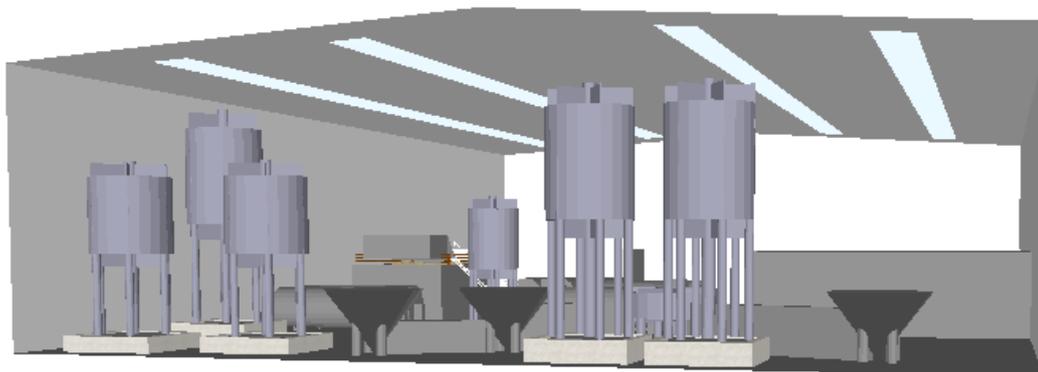


Figura 13. Vista 3D de la distribución de lucernarios de la propuesta 1 con maquinaria

4.2.1. Isolíneas E Propuesta 1

Utilizando la herramienta DIALux se puede obtener la incidencia lumínica en las diferentes áreas de la nave para las 3 escenas de luz planteadas. Estos valores se observan en las siguientes imágenes.

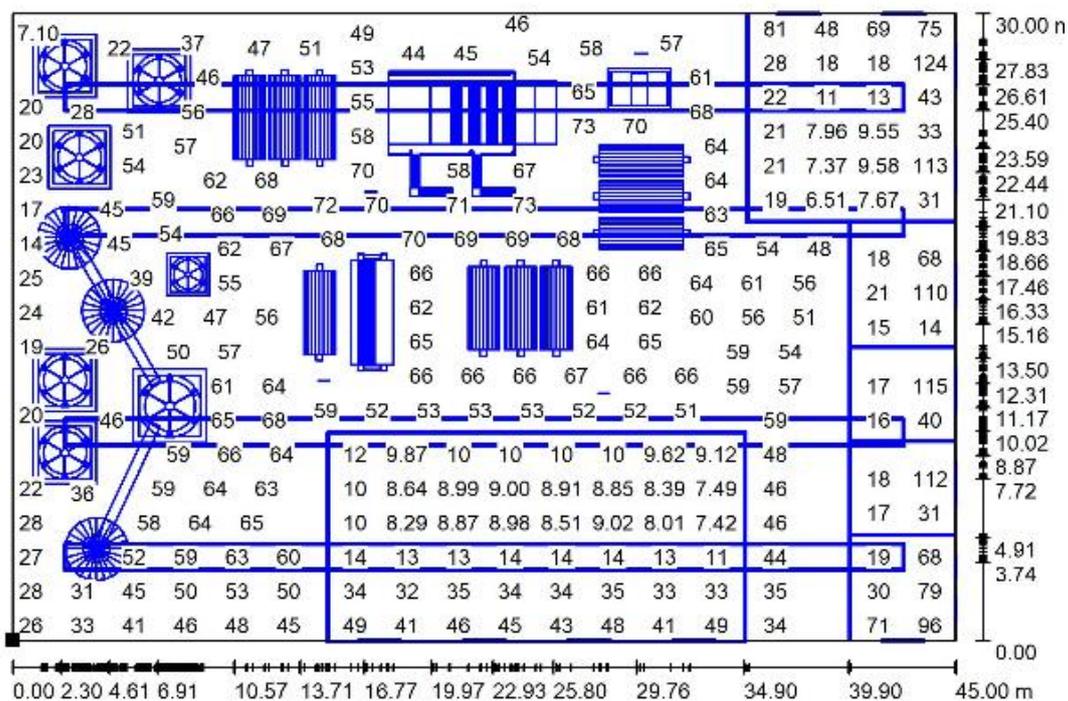


Figura 14. Gráfico de valores E de la propuesta 1 a 21 de diciembre 2021 a las 9h

Diseño y simulación de un sistema de iluminación natural energéticamente eficiente de la planta industrial dedicada a la fabricación de papel en Utiel (Valencia)

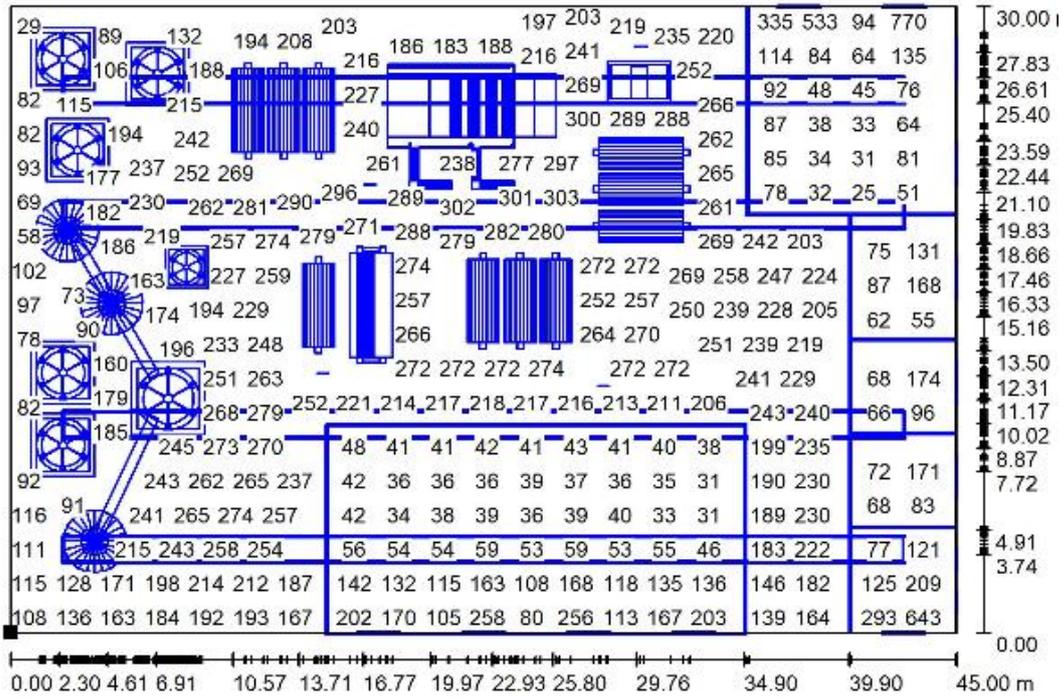


Figura 15. Gráfico de valores E de la propuesta 1 a 21 de diciembre 2021 a las 12h

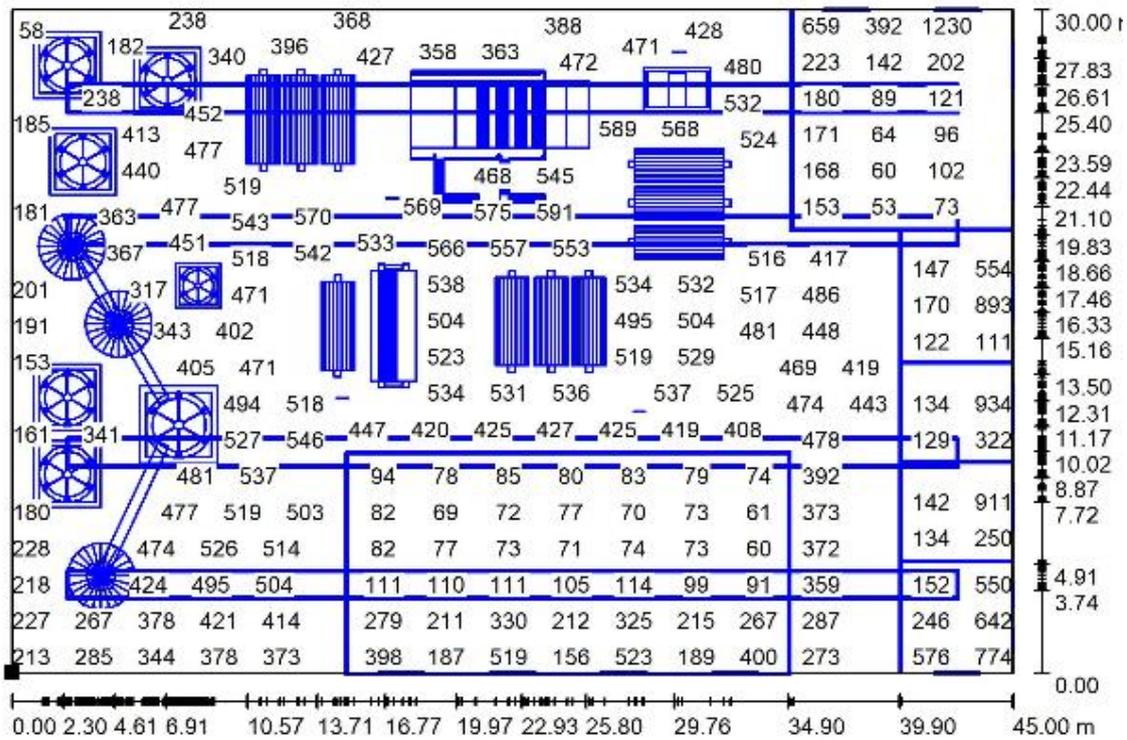


Figura 16. Gráfico de valores E de la propuesta 1 a 23 de junio 2021 a las 12h

Diseño y simulación de un sistema de iluminación natural energéticamente eficiente de la planta industrial dedicada a la fabricación de papel en Utiel (Valencia)

Tabla 4. Resumen parámetros E propuesta 1

Fecha	Hora	E_m (luxes)	E_{min} (luxes)	E_{max} (luxes)	E_{min}/E_m	E_{min}/E_{max}
21/12/2021	9:00	42	5,47	233	0,129	0,023
	12:00	174	23	960	0,129	0,023
23/06/2021	12:00	342	44	1888	0,129	0,023

4.2.2. Isolíneas D Propuesta 1

Como se ha comentado anteriormente, el factor de luz diurna representa la relación constante entre el nivel de iluminación interior y el nivel de iluminación exterior. A continuación, se muestra dicha relación en las distintas áreas de trabajo para cada escena de luz.

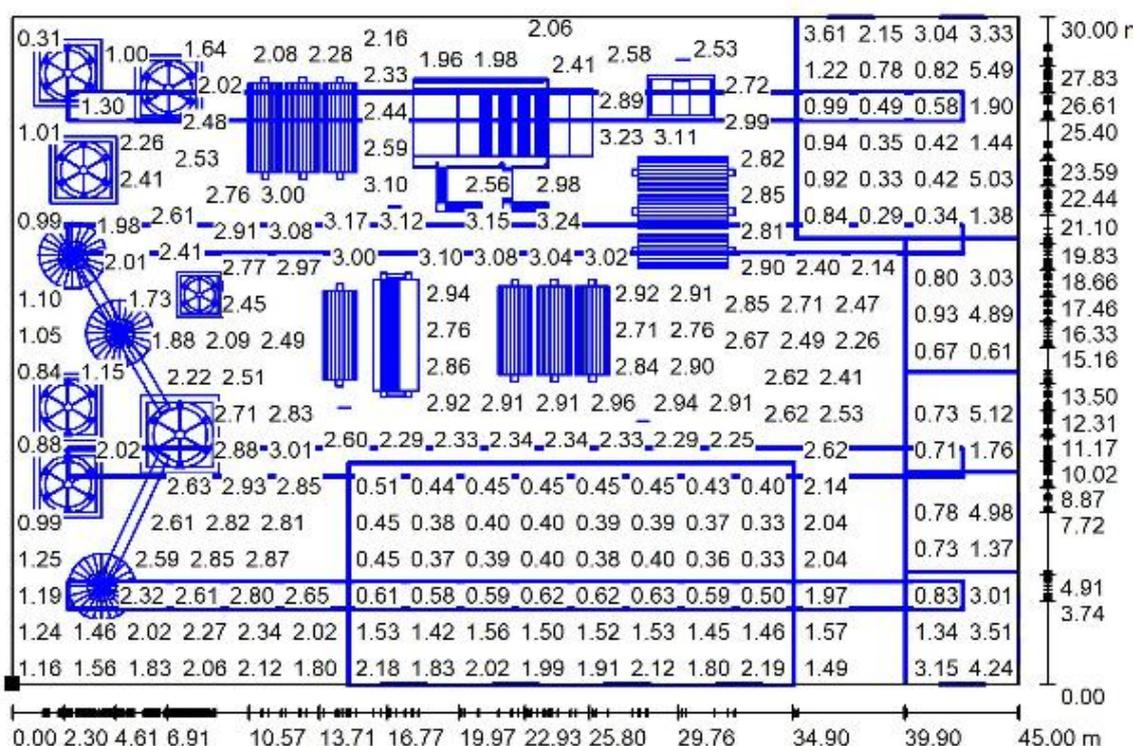


Figura 17. Gráfico de valores D de la propuesta 1 a 21 de diciembre 2021 a las 9h

Diseño y simulación de un sistema de iluminación natural energéticamente eficiente de la planta industrial dedicada a la fabricación de papel en Utiel (Valencia)

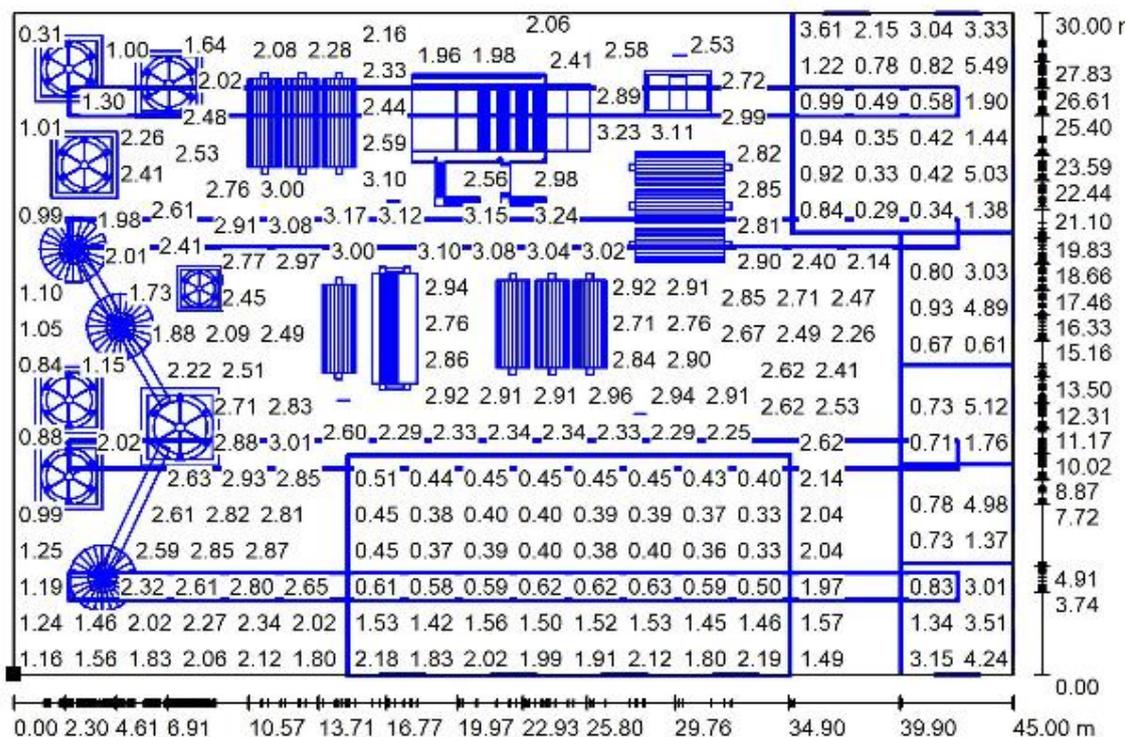


Figura 18. Gráfico de valores D de la propuesta 1 a 21 de diciembre 2021 a las 12h

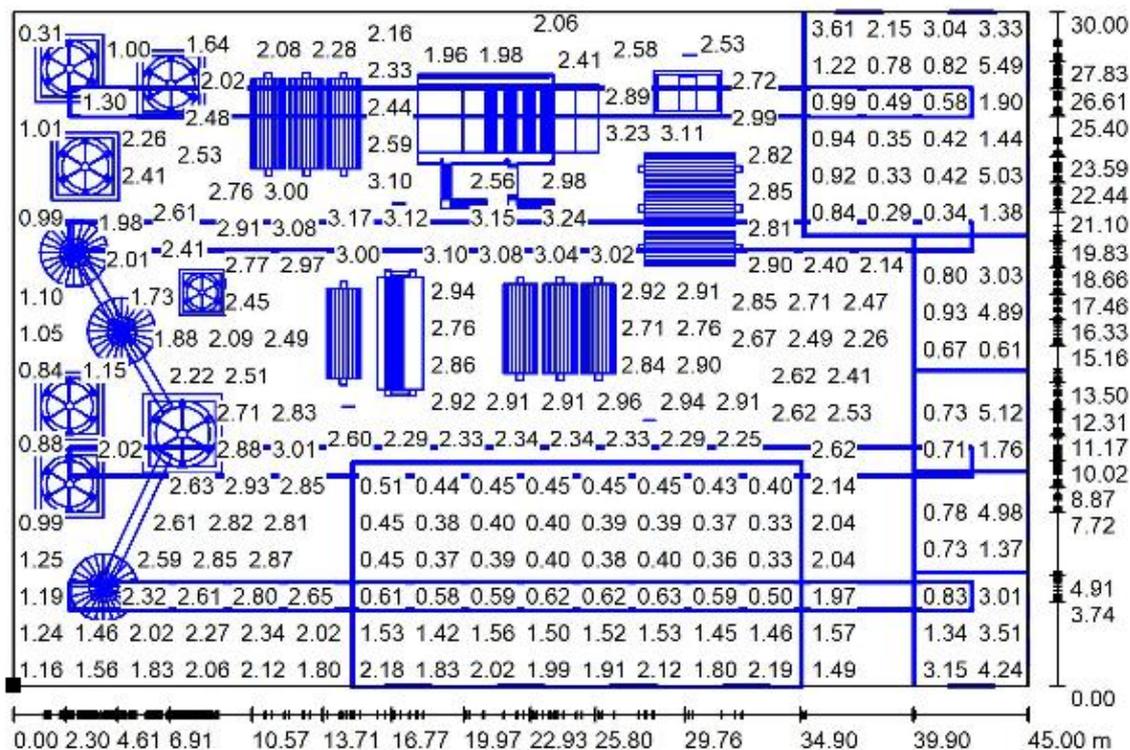


Figura 19. Gráfico de valores D de la propuesta 1 a 23 de junio 2021 a las 12h

Diseño y simulación de un sistema de iluminación natural energéticamente eficiente de la planta industrial dedicada a la fabricación de papel en Utiel (Valencia)

Tabla 5. Resumen parámetros D propuesta 1

Fecha	Hora	D_m (luxes)	D_{min} (luxes)	D_{max} (luxes)	D_{min}/D_m	D_{min}/D_{max}
21/12/2021	9:00	1,87	0,24	10	0,129	0,023
	12:00	1,87	0,24	10	0,129	0,023
23/06/2021	12:00	1,87	0,24	10	0,129	0,023

4.3. PROPUESTA 2

En la propuesta 2 se han cambiado tanto el número de tragaluces como sus dimensiones. Se ha optado por un diseño con 18 lucernarios de 1,6mx7m como se muestra a continuación.

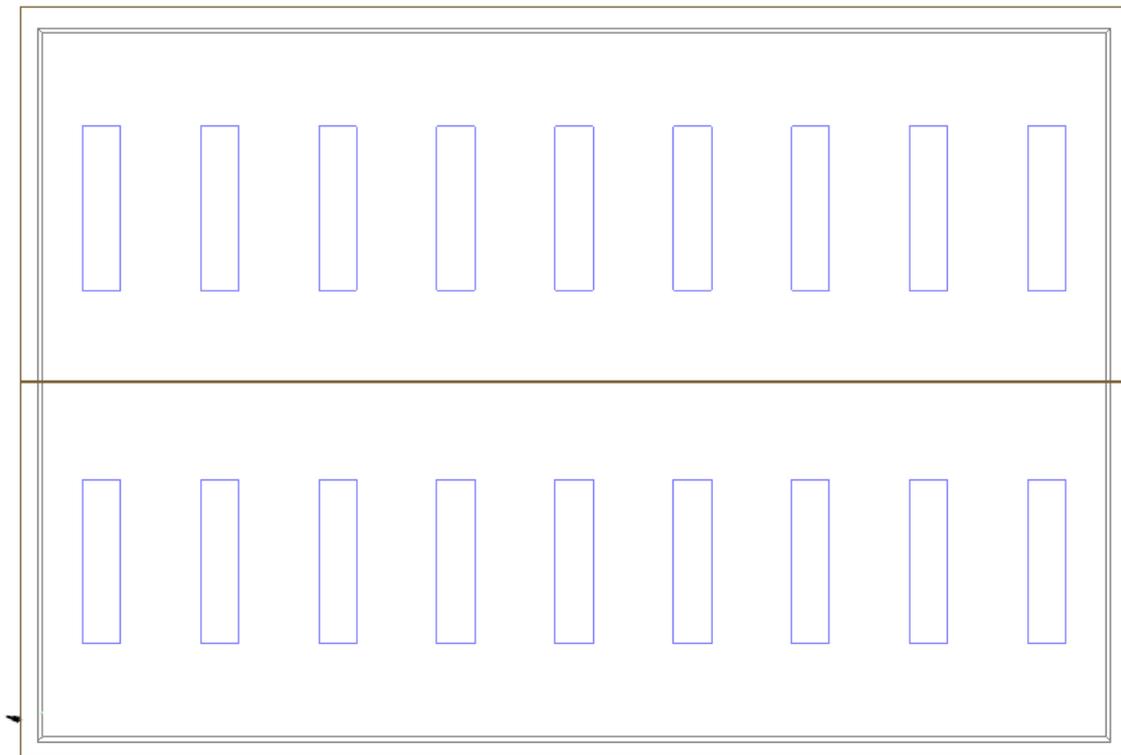


Figura 20. Vista en planta de la distribución de lucernarios de la propuesta 2 sin maquinaria

Diseño y simulación de un sistema de iluminación natural energéticamente eficiente de la planta industrial dedicada a la fabricación de papel en Utiel (Valencia)

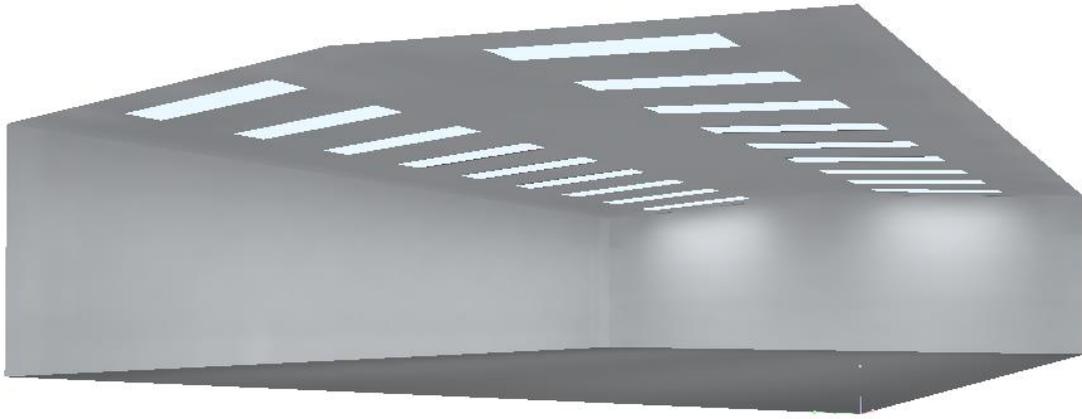


Figura 21. Vista 3D de la distribución de lucernarios de la propuesta 2 sin maquinaria

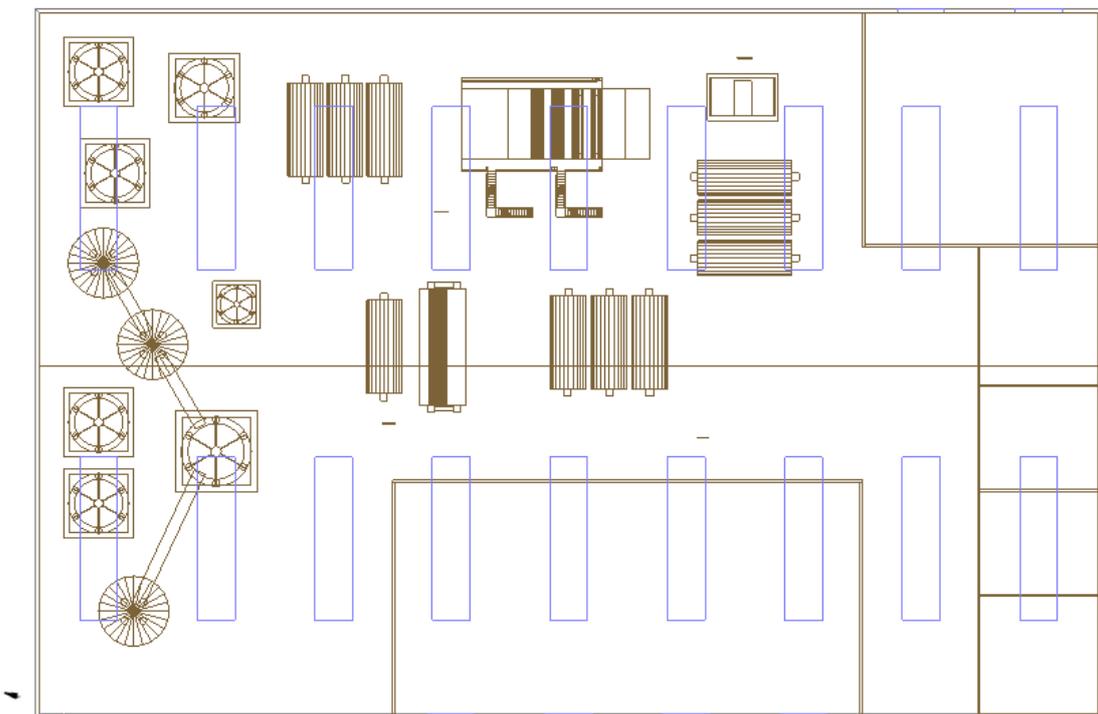


Figura 22. Vista en planta de la distribución de lucernarios de la propuesta 2 con maquinaria

Diseño y simulación de un sistema de iluminación natural energéticamente eficiente de la planta industrial dedicada a la fabricación de papel en Utiel (Valencia)

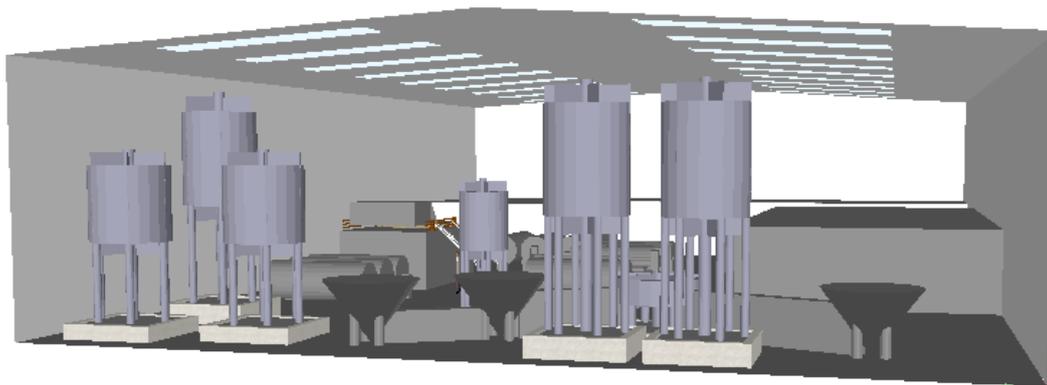


Figura 23. Vista 3D de la distribución de lucernarios de la propuesta 2 con maquinaria

4.3.1. Isolíneas E Propuesta 2

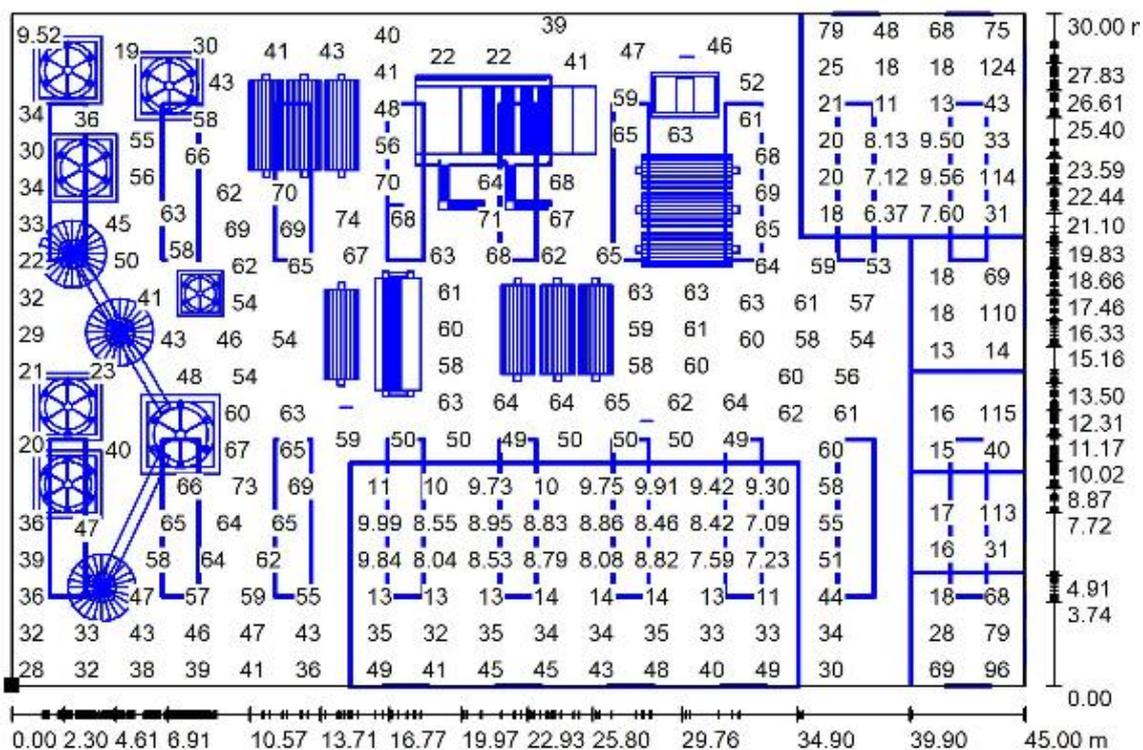


Figura 24. Gráfico de valores E de la propuesta 2 a 21 de diciembre 2021 a las 9h

Diseño y simulación de un sistema de iluminación natural energéticamente eficiente de la planta industrial dedicada a la fabricación de papel en Utiel (Valencia)

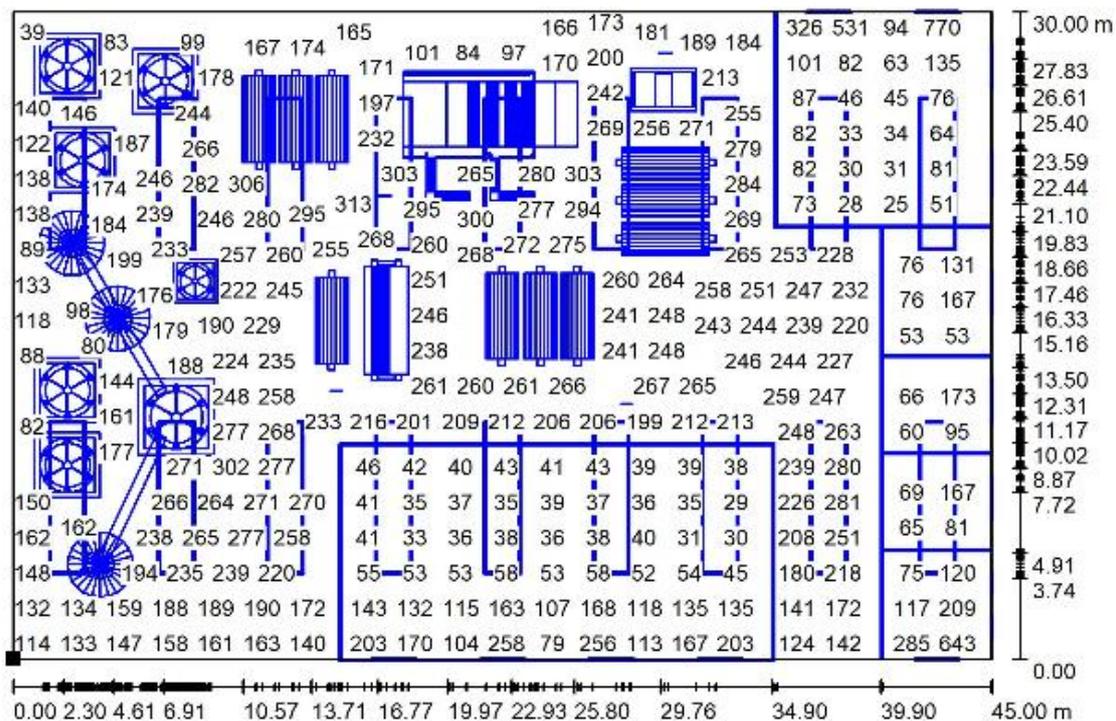


Figura 25. Gráfico de valores E de la propuesta 2 a 21 de diciembre 2021 a las 12h

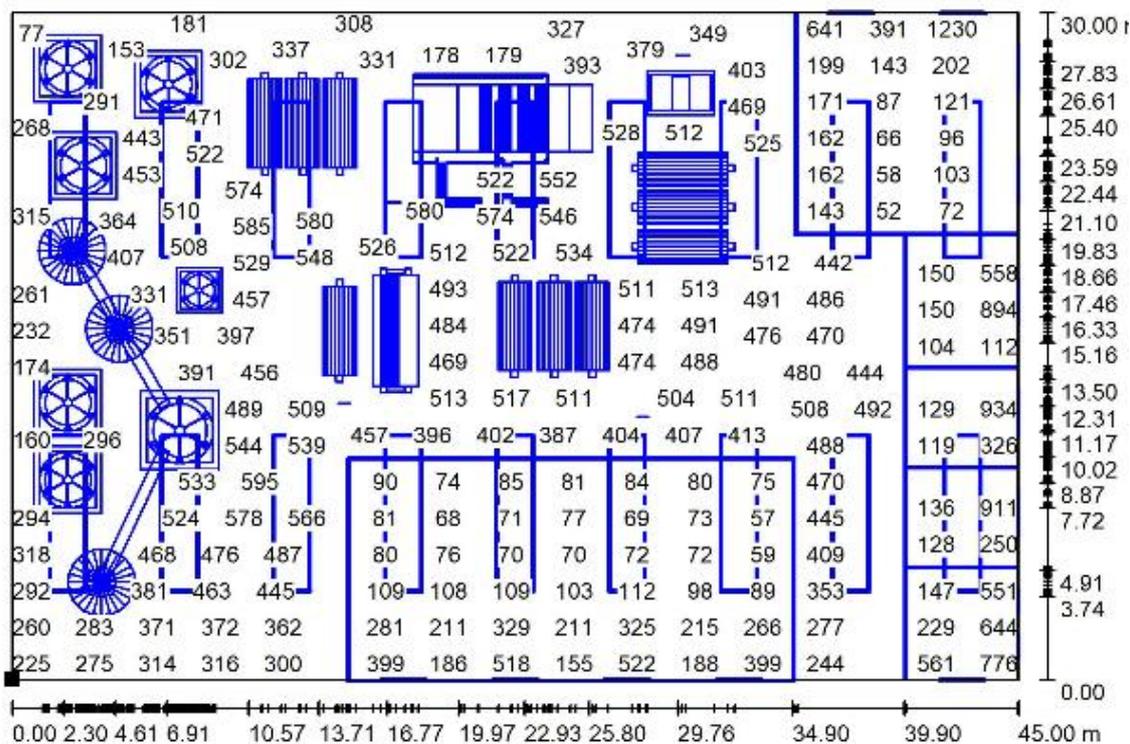


Figura 26. Gráfico de valores E de la propuesta 2 a 23 de junio 2021 a las 12h

Tabla 6. Resumen parámetros E propuesta 2

Fecha	Hora	E_m (luxes)	E_{min} (luxes)	E_{max} (luxes)	E_{min}/E_m	E_{min}/E_{max}
21/12/2021	9:00	42	5,55	233	0,133	0,024
	12:00	172	23	960	0,133	0,024
23/06/2021	12:00	388	45	1888	0,133	0,024

4.3.2. Isolíneas D Propuesta 2

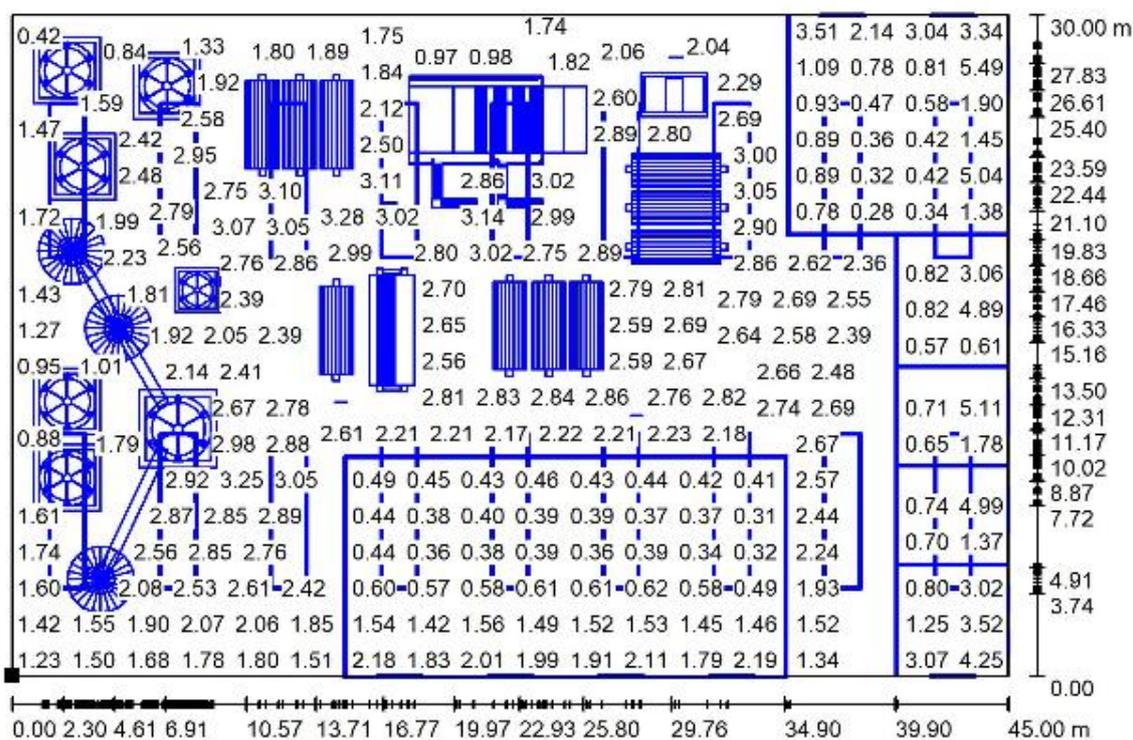


Figura 27. Gráfico de valores D de la propuesta 2 a 21 de diciembre 2021 a las 9h

Diseño y simulación de un sistema de iluminación natural energéticamente eficiente de la planta industrial dedicada a la fabricación de papel en Utiel (Valencia)

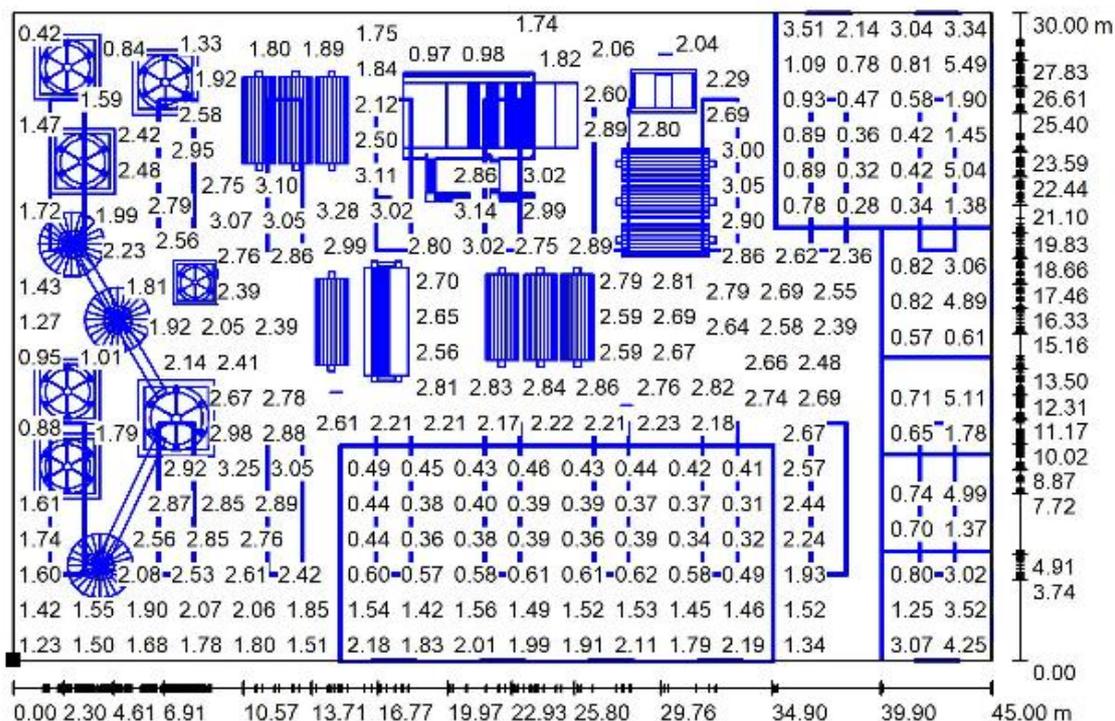


Figura 28. Gráfico de valores D de la propuesta 2 a 21 de diciembre 2021 a las 12h

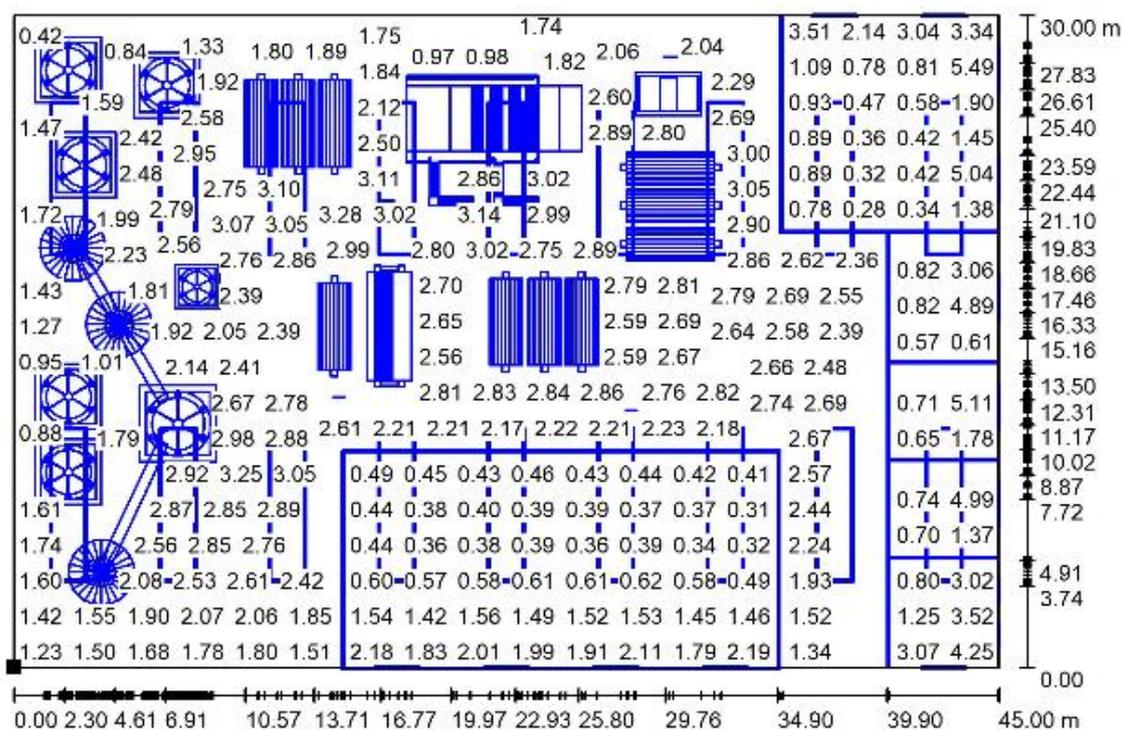


Figura 29. Gráfico de valores D de la propuesta 2 a 23 de junio 2021 a las 12h

Diseño y simulación de un sistema de iluminación natural energéticamente eficiente de la planta industrial dedicada a la fabricación de papel en Utiel (Valencia)

Tabla 7. Resumen parámetros D propuesta 2

Fecha	Hora	D_m (luxes)	D_{min} (luxes)	D_{max} (luxes)	D_{min}/D_m	D_{min}/D_{max}
21/12/2021	9:00	1,85	0,25	10	0,133	0,024
	12:00	1,85	0,25	10	0,133	0,024
23/06/2021	12:00	1,85	0,25	10	0,133	0,024

4.4. PROPUESTA 3

En la propuesta 3 se han diseñado 54 tragaluces de dimensiones 3m x 1,25m. A continuación se muestran las simulaciones realizadas con DIALux.

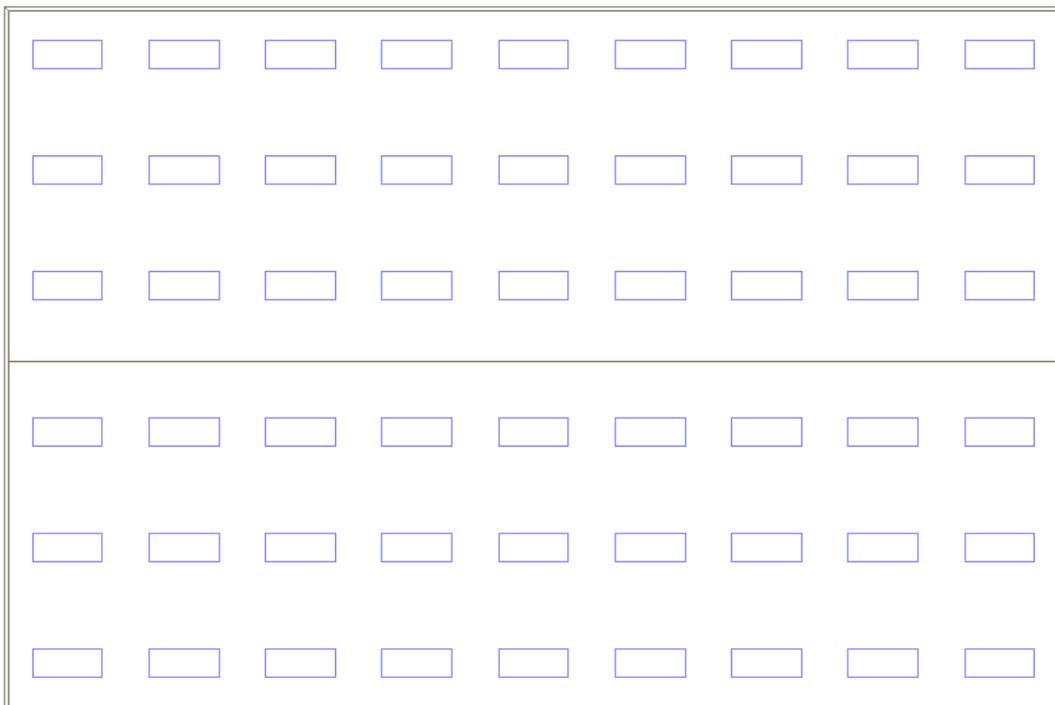


Figura 30. Vista en planta de la distribución de lucernarios de la propuesta 3 sin maquinaria

Diseño y simulación de un sistema de iluminación natural energéticamente eficiente de la planta industrial dedicada a la fabricación de papel en Utiel (Valencia)

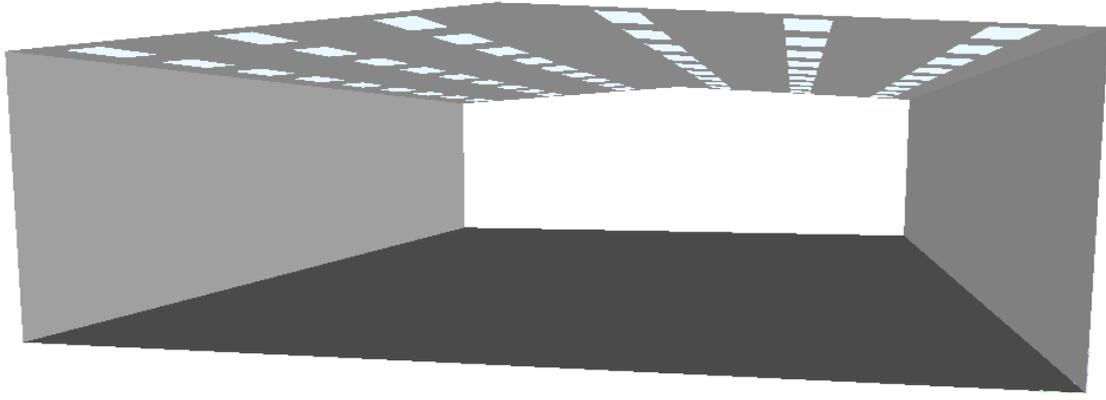


Figura 31. Vista 3D de la distribución de lucernarios de la propuesta 3 sin maquinaria

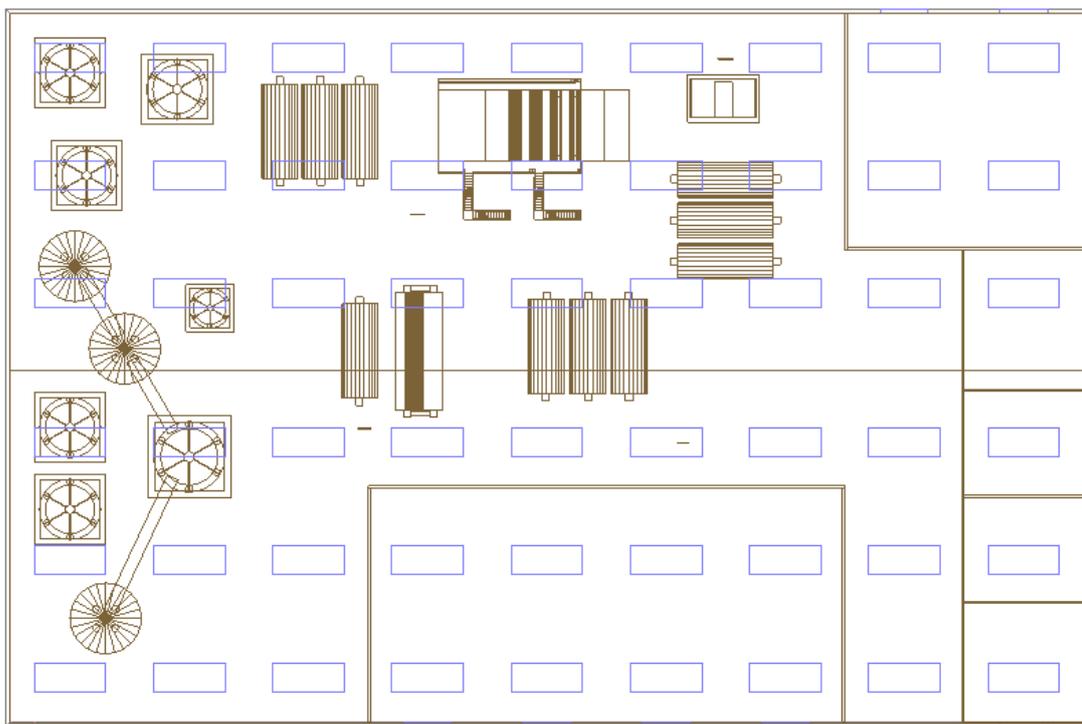


Figura 32. Vista en planta de la distribución de lucernarios de la propuesta 3 con maquinaria

Diseño y simulación de un sistema de iluminación natural energéticamente eficiente de la planta industrial dedicada a la fabricación de papel en Utiel (Valencia)

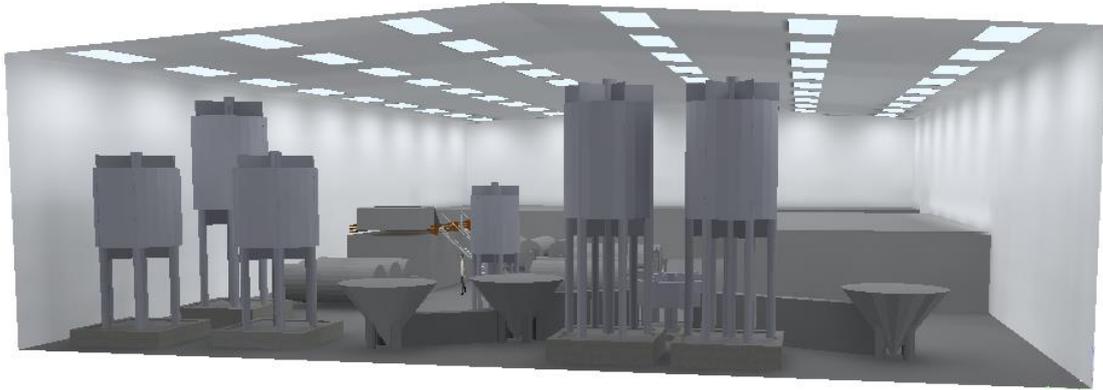


Figura 33. Vista 3D de la distribución de lucernarios de la propuesta 3 con maquinaria

4.4.1. Isolíneas E Propuesta 3

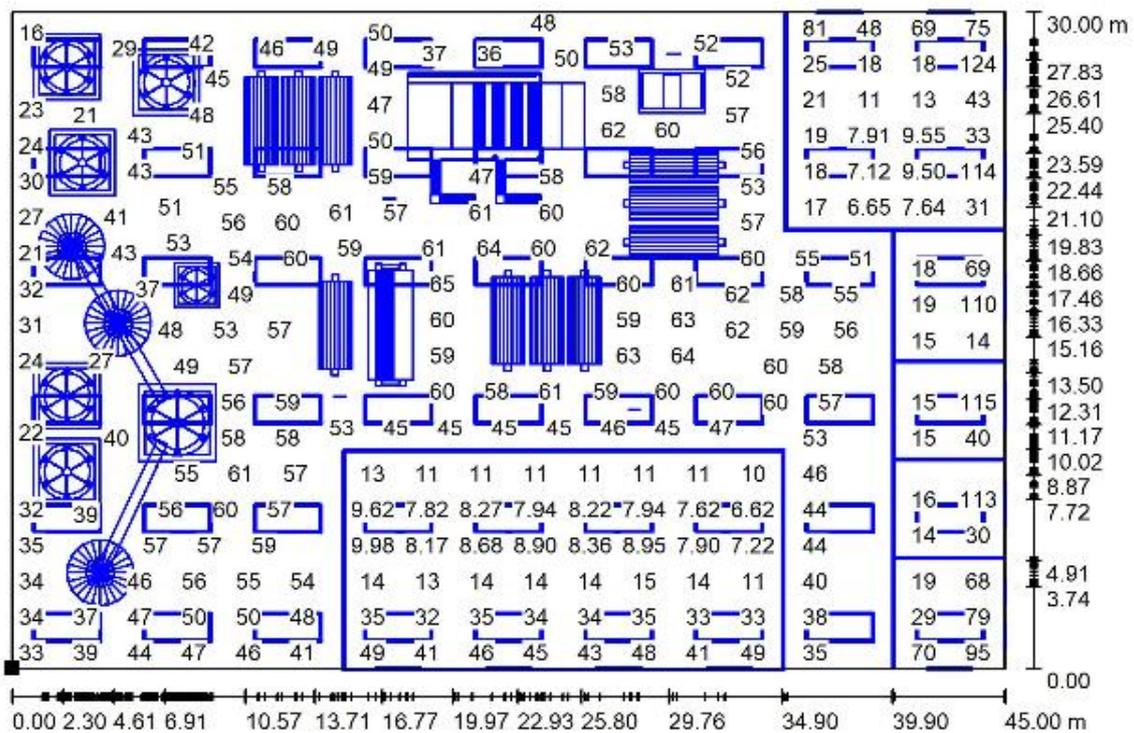


Figura 34. Gráfico de valores E de la propuesta 3 a 21 de diciembre 2021 a las 9h

Diseño y simulación de un sistema de iluminación natural energéticamente eficiente de la planta industrial dedicada a la fabricación de papel en Utiel (Valencia)

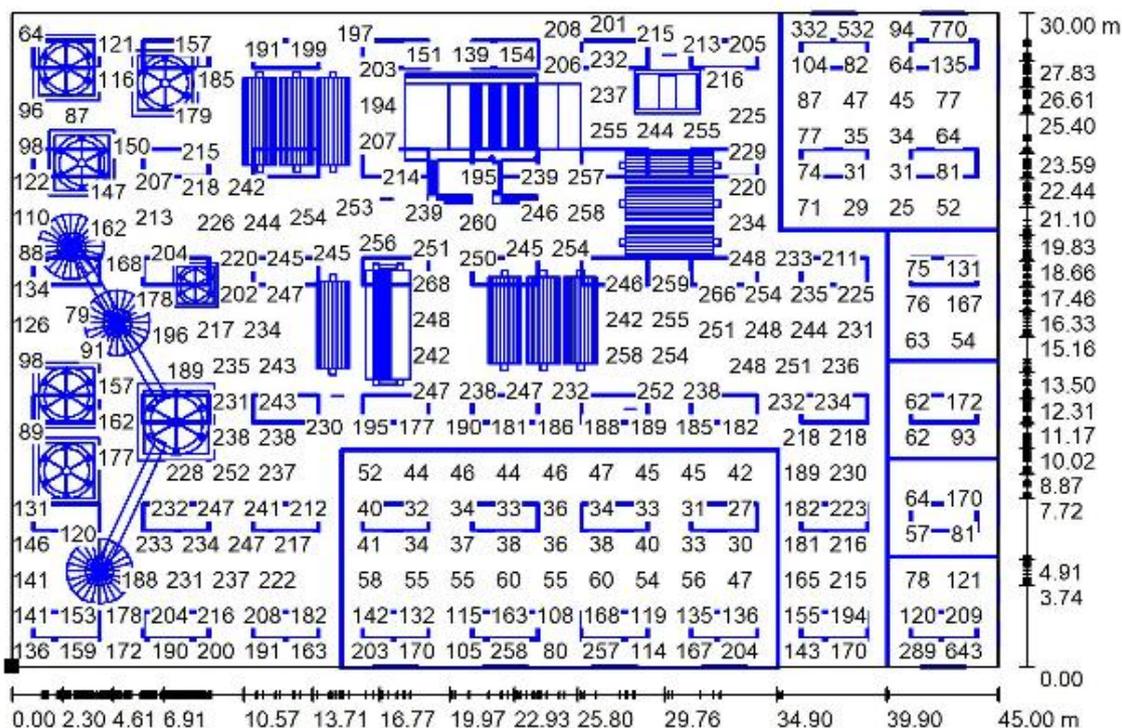


Figura 35. Gráfico de valores E de la propuesta 3 a 21 de diciembre 2021 a las 12h

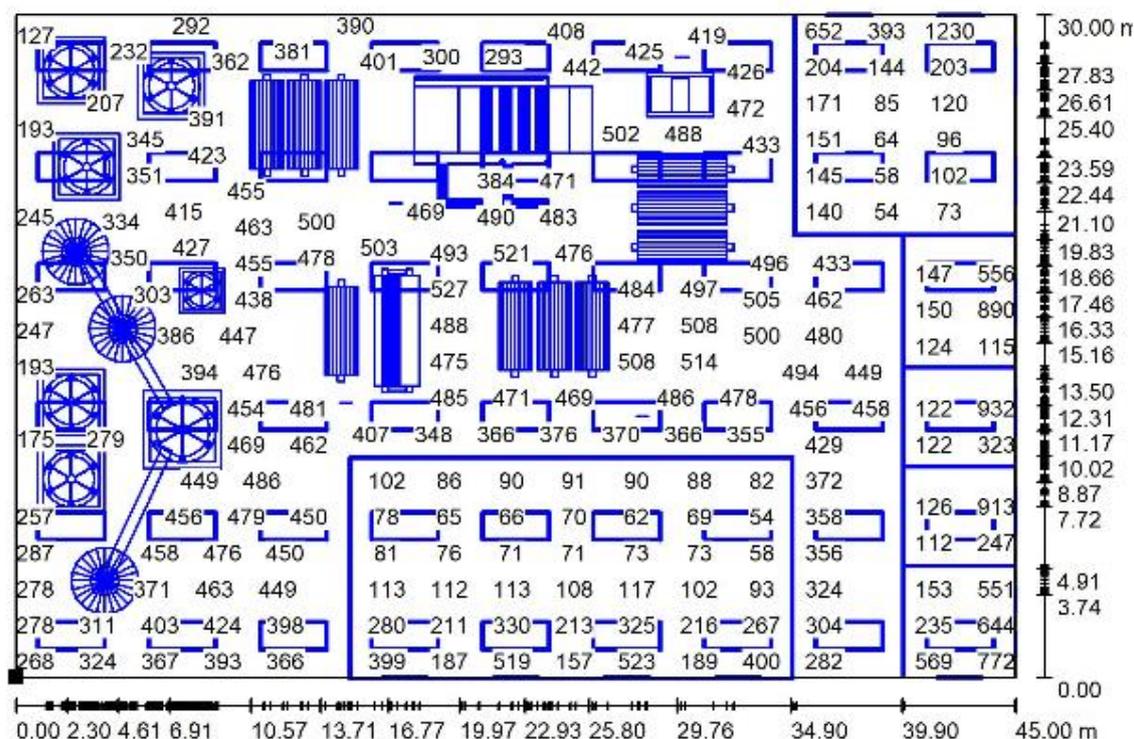


Figura 36. Gráfico de valores E de la propuesta 3 a 23 de junio 2021 a las 12h

Diseño y simulación de un sistema de iluminación natural energéticamente eficiente de la planta industrial dedicada a la fabricación de papel en Utiel (Valencia)

Tabla 8. Resumen parámetros E propuesta 3

Fecha	Hora	E_m (luxes)	E_{min} (luxes)	E_{max} (luxes)	E_{min}/E_m	E_{min}/E_{max}
21/12/2021	9:00	41	5,61	233	0,138	0,024
	12:00	167	23	958	0,138	0,024
23/06/2021	12:00	329	45	1884	0,138	0,024

4.4.2. Isolíneas D Propuesta 3

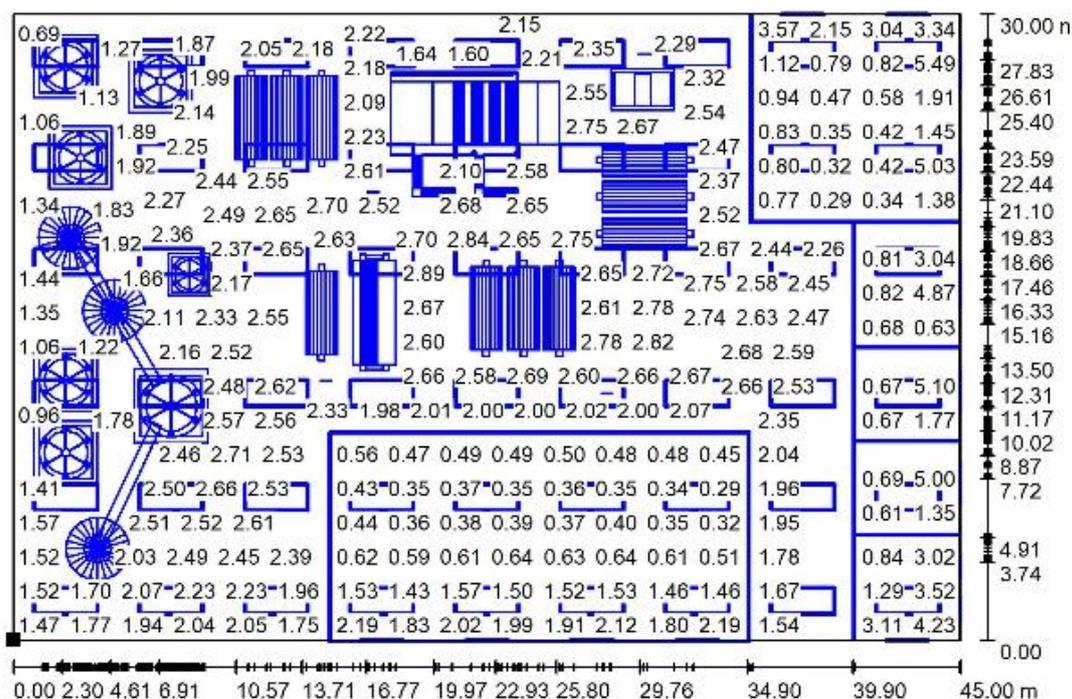


Figura 37. Gráfico de valores D de la propuesta 3 a 21 de diciembre 2021 a las 9h

Diseño y simulación de un sistema de iluminación natural energéticamente eficiente de la planta industrial dedicada a la fabricación de papel en Utiel (Valencia)

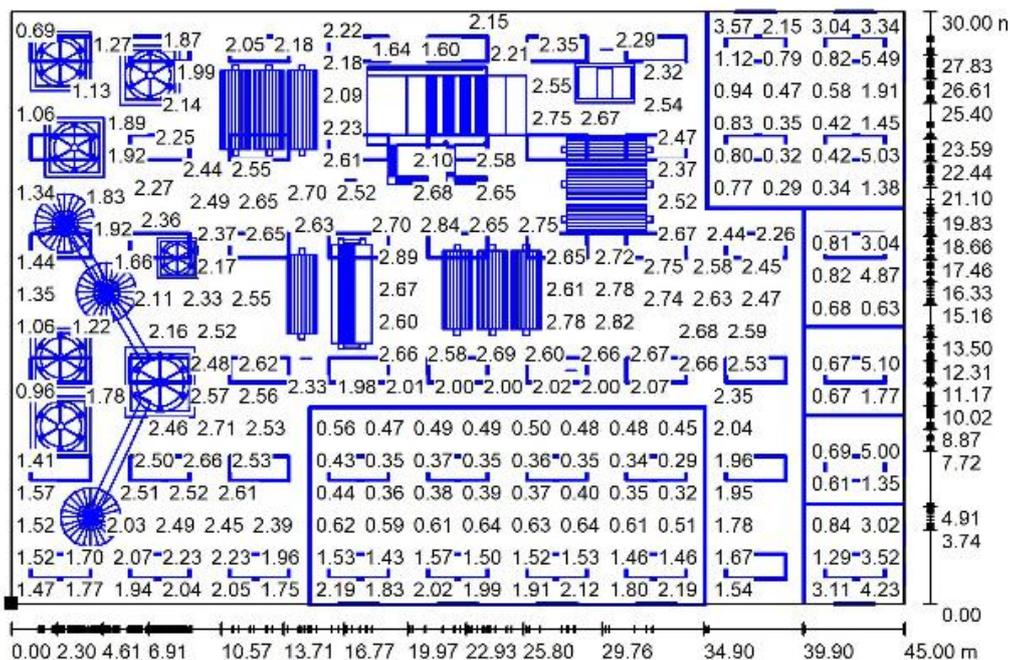


Figura 38. Gráfico de valores D de la propuesta 3 a 21 de diciembre 2021 a las 12h

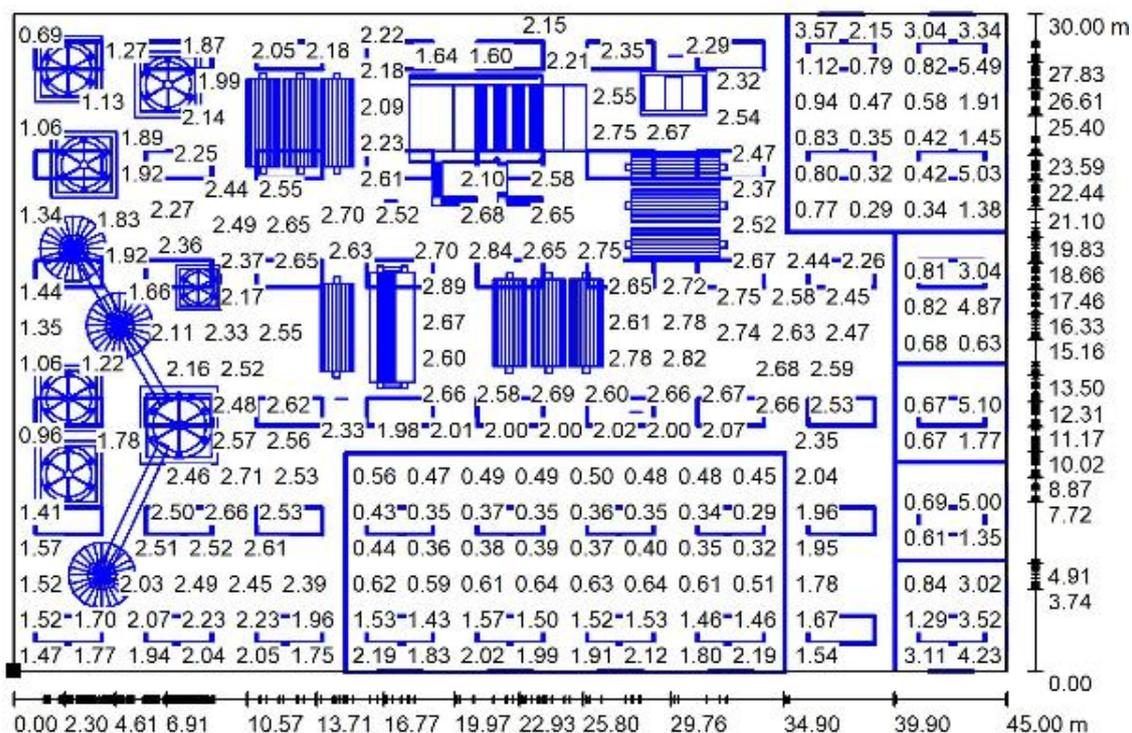


Figura 39. Gráfico de valores D de la propuesta 3 a 23 de junio 2021 a las 12h

Diseño y simulación de un sistema de iluminación natural energéticamente eficiente de la planta industrial dedicada a la fabricación de papel en Utiel (Valencia)

Tabla 9. Resumen parámetros D propuesta 3

Fecha	Hora	D_m (luxes)	D_{min} (luxes)	D_{max} (luxes)	D_{min}/D_m	D_{min}/D_{max}
21/12/2021	9:00	1,8	0,25	10	0,138	0,024
	12:00	1,8	0,25	10	0,138	0,024
23/06/2021	12:00	1,8	0,25	10	0,138	0,024

4.5. COMPARACIÓN Y ANÁLISIS DE PROPUESTAS

Para poder seleccionar la propuesta más viable, se introducen los valores obtenidos en las 3 propuestas en una tabla resumen, con la finalidad de compararlos.

Tabla 10. Resumen propuestas con grado de transmisión del 45%

	Fecha	Hora	E_m (luxes)	E_{min} (luxes)	E_{max} (luxes)	E_{min}/E_m	E_{min}/E_{max}
PROPUESTA 1	21/12/2021	9:00	42	5,47	233	0,129	0,023
		12:00	174	23	960	0,129	0,023
	23/06/2021	12:00	342	44	1888	0,129	0,023
PROPUESTA 2	21/12/2021	9:00	42	5,55	233	0,133	0,024
		12:00	172	23	960	0,133	0,024
	23/06/2021	12:00	388	45	1888	0,133	0,024
PROPUESTA 3	21/12/2021	9:00	41	5,61	233	0,138	0,024
		12:00	167	23	958	0,138	0,024
	23/06/2021	12:00	329	45	1884	0,138	0,024

	D_m (luxes)	D_{min} (luxes)	D_{max} (luxes)	D_{min}/D_m	D_{min}/D_{max}
PROPUESTA 1	1,87	0,24	10	0,129	0,023
PROPUESTA 2	1,85	0,25	10	0,133	0,024
PROPUESTA 3	1,8	0,25	10	0,138	0,024

Para saber qué propuesta es la más eficiente hay que comparar los parámetros explicados anteriormente y comprobar cual se ajusta más a los límites establecidos.

Tabla 11. Valores límites

E_m (luxes)	E_{max} (luxes)	E_{min}/E_m	D_m
$\geq 202,91$	< 2000	$> 30\%$	$\approx 2\%$

Los parámetros de la *Tabla 10* se analizan para saber si el uso de luz artificial será necesaria para iluminar la nave. Si se observa que las condiciones se cumplen para las épocas más restrictivas del año, éstas también se cumplirán el resto del año.

La opción más favorable será aquella que presente una iluminación media superior a 202,91 luxes, una iluminación máxima inferior a 2000 luxes, una uniformidad superior al 30% y un valor de factor de luz diurna aproximadamente del 2%. De este modo, quedaría garantizado un consumo óptimo de energía y unas condiciones de trabajo que generen seguridad y bienestar al trabajador.

Diseño y simulación de un sistema de iluminación natural energéticamente eficiente de la planta industrial dedicada a la fabricación de papel en Utiel (Valencia)

Una vez establecidos los valores límites, se pueden analizar las tres propuestas planteadas.

Tabla 12. Análisis propuestas con grado de transmisión del 45%

	Fecha	Hora	E_m (luxes)	E_{min} (luxes)	E_{max} (luxes)	E_{min}/E_m	E_{min}/E_{max}
PROPUESTA 1	21/12/2021	9:00	42	5,47	233	0,129	0,023
		12:00	174	23	960	0,129	0,023
	23/06/2021	12:00	342	44	1888	0,129	0,023
PROPUESTA 2	21/12/2021	9:00	42	5,55	233	0,133	0,024
		12:00	172	23	960	0,133	0,024
	23/06/2021	12:00	388	45	1888	0,133	0,024
PROPUESTA 3	21/12/2021	9:00	41	5,61	233	0,138	0,024
		12:00	167	23	958	0,138	0,024
	23/06/2021	12:00	329	45	1884	0,138	0,024

	D_m (luxes)	D_{min} (luxes)	D_{max} (luxes)	D_{min}/D_m	D_{min}/D_{max}
PROPUESTA 1	1,87	0,24	10	0,129	0,023
PROPUESTA 2	1,85	0,25	10	0,133	0,024
PROPUESTA 3	1,8	0,25	10	0,138	0,024

Como se puede observar en la *Tabla 12*, las tres propuestas cumplen el parámetro de luz diurna (D_m). Sin embargo, en los 3 casos la iluminación media el 21/12 a las 9h y a las 12h es inferior al valor mínimo requerido de 202,91 luxes, por tanto, no se cumple. Lo mismo ocurre con el valor de la uniformidad ($\frac{E_{min}}{E_m}$) referido a la totalidad de la nave.

4.6. ANÁLISIS DETALLADO UNIFORMIDAD

Como se ha podido observar en el análisis de las tres propuestas, la uniformidad tiene un valor inferior al 30%. Esto es debido a que este dato se ha obtenido referido a la totalidad de la nave, por lo cual se debe calcular este parámetro en las zonas donde este el trabajador durante su jornada laboral.

Se evalúa la uniformidad de las tres propuestas en las diferentes áreas donde se encuentra el operario: escurridor, extracción, prensa, control de calidad, cortadora y pasillos. Este parámetro se estudiará en la situación más desfavorable (21 de diciembre a las 9h).

Propuesta 1:

Para obtener la uniformidad en las diferentes áreas donde se encuentran los trabajadores se observa la *Figura 14*. A continuación se muestra dicha Figura con las zonas a analizar resaltadas.

Diseño y simulación de un sistema de iluminación natural energéticamente eficiente de la planta industrial dedicada a la fabricación de papel en Utiel (Valencia)

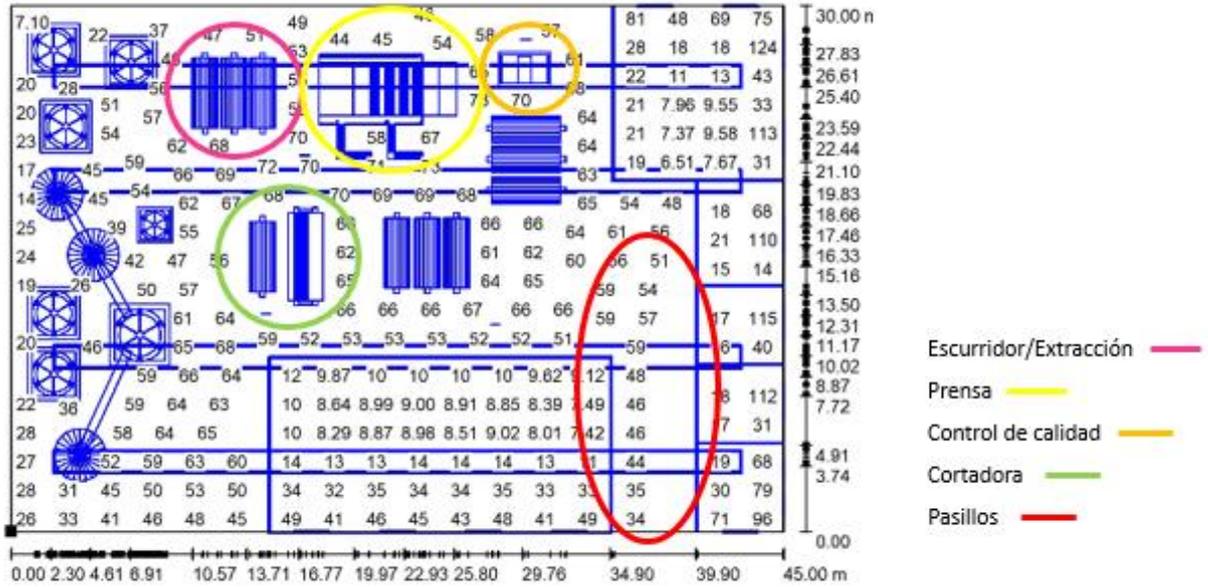


Figura 40. Señalización zonas a analizar Propuesta 1

$$U_{\text{escurr/extrac}} = \frac{47}{47 + 51 + 46 + 56 + 62 + 68 + 70 + 58 + 55 + 53} \cdot 100 = \frac{47}{56.6} \cdot 100 = 83.03\%$$

$$U_{\text{prensa}} = \frac{44}{53 + 55 + 58 + 70 + 71 + 73 + 67 + 73 + 44 + 54} \cdot 100 = \frac{44}{61.8} \cdot 100 = 71.19\%$$

$$U_{\text{CC}} = \frac{46}{58 + 65 + 73 + 70 + 64 + 68 + 61 + 57 + 54 + 46} \cdot 100 = \frac{46}{61.6} \cdot 100 = 74.67\%$$

$$U_{\text{cortadora}} = \frac{56}{70 + 70 + 68 + 72 + 67 + 56 + 64 + 52 + 66 + 66} \cdot 100 = \frac{56}{65.1} \cdot 100 = 86.02\%$$

$$U_{\text{pasillos}} = \frac{34}{34 + 35 + 44 + 46 + 46 + 48 + 59 + 66 + 59 + 59} \cdot 100 = \frac{34}{49.6} \cdot 100 = 68.54\%$$

Tabla 13. Valores de la uniformidad propuesta 1

	Uniformidad Áreas (%)
Escurr/Extrac	83,03
Prensa	71,19
CC	74,67
Cortadora	86,02
Pasillos	68,54

Diseño y simulación de un sistema de iluminación natural energéticamente eficiente de la planta industrial dedicada a la fabricación de papel en Utiel (Valencia)

Propuesta 2:

En este caso, para la obtención de los parámetros se utiliza la *Figura 24*. A continuación se muestra dicha Figura con las zonas a analizar resaltadas.

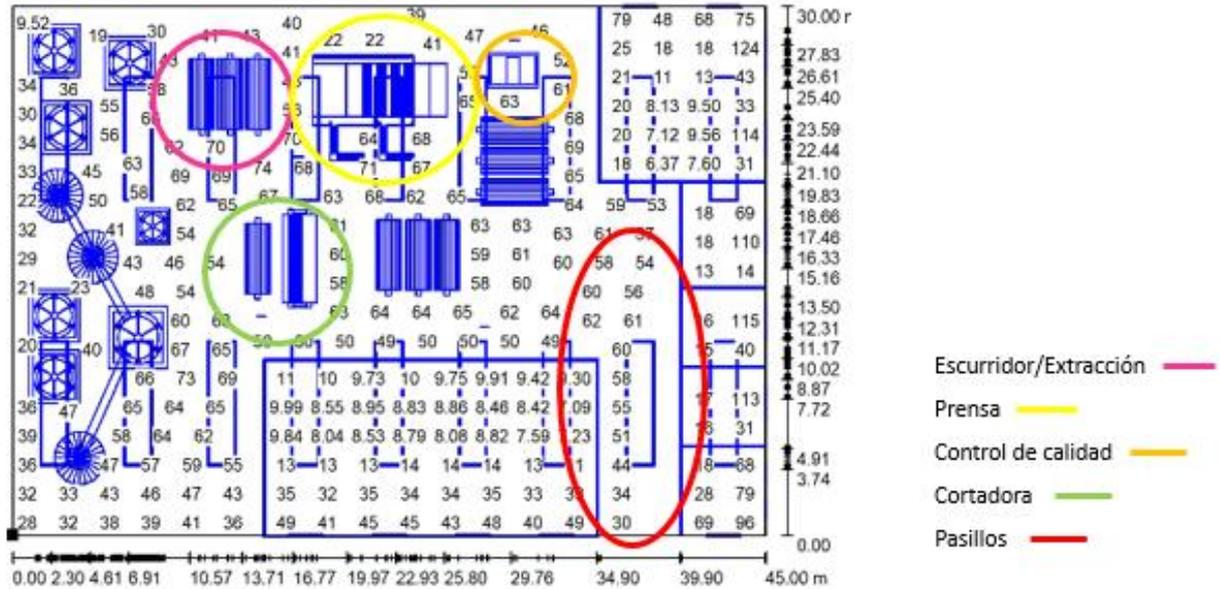


Figura 41. Señalización zonas a analizar Propuesta 2

$$U_{\text{escurr/extrac}} = \frac{41}{43 + 30 + 41 + 43 + 41 + 62 + 56 + 70 + 70 + 69} \cdot 100 = \frac{41}{52.5} \cdot 100 = 78.09\%$$

$$U_{\text{prensa}} = \frac{22}{22 + 22 + 41 + 59 + 65 + 68 + 64 + 71 + 70 + 56} \cdot 100 = \frac{22}{53.8} \cdot 100 = 40.89\%$$

$$U_{\text{CC}} = \frac{41}{41 + 39 + 47 + 46 + 52 + 61 + 68 + 63 + 65 + 59} \cdot 100 = \frac{41}{55.1} \cdot 100 = 74.41\%$$

$$U_{\text{cortadora}} = \frac{54}{63 + 61 + 60 + 58 + 63 + 68 + 74 + 67 + 69 + 54} \cdot 100 = \frac{54}{63.7} \cdot 100 = 84.77\%$$

$$U_{\text{pasillos}} = \frac{30}{30 + 34 + 44 + 51 + 55 + 58 + 60 + 61 + 62 + 56} \cdot 100 = \frac{30}{51.1} \cdot 100 = 58.71\%$$

Tabla 14. Valores de la uniformidad propuesta 2

	Uniformidad Áreas (%)
Escurr/Extrac	78,09
Prensa	40,89
CC	74,41
Cortadora	84,77
Pasillos	58,71

Diseño y simulación de un sistema de iluminación natural energéticamente eficiente de la planta industrial dedicada a la fabricación de papel en Utiel (Valencia)

Propuesta 3:

Para obtener la uniformidad por zonas en la propuesta 3 se utiliza la *Figura 34*. A continuación se muestra dicha Figura con las zonas a analizar resaltadas.



Figura 42. Señalización zonas a analizar Propuesta 2

$$U_{\text{escurr/extrac}} = \frac{42}{42 + 45 + 48 + 46 + 49 + 49 + 55 + 50 + 61 + 58} \cdot 100 = \frac{42}{50.3} \cdot 100 = 83.49\%$$

$$U_{\text{prensa}} = \frac{36}{37 + 36 + 48 + 50 + 58 + 62 + 47 + 58 + 59} \cdot 100 = \frac{36}{45.5} \cdot 100 = 79.12\%$$

$$U_{\text{CC}} = \frac{48}{48 + 50 + 53 + 52 + 52 + 57 + 56 + 60 + 62 + 58} \cdot 100 = \frac{48}{54.8} \cdot 100 = 87.59\%$$

$$U_{\text{cortadora}} = \frac{45}{59 + 60 + 57 + 59 + 58 + 65 + 45 + 45 + 60 + 60} \cdot 100 = \frac{45}{56.8} \cdot 100 = 79.22\%$$

$$U_{\text{pasillos}} = \frac{35}{35 + 38 + 40 + 44 + 44 + 46 + 53 + 57 + 60 + 60} \cdot 100 = \frac{35}{47.7} \cdot 100 = 73.37\%$$

Tabla 15. Valores de la uniformidad propuesta 3

	Uniformidad Áreas (%)
Escurr/Extrac	83,49
Prensa	79,12
CC	87,59
Cortadora	79,22
Pasillos	73,37

Como se puede observar, al calcular la uniformidad en las zonas donde los operarios realizan su trabajo, éstas cumplen el valor límite. Esto indica que para seleccionar una de las tres propuestas habrá que fijarse en el valor de la iluminación media. Sin embargo, para todas las propuestas sería necesaria la utilización de luz artificial el 21 de diciembre. Por este motivo, se ha optado por aumentar el grado de reflexión del techo al 50%.

4.7. AUMENTO GRADO DE REFLEXIÓN AL 50%

El parámetro a cumplir que determinará qué propuesta será la más favorable es la iluminación media. Como se ha observado en la *Tabla 12*, en las tres propuestas planteadas dicho valor es inferior al mínimo establecido (202.91 luxes) para el 21/12 a las 9h y 12h. Por tanto, se ha optado por aumentar el grado de reflexión del techo al 50%. De este modo, simulando en DIALux, se obtiene los valores que se muestran a continuación.

Tabla 16. Análisis propuestas con grado de transmisión del 50%

	Fecha	Hora	E_m (luxes)	E_{min} (luxes)	E_{max} (luxes)	E_{min}/E_m	E_{min}/E_{max}
PROPUESTA 1	21/12/2021	9:00	46	5,76	233	0,125	0,025
		12:00	190	24	959	0,125	0,025
	23/06/2021	12:00	374	47	1885	0,125	0,025
PROPUESTA 2	21/12/2021	9:00	45	5,7	233	0,125	0,024
		12:00	187	23	961	0,125	0,024
	23/06/2021	12:00	368	46	1890	0,125	0,024
PROPUESTA 3	21/12/2021	9:00	44	5,83	234	0,132	0,025
		12:00	182	24	963	0,132	0,025
	23/06/2021	12:00	358	47	1893	0,132	0,025

	D_m (luxes)	D_{min} (luxes)	D_{max} (luxes)	D_{min}/D_m	D_{min}/D_{max}
PROPUESTA 1	2,04	0,26	10	0,125	0,025
PROPUESTA 2	2,02	0,25	10	0,125	0,024
PROPUESTA 3	1,96	0,26	10	0,132	0,025

Analizando los valores obtenidos, se llega a la conclusión de que el grado de transmisión no puede elevarse más, ya que supondría a su vez un aumento del factor de luz diurna y superaría el límite establecido del 2%. De este modo, se ha optado por seleccionar la propuesta 1, ya que su iluminación media el día 21/12 a las 12h es la más elevada de las tres propuestas planteadas.

Una vez se ha seleccionado la propuesta 1 como la más apropiada, se realizan diferentes simulaciones a principios de diciembre y enero, dejando aproximadamente 20-30 días de margen con respecto al 21 de diciembre. De esta forma se puede estimar hasta que fecha va a ser necesaria la iluminación artificial para llegar a la iluminación media requerida a las 12h. Por tanto, se crean dos nuevas escenas de luz: 1 de diciembre y 18 enero.

Diseño y simulación de un sistema de iluminación natural energéticamente eficiente de la planta industrial dedicada a la fabricación de papel en Utiel (Valencia)

Tabla 17. Análisis nuevas escenas de luz

Fecha	Hora	E_m (luxes)	E_{min} (luxes)	E_{max} (luxes)	E_{min}/E_m	E_{min}/E_{max}
01/12/2021	12:00	204	25	1030	0,125	0,025
18/01/2022	12:00	203	25	1024	0,125	0,025

Como se puede observar en la tabla anterior, para las dos escenas de luz nuevas se cumple la iluminación media a las 12h, ya que supera los 202.91 luxes.

A continuación se muestra un resumen de la propuesta 1.

Tabla 18. Resumen propuesta 1

Fecha	Hora	E_m (luxes)	E_{min} (luxes)	E_{max} (luxes)	E_{min}/E_m	E_{min}/E_{max}
21/12/2021	9:00	46	5,76	233	0,125	0,025
	12:00	190	24	959	0,125	0,025
23/06/2021	12:00	374	47	1885	0,125	0,025
01/12/2021	12:00	204	25	1030	0,125	0,025
18/01/2022	12:00	203	25	1024	0,125	0,025
		D_m (luxes)	D_{min} (luxes)	D_{max} (luxes)	D_{min}/D_m	D_{min}/D_{max}
		2,04	0,26	10	0,125	0,025

Analizando la *Tabla 18* se observa que para mantener la iluminación media de 202.91 luxes de 9 a 12 de la mañana entre el 1 de diciembre y el 18 de enero será necesaria la utilización de luz artificial para complementar la natural.

Por otro lado, la uniformidad debe presentar un valor superior al 30%. Para un grado de transmisión del 45% la uniformidad si se cumplía (*Tabla 13*), por tanto como la uniformidad de la propuesta 1 mostrada en la *Tabla 16* varía relativamente poco con respecto a la uniformidad obtenida en la *Tabla 12*, se asume que para el caso de un grado de transmisión del 50% también se cumpliría.

Con respecto al nivel máximo de iluminación, se puede observar en la tabla anterior que en ninguna de las escenas de luz planteadas supera el valor límites de 2000 luxes.

Finalmente, el último parámetro a estudiar es el deslumbramiento. Como bien se ha comentado anteriormente, en el caso de la nave diseñada únicamente se tienen lucernarios en la cubierta, por tanto, se reduce la posibilidad de tener deslumbramientos. Además, para evitar en mayor medida los deslumbramientos, se ha optado por utilizar ventanas que no son del todo transparentes.

CAPÍTULO 5. ILUMINACIÓN ARTIFICIAL

5.1. CÁLCULO EFICIENCIA ENERGÉTICA

Una vez seleccionada la propuesta más favorable y estudiada la iluminación media en las distintas escenas de luz, se procede a describir el tipo y la cantidad de luminarias instaladas inicialmente en la nave, así como la potencia que consumen y los niveles de iluminación que producen.

En primer lugar, se valora la eficiencia energética de la instalación teniendo en cuenta la luz artificial utilizada. A continuación, se podrá valorar el ahorro y la rentabilidad al sustituir la luz artificial inicial por luz natural.

Se sabe que la planta diseñada tiene 1350 m² y se ha asumido que es necesaria una lámpara cada 20 m². Por tanto, se han seleccionado un total de 60 lámparas de modelo Geschlossen con una potencia de 420W.

Se van a realizar 3 casos distintos:

- ❖ Caso 1: Iluminación artificial 100%
- ❖ Caso 2: Iluminación artificial 30%
- ❖ Caso 3: Iluminación artificial 10%

Para obtener el valor de la eficiencia energética de la instalación (VEEI) se utiliza la siguiente ecuación.

$$VEEI = \frac{P \cdot 100}{S \cdot E_m}$$

Ecuación 5. Cálculo VEEI por cada 100 luxes

Donde

P: Potencia lámpara más el equipo auxiliar (W).

S: Superficie iluminada (m²).

E_m: Iluminación media mantenida (luxes).

5.2. CASO 1: ILUMINACIÓN ARTIFICIAL 100%

Como se ha explicado en el apartado anterior, para obtener el valor de la eficiencia energética de la instalación VEEI se necesita la potencia de la lámpara, la iluminación media y la superficie iluminada. Todos estos valores han sido mencionado anteriormente, por tanto utilizando la *Ecuación 5* se obtiene el valor de VEEI para una iluminación artificial al 100%.

Diseño y simulación de un sistema de iluminación natural energéticamente eficiente de la planta industrial dedicada a la fabricación de papel en Utiel (Valencia)

$$VEEI = \frac{420 \cdot 60 \cdot 1 \cdot 100}{1350 \cdot 202.91} = 9.20 \frac{W}{m^2}$$

Ecuación 6. Cálculo VEEI caso 1 por cada 100 luxes

Tabla 19. Valor VEEI para el caso 1

CASO 1: ILUMINACIÓN ARTIFICIAL 100%	
Lámparas	60
Potencia lámpara (W)	420
Superficie iluminada (m ²)	1350
Iluminación media (luxes)	202,91
VEEI (W/m ²)/100luxes	9,20

5.3. CASO 2: ILUMINACIÓN ARTIFICIAL 30%

En el caso 2 se obtiene la eficiencia energética de la instalación siguiendo el mismo procedimiento anterior, pero para una potencia del 30% de la potencia establecida.

$$VEEI = \frac{420 \cdot 60 \cdot 0.3 \cdot 100}{1350 \cdot 202.91} = 2.76 \frac{W}{m^2}$$

Ecuación 7. Cálculo VEEI caso 2 por cada 100 luxes

Tabla 20. Valor VEEI para el caso 2

CASO 2: ILUMINACIÓN ARTIFICIAL 30%	
Lámparas	60
Potencia lámpara (W)	420
Superficie iluminada (m ²)	1350
Iluminación media (luxes)	202,91
VEEI (W/m ²)/100luxes	2,76

5.4. CASO 3: ILUMINACIÓN ARTIFICIAL 10%

Siguiendo el mismo procedimiento que para ambos casos anteriores, se calcula la VEEI para una potencia que será el 10% de la potencia establecida.

$$VEEI = \frac{420 \cdot 0.1 \cdot 100}{1350 \cdot 202.91} = 0.92 \frac{W}{m^2}$$

Diseño y simulación de un sistema de iluminación natural energéticamente eficiente de la planta industrial dedicada a la fabricación de papel en Utiel (Valencia)

Ecuación 8. Cálculo VEEI caso 3 por cada 100 luxes

Tabla 21. Valor VEEI para el caso 3

CASO 3: ILUMINACIÓN ARTIFICIAL 10%	
Lámparas	60
Potencia lámpara (W)	420
Superficie iluminada (m²)	1350
Iluminación media (luxes)	202,91
VEEI (W/m²)/100luxes	0,92

A continuación se muestra una tabla con los tres valores obtenidos de VEEI en cada caso.

Tabla 22. Resumen valores VEEI

ILUMINACIÓN ARTIFICIAL	VEEI (W/m²)/100luxes
CASO 1: 100%	9,20
CASO 2: 30%	2,76
CASO 3: 10%	0,92

Como se puede observar en la *Tabla 22* cuanto mayor es la potencia, mayor es el valor de eficiencia energética de la instalación. Para tener un sistema energéticamente eficiente debe tenerse un VEEI próximo a 0.

Al tener una iluminación natural y artificial combinada se produce un ahorro energético y, por tanto, el VEEI disminuye.

Diseño y simulación de un sistema de iluminación natural energéticamente eficiente de la planta industrial dedicada a la fabricación de papel en Utiel (Valencia)

CAPÍTULO 6. ANÁLISIS ECONÓMICO

Para saber qué sistema es el más eficiente se realiza un análisis económico. De los casos anteriores hay que seleccionar la propuesta en la cual se obtengan los resultados más favorables. Como ya se ha comentado anteriormente durante unas semanas del año no se cumplía la iluminación media requerida de 202.91 luxes, por tanto, es necesaria la combinación de luz natural y artificial.

6.1. CONSUMO ENERGÉTICO

Para poder realizar el análisis económico, previamente hay que estimar el consumo energético de los elementos de la nave industrial para saber la potencia a contratar y seleccionar una tarifa.

Los elementos que necesitan energía eléctrica son los siguientes: la maquinaria utilizada durante el proceso de obtención del papel, las carretillas eléctricas para transportar el producto terminado al almacén y las luminarias. A continuación se muestran las unidades existentes de cada elemento.

Tabla 23. Elementos que utilizan energía eléctrica

Elementos	Unidades
Descortezadora	1
Cortadora troncos	1
Lavado	2
Horno	1
Círculo recuperación	1
Espesador	1
Blanqueador	1
Escurreidor	1
Extractor	1
Prensa	1
Rulos	1
Bobinadora	1
Cortadora papel	1
Carretilla	2
Luminarias	60

Diseño y simulación de un sistema de iluminación natural energéticamente eficiente de la planta industrial dedicada a la fabricación de papel en Utiel (Valencia)

Es necesario determinar la potencia a contratar con la compañía suministradora, la cual se ven reflejada en la siguiente tabla.

Tabla 24. Cálculo potencia total a contratar

Elementos	Unidades	Potencia por unidad (kW)	Potencia total (kW)
Descortezadora	1	12	12
Cortadora troncos	1	7,5	7,5
Lavado	2	7	14
Horno	1	30	30
Circuito recuperación	1	30	30
Espesador	1	5	5
Blanqueador	1	25	25
Escurreidor	1	7	7
Extractor	1	7	7
Prensa	1	6	6
Rulos	1	8	8
Bobinadora	1	7,5	7,5
Cortadora papel	1	7,5	7,5
Carretilla	2	3,5	7
Luminarias	60	0,42	25,2
POTENCIA TOTAL (kW)			198,7

Una vez sabidas las unidades de cada elemento y estimado la potencia, hay que determinar las horas de funcionamiento de cada mes para cada periodo (punta, llano y valle), ya que, en función del periodo de funcionamiento la demanda variará y, por tanto, también lo hará el precio.

La planta de producción diseñada funciona de lunes a viernes de 9:00 a 18:00 durante todo el año. La tarifa contratada ha sido la 3.1a., ya que se ha estimado que la potencia demandada es inferior a 450kW.

Tabla 25. Tarifa 3.1a (IBERDROLA, 2021)

TARIFA 3.1A	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3
Término de potencia (Tp) (€/kW-año)	59,173468	36,490689	8,367731
Término de energía (Te) (€/kW·h)	0,014335	0,012754	0,007805

Los periodos 1, 2 y 3 hacen referencia al punta, llano y valle, respectivamente. En la tabla siguiente se muestran cómo se distribuyen los periodos durante el año. Hay que tener en cuenta que a efectos del calendario eléctrico la estación de verano comprende desde el cambio de hora del último domingo de marzo hasta el cambio de hora del último domingo de octubre. Por tanto, los meses de noviembre, diciembre, enero, febrero y marzo son invierno.

Diseño y simulación de un sistema de iluminación natural energéticamente eficiente de la planta industrial dedicada a la fabricación de papel en Utiel (Valencia)

Tabla 26. Tarifa 3.1a (Colón Cortegoso, 2016)

		0_1	1_2	2_3	3_4	4_5	5_6	6_7	7_8	8_9	9_10	10_11	11_12	12_13	13_14	14_15	15_16	16_17	17_18	18_19	19_20	20_21	21_22	22_23	23_24
INVIERNO	ENERO	P3	P2	P2	P2	P2	P2	P2	P2	P2	P2	P1	P1	P1	P1	P1	P1	P2							
	FEBRERO	P3	P2	P2	P2	P2	P2	P2	P2	P2	P2	P1	P1	P1	P1	P1	P1	P2							
	MARZO	P3	P2	P2	P2	P2	P2	P2	P2	P2	P2	P1	P1	P1	P1	P1	P1	P2							
VERANO	ABRIL	P3	P2	P2	P1	P1	P1	P1	P1	P1	P2														
	MAYO	P3	P2	P2	P1	P1	P1	P1	P1	P1	P2														
	JUNIO	P3	P2	P2	P1	P1	P1	P1	P1	P1	P2														
	JULIO	P3	P2	P2	P1	P1	P1	P1	P1	P1	P2														
	AGOST	P3	P2	P2	P1	P1	P1	P1	P1	P1	P2														
	SEPTIEMBRE	P3	P2	P2	P1	P1	P1	P1	P1	P1	P2														
	OCTUBRE	P3	P2	P2	P1	P1	P1	P1	P1	P1	P2														
	NOVIEMBRE	P3	P2	P2	P2	P2	P2	P2	P2	P2	P2	P2	P1	P1	P1	P1	P1	P2							
INVIERNO	DICIEMBRE	P3	P2	P2	P2	P2	P2	P2	P2	P2	P2	P1	P1	P1	P1	P1	P2								
FINES DE SEMANA Y FESTIVOS		P3	P3	P3	P3	P3	P3	P3	P3	P3	P1	P1	P1	P1	P1	P1									

Según el calendario laboral de 2021 los días festivos en la Comunidad Valenciana son los siguientes: 01/01, 06/01, 19/03, 02/04, 05/04, 01/05, 24/06, 09/10, 12/10, 01/11, 06/12, 08/12 y 25/12 (Generalitat Valenciana, 2021). Sabiendo que los días mencionados y los fines de semana no se trabaja, se procede a calcular las horas mensuales de cada periodo durante la jornada laboral (de lunes a viernes de 9:00h a 18:00h).

Tabla 27. Periodos durante la jornada laboral

		9_10	10_11	11_12	12_13	13_14	14_15	15_16	16_17	17_18
INVIERNO	ENERO	P2	P2	P2	P2	P2	P2	P2	P2	P1
	FEBRERO	P2	P2	P2	P2	P2	P2	P2	P2	P1
	MARZO	P2	P2	P2	P2	P2	P2	P2	P2	P1
VERANO	ABRIL	P2	P1	P1	P1	P1	P1	P1	P2	P2
	MAYO	P2	P1	P1	P1	P1	P1	P1	P2	P2
	JUNIO	P2	P1	P1	P1	P1	P1	P1	P2	P2
	JULIO	P2	P1	P1	P1	P1	P1	P1	P2	P2
	AGOST	P2	P1	P1	P1	P1	P1	P1	P2	P2
	SEPTIEMBRE	P2	P1	P1	P1	P1	P1	P1	P2	P2
	OCTUBRE	P2	P1	P1	P1	P1	P1	P1	P2	P2
	NOVIEMBRE	P2	P2	P2	P2	P2	P2	P2	P2	P1
INVIERNO	DICIEMBRE	P2	P2	P2	P2	P2	P2	P2	P2	P1

Diseño y simulación de un sistema de iluminación natural energéticamente eficiente de la planta industrial dedicada a la fabricación de papel en Utiel (Valencia)

Hay que tener en cuenta que, como se puede observar en la *Tabla 27*, el periodo 3 no se refleja durante la jornada laboral.

Tabla 28. Horas mensuales de cada periodo

	HORAS DIARIAS			DIAS LABORABLES	HORAS MENSUALES		
	P1	P2	P3		P1	P2	P3
ENERO	1	8	0	19	19	152	0
FEBRERO	1	8	0	20	20	160	0
MARZO	1	8	0	22	22	176	0
ABRIL	6	3	0	20	120	60	0
MAYO	6	3	0	21	126	63	0
JUNIO	6	3	0	21	126	63	0
JULIO	6	3	0	22	132	66	0
AGOST	6	3	0	22	132	66	0
SEPTIEMBRE	6	3	0	22	132	66	0
OCTUBRE	6	3	0	20	120	60	0
NOVIEMBRE	1	8	0	21	21	168	0
DICIEMBRE	1	8	0	21	21	168	0
				HORAS TOTALES	991	1268	

En la tabla anterior, las tres columnas izquierdas muestran las horas diarias de cada periodo durante la jornada laboral. Por tanto, sabiendo esto y los días laborables de cada mes, se obtienen las horas mensuales de cada periodo.

6.2. TÉRMINO DE POTENCIA Y ENERGÍA

Para calcular el coste anual de las luminarias es necesario obtener los términos de potencia y energía para cada periodo.

❖ Término de potencia (T_p)

Para realizar el cálculo del término de potencia de las maquinas mencionadas anteriormente se utiliza la siguiente expresión:

$$T_p(\text{€}) = \sum_i P_t \cdot P_i$$

Ecuación 9. Cálculo término de potencia (T_p)

Donde

P_t : Potencia total de demanda (kW)

P_i : Precio por periodo anual ($\frac{\text{€}}{kW \cdot \text{año}}$)

i : Número de periodo

❖ Término de energía (T_e)

Para realizar el cálculo del término de energía ha de tenerse en cuenta que, como los equipos no aportan información para realizar el análisis económico, únicamente se valora el consumo de las luminarias. Para calcular dicho término se utiliza la siguiente expresión:

Diseño y simulación de un sistema de iluminación natural energéticamente eficiente de la planta industrial dedicada a la fabricación de papel en Utiel (Valencia)

$$T_E(\text{€}) = \sum_i P_t \cdot P_i \cdot h_i$$

Ecuación 10. Cálculo del término de energía (T_E)

Donde

P_t : Potencia total de demanda (kW)

P_i : Precio por periodo por hora ($\frac{\text{€}}{\text{kW}\cdot\text{h}}$)

i : Número de periodo

h_i : Horas por periodo de actividad (h)

Una vez obtenido el término de potencia y energía, se puede calcular el impuesto sobre electricidad con la siguiente fórmula:

$$\text{Imp Electricidad}(\text{€}) = 5.1127\% \cdot (T_p + T_E)$$

Ecuación 11. Cálculo impuesto sobre electricidad

Hay que tener en cuenta la necesidad de alquilar un contador de electricidad. Entre las tarifas de alquiler de contadores publicados en el BOE de 03 de agosto de 2013 se ha optado por uno trifásico con discriminación y telegestión, cuyo precio es de $0.044712 \frac{\text{€}}{\text{dia}}$. Por tanto, supondría un coste anual de:

$$\text{Coste anual contador} = 365 \cdot 0.044712 = 16.3199\text{€}$$

6.3. ILUMINACIÓN ARTIFICIAL 100%

En el primer caso, como se ha mencionado anteriormente, se tiene el 100% de luz artificial. Por tanto, el consumo total de luminarias se obtiene de la siguiente manera:

$$\text{Consumo total 100\% luminarias} = 60 \cdot 0.42 = 25.2 \text{ kW}$$

De este modo, con el sumatorio de este término y el consumo de la maquinaria se obtiene el consumo total en kW, como se puede observar en la siguiente tabla.

Diseño y simulación de un sistema de iluminación natural energéticamente eficiente de la planta industrial dedicada a la fabricación de papel en Utiel (Valencia)

Tabla 29. Consumos para iluminación 100% artificial

100 % artificial	
Luminarias totales	60
Consumo luminaria por unidad (kW)	0,42
Consumo total 100% luminarias (kW)	25,2
Consumo maquinaria (kW)	173,5
Consumo total (kW)	198,7

Una vez obtenido el consumo total, se pueden obtener los términos de potencia y energía para cada periodo utilizando la Ecuación 9 y la Ecuación 10, respectivamente.

$$T_{pP1} = 198.7 \text{ kW} \cdot 59.173468 \frac{\text{€}}{\text{kW} \cdot \text{año}} = 11757.77 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

$$T_{pP2} = 198.7 \text{ kW} \cdot 36.490689 \frac{\text{€}}{\text{kW} \cdot \text{año}} = 7250.70 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

$$T_{EP1} = 198.7 \text{ kW} \cdot 0.014335 \frac{\text{€}}{\text{kW} \cdot \text{h}} \cdot 991 \frac{\text{horas}}{\text{año}} = 2822.73 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

$$T_{EP2} = 198.7 \text{ kW} \cdot 0.012754 \frac{\text{€}}{\text{kW} \cdot \text{h}} \cdot 1268 \frac{\text{horas}}{\text{año}} = 3213.39 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

Tabla 30. Gasto anual para iluminación 100% artificial

	P1	P2	SUMATORIO (kW)
Término de potencia, T_p (€)	11757,77	7250,70	19008,47
Término de energía, T_E (€)	2822,73	3213,39	6036,12
Total (€)	14580,50	10464,09	25044,59

A continuación, con los términos de potencia y energía se puede hallar el impuesto sobre electricidad haciendo uso de la Ecuación 11.

$$\text{Imp Electricidad} = 0.051127 \cdot (19008.47 + 6036.12) = 1280.45 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

Como estos tres términos calculados y el precio del contador (16,32€), se puede obtener el precio del IVA y finalmente, el precio total para una iluminación 100% artificial.

$$\text{IVA} = (19008.47 + 6036.12 + 1280.45 + 16.32) \cdot 0.21 = 5531.69 \text{ €}$$

$$\text{Precio total} = 19008.47 + 6036.12 + 1280.45 + 16.32 + 5531.69 = 31873.05 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

Diseño y simulación de un sistema de iluminación natural energéticamente eficiente de la planta industrial dedicada a la fabricación de papel en Utiel (Valencia)

Tabla 31. Tabla resumen coste anual para iluminación 100% artificial

	TOTAL (€)
Término de potencia, T_p (€)	19008,47
Término de energía, T_E (€)	6036,12
Impuesto sobre electricidad (€)	1280,45
Precio contador (€)	16,32
IVA (€)	5531,69
TOTAL (€)	31873,05

6.4. ILUMINACIÓN ARTIFICIAL 30%

Para el caso del 30% de la iluminación artificial se sigue el mismo procedimiento anterior.

$$\text{Luminarias } 30\% = 60 \cdot 0.3 = 18 \text{ lámparas}$$

$$\text{Consumo total } 30\% \text{ luminarias} = 18 \cdot 0.42 = 7.56 \text{ kW}$$

Tabla 32. Consumos para iluminación 30% artificial

30 % artificial	
30% luminarias	18
Consumo luminaria por unidad (kW)	0,42
Consumo total 30% luminarias (kW)	7,56
Consumo maquinaria (kW)	173,5
Consumo total (kW)	181,06

$$T_{pP1} = 181.06 \text{ kW} \cdot 59.173468 \frac{\text{€}}{\text{kW} \cdot \text{año}} = 10713.95 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

$$T_{pP2} = 181.06 \text{ kW} \cdot 36.490689 \frac{\text{€}}{\text{kW} \cdot \text{año}} = 6607 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

$$T_{EP1} = 181.06 \text{ kW} \cdot 0.014335 \frac{\text{€}}{\text{kW} \cdot \text{h}} \cdot 991 \frac{\text{horas}}{\text{año}} = 2572.14 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

$$T_{EP2} = 181.06 \text{ kW} \cdot 0.012754 \frac{\text{€}}{\text{kW} \cdot \text{h}} \cdot 1268 \frac{\text{horas}}{\text{año}} = 2928.12 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

Diseño y simulación de un sistema de iluminación natural energéticamente eficiente de la planta industrial dedicada a la fabricación de papel en Utiel (Valencia)

Tabla 33. Gasto anual para iluminación 30% artificial

	P1	P2	SUMATORIO (kW)
Término de potencia, T_p (€)	10713,95	6607,00	17320,95
Término de energía, T_E (€)	2572,14	2928,12	5500,25
Total (€)	13286,08	9535,12	22821,20

$$\text{Imp Electricidad} = 0.051127 \cdot (17320.95 + 5500.25) = 1166.78 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

$$\text{IVA} = (17320.95 + 5500.25 + 1166.78 + 16.32) \cdot 0.21 = 5040.90 \text{ €}$$

$$\text{Precio total} = 17320.95 + 5500.25 + 1166.78 + 16.32 + 5040.90 = 29045.21 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

Tabla 34. Tabla resumen coste anual para iluminación 30% artificial

	TOTAL (€)
Término de potencia, T_p (€)	17320,95
Término de energía, T_E (€)	5500,25
Impuesto sobre electricidad (€)	1166,78
Precio contador (€)	16,32
IVA (€)	5040,90
TOTAL (€)	29045,21

6.5. ILUMINACIÓN ARTIFICIAL 10%

Para el caso del 10% de la iluminación artificial se procede de la misma forma.

$$\text{Luminarias 10\%} = 60 \cdot 0.1 = 6 \text{ lámparas}$$

$$\text{Consumo total 30\% luminarias} = 6 \cdot 0.42 = 2.52 \text{ kW}$$

Tabla 35. Consumos para iluminación 10% artificial

10 % artificial	
Luminarias 10%	6
Consumo luminaria por unidad (kW)	0,42
Consumo total 10% luminarias (kW)	2,52
Consumo maquinaria (kW)	173,5
Consumo total (kW)	176,02

Diseño y simulación de un sistema de iluminación natural energéticamente eficiente de la planta industrial dedicada a la fabricación de papel en Utiel (Valencia)

$$T_{p_{P1}} = 176.02 \text{ kW} \cdot 59.173468 \frac{\text{€}}{\text{kW} \cdot \text{año}} = 10415.71 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

$$T_{p_{P2}} = 176.02 \text{ kW} \cdot 36.490689 \frac{\text{€}}{\text{kW} \cdot \text{año}} = 6423.09 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

$$T_{E_{P1}} = 176.02 \text{ kW} \cdot 0.014335 \frac{\text{€}}{\text{kW} \cdot \text{h}} \cdot 991 \frac{\text{horas}}{\text{año}} = 2500.54 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

$$T_{E_{P2}} = 176.02 \text{ kW} \cdot 0.012754 \frac{\text{€}}{\text{kW} \cdot \text{h}} \cdot 1268 \frac{\text{horas}}{\text{año}} = 2846.61 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

Tabla 36. Gasto anual para iluminación 10% artificial

	P1	P2	SUMATORIO (kW)
Término de potencia, T_p (€)	10415,71	6423,09	16838,80
Término de energía, T_E (€)	2500,54	2846,61	5347,15
Total (€)	12916,25	9269,70	22185,95

$$\text{Imp Electricidad} = 0.051127 \cdot (16838.80 + 5347.15) = 1134.30 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

$$\text{IVA} = (16838.80 + 5347.15 + 1134.30 + 16.32) \cdot 0.21 = 4900.68 \text{ €}$$

$$\text{Precio total} = 16838.80 + 5347.15 + 1134.30 + 16.32 + 4900.68 = 28237.25 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

Tabla 37. Tabla resumen coste anual para iluminación 10% artificial

	TOTAL (€)
Término de potencia, T_p (€)	16838,80
Término de energía, T_E (€)	5347,15
Impuesto sobre electricidad (€)	1134,30
Precio contador (€)	16,32
IVA (€)	4900,68
TOTAL (€)	28237,25

6.6. ILUMINACIÓN NATURAL 100%

En este último caso, no se utilizan las luminarias, por tanto, el consumo total será el equivalente al consumo de la maquinaria, el cual es de 173.5 kW.

Tabla 38. Consumo para iluminación 100% natural

100 % natural	
Consumo total (kW)	173,5

Diseño y simulación de un sistema de iluminación natural energéticamente eficiente de la planta industrial dedicada a la fabricación de papel en Utiel (Valencia)

$$T_{p_{P1}} = 173.5 \text{ kW} \cdot 59.173468 \frac{\text{€}}{\text{kW} \cdot \text{año}} = 10266.60 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

$$T_{p_{P2}} = 173.5 \text{ kW} \cdot 36.490689 \frac{\text{€}}{\text{kW} \cdot \text{año}} = 6331.13 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

$$T_{E_{P1}} = 173.5 \text{ kW} \cdot 0.014335 \frac{\text{€}}{\text{kW} \cdot \text{h}} \cdot 991 \frac{\text{horas}}{\text{año}} = 2464.74 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

$$T_{E_{P2}} = 173.5 \text{ kW} \cdot 0.012754 \frac{\text{€}}{\text{kW} \cdot \text{h}} \cdot 1268 \frac{\text{horas}}{\text{año}} = 2805.85 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

Tabla 39. Gasto anual para iluminación 100% natural

	P1	P2	SUMATORIO (kW)
Término de potencia, T_p (€)	10266,60	6331,13	16597,73
Término de energía, T_E (€)	2464,74	2805,85	5270,59
Total (€)	12731,34	9136,99	21868,32

$$\text{Imp Electricidad} = 0.051127 \cdot (16597.73 + 5270.59) = 1118.06 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

$$\text{IVA} = (16597.73 + 5270.59 + 1118.06 + 16.32) \cdot 0.21 = 4830.57 \text{ €}$$

$$\text{Precio total} = 16597.73 + 5270.59 + 1118.06 + 16.32 + 4830.57 = 27833.27 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

Tabla 40. Tabla resumen coste anual para iluminación 100% natural

	TOTAL (€)
Término de potencia, T_p (€)	16597,73
Término de energía, T_E (€)	5270,59
Impuesto sobre electricidad	1118,06
Precio contador (€)	16,32
IVA (€)	4830,57
TOTAL (€)	27833,27

6.7. AHORRO Y RENTABILIDAD

6.7.1. Ahorro

Una vez obtenido el coste anual para los 4 casos planteados, se comparan cada uno de ellos con la iluminación 100% artificial para saber el ahorro eléctrico obtenido de la siguiente forma:

$$\text{Ahorro}_{100\%/30\%} = 31873.05 - 29045.21 = 2827.84 \text{ €}$$

$$\text{Ahorro}_{100\%/10\%} = 31873.05 - 28237.25 = 3635.8 \text{ €}$$

$$\text{Ahorro}_{100\%/100\%} = 31873.05 - 27833.27 = 4039.78 \text{ €}$$

Tabla 41. Tabla resumen ahorro eléctrico

Caso	Coste anual (€)	Ahorro (€)
100% artificial	31873,05	-
30% artificial	29045,21	2827,84
10% artificial	28237,25	3635,8
100% natural	27833,27	4039,78

Como ya se ha estudiado durante el proyecto, es inviable la utilización únicamente de luz natural, ya que la iluminación media en determinadas fechas del año es insuficiente. De este mismo modo, se descarta la opción de utilizar 100% luz artificial, ya que económicamente no es factible. Así pues, se procede a analizar la rentabilidad de las opciones de iluminación 30% y 10% artificial.

6.7.2. Rentabilidad

A continuación, se calcula el valor actual neto (VAN) y la tasa interna de rentabilidad (TIR) para evaluar la rentabilidad del proyecto.

❖ VAN

$$VAN = -I_0 + \sum_{j=0}^n \frac{FC_j}{(1+i)^j}$$

Ecuación 12. Cálculo del VAN

Donde

I_0 : Inversión el año 0 (€)

j : Año en curso

FC_j : Flujo de Caja para el año j

i : la TIN o el IPC

n : Horizonte temporal

❖ TIR

$$TIR = -I_0 + \sum_{j=0}^n \frac{FC_j}{(1+\lambda)^j}$$

Ecuación 13. Cálculo del TIR

Diseño y simulación de un sistema de iluminación natural energéticamente eficiente de la planta industrial dedicada a la fabricación de papel en Utiel (Valencia)

Donde

I_0 : Inversión el año 0 (€)

j : Año en curso

FC_j : Flujo de Caja para el año j

λ : la TIR

n : Horizonte temporal

Para poder realizar el cálculo de ambos parámetros es necesario estimar la vida del proyecto, es decir, el tiempo durante el cual se producen salidas y entradas de dinero. (Fuentes Bargues, 2020). Se ha establecido un horizonte temporal de 35 años y se ha asumido un aumento del 1% del coste de electricidad y un interés del 5%.

Sabiendo que la inversión inicial calculada en el presupuesto es de 66748€ y que los flujos de caja quedan mostrados en la *Tabla 41*, con la utilización de la *Ecuación 12* se obtiene el valor del VAN.

❖ Iluminación 10% artificial

$$VAN = -66748 + \frac{3635.80}{(1 + 0.05)^1} + \frac{3672.16}{(1 + 0.05)^2} + \dots + \frac{5099.49}{(1 + 0.05)^{35}} = 803.68$$

❖ Iluminación 30% artificial

$$VAN = -66748 + \frac{2827.84}{(1 + 0.05)^1} + \frac{2856.12}{(1 + 0.05)^2} + \dots + \frac{3966.26}{(1 + 0.05)^{35}} = -14207.88$$

A continuación, se ha obtenido el VAN para ambos casos anteriores para diferentes intereses.

Tabla 42. Resultados VAN

	VAN 1%	VAN 2%	VAN 3%	VAN 5%	VAN 6%
30 % artificial	31246,45	15728,64	3462,02	-14207	-20615,04
10 % artificial	59245,07	39293,56	23522,17	803,68	-7434,09

Diseño y simulación de un sistema de iluminación natural energéticamente eficiente de la planta industrial dedicada a la fabricación de papel en Utiel (Valencia)

Finalmente se calcula el TIR utilizando la *Ecuación 13*.

❖ Iluminación 10% artificial

$$0 = -66748 + \frac{3635.80}{(1 + \lambda)^1} + \frac{3672.16}{(1 + \lambda)^2} + \dots + \frac{5099.49}{(1 + \lambda)^{35}}$$

$$\lambda = 5.09\%$$

❖ Iluminación 30% artificial

$$0 = -66748 + \frac{2827.84}{(1 + \lambda)^1} + \frac{2856.12}{(1 + \lambda)^2} + \dots + \frac{3966.26}{(1 + \lambda)^{35}}$$

$$\lambda = 3.33\%$$

Tabla 43. Valores TIR

	TIR
30 % artificial	3,33%
10 % artificial	5,09%

Observando los resultados obtenidos, se concluye que el sistema de iluminación natural es rentable.

Para un 30% de luz artificial, el proyecto es rentable cuando el interés es inferior al 3.33%. De este mismo modo, para un 10% de luz artificial, el proyecto es rentable cuando el interés es menor al 5.09%. Por tanto, se concluye que, con unos intereses relativamente bajos, la utilización de luz artificial y natural combinada es rentable.

Diseño y simulación de un sistema de iluminación natural energéticamente eficiente de la planta industrial dedicada a la fabricación de papel en Utiel (Valencia)

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES

Para finalizar el trabajo, se comprueba que se han cumplido los objetivos planteados al inicio de este y se obtienen las siguientes conclusiones:

- ❖ Al modelar y simular una nave industrial con la herramienta DIALux se ha observado que la iluminación 100% natural no es posible. Esto es debido a que durante una determinada franja horaria (de 9h a 12h) durante aproximadamente un mes y medio (1 de diciembre-18 de enero) la iluminación media obtenida es inferior a la requerida. Por tanto, la opción correcta es la combinación de luz natural y artificial.
- ❖ La disposición más viable de lucernarios ha sido la propuesta 1, debido a que al simularla en DIALux es la que mejor se ajusta a los valores límites establecidos de iluminación media, uniformidad, deslumbramientos y factor de luz diurna.
- ❖ El valor límite de iluminación máxima de 2000 luxes no ha sido sobrepasado en ninguna de las propuestas planteadas en ninguna fecha del año, lo cual indica la posibilidad de prescindir de sistemas para disminuir o eliminar los excesos de luz durante el verano.
- ❖ Un sistema energéticamente eficiente debe tener un valor de eficiencia energética (VEEI) próximo a 0. La combinación de iluminación natural y artificial produce un ahorro energético. Cuanto menor es el porcentaje de luz artificial, menor es la potencia y, por tanto, menor es el VEEI.
- ❖ Para un horizonte temporal de 35 años, se ha obtenido rentabilidad para las propuestas de iluminación mixta (30% artificial/70% natural y 10% artificial/90% natural) cuando la TIR (λ) no supere el 3.33% y 5.09%, respectivamente. Dependiendo del interés que se tenga, se optará por una opción u otra.

Diseño y simulación de un sistema de iluminación natural energéticamente eficiente de la planta industrial dedicada a la fabricación de papel en Utiel (Valencia)

CAPÍTULO 8. BIBLIOGRAFÍA

- Asociación Española de Fabricantes de Pasta, Papel y Cartón (2018). *Agenda Sectorial Industria Papelera*. Recuperado el 20 de mayo de 2021, de <https://industria.gob.es/es-es/Servicios/AgendasSectoriales/Agenda%20sectorial%20de%20la%20industria%20papelera/agenda-sectorial-Industria-papelera.pdf>
- Atabal, F. (2019). *Industria Papelera en España: 4,5 del PIB (Cartonajes Malagueños, S.L.)*. Recuperado el 20 de mayo de 2021, de <https://www.cartonajes-malaga.com/es/industria-papelera-espana/>
- Cantavalle, S. (2019). *Historia del papel: desde los orígenes hasta hoy*. Recuperado el 20 de mayo de 2021, de <https://www.pixartprinting.es/blog/historia-papel/>
- Colón Cortegoso, J. (2016). *Gesternova energía. Todo sobre la tarifa de electricidad de Alta Tensión 3.1A*
- Comisión de Normalización Europea (2002). Obtenido de *UNE 12464-1. Norma Europea sobre Iluminación para Interiores*
- Fuentes Bargues, J. L. (2020). *Proyectos en Ingeniería Química*. Obtenido de Universidad Politécnica de Valencia.
- Generalitat Valenciana (2021). Recuperado el 5 de julio de 2021, de https://www.gva.es/va/inicio/area_de_prensa/not_detalle_area_prensa?id=897302
- IBERDROLA (2021). Recuperado el 5 de julio de 2021, de <https://www.iberdrola.es/empresas/informacion/mercado-energetico>
- IBERDROLA (2021). Recuperado el 5 de julio de 2021, de <https://www.iberdrola.es/negocios/informacion/alquiler-de-contador#nota1>
- Interempresas (2020). *El papel y el cartón, la opción sostenible de envase en gran consumo*. Recuperado el 20 de mayo de 2021, de <https://www.interempresas.net/Envase/Articulos/298674-El-papel-y-el-carton-la-opcion-sostenible-de-envase-en-gran-consumo.html>
- Robosup (2019). *Propiedades de la celulosa, producción y aplicación*. Recuperado el 20 de mayo de 2021, de <https://sciencealpha.com/es/cellulose-properties-production-and-application/>
- Santamarina Siurana, M.C. (2021). *Construcción y Arquitectura Industrial*. Obtenido de Universidad Politécnica de Valencia

Diseño y simulación de un sistema de iluminación natural energéticamente eficiente de la planta industrial dedicada a la fabricación de papel en Utiel (Valencia)

-Schapiro, D. (2017). *Vida útil de LED ¿Cuántos años dura una lámpara?* Recuperado el 28 de julio de 2021 de <https://dmdiluminacion.com/vida-util-led-cuantos-anos-dura-una-lampara/>

DOCUMENTO II: **PRESUPUESTO**

PRESUPUESTO

Una vez desarrollada la memoria descriptiva, hay que elaborar un presupuesto. Para su realización se ha utilizado una herramienta de generación de precios (CYPE Ingenieros, S.A.) utilizada previamente en una asignatura del grado. Es un software que permite la obtención de costes de construcción ajustados al mercado.

El presupuesto se realiza de la propuesta más favorable detallada durante la memoria descriptiva, en este caso, la propuesta 1. Ésta cuenta con 4 lucernarios de 40mx1.25m, lo cual supone una superficie de 50 m² por luminaria y 200 m² de superficie total de ventanas.

1.1. PRESUPUESTO INSTALACION LUMINARIAS

En primer lugar, hay que tener en cuenta la preparación de la cubierta para disponer los lucernarios en ella.

Tabla 44. Unidad de obra 1.1

CÓDIGO	UNIDAD	DESCRIPCIÓN	RENDIMIENTO	PRECIO UNITARIO (€)	IMPORTE (€)	TOTAL
1.1	m ²	Demolición y preparación cubierta para disponer lucernarios				
	Equipo y maquinaria					
	h	Martillo neumático	0,103	4,12	0,42	
	h	Compresor portátil diesel media presión 10 m ³ /min	0,103	6,99	0,72	
	Mano de obra					
	h	Peón especializado construcción	0,1	18,12	1,81	
	h	Peón ordinario construcción	0,2	17,82	3,56	
	Costes directos complementarios					
	%	Costes directos complementarios	2	6,51	0,13	
						6.64€

Diseño y simulación de un sistema de iluminación natural energéticamente eficiente de la planta industrial dedicada a la fabricación de papel en Utiel (Valencia)

Tabla 45. Unidad de obra 1.2

CÓDIGO	UNIDAD	DESCRIPCIÓN	RENDIMIENTO	PRECIO UNITARIO (€)	IMPORTE (€)	TOTAL
1.2	m ²	Lucernario a dos aguas con una luz máxima menor de 3 m revestido con placas alveolares de policarbonato celular incoloras de 6 mm de espesor.				
	Materiales					
	m ²	Repercusión por m ² de lucernario a dos aguas con una luz máxima menor de 3 m de los elementos de remate, tornillería y piezas de anclaje del lucernario.	1	18,54	18,54	
	m ²	Placa alveolar translúcida, de policarbonato celular, espesor 6 mm, incolora.	1,05	22,69	23,82	
	m	Perfil universal de aluminio, con gomas de estanqueidad de EPDM, para cierres de juntas entre placas de policarbonato celular en lucernarios.	3	12,49	37,47	
	Ud	Material auxiliar para montaje de placas de policarbonato celular en lucernarios.	2	1,38	2,76	
	Mano de obra					
	h	Oficial 1ª montador	3,639	19,56	71,18	
	h	Ayudante montador	3,639	18,05	65,68	
	Costes directos complementarios					
%	Costes directos complementarios	2	284,55	5,69		
						225,14 €

Tabla 46. Mediciones de cada unidad de obra

CODIGO	UNIDAD	DESCRIPCIÓN	Cantidad	Largo	Ancho	TOTAL
1.1	m ²	Demolición y preparación cubierta para disponer lucernarios				
		Lucernarios	4	40	1,25	200
1.2	m ²	Lucernario a dos aguas con una luz máxima menor de 3 m revestido con placas alveolares de policarbonato celular incoloras de 6 mm de espesor.				
		Lucernarios	4	40	1,25	200

Una vez obtenidos los precios de cada unidad de obra y las mediciones correspondientes, se procede a calcular el presupuesto de inversión.

En primer lugar, se calcula el importe de cada unidad de obra para sus respectivas medidas. La suma de dichas unidades de obra permite obtener el Presupuesto de Ejecución Material (PEM).

$$PEM = TOTAL_{1.1} + TOTAL_{1.2}$$

Ecuación 14. Cálculo PEM

Tabla 47. Obtención PEM

CODIGO	UNIDAD	DESCRIPCIÓN	IMPORTE	MEDICIONES	TOTAL
1.1	m ²	Demolición y preparación cubierta para disponer lucernarios	6,64 €	200	1.328,00 €
1.2	m ²	Lucernario a dos aguas con una luz máxima menor de 3 m revestido con placas alveolares de policarbonato celular incoloras de 6 mm de espesor.	225,14 €	200	45.028,00 €
Presupuesto de Ejecución Material (PEM)					46.356,00 €

Diseño y simulación de un sistema de iluminación natural energéticamente eficiente de la planta industrial dedicada a la fabricación de papel en Utiel (Valencia)

A continuación, sabiendo que los Gastos Generales(GG) son de un 13% y el Beneficio Industrial(BI) de un 6% respecto del PEM, se calculan de la siguiente forma:

$$GG = PEM \cdot 0.13$$

Ecuación 15. Cálculo Gastos Generales

$$BI = PEM \cdot 0.06$$

Ecuación 16. Cálculo Beneficio Industrial

Seguidamente, se obtiene el Presupuesto de Ejecución por Contrata (PEC).

$$PEC = PEM + GG + BI$$

Ecuación 17. Cálculo PEC

Finalmente, sabiendo que el IVA es el 21% del PEC, se puede obtener el Presupuesto de Inversión.

$$\text{Presupuesto de Inversión} = PEC + IVA$$

Ecuación 18. Cálculo Presupuesto de Inversión

Tabla 48. Presupuesto de Inversión instalación lucernarios

Presupuesto de Ejecución Material (PEM)	46.356,00 €
Gastos Generales (GG)	6.026,28 €
Beneficio Industrial (BI)	2.781,36 €
Presupuesto de Ejecución por Contrata (PEC)	55.163,64 €
IVA (21%)	11.584,36 €
Presupuesto de Inversión	66.748,00 €

Una vez obtenido el Presupuesto de Inversión de la instalación de lucernarios, se calcula el coste de su mantenimiento. Durante los primeros 10 años, el coste de mantenimiento es de 170,31€.

Tabla 49. Unidad de obra 1.3, presupuesto mantenimiento lucernarios (10 años)

CODIGO	UNIDAD	DESCRIPCIÓN	IMPORTE	MEDICIONES	TOTAL
1.3	m ²	Mantenimiento lucernarios	197,36 €	200	39.472,00 €
Presupuesto de Ejecución Material (PEM)					39.472,00 €
Gastos Generales (GG)					5.131,36 €
Beneficio Industrial (BI)					2.368,32 €
Presupuesto de Ejecución por Contrata (PEC)					46.971,68 €
IVA (21%)					9.864,05 €
Presupuesto de Inversión					56.835,73 €

Diseño y simulación de un sistema de iluminación natural energéticamente eficiente de la planta industrial dedicada a la fabricación de papel en Utiel (Valencia)

Tabla 50. Presupuesto anual mantenimiento lucernarios

Presupuesto (10 años)	56.835,73 €
Presupuesto anual	5.683,57 €

1.2. PRESUPUESTO LÁMPARAS

Una vez obtenido el presupuesto para los lucernarios, se procede a obtener el de las lámparas. Hay que tener en cuenta que dichas lámparas tienen un tiempo de vida útil, por tanto, una vez transcurrido deben renovarse. De este modo, en el presupuesto se debe tener en cuenta el coste de mantenimiento y el recambio de las lámparas.

Se realiza el presupuesto para los 3 casos planteados anteriormente: 100%, 30% y 10% de luminarias.

1.2.1. Presupuesto 100% luminarias

Tabla 51. Unidad de obra 1.4

CÓDIGO	UNIDAD	DESCRIPCIÓN	RENDIMIENTO	PRECIO UNITARIO (€)	IMPORTE (€)	TOTAL	
1.4	Ud	Luminaria					
	Materiales						
	Ud	Luminaria cuadrada de techo Downlight	1	60,96	60,96		
	Ud	Lámpara fluorescente compacta	2	4,66	9,32		
	Mano de obra						
	h	Oficial 1ª electricista	0,416	19,56	8,14		
	h	Ayudante electricista	0,416	18,01	7,49		
	Costes directos complementarios						
	%	Costes directos complementarios	2	85,91	1,72		
						87,63 €	

Como bien se ha comentado anteriormente, es necesaria una luminaria por cada 20 m², por tanto, como la nave diseñada tiene una superficie de 1350 m², se necesitan 60 lámparas. De este modo, el PEM se obtiene multiplicado el precio de una unidad por el total de lámparas necesarias.

Tabla 52. Presupuesto mantenimiento 100% luminarias

Presupuesto de Ejecución Material (PEM)	5.257,80 €
Gastos Generales (GG)	683,51 €
Beneficio Industrial (BI)	315,47 €
Presupuesto de Ejecución por Contrata (PEC)	6.256,78 €
IVA (21%)	1.313,92 €
Presupuesto de Inversión	7.570,71 €

Durante el año se trabajan 2259 horas al año (9h al día durante 251 días). Se ha estimado que la vida útil de las luminarias es de 25.000 horas (Schapiro, 2017), por tanto, realizando el siguiente cálculo se obtiene la vida útil esperada en años:

$$Vida\ útil = \frac{25.000\ h}{2259\ \frac{h}{año}} = 11\ años$$

Diseño y simulación de un sistema de iluminación natural energéticamente eficiente de la planta industrial dedicada a la fabricación de papel en Utiel (Valencia)

Tabla 53. Presupuesto anual mantenimiento 100% luminarias

Presupuesto (11 años)	7.570,71 €
Presupuesto anual	688,25 €

1.2.2. Presupuesto 30% luminarias

En este caso se sigue el mismo procedimiento anterior, pero con el 30% de las luminarias (18 lámparas).

Tabla 54. Presupuesto mantenimiento 30% luminarias

Presupuesto de Ejecución Material (PEM)	1.577,34 €
Gastos Generales (GG)	205,05 €
Beneficio Industrial (BI)	94,64 €
Presupuesto de Ejecución por Contrata (PEC)	1.877,03 €
IVA (21%)	394,18 €
Presupuesto de Inversión	2.271,21 €

Tabla 55. Presupuesto anual mantenimiento 30% luminarias

Presupuesto (11 años)	2.271,21 €
Presupuesto anual	206,47 €

1.2.3. Presupuesto 10% luminarias

En este último caso, se realiza el cálculo del presupuesto para 6 lámparas.

Tabla 56. Presupuesto mantenimiento 10% luminarias

Presupuesto de Ejecución Material (PEM)	525,78 €
Gastos Generales (GG)	68,35 €
Beneficio Industrial (BI)	31,55 €
Presupuesto de Ejecución por Contrata (PEC)	625,68 €
IVA (21%)	131,39 €
Presupuesto de Inversión	757,07 €

Tabla 57. Presupuesto anual mantenimiento 10% luminarias

Presupuesto (11 años)	757,07 €
Presupuesto anual	68,82 €

DOCUMENTO III:
PLANO

Diseño y simulación de un sistema de iluminación natural energéticamente eficiente de la planta industrial dedicada a la fabricación de papel en Utiel (Valencia)

