ESCUELA SUPERIOR DE ARTE Y DISEÑO DE ANDALUCÍA

PROYECTO DE FIN DE GRADO – DISEÑO DE PRODUCTO

TIPOLOGÍA: INVESTIGACIÓN

Mejora del proceso de nesting para corte CNC 2D

Comparación entre métodos manual, algorítmico e híbrido

Tomás Santiago Arriete Cabaneros

Tutor de proyecto: **José Antonio González Casares**

Junio 2026

Escuela Superior
de Arte y Diseño
de Andalucía

“Design in relation to production is not primarily an art, but an industrial problem.”

— Walter Gropius

Agradecimientos

Primeramente gracias a Dios por permitirme disfrutar de este proceso que con subidas y bajadas ha llegado a su final. Él me ha acompañado y guiado en todo lo que he podido hacer en estos 4 años de carrera y estoy muy agradecido.

A mi tutor, Jose, gracias por hacerme disfrutar de algo que me daba tanto temor al comienzo. Por motivarme a seguir adelante y **hacerme potenciar** en cada momento.

A mi familia y pareja, gracias por ser mis **pilares** en estos 4 años. Por permitirme ponerme mal y ser mi consuelo. Por ayudarme en cada momento de dificultad dándome consejos, fortaleciendome y haciendome cada vez más fuerte. Gracias por escucharme y responder a cada pregunta que a veces ni respuesta tenía.

A mis profesores y compañeros, gracias por la compañía de estos 4 años que hemos vivido juntos. Hemos disfrutado de anécdotas y en parte es gracias a ustedes lo que he podido ser y voy a ser. Gracias por motivarme a tener ese **máximo esfuerzo** siempre y disfrutar de hacer lo que amo.

Esto es por y para todos ustedes.

ÍNDICE

Bloque 0: Paper....7
Abstract....7
Resumen....8
1. Introduction and state of the question....9
1.2. Objectives....11
2. Methodology....12
2.1 Study sample....12
2.2. Phases of the methodology....14
2.4. Timeline....17
3. Development....18
3.1. Quantitative results....18
4. Conclusions....20
4.1 Critical evaluation....20
5. Bibliographic references....21
List of figures....21
List of tables....21
Bibliographic references....21
Bloque 1: Introducción, justificación y contexto....23
1.1 Introducción....23
1.1.1 Definición y contexto del nesting en corte CNC 2D....23
1.2. Contexto personal y profesional....24
1.3. Justificación....28
1.3.1. Justificación técnica-profesional....28
1.3.2. Justificación académica....29
1.4. Delimitación y concreción del problema a investigar....29
1.4.1. Ámbito específico del estudio....30
1.4.2. Exclusiones explícitas del estudio....30
1.4.3. Consideraciones sobre software, algoritmos e inteligencia artificial....31
Bloque 2: Hipótesis y objetivos....32
2.1. Hipótesis....32
2.2. Objetivos de la investigación....32
Bloque 3: Estado de la cuestión....33
3.1. Marco teórico....33
3.1.1. El nesting como problema de decisión en sistemas productivos....33
3.1.2. Desarrollo de herramientas de optimización y su enfoque dominante....33
3.1.3. Limitaciones de la optimización algorítmica en entornos reales....34

3.1.4. El papel del conocimiento humano en la planificación....35
3.1.5. Coexistencia actual: Entre automatización y experiencia.... 36
3.1.6. Hacia una integración más eficiente....36
3.2. Estado del arte....36
Bloque 4: Metodología.... 39
4.1. Variables analizadas....39
4.2. Diseño experimental....40
4.3. Condiciones comunes de experimentación....42
4.4. Fases del trabajo.... 44
4.5. Datos obtenidos para cada instancia experimental. Fichas experimentales....46
4.6. Análisis comparativo de resultados....49
4.7. Limitaciones metodológicas....50
4.8. Cronograma de desarrollo....51
Bloque 5: Desarrollo.... 52
5.1. Introducción al desarrollo experimental.... 52
5.2. Instancias experimentales desarrolladas.... 52
Instancia experimental 1....53
Instancia experimental 2.... 55
Instancia experimental 3.... 57
Instancia experimental 4....59
Instancia experimental 5.... 61
Instancia experimental 6....63
Instancia experimental 7.... 65
Instancia experimental 8....67
5.3. Lectura comparativa y relación inicial de los resultados.... 69
5.3.1. Diferencias observadas entre métodos....70
5.3.2. Resultados de las valoraciones ponderadas.... 71
Bloque 6: Conclusiones....73
6.1. Evaluación de hipótesis iniciales....73
6.2. Evaluación de objetivos iniciales.... 74
6.3. Valoración crítica del proceso seguido y las conclusiones obtenidas....75
6.4. Futuras líneas de investigación.... 76
Bloque 7: Listado de figuras, tablas y referencias bibliográficas.... 77
Listado de figuras....77
Listado de tablas.... 79
Referencias bibliográficas....80

Improvement of the Nesting Process for 2D CNC Cutting

Comparison between Manual, Algorithmic, and Hybrid Methods Applied to 2D CNC Nesting

Abstract

This research analyses the efficiency of the nesting process applied to 2D CNC cutting of sheet-format materials. The study focuses on the pre-machining planning stage, where decisions such as part placement, safety margins, spacing between parts, and material utilization directly influence production performance. The main objective is to compare three nesting approaches: Manual nesting using AutoCAD (Autodesk, s. f.), algorithmic nesting using Nest&Cut (ALMA, s. f.), and a hybrid combining both tools.

Using a mixed-methods approach (quantitative and qualitative), eight experimental cases with different part geometries were evaluated on a standard 3,000 × 1,500 mm sheet, applying a 20 mm outer margin and a minimum spacing of 8 mm between parts.

The results show that the algorithmic approach generally achieved the best balance between preparation time and waste percentage. The hybrid method improved some manually obtained results, but did not consistently outperform the algorithmic approach. The research concludes that optimisation software is effective as an initial solution, while the operator's technical judgement retains value as a layer for validation, contextual interpretation, and production adjustment.

Keywords: Nesting, 2D CNC cutting, material optimisation, algorithmic software, technical judgement, production efficiency.

Resumen

Esta investigación analiza la eficiencia del proceso de nesting aplicado al corte CNC 2D sobre materiales en formato de tablero. El estudio se centra en la fase de planificación previa al mecanizado, donde decisiones como la colocación de piezas, los márgenes de seguridad, la separación entre geometrías y el aprovechamiento del material condicionan directamente el rendimiento productivo. El objetivo principal es comparar tres métodos de resolución del nesting: Resolución manual mediante AutoCAD (Autodesk, n. d.), resolución algorítmica mediante Nest&Cut (ALMA, n. d.) y resolución híbrida mediante la combinación de ambos procedimientos.

Mediante un enfoque mixto (cuantitativo y cualitativo), se evaluaron ocho instancias experimentales con piezas con geometrías diferentes sobre un tablero estándar de 3.000 × 1.500 mm, aplicando un margen exterior de 20 mm y una separación mínima de 8 mm entre piezas.

Los resultados muestran que la resolución algorítmica obtuvo, de forma general, el mejor equilibrio entre tiempo de preparación y porcentaje de desperdicio. El método híbrido permitió mejorar algunos resultados obtenidos manualmente, pero no superó de manera constante a la resolución algorítmica. La investigación concluye que la herramienta de optimización resulta eficaz como primera capa operativa para generar soluciones de nesting, mientras que el criterio técnico del operador mantiene valor como capa de validación, interpretación contextual y ajuste productivo.

Palabras clave: Nesting, corte CNC 2D, optimización de material, software algorítmico, criterio técnico, eficiencia productiva.

1. Introduction and state of the question

Nesting is defined as the strategic phase prior to machining, dedicated to organising and distributing a set of parts across a limited material surface with the primary objective of optimising physical utilisation (Naboni y Paoletti, 2014). This operation does not constitute an isolated technical task or a mere final adjustment, but rather a central node of industrial production that directly influences the performance and economic viability of the workshop.

Figure 1. *CNC-processed elements*



Note. Author's own elaboration (2026).

1.1 Theoretical framework

Nesting constitutes a decision-making problem within the production system, framed within the so-called *cutting and packing* problems, which involve the allocation of parts onto material resources under geometric constraints and optimisation objectives (Wäscher et al., 2007).

The advancement of digital tools has enabled the automation of this process. However, the high computational complexity of irregular geometries requires the use of heuristic methods (Bennell & Oliveira, 2008). However, despite their usefulness, algorithmic systems present limitations: By operating on quantifiable variables, they may exclude logistical or organisational factors that cannot be translated mathematically.

Tools such as DeepNest combine different optimisation methods to explore multiple configurations and select those that best fit the defined parameters (DeepNest, n. d.).

In response to these limitations, operational experience remains fundamental. As Osorio Cuervo (2025) notes, human control in CNC environments involves interpreting drawings, configuring parameters, and coordinating actual production. In practice, many workshops develop a hybrid approach where software handles the computational workload whilst the operator validates production viability and adapts solutions to unforeseen situations (Suárez & Paredes, 2022).

However, the parameters that influence nesting are not limited exclusively to maximum board utilisation, as reflected in Figure 2.

Figure 2. *Variables influencing nesting.*



Note. Author's own elaboration (2026).

This study focuses exclusively on the **planning phase prior to machining**, encompassing both geometric aspects and operational aspects related to production criteria, safety and process management. The scope is limited to industrial 2D routing processes using technical plastic boards.

1.2. Objectives

Main objective

Main Objective: To analyse the efficiency of the nesting process in 2D CNC cutting systems by comparing manual, algorithmic, and hybrid nesting methods.

Specific objectives

Specific Objective 1: To identify the limitations and technical constraints that influence nesting planning.
Specific Objective 2: To analyse the decision-making criteria involved in organising a nesting layout.
Specific Objective 3: To study the geometric factors that influence material utilisation in nesting.
Specific Objective 4: To measure the time, material waste percentage, and number of parts placed in each resolution method.
Specific Objective 5: To assess qualitative aspects of the process, such as the potential reuse of residual material, the organisational quality and adaptability of nesting, and the dependence on technical judgement.

1.3. Hypothesis

Main hypothesis

H1: The incorporation of algorithmic optimisation software improves the efficiency of the nesting process in 2D CNC cutting compared to manual resolution.

Specific hypotheses

H2: Manual nesting resolution presents greater operational variability and greater dependence on technical judgement than software-assisted methods.
H3: Parts with irregular geometries or internal voids generate areas of residual material that are difficult to reuse.
H4: Nesting optimization based solely on the material waste percentage does not reflect the overall efficiency of the production system.
H5: The lack of systematisation in nesting planning criteria increases dependence on operator experience.

2. Methodology

This research uses a **mixed-methods** approach from a mixed-methods perspective, combining quantitative and qualitative analysis based on a series of experimental nesting tests.

From a quantitative standpoint, three main variables are compared: Preparation time, waste percentage, and number of parts placed. These variables allow for the observation of measurable differences between solutions obtained through manual resolution, algorithmic resolution, and hybrid resolution.

The qualitative analysis addresses criteria that affect production viability and cannot be reduced solely to numerical values. These include the potential for reusing residual material, the organisational quality of the nesting, the adaptability of the solution, and the dependence on technical judgement.

The comparison is structured around three resolution methods:

1. **Manual resolution:** Carried out manually in AutoCAD, based on visual judgement, technical experience, and manual organisation of the parts.
2. **Algorithmic resolution:** Carried out using Nest&Cut, employing the software as an automatic optimisation system.
3. **Hybrid resolution:** Developed through the combination of Nest&Cut and AutoCAD, where the software generates or facilitates the initial solution and the operator reviews or adjusts the result when necessary.

All tests were conducted under equivalent initial conditions. Each experimental instance used the same set of parts across the three methods, so that the observed differences could be attributed to the resolution procedure employed and not to variations in geometry, number of parts, or complexity of the set.

2.1 Study sample

The study sample consists of eight experimental instances of nesting. Each instance represents a different situation within the usual processes of 2D CNC cutting on board-format materials.

Table 1. *Experimental instances and type of pieces.*

Experimental Instance	Type of parts
Experimental Instance 1	Large pieces
Experimental Instance 2	Medium pieces
Experimental Instance 3	Small pieces
Experimental Instance 4	Mixed pieces: Large, medium, and small
Experimental Instance 5	Elongated pieces
Experimental Instance 6	Rectangular pieces
Experimental Instance 7	Organic pieces
Experimental Instance 8	Pieces with interior voids, medium pieces, and small pieces

Note. *Author's own elaboration (2026).*

All instances were developed on a board measuring 3,000 × 1,500 mm, equivalent to 45,000 cm². The same safety and spacing conditions were applied in all cases: A 20 mm outer margin from the edge of the board and an 8 mm minimum separation between pieces at their closest point.

Figure 3. *Example of a final product assembled from CNC-cut parts.*



Note. Adapted from Restaupark.com (Restaupark, S.L., 2026).

A nesting solution was considered valid only when all pieces were located within the usable area of the board, respected the defined outer margin, and maintained the established minimum separation. In cases where the number of pieces placed varied between methods, this data was incorporated into the interpretation of results to avoid an isolated reading of the waste percentage.

2.2. Phases of the methodology

The experimental procedure followed a common sequence across the eight instances.

Phase 1. **Digital preparation:** This stage consisted of preparing the set of pieces corresponding to each instance. All pieces had to be available in digital format in order to be used in both AutoCAD and Nest&Cut.

Phase 2. **Definition of piece quantities:** Exclusive to the algorithmic and hybrid processes, this stage involved selecting the quantities of pieces estimated to be placed in each process.

Phase 3. **Board setup and constraints:** The workspace was configured according to the established dimensions and common conditions.

Phase 4. **Execution and timing:** The layout was generated using the three study methods. The exact elapsed time from the start of preparation to obtaining a valid solution was recorded using a stopwatch.

Phase 5. **Efficiency and waste calculation:** Material waste was calculated, and material utilisation was inferred as its complementary value.

Phase 6. **Data systematization:** Finally, an analysis sheet was completed for each experimental instance, as detailed in the following section.

2.3 Data obtained for each instance. Experimental records

Each instance was documented through an analysis sheet that facilitated comparison between the three solution methods.

Experimental Instance X

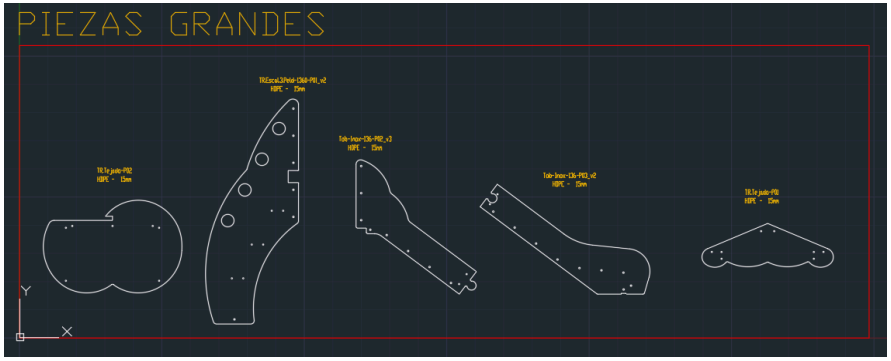
(template)

Table 2. *Example of the technical record for the experimental instance.*

Experimental instance name and number	-
Type of pieces	-
Piece dimensions	-
Number of pieces places by method	-

Note. *Author's own elaboration (2026).*

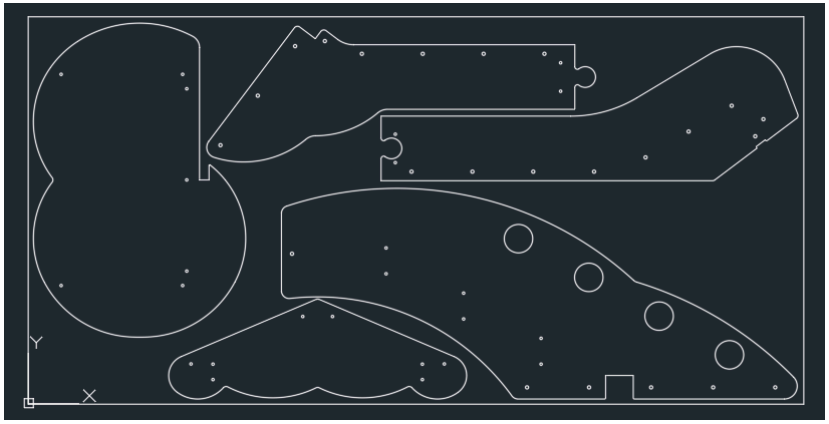
Figure 4. *Example of pieces used in the experimental instance.*



Note. *Author's own elaboration (2026).*

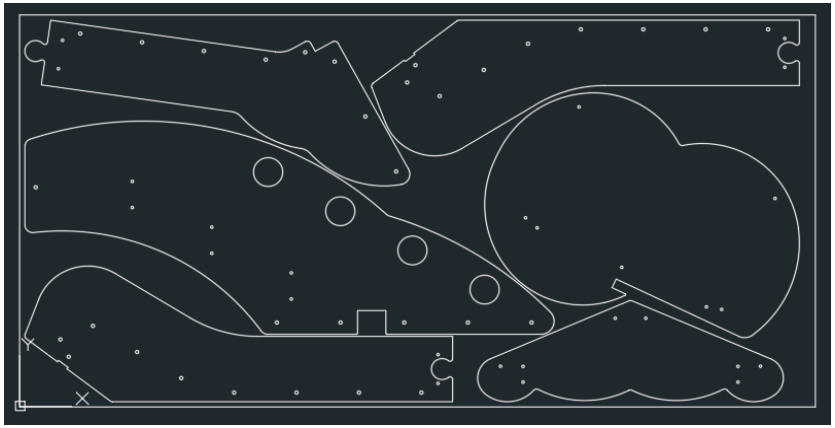
Nesting results

Figure 5. *Example of manual nesting for the experimental instance.*



Note. *Author's own elaboration (2026).*

Figure 6. *Example of algorithmic and hybrid nesting for the experimental instance.*



Note. Author's own elaboration (2026).

Time/Waste Relationship

Table 3. *Example of the time/waste relationship.*

Method	Time	Waste	Remarks
Manual	-	-	-
Algorithmic	-	-	-
Hybrid	-	-	-

Note. *Author's own elaboration (2026).*

Qualitative Assessments

Table 4. *Example of qualitative assessment criteria.*

Method	Residual Material Reusability	Organisational Quality and Adaptability of the Nesting	Dependence on technical expertise
Manual	-	-	-
Algorithmic	-	-	-
Hybrid	-	-	-

Note. *Author's own elaboration (2026).*

Individual Synthesis of the Experimental Instance

Once the technical feasibility of each proposal had been validated, a weighted evaluation matrix (Table 5) was applied according to a matrix defined by the author.

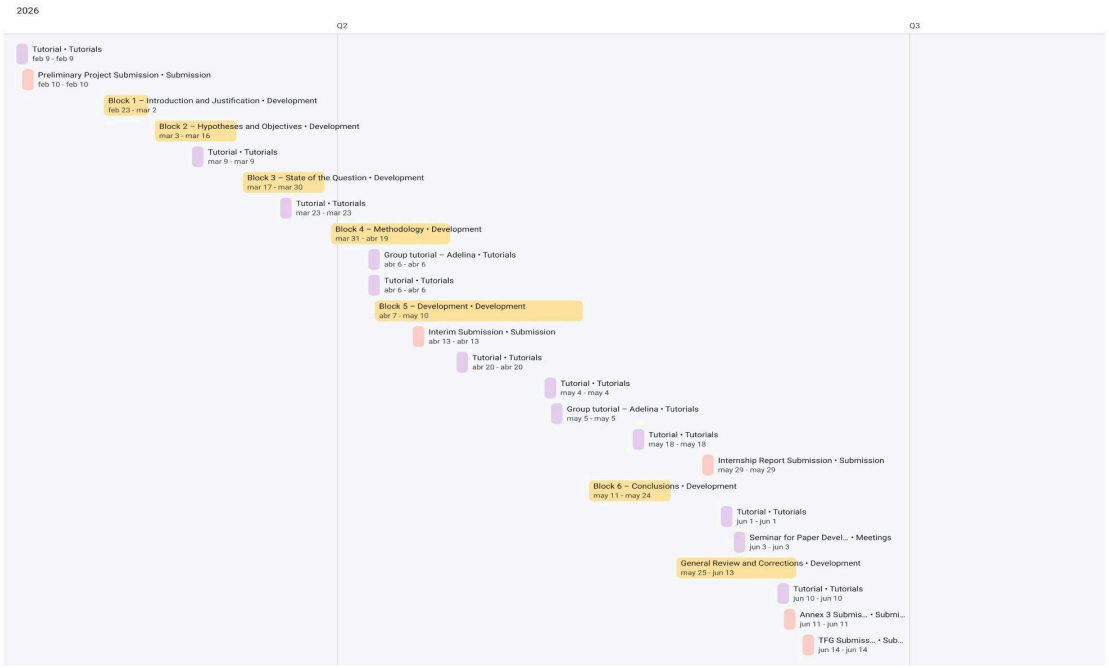
Table 5. *Weighting matrix for the results of the experimental instances.*

Analysis criterion	Type of variable	Weighting
Waste percentage	Quantitative	30 %
Preparation time	Quantitative	25 %
Number of parts placed	Quantitative	15 %
Residual material reusability	Qualitative	10 %
Organisational quality and adaptability of the nesting	Qualitative	10 %
Dependence on technical judgement	Qualitative	10 %
Total		**100 %**

Note. *Author's own elaboration (2026).*

2.4. Timeline

Figure 7. *Project development timeline*



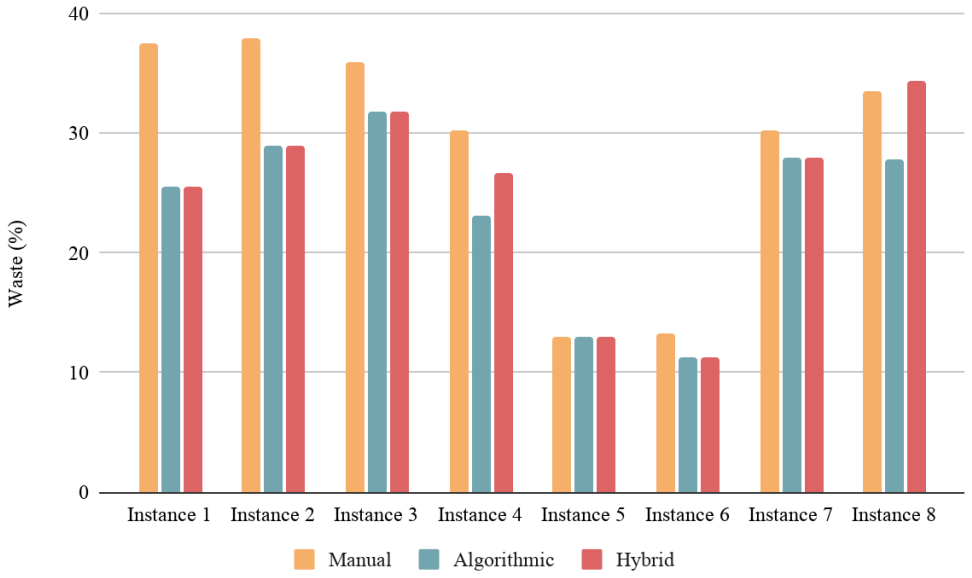
Note. *Author's own elaboration (2026).*

3. Development

3.1. Quantitative results

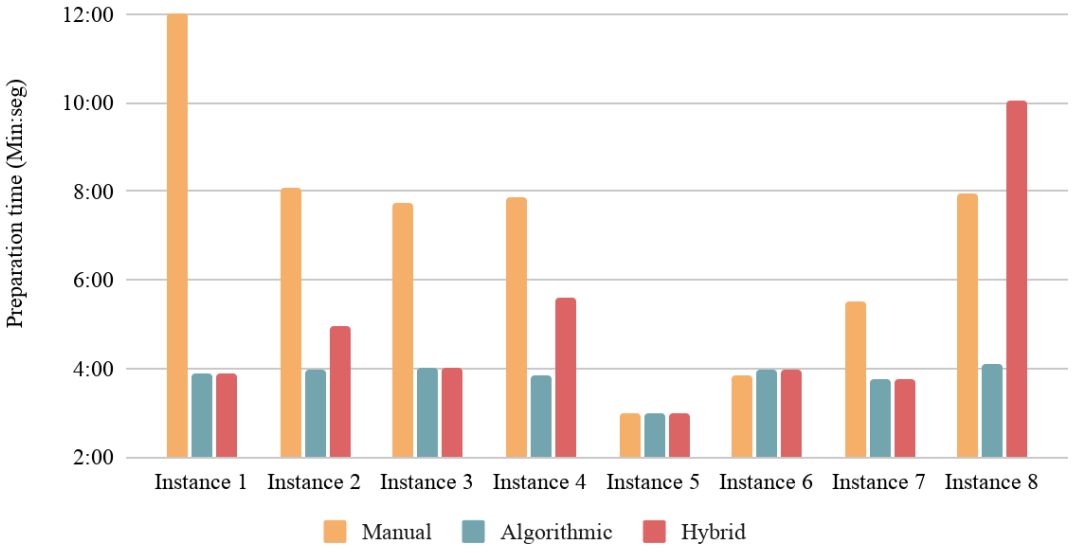
The results obtained reveal a clear trend: Algorithmic nesting generally achieved shorter preparation times and lower waste percentages than manual nesting.

Figure 8. *Comparative chart of waste generated by each method across experimental instances.*



Note. *Author's own elaboration (2026).*

Figure 9. *Comparative* chart of preparation time by method across experimental instances.



Note. *Author's own elaboration (2026).*

Based on the data collected, four main patterns were identified.

1. **Simple and repetitive** geometries (rectangular pieces and small- or medium-sized components) tended to reduce the differences between methods due to their ease of optimisation and geometric arrangement.
2. **Complex geometries** (organic shapes, pieces with internal voids, or components with significant size variation) increased the relevance of both automatic optimisation tools and technical judgement during the nesting process, whether for validating layouts, interpreting residual spaces, or assessing the practical functionality of the proposed solution.
3. **Mixed configurations** displayed intermediate behaviour. The combination of pieces of different sizes and shapes increased nesting complexity. In these cases, the ability to reorganise and adapt the available space became more significant within the decision-making process.
4. A visually dense board layout does not necessarily guarantee greater efficiency, as performance also depends on preparation time, the number of useful parts produced, and the quality of the remaining material.

The following table summarises the final weighted score obtained by each method in every experimental instance, on a scale with a maximum value of 100 %.

Table 6. *Final weighted performance score by experimental instance.*

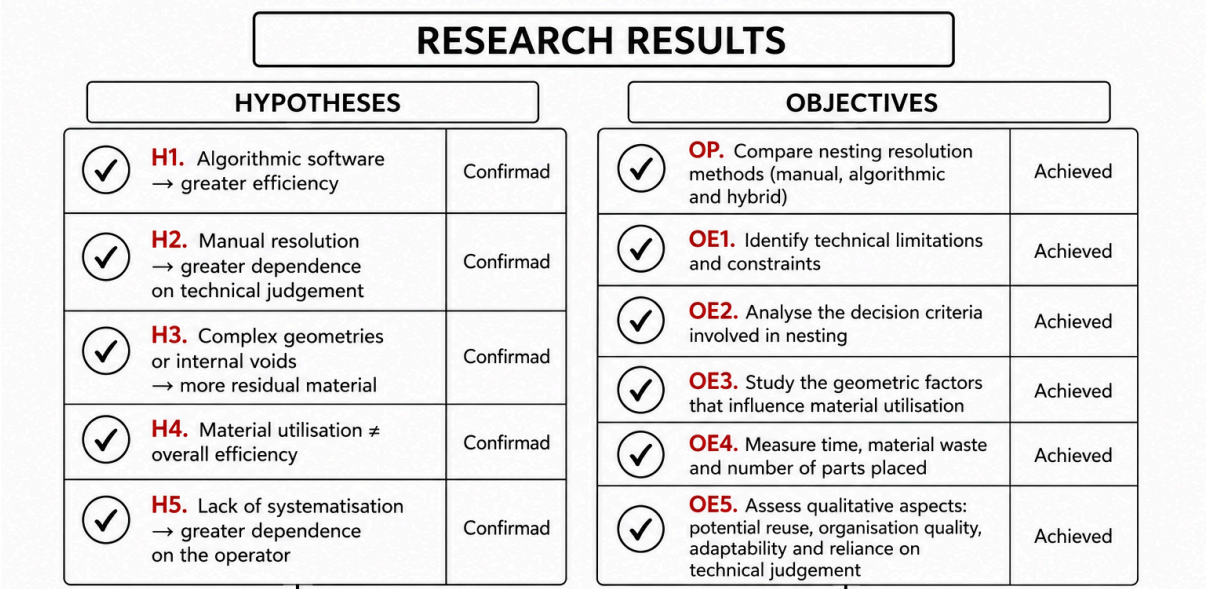
Instancia experimental	Manual	Algorithmic	Hybrid	Best-rated method
Instance 1: Large pieces	57.02 %	96.00 %	96.00 %	Algorithmic/Hybrid
Instance 2: Medium-sized pieces	66.15 %	89.85 %	89.85 %	Algorithmic/Hybrid
Instance 3: Small pieces	74.23 %	90.00 %	90.00 %	Algorithmic/Hybrid
Instance 4: Mixed-size pieces	61.08 %	96.00 %	74.29 %	Algorithmic
Instance 5: Elongated rectangular pieces	92.00 %	92.00 %	92.00 %	Equivalent
Instance 6: Rectangular pieces	81.59 %	91.26 %	91.26 %	Algorithmic/Hybrid
Instance 7: Organic shapes	69.65 %	92.00 %	88.00 %	Algorithmic
Instance 8: Pieces with internal voids and mixed sizes	64.77 %	90.83 %	64.67 %	Algorithmic

Note. Author's own elaboration (2026). Values represent the final weighted score on a 100 % scale and do not correspond to waste percentage or material utilisation rate.

4. Conclusions

This research supports the five hypotheses and all the objectives are addressed.

Figure 10. *Summary of hypothesis and objectives achievements.*



Note. *Author's own elaboration (2026).*

Furthermore, the study demonstrates that irregular geometries and pieces containing internal voids hinder efficient board utilisation. Likewise, the findings indicate that evaluating efficiency solely through material utilisation rates is insufficient, as this approach fails to account for other factors such as preparation time, organisation, adaptability, and the potential reuse of leftover material. Finally, the research confirms that the absence of systematised planning criteria increases reliance on individual experience and reduces process repeatability.

4.1 Critical evaluation

The findings highlight that nesting automation does not eliminate the need for operator expertise. Although algorithmic systems are highly effective in geometric optimisation, they remain limited in their ability to incorporate operational and contextual constraints. Consequently, process efficiency depends on the combination of software computational capability and expert knowledge, as some decisions continue to rely on tacit knowledge that cannot be fully systematised.

Moreover, the study confirms that the implementation of technological improvements in industrial environments often encounters resistance from manufacturers, which can hinder the adoption of new systems. In this regard, this research aims to contribute to the integration of optimisation technologies within nesting processes and may contribute to identifying conditions that facilitate the adoption of optimisation tools.

5. Bibliographic references

List of figures

Figure 1. CNC-processed elements

Figure 2. Variables influencing nesting

Figure 3. Example of a final product assembled from CNC-cut parts

Figure 4. Example of pieces used in the experimental instance

Figure 5. Example of manual nesting for the experimental instance

Figure 6. Example of algorithmic and hybrid nesting for the experimental instance

Figure 7. Project development timeline

Figure 8. Comparative chart of waste generated by each method across experimental instances

Figure 9. Comparative chart of preparation time by method across experimental instances

Figure 10. Summary of hypothesis and objectives achievements

List of tables

Table 1. Experimental instances and type of pieces

Table 2. Example of the technical record for the experimental instance

Table 3. Example of the time/waste relationship

Table 4. Example of qualitative assessment criteria

Table 5. Weighting matrix for the results of the experimental instances

Table 6. Final weighted performance score by experimental instance

Bibliographic references

ALMA. (n. d.). *Nest&Cut* [Software]. https://nestandcut.com/es/

Autodesk. (n. d.). *Autodesk AutoCAD* (Versión 2027) [Software]. https://www.autodesk.com/es/products/autocad/

Bennell, J. A., & Oliveira, J. F. (2008). The geometry of nesting problems: A tutorial. *European Journal Of Operational Research*, *184*(2), 397-415. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.11.038

DeepNest.io. (n. d.). *DeepNest*. https://deepnest.io/

Naboni, R., & Paoletti, I. (2014). Advanced Customization in Architectural Design and Construction. En *SpringerBriefs in applied sciences and technology*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-04423-1

Osorio Cuervo, D. F. (2025). *Diseño de una propuesta de mejora del proceso de producción en una comercializadora y Transformadora de Acero* [Tesis de Maestría, Universidad de la Costa]. https://repositorio.cuc.edu.co/server/api/core/bitstreams/ba3b5d1f-9583-4c5c-91e1-9fe8e629d07a/content

Restaupark, S.L. (2026, 22 mayo). *Torre Karan*. Restaupark - Fabricante de parques infantiles. https://www.restaupark.com/producto/to20-torre-karan/

Suárez, J. C., & Paredes, S. S. (2022). El factor humano y su rol en la transición a Industria 5.0: Una revisión sistemática y perspectivas futuras. *Entreciencias Diálogos en la Sociedad del Conocimiento*, *10*(24). https://doi.org/10.22201/enesl.20078064e.2022.24.81727

Wäscher, G., Haußner, H., & Schumann, H. (2007). An improved typology of cutting and packing problems. *European Journal Of Operational Research*, *183*(3), 1109-1130. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.12.047

1.1 Introducción

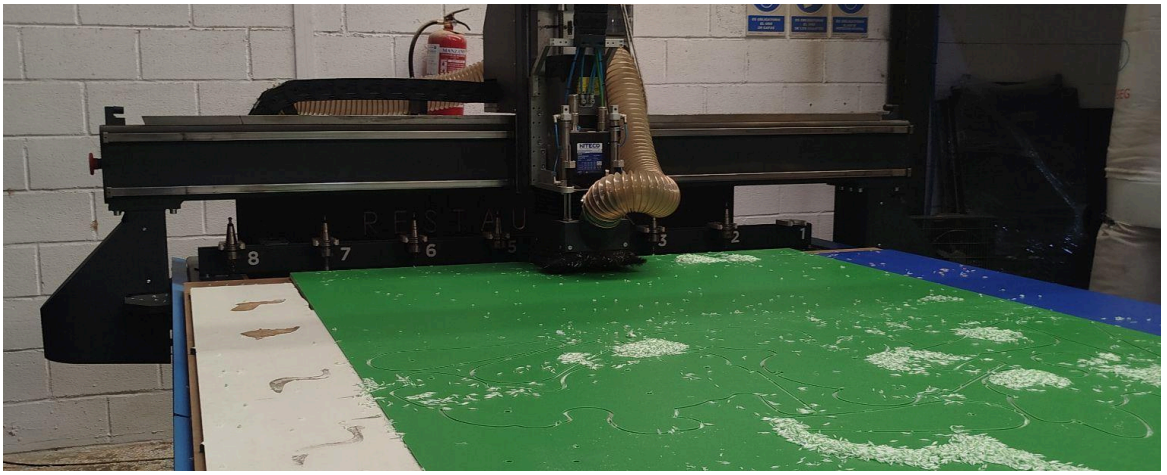
1.1.1 Definición y contexto del nesting en corte CNC 2D

El término CNC, siglas de **Control Numérico Computarizado**, hace referencia al sistema automatizado capaz de ejecutar movimientos de máquina mediante instrucciones codificadas (Universidad Europea, 2025). La tecnología CNC 2D constituye una herramienta habitual en procesos de fabricación digital donde se requiere precisión, repetibilidad y control sobre la producción de piezas en materiales planos. Dentro de este ámbito se incluyen tecnologías como el fresado, el corte láser, el corte por plasma y el corte por chorro de agua. Aunque cada una responde a principios técnicos diferentes, todas comparten una lógica común: **Transformar un archivo digital en una operación física sobre un material plano.**

En esta investigación, el análisis se centra en procesos de **fresado CNC 2D aplicados a materiales suministrados en formato de tablero** y, específicamente, en la fase previa de planificación, donde:

1. La geometría de las piezas,
2. La posición sobre el tablero,
3. Las separaciones de seguridad,
4. El flujo de preparación
5. El aprovechamiento del material, influye en el rendimiento final.

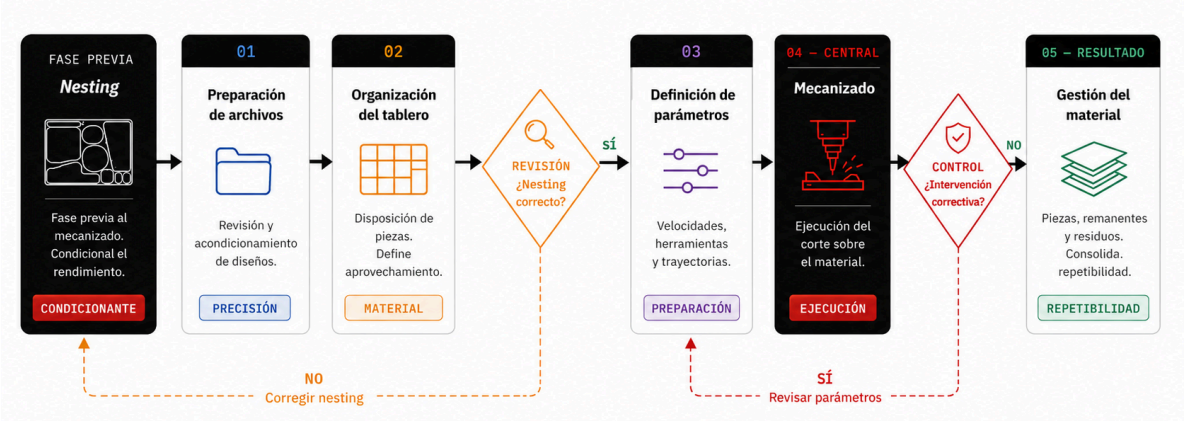
Figura 1. *Corte con fresa en maquinaria CNC 2D en panel de plástico técnico.*



Nota. Elaboración propia (2026). La imagen muestra una operación de fresado CNC 2D sobre tablero de plástico técnico en entorno productivo.

En este punto del proceso se sitúa el concepto de ***nesting***. Según Naboni y Paoletti (2014), el nesting puede entenderse como una fase de planificación y distribución de piezas sobre una superficie limitada de material con el objetivo de optimizar su aprovechamiento y generar una configuración válida para su posterior corte.

Figura 2. *Gráfico de flujo de trabajo CNC 2D.*



Nota. Elaboración propia (2026).

Como se observa en la Figura 2, el nesting se sitúa en una fase previa al mecanizado, pero condiciona el rendimiento posterior del proceso. La eficiencia depende de la coordinación entre la preparación de archivos, la organización del tablero, la definición de parámetros, el mecanizado y la gestión del material. Por ello, la eficiencia no se mide solo por el aprovechamiento del material, sino también por el tiempo de preparación, la necesidad de correcciones y la repetibilidad de los resultados.

Mi experiencia profesional previa muestra que, la planificación del corte suele apoyarse en el operador y en configuraciones previas. Aunque esto aporta seguridad, limita la optimización real; por lo tanto, el verdadero desafío es lograr una integración efectiva entre la capacidad de cálculo digital y el criterio técnico.

Desde esta perspectiva, el presente Trabajo de Fin de Grado se plantea como una investigación aplicada centrada en el estudio crítico del proceso de nesting aplicado al corte por fresa con maquinaria CNC 2D, con el propósito de comparar diferentes métodos de resolución e identificar oportunidades reales de mejora en términos de eficiencia material y operativa.

1.2. Contexto personal y profesional

Este trabajo nace de mi experiencia directa en un entorno de fabricación donde el corte con fresa con maquinaria CNC 2D formaba parte central del proceso

productivo. Durante aproximadamente un año participé en tareas vinculadas a la preparación de archivos, organización de soluciones de nesting, preparación y envío de los archivos al proceso de corte, control del proceso, validación de piezas, control de calidad, coordinación de stock y preparación de componentes para pedidos.

El trabajo se desarrollaba principalmente con materiales suministrados en formato de tablero, especialmente plásticos técnicos. En este contexto, la preparación previa al corte tenía un impacto directo en la organización interna del flujo productivo. A través del uso de herramientas como AutoCAD (Autodesk, s. f.-a) y programas asociado a la fabricación CNC, como herramientas CAM o de preparación de corte, se comprobó que muchas decisiones relevantes no se tomaban durante el corte, sino antes: En la forma de preparar, ordenar y validar cada tablero.

Figura 3. *Elementos procesados en CNC.*



Nota. Elaboración propia (2026).

Desde mi formación en Diseño de Producto, siempre he entendido el diseño desde una perspectiva industrial. Diseñar no consiste únicamente en definir la apariencia final de un objeto, sino en comprender **cómo se fabrica, cómo se organiza su producción y qué condiciones permiten que ese proceso sea viable, repetible y eficiente.**

Figura 4. *Representación de montaje de piezas procesadas.*

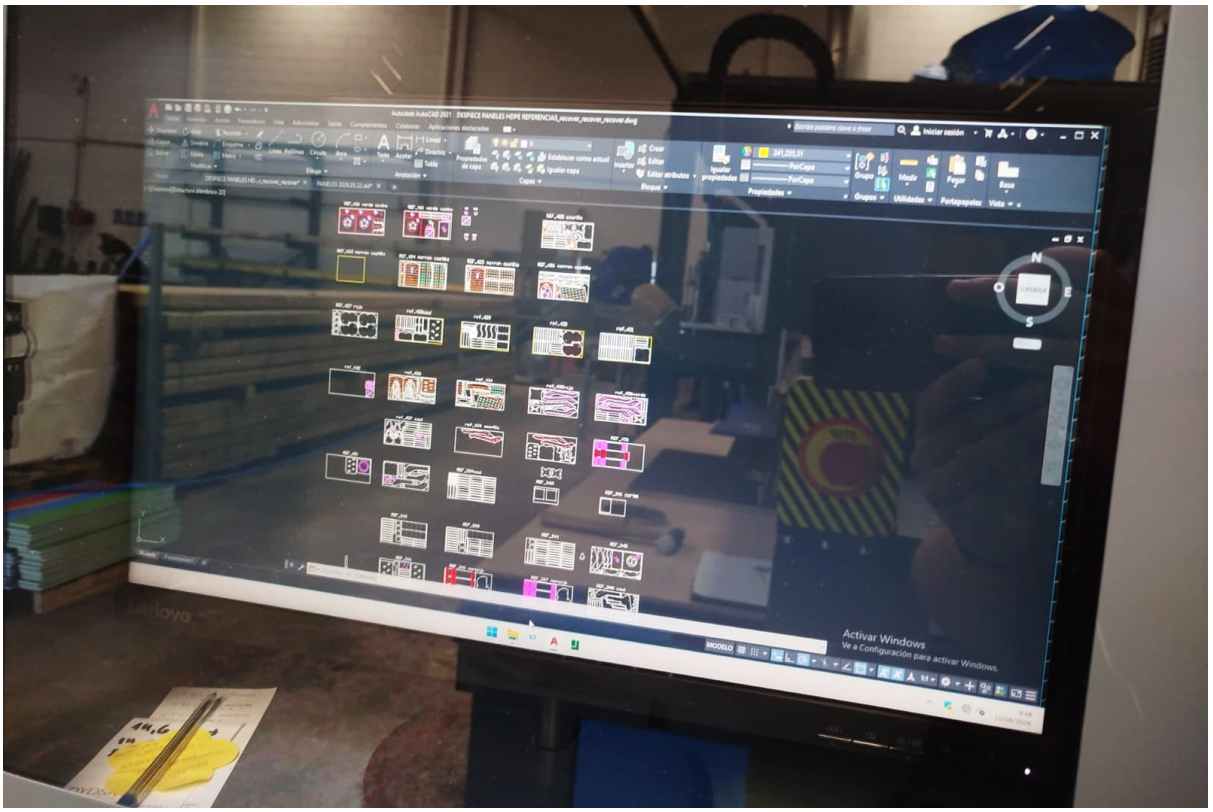


Nota. Tomado de Restaupark, S.L. (2026, 22 mayo). Torre Karan. Restaupark - Fabricante de parques infantiles. https://www.restaupark.com/producto/to20-torre-karan/

Este trabajo surgió a partir del reto profesional que consistía en mejorar la rapidez del proceso de corte sin comprometer la calidad ni incrementar ineficiencias productivas. Esta necesidad surgió al observar que, en muchos casos, se reutilizaban determinadas soluciones de nesting previamente configuradas. Esta práctica aportaba rapidez y cierta seguridad operativa, pero podía derivar en preparaciones redundantes o poco ajustadas al pedido real.

También comprobé que existía una dependencia importante de la revisión manual, de la memoria del operador y del conocimiento acumulado sobre piezas, archivos e inventario. La dificultad para saber con rapidez qué elementos debían cortarse realmente y si las piezas pendientes podían integrarse en un mismo tablero hacía que el proceso dependiera demasiado de decisiones no siempre sistematizadas ni fácilmente transferibles.

Figura 5. *Configuraciones previamente guardadas.*



Nota. Elaboración propia (2026).

Esta investigación no pretende evaluar una empresa concreta ni exponer datos internos de un entorno profesional específico. La experiencia laboral funciona como punto de partida para identificar una problemática más amplia: La necesidad de analizar de forma estructurada cómo se resuelve el nesting y qué diferencias existen entre un método manual, un método algorítmico y un método híbrido. El objetivo no es sustituir el criterio técnico del operador, sino comprender cuándo aporta valor, cuándo limita el proceso y cómo puede combinarse con herramientas digitales de optimización.

En este sentido, el TFG conecta mi formación académica con una problemática productiva real. El trabajo se plantea desde la convicción de que el diseño de producto también debe intervenir en la mejora de procesos, especialmente cuando estos condicionan la eficiencia, la viabilidad y la calidad del resultado final.

1.3. Justificación

1.3.1. Justificación técnica-profesional

En el contexto industrial analizado se observa que la geometría de las piezas influye de forma notable en el porcentaje de desperdicio generado. Los diseños con piezas de gran superficie, las geometrías irregulares o los elementos con vacíos interiores tienden a producir zonas residuales de difícil aprovechamiento y reducen la eficiencia del proceso.

A esta condición geométrica se suma una práctica habitual en el entorno profesional: La reutilización de configuraciones de nesting previamente usadas, sin que se evalúen en función de variables de producción cambiantes como el volumen de pedidos, las prioridades productivas o la disponibilidad de material.

Por tanto, los parámetros que condicionan el nesting no se reducen exclusivamente al máximo aprovechamiento del tablero, tal y como se refleja en la Figura 6.

Figura 6. *Variables que condicionan el nesting.*



Nota. Elaboración propia (2026).

En consecuencia, esta investigación se justifica por la necesidad de analizar de forma estructurada cómo mejorar la planificación del nesting mediante la integración de herramientas algorítmicas y del criterio técnico, entendiendo este último como la validación operativa del resultado.

1.3.2. Justificación académica

Desde el ámbito académico, este trabajo se enmarca dentro de las líneas de investigación de **diseño tecnológico: Digitalización, inteligencia artificial y nuevos materiales.**

La investigación aborda un área menos habitual dentro del ámbito del diseño de producto: **La optimización de procesos productivos industriales.**

Este trabajo aporta valor académico en tres dimensiones:

1. Contribuye a generar conocimiento aplicado sobre optimización de procesos productivos con CNC en entornos reales.
2. Propone una reflexión crítica sobre el papel actual de las herramientas algorítmicas y los sistemas digitales de apoyo a la optimización de procesos.
3. Establece un puente entre el conocimiento académico y la práctica profesional.

El estudio aporta valor al ámbito académico al trasladar un problema industrial real a un marco de análisis estructurado, cuantificable y replicable, permitiendo evaluar un proceso productivo desde criterios propios de la investigación aplicada en diseño.

1.4. Delimitación y concreción del problema a investigar

El estudio se centra exclusivamente en la fase de planificación previa al mecanizado, e incluye:

1. **Aspectos geométricos:** Vinculados a la optimización de superficies.
2. **Aspectos operativos:** Relacionados con criterios productivos, seguridad y gestión del proceso.

A su vez, excluye:

1. Optimización en los parámetros de corte, como la velocidad de avance, el desgaste de herramientas o la calidad del acabado.

2. Aspectos vinculados al hardware de la maquinaria.

1.4.1. Ámbito específico del estudio

El ámbito específico del estudio es la **optimización de procesos productivos industriales de corte 2D con fresa para plásticos técnicos suministrados en tablero.**

El análisis se limita a sistemas de mecanizado por arranque de viruta en plano, excluyendo otras tecnologías de corte, como el láser, el chorro de agua o el plasma, así como materiales como piedra, textiles u otros materiales que no se comercializan habitualmente en formato panel. Aunque el estudio se limita al corte con fresa en maquinaria CNC 2D, algunos criterios de análisis podrían orientar investigaciones futuras en otros sistemas de corte bidimensional.

1.4.2. Exclusiones explícitas del estudio

Quedan fuera del alcance de esta investigación:

1. Procesos de corte tridimensionales o tecnologías de mecanizado multieje.
2. Diseño formal, estético o funcional de productos finales.
3. Programación informática avanzada o desarrollo de algoritmos propios desde cero.
4. Diseño de software comercial, interfaces gráficas o plataformas digitales específicas.

Figura 7. *Exclusiones explícitas del estudio.*



Nota. Elaboración propia (2026).

Estas exclusiones permiten concentrar el análisis en la toma de decisiones técnicas y operativas dentro del marco tecnológico ya existente.

1.4.3. Consideraciones sobre software, algoritmos e inteligencia artificial

Las herramientas algorítmicas y los sistemas de optimización se consideran en esta investigación como recursos de apoyo a la toma de decisiones dentro de la planificación del nesting, dada su capacidad para procesar configuraciones geométricas, generar alternativas de distribución y reducir parte del tiempo asociado a la preparación del corte.

El estudio no aborda el desarrollo de algoritmos ni de sistemas autónomos basados en inteligencia artificial, sino el análisis de la aplicación de herramientas algorítmicas como complemento del criterio técnico del operador en entornos productivos reales. El análisis se centra en su papel para validar, ajustar e interpretar soluciones desde criterios de viabilidad productiva.

Bloque 2: Hipótesis y objetivos

2.1. Hipótesis

Hipótesis principal

H1: La incorporación de software de optimización algorítmica mejora la eficiencia del proceso de nesting para corte con fresas en maquinaria CNC 2D respecto a la resolución manual.

Hipótesis específicas

H2: La resolución manual del nesting presenta mayor variabilidad operativa y mayor dependencia del criterio técnico que los métodos asistidos por software.
H3: Las piezas con geometrías irregulares o con vacíos interiores generan zonas de material residual difíciles de reutilizar.
H4: La optimización del nesting basada únicamente en el porcentaje de desperdicio del material no refleja la eficiencia global del sistema productivo.
H5: La falta de sistematización en los criterios de planificación del nesting incrementa la dependencia de la experiencia del operador.

2.2. Objetivos de la investigación

Objetivo principal

OP: Analizar la eficiencia del proceso de nesting en sistemas de corte CNC 2D con fresa mediante la comparación entre método manual, algorítmico e híbrido.

Objetivos específicos

OE1: Identificar las limitaciones y restricciones técnicas que condicionan la planificación del nesting.
OE2: Analizar los criterios de decisión que intervienen en la organización del nesting.
OE3: Estudiar los factores geométricos que condicionan el aprovechamiento del material en el nesting.
OE4: Medir el tiempo, el porcentaje de desperdicio del material y el número de piezas colocadas en cada método de resolución.
OE5: Valorar la reutilización potencial del material residual, la calidad organizativa, la adaptabilidad del nesting y la dependencia del criterio técnico.

Bloque 3: Estado de la cuestión

3.1. Marco teórico

3.1.1. El nesting como problema de decisión en sistemas productivos

El nesting puede entenderse no solo como un problema de optimización geométrica, sino como un proceso de toma de decisiones dentro del sistema productivo. Estas decisiones se enmarcan dentro de los denominados problemas *cutting and packing*, que implican la selección, agrupación y asignación de piezas sobre recursos materiales bajo restricciones geométricas y con un objetivo de optimización definido (Wäscher et al., 2007).

Heizer y Render (2007), en *Dirección de la producción y de operaciones: Decisiones tácticas*, señalan que la dirección de operaciones se ocupa de la producción de bienes y servicios, lo que permite entender la producción como un sistema de decisiones y no como una ejecución técnica aislada.

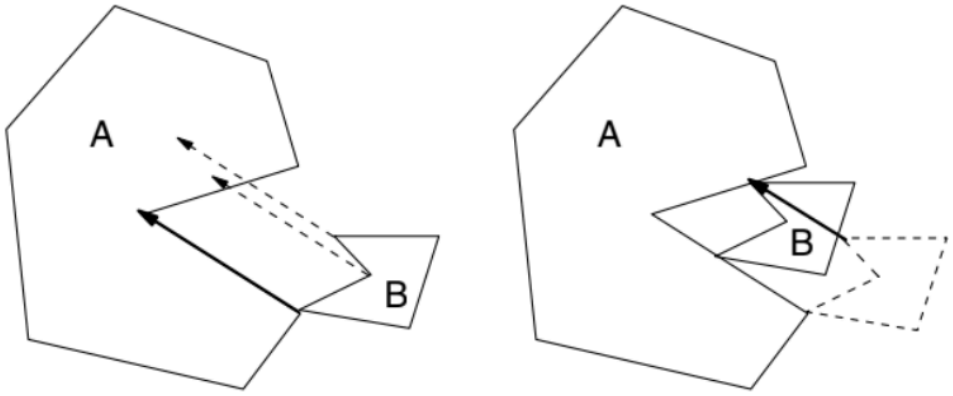
3.1.2. Desarrollo de herramientas de optimización y su enfoque dominante

El avance de las herramientas digitales ha permitido automatizar en gran medida el proceso de nesting. Los sistemas actuales son capaces de generar múltiples configuraciones en tiempos reducidos, evaluando diferentes combinaciones y seleccionando las que ofrecen mejores resultados según criterios previamente definidos.

Este tipo de problemas presenta una elevada complejidad computacional, especialmente cuando se trabaja con geometrías irregulares, lo que implica la necesidad de utilizar métodos heurísticos para la generación de soluciones viables (Bennell y Oliveira, 2008).

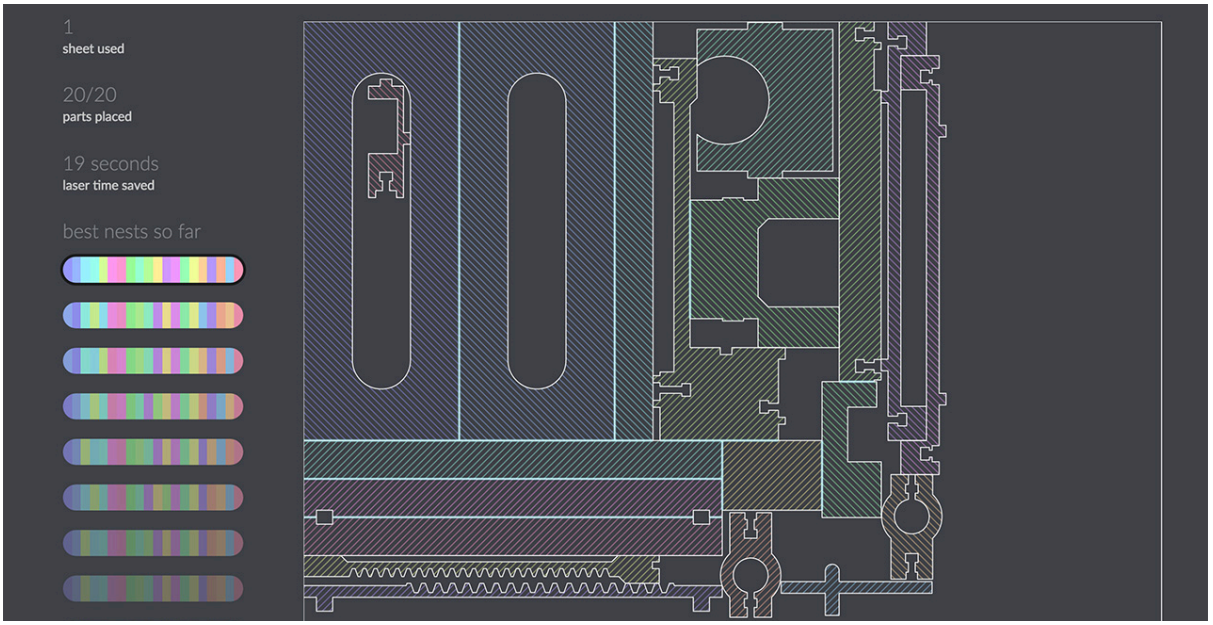
Herramientas como DeepNest muestran enfoques basados en la exploración de múltiples configuraciones posibles y seleccionar aquellas que mejor responden a los parámetros definidos en el proceso de optimización (*DeepNest*, s. f.).

Figura 8. *Representación de intersección de piezas irregulares.*



Nota. Tomado de The geometry of nesting problems: A tutorial (p. 403), por J. A. Bennell y J. F. Oliveira, 2008, European Journal of Operational Research.

Figura 9. *Interfaz beta de DeepNest con selección del mejor resultado.*



Nota. Tomado de DeepNest.io (s. f.).

3.1.3. Limitaciones de la optimización algorítmica en entornos reales

Una de las principales limitaciones de los sistemas algorítmicos en entornos productivos es su dependencia de la parametrización. Al operar sobre variables medibles, el software traduce el problema geométrico a parámetros formales y puede excluir factores logísticos u organizativos. Si una prioridad de taller, una restricción logística o una necesidad de gestión no puede formularse matemáticamente, es probable que no quede incorporada al resultado.

Esta desconexión entre cálculo y operatividad es analizada por Luzuriaga Bermeo (2024), quien demuestra que la eficiencia en procesos industriales de corte no se limita al ahorro material, sino que depende de la planificación, las formas de almacenamiento, el flujo de trabajo y la distribución de recursos.

Trasladado al proceso de nesting, esto significa que una solución geométricamente óptima puede resultar deficiente en la práctica. Un nesting con un aprovechamiento excelente puede perder parte de su valor si alarga los tiempos de preparación, dificulta la extracción de las piezas o ignora si el material residual sobrante es reutilizable en procesos posteriores.

3.1.4. El papel del conocimiento humano en la planificación

Frente a las limitaciones algorítmicas, la experiencia operativa sigue siendo fundamental en el nesting. En la práctica, las decisiones manuales aportan adaptación contextual al taller, pero generan una fuerte dependencia del conocimiento del operador.

Figura 10. *Programación de maquinaria CNC 2D.*



Nota. Tomado de Cottonbro Studio. (2021b, abril 12). Trabajando carpintería adentro fabricando. Pexels. https://www.pexels.com/es-es/foto/trabajando-carpinteria-adentro-fabricando-7484155/

Como señala Osorio Cuervo (2025), la tecnología CNC exige una transformación organizativa donde el control del operador va más allá de encender la máquina: Implica interpretar planos, configurar parámetros y coordinar la producción real

en el taller. El criterio técnico del operador garantiza la flexibilidad, pero la variabilidad entre operadores dificulta la sistematización, la transferencia de conocimiento y la evaluación objetiva del rendimiento.

3.1.5. Coexistencia actual: Entre automatización y experiencia

En muchos entornos productivos, el nesting se desarrolla como una práctica híbrida. Desde el punto de vista puramente técnico, autores como D'Amato et al. (2016) muestran la utilidad de los métodos computacionales para distribuir piezas irregulares sin solapamientos. No obstante, esta optimización geométrica suele requerir una interpretación operativa en el taller.

Esta necesidad de complementariedad coincide con Suárez y Paredes (2022), quienes defienden que la industria contemporánea no busca sustituir la intervención humana, sino integrar la tecnología con el criterio y la supervisión de las personas. En esta lógica de complementariedad el software asume la carga de cálculo, mientras que el operador aprueba la viabilidad productiva, adaptando el corte a situaciones imprevistas.

3.1.6. Hacia una integración más eficiente

La revisión previa permite observar que la mejora del proceso de nesting no pasa por enfrentar el trabajo manual frente a la automatización, sino por estructurar cómo interactúan ambas herramientas.

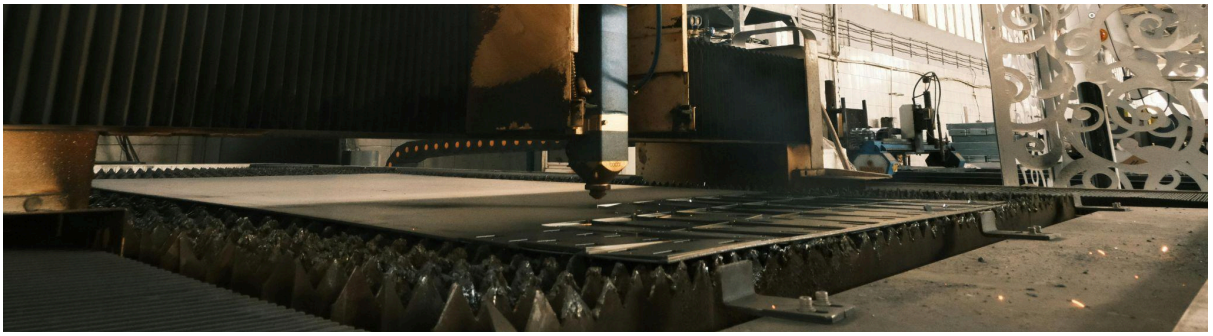
A partir de esta revisión, puede plantearse que un modelo de trabajo eficiente utilizaría el software como punto de partida para generar alternativas y reducir drásticamente los tiempos de preparación. A continuación, la intervención humana actuaría como filtro cualitativo, validando o ajustando esa propuesta base según los condicionantes productivos reales. Esta premisa de integración es la que determina el enfoque híbrido que se ha puesto a prueba en esta investigación. En este trabajo, se considera híbrida la solución generada por software y posteriormente validada o ajustada en AutoCAD

3.2. Estado del arte

En la industria contemporánea, el nesting ha evolucionado hasta convertirse en un condicionante estratégico que influye desde el inicio en el propio diseño del producto.

En sectores como el corte de chapa mediante láser o plasma, su uso es un estándar para reducir los costes de materia prima. Las empresas del sector utilizan herramientas de software especializadas para agrupar pedidos de distintos clientes en una misma plancha. Más allá de la compactación geométrica, estas distribuciones requieren ajustes por parte de los técnicos en el taller para integrar condicionantes físicos, como: secuencia de corte; reducción de desplazamientos del cabezal o el control de las deformaciones térmicas del material.

Figura 11. *Maquinaria láser cortando chapa metálica.*



Nota. Tomado de Yurtman, C. (2024, 29 diciembre). Cortadora láser industrial en entorno de fabrica. Pexels. https://www.pexels.com/es-es/foto/cortadora-láser-industrial-en-entorno-de-fabrica-29988963/

En la industria del mueble, especialmente en sistemas modulares o de fabricación bajo demanda, el nesting ha dado lugar a estrategias de *design for manufacturing* (Autodesk, s. f.-b). El diseñador proyecta las piezas previendo desde la fase de boceto cómo se distribuirán en los formatos estándar de tablero comercial, buscando el máximo aprovechamiento del panel, la facilidad de corte y la eficiencia en el montaje.

Figura 12. *Maquinaria CNC 2D en funcionamiento.*



Nota. Tomado de Cottonbro Studio. (2021a, abril 12). Maquinaria CNC 2D en funcionamiento. Pexels. https://www.pexels.com/es-es/foto/madera-de-madera-carpintero-carpinteria-7480234/

Del mismo modo, en la fabricación de señalética, elementos promocionales o trofeos, caracterizada por la alta variabilidad y los bajos volúmenes unitarios, el nesting permite agrupar múltiples diseños en una sola área de trabajo. Esto puede contribuir a hacer rentable un modelo de negocio basado en la personalización, haciendo viables las series muy cortas al optimizar el gasto en material.

Figura 13. *Corte CNC 2D aplicado a tablero de madera para señalética.*



Nota. Tomado de Corte Madera CNC. (2024). Corte madera CNC Madrid. Corte Madera CNC Madrid. https://cortemaderacnc.com/corte-madera-cnc-madrid/

Desde el punto de vista tecnológico, la tendencia actual avanza hacia la interconexión entre diseño, planificación y producción (AlmaCam, 2024). Los procesos de nesting se vinculan de manera fluida con software CAD/CAM[1] y sistemas de gestión ERP[2]. Esta integración confirma que la disposición de piezas sobre un material ha dejado de ser una tarea final de organización para consolidarse como un nodo central de la producción industrial, interconectando el diseño digital, la planificación de recursos y la estrategia operativa de la empresa.

[1] Diseño asistido por computadora y fabricación asistida por computadora, del inglés *Computer Aided Design and Computer Aided Manufacturing.*
[2] Planificación de recursos empresariales, del inglés *Enterprise Resource Planning.*

4.1. Variables analizadas

La metodología de este trabajo se ha planteado desde un enfoque mixto, combinando **análisis cuantitativo y cualitativo** a partir de una serie de pruebas experimentales de nesting.

Desde el punto de vista **cuantitativo**, la investigación ha analizado:

Tabla 1. *Variables cuantitativas.*

Variable	Descripción	Unidad de medición
Tiempo de preparación.	Tiempo necesario para generar una solución válida.	Tiempo (min:seg)
Porcentaje de desperdicio.	Relación entre área desperdiciada y total del tablero.	Porcentaje (%)
Número de piezas colocadas.	Cantidad de piezas incluidas correctamente.	N.º de piezas colocadas

Nota. Elaboración propia (2026).

El desperdicio se calculó mediante la siguiente fórmula matemática:

$$\%\ de\ desperdicio\ = \frac{(45.000\ cm^2 - Área\ aprovechada)\cdot 100}{45.000\ cm^2}$$

En esta fórmula, el área aprovechada corresponde a la superficie ocupada por las piezas colocadas.

Desde el punto de vista **cualitativo**, se ha analizado:

Tabla 2. *Variables cualitativas.*

Variable	Descripción	Escala de valoración
Capacidad de reutilización del material residual.	Se observó si el material sobrante generado mantiene espacios reutilizables para futuros procesos productivos.	Del 1 al 5, siendo 1 el menor capacidad y 5 mayor capacidad.
Calidad organizativa y adaptabilidad del nesting.	Se analizó el nivel de claridad y coherencia en la disposición de las piezas dentro del tablero.	Del 1 al 5, siendo 1 el menos adaptable y 5 el más adaptable.
Dependencia del criterio técnico.	Se observó el grado de intervención manual y toma de decisiones necesarias para alcanzar una solución funcional y técnicamente válida.	Del 1 al 5, siendo 1 el que mayor criterio técnico necesita y 5 el que menos criterio técnico necesita.

Nota. Elaboración propia (2026).

En la Tabla 3 se relacionan las hipótesis y objetivos de los apartados 2.1 y 2.2 con las variables.

Tabla 3. Relación entre hipótesis, objetivos y variables de análisis.

Hipót.	Objetivos relacionados	Variables cuantitativas	Variables cualitativas
H1	OP, OE4, OE5	Tiempo de preparación. Porcentaje de desperdicio. Número de piezas colocadas.	Calidad organizativa y adaptabilidad del nesting. Capacidad de reutilización del material residual. Dependencia del criterio técnico.
H2	OP, OE2, OE4, OE5	Tiempo de preparación. Porcentaje de desperdicio. Número de piezas colocadas.	Dependencia del criterio técnico. Calidad organizativa y adaptabilidad del nesting.
H3	OE3, OE4, OE5	Porcentaje de desperdicio. Número de piezas colocadas.	Capacidad de reutilización del material residual. Calidad organizativa y adaptabilidad del nesting.
H4	OP, OE4, OE5	Tiempo de preparación. Porcentaje de desperdicio. Número de piezas colocadas.	Capacidad de reutilización del material residual. Calidad organizativa y adaptabilidad del nesting.
H5	OE1, OE2, OE5	Tiempo de preparación.	Dependencia del criterio técnico. Calidad organizativa y adaptabilidad del nesting.

Nota. Elaboración propia (2026).

4.2. Diseño experimental

La investigación se estructuró a partir de ocho instancias de nesting, diseñadas para representar diferentes situaciones de corte y dificultad en función del tamaño y la geometría de las piezas. La Figura 14 muestra un ejemplo de las piezas que se deben colocar.

La muestra está formada por ocho grupos de piezas, denominados **instancias experimentales**, que representan distintas situaciones habituales dentro del proceso de nesting para corte con fresa en maquinaria CNC 2D.

Se entiende por instancia experimental cada caso específico de nesting en el que se evalúa un conjunto determinado de piezas para obtener un resultado concreto.

Figura 14. *Combinación de piezas de distintos tamaños (instancia experimental mixta).*



Nota. Elaboración propia (2026).

Figura 15. *Conjunto de piezas utilizadas para las instancias experimentales.*



Nota. Elaboración propia (2026).

Cada instancia se resolvió mediante tres enfoques:

1. **Resolución manual**: Se ejecutó manualmente en AutoCAD, fundamentándose en el criterio, la capacidad visual y la experiencia práctica del operador para organizar el espacio y la geometría. Este enfoque permitió observar la toma de decisiones en un entorno productivo **donde el factor humano mantiene un peso central.**

2. **Resolución algorítmica**: Se automatizó por completo a través del software Nest&Cut (ALMA, s. f.). El programa procesó las piezas bajo restricciones fijas de separación y tablero, para luego generar una propuesta sin intervención manual.

3. **Resolución híbrida**: Se combinaron ambas herramientas utilizando el cálculo automático de Nest&Cut para la distribución inicial y el ajuste manual posterior en AutoCAD.

   El método híbrido se utilizó:

- Cuando el operador observó que el método algorítmico ofreció una solución suficientemente eficiente (se pudieron colocar más piezas).
- Cuando fue necesaria la colocación de piezas medianas o pequeñas, en casos mixtos.

Figura 16. *Resumen de enfoques de la investigación.*



Nota. Elaboración propia (2026).

La comparación entre métodos se realizó de forma **intra-instancia**, es decir, comparando los tres enfoques dentro de una misma instancia experimental.

El análisis se realizó mediante tablas comparativas. Esta estructura permitió identificar qué enfoque ofrece mejores resultados en cada tipo de instancia experimental y valorar si la eficiencia del nesting dependía únicamente del aprovechamiento del material o también de otros factores operativos.

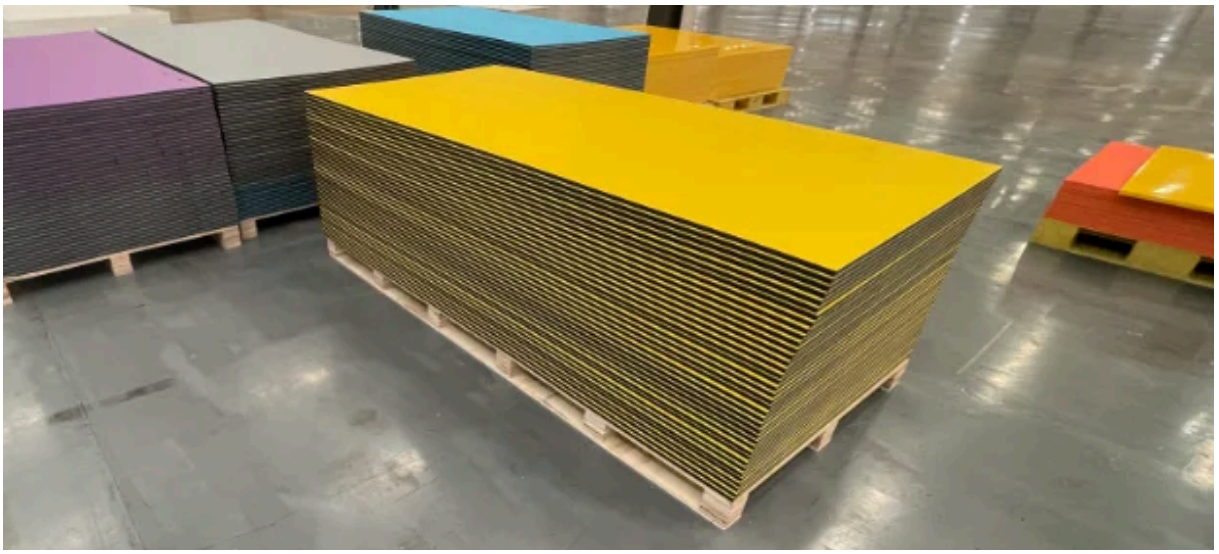
4.3. Condiciones comunes de experimentación

Todas las pruebas se realizaron bajo condiciones equivalentes para garantizar la comparabilidad de los resultados. Cada instancia experimental partió de un archivo digital que contenía las piezas seleccionadas para esa instancia experimental.

Tipo de tablero:

En todas las pruebas se utilizó un tablero de **3.000** × **1.500 mm** (Figura 17) y se aplicaron las mismas restricciones de trabajo: Un margen exterior de seguridad de **20 mm** y una separación mínima de **8 mm** entre piezas. Estas distancias respondieron a la necesidad de mantener una configuración válida para procesos de corte CNC con fresa, donde la herramienta requiere un margen físico mayor. Como algunas de las herramientas utilizadas en el proceso no permitieron corroborar automáticamente algunos de estos parámetros, la comprobación se realizó de manera manual antes de validar el resultado.

Figura 17. *Tablero de plástico técnico.*



Nota. Tomado de Zhihong (2026)

Para que una solución de nesting se considerase válida, todas las piezas debían situarse dentro del área útil del tablero. Además, en cada instancia experimental se debía incorporar al menos un elemento de cada tipo de pieza previsto para la instancia experimental, evitando soluciones que optimicen únicamente una parte del conjunto y excluyan geometrías relevantes para el análisis.

Temporalización:

Con el fin de mantener un marco temporal comparable, se estableció un límite máximo de **15 minutos por método**. Este límite se justificó porque tiempos superiores se consideran poco viables en un flujo productivo real. Si el resultado no se encontraba dentro de ese tiempo, se registraría como **no resuelto**.

Asimismo, para reducir la contaminación visual entre métodos, las resoluciones algorítmica e híbrida se realizaron en una misma jornada de trabajo, mientras que

el método manual se desarrolló en un momento diferente. De este modo se buscaba evitar que el operador reprodujera de forma inconsciente soluciones previamente observadas en el software o en otros métodos de resolución.

Cualquier instancia experimental que no cumpliera con las condiciones anteriormente mencionadas debía realizarse de nuevo

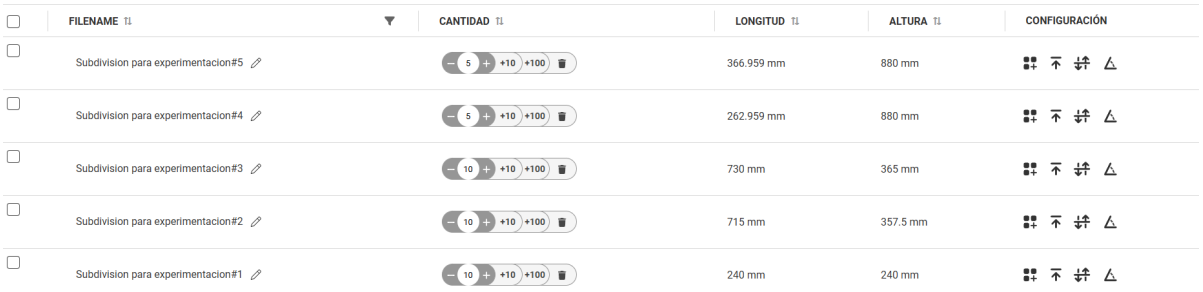
4.4. Fases del trabajo

El procedimiento de experimentación siguió una secuencia común para las ocho instancias experimentales.

Fase 1. **Preparación digital**: Consistió en preparar el conjunto de piezas correspondiente a cada instancia experimental. Todas las piezas debían estar listas en formato digital para poder ser utilizadas tanto en AutoCAD como en Nest&Cut. Para cada método se utilizó una copia del mismo archivo base, evitando modificaciones acumuladas entre pruebas.

Fase 2. **Definición de cantidad de piezas**: Esta fase fue exclusiva de los procesos algorítmicos e híbridos. Se seleccionaron las cantidades de piezas que se estimaron colocar en cada proceso. Si en el software se seleccionó una menor cantidad tendríamos espacio residual en el que posiblemente cabrían piezas. La pantalla de configuración se muestra en la Figura 18.

Figura 18. *Selección de cantidad de piezas.*



Nota. Elaboración propia (2026). De izquierda a derecha se observa nombre de referencia, cantidad de piezas a anidar, longitud, altura y algunas configuraciones propias del programa.

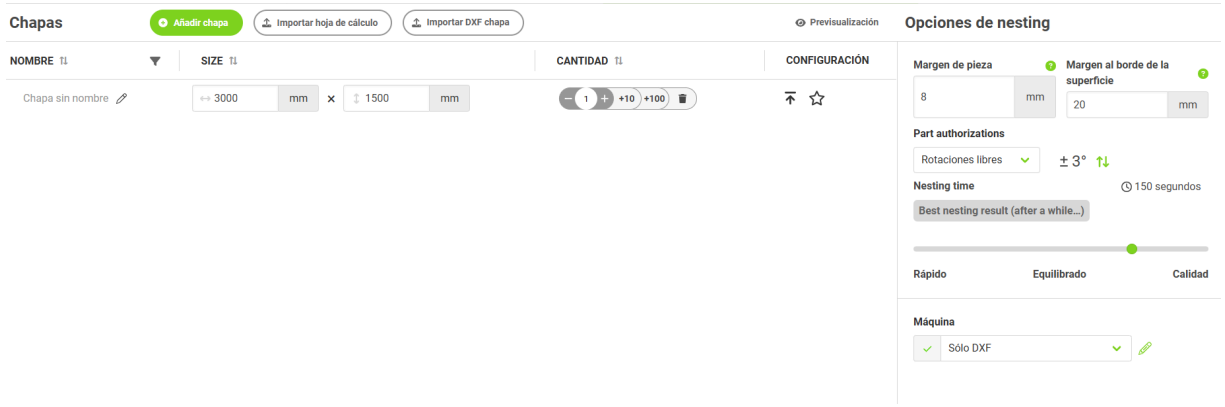
Fase 3. **Configuración de tableros y restricciones**: Se configuró el tablero de trabajo con las dimensiones establecidas y las condiciones comunes de separación. Ver figuras 19 y 20.

Figura 19. *Configuración del tablero base y restricciones en AutoCAD.*



Nota. Elaboración propia (2026). En contorno blanco el exterior del tablero (3.000 × 1.500 mm); en amarillo el rectángulo útil considerando la distancia de seguridad de 20 mm en cada lado (2.960 × 1.460 mm)

Figura 20. *Configuración del tablero base y restricciones en Nest&Cut.*



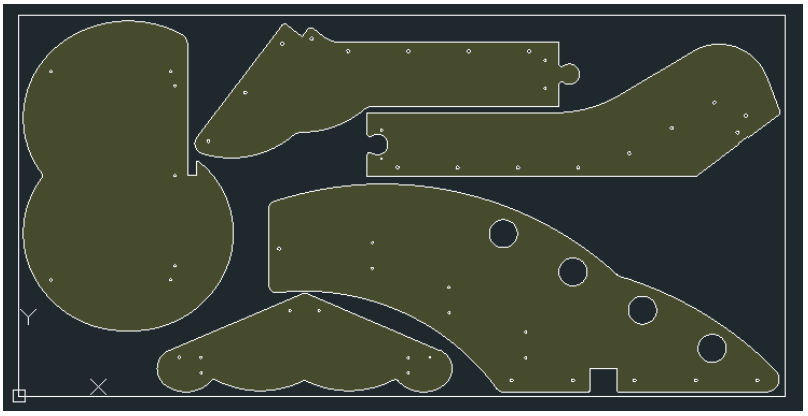
Nota. Elaboración propia (2026). Captura realizada del software web Nest&Cut (ALMA, s. f.) donde se pueden seleccionar dimensiones del panel, separación mínima entre piezas y margen de seguridad de exterior.

Fase 4. **Resolución y cronometraje**: Se ejecutó la distribución mediante los tres métodos de estudio. Se registró con cronómetro el tiempo exacto transcurrido desde el inicio de la preparación hasta la obtención de una propuesta válida (aquella que respetaba todas las restricciones técnicas), descartando estimaciones aproximadas.

Fase 5. **Cálculo de eficiencia y residuo** (Figuras 21 y 22): Se determinó el aprovechamiento del material mediante la relación entre el área total del tablero y la superficie neta ocupada por las piezas, expresando el desperdicio[3] resultante en porcentaje (ver fórmula en apartado 4.1).

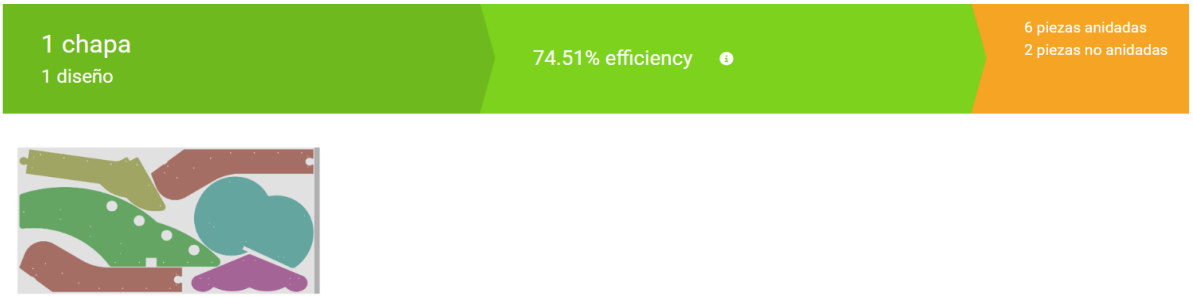
[3] Se considera desperdicio todo aquel espacio en el que no se puedan colocar o añadir piezas para ser aprovechadas. Esto añade, espacio entre piezas, márgenes de seguridad e interiores de piezas no utilizables.

Figura 21. *Cálculo del desperdicio de material en AutoCAD.*



Nota. Elaboración propia (2026). Captura de AutoCAD donde se pueden observar las piezas, pintadas en amarillo, colocadas en el tablero.

Figura 22. *Cálculo del desperdicio de material en Nest&Cut.*



Nota. Elaboración propia (2026). Captura realizada del software web Nest&Cut donde podemos revisar, de izquierda a derecha, cantidad de tableros (chapa) necesarios para cortar, la eficiencia en porcentaje y las piezas que no han podido ser anidadas por falta de espacio.

Fase 6. Sistematización de datos: Finalmente, se completó una ficha de análisis por cada instancia experimental, según se detalla en el siguiente apartado.

4.5. Datos obtenidos para cada instancia experimental. Fichas experimentales

Cada una de estas instancias se documentó mediante una ficha de análisis que facilitó la comparación entre los tres métodos de resolución (en función de lo comentado en el apartado 4.2).

La estructura de cada ficha es la siguiente:

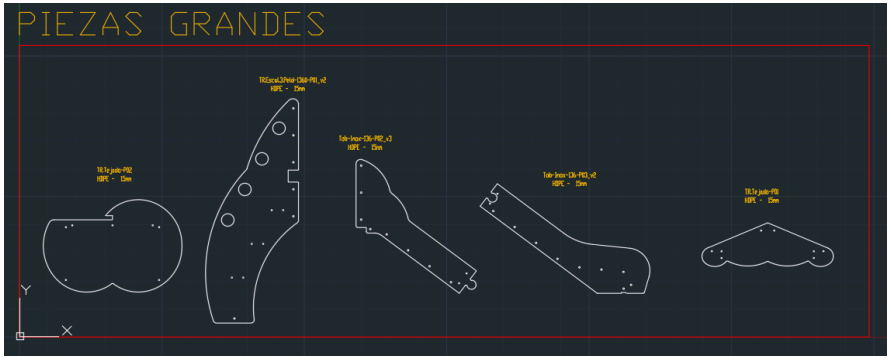
Instancia experimental x

Tabla 4. *Ejemplo de ficha técnica de la instancia experimental.*

Nombre y número de instancia experimental	-
Tipo de piezas	-
Dimensiones de piezas	-
Número de piezas colocadas por método	-

Nota. Elaboración propia (2026). Esta tabla presenta la estructura de la plantilla utilizada.

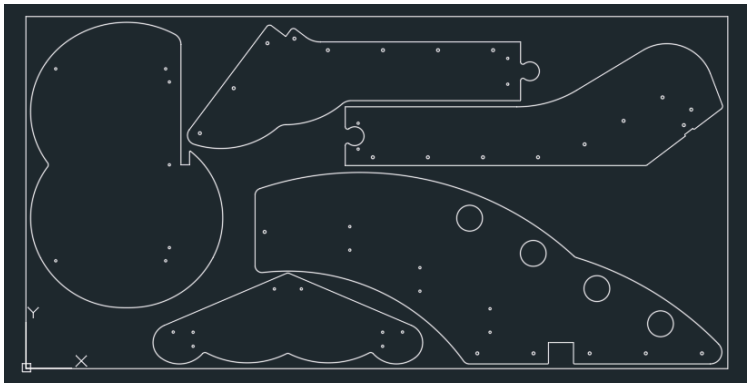
Figura 23. *Ejemplo de piezas utilizadas en la instancia experimental.*



Nota. Elaboración propia (2026). Esta figura es un mero ejemplo de cómo debe estar estructurada la plantilla.

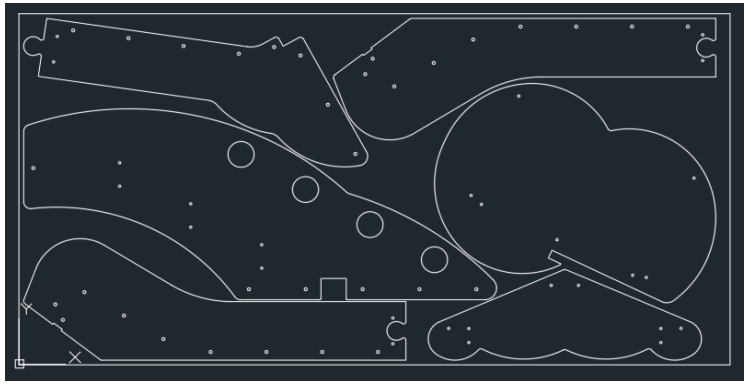
Resultados de nesting

Figura 24. *Ejemplo de nesting manual de la instancia experimental.*



Nota. Elaboración propia (2026). Esta figura es un mero ejemplo de cómo debe estar estructurada la plantilla.

Figura 25. *Ejemplo de nesting algorítmico e híbrido de la instancia experimental.*



Nota. Elaboración propia (2026). Esta figura es un mero ejemplo de cómo debe estar estructurada la plantilla.

Relación tiempo/desperdicio

Tabla 5. *Ejemplo de relación tiempo/desperdicio.*

Método	Tiempo	Desperdicio	Aclaraciones
Manual	-	-	-
Algorítmico	-	-	-
Híbrido	-	-	-

Nota. Elaboración propia (2026). Esta tabla presenta la estructura de la plantilla utilizada.

Valoraciones cualitativas

Tabla 6. *Ejemplo de valoración cualitativa.*

Método	Capacidad de reutilización del material residual	Calidad organizativa y adaptabilidad del nesting	Dependencia del criterio técnico
Manual	-	-	-
Algorítmico	-	-	-
Híbrido	-	-	-

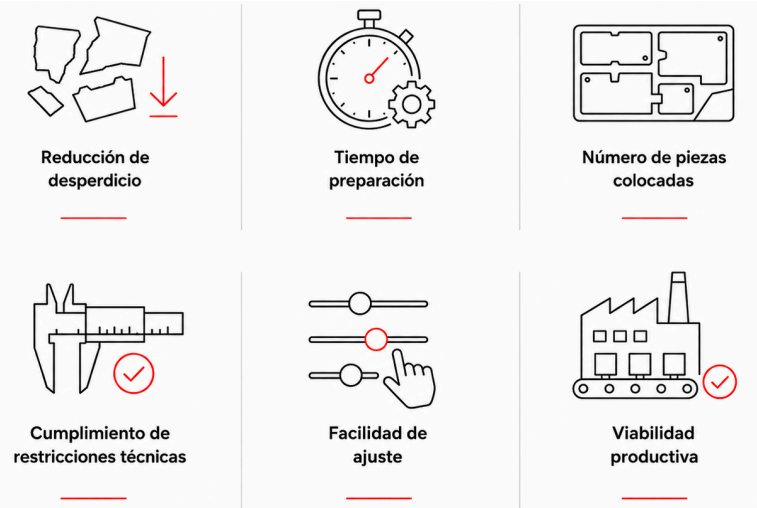
Nota. Elaboración propia (2026). Esta tabla presenta la estructura de la plantilla utilizada.

Síntesis individual de la instancia experimental

4.6. Análisis comparativo de resultados

Una vez completadas las ocho instancias experimentales se realizó un **análisis global** en el que se compararon los resultados acumulados y se observaron tendencias generales. Este análisis permitió valorar si alguno de los métodos mantiene un comportamiento más estable, si el software obtiene mejores resultados en determinados tipos de piezas o si el enfoque híbrido logra un mejor equilibrio (ver figura 26).

Figura 26. *Criterios de equilibrio para el análisis comparativo del nesting.*



Nota. Elaboración propia (2026).

Una vez validada la viabilidad técnica de cada propuesta, se aplicó una matriz de valoración ponderada (Tabla 7) según criterio propio del autor, donde se ha ponderado con mayor peso las variables cuantitativas y en especial el porcentaje de desperdicio y el tiempo de preparación, ya que son las variables que inciden directamente en la rentabilidad del proceso.

La distribución de ponderación se ha realizado de esta manera atendiendo a la importancia y la necesidad de prioridades reales en una empresa.

Tabla 7. *Tabla de ponderación para resultados de las instancias experimentales.*

Criterio de análisis	Tipo de variable	Ponderación
Porcentaje de desperdicio	Cuantitativa	30 %
Tiempo de preparación	Cuantitativa	25 %
Número de piezas colocadas	Cuantitativa	15 %
Capacidad de reutilización del material residual	Cualitativa	10 %
Calidad organizativa y adaptabilidad del nesting	Cualitativa	10 %
Dependencia del criterio técnico del operador	Cualitativa	10 %
Total		**100 %**

Nota. Elaboración propia (2026). En el caso del porcentaje de desperdicio y tiempo, el mejor resultado es el más bajo obtenido. Lo contrario para el número de piezas, la mejor puntuación es la que más piezas ha colocado. En el caso de las variables cualitativas una valoración de 5 es el mejor resultado y 1 es el peor resultado. Para estas variables, se asignan valores equivalentes a 33%/66%/99%.

De este modo, la comparación final no dependió únicamente del porcentaje de aprovechamiento del material, sino de una lectura integrada de los valores.

4.7. Limitaciones metodológicas

En primer lugar, el estudio se desarrolló sobre ocho instancias experimentales concretas, por lo que sus conclusiones estuvieron vinculadas a las piezas, geometrías y condiciones definidas para este trabajo.

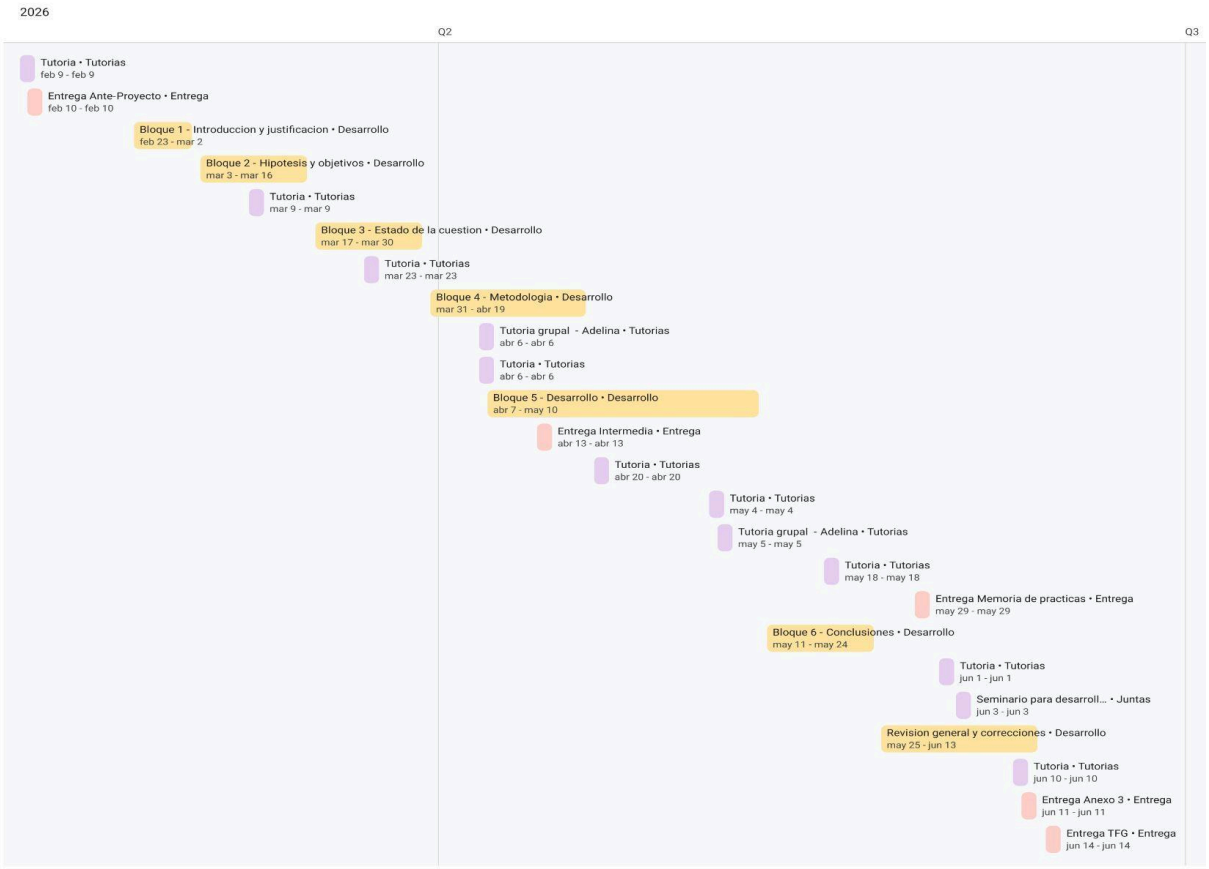
En segundo lugar, el análisis se limitó a la fase de planificación del nesting. No se evaluó el comportamiento real de la máquina durante el corte, ni variables como desgaste de herramienta, velocidad de avance, vibraciones, calidad del acabado o incidencias durante el mecanizado. **Estos aspectos quedaron fuera del alcance del estudio.**

Asimismo, el método manual fue realizado desde un criterio técnico del operador concreto, por lo que los resultados no representaron toda la variabilidad posible entre diferentes operadores. Esta limitación debe considerarse al interpretar la comparación entre métodos.

Por último, el estudio no pretendió establecer una solución universal para todos los procesos de nesting, sino analizar de forma concreta cómo se comportaron tres métodos de resolución ante ocho situaciones controladas.

4.8. Cronograma de desarrollo

Figura 27. *Cronograma de desarrollo del TFG.*



Nota. Elaboración propia (2026).

Bloque 5: Desarrollo

5.1. Introducción al desarrollo experimental

En este bloque se expondrán los resultados de las 8 instancias experimentales, según el procedimiento de trabajo explicado en el apartado 4.5 y obteniendo los datos según las fichas experimentales individuales desarrolladas en el 4.6

5.2. Instancias experimentales desarrolladas

Una vez preparado el entorno de trabajo, se desarrollan las ocho instancias experimentales definidas previamente en la metodología. Cada una de ellas se resuelve mediante los tres métodos de resolución establecidos: Manual, algorítmico e híbrido.

Instancia experimental 1

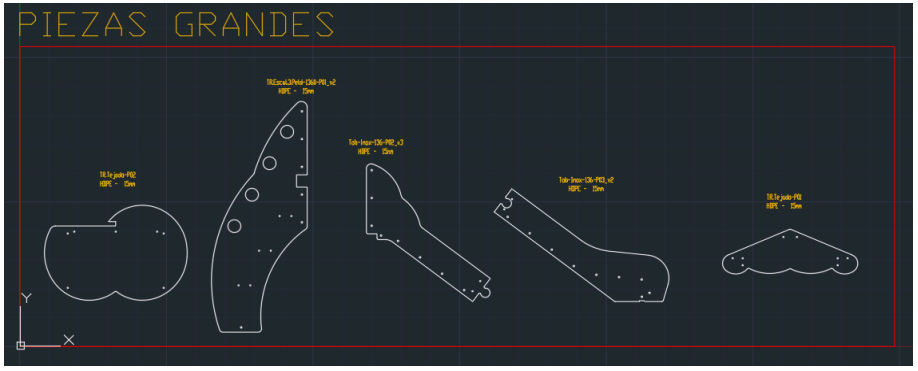
Tabla 8. *Ficha técnica de la instancia experimental 1.*

Nombre y número de instancia experimental	Instancia experimental 1 - Piezas grandes
Tipo de piezas	Piezas de gran tamaño
Dimensiones de piezas	Entre 2000 × 820 mm y 1152 × 388 mm
Número de piezas colocadas por método	6 piezas colocadas (algorítmico/híbrido) 5 piezas colocadas (manual)

Nota. Elaboración propia (2026).

Piezas a utilizar

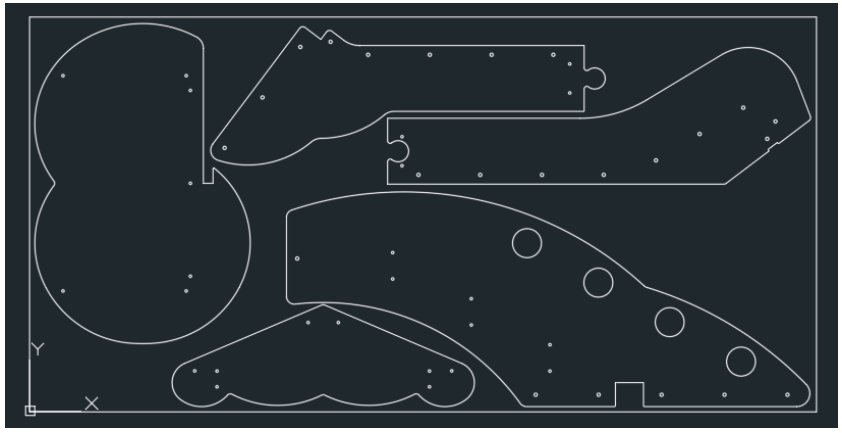
Figura 28. *Piezas utilizadas en la instancia experimental 1.*



Nota. Elaboración propia (2026). Piezas incluidas en el nesting de piezas grandes.

Resultados de nesting

Figura 29. *Nesting manual de la instancia experimental 1.*



Nota. Elaboración propia (2026). Nesting manualmente realizado compuesto por piezas grandes.

Figura 30. *Nesting algorítmico e híbrido de la instancia experimental 1.*



Nota. Elaboración propia (2026). Nesting de piezas grandes realizada por algoritmo y revisada por operador.

Relación tiempo/desperdicio

Tabla 9. *Relación tiempo/desperdicio de la instancia experimental 1.*

Método	Tiempo (min:seg)	Desperdicio
Manual	12:02	37,46 %
Algorítmico	03:54	25,49 %
Híbrido	03:54	25,49 %

Nota. Elaboración propia (2026).

Valoraciones cualitativas

Tabla 10. *Valoraciones cualitativas por método de la instancia experimental 1.*

Método	Capacidad de reutilización del material residual	Calidad organizativa y adaptabilidad del nesting	Dependencia del criterio técnico
Manual	5	2	1
Algorítmico	5	3	5
Híbrido	5	3	5

Nota. Elaboración propia (2026).

Síntesis individual de la instancia experimental

Las piezas de gran tamaño mostraron una mayor dependencia de la capacidad de compactación del software, obteniendo mejores resultados tanto en tiempo como en aprovechamiento respecto al nesting realizado manualmente. La limitada cantidad de piezas redujo las posibilidades de reorganización híbrida, por lo que no se observaron mejoras adicionales frente a la solución algorítmica.

Instancia experimental 2

Ficha de instancia experimental

Tabla 11. *Ficha técnica de la instancia experimental 2.*

Nombre y número de instancia experimental	**Instancia experimental 2 - Piezas medianas**
Tipo de piezas	Piezas de tamaño medio
Dimensiones de piezas	Entre 287 × 170 mm y 208 × 145 mm
Número de piezas colocadas por método	101 piezas colocadas (algorítmico/híbrido) 102 piezas colocadas (manual)

Nota. Elaboración propia (2026).

Piezas a utilizar

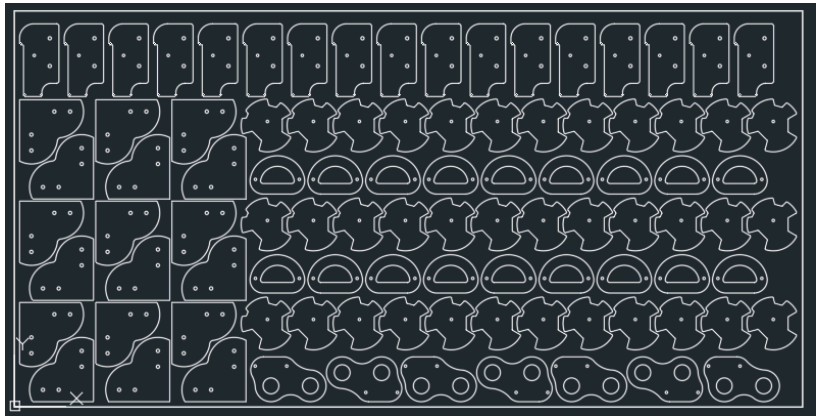
Figura 31. *Piezas utilizadas en la instancia experimental 2.*



Nota. Elaboración propia (2026). Piezas incluidas en el nesting de piezas medianas.

Resultados de nesting

Figura 32. *Nesting manual de la instancia experimental 2.*



Nota. Elaboración propia (2026). Nesting manualmente realizado compuesto por piezas medianas.

Figura 33. *Nesting algorítmico e híbrido de la instancia experimental 2.*



Nota. Elaboración propia (2026). Nesting de piezas medianas realizado por algoritmo y revisado por operador.

Relación tiempo/desperdicio

Tabla 12. *Relación tiempo/desperdicio de la instancia experimental 2.*

Método	Tiempo (min:seg)	Desperdicio
Manual	08:04	37,93 %
Algorítmico	03:57	28,96 %
Híbrido	03:57	28,96 %

Nota. Elaboración propia (2026).

Valoraciones cualitativas

Tabla 13. *Valoraciones cualitativas instancia experimental 2.*

Método	Capacidad de reutilización del material residual	Calidad organizativa y adaptabilidad del nesting	Dependencia del criterio técnico
Manual	1	4	3
Algorítmico	1	4	1
Híbrido	1	4	1

Nota. Elaboración propia (2026).

Síntesis individual de la instancia experimental

Las piezas medianas permitieron una distribución más flexible dentro del tablero, aunque el nesting algorítmico continuó mostrando una mejor relación entre tiempo y desperdicio. La intervención híbrida no generó diferencias significativas, evidenciando que en geometrías relativamente repetitivas el software puede resolver el problema de forma eficiente sin intervención adicional.

Instancia experimental 3

Ficha de instancia experimental

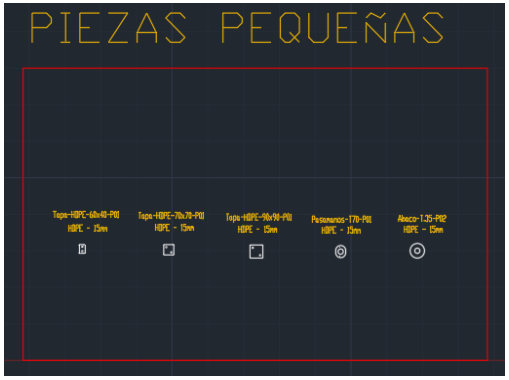
Tabla 14. *Ficha técnica de la instancia experimental 3.*

Nombre y número de instancia experimental	Instancia experimental 3 - Piezas pequeñas
Tipo de piezas	Piezas de pequeño tamaño
Dimensiones de piezas	Entre 100 × 100 mm y 60 × 40 mm
Número de piezas colocadas por método	581 piezas colocadas (algorítmico/híbrido) 570 piezas colocadas (manual)

Nota. Elaboración propia (2026).

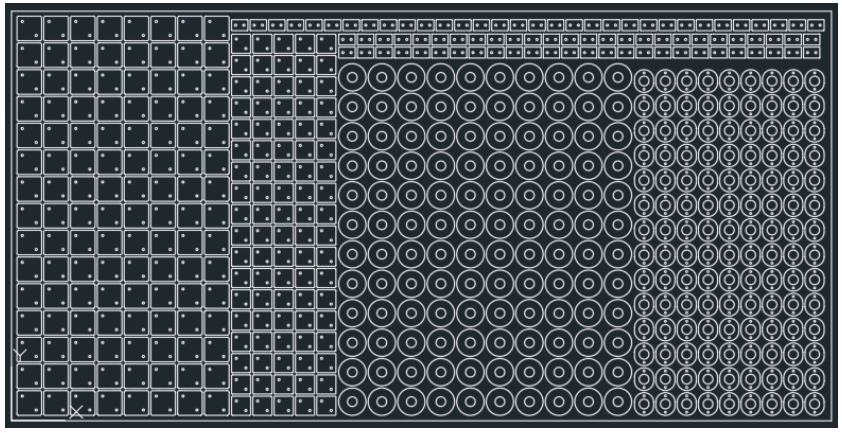
Piezas a utilizar

Figura 34. *Piezas utilizadas en la instancia experimental 3.*



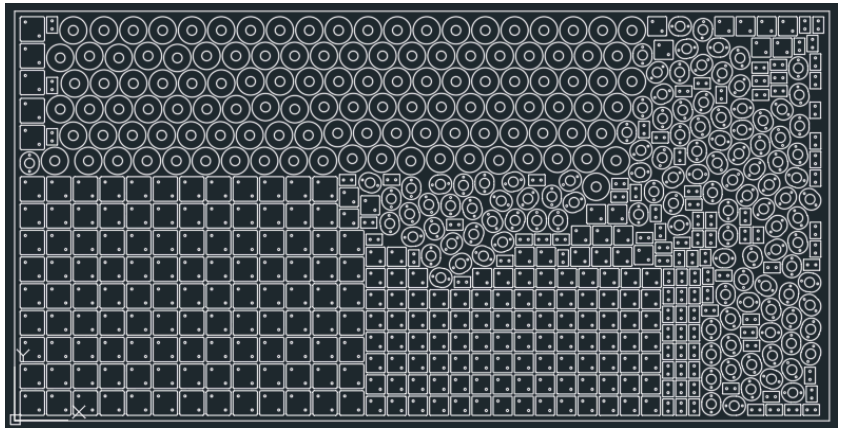
Nota. Elaboración propia (2026). Piezas incluidas en el nesting de piezas pequeñas.

Figura 35. *Nesting manual de la instancia experimental 3.*



Nota. Elaboración propia (2026). Nesting manual de piezas pequeñas.

Figura 36. *Nesting algorítmico e híbrido de la instancia experimental 3.*



Nota. Elaboración propia (2026). Nesting híbrido de piezas pequeñas.

Relación tiempo/desperdicio

Tabla 15. *Relación tiempo/desperdicio de la instancia experimental 3.*

Método	Tiempo (min:seg)	Desperdicio
Manual	07:43	36,01 %
Algorítmico	04:00	31,87 %
Híbrido	04:00	31,87 %

Nota. Elaboración propia (2026).

Valoraciones cualitativas

Tabla 16. *Valoraciones cualitativas por método de la instancia experimental 3.*

Método	Capacidad de reutilización del material residual	Calidad organizativa y adaptabilidad del nesting	Dependencia del criterio técnico
Manual	1	4	1
Algorítmico	1	4	1
Híbrido	1	4	1

Nota. Elaboración propia (2026).

Síntesis individual de la instancia experimental

La elevada cantidad de piezas pequeñas favoreció configuraciones densas y repetitivas. Aunque el operador logró colocar un número ligeramente inferior de piezas, el algoritmo mantuvo un mejor equilibrio entre tiempo de preparación y aprovechamiento del material. La intervención híbrida no produjo mejoras apreciables frente a la solución automática.

Instancia experimental 4

Ficha de instancia experimental

Tabla 17. *Ficha técnica de la instancia experimental 4.*

Nombre y número de instancia experimental	**Instancia experimental 4 - Piezas mixtas (Grandes, medianas, pequeñas)**
Tipo de piezas	Mezcla de piezas grandes, medianas y pequeñas
Dimensiones de piezas	Entre 1450 × 290 mm y 83 × 83 mm
Número de piezas colocadas por método	70 piezas colocadas (algorítmico) 52 piezas colocadas (híbrido) 56 piezas colocadas (manual)

Nota. Elaboración propia (2026).

Piezas a utilizar

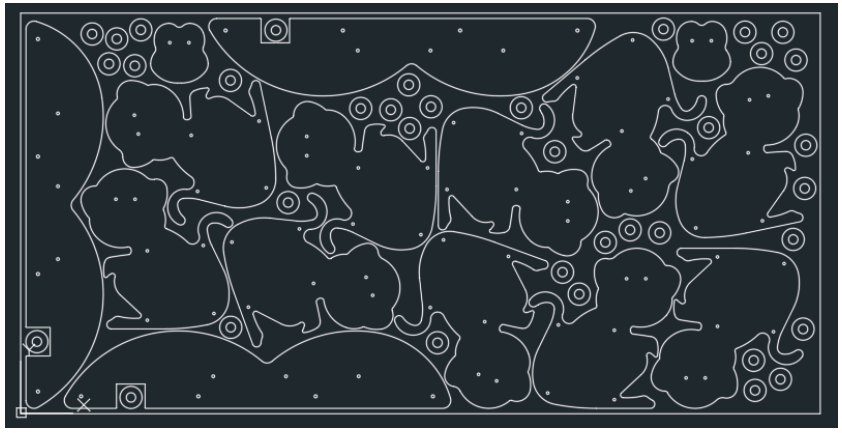
Figura 37. *Piezas utilizadas en la instancia experimental 4.*



Nota. Elaboración propia (2026). Piezas incluidas en el nesting de piezas mixtas

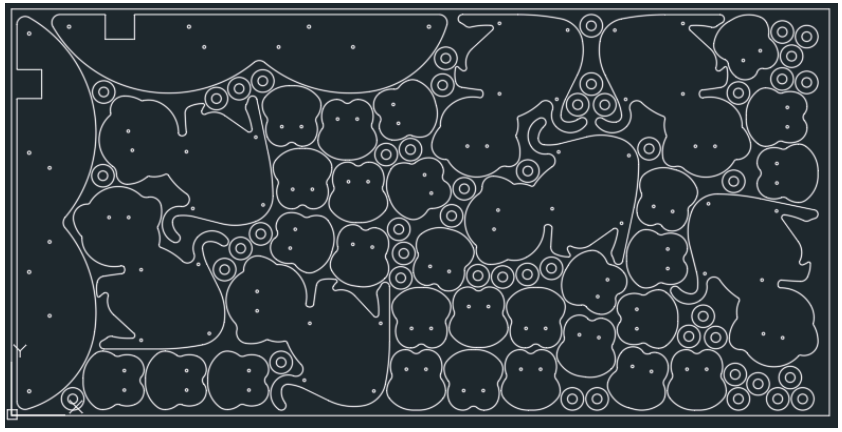
Resultados de nesting

Figura 38. *Nesting algorítmico de la instancia experimental 4.*



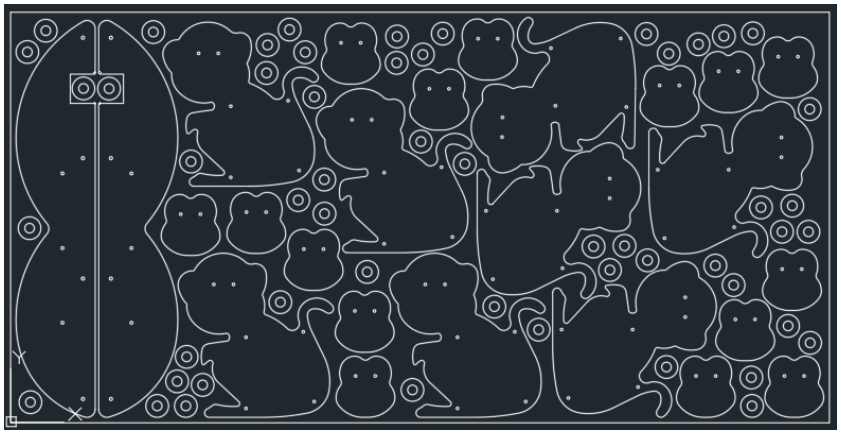
Nota. Elaboración propia (2026). Nesting algorítmico de piezas mixtas,

Figura 39. *Nesting híbrido de la instancia experimental 4.*



Nota. Elaboración propia (2026). Nesting híbrido de piezas mixtas

Figura 40. *Nesting manual de la instancia experimental 4.*



Nota. Elaboración propia (2026). Nesting manual de piezas mixtas

Relación tiempo/desperdicio

Tabla 18. *Relación tiempo/desperdicio de la instancia experimental 4.*

Método	Tiempo (min:seg)	Desperdicio
Manual	07:52	30,25 %
Algorítmico	03:51	23,04 %
Híbrido	05:36	26,63 %

Nota. Elaboración propia (2026).

Valoraciones cualitativas

Tabla 19. *Valoraciones cualitativas por método de la instancia experimental 4.*

Método	Capacidad de reutilización del material residual	Calidad organizativa y adaptabilidad del nesting	Dependencia del criterio técnico
Manual	3	3	1
Algorítmico	3	5	5
Híbrido	3	4	3

Nota. Elaboración propia (2026).

Síntesis individual de la instancia experimental

La combinación de piezas grandes, medianas y pequeñas incrementó la complejidad del nesting y permitió observar diferencias más claras entre metodologías. El proceso híbrido redujo el desperdicio respecto al método manual, aunque colocó un número menor de piezas. Por ello, su mejora debe interpretarse de forma parcial y no como una superioridad global frente a el método manual.

Instancia experimental 5

Ficha de instancia experimental

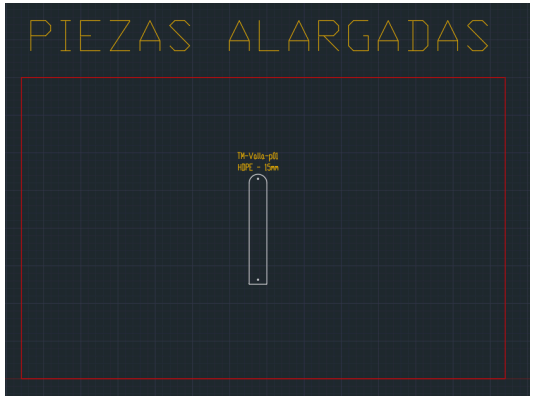
Tabla 20. *Ficha técnica de la instancia experimental 5.*

Nombre y número de instancia experimental	Instancia experimental 5 - Piezas alargadas
Tipo de piezas	Piezas cuyas dimensiones verticales son mayores que las horizontales
Dimensiones de piezas	730 × 120 mm
Número de piezas colocadas por método	45 piezas colocadas (En todas las instancias)

Nota. Elaboración propia (2026).

Piezas a utilizar

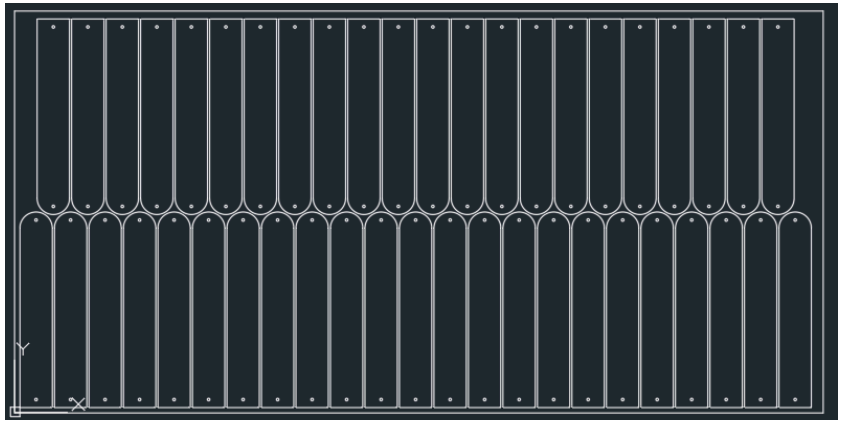
Figura 41. *Piezas utilizadas en la instancia experimental 5.*



Nota. Elaboración propia (2026). Piezas incluidas en el nesting de piezas alargadas.

Resultados de nesting

Figura 42. *Nesting común de la instancia experimental 5.*



Nota. Elaboración propia (2026). Nesting común obtenido en los tres métodos de resolución para piezas alargadas.

Relación tiempo/desperdicio

Tabla 21. *Relación tiempo/desperdicio de la instancia experimental 5.*

Método	Tiempo (min:seg)	Desperdicio
Manual	3:00	13,03 %
Algorítmico		
Híbrido		

Nota. Elaboración propia (2026).

Valoraciones cualitativas

Tabla 22. *Valoraciones cualitativas por método de la instancia experimental 5.*

Método	Capacidad de reutilización del material residual	Calidad organizativa y adaptabilidad del nesting	Dependencia del criterio técnico
Manual	1	5	5
Algorítmico			
Híbrido			

Nota. Elaboración propia (2026).

Síntesis individual de la instancia experimental

Las geometrías alargadas, al presentar una proporción regular y repetitiva, generaron un comportamiento altamente predecible, permitiendo resultados idénticos en las tres metodologías. La naturaleza repetitiva de las piezas redujo la influencia de la toma de decisiones humanas o híbridas sobre el resultado final.

Instancia experimental 6

Ficha de instancia experimental

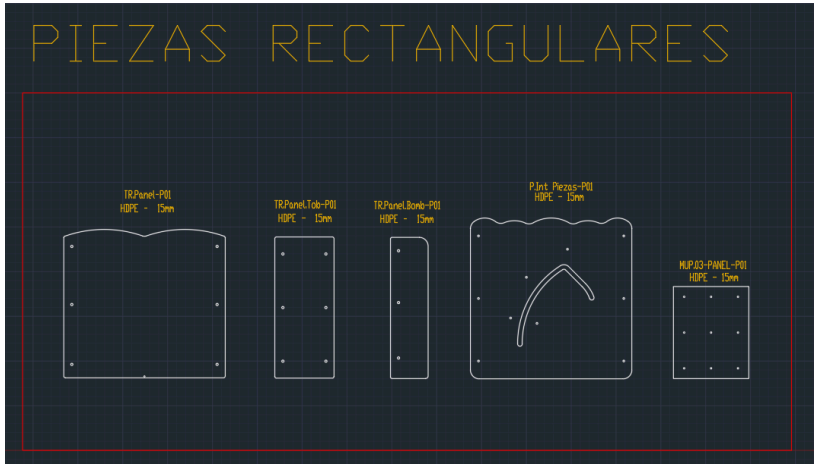
Tabla 23. *Ficha técnica de la instancia experimental 6.*

Nombre y número de instancia experimental	Instancia experimental 6 - Piezas rectangulares
Tipo de piezas	Piezas cuyos ángulos son rectos
Dimensiones de piezas	Entre 900 × 900 mm y 210 × 790 mm
Número de piezas colocadas por método	11 piezas colocadas en todos los métodos

Nota. Elaboración propia (2026).

Piezas a utilizar

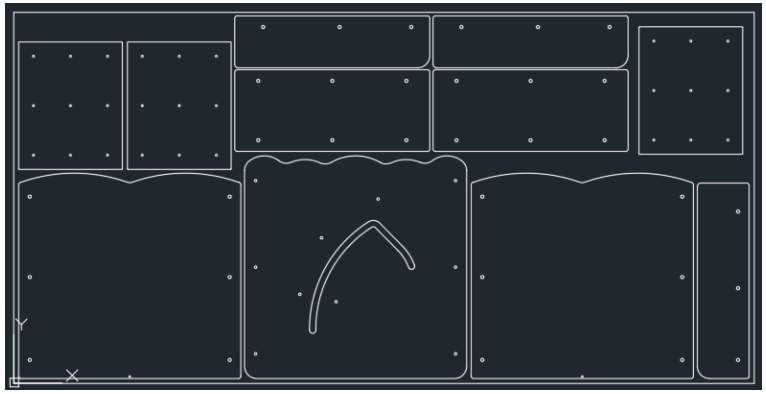
Figura 43. *Piezas utilizadas en la instancia experimental 6.*



Nota. Elaboración propia (2026). Piezas incluidas en el nesting de piezas rectangulares.

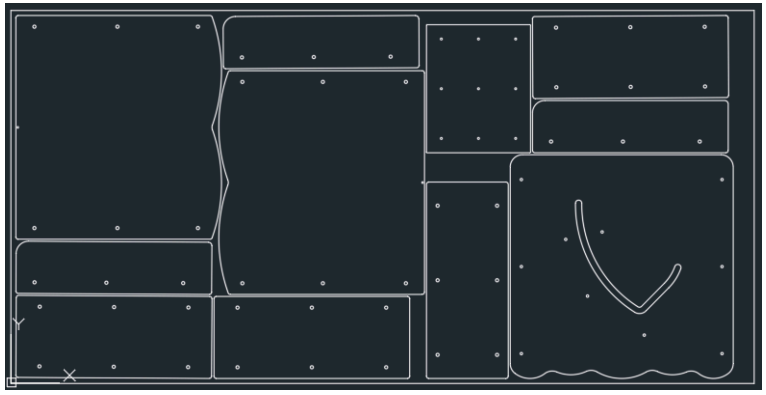
Resultados de nesting

Figura 44. *Nesting manual de la instancia experimental 6.*



Nota. Elaboración propia (2026). Nesting realizado manualmente con piezas rectangulares.

Figura 45. *Nesting algorítmico e híbrido de la instancia experimental 6.*



Nota. Elaboración propia (2026). Nesting de piezas rectangulares realizado por algoritmo y revisado por operador.

Relación tiempo/desperdicio

Tabla 24. *Relación tiempo/desperdicio de la instancia experimental 6.*

Método	Tiempo (min:seg)	Desperdicio
Manual	03:51	13,21 %
Algorítmico	03:58	11,27 %
Híbrido	03:58	11,27 %

Nota. Elaboración propia (2026).

Valoraciones cualitativas

Tabla 25. *Valoraciones cualitativas por método de la instancia experimental 6.*

Método	Capacidad de reutilización del material residual	Calidad organizativa y adaptabilidad del nesting	Dependencia del criterio técnico
Manual	1	4	3
Algorítmico	1	5	5
Híbrido	1	5	5

Nota. Elaboración propia (2026).

Síntesis individual de la instancia experimental

Las piezas rectangulares facilitaron un alto nivel de compactación debido a la continuidad de sus bordes y a la ausencia de geometrías complejas. Tanto el nesting manual como el algorítmico e híbrido alcanzaron niveles de desperdicio reducidos, aunque el algoritmo obtuvo una ligera mejora en el aprovechamiento global.

Instancia experimental 7

Ficha de instancia experimental

Tabla 26. *Ficha técnica de la instancia experimental 7.*

Nombre y número de instancia experimental	Instancia experimental 7 - Piezas orgánicas
Tipo de piezas	Piezas cuya geometría no es rectilínea
Dimensiones de piezas	Entre 367 × 880 mm y 240 × 240 mm
Número de piezas colocadas por método	29 piezas colocadas (algorítmico/híbrido) 25 piezas colocadas (manual)

Nota. Elaboración propia (2026).

Piezas a utilizar

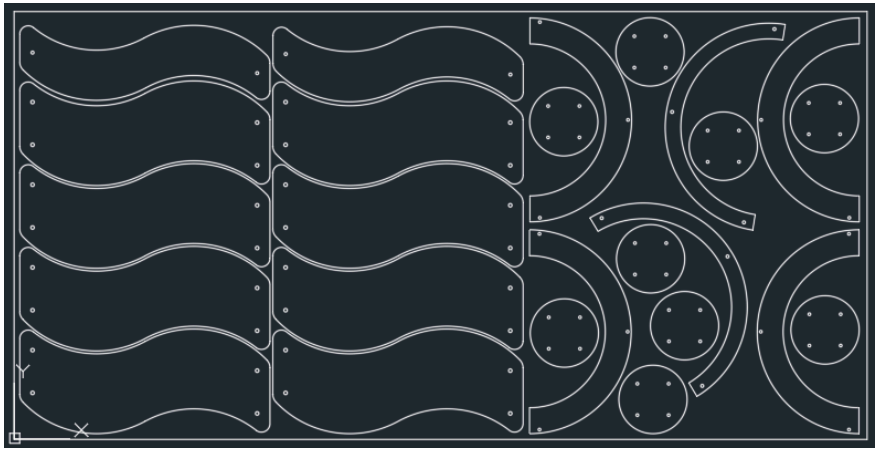
Figura 46. *Piezas utilizadas en la instancia experimental 7.*



Nota. Elaboración propia (2026). Piezas incluidas en el nesting de piezas orgánicas.

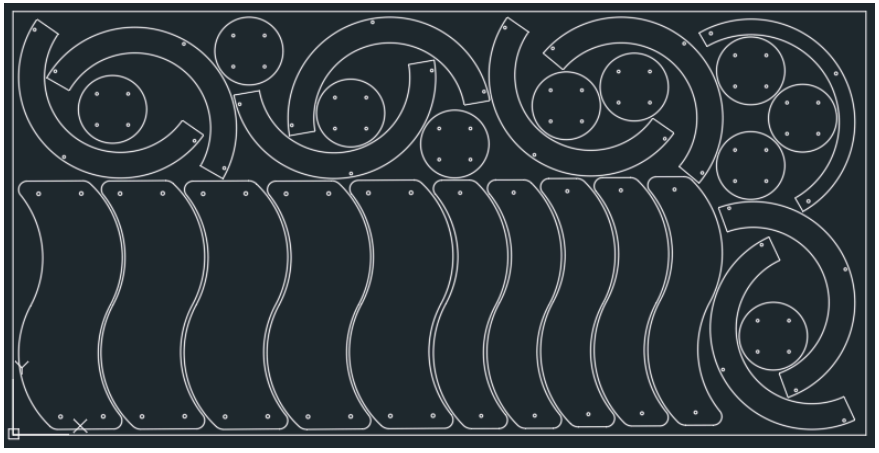
Resultados de nesting

Figura 47. *Nesting manual de la instancia experimental 7.*



Nota. Elaboración propia (2026). Nesting realizado manualmente con piezas orgánicas.

Figura 48. *Nesting algorítmico e híbrido de la instancia experimental 7.*



Nota. Elaboración propia (2026). Nesting de piezas orgánicas realizado por algoritmo y revisado por operador.

Relación tiempo/desperdicio

Tabla 27. *Relación tiempo/desperdicio de la instancia experimental 7.*

Método	Tiempo (min:seg)	Desperdicio
Manual	05:31	30,29 %
Algorítmico	03:46	27,92 %
Híbrido	03:46	27,92 %

Nota. Elaboración propia (2026).

Valoraciones cualitativas

Tabla 28. *Valoraciones cualitativas por método de la instancia experimental 7.*

Método	Capacidad de reutilización del material residual	Calidad organizativa y adaptabilidad del nesting	Dependencia del criterio técnico
Manual	3	2	1
Algorítmico	3	3	5
Híbrido	3	3	3

Nota. Elaboración propia (2026).

Síntesis individual de la instancia experimental

Las geometrías orgánicas dificultaron la reutilización de espacios residuales y generaron un aumento del desperdicio en comparación con las piezas rectangulares o alargadas. Los resultados obtenidos evidencian cómo la complejidad geométrica condiciona de forma significativa la eficiencia del nesting, aunque el método empleado pueda rebajar parcialmente sus efectos.

Instancia experimental 8

Ficha de instancia experimental

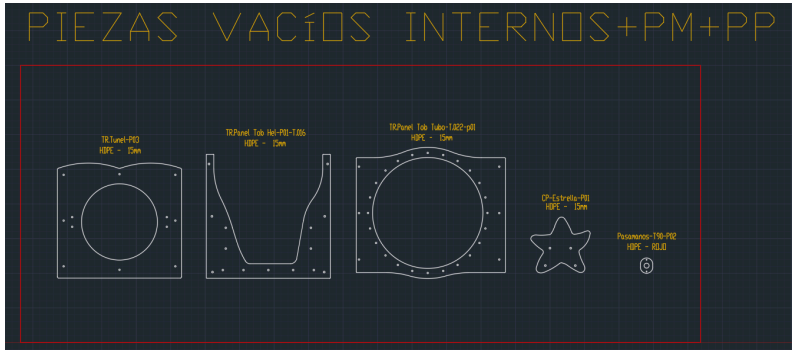
Tabla 29. *Ficha técnica de la instancia experimental 8.*

Nombre y número de instancia experimental	**Instancia experimental 8 - Piezas con vacíos interiores, piezas medianas y pequeñas**
Tipo de piezas	Piezas con vacíos interiores y piezas de relleno medianas y pequeñas
Dimensiones de piezas	Entre 1082 × 946 mm y 90 × 110 mm
Número de piezas colocadas por método	106 piezas colocadas (algorítmico) 109 piezas colocadas (híbrido) 115 piezas colocadas (manual)

Nota. Elaboración propia (2026).

Piezas a utilizar

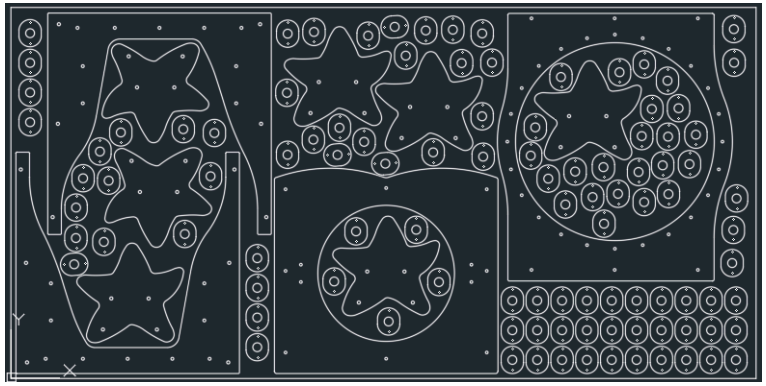
Figura 49. *Piezas utilizadas en la instancia experimental 8.*



Nota. Elaboración propia (2026). Piezas utilizadas en la instancia experimental 8.

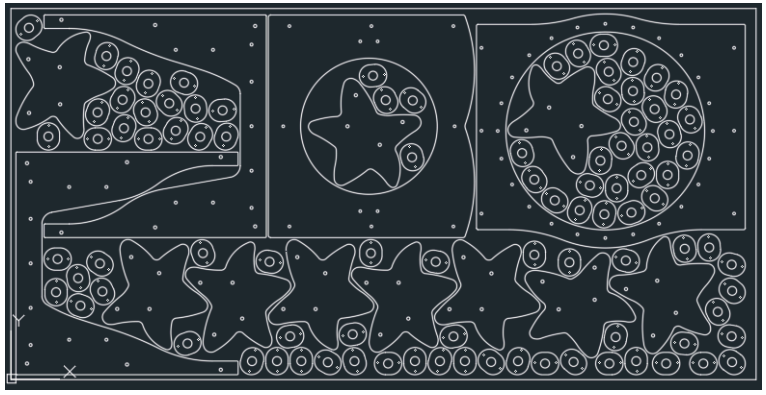
Resultados de nesting

Figura 50. *Nesting manual de la instancia experimental 8.*



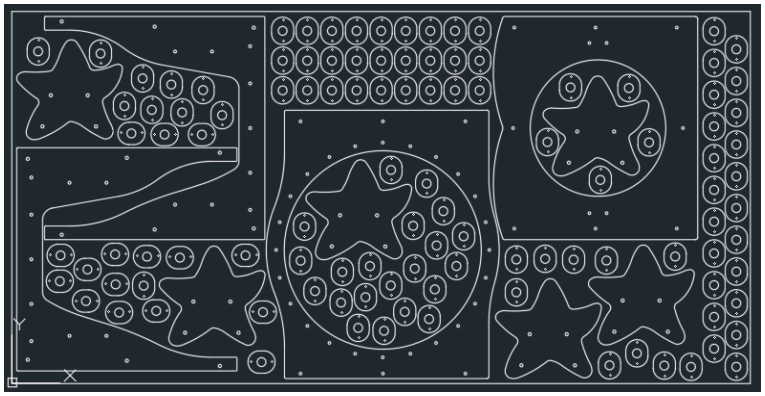
Nota. Elaboración propia (2026). Nesting manual de piezas con vacíos interiores, medianas y pequeñas.

Figura 51. *Nesting algorítmico de la instancia experimental 8.*



Nota. Elaboración propia (2026). Nesting algorítmico de piezas con vacíos interiores, medianas y pequeñas.

Figura 52. *Nesting híbrido de la instancia experimental 8.*



Nota. Elaboración propia (2026). Nesting híbrido de piezas con vacíos interiores, medianas y pequeñas.

Relación tiempo/desperdicio

Tabla 30. *Relación tiempo/desperdicio de la instancia experimental 8.*

Método	Tiempo (min:seg)	Desperdicio
Manual	07:57	33,58 %
Algorítmico	04:06	27,85 %
Híbrido	10:04	34,43 %

Nota. Elaboración propia (2026).

Valoraciones cualitativas

Tabla 31. *Valoraciones cualitativas por método de la instancia experimental 8.*

Método	Capacidad de reutilización del material residual	Calidad organizativa y adaptabilidad del nesting	Dependencia del criterio técnico
Manual	3	2	1
Algorítmico	3	3	5
Híbrido	3	2	3

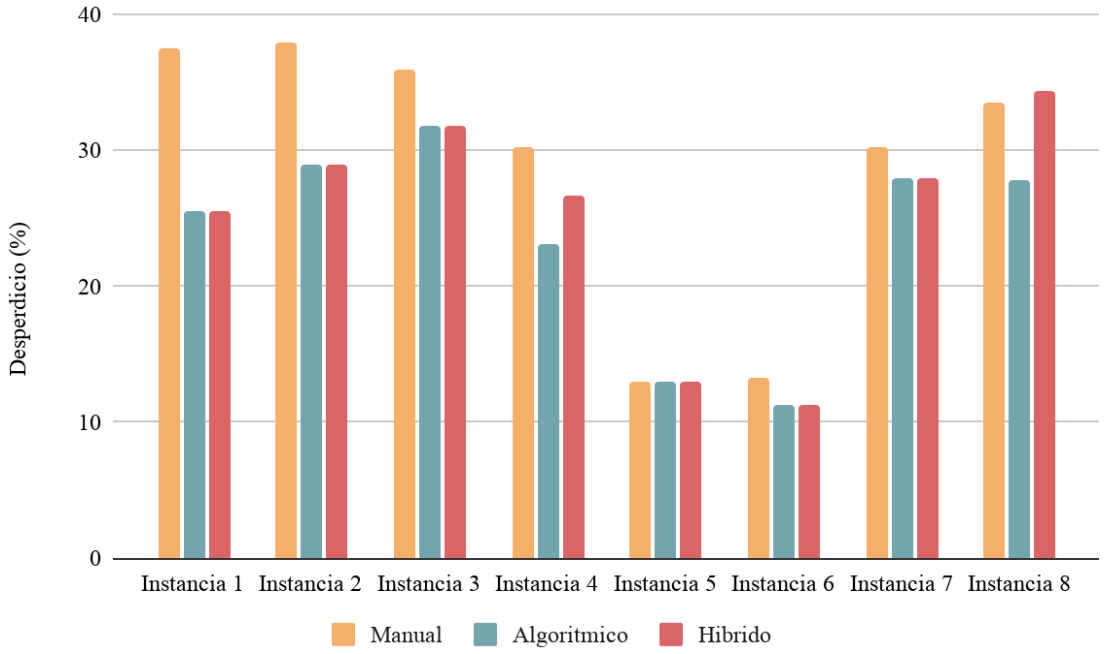
Nota. Elaboración propia (2026).

Síntesis individual de la instancia experimental

La presencia de vacíos interiores y piezas de relleno incrementó considerablemente la complejidad del nesting. Aunque el proceso híbrido permitió introducir más piezas que el algorítmico, no superó al método manual en número total de piezas colocadas; esto no se tradujo, en una mejora del aprovechamiento material ni del tiempo de preparación, evidenciando que una mayor ocupación visual no implica necesariamente una mayor eficiencia global.

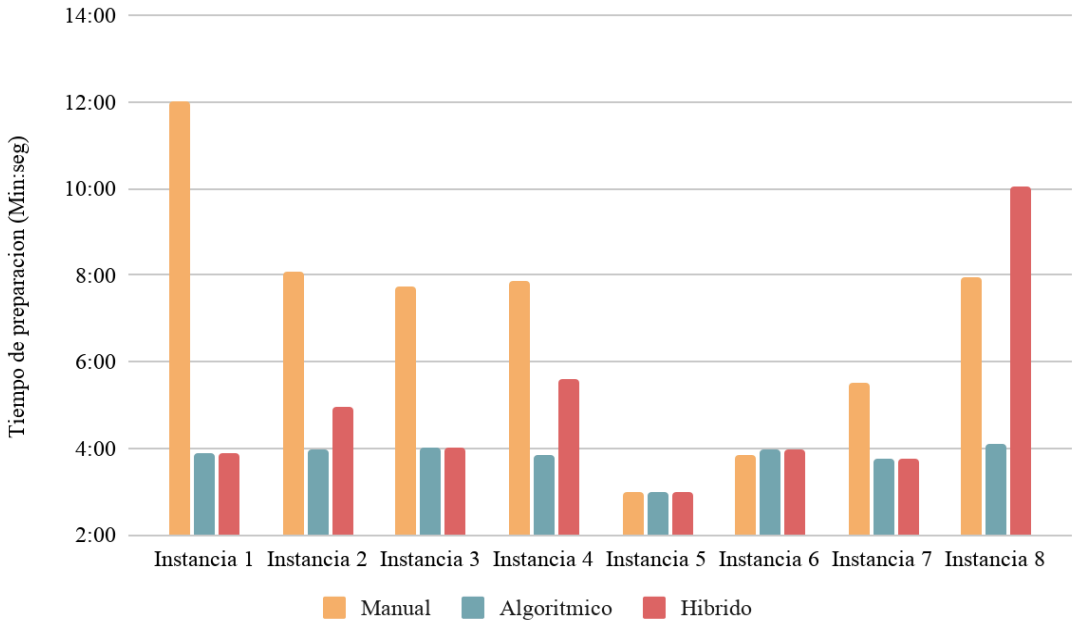
5.3. Lectura comparativa y relación inicial de los resultados

Figura 53. *Gráfico comparativo de desperdicio entre resultados por instancia experimental.*



Nota. Elaboración propia (2026).

Figura 54. *Gráfico comparativo de tiempo entre resultados por instancia experimental.*



Nota. Elaboración propia (2026).

A partir de los datos obtenidos, se identifican cuatro patrones principales

1. Las **geometrías simples** (rectangulares y de tamaño pequeño o mediano) y repetitivas tienden a reducir las diferencias entre métodos dada su facilidad de optimización y encaje geométrico.
2. Las **geometrías complejas** (orgánicas, con vacíos interiores o con gran diferencia de tamaño) incrementan la relevancia de las herramientas de optimización automática y del criterio técnico durante la resolución, ya sea para validar la distribución, interpretar los espacios residuales o valorar si la solución es realmente funcional.
3. Las **configuraciones mixtas** mostraron un comportamiento intermedio. La combinación de piezas de diferentes escalas y formas aumenta la complejidad del nesting. En estos casos, la capacidad de reorganización y adaptación del espacio adquirió una mayor relevancia dentro del proceso de resolución.
4. Una alta ocupación visual del tablero no garantiza una mayor eficiencia, ya que esta también depende del tiempo de preparación, la cantidad de piezas útiles obtenidas y la calidad de los restos generados.

En relación con la capacidad de reutilización del material residual, se observó que esta no depende únicamente del porcentaje de desperdicio obtenido, **sino también de la forma, continuidad y tamaño de las zonas sobrantes**.

5.3.1. Diferencias observadas entre métodos

En términos generales, **el método algorítmico obtuvo menores tiempos de preparación y menores porcentajes de desperdicio**, caracterizado por una mayor compactación y rapidez del proceso.

El método manual, aunque permitió una mayor interpretación visual del espacio disponible, **presentó tiempos superiores y una mayor dependencia del criterio del operador**, enfocándose en criterios visuales y de organización contextual.

La resolución híbrida mostró un comportamiento variable. En algunos casos permitió revisar o ajustar soluciones generadas por el software, pero obtuvo resultados inferiores a la resolución algorítmica cuando la intervención manual añadió tiempo sin reducir el desperdicio. **Esto indica que la combinación entre software y la experiencia técnica del operador no garantiza automáticamente una mayor eficiencia.**

5.3.2. Resultados de las valoraciones ponderadas

La valoración ponderada se obtiene aplicando los pesos definidos en el apartado 4.6.

La siguiente tabla sintetiza el resultado ponderado final de cada método en cada instancia experimental, expresado sobre una escala de 0 % a 100 %:

Tabla 32. *Resultado de la valoración ponderada por instancia experimental.*

Instancia experimental	Manual	Algorítmico	Híbrido	Método mejor valorado
Instancia experimental 1: Piezas grandes	57,02 %	96,00 %	96,00 %	Algorítmico / Híbrido
Instancia experimental 2: Piezas medianas	66,15 %	89,85 %	89,85 %	Algorítmico / Híbrido
Instancia experimental 3: Piezas pequeñas	74,23 %	90,00 %	90,00 %	Algorítmico / Híbrido
Instancia experimental 4: Piezas tamaño mixto	61,08 %	96,00 %	74,29 %	Algorítmico
Instancia experimental 5: Piezas rectangulares alargadas	92,00 %	92,00 %	92,00 %	Equivalente
Instancia experimental 6: Piezas rectangulares	81,59 %	91,26 %	91,26 %	Algorítmico / Híbrido
Instancia experimental 7: Piezas orgánicas	69,65 %	92,00 %	88,00 %	Algorítmico
Instancia experimental 8: Piezas con vacíos interiores y tamaño mixto	64,77 %	90,83 %	64,67 %	Algorítmico

Nota. Elaboración propia (2026). Los valores representan la puntuación ponderada final sobre una escala de 100 %, no el porcentaje de desperdicio ni de aprovechamiento material.

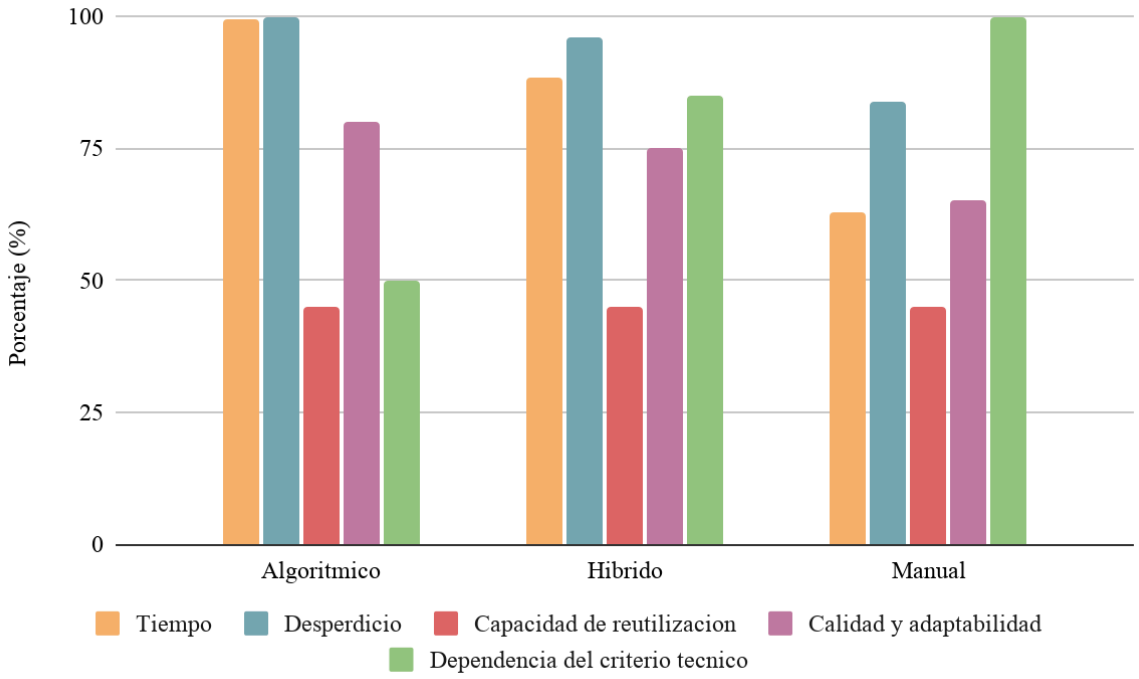
A partir de estos resultados, la **resolución algorítmica** obtuvo la mejor valoración global y los menores tiempos de preparación en la mayoría de las instancias experimentales. El método **híbrido** obtuvo resultados similares en cinco de ellas, aunque permitió realizar mejoras puntuales en algunos casos complejos.

Por su parte, el **método manual** obtuvo las valoraciones más bajas, aunque las diferencias se redujeron notablemente en geometrías regulares y repetitivas.

En términos medios, la resolución algorítmica obtuvo una puntuación global de 92,24 %, frente a 85,76 % de la resolución híbrida y 70,81 % del método manual. Estos

valores se calcularon como promedio aritmético simple de las puntuaciones ponderadas de las ocho instancias.

Figura 55. Gráfico de medias de las variables cuantitativas y cualitativas.



Nota. Elaboración propia (2026). El gráfico representa el promedio de las puntuaciones ponderadas finales por método.

En conjunto, el desarrollo experimental permitió construir una base experimental limitada pero útil para la comparación entre métodos y generar una lectura más amplia sobre el proceso de nesting. Más allá del porcentaje de desperdicio, los resultados muestran que la eficiencia debe entenderse como una relación entre aprovechamiento material, tiempo de preparación, número de piezas colocadas, viabilidad técnica y comportamiento geométrico de las piezas dentro del sistema productivo.

Bloque 6: Conclusiones

Este apartado recoge la síntesis final del estudio, integrando la evaluación de las hipótesis planteadas, el grado de cumplimiento de los objetivos de investigación y una valoración crítica del proceso desarrollado y se exponen las principales conclusiones, así como sus implicaciones en el contexto productivo y las posibles líneas de desarrollo futuro.

6.1. Evaluación de hipótesis iniciales

Hipótesis 1. La incorporación de software de optimización algorítmica mejora la eficiencia del proceso de nesting en corte CNC 2D respecto a la resolución manual.

> **Confirmada.** Los resultados muestran que la incorporación de herramientas algorítmicas mejora la eficiencia del proceso, especialmente en tiempo de preparación y aprovechamiento material.

Hipótesis 2. La resolución manual del nesting presenta indicios de mayor variabilidad operativa y mayor dependencia del criterio técnico que los métodos asistidos por software.

> **Confirmada**. El método manual permite una interpretación más flexible del espacio disponible y una adaptación directa a criterios productivos concretos, ligando el resultado a la experiencia, percepción visual y toma de decisiones del operador.

Hipótesis 3. Las piezas con geometrías irregulares o con vacíos interiores generan zonas de material residual difíciles de reutilizar.

> **Confirmada**. Las geometrías irregulares y los vacíos interiores dificultan la ocupación del tablero, como se pudo observar en las instancias 7 y 8. Este efecto se acentúa cuando las piezas no permiten una agrupación compacta o cuando los huecos resultantes no son compatibles con piezas de relleno reutilizables.

Hipótesis 4. La optimización del nesting basada únicamente en el porcentaje de desperdicio del material no refleja la eficiencia global del sistema productivo.

> **Confirmada**. El porcentaje de desperdicio de material permite valorar una parte del rendimiento del nesting, pero no recoge por sí solo aspectos como el tiempo de preparación, el número de piezas colocadas, la calidad organizativa, la capacidad de adaptación o la reutilización del material residual.

Hipótesis 5. La falta de sistematización en los criterios de planificación del nesting incrementa la dependencia de la experiencia del operador.

> **Confirmada**. Cuando los criterios de planificación no están definidos de forma explícita, la resolución del nesting depende en mayor medida de decisiones basadas en experiencia previa, intuición técnica o hábitos de trabajo. Esto puede resultar eficaz en situaciones concretas, pero dificulta la repetibilidad del proceso y su transferencia a otros operadores o contextos productivos.

6.2. Evaluación de objetivos iniciales

OP. Analizar la eficiencia del proceso de nesting en sistemas de corte CNC 2D con fresa mediante la comparación entre método manual, algorítmico e híbrido.

> **Cumplido.** La investigación ha permitido comparar los tres métodos de resolución planteados a partir de una serie de instancias experimentales desarrolladas bajo condiciones comunes.

OE1. Identificar las limitaciones y restricciones técnicas que condicionan la planificación del nesting.

> **Cumplido.** Se han definido y aplicado las principales restricciones técnicas que condicionan el desarrollo del nesting.

OE2. Analizar los criterios de decisión que intervienen en la organización del nesting.

> **Cumplido.** El estudio ha permitido analizar cómo intervienen distintos criterios de decisión en la organización del nesting, especialmente en el método manual y en la resolución híbrida. Se han considerado aspectos como la disposición visual de las piezas, la interpretación del espacio disponible, la priorización de zonas residuales, la necesidad de ajuste manual y la dependencia del criterio técnico.

OE3. Estudiar los factores geométricos que condicionan el aprovechamiento del material en el nesting.

> **Cumplido.** La comparación entre instancias experimentales ha evidenciado que la geometría de las piezas influye directamente en el aprovechamiento del material.

OE4. Medir el tiempo, porcentaje de desperdicio del material y el número de piezas colocadas en cada método de resolución.

> **Cumplido.** Se han registrado variables cuantitativas en cada instancia experimental, permitiendo comparar el comportamiento de los métodos manual, algorítmico e híbrido.

OE5. Valorar aspectos cualitativos del proceso, como la reutilización potencial del material residual, la calidad organizativa y adaptabilidad del nesting y la dependencia del criterio técnico.

> **Cumplido.** Se han valorado variables cualitativas en cada instancia experimental, especialmente reutilización residual, calidad organizativa, adaptabilidad y dependencia del criterio técnico.

Figura 56. *Resumen de hipótesis y objetivos del proyecto.*



Nota. Elaboración propia (2026).

6.3. Valoración crítica del proceso seguido y las conclusiones obtenidas

Más allá de los resultados obtenidos en términos de aprovechamiento material o reducción de tiempos, el desarrollo de la investigación permitió identificar una cuestión relevante dentro del contexto actual de digitalización industrial: **la automatización del nesting no implica necesariamente la desaparición del criterio técnico del operador dentro del proceso productivo.**

En las condiciones analizadas, los sistemas algorítmicos mostraron una elevada capacidad de cálculo geométrico, pero continúan mostrando limitaciones para interpretar determinados condicionantes operativos, organizativos o contextuales. Esto plantea un escenario en el que la eficiencia del nesting no depende únicamente de aumentar el nivel de automatización, sino de encontrar modelos de colaboración eficaces entre software y criterio técnico.

Al mismo tiempo, la investigación muestra cómo parte de las decisiones relevantes dentro del nesting continúan dependiendo de conocimientos tácitos difíciles de sistematizar completamente.

Esta cuestión abre una línea de reflexión futura:

¿Hasta qué punto los sistemas algorítmicos podrán incorporar criterios operativos complejos que actualmente no pueden traducirse fácilmente en reglas geométricas o parámetros matemáticos?

Podría explorarse en futuras investigaciones mediante tecnologías como la evolución de tecnologías basadas en inteligencia artificial, aprendizaje adaptativo o sistemas predictivos podría modificar progresivamente este escenario, permitiendo desarrollar herramientas capaces de identificar o modelar patrones de decisión.

A partir de los resultados obtenidos, la dirección más coherente no parece orientarse hacia la sustitución total del operador, sino hacia modelos híbridos **capaces de combinar automatización, capacidad de cálculo y supervisión técnica especializada.**

Desde esta perspectiva, la integración industrial del proceso debería plantearse de forma progresiva. El software algorítmico puede funcionar como primera herramienta de generación de soluciones, especialmente en situaciones donde se requiere rapidez, repetibilidad y reducción del desperdicio. Sin embargo, la validación técnica del operador sigue siendo necesaria para comprobar la viabilidad productiva del resultado, valorar la reutilización del material residual y adaptar la solución a necesidades concretas de producción.

6.4. Futuras líneas de investigación

A partir de los resultados obtenidos, se identifican distintas líneas de investigación que podrían ampliar o profundizar el alcance del presente estudio.

- **Ampliar la experimentación incorporando un mayor número de instancias experimentales de nesting, distintos formatos de tablero, contextos productivos.** Esto permitiría comprobar cómo se comportan los distintos métodos de resolución ante condiciones de trabajo diferentes.
- **Estudiar la integración de tecnologías basadas en inteligencia artificial o aprendizaje automático capaces de identificar patrones de organización utilizados por operadores experimentados.** Esto permitiría evolucionar desde sistemas de optimización puramente geométrica hacia herramientas capaces de incorporar criterios operativos y organizativos más complejos.
- **Analizar otros sistemas de fabricación digital y mecanizado CNC**, evaluando cómo los criterios estudiados en esta investigación pueden adaptarse a distintos procesos industriales y escalas de producción.

Bloque 7: Listado de figuras, tablas y referencias bibliográficas.

Listado de figuras

Figura 1. Corte con fresa en maquinaria CNC 2D en panel de plástico técnico

Figura 2. Gráfico de flujo de trabajo CNC 2D

Figura 3. Elementos procesados en CNC

Figura 4. Representación de montaje de piezas procesadas mediante CNC 2D

Figura 5. Configuraciones previamente guardadas

Figura 6. Variables que condicionan el nesting

Figura 7. Exclusiones explícitas del estudio

Figura 8. Representación de intersección de piezas irregulares

Figura 9. Interfaz beta de DeepNest con selección del mejor resultado

Figura 10. Programación de maquinaria CNC 2D

Figura 11. Maquinaria láser cortando chapa metálica

Figura 12. Maquinaria CNC 2D en funcionamiento

Figura 13. Corte CNC 2D aplicado a tablero de madera para señalética

Figura 14. Combinación de piezas de distintos tamaños en instancia experimental mixta

Figura 15. Conjunto de piezas utilizadas para las instancias experimentales

Figura 16. Resumen de enfoques de la investigación

Figura 17. Tablero de plástico técnico

Figura 18. Selección de cantidad de piezas

Figura 19. Configuración del tablero base y restricciones en AutoCAD

Figura 20. Configuración del tablero base y restricciones en Nest&Cut

Figura 21. Cálculo del desperdicio de material en AutoCAD

Figura 22. Cálculo del desperdicio de material en Nest&Cut

Figura 23. Ejemplo de piezas utilizadas en la instancia experimental

Figura 24. Ejemplo de nesting manual de la instancia experimental

Figura 25. Ejemplo de nesting algorítmico e híbrido de la instancia experimental

Figura 26. Criterios de equilibrio para el análisis comparativo del nesting

Figura 27. Cronograma de desarrollo del TFG

Figura 28. Piezas utilizadas en la instancia experimental 1

Figura 29. Nesting manual de la instancia experimental 1

Figura 30. Nesting algorítmico e híbrido de la instancia experimental 1

Figura 31. Piezas utilizadas en la instancia experimental 2

Figura 32. Nesting manual de la instancia experimental 2

Figura 33. Nesting algorítmico e híbrido de la instancia experimental 2

Figura 34. Piezas utilizadas en la instancia experimental 3

Figura 35. Nesting manual de la instancia experimental 3

Figura 36. Nesting algorítmico e híbrido de la instancia experimental 3

Figura 37. Piezas utilizadas en la instancia experimental 4

Figura 38. Nesting algorítmico de la instancia experimental 4

Figura 39. Nesting híbrido de la instancia experimental 4

Figura 40. Nesting manual de la instancia experimental 4

Figura 41. Piezas utilizadas en la instancia experimental 5

Figura 42. Nesting común de la instancia experimental 5

Figura 43. Piezas utilizadas en la instancia experimental 6

Figura 44. Nesting manual de la instancia experimental 6

Figura 45. Nesting algorítmico e híbrido de la instancia experimental 6

Figura 46. Piezas utilizadas en la instancia experimental 7

Figura 47. Nesting manual de la instancia experimental 7

Figura 48. Nesting algorítmico e híbrido de la instancia experimental 7

Figura 49. Piezas utilizadas en la instancia experimental 8

Figura 50. Nesting algorítmico de la instancia experimental 8

Figura 51. Nesting híbrido de la instancia experimental 8

Figura 52. Nesting manual de la instancia experimental 8

Figura 53. Gráfico comparativo de desperdicio entre resultados por instancia experimental

Figura 54. Gráfico comparativo de tiempo entre resultados por instancia experimental

Figura 55. Gráfico de media de variables cuantitativas y cualitativas

Figura 56. Resumen de hipótesis y objetivos del proyecto

Listado de tablas

Tabla 1. Variables cuantitativas

Tabla 2. Variables cualitativas

Tabla 3. Relación entre hipótesis, objetivos y variables de análisis

Tabla 4. Ejemplo de ficha técnica de la instancia experimental

Tabla 5. Ejemplo de relación tiempo/desperdicio

Tabla 6. Ejemplo de valoración cualitativa

Tabla 7. Tabla de ponderación para resultados de las instancias experimentales

Tabla 8. Ficha técnica de la instancia experimental 1

Tabla 9. Relación tiempo/desperdicio de la instancia experimental 1

Tabla 10. Valoraciones cualitativas por método de la instancia experimental 1

Tabla 11. Ficha técnica de la instancia experimental 2

Tabla 12. Relación tiempo/desperdicio de la instancia experimental 2

Tabla 13. Valoraciones cualitativas por método de la instancia experimental 2

Tabla 14. Ficha técnica de la instancia experimental 3

Tabla 15. Relación tiempo/desperdicio de la instancia experimental 3

Tabla 16. Valoraciones cualitativas por método de la instancia experimental 3

Tabla 17. Ficha técnica de la instancia experimental 4

Tabla 18. Relación tiempo/desperdicio de la instancia experimental 4

Tabla 19. Valoraciones cualitativas por método de la instancia experimental 4

Tabla 20. Ficha técnica de la instancia experimental 5

Tabla 21. Relación tiempo/desperdicio de la instancia experimental 5

Tabla 22. Valoraciones cualitativas por método de la instancia experimental 5

Tabla 23. Ficha técnica de la instancia experimental 6

Tabla 24. Relación tiempo/desperdicio de la instancia experimental 6

Tabla 25. Valoraciones cualitativas por método de la instancia experimental 6

Tabla 26. Ficha técnica de la instancia experimental 7

Tabla 27. Relación tiempo/desperdicio de la instancia experimental 7

Tabla 28. Valoraciones cualitativas por método de la instancia experimental 7

Tabla 29. Ficha técnica de la instancia experimental 8

Tabla 30. Relación tiempo/desperdicio de la instancia experimental 8

Tabla 31. Valoraciones cualitativas por método de la instancia experimental 8

Tabla 32. Resultado de la valoración ponderada por instancia experimental

Referencias bibliográficas

ALMA. (s. f.). *Nest&Cut* [Software]. https://nestandcut.com/es/

AlmaCam. (2024, 7 agosto). *Integración de CAD, CAM y ERP para aprovechar un entorno integrado*. https://es.almacam.com/industrias/construccion-naval-y-offshore/cad-cam-erp-integration/

Autodesk. (s. f.-a). *Autodesk AutoCAD* (Versión 2027) [Software]. https://www.autodesk.com/es/products/autocad/

Autodesk. (s. f.-b). *Design for manufacturing*. https://www.autodesk.com/solutions/design-for-manufacturing-software. https://www.autodesk.com/solutions/design-for-manufacturing-software

Bennell, J. A., & Oliveira, J. F. (2007). The geometry of nesting problems: A tutorial. *European Journal Of Operational Research*, *184*(2), 397-415. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.11.038

Corte Madera CNC. (2024). *Corte madera CNC Madrid*. Corte Madera CNC Madrid. https://cortemaderacnc.com/corte-madera-cnc-madrid/

Cottonbro Studio. (2021a, abril 12). *Maquinaria CNC 2D en funcionamiento*. Pexels. https://www.pexels.com/es-es/foto/madera-de-madera-carpintero-carpinteria-7480234/

Cottonbro Studio. (2021b, abril 12). *Trabajando carpintería adentro fabricando*. Pexels. https://www.pexels.com/es-es/foto/trabajando-carpinteria-adentro-fabricando-7484155/

D'Amato, J. P., Mercado, M., Heiling, A., & Cifuentes, V. (2016). Un método de optimización proximal al problema de anidamiento de piezas irregulares utilizando arquitecturas en paralelo. *Revista Iberoamericana de Automática E Informática Industrial RIAI*, *13*(2), 220-227. https://doi.org/10.1016/j.riai.2016.01.003

DeepNest.io. (s. f.). *DeepNest*. https://deepnest.io/

Heizer, J., & Render, B. (2007). *Dirección de la producción y de operaciones: decisiones tácticas*. PRENTICE HALL.

Idrogo Muñoz, M. C. (2024). *Diseño del sistema de control de una máquina CNC láser de CO2 utilizando UC ATMeGa328P para optimizar el corte de acrílico* [Tesis]. Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.

International Business Machines Corporation [IBM]. (2025, 28 noviembre). *Flujo de trabajo*. IBM. https://www.ibm.com/es-es/think/topics/workflow

Luzuriaga Bermeo, A. E. (2024). *Optimización de procesos industriales en base a la metodología de "Estudio del Trabajo" en las líneas de fabricación de asadores y corte láser de metal de una Pyme* [Trabajo de titulación]. Universidad Central del Ecuador.

Naboni, R., & Paoletti, I. (2014). Advanced Customization in Architectural Design and Construction. En *SpringerBriefs in applied sciences and technology*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-04423-1

Osorio Cuervo, D. F. (2025). *Diseño de una propuesta de mejora del proceso de producción en una comercializadora y Transformadora de Acero* [Tesis de Maestría, Universidad de la Costa]. https://repositorio.cuc.edu.co/server/api/core/bitstreams/ba3b5d1f-9583-4c5c-91e1-9fe8e629d07a/content

Restaupark, S.L. (2026, 22 mayo). *Torre Karan*. Restaupark - Fabricante de parques infantiles. https://www.restaupark.com/producto/to20-torre-karan/

Suárez, J. C., & Paredes, S. S. (2022). El factor humano y su rol en la transición a Industria 5.0: una revisión sistemática y perspectivas futuras. *Entreciencias Diálogos En la Sociedad del Conocimiento*, *10*(24). https://doi.org/10.22201/enesl.20078064e.2022.24.81727

Talavera Chaves, T. C. J., & Arredondo Onieva, A. o. D. (2024, 1 diciembre). *Diseño y Construcción de un Prototipo de Máquina CNC para la Optimización de Procesos en Talleres Metalmecánicos de la Ciudad de Coronel Oviedo, Departamento de Caaguazú*. https://publicaciones.fctunca.edu.py/handle/123456789/138

Universidad Europea. (2025, 9 mayo). *¿Qué es el control numérico y por qué es clave en la industria moderna?* https://universidadeuropea.com/blog/control-numerico/

Wäscher, G., Haußner, H., & Schumann, H. (2006). An improved typology of cutting and packing problems. *European Journal Of Operational Research*, *183*(3), 1109-1130. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.12.047

Yurtman, C. (2024, 29 diciembre). *Cortadora laser industrial en entorno de fabrica*. Pexels. https://www.pexels.com/es-es/foto/cortadora-laser-industrial-en-entorno-de-fabrica-29988963/

Zhihong. (2026). *HDPE Hojas Bicolor fabricante y suministro de fábrica*. https://zhihongplastic.com/es/laminas-de-hdpe-de-dos-colores/