

Francisco Burillo Julian

Configuración y readaptación  
inteligente de software para la  
transmisión e interacción de  
algoritmos

Director/es

Royo Sánchez, Jesús Antonio  
Lambán Castillo, María Pilar

<http://zaguan.unizar.es/collection/Tesis>



Universidad de Zaragoza  
Servicio de Publicaciones

ISSN 2254-7606



Tesis Doctoral

**CONFIGURACIÓN Y READAPTACIÓN  
INTELIGENTE DE SOFTWARE PARA LA  
TRANSMISIÓN E INTERACCIÓN DE ALGORITMOS**

Autor

**Francisco Burillo Julian**

Director/es

Royo Sánchez, Jesús Antonio  
Lambán Castillo, María Pilar

**UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA**  
**Escuela de Doctorado**

Programa de Doctorado en Ingeniería de Diseño y Fabricación

2024





**Universidad**  
Zaragoza

## Tesis Doctoral

Título de la tesis:  
**CONFIGURACIÓN Y READAPTACIÓN INTELIGENTE  
DE SOFTWARE PARA LA TRANSMISIÓN E  
INTERACCIÓN DE ALGORITMOS**

Autor

**Francisco Burillo Julián**

Directores

**Dr. Jesús Antonio Royo Sánchez**  
**Dra. María Pilar Lambán Castillo**

Dpto. Ingeniería de Diseño y Fabricación / Univ. De Zaragoza  
2024



# Agradecimientos

A mi familia, por su apoyo paciente durante el tiempo dedicado a esta investigación.



# Resumen

En esta tesis se desarrolla un algoritmo denominado “Sonar Industrial”, un nuevo método de programación de la producción en tiempo real de los centros de trabajo de un entorno industrial, basado en una estrategia innovadora de aplicación de los algoritmos. En él se describe el estado del arte, se detallan los algoritmos aplicados y se presentan los resultados obtenidos en un entorno real de producción. La estrategia de este método propone un paralelismo entre el funcionamiento de una fábrica industrial y la naturaleza, demostrando cómo determinados comportamientos pueden ser aplicados en la replanificación en tiempo real de los distintos centros de trabajo. Apoyados en esta estrategia, se ha desarrollado también un algoritmo para la reducción de las pérdidas de energía y huella de carbono, así como un nuevo concepto de sensor, y se ha comprobado su validez en distintos escenarios. Este método hace que las máquinas y equipos presentes en el centro productivo, mediante esta estrategia biomimética, usen sus propias herramientas para “ver” y tomar decisiones de una forma inmediata, y así solventar obstáculos como paradas de máquina, retrasos en producción, o desviaciones de coste. Para ello, se propone una automatización de los procesos de planificación de la fábrica en tiempo real, apoyados en la comunicación con AGV-Automated Guided Vehicles y AMR-Autonomous Mobile Robots, y en el uso de los contenedores de trabajo en curso como “Sensores de Planificación”. Este trabajo presenta los siguientes resultados: el desarrollo del algoritmo ECF (Energy Losses and Carbon Footprint) para programar la producción por centro de trabajo basado en la reducción de las pérdidas de energía derivadas del cálculo del OEE (Overall Equipment Effectiveness) y en la huella de carbono, el desarrollo del algoritmo ISA-Industrial Sonar Algorithm como nuevo enfoque para la planificación de producción en tiempo real, la propuesta de un nuevo tipo de sensor, como es el sensor de planificación, y la comunicación automática con los elementos encargados del transporte entre centros de trabajo. El objetivo de estas innovaciones es optimizar el tiempo total de fabricación (makespan), reducir los costes de energía y la huella de carbono, y disminuir los tiempos de espera y los tiempos de transporte, usando la tecnología de internet de las cosas ("Internet of things"), computación en la nube (“Cloud computing”) y aprendizaje de las máquinas ("Machine Learning") para emular la ecolocalización.

**Palabras Clave**— *Planificación en tiempo real; Programación de producción; Internet de las Cosas; AMR; Sistemas ciber-físicos; Fabricación inteligente; OEE*



# Abstract

This thesis presents the development of an algorithm, designated "Industrial Sonar", a novel approach to real-time production scheduling of work centres in an industrial setting. The algorithm is based on an innovative algorithmic application strategy. It provides a comprehensive overview of the state of the art, details the algorithms employed, and presents the outcomes achieved in a real-world production environment. The strategy of this method proposes a parallel between the operation of an industrial factory and nature, demonstrating how certain behaviours can be applied for real-time replanning of different work centres. In accordance with this strategy, an algorithm for the reduction of energy losses and carbon footprint and a new sensor concept were developed and tested in a variety of scenarios. This method enables the machines and equipment present in the production centre to emulate this biomimetic strategy, utilising their own tools to "see" and make decisions promptly, thereby resolving obstacles such as machine stops, delays in production, or cost deviations. In order to achieve this, it is proposed that the factory planning processes are automated in real time, with communication facilitated by AGV-Automated Guided Vehicles and AMR-Autonomous Mobile Robots, and the use of work-in-progress containers as "planning sensors" in the process. The following results were achieved: The development of the ECF (Energy Losses and Carbon Footprint) algorithm to schedule production by work centre based on the reduction of energy losses derived from the calculation of the OEE (Overall Equipment Effectiveness) and the carbon footprint; the development of the ISA-Industrial Sonar Algorithm which represents a novel approach to real-time production planning. Furthermore, a new type of sensor, such as the planning sensor, has been proposed, along with automatic communication with the elements in charge of transportation between work centres. The objective of these innovations is to optimise the total production time (makespan), reduce energy costs and carbon footprint, and reduce waiting times, using "Internet of Things" technology, "Cloud Computing", and "Machine Learning" to emulate echolocation.

**Keywords**— *real-time planning; production scheduling; Internet of Things; AMR; cyber-physical systems; smart manufacturing; OEE*

# Índice general

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1 INTRODUCCIÓN .....	1
1.2 HIPÓTESIS DE TRABAJO .....	2
1.3 OBJETIVOS GENERALES .....	2
1.4 ESTRUCTURA DE LA TESIS .....	3
<b>2. ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>5</b>
2.1 ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO .....	5
2.2 SISTEMAS TRADICIONALES DE PLANIFICACIÓN DINÁMICA.....	8
2.3 PRODUCCIÓN E INDUSTRIA, ESTRATEGIAS DE PLANIFICACIÓN .....	10
2.4 NUEVAS TECNOLOGÍAS EMERGENTES.....	12
2.5 NUEVOS SISTEMAS Y TÉCNICAS DE PLANIFICACIÓN EN TIEMPO REAL BASADAS EN NUEVAS TECNOLOGÍAS.....	17
2.5 ANÁLISIS DE LOS OBJETIVOS EN LA LITERATURA .....	23
2.6 ANÁLISIS DE LAS VARIABLES EN LA LITERATURA .....	27
2.7 COMBINACIÓN DE MÉTODOS, OBJETIVOS Y VARIABLES ANALIZADAS EN LA LITERATURA .....	31
2.8 PLANIFICACIÓN DINÁMICA DE TIEMPO DE TRANSPORTE DE AMR Y AGV .....	33
2.9 REALIDAD VIRTUAL AUMENTADA .....	35
2.10 NOTACIÓN, PRINCIPALES CONCEPTOS Y CLASIFICACIÓN DE LA PROGRAMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN .....	36
2.11 CLASIFICACIÓN DE LA PROGRAMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN EN FUNCIÓN DE LA DIFICULTAD DE RESOLUCIÓN.....	42
2.12 CONSIDERACIONES FINALES DEL ESTADO DEL ARTE.....	45
<b>3. MODELO: MÉTODO DE REPLANIFICACIÓN EN TIEMPO REAL – ALGORITMO SONAR INDUSTRIAL ....</b>	<b>48</b>
3.1 OBJETIVO PRINCIPAL DEL ALGORITMO SONAR INDUSTRIAL .....	48
3.2 VARIABLES Y OBJETIVOS DEL MODELO CONSIDERADOS.....	49
3.3 METODOLOGÍA DEL ALGORITMO SONAR INDUSTRIAL.....	50
3.4 ARQUITECTURA DEL SONAR INDUSTRIAL .....	51
<b>4. MODELO: ALGORITMOS POR CENTRO DE TRABAJO .....</b>	<b>58</b>
4.1 ALGORITMOS POR CENTRO DE TRABAJO .....	58
4.2 HUELLA DE CARBONO Y REDUCCIÓN DE LAS PÉRDIDAS DE ENERGÍA.....	59
4.3 ALGORITMO POR CENTRO DE TRABAJO PARA LA REDUCCIÓN DEL CONSUMO DE ENERGÍA Y LA HUELLA DE CARBONO (ECF) .....	62
4.4 ADAPTACIÓN DE DISTINTOS ALGORITMOS POR CENTRO DE TRABAJO.....	64
<b>5. MODELO: EL SENSOR DE PLANIFICACIÓN .....</b>	<b>67</b>
5.1 MODELO Y ARQUITECTURA DEL SENSOR DE PLANIFICACIÓN .....	67
<b>6. HERRAMIENTA DE SOFTWARE SONAR INDUSTRIAL .....</b>	<b>71</b>
6.1 INTRODUCCIÓN: DETALLE DEL SOFTWARE SONAR INDUSTRIAL DESARROLLADO .....	71
6.2 DISEÑO DE MÓDULOS Y LIBRERÍAS.....	72
6.3 DISEÑO Y DESARROLLO DE MENÚS DE LA APLICACIÓN Y DATOS MAESTROS DE LAS OPERACIONES .....	74
6.4 DISEÑO Y DESARROLLO DE LOS CÁLCULOS DE LOS MÉTODOS DE PROGRAMACIÓN DE PRODUCCIÓN .....	80
6.5 DISEÑO Y DESARROLLO DE LA COMUNICACIÓN MEDIANTE FICHEROS.....	83
6.6 DISEÑO Y DESARROLLO DE LA APLICACIÓN DEL ALGORITMO SONAR INDUSTRIAL .....	87
6.7 DISEÑO Y DESARROLLO DE GRÁFICAS CON LOS RESULTADOS.....	88

6.8 DISEÑO Y DESARROLLO DE SIMULACIÓN ANIMADA DEL PROCESO .....	89
<b>7. VALIDACIÓN DEL MODELO SONAR INDUSTRIAL.....</b>	<b>91</b>
7.1 VALIDACIÓN DEL MODELO DE SONAR INDUSTRIAL: PARADA DE MÁQUINA .....	91
7.2 VALIDACIÓN DEL MODELO DE SONAR INDUSTRIAL: FALLO ENTREGA DE SUMINISTRO.....	94
<b>8. RESULTADOS.....</b>	<b>97</b>
8.1 IMPLEMENTACIÓN Y APLICACIÓN DEL ALGORITMO SONAR INDUSTRIAL .....	97
8.2 COMPARATIVA DE LOS RESULTADOS DEL ALGORITMO SONAR INDUSTRIAL ANALIZANDO SU APLICACIÓN EN DIFERENTES ESCENARIOS .....	101
8.3 IMPLEMENTACIÓN DE LA ESTRATEGIA DE SENSOR DE PLANIFICACIÓN Y COMPARATIVA DE RESULTADOS.....	105
8.4 COMPARATIVA DE LOS RESULTADOS DEL ALGORITMO SONAR INDUSTRIAL RESPECTO A UN EJEMPLO DE ALGORITMO GENÉTICO .....	110
<b>9. CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS.....</b>	<b>113</b>
9.1 CONCLUSIONES.....	113
9.2 DESARROLLOS FUTUROS .....	117
<b>10. PLAN DE DISEMINACIÓN .....</b>	<b>119</b>
<b>11. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE.....</b>	<b>120</b>
<b>12. REFERENCIAS – BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>121</b>
<b>ANEXO A:.....</b>	<b>129</b>
A.1 FUNCIÓN EJEMPLO DE APLICACIÓN DEL ALGORITMO DE JOHNSON EN PYTHON.....	130
A.2 FUNCIÓN EJEMPLO DE ALGORITMO BÁSICO DE SONAR INDUSTRIAL EN PYTHON.....	133
A.3 FUNCIÓN EJEMPLO DE CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE ENERGÍA Y HUELLA DE CARBONO EN PYTHON .....	136
A.4 FUNCIÓN EJEMPLO DE APLICACIÓN DE ALGORITMO BÁSICO ECF ORDENADO POR PÉRDIDAS DE ENERGÍA POR OEE EN PYTHON .....	139
<b>ANEXO B: .....</b>	<b>141</b>
B.1 EJEMPLO DE APLICACIÓN DE ALGORITMO DE JOHNSON EN LA LITERATURA PARA UN TALLER DE FLUJO DE 2 Y 3 MÁQUINAS.....	142
B.2 EJEMPLOS DE ALGORITMOS HEURÍSTICOS Y METAHEURÍSTICOS EN LA LITERATURA.....	144

# Índice de Figuras

FIGURA 1: FLUJO DE TRABAJO DEL ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO .....	6
FIGURA 2: PRODUCCIÓN BIBLIOGRÁFICA ANUAL EN LA PLANIFICACIÓN DINÁMICA DE LA PRODUCCIÓN EN TIEMPO REAL .....	6
FIGURA 3: LISTA DE LOS PRINCIPALES GRUPOS DE INVESTIGACIÓN SOBRE PLANIFICACIÓN DINÁMICA DE LA PRODUCCIÓN EN TIEMPO REAL (MAPA DE CALOR) .....	7
FIGURA 4: LISTA DE REVISTAS QUE PUBLICAN LITERATURA SOBRE PLANIFICACIÓN DINÁMICA DE LA PRODUCCIÓN EN TIEMPO REAL (FILTRADA POR VALOR SUPERIOR A 2) .....	7
FIGURA 5: LISTA DE LAS PRINCIPALES PALABRAS CLAVE DE AUTOR UTILIZADAS EN LA LITERATURA SOBRE PLANIFICACIÓN DINÁMICA DE LA PRODUCCIÓN EN TIEMPO REAL (FILTRADAS POR VALOR SUPERIOR A 3) .....	8
FIGURA 6: PRINCIPALES OBJETIVOS REFERENCIADOS EN LA LITERATURA.....	23
FIGURA 7: EXPLICACIÓN DEL PROCESO DE COMUNICACIÓN DEL ALGORITMO SONAR INDUSTRIAL.....	53
FIGURA 8: MÁQUINAS Y DISPOSITIVOS UTILIZADOS EN EL MODELO.....	57
FIGURA 9: VARIABLES Y CÁLCULOS REALIZADOS.....	63
FIGURA 10: CÁLCULO REALIZADO DESDE EL PROGRAMA SONAR INDUSTRIAL DESARROLLADO EN PYTHON.....	64
FIGURA 11: EXPLICACIÓN DEL PROCESO DE COMUNICACIÓN DE LA ARQUITECTURA DEL SENSOR DE PLANIFICACIÓN .....	69
FIGURA 12: LIBRERÍAS DE PYTHON UTILIZADAS .....	73
FIGURA 13: MENÚ PRINCIPAL DEL PROGRAMA SONAR INDUSTRIAL.....	74
FIGURA 14: OPCIONES DE IMPORTACIÓN/CREACIÓN DE DATOS MAESTROS DE OPERACIONES E HISTÓRICO DE PÉRDIDAS DE ENERGÍA .....	75
FIGURA 15: EJEMPLO DE DATOS DEMO DE OPERACIONES DE PRODUCCIÓN DEL CENTRO DE TRABAJO .....	75
FIGURA 16: CONFIGURACIÓN CAMPOS DE TABLA BÁSICA PRODROUTE PARA IMPORTACIÓN.....	76
FIGURA 17: EJEMPLO DE DATOS DE DEMO PARA HISTÓRICO DE PÉRDIDAS DE ENERGÍA .....	76
FIGURA 18: CONFIGURACIÓN DE CAMPOS DE TABLA BÁSICA ENERGYLOSSES PARA IMPORTACIÓN DE HISTÓRICO DE PÉRDIDAS DE ENERGÍA .....	76
FIGURA 19: EJEMPLO DE DATOS IMPORTADOS DE OPERACIONES DE PRODUCCIÓN DEL CENTRO DE TRABAJO .....	77
FIGURA 20: EJEMPLO DE DATOS IMPORTADOS DEL HISTÓRICO DE PÉRDIDAS DE ENERGÍA.....	77
FIGURA 21: PLANTILLA PARA CREACIÓN MANUAL DE OPERACIONES DE PRODUCCIÓN EN CENTRO DE TRABAJO .....	78
FIGURA 22: PANTALLA PARA LA CREACIÓN MANUAL DE REPORTE DEL TURNO Y CÁLCULO DE OEE Y PÉRDIDAS DE ENERGÍA .....	79
FIGURA 23: EJEMPLO DE CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO Y LAS PÉRDIDAS DE ENERGÍA POR PIEZAS Y POR OEE .....	79
FIGURA 24: OPCIONES DE CÁLCULO, SELECCIÓN DE ALGORITMO Y CONSULTA DE RESULTADOS DEL CÁLCULO PROGRAMACIÓN PRODUCCIÓN POR CENTRO DE TRABAJO .....	81
FIGURA 25: PANTALLA DE RESULTADOS DEL MÉTODO FE .....	81
FIGURA 26: PANTALLA DE RESULTADOS DEL MÉTODO TPC.....	82
FIGURA 27: PANTALLA DE RESULTADOS DEL MÉTODO ECF DE OPTIMIZACIÓN DE PÉRDIDAS DE ENERGÍA Y HUELLA DE CARBONO.....	83
FIGURA 28: OPCIONES DE LLAMADA Y PROCESAMIENTO DE RESPUESTAS PARA LA COMUNICACIÓN ENTRE CENTROS DE TRABAJO.....	84
FIGURA 29: PANTALLA PARA LA COMUNICACIÓN ENTRE CENTROS DE TRABAJO Y FICHERO "SALIDA" GENERADO.....	85
FIGURA 30: PANTALLA PARA EL PROCESAMIENTO DE LA LLAMADA, LA APLICACIÓN DEL ALGORITMO POR CENTRO DE TRABAJO ORDENADO Y FICHERO DE "RESPUESTA" GENERADO .....	86
FIGURA 31: PANTALLA PARA EL PROCESAMIENTO DE LOS FICHEROS DE RESPUESTA DE LOS DISTINTOS CENTROS DE TRABAJO.....	87
FIGURA 32: PANTALLA PARA EL PROCESAMIENTO DEL ALGORITMO DE SONAR INDUSTRIAL, Y RESULTADOS DEL ALGORITMO UNA VEZ PROCESADO .....	88
FIGURA 33: PANTALLA PARA LA PRESENTACIÓN DE LA GRÁFICA DE COMPARACIÓN DE CMAX VS. ENERGY LOSSES PARA LOS DATOS DEL ALGORITMO SONAR INDUSTRIAL APLICADO.....	89
FIGURA 34: REPRESENTACIÓN ANIMADA DEL PROCESO LLEVADO A CABO DURANTE LA APLICACIÓN DEL ALGORITMO DE SONAR INDUSTRIAL.....	90
FIGURA 35: PÉRDIDAS DE ENERGÍA CALCULADAS PARA EL ARTÍCULO Y EL CENTRO DE TRABAJO .....	97

FIGURA 36: DATOS HISTÓRICOS SOBRE CÁLCULOS DE PÉRDIDA DE ENERGÍA DE LOS ELEMENTOS DEL CENTRO DE TRABAJO.....	98
FIGURA 37: SECUENCIA DE TAREAS DE PRODUCCIÓN ORDENADAS SEGÚN CRITERIOS SOLICITADOS DE PÉRDIDAS DE ENERGÍA.....	99
FIGURA 38: TAREAS DE PRODUCCIÓN ORDENADAS SEGÚN CRITERIOS (OEE + TIEMPO DE TRANSPORTE) .....	99
FIGURA 39: RESULTADO DEL ALGORITMO SONAR INDUSTRIAL UTILIZANDO EL SOFTWARE 'SONAR INDUSTRIAL' DESARROLLADO EN PYTHON .....	100
FIGURA 40: DIFERENTES ESCENARIOS DE APLICACIÓN DE ALGORITMO SONAR INDUSTRIAL PARA SU COMPARATIVA .....	101
FIGURA 41: GRÁFICO DE LA APLICACIÓN DEL ALGORITMO DE JOHNSON PARA OPTIMIZAR CMAX .....	102
FIGURA 42: GRÁFICO DE LA APLICACIÓN DEL ALGORITMO PARA REDUCIR Y OPTIMIZAR LAS PÉRDIDAS DE ENERGÍA	103
FIGURA 43: GRÁFICO DE LA APLICACIÓN DEL ALGORITMO SONAR INDUSTRIAL PARA REDUCIR Y OPTIMIZAR EL CMAX Y LAS PÉRDIDAS DE ENERGÍA .....	104
FIGURA 44: DATOS DE OPERACIONES DE ÓRDENES DE PRODUCCIÓN A REALIZARSE EN CENTRO DE TRABAJO WC001 .....	106
FIGURA 45: DATOS HISTÓRICOS DE PÉRDIDAS DE ENERGÍA Y HUELLA DE CARBONO.....	106
FIGURA 46: GRÁFICO DE EVOLUCIÓN DE LAS PÉRDIDAS DE ENERGÍA VS. CMAX EN EL CENTRO DE TRABAJO WC001 SECUENCIADO BASÁNDOSE EN LA APLICACIÓN DE LA PONDERACIÓN DE ECF+ALGORITMO DE JOHNSON ..	108
FIGURA 47: GRÁFICO DE LA EVOLUCIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO VS. CMAX EN EL CENTRO DE TRABAJO WC001 SECUENCIADO BASADO EN LA APLICACIÓN DE FORMA PONDERADA DE ECF+ALGORITMO DE JOHNSON ....	109
FIGURA 48: PÉRDIDAS DE ENERGÍA VS. HUELLA DE CARBONO EN EL CENTRO DE TRABAJO WC001 CON UNA SECUENCIACIÓN BASADA EN LA APLICACIÓN DE ECF+ALGORITMO DE JOHNSON .....	110
FIGURA 49: ANÁLISIS DEL RENDIMIENTO DE APLICACIÓN DEL ALGORITMO SONAR INDUSTRIAL RESPECTO A UN EJEMPLO DE ALGORITMO GENÉTICO .....	111

# Índice de Tablas

TABLA 1: CLASIFICACIÓN DE LAS ESTRATEGIAS DE LA PLANIFICACIÓN DINÁMICA DE LA PRODUCCIÓN.....	12
TABLA 2: CLASIFICACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS UTILIZADAS EN LA PLANIFICACIÓN DINÁMICA .....	14
TABLA 3: CLASIFICACIÓN DE TÉCNICAS APLICADAS A LA PLANIFICACIÓN DINÁMICA.....	17
TABLA 4: VARIABLES UTILIZADAS EN PLANIFICACIÓN DINÁMICA DE LA PRODUCCIÓN .....	30
TABLA 5: NOTACIÓN UTILIZADA EN LOS CONCEPTOS DE PROGRAMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN .....	37
TABLA 6: VARIABLES Y UNIDADES QUE SE HAN UTILIZADO, Y QUE SE TOMAN COMO DATO .....	62
TABLA 7: FÓRMULAS DE CÁLCULO DE DATOS DE RENDIMIENTO POR TURNO DE TRABAJO .....	63
TABLA 8: ALGORITMOS DE PLANIFICACIÓN POR CENTRO DE TRABAJO EN BASE A DISTINTOS MÉTODOS .....	65
TABLA 9: CAMPOS QUE INTERVIENEN EN LOS ALGORITMOS DE CÁLCULO POR CENTRO DE TRABAJO .....	65
TABLA 10: TRABAJOS AFECTADOS POR LA PARADA DE LA MÁQUINA CNC HAAS ENTRE LAS 13:08 Y LAS 15:53 HORAS DEL DÍA 23/01/2024 .....	92
TABLA 11: TRABAJOS REPLANIFICADOS POR ALGORITMO SONAR INDUSTRIAL TRAS LA PARADA DE LA MÁQUINA.....	93
TABLA 12: TRABAJOS AFECTADOS POR EL FALLO EN LA ENTREGA DE SUMINISTROS DE MATERIA PRIMA REPROGRAMADOS POR EL ALGORITMO SONAR INDUSTRIAL .....	96

# Glosario

ACA	Ant Colony Algorithm	Algoritmo de Colonia de Hormigas
A	Availability	Disponibilidad operacional
AGV	Automated Guided Vehicle	Vehículo Guiado Automáticamente
AI	Artificial Intelligence	Inteligencia Artificial
AMR	Autonomous Mobile Robot	Robot Móvil Autónomo
CE	Circular Economy	Economía Circular
COP	Conference of the Parties	Conferencia de Partes (UNFCCC)
CPS	Cyber Physical Systems	Sistemas Ciber-físicos
DT	Digital Twin	Gemelo Digital
ECF	Energy Losses and Carbon Footprint	Pérdidas de Energía y Huella de Carbono
ERP	Enterprise Resource Planning	Planificación de Recursos Empresariales
FTQ	First Time to Quality	Rendimiento de Calidad
GA	Genetic Algorithm	Algoritmo Genético
GELS	Gravitational Emulation Local Search algorithm	Algoritmo de Emulación Gravitacional de Búsqueda Local
GEI	Greenhouse Gases (GHG)	Gases de Efecto Invernadero
ICM	Intelligent Collaborative Mechanism	Mecanismo Inteligente Colaborativo
IoMT	Internet of Manufacturing Things	Internet de las Cosas de Fabricación
IoT	Internet of Things	Internet de las Cosas
IPPS	Integrated Process Planning and Scheduling	Planificación Integrada de Procesos y Programación
ISA	Industrial Sonar Algorithm	Algoritmo Sonar Industrial
IVNH	Neighborhood heuristic algorithm	Algoritmo heurístico de vecindad
KPI	Key Performance Indicators	Indicadores clave de desempeño
MAS	Multi Agent System	Sistema Multi Agente
MES	Manufacturing Execution System	Sistema de Ejecución de Fabricación
MPHS	Multi-Period Hierarchical Scheduling mechanism	Mecanismo de Programación Jerárquico Multi período
OEE	Overall Equipment Effectiveness	Rendimiento operacional
P	Performance	Rendimiento de velocidad
PSO	Particle Swarm Optimization	Optimización de Enjambre de Partículas
RFID	Radio Frequency Identification	Identificación por Radiofrecuencia
RL	Reverse Logistics	Logística Inversa
SI	Swarm Intelligence	Inteligencia de Enjambre
SPT	Shortest Processing Time	Tiempo de Proceso más Corto
SBC	Single Board Computer	Computadora de Placa única
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change	Convención sobre Cambio Climático de Naciones Unidas
WEF	World Economic Forum	Foro Económico Mundial
ZDM	Zero-Defect Manufacturing	Fabricación sin Defectos



# 1. Introducción

## 1.1 Introducción

Los sistemas de programación dinámica de la producción están basados en la aplicación de diferentes algoritmos de planificación a las tareas que deben hacerse en los centros de trabajo de un entorno industrial. Su objetivo es optimizar la secuenciación de la producción para minimizar diversos aspectos a analizar: el tiempo total de la producción, el tiempo promedio de cada tarea, la cantidad promedio de tareas en curso, el retraso promedio, las pérdidas de coste por fallo de máquina, los costes de producción, los costes medioambientales, los costes de demanda no satisfecha (Brucker, 2012), (Pinedo, 2016), (Romano, 2017).

La programación de la producción en cada centro de trabajo puede verse continuamente alterada por múltiples circunstancias que se dan en el día a día, como paradas de máquina, defectos en componentes, o problemas de calidad, lo cual puede provocar una alteración significativa de los resultados de producción deseados. Todo ello, hace imprescindible un planteamiento de la programación de la producción en tiempo real de los distintos centros de trabajo que contemple dichas circunstancias. La tecnología actual, bajo los conceptos de internet de las cosas ("Internet of things"), computación en la nube ("Cloud computing") y aprendizaje de las máquinas ("Machine Learning"), nos permite comunicar e interaccionar entre centros de trabajo para lograr dicho objetivo de secuenciar la producción considerando dichas circunstancias (Jha, Babiceanu, & Seker, 2020), (Qian, Zhang, Jiang, Pan, & Rong, 2020).

Cualquier parada o retraso en la programación del centro de trabajo supone un obstáculo. Tomando como referencia la naturaleza, podemos encontrarnos ejemplos de cómo determinados animales superan los obstáculos físicos que pueden encontrarse. Existen diversas especies animales que utilizan un sistema de ecolocalización mediante el cual, a través de la emisión de sonidos y la interpretación del eco que reciben, detectan los objetos y obstáculos que tienen a su alrededor y toman decisiones de dónde dirigirse. El sonar de los barcos y submarinos está basado en este mismo principio.

Utilizando como estrategia este principio, podemos trasladarlo a la secuenciación del trabajo en las máquinas, estableciendo una comunicación que podemos definir como Eco-secuenciación o Sonar industrial entre los distintos centros de trabajo.

Este procedimiento constituye una estrategia reactiva de replanificación de la producción en tiempo real, que puede aplicarse ya no sólo en la finalización de cada operación, sino que cada centro de trabajo puede ser proactivo en cuanto al desvío de las ordenes de producción existentes en su cola a otros centros de trabajo, aplicando la misma estrategia ante cualquier problema que pudiese surgir en dicho centro de trabajo que disparase dicha comunicación.

Previamente a esta estrategia reactiva podría haber una planificación inicial diaria de la producción donde se hubiese aplicado un determinado algoritmo de secuenciación en cada centro de trabajo.

## **1.2 Hipótesis de trabajo**

El objetivo de la tesis es lograr una replanificación en tiempo real con la que es posible hacer frente en el momento a los posibles problemas que puedan surgir durante la producción, haciendo que los propios centros de trabajo replanifiquen sus tareas en base a la comunicación existente entre ellos, basada en algoritmos previamente diseñados.

## **1.3 Objetivos generales**

Se establecen los siguientes objetivos como aportaciones de este proyecto:

- Identificar el Estado del Arte de la planificación dinámica en tiempo real de la producción y aspectos relacionados con ella.
- Estudio y evaluación del impacto directo e indirecto de los problemas productivos sobre los resultados de la producción desde el punto de vista de la planificación de la producción.

- Diseño e implementación de un sistema de replanificación en tiempo real de la producción que optimice dicha planificación de forma eficiente en base a los problemas que puedan presentarse durante el tiempo efectivo de producción.

## 1.4 Estructura de la tesis

Este documento de tesis se organiza de la siguiente manera.

- En la Sección 2 de Estado del Arte se refleja el análisis bibliométrico y se exponen los problemas de Planificación Dinámica identificados por los sistemas tradicionales, mostrando cómo los diferentes autores integran nuevas tecnologías para abordarlos. A su vez, se establece la clasificación de las diferentes estrategias analizadas y propuestas aportadas por los distintos autores y se referencian los algoritmos y variables utilizados en la planificación en tiempo real. Basado en ello, se establece la combinación más relevante de Objetivos y Variables utilizadas. También se detallan las referencias existentes en cuanto a su aplicación en AMR (Robots Móviles Autónomos) y AGV (Vehículos Guiados Automáticamente), Realidad Virtual Aumentada, y Sistemas Ciberfísicos. También, se introducen diversos conceptos, notación y fórmulas usados en la programación de la producción, así como el esquema de alguno de los algoritmos que en el estado del arte han sido empleados para optimizarla. Adicionalmente, se realizan unas consideraciones finales indicando aquellos aspectos en los que se detecta una ausencia de referencias, que es donde se centra esta tesis.
- En la Sección 3 se presenta el concepto del nuevo modelo de Sonar Industrial, se muestran las variables y objetivos trabajados en el modelo, y se detallan los diagramas de flujo de la interacción con los centros de trabajo, los AMR y los dispositivos de realidad virtual. En esta sección se identifican dos casos diferentes de aplicación de los Algoritmos que forman el software de Sonar Industrial:
  - Caso 1: Algoritmo Sonar Industrial Simple para optimización de  $C_{max}$ .
  - Caso 2: Algoritmo Sonar Industrial Avanzado para optimización de  $C_{max}$ , OEE y consumo de Energía.

- En la Sección 4 se detalla un nuevo algoritmo desarrollado para la secuenciación por centro de trabajo con el objetivo de optimizar el coste de las pérdidas de energía en función del OEE, y del consumo de energía histórico y huella de carbono.
- En la Sección 5 se presenta el concepto del Sensor de Planificación, se detalla el diagrama de flujo de la interacción de los contenedores con los centros de trabajo, los AMR y dispositivos de realidad virtual. Y se identifica un tercer caso adicional de aplicación de los Algoritmos que forman el software de Sonar Industrial:
  - Caso 3: Algoritmo Sonar Industrial aplicado al WIP (Work-in-Progress, Trabajo en curso de producción) mediante su aplicación a través de dispositivos asociados a contenedores de trabajo en curso, bajo el concepto de “Sensor de Planificación”.
- En la Sección 6, se describe la aplicación de software desarrollada en Python como herramienta para realizar las validaciones y extracción de resultados.
- En la Sección 7, se comprueban las validaciones del modelo Sonar -industrial.
- En la Sección 8, se analizan los resultados sobre simulaciones reales en distintos escenarios, y se lleva a cabo un análisis y discusión a través de su comparativa.
- En la Sección 9 se revelan las conclusiones de esta tesis doctoral y se proponen futuras investigaciones para la continuación de dicha investigación.
- En la Sección 10 se expone el Plan de Diseminación llevado a cabo en la tesis.
- En la Sección 11 se indican los Objetivos de Desarrollo Sostenible cubiertos por esta tesis.
- La Sección 12 enumera las distintas referencias bibliográficas en las que se cimenta esta tesis.

## 2. Estado del arte

### 2.1 Análisis bibliométrico

Esta investigación se basa en un análisis bibliométrico llevado a cabo en la base de datos Web of Science (WoS), filtrando los resultados con criterios inclusivos y exclusivos. Esta revisión bibliográfica se realiza para identificar la productividad de los autores, las revistas, los años, los grupos de investigación, y las herramientas de planificación utilizadas.

Los artículos se han recogido de la WoS utilizando los siguientes criterios de búsqueda relacionados con la planificación en tiempo real: (real time OR real-time) AND (dynamic scheduling OR scheduling) AND (industry 4.0 OR smart manufacturing OR cyber physical system OR cyber-physical-system OR Internet of Things). Esta búsqueda ha enmarcado o estudiado alrededor de 22.373 artículos. Posteriormente, se ha realizado un refinamiento para asegurar que todas las referencias estén relacionadas con el objetivo del trabajo. Todos los documentos han sido analizados y clasificados como incluidos o excluidos tomando como base al menos uno de estos requisitos (R):

- R1: el documento no es un artículo.
- R2: el artículo no está en inglés.
- R3: los artículos han sido publicados antes de 2012.
- R4: la categoría de los artículos no está relacionada con el objetivo del trabajo.
- R5: el trabajo ha sido seleccionado según la estrategia de búsqueda establecida, pero, a pesar de ello, no se corresponde con el objetivo real del mismo.

Además, se han incluido 21 artículos considerados relevantes para la investigación.

El flujo de trabajo del análisis bibliométrico se muestra en la figura (1):

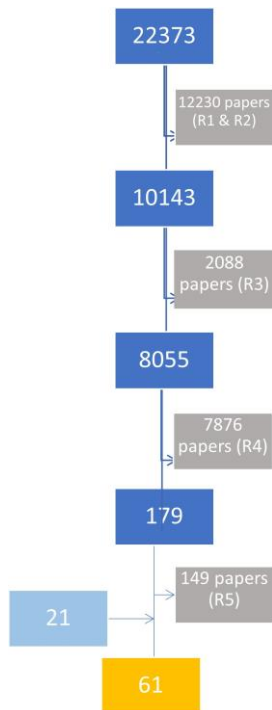


Figura 1: Flujo de trabajo del análisis bibliométrico

Los resultados bibliométricos se reflejan en la figura (2):

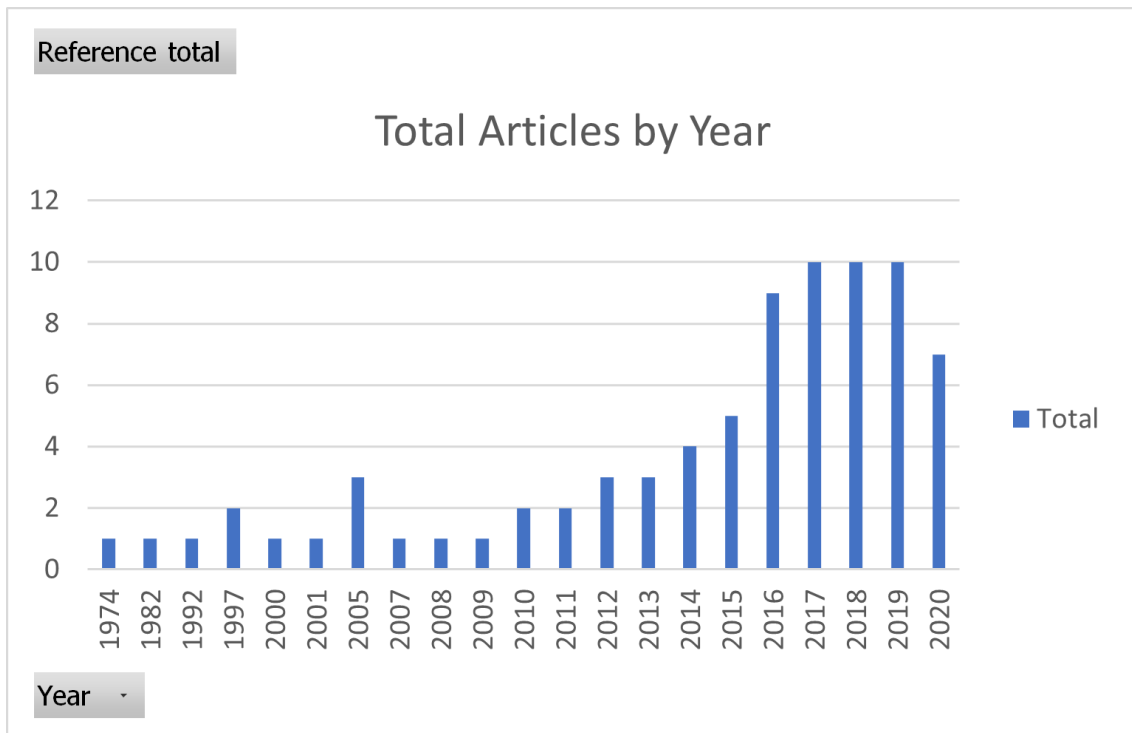


Figura 2: Producción bibliográfica anual en la planificación dinámica de la producción en tiempo real

La lista de los principales grupos de investigación por países sobre este tema se muestra en la Figura (3):



Figura 3: Lista de los principales grupos de investigación sobre planificación dinámica de la producción en tiempo real (mapa de calor)

La Lista de las principales Revistas que publican literatura sobre este tema se muestra en la Figura (4):

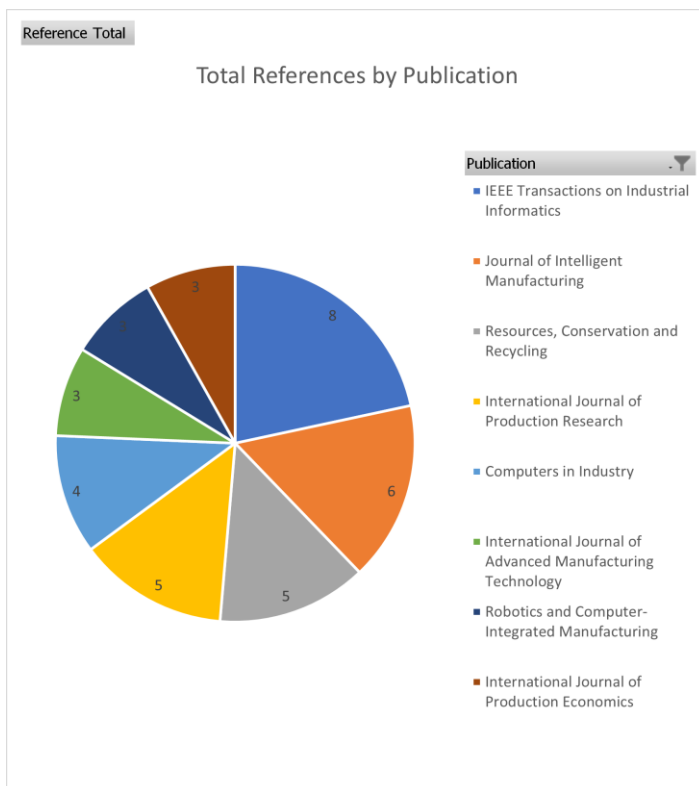


Figura 4: Lista de revistas que publican literatura sobre planificación dinámica de la producción en tiempo real (filtrada por valor superior a 2)

Configuración y Readaptación Inteligente de Software para la Transmisión e Interacción de Algoritmos.

La Lista de las principales Palabras Clave de Autor utilizadas sobre este tema se muestra en la Figura (5):

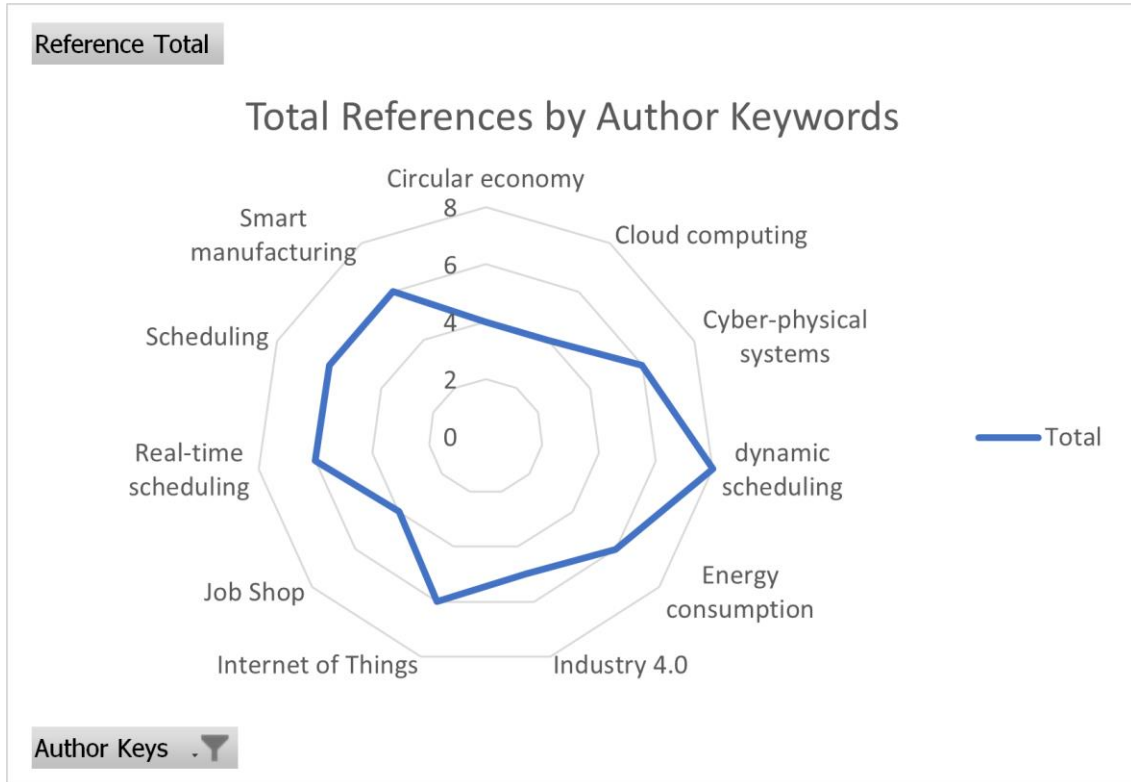


Figura 5: Lista de las principales palabras clave de autor utilizadas en la literatura sobre planificación dinámica de la producción en tiempo real (filtradas por valor superior a 3)

## 2.2 Sistemas tradicionales de planificación dinámica

Es posible establecer una primera Clasificación de los problemas de Planificación de la Producción: Planificación Estática (offline) y Planificación Dinámica (online):

- Clasificación de los problemas de Planificación de la producción (Al-Hinai & Elmekawy, 2011)
  - Estáticos (offline)
  - Dinámicos (online)

Esta tesis se va a centrar en esta última, la Planificación Dinámica en tiempo real.

Las primeras investigaciones relacionadas con la planificación dinámica fueron las siguientes:

- (Holloway & Nelson, 1974), fueron los primeros en apuntar al problema de la planificación dinámica.
- (Muhleman, Lockett, & Farn, 1982), estudiaron ampliamente la aplicación de la estrategia de planificación periódica en un sistema de taller dinámico aleatorio.
- (Church & Uzsoy, 1992), desarrollaron métodos de reprogramación periódicos y basados en eventos en un sistema de programación de una sola máquina con ordenación por urgencia.
- (Pierreval & Mebarki, 1997), diseñaron una regla heurística.
- (Kouiss, Pierreval, & Mebarki, 1997), propusieron una estrategia de planificación basada en un sistema Multi-Agente para un flujo de taller dinámico (Dynamic job shop).

Más recientemente:

- (Aytug, Lawley, McKay, Mohan, & Uzsoy, 2005), propusieron un sistema de planificación dinámica.
- (Ouelhadj & Petrovic, 2009), propusieron un sistema de planificación dinámica alternativo.

En la Planificación de la Producción, el planificador puede planificar al detalle cada pequeño paso a dar. Pero más tarde, cuando comienza la producción, pueden cambiar muchas cosas, y dicha planificación debe adaptarse a las circunstancias.

El problema de la planificación dinámica se plantea cuando en un sistema estático de planificación de la producción se tienen en cuenta acontecimientos excepcionales, como pedidos urgentes o cancelaciones de trabajos.

Para resolver estos problemas, el planificador debe analizar todas las distintas variables que pueden afectar durante los procesos de producción, para tomar decisiones en cada momento. El objetivo del plan es claro: realizar la producción en el menor tiempo posible. Pero para conseguir este objetivo principal, se deben sincronizar otros objetivos paralelos. El planificador debe pensar en ahorrar y mantener la carga de la máquina dentro de unos parámetros adecuados para responder a cualquier circunstancia adversa y

también debe pensar en los posibles obstáculos que podrían surgir, que frenarían el plan. Además, debido a posibles urgencias, la producción puede necesitar realizarse más rápido de lo previsto, en cuyo caso debe decidirse si mantener el ritmo incluyendo la urgencia, u optar por una estrategia específica alternativa para alcanzar el plan más adelante incluyendo estas urgencias.

Teniendo esto en cuenta, los sistemas tradicionales han propuesto diferentes estrategias de Planificación Dinámica para superar estos problemas, como son: la aplicación de la estrategia de planificación periódica en un sistema de taller dinámico, el desarrollo de métodos de reprogramación periódicos y basados en eventos en un sistema de programación de una sola máquina con pedido urgente, el diseño de una regla heurística, la propuesta de una estrategia de planificación basada en Multi-Agente para un flujo de taller dinámico (Dynamic job shop), o la propuesta de otros métodos de programación dinámica.

No obstante, estos sistemas tradicionales no han conseguido dar una solución definitiva a estos problemas u obstáculos encontrados. Por ello, como una evolución natural de estos sistemas tradicionales de la Planificación Dinámica de la Producción, han surgido nuevas estrategias y tecnologías capaces de superarlos.

## **2.3 Producción e industria, estrategias de planificación**

Cuando hablamos de Producción y Fabricación, estamos hablando de un concepto general que puede desarrollarse en diferentes entornos. Cada entorno industrial o fábrica, está especializado normalmente en la producción de un determinado tipo de productos cuyas características marcan significativamente la forma en que se realiza la programación de la producción. Dentro de cada fábrica, existen distintos centros de trabajo donde se lleva a cabo la producción. Es habitual que en dichos centros de trabajo puedan producirse de forma consecutiva distintos tipos de productos con diferentes características, y la planificación dinámica debe considerar esta circunstancia, para optimizar dicha secuencia. Las características del artículo (lista de materiales/fórmula y ruta) afectarán al tiempo y al coste de la operación. A su vez, las diferencias existentes

entre los distintos artículos a producir pueden acarrear tiempos de preparación adicionales, que también afectarán al tiempo y al coste. Para esos casos, el plan de producción debe encontrar la manera de combinar estas operaciones para lograr los mejores resultados posibles. Para que este plan de producción pueda desarrollarse y hacer frente a las dificultades y los problemas que puedan presentarse en su ejecución, el planificador debe seguir una estrategia adecuada capaz de preverlos y contemplar diversas acciones para afrontarlos.

Partiendo de este punto, podemos recuperar las clasificaciones tradicionales que han sido establecidas para las distintas estrategias posibles de Planificación Dinámica de la Producción (Wang, Yang, Ren, & Liu, 2020):

- 1) Inteligencia Artificial (Artificial Intelligence (AI) and Knowledge-based approaches)
  - Algoritmos genéticos: Genetic Algorithm (GA)
  - Redes neuronales: Neural networks
  - Sistemas expertos: Expert systems
  - Lógica difusa: Fuzzy logic
- 2) Simulación basada en aproximaciones (Simulation-based approaches), como el establecimiento de reglas de prioridad (the priority dispatching rules)
- 3) Aproximaciones Multi-Agente (Multi-Agent based approaches)

A esta clasificación tradicional, se han incorporado las contribuciones de las nuevas tecnologías, de forma que la solución propuesta por cada autor pueda incluirse en alguna de las siguientes estrategias de la Tabla 1.

TABLA 1: ESTRATEGIAS DE PLANIFICACIÓN DINÁMICA DE LA PRODUCCIÓN	
Estrategia	Autor
<b>Artificial Intelligence (AI) and knowledge- based approaches</b>	
Genetic Algorithm (GA)	(Zambrano Rey, Bekrar, Prabhu, & Trentesaux, 2014)
	(Kundakci & Kulak, 2016)
Neural networks	(Tang, Liu, & Liu, 2005)
	(Araz & Salum, 2010)
Expert systems	(Vieira, Herrmann, & Lin, 2000)
	(Umar, Ariffin, Ismail, & Tang, 2015)
Fuzzy logic	(Zhao, Hong, Yu, Yang, & Zhang, 2010)
	(Xanthopoulos, Koulouriotis, Tourassis, & Emiris, 2013)
<b>Simulation-based approaches</b> as priority dispatching rules	(Lu & Romanowski, 2013)
	(Sharma & Jain, 2016)
<b>Multi-Agent based approaches</b>	(Wang, Xi, & Zhou, 2008)
	(Sahin, Demirtas, Erol, Baykasoglu, & Kaplanoglu, 2017)
<b>Digital-twin based approaches</b>	(Fang, y otros, 2019)
<b>Cyber-physical based approaches</b>	(Zhang, Qian, Lv, & Liu, 2017)

Tabla 1: Clasificación de las estrategias de la planificación dinámica de la producción

Cuando el planificador centra sus esfuerzos en encontrar una solución a los problemas de Planificación Dinámica de la Producción, el primer paso es seleccionar, de entre todas ellas, la estrategia más adecuada para la fábrica, la tecnología disponible y los objetivos perseguidos.

## 2.4 Nuevas tecnologías emergentes

A lo largo de la evolución de los tiempos y la técnica, surgen algunas tecnologías que hacen posible que el planificador de la producción aborde mejoras de rendimiento antes inabordables: mejor material, mejores técnicas y tecnologías, mejor consumo de

energía, mejor comunicación. Esto permite aplicar estrategias que antes eran imposibles.

En la planificación dinámica, los métodos tradicionales de planificación periódica no son lo suficientemente flexibles y son lentos para responder a acontecimientos excepcionales en situaciones de tiempo real.

Con la aparición de nuevas tecnologías, los recursos de fabricación pueden interactuar entre sí de forma dinámica, surgiendo un nuevo entorno de fabricación:

- Internet de las cosas aplicado a la fabricación (IoMT-Internet of Manufacturing Things): En este entorno de producción, hay grandes cantidades de datos de fabricación que se intercambian constantemente para interactuar entre sí, y los métodos de planificación tradicionales ya no son apropiados para la gestión de dichos datos.

Con la aplicación de las tecnologías informáticas y de la comunicación, han surgido nuevas formas de gestión capaces de optimizar los procesos de planificación de la producción, y que han sido aplicadas por diversos investigadores para abordar el problema de la planificación en tiempo real.

Algunas de las nuevas tecnologías que se están aplicando a la planificación dinámica son las siguientes reflejadas en la Tabla 2:

TABLA 2: CLASIFICACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS UTILIZADAS EN LA PLANIFICACIÓN DINÁMICA	
Tecnología	Autor
Industry 4.0 technologies	(Kagermann & Lukas, 2011)
Internet of Things (IoT)	(Zhong, Xu, Klotz, & Newman, 2017)
Industrial Internet of Things (IIoT)	(Hofmann & Rusch, 2017)
MES – Manufacturing Execution System	(Liu, Wang, Li, & Gao, 2023)
Automated assembly plan. system	(Xu, Wang, Bi, & Yu, 2012)
Cloud Computing	(Xu, 2012)
Big Data analysis	(Ren, y otros, 2019)
Real-Time monitoring of the assembly execution systems	(Villalobos, Muñoz, & Gutierrez, 2005)
Dynamic Optimization of manufacturing processes	(Tang, Dai, Salido, & Giret, 2016)
Multi Agent System (MAS)	(Zhang, Qian, Lv, & Liu, 2017)
Online monitoring	(Rodrigues, y otros, 2012)

Configuración y Readaptación Inteligente de Software para la Transmisión e Interacción de Algoritmos.

Information/sensing technology	(Want, Schilit, & Jenson, 2015)
RFID	(Günther, Kletti, & Kubach, 2006)
Smart gateways	(Fang, Qu, Li, & Xu, 2013)
Bluetooth	(Chang, 2014)
Virtual Reality and Data mining	(Roldán, Crespo, Martin-Barrio, Pena, & Barrientos, 2019)
State Monitoring based on Petri net	(Zhang, Wang, Du, Qian, & Yang, 2018)
Digital twin (DT)	(Negri, Fumagalli, & Macchi, 2017)
Cyber-physical system (CPS)	(Rho, Vasilakos, & Chen, 2016)
Sensors	(Chunyang, Xun, & Yuqian, 2016)
Circular Economy (CE)	(Sehnm, Charbel, Chiappetta Jabbour, Farias Pereira, & Lopes de Sousa Jabbour, 2019)
Reverse Logistics (RL)	(Reike, Vermeulen, & Witjes, 2017)
Environment of real data availability	(Ahmadov & Helo, 2018)

Tabla 2: Clasificación de las tecnologías utilizadas en la planificación dinámica

La aparición de nuevas tecnologías en la industria es constante, así como la mejora de las ya existentes, lo que posibilita una mejora continua en el sistema de planificación dinámica de la producción, siempre que sea capaz de ser lo suficientemente flexible para incorporar cualquier nueva tecnología que aparezca. Este debe ser el objetivo de un buen sistema de planificación dinámica en tiempo real: la flexibilidad de absorber los cambios tecnológicos.

Alguna de las tecnologías que se están aplicando son las siguientes:

- Industry 4.0 technologies:
  - (Kagermann & Lukas, 2011), (Holmström & Romme., 2012), (Hermann, Pentek, & Otto, 2016), (Chukwuekwe, Schjøberg, Rødseth, & Stube, 2016), (Tortorella & Fettermann, 2018), (Mangla, y otros, 2019), (Fettermann, Sa Cavalcante, Domingues de Almeida, & Tortorella, 2018), (Bueno, Godinho, & Frank, 2020).
- Internet of Things (IoT):
  - (Xu, He, & Li, Internet of things in industries: a survey, 2014), (Zhong, Xu, Klotz, & Newman, 2017).
- IIoT -> Industrial Internet of Things.
  - (Hofmann & Rusch., 2017), (Witkowski, 2017), (Boyes, Hallaq, Cunningham, & Watson, 2018).

- 
- MES - Manufacturing Execution System
    - (Liu, Wang, Li, & Gao, 2023)
  - Automated assembly planning system
    - (Xu, Wang, Bi, & Yu, 2012)
  - Cloud Computing
    - (Xu, 2012)
  - Big Data analysis
    - (Ren, 2019)
  - Real-Time monitoring of the assembly execution systems
    - (Villalobos, Muñoz, & Gutierrez, 2005)
  - Dynamic Optimization of manufacturing processes
    - (Tang, Dai, Salido, & Giret, 2016)
  - Multi Agent System (MAS)
    - (Bellifemine, Caire, & Greenwood, 2018)
    - MAS for flexible manufacturing systems (Cetnarowicz & Kozlak, 2021)
    - MAS and cyber-physical systems (Zhang, Qian, Lv, & Liu, 2017)
  - Online monitoring
    - (Rodrigues, y otros, 2012)
  - Information/sensing technology: smart gateways, Radio Frequency Identification, ZigBee, Bluetooth
    - (Want, Schilit, & Jenson, 2015)
  - RFID
    - (Günther, Kletti, & Kubach, 2006)
  - Smart gateways
    - (Fang, Qu, Li, & Xu, 2013)
  - Bluetooth
    - (Chang, 2014)
  - Virtual reality and Data mining
    - (Roldán, Crespo, Martin-Barrio, Pena, & Barrientos, 2019)
  - State Monitoring based on Petri net
    - (Zhang, Wang, Du, Qian, & Yang, 2018)
-

- Digital twin (DT): virtual Reality interaction, real-time mapping, symbiotic evolution
  - (Negri, Fumagalli, & Macchi, 2017), (Tao, Zhan, Liu, & Nee, 2019), (Rosen, von Wichert, Lo, & Bettenh, 2015), (Zhuang, Liu, & Xiong, 2018), (Tao & Zhang, Digital twin shop-floor: A new shop-floor paradigm towards smart manufacturing, 2017).
- Cloud Computing and Digital Twins
  - (Jeschke, Brecher, Meisen, Ozdemir, & Eschert, 2017), (Sullivan, Luijff, & Colbert, 2016), (Fitzgerald, Ingram, & Romanovsky, 2016)
- Cyber-physical system (CPS)
  - (Rho, Vasilakos, & Chen, 2016)
- Cyber-physical system (CPS) combining IoT, Cloud Computing and Big Data
  - (Monostori, y otros, 2016), (Bagheri, Yang, Kao, & Lee, 2015), (Zhang, Qian, Lv, & Liu, 2017), (Zhang, Guo, Lv, & Liu, 2018), (Zhang, Zhu, & Lv, CPS-based smart control model for shopfloor material handling, 2018)
- RFID in third generation CPS system
  - (Thaman & Singh, 2017)
- Sensors: wireless sensor, actuator network (WSAN), edge computing (EC)
  - Distributing real-time data, sensors, and actuators (Chunyang, Xun, & Yuqian, 2016)
- Circular Economy (CE)
  - (Sehnm, Charbel, Chiappetta Jabbour, Farias Pereira, & Lopes de Sousa Jabbour, 2019), (Kirchherr, Reike, & Hekkert, 2017)
- Reverse Logistics (RL)
  - (Reike, Vermeulen, & Witjes, 2017)
- Environment of real-data availability
  - (Ahmadov & Helo, 2018)

## 2.5 Nuevos sistemas y técnicas de planificación en tiempo real basadas en nuevas tecnologías

Con el uso de estas tecnologías, han surgido nuevas investigaciones que abordan este problema de la planificación de la producción en tiempo real y proponen el uso de diversos algoritmos. La lista de las diferentes técnicas utilizadas se muestra en la Tabla 3.

TABLA 3: CLASIFICACIÓN DE TÉCNICAS APLICADAS A LA PLANIFICACIÓN DINÁMICA	
Técnica-Algoritmos	Autor
Multi-period hierarchical mechanism	(Luo, Fang, & Huang, 2015)
Multi-agent architecture	(Shukla, Soni, Kumar, & Sujil, 2018)
Genetic algorithm	(Fang, y otros, 2019)
Games theory	(Wang, Yang, Ren, & Liu, 2020)
Swarm intelligence approach	(Rossi, 2014)
Gravitational emulation local search algorithm	(Hosseinabadi, Siar, Shamsirband, Shojafar, & Nasir, 2015)
ICM- Intelligent Collaborative Mechanism and Optimization Algorithm	(Qian, Zhang, Jiang, Pan, & Rong, 2020)
Planning algorithm based on Petri net and ant colony heuristic algorithm	(Tian, Wang, Zhang, & Wu, 2019)
Software designed in network	(Jha, Babiceanu, & Seker, 2020)
Algorithm in Cloud ERP	(Dev, Shankar, & Qaiser, 2020)
Neighbourhood, heuristic (IVNH) algorithm	(Otto & Li, 2020)
Algorithm based on an improvement of particle swarm optimization	(Tang, Dai, Salido, & Giret, 2016)
MDSS algorithm (uncertainty)	(Jiang, Zheng, & Liu, 2017)
Heterarchical architectures	(Duffie, 1990)
Zero-defect manufacturing (ZDM)	(Psarommatis, Martiriggiano, Zheng, & Kiritsis, 2021)
Augmented Reality application and holonic approach to adapt production rescheduling	(Mourtzis, Zogopoulos, & Xanthi, 2019) (Mourtzis, Angelopoulos, & Zogopoulos, 2021)

Tabla 3: Clasificación de técnicas aplicadas a la planificación dinámica

Configuración y Readaptación Inteligente de Software para la Transmisión e Interacción de Algoritmos.

A continuación, se desarrolla una descripción un poco más detallada de estas técnicas:

- Mecanismo de programación jerárquica multi período (MPHS- Multi-period hierarchical scheduling mechanism): (Luo, Fang, & Huang, 2015) propone un mecanismo jerárquico multi periodo para optimizar la planificación de la producción y la planificación en tiempo real para un flujo de taller híbrido.
  - Este mecanismo MPHS se desarrolla basándose en el procedimiento de decisión, en el que el mecanismo de programación propuesto contiene dos niveles (decisión de taller y decisión de etapa de trabajo), para controlar el equilibrio de la carga de trabajo.
- Arquitectura multi agente: (Shukla, Soni, Kumar, & Sujil, 2018) desarrollaron una arquitectura multi agente para un flujo de taller.
  - Se desarrolló una arquitectura basada en agentes, que permite la integración de la planificación y la programación de la producción aplicando el concepto de MAS- Multi Agent System.
- Algoritmos genéticos: Un algoritmo genético (AG) es uno de los métodos más utilizados habitualmente en la programación en tiempo real. En este tipo de algoritmo metaheurístico, la optimización de los problemas de búsqueda se inspira en el proceso de selección natural, que imita la evolución biológica. Pertenece al grupo de los algoritmos evolutivos. A continuación, se exponen alguna de sus distintas variantes:
  - Algoritmo genético: (Chryssolouris & Subramaniam, 2001)
  - El método de rejilla (“grid” method) y el algoritmo genético (Yang, Yu, Liu, & Chai, 2011)
  - El algoritmo genético con optimización de enjambre de partículas “particle swarm optimisation” (Wang, Jiang, Wang, Zhang, & Wang, 2018)
  - El algoritmo de optimización multiobjetivo (Fang, y otros, 2019).
- Teoría de juegos (“Game Theory”): La aplicación de la teoría de juegos se basa en la idea de utilizar modelos matemáticos de interacción estratégica entre decisores racionales. Los modelos matemáticos de programación en tiempo real

pueden establecerse para mejorar la eficiencia de la producción y reducir el consumo de energía, basándose en un modelo de etapas de juego que se repiten infinitamente.

- (Wang, Yang, Ren, & Liu, 2020) propusieron un algoritmo basado en la teoría de juegos que tiene en cuenta el consumo de energía.
- Enfoque de Inteligencia de Enjambre (Rossi, 2014): Los algoritmos de inteligencia de enjambre (SI-Swarm Intelligence) se basan en el comportamiento colectivo de sistemas descentralizados y autoorganizados. Se fundamentan en sistemas naturales, pero pueden aplicarse a sistemas artificiales. Consisten en una población de agentes simples que interactúan localmente entre sí y con su entorno.
- Algoritmo de búsqueda local de emulación gravitacional (Gravitational emulation local search algorithm) (Hosseinabadi, Siar, Shamsirband, Shojafar, & Nasir, 2015): Para obtener soluciones multiobjetivo a los problemas de programación de talleres de flujo, emplea los algoritmos heurísticos basados en el algoritmo de búsqueda local de emulación gravitacional (GELS) con el fin de buscar eficazmente en el espacio del problema, y generar soluciones para buscar y resolver problemas NP-completos.
- Mecanismo Colaborativo Inteligente (ICM-Intelligent Collaborative Mechanism) y algoritmo de optimización, (Qian, Zhang, Jiang, Pan, & Rong, 2020).
  - Para reducir el impacto de las excepciones en la programación dinámica, se utiliza el Mecanismo Colaborativo Inteligente (ICM) con el que se lleva a cabo una secuenciación a través de la configuración de los recursos entre tareas. Este mecanismo fundamenta su acción en la toma de datos, su análisis en redes de Petri, y en una matriz de restricciones.
- Algoritmo de planificación basado en la red de Petri y algoritmo heurístico de colonia de hormigas, (Tian, Wang, Zhang, & Wu, 2019), (Demir & Erden, 2020).
  - El algoritmo de colonia de hormigas es una técnica probabilística que se utiliza para resolver problemas computacionales que pueden reducirse a

encontrar los mejores caminos a través de grafos. Petrinet se utiliza para fabricar grafos. Esta técnica constituye una optimización metaheurística en métodos de inteligencia de enjambre.

- Software diseñado en red, (Jha, Babiceanu, & Seker, 2020). Es una solución basada en un diseño de software específico para modelar “Internet Industrial de las Cosas” (IIoT) en las aplicaciones de fabricación. Esta solución analiza los fallos de los recursos/centros de trabajo y las capacidades disponibles para su reparación. En base a dicho análisis, transfiere el trabajo en curso a otros recursos/centros de trabajo, dentro del mismo entorno productivo o a otro entorno remoto, y sustituye recursos/centros de trabajo mediante la adquisición de otros nuevos.
- Algoritmo en ERP (Enterprise Resource Planning) en la nube, (Dev, Shankar, & Qaiser, 2020). Los programas ERP (Vollmann, Berry, & Clay, 1997) pueden utilizarse para desarrollar algoritmos específicos capaces de trabajar con múltiples variables y múltiples objetivos, y utilizarlos en la planificación dinámica de la producción en tiempo real. El ERP brinda la posibilidad de incluir en los algoritmos en tiempo real un mayor volumen de datos adicionales a aquellos que están estrictamente relacionados con el área de producción. Y, por lo tanto, abarca muchas más variables y objetivos relacionados indirectamente con la producción.
- Algoritmo heurístico de vecindad (IVNH- Neighbourhood heuristic), (Otto & Li, 2020). Se trata de otro método metaheurístico de optimización combinatoria utilizado para la fabricación. Explora vecindades distantes de la solución actual para resolver problemas lineales y no lineales.
- Algoritmo basado en una mejora de la optimización por enjambre de partículas, (Tang, Dai, Salido, & Giret, 2016).
  - Basado en la optimización de enjambre de partículas (PSO), se trata de un método computacional que optimiza un problema intentando mejorarlo de forma iterativa con una solución candidata seleccionada respecto a una medida de calidad dada. En esta técnica, a través de este algoritmo metaheurístico, se adoptan algunas mejoras que se aplican a

los procesos de fabricación para conseguir la planificación dinámica de la producción.

- Algoritmo MDSS para resolver casos de fabricación en problemas de planificación donde el proceso y tiempos de entrega son intervalos (incertidumbre), (Jiang, Zheng, & Liu, 2017).
  - En casos de problemas de programación con incertidumbre, en los que los tiempos de proceso y de entrega están en intervalos, se puede considerar un algoritmo multietapa basado en el conocimiento previo histórico (base de datos de conocimiento).
- Sistemas de fabricación heterárquicos, (Duffie, 1990), protocolo de red de contratos (Smith, 1980): Se plantea un control heterárquico en tiempo real de la asignación dinámica de recursos y el enrutamiento dinámico de productos mediante una simulación NetLogo (Zbib, Pach, Sallez, & Trentesaux, 2012).
  - Las arquitecturas heterárquicas son capaces de modelar sistemas basados en las interacciones entre las entidades de los sistemas de fabricación.
- Metodología de fabricación con cero defectos (ZDM): (Psarommatis, Martiriggiano, Zheng, & Kiritsis, 2021).
  - Basándose en eventos tradicionales y orientados a la ZDM, propone una metodología para tratar la reprogramación causada por eventos inesperados. Esta metodología utiliza diversos parámetros que se integran en el cálculo de la siguiente reprogramación con el objetivo de responder eficazmente a estos eventos.
- Aplicación de la realidad aumentada y enfoque holónico para adaptar la reprogramación de la producción, (Mourtzis, Zogopoulos, & Xanthi, 2019), (Mourtzis, Angelopoulos, & Zogopoulos, 2021).
  - Basado en interfaces de dispositivos móviles y utilizando la realidad aumentada, se propone un enfoque holónico para apoyar la reprogramación dinámica de la producción. Este enfoque se realiza a través de la representación de la construcción de cada sistema de fabricación holónico de abajo arriba, y mediante la integración holones que colaboran para proporcionar flexibilidad y robustez.

La estrategia a seguir por el planificador, para afrontar los problemas de planificación de la producción en tiempo real, es la toma de decisión de la combinación de las tecnologías y técnicas más adecuadas que puedan cubrir los objetivos perseguidos.

## 2.5 Análisis de los objetivos en la literatura

Previamente a la toma de decisión de la estrategia a seguir para la planificación dinámica, es necesario tener claros los objetivos principales y los objetivos paralelos que necesitamos cumplir para obtener los mejores resultados (Figura 6). Todos los procesos de planificación estarán orientados a ello. Por ello, el secreto de una buena estrategia es seleccionar correctamente el propósito final, los hitos o etapas a establecer, y las herramientas necesarias para alcanzarla.



Figura 6: Principales objetivos referenciados en la literatura

A continuación, se detallan de forma agrupada y resumida los principales objetivos que han sido trabajados por los autores en la literatura:

- Minimizar el tiempo de fabricación  $C_{max}$  (makespan):
  - El objetivo principal de un planificador en la planificación dinámica es terminar todas las operaciones previstas en el plan de producción de la fábrica en el menor tiempo posible, considerando el tiempo de proceso de todas las operaciones a realizar. Este objetivo es un factor común en todas las investigaciones. (Qian, Zhang, Jiang, Pan, & Rong, 2020) y

(Tan, Tong, Wu, & Li, 2019) son diferentes ejemplos de la consideración de este objetivo para la planificación dinámica.

- Minimizar la carga de las máquinas:
  - Para lograr el objetivo principal, el planificador sabe que las máquinas no deben sobrecargarse para mantenerlas todas en buenas condiciones con el fin de aguantar un ritmo adecuado hasta el final del plan de producción. Si durante la producción una máquina se sobrecarga, la carga de trabajo debe equilibrarse buscando centros de trabajo alternativos para conseguir mejores resultados con un correcto equilibrio de las operaciones. (Tan, Tong, Wu, & Li, 2019) es un ejemplo de investigación que combina el objetivo principal de Minimizar el makespan con este objetivo paralelo de Minimizar la carga de máquina.
- Reducir el consumo de energía y los costes medioambientales:
  - Para soportar las demandas de producción, el planificador debe reducir al máximo el consumo de energía y evitar la contaminación. (Wang, Yang, Ren, & Liu, 2020) es un ejemplo de investigación con este objetivo principal. (Tan, Tong, Wu, & Li, 2019) también combina la minimización del consumo de energía con la duración de la producción y la carga de las máquinas.
- Minimizar el coste total:
  - En ocasiones las exigencias de producción obligan a un equilibrio en la eficiencia para acomodar al mínimo los gastos de coste total. En el caso de la planificación dinámica deben considerarse los diferentes costes que intervienen en la producción: costes directos de materiales, mano de obra y costes indirectos. (Fang, y otros, 2019) es un ejemplo de investigación que combina el objetivo principal de Minimizar el makespan con los objetivos paralelos de minimizar la carga de máquina y minimizar el coste total.
- Minimizar el tiempo de fabricación:
  - En otros casos, el resultado de la producción global no es el objetivo principal, por lo que no depende de reducir el consumo, el coste, o el

tiempo total, sino que el objetivo es reducir el tiempo en operaciones específicas obteniendo más beneficio en ellas, por ejemplo, para conseguir más beneficios a largo plazo. Un ejemplo de la combinación de minimizar el tiempo de fabricación con el objetivo de minimizar también el makespan se analiza en la investigación de (Qian, Zhang, Jiang, Pan, & Rong, 2020).

- Maximizar la utilización de los operarios:
  - El secreto de un buen planificador es conocer al cien por cien las capacidades que tiene detrás, y por tanto los límites de cualquier herramienta que pueda utilizar. Un buen planificador debe conocer las capacidades de la fábrica, de los operarios humanos y de las máquinas, así como los límites, puntos fuertes, puntos débiles, y debe ponerlos en práctica en consecuencia tratando de maximizar su utilización. En la Planificación Dinámica de la producción, debemos conocer las capacidades de los diferentes roles de los operarios de producción e intentar maximizar las capacidades en las operaciones. (Qian, Zhang, Jiang, Pan, & Rong, 2020) combina maximizar la utilización del operario con minimizar el tiempo de fabricación.
- Minimizar el retraso en la fecha de entrega:
  - A veces el objetivo debe ser mantener el plan tal y como se estimó. El planificador puede establecer un plan de producción, y el objetivo en este caso no es ahorrar energía o reducir costes o minimizar el tiempo, el objetivo es hacer el trabajo tal y como se ha planificado. (Fang, y otros, 2019) es un ejemplo de la combinación de minimizar el retraso en las fechas de entrega con la minimización del coste total. Se trata de alcanzar un equilibrio entre la atención al cliente y la atención interna.
- Maximizar paquetes:
  - La mejor forma de mantenerse a nivel industrial es llevar a cabo una evolución continua, esto no significa cambiar la base, significa hacer pequeños cambios e innovaciones. Cuando algo tiene éxito, no modificarlo parece una buena idea, pero todo tiene su ciclo de vida, y

para mantener un producto es necesario hacer pequeñas innovaciones. Estas aportaciones pueden alargar la vida del producto minimizando costes, por ejemplo, como maximizar el uso de envases en los artículos en los que es aplicable. Como ejemplo de esta evolución se muestra la maximización de los envases propuesta por (Otto & Li, 2020) en su investigación.

Los objetivos perseguidos en la planificación dinámica de la producción en tiempo real son parte de la definición básica que debe establecer el planificador con el fin común de maximizar los beneficios. Todas las necesidades, técnicas y tecnologías a utilizar deben construirse en relación con estos objetivos. Normalmente, habrá objetivos comunes en la planificación de la producción de las diferentes industrias, pero la prevalencia entre ellos, y la existencia de objetivos específicos, será diferente para cada industria y cada empresa, aunque fabriquen el mismo tipo de producto.

## 2.6 Análisis de las variables en la literatura

Una vez que el planificador ha establecido los objetivos, es el momento de preguntarse: ¿cómo podemos hacerlo?, para ello es necesario profundizar a un nivel inferior y determinar cómo podemos medir la evolución y el cumplimiento de ese objetivo. Para cada objetivo debemos establecer una serie de variables que nos sirvan de cuadro de mando de la evolución de la planificación dinámica.

Los autores mencionados a lo largo del estado del arte han trabajado con diferentes variables. Destacamos algunas de ellas:

- **Prioridad y urgencia estáticas.**
  - La prioridad y la urgencia son un punto importante a tener en cuenta, ya que suele ser uno de los imprevistos más comunes en la planificación dinámica diaria. Los intereses especiales del Departamento de Ventas pueden afectar al plan de producción. La Prioridad y la Urgencia también pueden gestionarse conjuntamente como diferentes niveles de clasificación en los algoritmos.
- **Margen de Vencimiento y Cambios en la Fecha de Entrega.**
  - Otra variable principal en el plan de fabricación, que contribuye a la atención al cliente, es dar preferencia a la fecha de vencimiento de la orden de fabricación respecto a la fecha de entrega al cliente. En este margen de fecha de entrega también tenemos en cuenta el tiempo de producción. Producir los productos demasiado tarde será un problema para el cliente y producirlos demasiado pronto podría ser un problema para la empresa, sobre todo si tenemos altos costes de inventario. Por lo tanto, otro criterio importante debería ser planificar las operaciones en el periodo de tiempo correcto. En el caso de los productos semielaborados, esta diferencia también podría simularse con las fechas de consumo. Los cambios en la fecha de entrega son otro posible impacto diario en la Planificación Dinámica.
- **Costes del artículo y costes WIP.**

- En la fabricación del producto, la suma del coste de producción y el coste de los materiales da como resultado un precio de coste para el artículo fabricado. Para las empresas es importante reducir el coste de valoración de las existencias y los costes del trabajo en curso. Por lo tanto, la idea principal para la planificación es reducir al máximo el tiempo en que las órdenes de producción están en el inventario antes de la entrega al cliente. Esto es más importante para los productos con mayor coste.
- Costes de inventario:
  - También hay otros puntos relevantes como los costes de inventario, relacionados con las dimensiones físicas del producto. Tienen más coste de inventario los productos con grandes dimensiones que los productos pequeños.
- Costes de Producción y Costes de Máquina:
  - En relación con el coste de producción, algunas operaciones requieren una preparación del centro de trabajo, y en ese caso, es necesario agrupar las órdenes de producción. También, el consumo de energía de la Máquina es importante para la contribución al coste total, así como a los costes medioambientales.
- Costes de material:
  - En relación con el coste de material (materia prima y componentes), alguno de ellos puede ser más caros o ser perecedero, y en este caso, podríamos tomarlo como criterio de planificación para reducir el coste de valoración o las pérdidas.
- Consumo de Energía y Costes Medioambientales
  - Existe otro coste a considerar en algunas empresas, es el coste medioambiental, relacionado con el consumo de energía y los residuos de producción. A veces el tipo de producto a producir implica algún tipo de contaminación ambiental. En estos casos es importante agrupar la producción para contaminar lo menos posible.
- Tiempo de Producción

- El tiempo de producción es una de las principales características analizadas para planificar y secuenciar las órdenes de producción. Este objetivo será más relevante, cuando se combine con otros y entren en combinación diversos centros de trabajo alternativos, en función de cómo organicemos la secuencia en la que se fabricarán las operaciones de las órdenes de producción en el centro de trabajo. Dependiendo de la complejidad del problema, existen algoritmos simples con soluciones óptimas, o algoritmos metaheurísticos complejos donde se obtiene una solución aproximada como la mejor solución posible de entre las consideradas.
- Beneficios y Margen de la empresa:
  - Una de las principales variables del plan de fabricación que contribuye al éxito de la empresa es dar preferencia a los beneficios de la empresa y hacerlos sostenibles en el tiempo. Así, uno de los principales criterios debe ser planificar antes las operaciones que den a la empresa más margen, es decir, más diferencia entre el coste y el precio de venta. En el caso de los productos semielaborados, esta diferencia también podría simularse con valores estimados.

En la tabla 4 podemos ver ilustradas las distintas variables utilizadas en la planificación dinámica de la producción:

TABLA 4: VARIABLES UTILIZADAS EN PLANIFICACIÓN DINÁMICA DE LA PRODUCCIÓN	
Variable	Autor
Prioridad (Static Priority)	(Qian, Zhang, Jiang, Pan, & Rong, 2020)
Urgencia (Urgency of tasks)	(Qian, Zhang, Jiang, Pan, & Rong, 2020)
Tiempo de proceso medio (Average Process time)	(Qian, Zhang, Jiang, Pan, & Rong, 2020)
Matriz de restricciones (Constrain matrix)	(Qian, Zhang, Jiang, Pan, & Rong, 2020)
Parámetros de peso (Weight parameters)	(Qian, Zhang, Jiang, Pan, & Rong, 2020)
Costes operación/producción (Operation costs, Production costs)	(Fang, y otros, 2019), (Jha, Babiceanu, & Seker, 2020), (Dev, Shankar, & Qaiser, 2020)
Costes de máquina - pérdidas (Machine costs - losses)	(Fang, y otros, 2019)
Costes de energía, consumo combustible, consumo de energía (Equipment energy costs, fuel consumption, energy consumption)	(Fang, y otros, 2019), (Dev, Shankar, & Qaiser, 2020), (Wang, Yang, Ren, & Liu, 2020)
Tiempo de proceso (Processing time)	Fang et al [11], (Dev, Shankar, & Qaiser, 2020), (Tan, Tong, Wu, & Li, 2019)
Nivel de habilidad del trabajador (Skill levels of workers)	(Fang, y otros, 2019)
Fallos de máquina, fallos de trabajo en proceso (Equipment failures, physical work-in-progress resource failures)	(Fang, y otros, 2019), (Jha, Babiceanu, & Seker, 2020)
Llegada de nuevas órdenes (Arrival of new orders / new orders)	(Fang, y otros, 2019)
Cambios fecha entrega (Changes to the Delivery Date)	(Fang, y otros, 2019)
Faltas de material (Shortage raw materials, logistic availability)	(Fang, y otros, 2019), (Jha, Babiceanu, & Seker, 2020)
Retrasos de producción (Processing delays)	(Fang, y otros, 2019)
Ausencia de trabajadores (Absence of workers)	(Fang, y otros, 2019)
Centros de trabajo alternativos (Alternative Work Centres)	(Jha, Babiceanu, & Seker, 2020)
Parámetros logísticos de reabastecimiento (Inventory-related logistics and order parameter information)	(Jha, Babiceanu, & Seker, 2020), (Dev, Shankar, & Qaiser, 2020)
Coste social de las operaciones, costes ambientales (Cost of operations with social influence, Environmental costs.)	(Dev, Shankar, & Qaiser, 2020)
Atención al cliente (Customer service)	(Dev, Shankar, & Qaiser, 2020)
Costes Demanda insatisfecha (Demand, unmet demand costs)	(Dev, Shankar, & Qaiser, 2020)
Plazo de entrega (Lead time)	(Dev, Shankar, & Qaiser, 2020)
Tamaño del pedido (Order size)	(Dev, Shankar, & Qaiser, 2020)
Gestión del transporte (Transportation management)	(Dev, Shankar, & Qaiser, 2020)
Personalización del Producto (Product customization)	(Dev, Shankar, & Qaiser, 2020), (Otto & Li, 2020)
Tiempo de preparación (Set up time)	(Dev, Shankar, & Qaiser, 2020)
Tiempo de espera (Waiting time)	(Dev, Shankar, & Qaiser, 2020)
Costes de reciclaje (Recycling costs - RL Costs, Revers Log.)	(Dev, Shankar, & Qaiser, 2020)
Paquetizado (Packaging)	(Dev, Shankar, & Qaiser, 2020)
Calidad (Quality)	(Jha, Babiceanu, & Seker, 2020)
Costes de recogida y almacén. (Collection costs and storage costs)	New variable apported in this research
Margen de beneficios (Margin of Benefits for the company)	New variable apported in this research

Tabla 4: Variables utilizadas en planificación dinámica de la producción

Las variables a utilizar y la forma de medirlas, es una decisión importante que debe tomar el planificador. La decisión debe tomarse de forma adecuada teniendo en cuenta la cobertura de los objetivos a corto, medio y largo plazo, y con la suficiente flexibilidad para dar cabida a más variables y combinación de objetivos.

## 2.7 Combinación de métodos, objetivos y variables analizadas en la literatura

Ejemplos de diferentes combinaciones principales de variables-objetivos que han sido utilizadas por los autores en la literatura:

- Makespan (CMax) y Coste total:
  - (Zhou et al., 2019), proponen una combinación de Coste y makespan, de flujos de trabajo en nubes híbridas con algoritmos basados en el primer tiempo de finalización heterogéneo (HEFT- heterogeneous earliest finish time), y hace una clasificación de varios trabajos representativos en la literatura.
- Carga de la máquina, Coste total y Fecha de entrega:
  - (Fang, y otros, 2019), propone un Algoritmo genético de optimización multiobjetivo. Objetivos: Minimizar la carga de máquina, Minimizar el coste total, Minimizar el retraso en la fecha de entrega. Variables: Costes de explotación, Costes de producción, Costes de máquina, Costes de energía, Tiempo de procesamiento, Niveles de cualificación de los trabajadores, Fallos en los equipos, Llegada de nuevos pedidos, Cambios en la Fecha de entrega, Escasez de materia prima, Retrasos en el procesamiento, Ausencia de trabajadores.
- Makespan, Tiempo de fabricación y Utilización del operario:
  - (Qian, Zhang, Jiang, Pan, & Rong, 2020), ICM y Algoritmo de Optimización. Objetivos: Minimizar el makespan, Minimizar el tiempo de fabricación, Maximizar la utilización del operario. Variables:

Prioridad estática, Urgencia, Tiempo de proceso, Matriz de restricciones, Parámetros de peso.

- Coste total y Tiempo de fabricación:
  - (Jha, Babiceanu, & Seker, 2020), Software diseñado en red. Variables: Costes de explotación, costes de producción, fallos de equipos, fallos de recursos de trabajo en curso, disponibilidad logística, recursos alternativos, logística relacionada con el inventario e información sobre los parámetros del pedido, calidad.
- Consumo de energía y costes medioambientales:
  - (Wang, Yang, Ren, & Liu, 2020), propone un Algoritmo basado en la teoría de juegos. Objetivos: Reducir el consumo de energía y los costes medioambientales. Variables: Consumo de energía.
  - Otro ejemplo de esta combinación: (Dev, Shankar, & Qaiser, 2020), Algoritmo en ERP en la nube. Variables: Costes operativos, Costes de producción, Consumo de combustible, Tiempo de procesamiento, Información logística relacionada con el inventario y parámetros del pedido, Coste de las operaciones, Costes medioambientales-emisión de CO<sub>2</sub>, Costes medioambientales, Servicio al cliente, Demanda, Costes de la demanda insatisfecha, Plazo de entrega (lead time), Tamaño del pedido, Gestión del transporte, Personalización, Tiempo de preparación, Tiempos de espera, Coste de reciclaje, Embalaje, envasado.
- Coste total- Paquete:
  - (Otto & Li, 2020), propone Algoritmo heurístico de vecindad (IVNH). Objetivo: Maximizar paquetes. Variable: Personalización del producto.
- Makespan-Carga de la máquina-Consumo de energía:
  - (Tan, Tong, Wu, & Li, 2019), propone una arquitectura Ciber-física (Cyber-physical architecture) y un algoritmo de planificación inteligente. Objetivos: Minimizar el makespan  $C_{max}$ , Minimizar la carga de máquina, Reducir el consumo de energía y los costes medioambientales. Variable: Tiempo de procesamiento.

- Otro ejemplo de la misma combinación: (Ding, Qin, Liu, & Wang, 2015). Objetivos: Reducir el consumo de energía, Minimizar la carga de la máquina y el tiempo de fabricación. Variable: Tiempo de proceso.
- Consumo de energía - Makespan:
  - (Mansouri & Aktas, 2016). Objetivos: Reducir el consumo de energía. Minimizar el makespan. Variables: Tiempo de proceso, Costes de máquina.
  - Otro ejemplo de la misma combinación: (Thaman & Singh, 2017). Minimizar makespan, Minimizar tiempo de fabricación, Reducir consumo de energía.

Es destacable, que el planteamiento de la mayor parte de estos métodos se centra en la aplicación de un algoritmo heurístico, que da una solución aceptable al problema de planificación en su conjunto, considerando el conjunto de los diferentes centros de trabajo.

## 2.8 Planificación dinámica de tiempo de transporte de AMR y AGV

Los AMR y AGV se utilizan para el manejo de materiales en el proceso de fabricación y son responsables de conectar los procesos productivos. El control de estos robots es fundamental para la Programación de la producción en tiempo real con el fin de conectar las tareas en diferentes centros de trabajo. Por lo tanto, encontrar el tiempo y el equipo de transporte óptimos para cada tarea con respecto a la producción son cruciales en la planificación de la producción. Los AGV funcionan con un mínimo de integración de inteligencia y se mueven de forma guiada a través de un circuito cerrado. Por el contrario, los AMR dependen de un software que les proporciona mapas en tiempo real y no requieren un circuito para guiar su movimiento. Optimizar el tiempo de transporte y asignar dichos transportes tanto a los AGV como a los AMR para las tareas de

logística de producción son objetivos importantes que deben incorporarse en tiempo real. Por lo tanto, es importante considerar las reglas más utilizadas en la literatura para la demanda de AGV en el problema de programación en tiempo real, como lo sugieren (Klei & Kim, 1996).

Considerando este aspecto, otros autores han investigado sobre la optimización de los tiempos de transporte de los robots de transporte como AGV:

- (Ulusoy, Sivrikaya-,Serifoglu, & Bilge, 1997) propuso un enfoque de algoritmo genético para resolver el problema de programación simultánea de máquinas, y propuso utilizar varios AGV idénticos en un FMS (Flexible Manufacturing System) para minimizar el makespan.
- (Zhang, Wang, Du, Qian, & Yang, 2018) propuso una estrategia de asignación y un Método de optimización dinámica para el manejo de materiales en el taller basado en la fabricación de fuentes de datos múltiples.
- (Saidi-Mehrabad, Dehnavi-Arani, Evazabadian, & Mahmoodian, 2015) propuso un enfoque de una programación lineal entera mixta y aplicó un algoritmo de colonia de hormigas (ACA) de dos etapas para resolver un modelo de taller para problemas de programación, y un problema de enrutamiento sin conflictos para los AGV.
- (Mousavi, Yap, Musa, Tahriri, & Md Dawal, 2017) propuso un enfoque de programación multiobjetivo para AGV en un entorno de fabricación flexible (FMS) utilizando un híbrido del algoritmo genético y el algoritmo de enjambre de partículas. Este enfoque considera múltiples objetivos, incluyendo minimizar el makespan y el número de AGV.
- (Hu, Jia, He, Fu, & Liu, 2020) propuso un enfoque de programación en tiempo real utilizando el Aprendizaje por refuerzo para reducir la duración y la ratio de retardo de los AGV.
- (Liu, Wang, Li, & Gao, 2023) propuso un algoritmo coevolutivo multi poblacional para resolver un multiobjetivo verde (Problema de IPPS) considerando un sistema logístico. Este algoritmo tiene como objetivo minimizar el consumo de energía y maximizar el tiempo de finalización.

## 2.9 Realidad virtual aumentada

La Realidad Virtual Aumentada es una tecnología que permite superponer elementos virtuales sobre nuestra visión de la realidad. Es necesario buscar nuevos algoritmos y estrategias que sirvan de herramienta de programación en tiempo real que aporten y colaboren de forma definitiva en los dispositivos de realidad aumentada, proporcionando información en tiempo real de aquella reprogramación derivada de cualquier imprevisto que pudiera surgir en la producción. Los objetivos y tratamiento de esta información podrían ser ilimitados, o únicamente informativos, para su interacción con los usuarios, como KPI de operaciones, etc.

Algunos autores han investigado sobre la programación de la producción en tiempo real y su aplicación en dispositivos de realidad virtual, aplicando algoritmos heurísticos:

- Aplicación de la realidad aumentada y enfoque holónico para adaptar la reprogramación de la producción (Mourtzis, Zogopoulos, & Xanthi, 2019), (Mourtzis, Angelopoulos, & Zogopoulos, 2021).
  - Basado en interfaces de dispositivos móviles y utilizando la realidad aumentada, se propone un enfoque holónico para apoyar la reprogramación dinámica de la producción, a través de la representación de la construcción de cada sistema de fabricación holónico de abajo arriba, y mediante la integración holones que colaboran para proporcionar flexibilidad y robustez.

## 2.10 Notación, principales conceptos y clasificación de la programación de la producción

Para el abordaje de las fórmulas utilizadas en la programación de la producción que se detallan en este punto y en los algoritmos que se tratan en los posteriores apartados, a continuación, se introduce la notación utilizada en los diferentes conceptos, así como una clasificación de los distintos modelos de producción (tabla 5):

TABLA 5: NOTACIÓN UTILIZADA EN LOS CONCEPTOS DE PROGRAMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN	
Concepto	Notación
Máquinas, o centros de trabajo	$M_j = (M_1, \dots, M_n)$
Trabajos, u órdenes de producción	$J_i = (J_1, \dots, J_n)$
Operaciones	$O_{ij} = (O_{i1}, \dots, O_{in})$
Requisitos de procesamiento	$p_{ij}$
Centros de Trabajo alternativos	$\mu_{ij} \subseteq \{M_1, \dots, M_n\}$
Funciones, por ejemplo, función de coste	$f_i(t)$
Variable, por ejemplo, fecha de entrega	$d_i$
Variable, por ejemplo, Importancia	$w_i$
Entorno de Trabajo	$\alpha = \alpha_1 \alpha_2$ , siendo $\alpha_2$ el número de máquinas, y siendo $\alpha_1$ : o, una única máquina P, varias máquinas con mismo tiempo procesamiento Q, varias máquinas con distinto tiempo procesamiento R, máquinas en paralelo con distinto tiempo procesamiento MPM, máquinas multipropósito G, máquinas multipropósito en Taller General (General Shop) J, máquinas multipropósito en Taller de Trabajo (Job Shop) F, máquinas multipropósito en Taller de Flujo (Flow Shop) O, máquinas multipropósito en Taller Abierto (Open Shop) X, máquinas multipropósito en Taller Mixto (Mixed Shop) PMPM, máquinas multipropósito iguales trabajando en paralelo

	QMPM, máquinas multipropósito distintas trabajando en paralelo.
Características de los trabajos	$\beta$ , con subíndice $i=1$ a $6$ $i=1$ , división del trabajo; $i=2$ , precedencia entre trabajos; $i=3$ , estado en el árbol de representación gráfica; $i=4$ , restricciones específicas en tiempos procesamiento o número operaciones $i=5$ , fecha de finalización máxima (deadline); $i=6$ , se utiliza cuando la programación de la producción es agrupada por lotes;
Criterios de optimización	$\gamma$ , $C_i$ coste, $L_i$ latencia, $E_i$ adelanto, $T_i$ tardanza, $D_i$ desviación absoluta, $S_i$ desviación al cuadrado, $U_i$ penalización unitaria
Clasificación Programación Producción	$\alpha$ Entorno trabajo + $\beta$ Características trabajos + $\gamma$ Criterios optimización

Tabla 5: Notación utilizada en los conceptos de programación de la producción

- Máquinas, o centros de trabajo ( $M_j$ ):
  - $M_j = (M_1, \dots, M_n)$
  - Pueden estar dedicadas a un único propósito u operación (Dedicated Machine), o a diferentes propósitos u operaciones (MPM- Multi-Purpose Machine)
- Trabajos, u órdenes de producción ( $J_i$ ):
  - $J_i = (J_1, \dots, J_n)$

Cada trabajo corresponde a un conjunto de operaciones con unos requisitos de procesamiento.

- Operaciones:
  - $O_{ij} = (O_{i1}, \dots, O_{in})$
- Requisitos de procesamiento, por ejemplo, el tiempo de procesamiento:
  - $p_{ij}$
- Cada operación  $O_{ij}$  tiene asociada un conjunto o lista de centros de trabajo alternativos  $\mu_{ij}$  capaz de trabajar en paralelo.
  - $\mu_{ij} \subseteq \{M_1, \dots, M_n\}$
- Relacionado con cada trabajo existen diversos objetivos a conseguir para lo cual pueden emplearse diversos cálculos, como, por ejemplo:
  - Función de coste para medir el tiempo empleado,

- $f_i(t)$

en donde se pueden aplicar diferentes variables:

- Fecha de entrega
  - $d_i$
- Importancia
  - $w_i$
- **Entornos de trabajo ( $\alpha$ )** (“Machine environments”):
  - $\alpha = \alpha_1 \alpha_2$ ,  
siendo  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  los dos parámetros que definen el entorno de trabajo.

Podemos diferenciar los siguientes entornos de trabajo en una producción industrial;

- Trabajos modelo de Operación (etapa) única
  - Una única máquina (1- Single-Machine Scheduling)
    - ( $\alpha_1 = 1$ ) o lo que es lo mismo, ( $\alpha_1 = 1$ )
  - Varias máquinas en paralelo con mismas características (P- Identical-Machines Scheduling)
    - ( $\alpha_1 = P$ ), por ejemplo, cuando todas las máquinas emplean en la fabricación el mismo tiempo de procesamiento ( $p_{ij} = p_i$ )
    - Por Ejemplo, **P3**, corresponde a 3 máquinas idénticas trabajando en Paralelo con las mismas características, donde, por lo tanto,  $\alpha_1 = P$ , y  $\alpha_2 = 3$ .
  - Varias máquinas en paralelo con distintas características (Q- Uniform-Machines)
    - ( $\alpha_1 = Q$ ), por ejemplo, cuando las máquinas tienen distinta velocidad, por lo que el tiempo de procesamiento depende de la máquina ( $p_{ij} = p_i/s_j$ ), siendo  $s_j$  la velocidad de cada máquina.

- Varias máquinas en paralelo con distintas características dependientes del trabajo a realizar (R-Unrelated Parallel Machines)
  - $(\alpha_1 = R)$ , por ejemplo, cuando las máquinas tienen distinta velocidad que además depende del trabajo, por lo que el tiempo de procesamiento depende de ella ( $p_{ij} = p_i/s_{ij}$ ), siendo  $s_{ij}$  la velocidad de cada máquina en cada trabajo.
- Varias máquinas multipropósito trabajando en paralelo con mismas características
  - $(\alpha_1 = PMPM)$
- Varias máquinas multipropósito trabajando en paralelo con distintas características
  - $(\alpha_1 = QMPM)$
- Trabajos modelo multi-operación (multi-etapa) a realizar en Centros de trabajo Multipropósito (MPM)
  - Taller general (G- General Shop), corresponde a un modelo multi operación donde asociado a cada trabajo hay un conjunto de operaciones diferentes  $O_{ij}$ , donde cada una tiene asociado un conjunto de centros de trabajo alternativos diferentes  $\mu_{ij}$  y existen relaciones de precedencia entre operaciones.  
El Taller de trabajo (Job Shop), Taller de Flujo (Flow Shop), el Taller abierto (Open Shop) y el Taller Mixto (Mixed Shop) son casos particulares de este taller de Flujo General.
  - **Taller de trabajo (J- Job Shop).** Es un **modelo típico de taller** de fabricación donde los trabajos a realizar no tienen por qué pasar por los centros de trabajo en el mismo orden.
    - $(\alpha_1 = J)$   
En este caso dentro de cada trabajo existe una relación de precedencia en las operaciones tipo.

$$O_{i1} \rightarrow O_{i2} \rightarrow O_{i3} \dots \rightarrow O_{in}$$



- “p-batch”, donde la longitud del lote es igual al máximo de tiempos de procesamiento de los trabajos del lote.
- “s-batch”, donde la longitud del lote es igual a la suma de todos los tiempos de procesamiento de los trabajos del lote.
- **Criterios de optimización ( $\gamma$ )** (“Optimality criteria”): Corresponde a funciones o criterios a aplicar para optimizar determinados objetivos a cumplir. Existen las siguientes funciones objetivo, relacionadas con el coste  $C_i$  y la fecha de vencimiento de los trabajos  $d_i$ :
  - $C_i$ : Coste (“cost”): Por ejemplo, un criterio es programar minimizando el tiempo de finalización de un trabajo  $J_i$ , por el criterio  $C_i$ , para optimizar el coste asociado ( $f_i(C_i)$ ) aplicando un determinado criterio o función.
    - Existen dos tipos de funciones de coste
      - Objetivos de Cuellos de botella (“bottleneck objectives”)
        - $f_{max}(C) := \max\{f_i(C_i) | i = 1, \dots, n\}$ ,  
corresponde al makespan o  $C_{max}$
      - Objetivos de Suma (sum objectives)
        - $\sum f_i(C) := \sum_{i=1}^n f_i(C_i)$
  - $L_i$ : Latencia (“lateness”)
    - $L_i := C_i - d_i$
    - $L_{max} := \max\{L_i\}$ , corresponde a la latencia máxima.
  - $E_i$ : Adelanto (“earliness”)
    - $E_i := \max\{0, d_i - C_i\}$
  - $T_i$ : Tardanza (“tardiness”)
    - $T_i := \max\{0, C_i - d_i\}$
  - $D_i$ : Desviación absoluta (“absolute deviation”)
    - $D_i := |C_i - d_i|$
  - $S_i$ : Desviación al cuadrado (“squared deviation”)
    - $S_i := (C_i - d_i)^2$
  - $U_i$ : Penalización unitaria (“unit penalty”)

$$U_i := \begin{cases} 0, & \text{si } C_i \leq d_i \\ 1, & \text{si } C_i > d_i \end{cases}$$

- La Clasificación de la Programación de la producción viene establecida por estos 3 campos de clasificación explicados previamente (Brucker, 2012):
  - el entorno de trabajo ( $\alpha$ )
  - las características de los trabajos ( $\beta$ )
  - y los criterios de optimización ( $\gamma$ )
- La Programación de la producción consiste en la asignación de cada trabajo en uno o varios intervalos de tiempo a una o varias máquinas, dependiendo del número de operaciones que cada trabajo tenga. Esta programación la representamos normalmente en diagramas de Gantt por máquina o por trabajo y va a venir condicionada por esos 3 conceptos previos.

## 2.11 Clasificación de la programación de la producción en función de la dificultad de resolución

En función de la clasificación de la programación de la producción con la que nos encontremos, se pueden plantear diferentes soluciones aplicando algoritmos de combinatoria computacional, que, en función de su dificultad, son clasificados como fáciles de encontrar solución (“easy”) o difíciles (“hard”):

- Programación lineal y Programación en una sola máquina: En aquellos problemas de programación de la producción más sencillos podemos encontrar soluciones aplicando algoritmos con una Programación lineal, y aplicando una lógica Polinomial.
  - La **Programación lineal** corresponde a un problema que se puede optimizar obteniendo una solución **satisfactoria** (“feasible”).

También la clasificamos como **ilimitada** (“unbounded”), porque para cada número real obtenemos una solución satisfactoria.

Es decir, encontramos una solución satisfactoria e ilimitada,

$$\blacksquare \quad x = (x_1, \dots, x_n)$$

que cumple la función objetivo que queremos optimizar. Por ejemplo, minimizar un determinado valor dependiente de  $x$ :

$$\text{minimize } z(x) = cx_1 + \dots + cx_n$$

Un ejemplo de programación lineal son los problemas de Transporte. Por ejemplo, una programación de la producción con el objetivo de minimizar los costes totales de transporte.

- Programación de tareas en máquinas capaces de realizar diferentes operaciones (MPM: Multi-Purpose Machine problems): En problemas más complejos, con múltiples operaciones en distintos centros de trabajo, es más difícil llegar a obtener una solución óptima. Y nos encontramos con problemas que clasificamos como NP-hard y NP-completos, para los cuales se recurre de forma asidua a soluciones heurísticas y metaheurísticas, donde se establece el procedimiento para encontrar una buena solución (“óptimo local”), sin poder llegar a la solución óptima.

Algunos de estos tipos de programación MPM son:

- Problemas MPM con máquinas idénticas
- Problemas MPM con diferentes características de flujo
  - Taller de trabajo
  - Taller de flujo
  - Taller abierto

En ejemplos sencillos en los que interviene una operación entre dos centros de trabajo consecutivos, es posible aplicar algoritmos con los que se obtiene una solución óptima para el criterio de optimización objetivo planteado. Un ejemplo es el Algoritmo de Johnson para talleres de flujo de 2 y de 3 máquinas, cuyo funcionamiento se detalla en el Anexo B.1.

Sin embargo, en problemas de programación más complejos donde intervienen 4 máquinas o centros de trabajo, es decir, tres operaciones, ya no es factible la obtención

de una solución óptima, aplicándose distintos tipos de estrategias o algoritmos heurísticos y metaheurísticos. En el Anexo B.2 se detalla la estructura de diversos ejemplos de algoritmos heurísticos y metaheurísticos más complejos referenciados en la literatura.

## 2.12 Consideraciones finales del estado del arte

Los distintos trabajos referenciados en el estado del arte responden a una misma deficiencia u objetivo no alcanzado relacionado con la planificación y es el siguiente:

- El problema de la planificación dinámica o planificación en tiempo real sucede cuando se consideran en dicha planificación eventos excepcionales como son pedidos urgentes o la cancelación de trabajos en un sistema estático de planificación de la producción. Los métodos tradicionales de planificación periódica no son lo suficientemente flexibles y tardan en responder a eventos excepcionales de las situaciones en tiempo real.
  - La aparición de nuevas tecnologías lleva a que los recursos de fabricación puedan interactuar entre sí de forma dinámica surgiendo un nuevo entorno de fabricación, en el cual los métodos tradicionales de planificación dejan de ser apropiados. Aplicando dichas tecnologías, se puede plantear una solución a este problema.
  - Para dar respuesta a esta deficiencia de la planificación, en la exposición del estado del arte se plantean una serie trabajos realizados por diversos autores en los que se aplican diferentes métodos y se analizan diversas variables para dar solución a dicha deficiencia.

A raíz de dichos trabajos, se identifican diversas deficiencias adicionales:

- Existen múltiples algoritmos diseñados para entornos de trabajo de una sola máquina (por ejemplo, Algoritmo SPT, Algoritmo de Hodgson), y múltiples algoritmos diseñados para entornos de trabajo de Máquinas multipropósito (por ejemplo, Algoritmo de Johnson, Algoritmos genéticos), pero se ha detectado en la literatura una **falta de conexión en ambas tipologías de algoritmos**, como si

fueran dos “mundos” diferentes dentro de la programación de la producción. La conexión de ambos “mundos” puede suponer multiplicar exponencialmente el potencial de dichos algoritmos.

- Es necesaria una investigación en profundidad de los problemas de planificación relacionados, como el equilibrio de la línea de montaje y el compromiso de las fechas de vencimiento de los pedidos en las **líneas de montaje de varias piezas** (multi-piece-assembly line) (Otto & Li, 2020)
- Se requiere una investigación en los modelos de máquinas para analizar estados significativos adicionales y para construir modelos de estado de máquinas para el modelo logístico, incluyendo **fallos y reparaciones del sistema logístico** (Jha, Babiceanu, & Seker, 2020)
- Se ha identificado una falta de investigación en el problema de la programación de la producción basada en datos en tiempo real a nivel empresarial (casos reales en diferentes tipos de empresas), para conseguir la mejora de la **eficiencia de producción y la reducción del consumo de energía (planificación verde)**. (Wang, Yang, Ren, & Liu, 2020)
- Es preciso realizar una investigación para conectar la optimización de la secuenciación de Vehículos Autónomos AMR y AGV con la planificación en tiempo real de todos los centros de trabajo del entorno industrial. (Zhang, Wang, Du, Qian, & Yang, 2018)
- Se ha observado una carencia en el tratamiento de los contenedores como componentes “neuronales” del sistema de planificación en tiempo real, siendo tratados en la literatura únicamente como componentes del proceso. Es necesaria una investigación para conectar los contenedores de materiales WIP que están implicados en los procesos de fabricación de forma que se conviertan en actores principales en la planificación en tiempo real.
- Se ha detectado una deficiencia en la literatura relacionada con los algoritmos aplicables a máquinas multipropósito, donde se observa un déficit de comparativa entre los resultados ofrecidos por los distintos algoritmos de planificación. En general la literatura trata siempre de proponer algoritmos

nuevos que cubran criterios multiobjetivo, pero no se buscan comparativas o colaboraciones entre algoritmos.

## 3. Modelo: método de replanificación en tiempo real – algoritmo Sonar Industrial

### 3.1 Objetivo principal del algoritmo Sonar Industrial

Para lograr una planificación en tiempo real es necesario considerar todos los centros de trabajo de producción de la planta industrial. No es suficiente planificar y secuenciar los centros de trabajo individualmente dentro de una sola máquina o centro de trabajo.

En la planificación en tiempo real se planifica el cronograma de producción de “m” máquinas o centros de trabajo  $M_j$  ( $j=1, 2, \dots, n$ ), donde se consideran  $n$  trabajos  $J_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ). Cada trabajo  $J_i$  está compuesto por un número  $n_i$  de operaciones  $O_{i,1}, O_{i,2}, \dots, O_{i,n_i}$ .

Asociado a cada operación  $O_{ij}$  existe un conjunto de máquinas  $\mu_{i,j} \subseteq \{M_1, M_2, \dots, M_m\}$  capaces de ejecutarla. Es decir, la operación  $O_{i,j}$  puede procesarse en cualquiera de las máquinas  $\mu_{i,j}$ . Además, en un entorno de producción normal es posible que las máquinas  $\mu_{i,j}$  se utilicen para diferentes operaciones  $O_{i,j}$  durante el turno de producción.

El tiempo de finalización de un trabajo  $J_i$  se define como  $C_i$  y el coste asociado como  $f_i(C_i)$ . El objetivo más común en el cálculo de la planificación de la producción es calcular el tiempo de finalización de todos los trabajos, o el makespan:  $\max\{C_i, |i=1, \dots, n\}$ .

El algoritmo de Johnson se puede utilizar para obtener la solución óptima para  $C_{max}$  en la secuenciación de un taller de flujo de dos máquinas, y un taller de flujo de tres máquinas cumpliendo determinadas restricciones. Sin embargo, en talleres de flujo con más máquinas, no es posible obtener una solución óptima aplicando el Algoritmo de Johnson de forma estática. En tales casos, se emplean algoritmos metaheurísticos para

proporcionar una solución suficientemente buena entre todas las que el algoritmo es capaz de obtener.

El objetivo del Algoritmo Sonar Industrial (ISA) es proponer una nueva estrategia para la aplicación de algoritmos dinámicos que proporcionen una solución de planificación en tiempo real. Dicha estrategia consiste en establecer una conexión entre la planificación por centro de trabajo y la planificación de un conjunto de máquinas en una fábrica. Esto se hace con el fin de alcanzar una serie de objetivos comunes que no sólo consideran el makespan o  $C_{max}$ , sino que también reducen las pérdidas de energía derivadas de una producción defectuosa debido a una mala planificación.

En esta tesis se aborda la solución a este problema de la planificación en tiempo real desde una nueva perspectiva diferente, utilizando el principio de “divide y vencerás” (*divide et impera*, célebre frase atribuida a Julio César). **En lugar de optar por la aplicación de un algoritmo único que opere con toda la información disponible, se opta por utilizar las posibilidades de comunicación que da la tecnología actual, con el fin de aplicar algoritmos simples que puedan trabajar juntos para proporcionar un resultado óptimo en todo momento, en lugar de una aproximación.** Estos algoritmos se aplicarán en diferentes centros de trabajo mediante comunicación entre ellos.

## 3.2 Variables y objetivos del modelo considerados

Al analizar el estado del arte de la programación de la producción en tiempo real, se puede observar que se utilizan una amplia gama de objetivos y variables para resolver los posibles problemas que pueden surgir en la planificación dinámica. Un análisis de la literatura revela que las principales variables de análisis son: **Tiempo del proceso, Coste de producción, Consumo de energía, Prioridad, Fecha de entrega, Tiempo de entrega y transporte.**

En base a estas variables se han fijado los objetivos correspondientes siguientes: **Minimizar el makespan (Cmax), Reducir la carga de la máquina, Reducir el consumo de energía y la huella de carbono, Minimizar el coste total, Reducir los retrasos en la fecha de entrega, y Reducir del tiempo de entrega y transporte en fabricación.**

### 3.3 Metodología del algoritmo Sonar Industrial

En la sección anterior se han identificado los principales objetivos y variables que se utilizan para una Planificación dinámica adecuada. Esta investigación propone una nueva estrategia que se centra en la ejecución de Algoritmos ágiles para llevar a cabo una planificación dinámica que sea capaz de adaptarse en todo momento. Esta programación dinámica de la producción implica la aplicación de diferentes algoritmos para operaciones que deben realizarse en diferentes centros de trabajo de un entorno industrial. El objetivo es mejorar la secuencia de producción minimizando varios aspectos, entre ellos se han seleccionado los siguientes para analizarlos en los distintos modelos: **el makespan** (el tiempo entre el inicio y el final de todos los trabajos), **el consumo de energía y huella de carbono**, y los **tiempos de transporte**. Se han seleccionado estos objetivos por ser los de mayor interés en la problemática industrial y económica actual, y ser los más comúnmente tratados en la literatura en los últimos años.

Para alcanzar estos objetivos con la programación de producción deben analizarse todas las posibles casuísticas que pueden ocurrir: ¿"qué pasa si"...?:

- Un proveedor no entrega a tiempo
- Una máquina se estropea
- Una operación no dura lo previsto.

La secuenciación de tareas de órdenes de producción en cada centro de trabajo puede verse alterada por múltiples circunstancias que ocurren a diario, como paradas de máquinas, componentes defectuosos y problemas de calidad. Estas circunstancias pueden afectar significativamente a los resultados de producción deseados. Por ello, es

fundamental planificar los procesos productivos en tiempo real en los diferentes centros de trabajo teniendo en cuenta estas circunstancias. Las tecnologías actuales permiten la comunicación e interacción en el lugar de trabajo.

Se considera obstáculo cualquier retraso o paralización en la planificación de un centro de trabajo. Por ejemplo, ciertos animales han desarrollado métodos para superar obstáculos físicos en la naturaleza. Determinadas especies animales, por ejemplo, han desarrollado un sistema de ecolocalización. Emiten sonidos e interpretan los ecos que rebotan en los obstáculos que encuentran. Esto permite detectar objetos y obstáculos a su alrededor y tomar decisiones sobre dónde ir. El sistema de sonar de barcos y submarinos se basa en el mismo principio. Mediante el uso de este principio como estrategia, podemos establecer comunicación con los centros de trabajo de las operaciones siguientes de las órdenes de producción para recopilar información sobre su envío a dichos centros de trabajo, o envío a centros de trabajo alternativos. Esto se puede lograr tratándolo como una ecolocalización o un Sistema de “Sonar Industrial”.

Este proceso es una estrategia reactiva para la planificación de la producción en tiempo real. Puede ser aplicado al final de cada operación de producción. Cada centro de trabajo también puede ser proactivo en términos de poner las órdenes de producción en curso en cola en otros centros de trabajo. La misma estrategia se puede aplicar a cualquier problema que pueda surgir durante la producción, como una parada de la máquina.

Antes de implementar esta estrategia reactiva, puede realizarse una fase inicial de planificación de la producción diaria. Durante esta fase, un algoritmo específico secuenciaría la producción de cada centro de trabajo. Sin embargo, este paso no es estrictamente necesario.

### **3.4 Arquitectura del Sonar Industrial**

El objetivo es lograr una planificación en tiempo real, permitiendo la resolución de cualquier incidencia que pueda surgir durante la producción. Esto implica replanificar tareas en otros centros de trabajo mediante algoritmos previamente diseñados, además de utilizar sistemas automáticos de comunicación entre dichos centros de trabajo.

La metodología utilizada es la aplicación del concepto de Sonar Industrial (Figura 7) (Burillo et al., 2024).

A continuación, se muestra el diagrama de flujo del proceso de comunicación (pasos A, B), y de la aplicación del Algoritmo de Sonar Industrial para la toma de decisiones (paso C) (Figura 7):

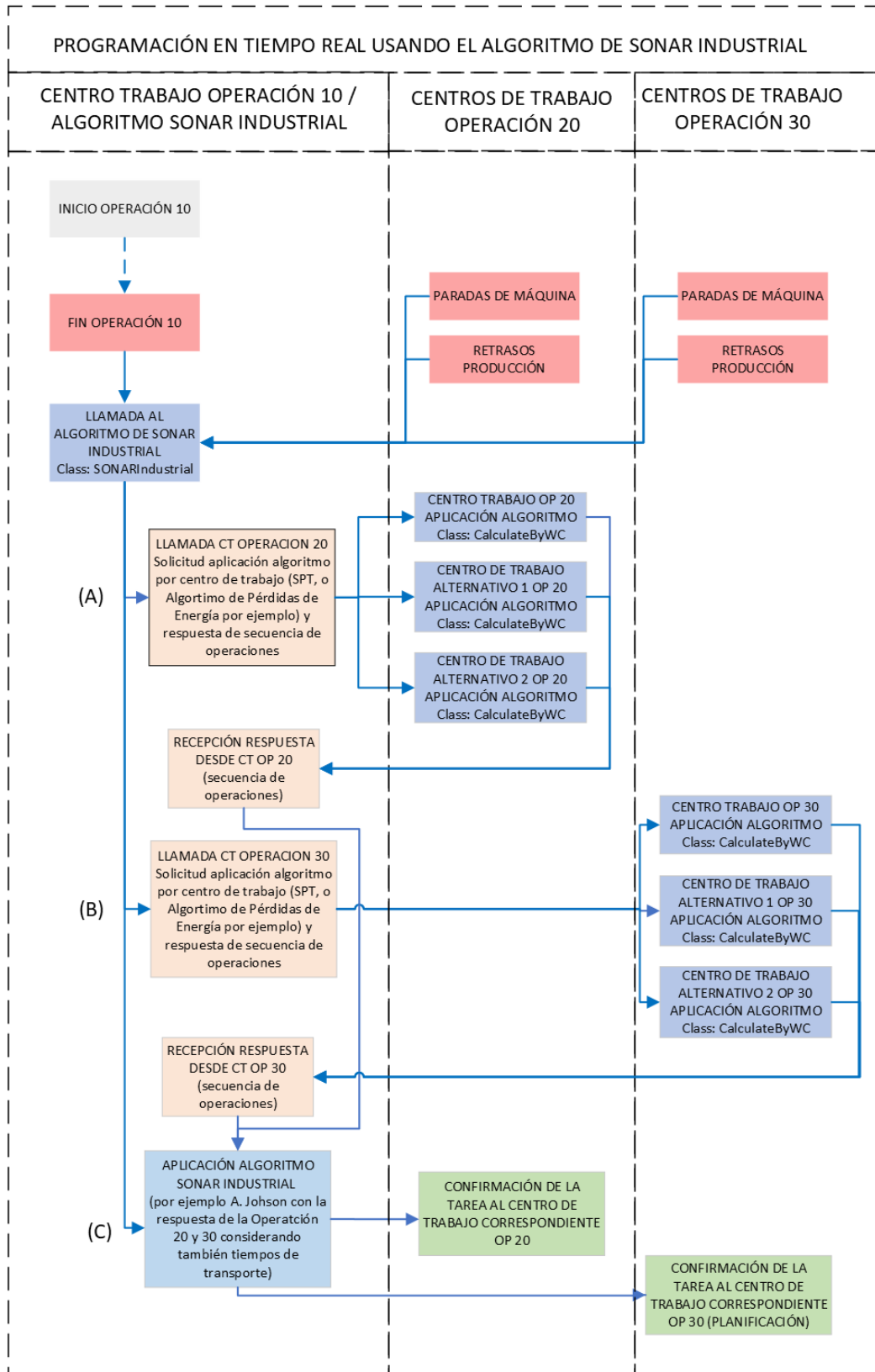


Figura 7: Explicación del proceso de comunicación del algoritmo Sonar Industrial

(A) En primer lugar, se establece Comunicación 1 con los centros de trabajo de operación 20 para obtener respuesta respecto a la secuencia de las tareas. (B) Simultáneamente se establece la Comunicación 2 con los centros de trabajo de la operación 30 para obtener una respuesta también respecto de la secuencia de las tareas. (C) Con la secuencia de operaciones de cada centro de trabajo obtenida, se aplica el algoritmo de Sonar Industrial y se toma una decisión, seleccionando y confirmando un centro de trabajo específico.

Esta metodología se basa en establecer la comunicación entre máquinas para solicitar la ejecución de un algoritmo simple que permita una ejecución rápida. Cada máquina, una vez completada la operación o tarea de producción que está realizando, establece simultáneamente una serie de comunicaciones con otros centros de trabajo:

- A) Comunicación 1: Por un lado, una vez completada la operación de producción en el centro de trabajo, se envía una solicitud de información al centro de trabajo en el que debe realizarse la operación de producción siguiente, así como a sus centros de trabajo alternativos. Por ejemplo, si la operación 10 ha finalizado, se realiza una solicitud a los diferentes centros de trabajo en los que es posible llevar a cabo la operación 20. En esta petición de información se requiere al centro de trabajo de destino, la aplicación de un algoritmo específico para ordenar sus tareas de producción, incluida la tarea que se plantea enviar. A su vez, se solicita como respuesta la secuencia de las operaciones, aplicando el algoritmo indicado y la información relativa a la fecha y hora en que se puede completar la operación. El algoritmo de programación por centro de trabajo utilizado puede ser el SPT (tiempo de procesamiento más corto) o cualquier otro algoritmo de programación del centro de trabajo, como por ejemplo el nuevo algoritmo ECF, que es un algoritmo diseñado para reducir los costes de energía.
- B) Comunicación 2: Por otro lado, se envía una solicitud de información a los centros de trabajo alternativos donde se puede realizar la operación siguiente a la próxima. Por ejemplo, si la siguiente operación es 20, la solicitud se envía a los centros de trabajo donde se puede llevar a cabo la operación 30. En esta petición

de información, al igual que en la Comunicación 1, se requiere la aplicación de un algoritmo específico para ordenar sus tareas de producción (SPT o ECF), incluida la tarea que se plantea enviar, y, se solicita como respuesta la secuencia de las operaciones, aplicando el algoritmo indicado.

- C) Aplicación del algoritmo Sonar Industrial: A partir de las respuestas de los centros de trabajo con la secuencia de operaciones obtenida de la aplicación de los Algoritmos específicos solicitados en los centros de trabajo 20 y 30, se pueden aplicar algoritmos adicionales a la programación del taller. Para alcanzar los objetivos propuestos, se pueden combinar de forma específica las respuestas de los centros de trabajo de las operaciones 20 y 30.
  - Por ejemplo, si el objetivo principal pretendido es lograr el makespan más bajo, es decir, el tiempo total más corto, o lo que es lo mismo, optimizar el tiempo de producción necesario para terminar todas las operaciones involucradas, se puede lograr utilizando el Algoritmo de Johnson. Se trata de ir secuenciando con criterio de menor tiempo de proceso seleccionando entre las operaciones de los centros de trabajo de la operación 20 y la operación 30. Si el menor tiempo de trabajo es del centro de trabajo de la operación 20, se van colocando al principio, y si es del centro de trabajo de la operación 30, se van situando al final. Este enfoque nos permite tomar una decisión óptima que minimiza el makespan como se referencia en los siguientes videos explicativos (Romano C.A., “Secuenciación en taller de flujo de dos máquinas”) (Romano C.A., “Secuenciación en taller de flujo de tres máquinas usando el Algoritmo de Johnson”).
  - Para ejemplos más complejos, donde se quieren obtener objetivos adicionales al makespan, podemos añadir combinaciones específicas en los algoritmos aplicables por centro de trabajo. Por ejemplo, las operaciones del centro pueden organizarse en base a una combinación de menor makespan, y menor consumo de energía y huella de carbono mediante el uso en la llamada a los centros de trabajo de la operación 20 y 30 de un algoritmo por centro de trabajo que optimice las pérdidas de

energía. Esto es similar al uso del Algoritmo de Johnson, pero permitiendo optimizar el makespan y las pérdidas de energía, y además pudiendo incorporar otros criterios adicionales para alcanzar los objetivos deseados. Esto puede incluir minimizar el tiempo de transporte comunicándose con los AMR responsables de gestionar el transporte entre centros de trabajo.

Este algoritmo de eco-secuenciación puede ser lanzado a su vez por cada centro de trabajo tan pronto como el propio centro de trabajo, a través de sensores, detecte cualquier saturación en la capacidad que pueda estar provocado por problemas surgidos durante la producción. Una parada de máquina, por ejemplo. Esto es similar al uso propuesto en el diagrama de flujo del algoritmo de Sonar Industrial (ISA-Industrial Sonar Algorithm) al final de la operación de orden de producción 10 en el centro de trabajo.

Para medir el tiempo, los fallos de máquinas y los problemas de calidad, así como gestionar la aplicación de algoritmo y respuestas, se ha seleccionado en esta tesis la siguiente arquitectura de hardware y software. Esta elección se ha llevado a cabo con el criterio de sencillez de uso, ya que permite la ejecución en tiempo real de algoritmos de planificación en cada centro. En cualquier caso, la estrategia de los algoritmos utilizados es independiente de la tecnología utilizada y pueden adaptarse a diversos diseños de arquitectura de sistemas.

- Dispositivo de ejecución de algoritmos: se ha seleccionado un ordenador o dispositivo IoT con potencia suficiente. Durante las pruebas, se seleccionaron los dispositivos Raspberry Pi 4 (Raspberry Pi Foundation, 2022) y Jetson Nano (NVIDIA, 2022) por su tamaño y disponibilidad.
- Sublime Text 3: Ha sido utilizado como editor de software para el desarrollo del algoritmo en Python (Sublime Text, 2022).
- Versión de Python: Python 3.10.5. (Fundación de software Python, 2022).
- SQLite: El software utiliza la base de datos SQLite (SQLite, 2022) por su versatilidad para mantener toda la información necesaria en el dispositivo, sobre todo lo concerniente a las operaciones dentro el centro de trabajo.

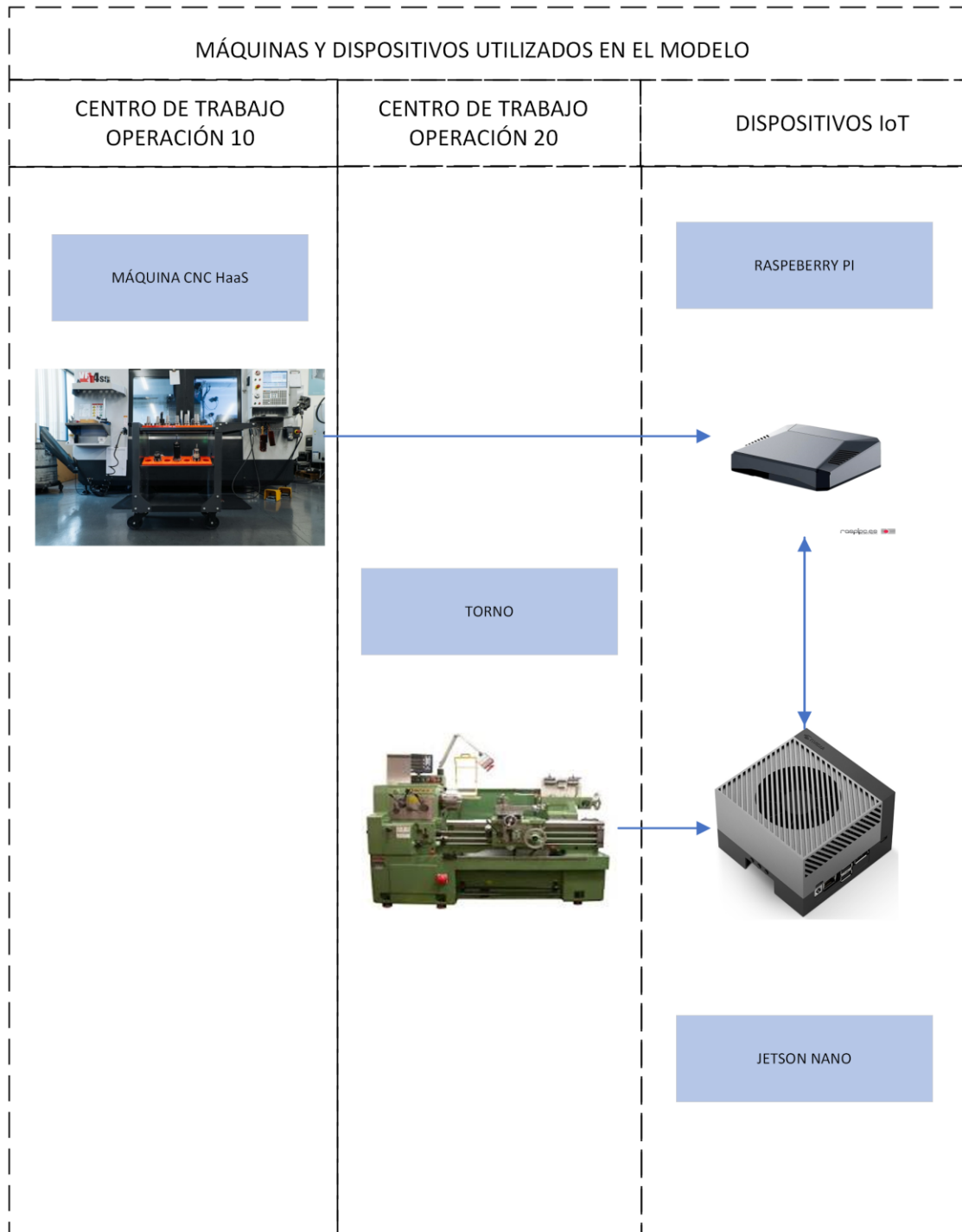


Figura 8: Máquinas y dispositivos utilizados en el modelo

## 4. Modelo: algoritmos por centro de trabajo

### 4.1 Algoritmos por centro de trabajo

La planificación de la producción ha sido objeto de una ardua investigación a lo largo de los últimos años. Diversas circunstancias desde el punto de vista macroeconómico como cambios en la producción, la inflación, aumento del precio de la energía, o bien desde el punto de vista microeconómico, como el precio de la energía, de las materias primas, así como otros aspectos geopolíticos, pueden determinar y hacer fluctuar la forma en que las industrias necesitan planificar la producción.

La planificación de las operaciones por centro de Trabajo es el punto clave en el que se basa una buena estructura de planificación de la producción de un entorno industrial. Dicha planificación por centro de trabajo siempre consiste en establecer una ordenación de los trabajos en base a una serie de variables: (Fecha de Entrada, Tiempo de Procesado, Fecha de entrega, etc), con el objetivo de conseguir unos objetivos determinados mediante la aplicación de un Algoritmo específico: (Tiempo de Procesado más corto, Fecha entrega más cercana, etc).

A raíz de las presiones a nivel mundial debidas al cambio climático, que urge a tomar medidas en cuanto a las emisiones de CO<sub>2</sub>, y las exigencias por conflictos que afectan directamente al precio de la energía, la eficiencia energética se está convirtiendo en la piedra angular clave en las decisiones a tomar. Y la planificación por Centro de Trabajo, no es ajena a esta circunstancia. Para ello, las pérdidas de energía y de eficiencia en la fabricación se convierten en variables importantes en la toma de decisiones. Y la reducción de estas pérdidas, y el orden de las operaciones de fábrica basándose en ello, se convierten en objetivos fundamentales en la Industria 4.0. De esta forma, conceptos como: las pérdidas de energía por pieza fabricada (Davies, Khuller, & Zhang, 2022), la medición del OEE-Overall Equipment Effectiveness (Ng Corrales et al., 2020), y la huella de carbono de cada una de las operaciones de fábrica (Budenny et al., 2022), se

convierten en variables a tener en cuenta en los algoritmos de planificación de la producción, con el objetivo de reducirlas o bien ubicarlas en el tramo horario más adecuado para que sean menos perjudiciales a nivel económico y ambiental.

## 4.2 Huella de carbono y reducción de las pérdidas de energía

Las consecuencias del cambio climático son cada día más palpables, y existe cada vez mayor conciencia ambiental a nivel mundial para actuar y así poder revertir o mitigar sus efectos. En el marco internacional de Naciones Unidas, para el tratamiento del cambio climático se ha establecido el Protocolo de Kioto cuyo progreso es evaluado anualmente en la Conferencia de las Partes (COP) con la participación de un gran número de países donde se establecen las iniciativas para reducir la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), el principal de ellos es el CO<sub>2</sub>. La huella de carbono, como representación del volumen total de GEI que producen las actividades del ser humano, supone el dato de referencia en la toma de medidas para tratar de reducirla al máximo. Por lo tanto, el control y medida de la huella de carbono de las actividades económicas, y de las operaciones industriales en este caso, es una variable que cada vez tiene mayor importancia en la toma de decisiones en la operativa industrial, y la planificación, no debe ser ajena a ello (Rodríguez-Andara, Rio-Belver, & Garcia-Marina, 2020). Por ello, se ha elaborado un cálculo de la huella de carbono de las máquinas que participan en el proceso de producción. El objetivo de su dicho cálculo es que se puedan ordenar las operaciones de un centro de trabajo en base a su menor huella de carbono. Para ello se utiliza el cálculo de la huella de carbono equivalente.

Los principales gases de efecto invernadero son:

- El Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), debido a emisiones procedentes principalmente de la quema de materiales orgánicos: carbón, petróleo, gas, madera y residuos sólidos.

- El Metano (CH<sub>4</sub>), debido a emisiones liberadas principalmente en los vertederos, las industrias del gas natural y del petróleo, y la agricultura.
- El Óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), emisiones procedentes de la agricultura y la ganadería, incluidos los fertilizantes, el estiércol y la quema de residuos agrícolas, junto con la quema de combustibles.
- Los Gases industriales: Clorofluorocarburos (CFC). Los gases fluorados como los hidrofluorocarbonos, los perfluorocarbonos, los clorofluorocarbonos, el hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>) y el trifluoruro de nitrógeno (NF<sub>3</sub>).
- El vapor de agua (H<sub>2</sub>O)
- El ozono (O<sub>3</sub>)

El equivalente de CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub>eq) es una medida en toneladas elegida para calcular la “Huella de carbono”, reconociendo como tal a la totalidad de la emisión de gases de efecto invernadero.

Para el cálculo de la Huella de carbono equivalente, los gases de efecto invernadero distintos del dióxido de carbono se convierten a su valor equivalente en CO<sub>2</sub>, multiplicando la masa del gas por su Potencial de calentamiento global (GWP).

$$\text{CO}_2\text{eq} = \text{masa del gas} * \text{GWP}$$

Adicionalmente, en el Foro Económico Mundial, World Economic Forum (WEF) se analizan las crisis energéticas y sus efectos, y los riesgos geopolíticos que pueden suponer obstáculos en la industria. Determinados conflictos internacionales derivan en crisis energéticas que, en un mundo globalizado, terminan afectando a los precios de la energía a nivel mundial. Este precio de la energía supone un punto crítico en determinadas industrias, siendo en alguna de ellas el coste principal de elaboración de un producto. A su vez, el precio de la energía de la industria puede venir dado en determinadas tarificaciones horarias que permite adecuar la producción a aquellos momentos en los que el coste de la energía sea más bajo. El cálculo de las pérdidas de energía por pieza fabricada permite tomar acciones para reducirlas, pero a su vez, permite planificar las operaciones en el momento más adecuado para que suponga el menor coste económico. Por ello, se ha elaborado un cálculo de pérdidas de energía de

las piezas fabricadas, para que, a partir de él, se puedan ordenar las operaciones de un centro de trabajo en base a su menor pérdida de energía.

Tanto la huella de carbono, como el consumo de energía de las operaciones, van a ser condicionados de forma determinante por la eficiencia operativa de los equipos. Para ello, la medición del OEE (Overall Equipment Effectiveness) del proceso productivo estándar definido, supone un dato clave que se ha de considerar también para la planificación del centro de trabajo (Chan & Chan, 2004), (Bititci, Garengo, Dörfler, & Nudurupati, 2012), (Fysikopoulos, Papacharalampopoulos, Pastras, Stavropoulos, & Chryssolouris, 2013), (Nakajima, 1988). Esta medición va a reflejar la capacidad productiva real mostrando las ineficiencias del proceso en lo relativo a rechazos, baja velocidad, averías, paradas, etc. Para una toma de decisiones de planificación en tiempo real, es muy importante el mantenimiento del cálculo de la medición del OEE en tiempo real, con el objetivo de poder tomar decisiones no sólo por una medida de OEE histórica sino por una medida de OEE diaria de los trabajos realizados en cada máquina. Por ello, se ha elaborado un cálculo de las pérdidas de energía por rendimiento, a partir de la medición de OEE, de forma que se puedan ordenar las operaciones de un centro de trabajo en base a su menor pérdida total de energía calculada por rendimiento.

## 4.3 Algoritmo por centro de trabajo para la reducción del consumo de energía y la huella de carbono (ECF)

Como parte de esta tesis, se ha desarrollado un Algoritmo para llevar a cabo un cálculo de las distintas pérdidas de energía que ocurren en cada determinada operación productiva de cada centro de trabajo (ECF- Energy and CO2 Footprint Algorithm).

Así se han desglosado en tres conceptos principales de pérdidas totales de energía y emisiones (huella de carbono):

- **Huella de carbono:** Dentro de este concepto se ha calculado el efecto en la huella de carbono en términos de eficiencia energética, tanto de emisiones de CO2 del consumo de electricidad/gas, como de emisiones de CO2 del proceso.
- **Pérdida total de energía (por las piezas):** Dentro de este concepto se han incorporado las pérdidas totales de energía por las piezas fabricadas debidas a motivos de calidad, de velocidad y de disponibilidad operacional.
- **Pérdida total de energía (calculada por rendimiento operacional):** Dentro de este concepto se han se han incorporado las pérdidas de energía debidas al consumo eléctrico del turno de trabajo en función del OEE obtenido en dicho turno.

Para el cálculo de dicho algoritmo se han incorporado las siguientes variables (Tabla 6 y 7).

VARIABLE DATO	UNIDADES	Code	Ref.
Capacidad	u/h	D4	Ca
Tiempo de cambio	u/h	D5	Su
Duración de turno	h	D6	h
Producción teórica	u/turno	D7	p
Tiempo de averías	h	D8	b
Producción piezas buenas	u/turno	D9	gp
Producción piezas malas	u/turno	D10	bp
Potencia maquinaria	KW	D12	pw
Precio electricidad	€/KW	D13	ep
Factura - TCO2/KWh	TCO2/KWh		in
Factura - Consumos KWh/año	KWh/Año		co
Emisiones CO2 por consumo de electricidad y gas	TCO2/KWh	D14	ee
Emisiones CO2 de maquinaria y proceso productivo	TCO2/Año	D19	ep

Tabla 6: Variables y unidades que se han utilizado, y que se toman como dato

VARIABLE CALCULADA	UNIDAD	FÓRMULA	Code	Ref
Producción real	u/turno	$v_6+v_7$	D11	Rp
Rendimiento de calidad (FTQ - First Time to Quality)	0-1 (%)	$v_6/(v_6+v_7)$	D15	FTQ
Rendimiento de velocidad (P-Performance)	0-1 (%)	$Rp/(v_1*(v_3-v_5))$	D16	P
Disponibilidad operacional (A-Availability)	0-1 (%)	$(v_3-v_5)/(v_3+v_2)$	D17	A
Rendimiento operacional (OEE- Overall Equipment Effectiveness)	0-1 (%)	$FTQ * P * A$	D18	OEE
Consumo eléctrico en el turno	KWh/turno	$v_8 * v_3$	D20	Ecds
Consumo eléctrico del turno	€	$Ecds * v_9$	D21	Ecos
Coste eléctrico de producción teórico unitario	€/u	$Ecos/v_4$	D22	Upec
Piezas perdidas por mala calidad	u	bp	D24	Plpq
Piezas perdidas por mal rendimiento de velocidad	u	$(v_1*(v_3-v_5))-Rp$	D25	Plpp
Piezas perdidas por mala disponibilidad operacional	u	$v_5 * v_1$	D26	Plpa
Piezas totales perdidas	u	$Plpq + Plpp + Plpa$	D27	Tpl
Pérdida de energía por Calidad (FTQ)	€	$Plpq * Upec$	D29	ELQ
Pérdida de energía por rendimiento de velocidad (P)	€	$Plpp * Upec$	D30	ELP
Pérdida de energía por disponibilidad operacional (A)	€	$Plpa * Upec$	D31	ELA
<b>Huella de Carbono</b>	TCO2/Año	$(Ecds * v_{12}) + v_{13}$	D32	CTP
<b>Pérdida total de energía (por las piezas)</b>	€	$ELQ + ELP + ELA$	D33	TEP
<b>Pérdida total de energía (calculado por rendimiento operacional) OEE</b>	€	$Ecos * (1 - OEE)$	D34	TEO

Tabla 7: Fórmulas de cálculo de datos de rendimiento por turno de trabajo

A continuación, se muestra una imagen de dichas variables y su cálculo en el algoritmo en Python (Figura 9).

```

# Creo la tabla ENERGYLOSSES/OEE para el cálculo del OEE y el cálculo de la pérdida de energía por piezas malas y por OEE
# Explicación de los cálculos de esta tabla
# CAPACITY # D4- Capacidad u/h
# SETUPTIME # D5- Tiempo de cambio u/h
# WORKSHIFTIME # D6- Duración de turno h (normalmente 8 h)
# THEORETICPROD # D7- Producción Teórica
# FAULTTIME # D8- Tiempo de averías (h)
# GOODPROD # D9- Producción buena (u)
# BADPROD # D10- Producción mala (u)
# REALPROD # D11- Producción real (D9+D10) (u)
# MACHPOWER # D12- Potencia maquinaria (KW)
# ELECTRICPRICE # D13- Precio electricidad (Euros/KW)
# ECO2EMISSIONS # D14- Emisiones de CO2 equivalente en Toneladas de CO2 por KW/h por consumo de electricidad y gas
# FTQ # D15- FTQ - First Time To Quality - Rendimiento de calidad (D9/(D9+D10))
# P # D16- P - Performance - Rendimiento de velocidad (D11/(D4*(D6-D8)))
# A # D17- A - Availabilty - Disponibilidad operacional ((D6-D8)/(D6+D5))
# OEE # D18- OEE - Overall Equipment Effectiveness - Rendimiento operacional (D15*D16*D17)
# CO2EMISSIONS # D19- Emisión de CO2 de la máquina y proceso productivo
# ELECTCONSUM # D20- Consumo eléctrico en el turno (D12*D6)
# ELECTAMOUNT # D21- Consumo eléctrico del turno (D20*D13)
# ELUNITCOST # D22- Coste eléctrico de producción teórico unitario (D21/D7)
# BADFTQPC # D24- Piezas perdidas por mala calidad (D10)
# BADPPC # D25- Piezas perdidas por mal rendimiento de velocidad (D4*(D6-D8)-D11)
# BADAPC # D26- Piezas perdidas por mala disponibilidad operacional (D8*D4)
# BADTOTALPC # D27- Piezas perdidas totales (D24+D25+D26)
# LOSSESFTQ # D29- Pérdida de energía por calidad (D24*D22)
# LOSSESP # D30- Pérdida de energía por rendimiento de velocidad (D25*D22)
# CARBONFOOTPRINT # D32- Huella de carbono, Emisiones CO2 totales ((D20*D14)+D19)
# LOSSESA # D31- Pérdida de energía por disponibilidad operacional (D26*D22)
# TOTALLOSSESPC # D33- Pérdida total de energía (por las piezas) (D29+D30+D31)
# TOTALLOSSES/OEE # D34- Pérdida total de energía (calculado por rendimiento operacional) (D21*(1-D18))

```

Figura 9: Variables y cálculos realizados

A continuación, se muestra una imagen del cálculo realizado desde el algoritmo en Python (Figura 10).

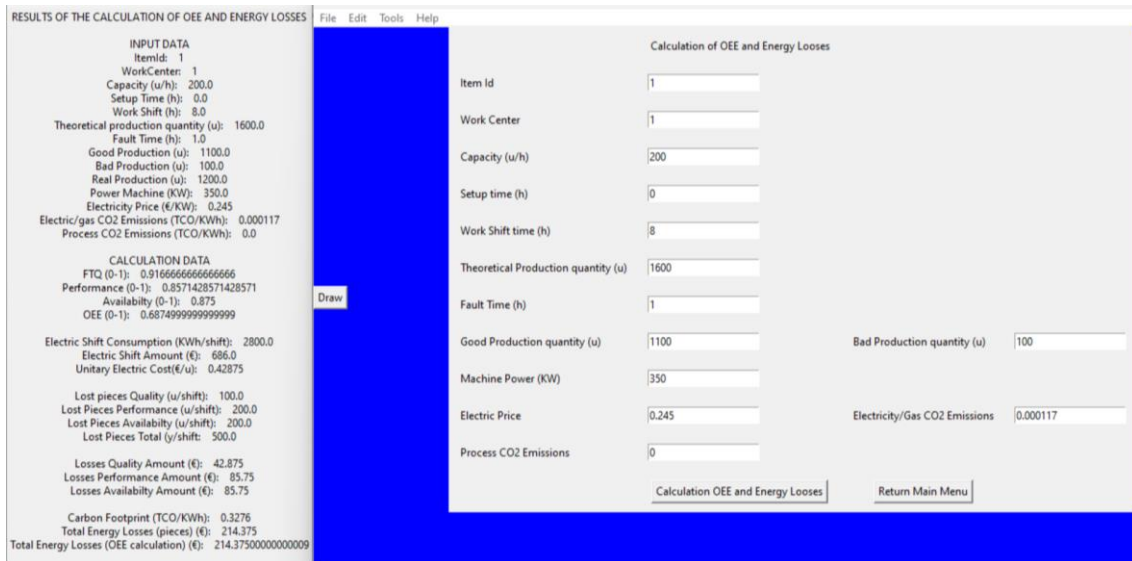


Figura 10: Cálculo realizado desde el programa Sonar Industrial desarrollado en Python

Este algoritmo, a partir de los cálculos, rellena un histórico de las pérdidas de energía por piezas fabricadas, y completa otro histórico de las pérdidas de energía por rendimiento OEE del centro. Y finalmente, crea también un histórico de la huella de carbono. En estos históricos se calcula la repercusión por unidad fabricada del artículo en dicho centro de trabajo.

## 4.4 Adaptación de distintos algoritmos por centro de trabajo

Se ha desarrollado el programa de Software de Sonar Industrial (Burillo et al., 2024), en el que se han creado diferentes algoritmos, que permiten planificar la producción por centro de trabajo en base a distintos métodos y criterios elaborados por diversos autores para poder realizar comparativas de planificación entre ellos. Se muestran en la Tabla 8:

---

Configuración y Readaptación Inteligente de Software para la Transmisión e Interacción de Algoritmos.

DESCRIPCIÓN CRITERIO ALGORITMO	ALGORITMO
Según fecha de entrada	FE
Según tiempo de procesado más corto	TPC
Según tiempo de procesado ponderado más corto	TPPC
Según fecha de entrega más cercana	FEC
Algoritmo de Rachamadugu & Morton	R&M
Según Relación Crítica	CR
Algoritmo de Hodgson	H
Algoritmo de Hodgson ponderado	HP
Según intercambio Adyacente por Pares	IAP
Según intercambio por Pares	IP
Algoritmo de inserción	INS
Según tiempo de preparación más corto	TCP
Según huella de carbono del proceso y pérdidas de energía por piezas fabricadas y por pérdidas de energía por cálculo rendimiento OEE	ECF
Algoritmo método ponderado	MP

Tabla 8: Algoritmos de planificación por centro de trabajo en base a distintos métodos

Como se ha visto en el anterior apartado, se ha desarrollado un Algoritmo de planificación por centro de trabajo, que permite ordenar y secuenciar las operaciones de las órdenes de producción en base a su menor pérdida de energía por piezas, a su menor pérdida de energía por OEE, o bien por su huella de carbono (ECF-Energy and CO2 Footprint). Y a su vez, permite realizar una ordenación en base a esos 3 conceptos ponderados.

Tomando como base los datos de una serie de operaciones de órdenes de producción que se deben ejecutar en el Centro de trabajo se ejecuta un cálculo de los diversos algoritmos de planificación posibles para ese centro de trabajo utilizando las diversas variables y cálculos realizados (Tabla 9).

DESCRIPCIÓN	CAMPO
Tiempo de procesado	PI
Peso/Importancia del trabajo	WI
Fecha de entrega	DI
Tiempo de preparación	TPI
Tiempo de Flujo de Trabajo	FI
Tardanza del trabajo	TI
Peso * Tardanza	WITI
Peso*Tiempo de flujo de trabajo	WIFI
Coficiente entre tiempo de proceso y peso	PIWI
Prioridad	VI
SI	Holgura
K*Prom	KPPRM
Coficiente entre Fecha de entrega y Tiempo de proceso	DIPI
<b>Huella de Carbono ponderada</b>	<b>CFP</b>
<b>Pérdidas de energía por pieza fabricada</b>	<b>ELP</b>
<b>Pérdidas de energía por rendimiento calculado OEE</b>	<b>OEE</b>
<b>Pérdida de Energía y Huella de carbono ponderada (Total Energy Losses and CO2 Footprint) (Huella carbono &amp; Pérdidas energía por pieza &amp; Pérdidas de energía OEE)</b>	<b>TEL</b>

Tabla 9: Campos que intervienen en los algoritmos de cálculo por centro de trabajo

Para cada una de las operaciones de producción a realizarse en el centro de trabajo, el algoritmo aplica los cálculos detallados en la Sección 4.3 para incorporar a la tabla de cálculo los conceptos de huella de carbono de la operación, y pérdida de energía por piezas fabricadas y rendimiento OEE. En base al histórico pasado y diario de pérdidas de energía por piezas fabricadas y pérdidas de energía por OEE, tanto a nivel de artículo y Centro de trabajo como a nivel de Centro de trabajo únicamente, el sistema incorpora a la tabla de cálculo una ponderación teórica de la huella de carbono (CFP), las pérdidas de energía por piezas fabricadas (ELP) y las pérdidas de energía por rendimiento calculado de dicha operación (OEE). A su vez, se obtiene un valor ponderado de esos tres conceptos con objeto de secuenciar las operaciones del centro de trabajo en base a un criterio que los incluya de forma conjunta (TEL).

En función del contrato de electricidad/gas del tipo de empresa/industria puede darse el caso de que haya horas punta, llano y valle. En estos casos, el algoritmo, en vez de ordenar, se puede configurar para programar las operaciones con mayor eficiencia energética teórica en las horas en las que interese su ejecución.

## **5. Modelo: el Sensor de Planificación**

### **5.1 Modelo y arquitectura del Sensor de Planificación**

A partir de las herramientas y posibilidades que aportan los algoritmos diseñados por el centro de trabajo y el algoritmo de Sonar Industrial, en este trabajo de investigación se ha diseñado una estructura de planificación basada en dispositivos IoT para su uso en fabricación, permitiendo su uso como sensores de planificación. Estos dispositivos se pueden conectar a contenedores WIP (Work In Progress) de trabajo en curso específicos que contienen los productos semielaborados o materias primas a procesar en el centro de trabajo. Cuando el producto a fabricar ingresa al centro de trabajo, estos dispositivos reciben información del dispositivo IoT del centro de trabajo sobre la operación de producción asignada a procesar, así como ciertas características que deben cumplir, fecha y hora de producción, pérdidas de energía comprometidas por pieza y por OEE, nivel de calidad comprometido, o determinadas propiedades físicas que deben mantenerse, así como márgenes de tolerancia sobre estos valores.

Con esta información, el contenedor espera en el centro de trabajo a que se procese la orden de producción a la que está asignado. Sin embargo, el dispositivo IoT permanece alerta y conectado, listo para recibir cualquier información del centro de trabajo (por ejemplo, si se ha producido una parada, o si las pérdidas de energía por pieza o por OEE han aumentado más de lo esperado), o cualquier información de la nube, por ejemplo, del ERP, que afecte al procesamiento de la orden de producción (por ejemplo, un cambio de prioridad).

El enfoque para utilizar este dispositivo IoT a nivel de contenedor es actuar como un “sensor de planificación”. Este sensor está alerta ante cualquier señal externa del centro de trabajo, dispositivos de control IoT, o cualquier señal autorizada desde la nube para desencadenar una solicitud de replanificación. Al mismo tiempo, se monitorean sus

contadores internos de tiempo de espera, nivel de calidad y pérdida de energía para activar la solicitud de replanificación en función de los márgenes de tolerancia establecidos para el artículo de dicha orden de producción.

Tan pronto como el sensor de planificación detecta, ya sea externa o internamente, que debe disparar una solicitud de reprogramación en tiempo real, ejecuta el algoritmo de Sonar Industrial, que realiza una llamada al centro de trabajo asociado a la producción y también a sus centros de trabajo alternativos, solicitando una reprogramación utilizando el algoritmo ECF para confirmar la fecha y hora en la que se podrá procesar. Y, paralelamente, se realiza la misma llamada a los centros de trabajo de la siguiente operación, solicitando también la aplicación de dicho algoritmo ECF.

Los centros de trabajo de esta operación y la siguiente operación responden al sensor de planificación con la secuencia de operaciones del centro de trabajo incluyendo la operación implicada del sensor que realizó la solicitud de reprogramación. Y aplicando el algoritmo Industrial Sonar, que pondera la aplicación del algoritmo Johnson y la aplicación del algoritmo ECF en los diferentes centros de trabajo, el sensor determina si permanece en espera en el centro de trabajo o confirma a los centros de trabajo una reprogramación de dicha orden, para a continuación, realizar la llamada a un AMR para su transporte al nuevo centro de trabajo asignado.

En la siguiente figura podemos ver la explicación anterior de la planificación en tiempo real activada por el Sensor de Planificación incluido en el contenedor WIP.

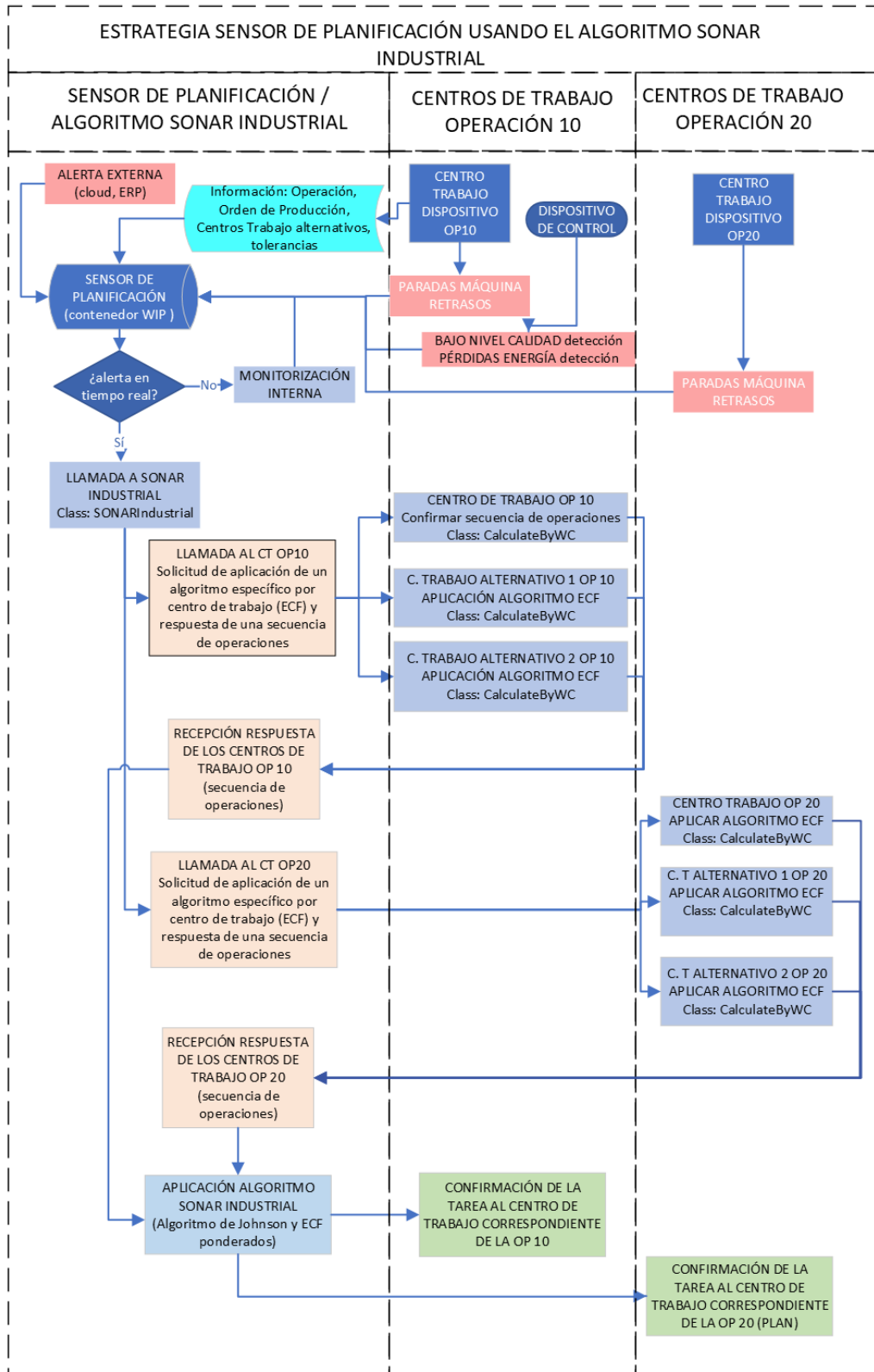


Figura 11: Explicación del proceso de comunicación de la arquitectura del sensor de planificación

La estructura hardware y software utilizada en la arquitectura del sensor de planificación para la simulación de estos procesos es la misma que la utilizada para la arquitectura del algoritmo de Sonar Industrial, basada igualmente en criterios de facilidad de uso y flexibilidad de su aplicación en diferentes entornos:

- Dispositivo sensor de planificación: Se seleccionó un ordenador o dispositivo IoT con suficiente potencia, como Raspberry Pi 4 (Raspberry Pi Foundation, 2022) y Jetson Nano (NVIDIA, 2022) debido a su disponibilidad para ser utilizado como sensor de planificación y ejecutar el algoritmo Sonar Industrial.
- Versión Python: El software fue desarrollado usando Python 3.10.5 (Python Software Foundation, 2022).
- SQLite: El software utiliza la base de datos SQLite (SQLite, 2022). Esta base de datos fue elegida por su facilidad de integración con el dispositivo y su versatilidad.

## **6. Herramienta de Software Sonar Industrial**

### **6.1 Introducción: Detalle del software Sonar Industrial desarrollado**

Como punto de partida de la tesis, se ha tomado como base la primera versión del Software Sonar Industrial desarrollada en Python (Burillo, Desarrollo de un programa en lenguaje Python para planificación por centro de trabajo e Integración con AGVs-Vehículos Guiados Automatizados, 2022). Esta primera versión se inspira en la adaptación a Python de un conjunto de algoritmos por centro de trabajo del software de Programación de la Producción del Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación de la Universidad de Zaragoza (Ibarz Castelló, 2013).

En dicha versión inicial de software desarrollado en Python se desarrollaron las herramientas necesarias para planificar en un único centro de Trabajo una serie de operaciones previamente existentes, aplicando los siguientes métodos de programación de operaciones:

- FE: Ordenación según Fecha de Entrada.
- TPC: Ordenación según Tiempo de Procesado más Corto
- TPPC: Ordenación según Tiempo de Procesado Ponderado más Corto
- FEC: Ordenación según Fecha de Entrega más Cercana.
- H: Ordenación según algoritmo de Hodgson
- TCP: Ordenación según Tiempo de Preparación más Corto
- MP: Ordenación según Método Ponderado.

A su vez, en dicha versión de software se estableció un ejemplo de la lógica inicial en Python para la comunicación entre centros de trabajo solicitando la aplicación de un algoritmo por centro de trabajo, y para la llamada a AGVs a través de ficheros .csv.

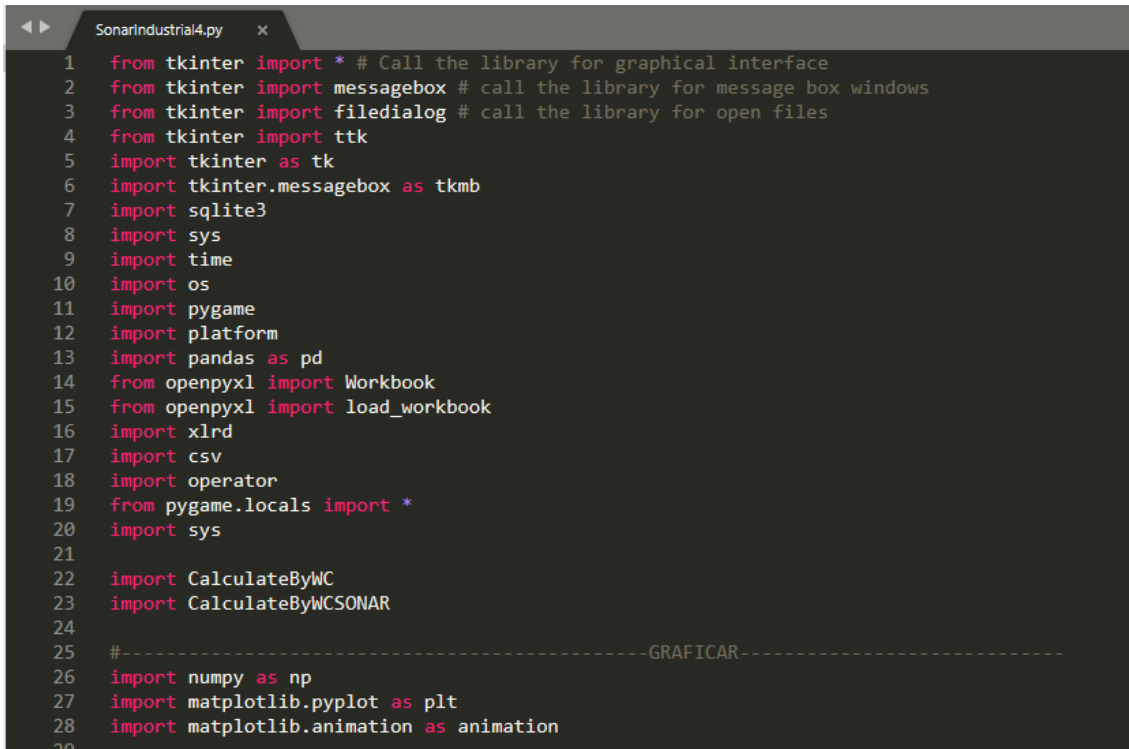
Con posterioridad, y como desarrollo de la tesis y como base de la publicación (Burillo et al., 2024), se ha añadido el algoritmo para la secuenciación de operaciones de producción por centro de trabajo en base a las pérdidas de energía ECF, detallado en el punto 4.4, se ha desarrollado el Algoritmo de Sonar Industrial detallado en el punto 3.4 y se han desarrollado las gráficas para la presentación gráfica de los resultados.

Se ha llevado a cabo el desarrollo del software Sonar Industrial en Python en las siguientes 7 etapas:

- 1- Diseño de módulos y librerías.
- 2- Diseño y desarrollo de menús de la aplicación y datos maestros de las operaciones.
- 3- Diseño y desarrollo de los cálculos de los métodos de programación de la producción.
- 4- Diseño y desarrollo de la comunicación mediante ficheros.
- 5- Diseño y desarrollo de la aplicación del algoritmo de Sonar Industrial
- 6- Diseño y desarrollo de gráficas con los resultados
- 7- Diseño y desarrollo de simulación animada del proceso.

## **6.2 Diseño de módulos y librerías**

- 1- Diseño de módulos y librerías: Como base, se han importado las siguientes librerías en Python:



```

1  from tkinter import * # Call the library for graphical interface
2  from tkinter import messagebox # call the library for message box windows
3  from tkinter import filedialog # call the library for open files
4  from tkinter import ttk
5  import tkinter as tk
6  import tkinter.messagebox as tkmb
7  import sqlite3
8  import sys
9  import time
10 import os
11 import pygame
12 import platform
13 import pandas as pd
14 from openpyxl import Workbook
15 from openpyxl import load_workbook
16 import xlrd
17 import csv
18 import operator
19 from pygame.locals import *
20 import sys
21
22 import CalculateByWC
23 import CalculateByWCSONAR
24
25 #-----GRAFCAR-----
26 import numpy as np
27 import matplotlib.pyplot as plt
28 import matplotlib.animation as animation
29

```

Figura 12: Librerías de Python utilizadas

- Para el Desarrollo de los menús de la aplicación se ha hecho uso de la librería “tkinter”.
- Para el almacenamiento y la gestión de los Datos maestros de las operaciones y los cálculos basados en ellas, se ha hecho uso de la librería “sqlite3”, con el objetivo de usar la base de datos sqlite.
- Para la representación gráfica de la comunicación se ha hecho uso de la librería “pygame”.
- Para la exportación de ficheros se ha hecho uso de las librerías “openpyxl”, “xlrd” y “csv”.
- Para el cálculo de los distintos métodos de programación de la producción se ha desarrollado un módulo para importar como librería “CalculateByWC”. Esta librería realiza el cálculo de la programación de operaciones de órdenes de producción en un centro de trabajo para la aplicación de un determinado algoritmo de planificación por centro de trabajo (FE, TPC, TPPC, FEC, H, TCP, MP, etc, y ECF, que es el nuevo algoritmo desarrollado para Pérdidas de Energía).

- También se ha desarrollado el módulo para importar como librería “CalculateByWCSONAR”. Esta librería realiza ese mismo cálculo de la programación de operaciones de producción, pero para las llamadas efectuadas desde otros centros de trabajo.

## 6.3 Diseño y desarrollo de menús de la aplicación y datos maestros de las operaciones

- 2- Diseño y desarrollo de menús de la aplicación y datos maestros de las operaciones:
  - Se ha diseñado el programa con los siguientes apartados: Un Menú, en la parte superior, compuesto por: los apartados de File (Archivo), Edit (Editar), Tools (Herramientas) y Help (Ayuda). Y un menú intuitivo de botones, que alberga la funcionalidad desarrollada y que se explicará a continuación en los distintos apartados.

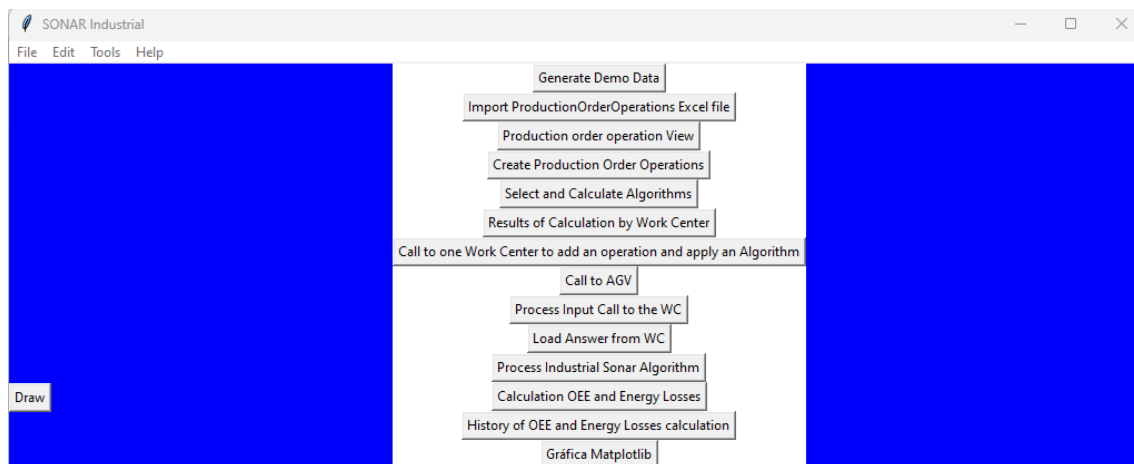


Figura 13: Menú principal del programa Sonar Industrial

- El primer paso para utilizar el programa en un dispositivo es la generación de la BBDD en el dispositivo y la creación de las tablas necesarias. Esa acción se realiza mediante la opción **File** -> “**BBDD**

**Connection**". El sistema responderá con el siguiente mensaje: "BBDD created correctly".

- El siguiente paso, es la generación de los datos de operaciones necesarios para realizar los cálculos de la programación de la Producción y la aplicación del algoritmo Sonar Industrial. Se han habilitado dos formas para introducir esta información, que se detallan a continuación:

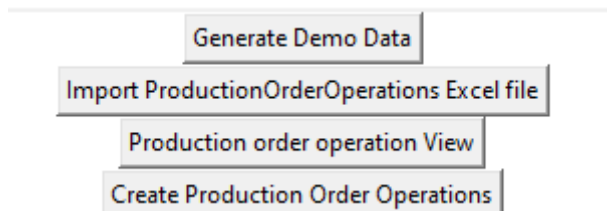


Figura 14: Opciones de importación/creación de datos maestros de operaciones e histórico de pérdidas de energía

- La primera es la importación de los datos mediante un fichero Excel utilizando el botón "Import Production Order Operations Excel File", que puede ser utilizado por ejemplo para la importación de estos datos desde el software ERP/MES. Este botón importa un archivo Excel llamado "demosheet" que es volcado en la tabla Ruta de Producción (PRODRROUTE) de la BBDD SQLite de la aplicación.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
ID	ProdId	ItemId	ItemName	OpNumber	OpCode	WorkCenter	WorkDescription	PI	LVI	DI	TPI						
2279	IT00001	ItemName 001	10	FORMING	WC001	Trabajo Conformado 01	0.7353	1	72	1.00							
2283	IT00002	ItemName 002	10	FORMING	WC001	Trabajo Conformado 02	4.4118	1	72	1.00							
2327	IT00003	ItemName 003	10	FORMING	WC001	Trabajo Conformado 03	8.8235	10	-8	2.00							
2351	IT00004	ItemName 004	10	FORMING	WC001	Trabajo Conformado 04	7.6923	3	72	2.50							
2363	IT00005	ItemName 005	10	FORMING	WC001	Trabajo Conformado 05	14.2857	3	72	2.50							
2368	IT00007	ItemName 007	10	FORMING	WC001	Trabajo Conformado 07	8.3333	3	72	1.50							
2367	IT00006	ItemName 006	10	FORMING	WC001	Trabajo Conformado 06	10.0000	3	72	1.50							
2371	IT00008	ItemName 008	10	FORMING	WC001	Trabajo Conformado 08	10.0000	3	72	1.50							
2372	IT00009	ItemName 009	10	FORMING	WC001	Trabajo Conformado 09	8.3333	3	72	1.50							
2411	IT00010	ItemName 010	10	FORMING	WC001	Trabajo Conformado 10	12.9167	10	40	2.00							

Figura 15: Ejemplo de datos demo de operaciones de producción del centro de trabajo

```
CREATE TABLE PRODROUTE(
  ID INTEGER PRIMARY KEY AUTOINCREMENT,
  PROPID VARCHAR(20),
  ITEMID VARCHAR(20),
  ITEMNAME VARCHAR(60),
  OPNUMBER VARCHAR(3),
  OPCODE VARCHAR(20),
  WORKCENTER VARCHAR(20),
  WORKDESCRIPTION VARCHAR(60),
  PI VARCHAR(10),
  WI VARCHAR(3),
  DI VARCHAR(20),
  TPI VARCHAR(10)
```

Figura 16: Configuración campos de tabla básica prodroute para importación

Y a su vez importa un archivo Excel llamado “demosheethistoryOEE” que es volcado en la tabla ENERGYLOSSES:

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	CA
1	IT00001	WC001	500	5	5	5000	1	1100	100	1200	500	0.245	0.000117	5	0.91866	0.857428	0.875	0.687499	2800	688	0.42875	100	200	200	500	42.875	85.75	85.75	0.1
1	IT00002	WC001	500	5	5	1600	1	1100	100	1200	500	0.245	0.000117	5	0.91866	0.857428	0.875	0.687499	2800	688	0.42875	100	200	200	500	42.875	85.75	85.75	0.1
1	IT00003	WC001	500	5	5	1600	1	1100	100	1200	500	0.245	0.000117	5	0.91866	0.857428	0.875	0.687499	2800	688	0.42875	100	200	200	500	42.875	85.75	85.75	0.1
1	IT00004	WC001	500	5	5	1600	1	1100	100	1200	500	0.245	0.000117	5	0.91866	0.857428	0.875	0.687499	2800	688	0.42875	100	200	200	500	42.875	85.75	85.75	0.1
1	IT00005	WC001	500	5	5	1600	1	1100	100	1200	500	0.245	0.000117	5	0.91866	0.857428	0.875	0.687499	2800	688	0.42875	100	200	200	500	42.875	85.75	85.75	0.1
1	IT00006	WC001	500	5	5	1600	1	1100	100	1200	500	0.245	0.000117	5	0.91866	0.857428	0.875	0.687499	2800	688	0.42875	100	200	200	500	42.875	85.75	85.75	0.1
1	IT00007	WC001	500	5	5	1600	1	1100	100	1200	500	0.245	0.000117	5	0.91866	0.857428	0.875	0.687499	2800	688	0.42875	100	200	200	500	42.875	85.75	85.75	0.1
1	IT00008	WC001	500	5	5	1600	1	1100	100	1200	500	0.245	0.000117	5	0.91866	0.857428	0.875	0.687499	2800	688	0.42875	100	200	200	500	42.875	85.75	85.75	0.1
0	IT00009	WC001	500	5	5	1600	1	1100	100	1200	500	0.245	0.000117	5	0.91866	0.857428	0.875	0.687499	2800	688	0.42875	100	200	200	500	42.875	85.75	85.75	0.1
1	IT00010	WC001	500	5	5	1600	1	1100	100	1200	500	0.245	0.000117	5	0.91866	0.857428	0.875	0.687499	2800	688	0.42875	100	200	200	500	42.875	85.75	85.75	0.1
2	IT00011	WC001	500	5	5	1600	1	1100	100	1200	500	0.245	0.000117	5	0.91866	0.857428	0.875	0.687499	2800	688	0.42875	100	200	200	500	42.875	85.75	85.75	0.1
3	IT00012	WC001	500	5	5	1600	1	1100	100	1200	500	0.245	0.000117	5	0.91866	0.857428	0.875	0.687499	2800	688	0.42875	100	200	200	500	42.875	85.75	85.75	0.1
4	IT00013	WC001	500	5	5	1600	1	1100	100	1200	500	0.245	0.000117	5	0.91866	0.857428	0.875	0.687499	2800	688	0.42875	100	200	200	500	42.875	85.75	85.75	0.1
5	IT00014	WC001	500	5	5	1600	1	1100	100	1200	500	0.245	0.000117	5	0.91866	0.857428	0.875	0.687499	2800	688	0.42875	100	200	200	500	42.875	85.75	85.75	0.1
6	IT00015	WC001	500	5	5	1600	1	1100	100	1200	500	0.245	0.000117	5	0.91866	0.857428	0.875	0.687499	2800	688	0.42875	100	200	200	500	42.875	85.75	85.75	0.1
7	IT00016	WC001	500	5	5	1600	1	1100	100	1200	500	0.245	0.000117	5	0.91866	0.857428	0.875	0.687499	2800	688	0.42875	100	200	200	500	42.875	85.75	85.75	0.1
8	IT00017	WC001	500	5	5	1600	1	1100	100	1200	500	0.245	0.000117	5	0.91866	0.857428	0.875	0.687499	2800	688	0.42875	100	200	200	500	42.875	85.75	85.75	0.1

Figura 17: Ejemplo de datos de demo para histórico de pérdidas de energía

```
CREATE TABLE ENERGYLOSSES(
  ID INTEGER PRIMARY KEY AUTOINCREMENT,
  ITEMID VARCHAR(20),
  WORKCENTER VARCHAR(20),
  CAPACITY REAL,
  SETUPTIME REAL,
  WORKSHIFTTIME REAL,
  THEORETICPROD REAL,
  FAULTTIME REAL,
  GOODPROD REAL,
  BADPROD REAL,
  REALPROD REAL,
  MACHPOWER REAL,
  ELECTRICPRICE REAL,
  ECO2EMISSIONS REAL,
  MC02EMISSIONS REAL,
  FTQ REAL,
  P REAL,
  A REAL,
  OEE REAL,
  ELECTCONSUM REAL,
  ELECTAMOUNT REAL,
  ELUNITCOST REAL,
  BADFTQPC REAL,
  BADPPC REAL,
  BADAPC REAL,
  BADTOTALPC REAL,
  LOSSESFTQ REAL,
  LOSSESP REAL,
  LOSSESA REAL,
  CARBONFOOTPRINT REAL,
  TOTALLOSSESPC REAL,
  TOTALLOSSES0EE REAL
)
```

Figura 18: Configuración de campos de tabla básica energylosses para importación de histórico de pérdidas de energía

Desde el botón “Production order operation view” es posible visualizar los datos de operaciones de producción importados.

view Production Operation data and refresh												
ID	ProId	ItemId	ItemName	OpNumber	OpCode	WorkCenter	WorkDescript	ProcessTime	Weight/Impo	Work Delivery	SetupTime	
1	2279	IT00001	ItemName 00	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	0.7353	1	72	1.0	
2	2283	IT00002	ItemName 00	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	4.4118	1	72	1.0	
3	2327	IT00003	ItemName 00	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	8.8235	10	-8	2.0	
4	2351	IT00004	ItemName 00	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	7.6923	3	72	2.5	
5	2363	IT00005	ItemName 00	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	14.2857	3	72	2.5	
6	2368	IT00007	ItemName 00	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	8.3333	3	72	1.5	
7	2367	IT00006	ItemName 00	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	10.0	3	72	1.5	
8	2371	IT00008	ItemName 00	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	10.0	3	72	1.5	
9	2372	IT00009	ItemName 00	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	8.3333	3	72	1.5	
10	2411	IT00010	ItemName 01	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	12.9167	10	40	2.0	
11	2433	IT00011	ItemName 01	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	27.7778	10	40	2.0	
12	2462	IT00012	ItemName 01	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	1.087	9	72	3.5	
13	2497	IT00013	ItemName 01	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	1.6667	8	112	2.0	
14	2496	IT00014	ItemName 01	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	2.5	8	112	2.0	
15	2501	IT00015	ItemName 01	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	6.7188	6	112	2.0	
16	2505	IT00016	ItemName 01	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	4.625	6	112	2.0	
17	2510	IT00017	ItemName 01	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	2.3214	6	112	2.0	
18	2518	IT00018	ItemName 01	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	8.1081	7	152	2.0	
19	2523	IT00020	ItemName 02	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	3.2609	7	152	1.5	
20	2522	IT00019	ItemName 01	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	5.0	7	152	2.0	
21	2537	IT00021	ItemName 02	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	3.0	9	112	1.5	
22	2543	IT00022	ItemName 02	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	2.2727	9	112	1.5	
23	2553	IT00023	ItemName 02	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	1.3	5	88	2.0	
24	2559	IT00024	ItemName 02	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	2.575	5	88	2.0	
25	2564	IT00025	ItemName 02	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	4.625	4	112	2.0	

Create Production Order Operation

Return to Main Menu

Figura 19: Ejemplo de datos importados de operaciones de producción del centro de trabajo

A su vez, desde el botón “History of OEE and Energy Losses Calculation” es posible la visualización los datos de histórico de cálculo de pérdidas de energía y OEE importados.

view History OEE and energy losses calculation																															
ID	W	Ca	Se	W	Theoretical F	Fa	Good Produ	Bad Produ	Rei	Power Mach	Electricity Pt	Electric/Gas	Process CO2	FTQ (0-1)	P-Perform	A-Availability	OEE (0-1)	Electric Shift	Electric Shift	Unitary Elect	Lost Pieces C	Lost Pieces F	Lost Pieces J	Lost Pieces 1	Losses Qual	Losses Perfo	Losses Avail	CARBONFO	TOTL	TC	
1	FR	W	20	01	EL	1600.0	1.0	1100.0	100.0	100.0	350.0	0.245	0.000117	0.0	0.91666	0.9571428	0.875	0.687499	2800.0	686.0	0.42875	100.0	200.0	200.0	500.0	42.875	85.75	85.75	0.3276	2143	21
2	FR	W	20	01	EL	1600.0	1.0	1100.0	100.0	100.0	350.0	0.245	0.000117	0.0	0.91666	0.9571428	0.875	0.687499	2800.0	686.0	0.42875	100.0	200.0	200.0	500.0	42.875	85.75	85.75	0.3276	2143	21
3	FR	W	20	01	EL	1600.0	1.0	1100.0	100.0	100.0	350.0	0.245	0.000117	0.0	0.91666	0.9571428	0.875	0.687499	2800.0	686.0	0.42875	100.0	200.0	200.0	500.0	42.875	85.75	85.75	0.3276	2143	21
4	FR	W	20	01	EL	1600.0	1.0	1100.0	100.0	100.0	350.0	0.245	0.000117	0.0	0.91666	0.9571428	0.875	0.687499	2800.0	686.0	0.42875	100.0	200.0	200.0	500.0	42.875	85.75	85.75	0.3276	2143	21
5	FR	W	20	01	EL	1600.0	1.0	1100.0	100.0	100.0	350.0	0.245	0.000117	0.0	0.91666	0.9571428	0.875	0.687499	2800.0	686.0	0.42875	100.0	200.0	200.0	500.0	42.875	85.75	85.75	0.3276	2143	21
6	FR	W	20	01	EL	1600.0	1.0	1100.0	100.0	100.0	350.0	0.245	0.000117	0.0	0.91666	0.9571428	0.875	0.687499	2800.0	686.0	0.42875	100.0	200.0	200.0	500.0	42.875	85.75	85.75	0.3276	2143	21
7	FR	W	20	01	EL	1600.0	1.0	1100.0	100.0	100.0	350.0	0.245	0.000117	0.0	0.91666	0.9571428	0.875	0.687499	2800.0	686.0	0.42875	100.0	200.0	200.0	500.0	42.875	85.75	85.75	0.3276	2143	21
8	FR	W	20	01	EL	1600.0	1.0	1100.0	100.0	100.0	350.0	0.245	0.000117	0.0	0.91666	0.9571428	0.875	0.687499	2800.0	686.0	0.42875	100.0	200.0	200.0	500.0	42.875	85.75	85.75	0.3276	2143	21
9	FR	W	20	01	EL	1600.0	1.0	1100.0	100.0	100.0	350.0	0.245	0.000117	0.0	0.91666	0.9571428	0.875	0.687499	2800.0	686.0	0.42875	100.0	200.0	200.0	500.0	42.875	85.75	85.75	0.3276	2143	21
10	FR	W	20	01	EL	1600.0	1.0	1100.0	100.0	100.0	350.0	0.245	0.000117	0.0	0.91666	0.9571428	0.875	0.687499	2800.0	686.0	0.42875	100.0	200.0	200.0	500.0	42.875	85.75	85.75	0.3276	2143	21
11	FR	W	20	01	EL	1600.0	1.0	1100.0	100.0	100.0	350.0	0.245	0.000117	0.0	0.91666	0.9571428	0.875	0.687499	2800.0	686.0	0.42875	100.0	200.0	200.0	500.0	42.875	85.75	85.75	0.3276	2143	21
12	FR	W	20	01	EL	1600.0	1.0	1100.0	100.0	100.0	350.0	0.245	0.000117	0.0	0.91666	0.9571428	0.875	0.687499	2800.0	686.0	0.42875	100.0	200.0	200.0	500.0	42.875	85.75	85.75	0.3276	2143	21
13	FR	W	20	01	EL	1600.0	1.0	1100.0	100.0	100.0	350.0	0.245	0.000117	0.0	0.91666	0.9571428	0.875	0.687499	2800.0	686.0	0.42875	100.0	200.0	200.0	500.0	42.875	85.75	85.75	0.3276	2143	21
14	FR	W	20	01	EL	1600.0	1.0	1100.0	100.0	100.0	350.0	0.245	0.000117	0.0	0.91666	0.9571428	0.875	0.687499	2800.0	686.0	0.42875	100.0	200.0	200.0	500.0	42.875	85.75	85.75	0.3276	2143	21
15	FR	W	20	01	EL	1600.0	1.0	1100.0	100.0	100.0	350.0	0.245	0.000117	0.0	0.91666	0.9571428	0.875	0.687499	2800.0	686.0	0.42875	100.0	200.0	200.0	500.0	42.875	85.75	85.75	0.3276	2143	21
16	FR	W	20	01	EL	1600.0	1.0	1100.0	100.0	100.0	350.0	0.245	0.000117	0.0	0.91666	0.9571428	0.875	0.687499	2800.0	686.0	0.42875	100.0	200.0	200.0	500.0	42.875	85.75	85.75	0.3276	2143	21
17	FR	W	20	01	EL	1600.0	1.0	1100.0	100.0	100.0	350.0	0.245	0.000117	0.0	0.91666	0.9571428	0.875	0.687499	2800.0	686.0	0.42875	100.0	200.0	200.0	500.0	42.875	85.75	85.75	0.3276	2143	21
18	FR	W	20	01	EL	1600.0	1.0	1100.0	100.0	100.0	350.0	0.245	0.000117	0.0	0.91666	0.9571428	0.875	0.687499	2800.0	686.0	0.42875	100.0	200.0	200.0	500.0	42.875	85.75	85.75	0.3276	2143	21
19	FR	W	20	01	EL	1600.0	1.0	1100.0	100.0	100.0	350.0	0.245	0.000117	0.0	0.91666	0.9571428	0.875	0.687499	2800.0	686.0	0.42875	100.0	200.0	200.0	500.0	42.875	85.75	85.75	0.3276	2143	21
20	FR	W	20	01	EL	1600.0	1.0	1100.0	100.0	100.0	350.0	0.245	0.000117	0.0	0.91666	0.9571428	0.875	0.687499	2800.0	686.0	0.42875	100.0	200.0	200.0	500.0	42.875	85.75	85.75	0.3276	2143	21
21	FR	W	20	01	EL	1600.0	1.0	1100.0	100.0	100.0	350.0	0.245	0.000117	0.0	0.91666	0.9571428	0.875	0.687499	2800.0	686.0	0.42875	100.0	200.0	200.0	500.0	42.875	85.75	85.75	0.3276	2143	21
22	FR	W	20	01	EL	1600.0	1.0	1100.0	100.0	100.0	350.0	0.245	0.000117	0.0	0.91666	0.9571428	0.875	0.687499	2800.0	686.0	0.42875	100.0	200.0	200.0	500.0	42.875	85.75	85.75	0.3276	2143	21
23	FR	W	20	01	EL	1600.0	1.0	1100.0	100.0	100.0	350.0	0.245	0.000117	0.0	0.91666	0.9571428	0.875	0.687499	2800.0	686.0	0.42875	100.0	200.0	200.0	500.0	42.875	85.75	85.75	0.3276	2143	21
24	FR	W	20	01	EL	1600.0	1.0	1100.0	100.0	100.0	350.0	0.245	0.000117	0.0	0.91666	0.9571428	0.875	0.687499	2800.0	686.0	0.42875	100.0	200.0	200.0	500.0	42.875	85.75	85.75	0.3276	2143	21
25	FR	W	20	01	EL	1600.0	1.0	1100.0	100.0	100.0	350.0	0.245	0.000117	0.0	0.91666	0.9571428	0.875	0.687499	2800.0	686.0	0.42875	100.0	200.0	200.0	500.0	42.875	85.75	85.75	0.3276	2143	21

Calculation of OEE and Energy Losses

Return to Main Menu

Figura 20: Ejemplo de datos importados del histórico de pérdidas de energía

Configuración y Readaptación Inteligente de Software para la Transmisión e Interacción de Algoritmos.

- La segunda es introducir manualmente los datos desde la aplicación mediante el botón “Create Production Order Operations” para crear las operaciones de producción del centro de trabajo. Se introducen los datos necesarios para crear el registro (Production order, ItemId, ItemName, Operation Number, Operation Code, Work Description, Process Time, Importance, Delivery Date, Setup Time) y se pulsa el botón “Create”.

Production Order	<input type="text" value="2279"/>
Item Id	<input type="text" value="IT001"/>
Item Name	<input type="text" value="ItemName 001"/>
Operation Number	<input type="text" value="10"/>
Operation Code	<input type="text" value="FORMING"/>
Work Description	<input type="text" value="Trabajo Conformado"/>
Process Time	<input type="text" value="0.7353"/>
Importance	<input type="text" value="1"/>
Delivery Date	<input type="text" value="72"/>
Setup Time	<input type="text" value="1.0"/>

Figura 21: Plantilla para creación manual de operaciones de producción en centro de trabajo

Y crear los datos de Cálculo de OEE y Pérdidas de energía mediante la opción “Calculation OEE and Energy Losses”.

Calculation of OEE and Energy Looses

Item Id	<input type="text" value="IT001"/>	
Work Center	<input type="text" value="1"/>	
Capacity (u/h)	<input type="text" value="200"/>	
Setup time (h)	<input type="text" value="0"/>	
Work Shift time (h)	<input type="text" value="8"/>	
Theoretical Production quantity (u)	<input type="text" value="1600"/>	
Fault Time (h)	<input type="text" value="1"/>	
Good Production quantity (u)	<input type="text" value="1100"/>	Bad Production quantity (u) <input type="text" value="100"/>
Machine Power (KW)	<input type="text" value="350"/>	
Electric Price	<input type="text" value="0.245"/>	Electricity/Gas CO2 Emissions <input type="text" value="0.000117"/>
Process CO2 Emissions	<input type="text" value="0"/>	

Figura 22: Pantalla para la creación manual de reporte del turno y cálculo de OEE y pérdidas de Energía

```

SONAR Industrial
RESULTS OF THE CALCULATION OF OEE AND ENERGY LOSSES

INPUT DATA
ItemId: IT001
WorkCenter: 1
Capacity (u/h): 200.0
Setup Time (h): 0.0
Work Shift (h): 8.0
Theoretical production quantity (u): 1600.0
Fault Time (h): 1.0
Good Production (u): 1100.0
Bad Production (u): 100.0
Real Production (u): 1200.0
Power Machine (KW): 350.0
Electricity Price (€/KW): 0.245
Electric/gas CO2 Emissions (TCO/KWh): 0.000117
Process CO2 Emissions (TCO/KWh): 0.0

CALCULATION DATA
FTQ (0-1): 0.9166666666666666
Performance (0-1): 0.8571428571428571
Availability (0-1): 0.875
OEE (0-1): 0.6874999999999999

Electric Shift Consumption (KWh/shift): 2800.0
Electric Shift Amount (€): 686.0
Unitary Electric Cost(€/u): 0.42875

Lost pieces Quality (u/shift): 100.0
Lost Pieces Performance (u/shift): 200.0
Lost Pieces Availability (u/shift): 200.0
Lost Pieces Total (y/shift): 500.0

Losses Quality Amount (€): 42.875
Losses Performance Amount (€): 85.75
Losses Availability Amount (€): 85.75

Carbon Footprint (TCO/KWh): 0.3276
Total Energy Losses (pieces) (€): 214.375
Total Energy Losses (OEE calculation) (€): 214.37500000000005
    
```

Figura 23: Ejemplo de cálculo de la huella de carbono y las pérdidas de energía por piezas y por OEE

## 6.4 Diseño y desarrollo de los cálculos de los métodos de programación de producción

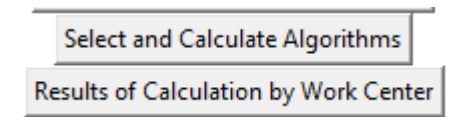
- 3- Diseño y desarrollo de los cálculos de los métodos de programación de la producción:

- Adicionalmente a la carga de datos, se ha desarrollado el proceso de cálculo de Programación de Producción de dos formas:

La Primera mediante el botón “Select and Calculate Algorithms”, donde se ofrece la posibilidad de seleccionar uno o varios métodos de Programación de la producción para un centro de trabajo con el fin de poder comparar sus resultados.

En el cálculo de Algoritmos para el centro de trabajo se seleccionan el algoritmo o algoritmos que se desean calcular. Una vez seleccionados, mediante el botón “Calculate Algorithm by WC” es posible llevar a cabo el cálculo de todos ellos, a partir de los datos previamente introducidos.

Una vez realizado el cálculo, mediante el botón “Results”, o en el menú principal con la opción “Results of calculation by Work Center” es posible visualizar los resultados de cálculo para cada algoritmo.



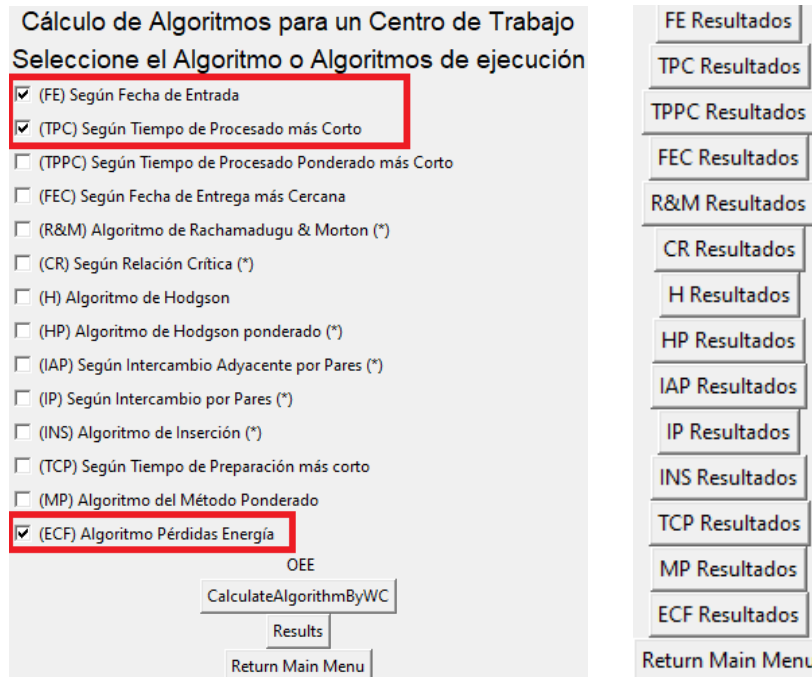


Figura 24: Opciones de cálculo, selección de algoritmo y consulta de resultados del cálculo programación producción por centro de trabajo

A modo de ejemplo, “FE Resultados”: Muestra la Programación de la Producción ordenada por Fecha de Entrada.

view FE Results															
ID	ProId	ItemId	ItemName	OpNu	OpCode	WorkCenter	WorkDescript	ProcessTime	Importance	DeliveryDate	SetupTime	Work Flow tin	Delay (Ti)	Wi*Ti	Wi*Fi
1	2279	IT00001	ItemName 001	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	1.7353	1	72	1.0	1.7353	0	0	1.7353
2	2283	IT00002	ItemName 002	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	5.4118	1	72	1.0	7.1471	0	0	7.1471
3	2327	IT00003	ItemName 003	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	10.8235	10	-8	2.0	17.9706	25.9706	259.706	179.706
4	2351	IT00004	ItemName 004	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	10.1923	3	72	2.5	28.1629	0	0	84.4887
5	2363	IT00005	ItemName 005	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	16.7857	3	72	2.5	44.9486	0	0	134.8458
6	2368	IT00007	ItemName 007	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	9.8333	3	72	1.5	54.7819	0	0	164.3457
7	2367	IT00006	ItemName 006	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	11.5	3	72	1.5	66.2819	0	0	198.8457
8	2371	IT00008	ItemName 008	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	11.5	3	72	1.5	77.7819	5.78190000000	17.3457	233.3457
9	2372	IT00009	ItemName 009	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	9.8333	3	72	1.5	87.6152	15.6152	46.8456	262.8456
10	2411	IT00010	ItemName 010	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	14.9167	10	40	2.0	102.5319	62.5319	625.319	1025.319
11	2433	IT00011	ItemName 011	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	29.7778	10	40	2.0	132.3097	92.3097	923.097	1323.097
12	2462	IT00012	ItemName 012	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	4.587	9	72	3.5	136.8967	64.8967	584.0703	1232.0703
13	2497	IT00013	ItemName 013	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	3.6667	8	112	2.0	140.5634	28.5634	228.5072	1124.5072
14	2496	IT00014	ItemName 014	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	4.5	8	112	2.0	145.0634	33.0634	264.5072	1160.5072
15	2501	IT00015	ItemName 015	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	8.7188	6	112	2.0	153.7822	41.7822	250.6932	922.6932
16	2505	IT00016	ItemName 016	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	6.625	6	112	2.0	160.4072	48.4072	290.4432	962.4432
17	2510	IT00017	ItemName 017	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	4.3214	6	112	2.0	164.7286	52.7286	316.3716	988.3716
18	2518	IT00018	ItemName 018	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	10.1081	7	152	2.0	174.8367	22.8367	159.8569	1223.8569
19	2523	IT00020	ItemName 020	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	4.7609	7	152	1.5	179.5976	27.5976	193.1832	1257.1832
20	2522	IT00019	ItemName 019	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	7.0	7	152	2.0	186.5976	34.5976	242.1832	1306.1832
21	2537	IT00021	ItemName 021	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	4.5	9	112	1.5	191.0976	79.0976	711.8784	1719.8784
22	2543	IT00022	ItemName 022	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	3.7727	9	112	1.5	194.8703	82.8703	745.8327	1753.8327
23	2553	IT00023	ItemName 023	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	3.3	5	88	2.0	198.1703	110.1703	550.8515	990.8515
24	2559	IT00024	ItemName 024	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	4.575	5	88	2.0	202.7453	114.7453	573.7265	1013.7265
25	2564	IT00025	ItemName 025	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	6.625	4	112	2.0	209.3703	97.3703	389.4812	837.4812

Figura 25: Pantalla de resultados del método FE

“TPC Resultados”: Muestra la Programación de la Producción ordenada según el Tiempo de Procesado más Corto. Para eso se hace uso de la variable Pi (tiempo de proceso) cargada.

view TPC Results															
ID	PrOID	ItemID	ItemName	OpNu	OpCode	WorkCenter	WorkDescript	ProcessTime	Importance	DeliveryDate	SetupTime	Work Flow tin	Delay (Ti)	Wi*Ti	Wi*Fi
1	2589	IT00030	ItemName 030	10	FORMING	WC001	Trabajo Conf	1.1	3	112	1.0	1.1	0.0	0.0	3.300000000
2	2279	IT00001	ItemName 001	10	FORMING	WC001	Trabajo Conf	1.7353	1	72	1.0	2.8353	0.0	0.0	2.8353
3	2586	IT00028	ItemName 028	10	FORMING	WC001	Trabajo Conf	1.9333	3	112	1.5	4.7686	0.0	0.0	14.30580000
4	2594	IT00031	ItemName 031	10	FORMING	WC001	Trabajo Conf	2.05	3	112	1.5	6.8186	0.0	0.0	20.4558
5	2602	IT00034	ItemName 034	10	FORMING	WC001	Trabajo Conf	2.0833	3	112	1.0	8.9019	0.0	0.0	26.7057
6	2588	IT00029	ItemName 029	10	FORMING	WC001	Trabajo Conf	2.1	3	112	2.0	11.0019	0.0	0.0	33.0057
7	2601	IT00033	ItemName 033	10	FORMING	WC001	Trabajo Conf	2.15	3	112	1.5	13.1519	0.0	0.0	39.4557
8	2574	IT00026	ItemName 026	10	FORMING	WC001	Trabajo Conf	2.8649	4	32	2.0	16.0168	0.0	0.0	64.0672
9	2595	IT00032	ItemName 032	10	FORMING	WC001	Trabajo Conf	3.1176	3	112	1.5	19.1344	0.0	0.0	57.4032
10	2553	IT00023	ItemName 023	10	FORMING	WC001	Trabajo Conf	3.3	5	88	2.0	22.4344	0.0	0.0	112.172
11	2497	IT00013	ItemName 013	10	FORMING	WC001	Trabajo Conf	3.6667	8	112	2.0	26.1011	0.0	0.0	208.8088
12	2543	IT00022	ItemName 022	10	FORMING	WC001	Trabajo Conf	3.7727	9	112	1.5	29.8738	0.0	0.0	268.8642
13	2575	IT00027	ItemName 027	10	FORMING	WC001	Trabajo Conf	3.7778	4	32	2.0	33.6516	1.6516000000	6.6064000000	134.6064
14	2510	IT00017	ItemName 017	10	FORMING	WC001	Trabajo Conf	4.3214000000	6	112	2.0	37.973	0.0	0.0	227.838
15	2496	IT00014	ItemName 014	10	FORMING	WC001	Trabajo Conf	4.5	8	112	2.0	42.473	0.0	0.0	339.784
16	2537	IT00021	ItemName 021	10	FORMING	WC001	Trabajo Conf	4.5	9	112	1.5	46.973	0.0	0.0	422.757
17	2559	IT00024	ItemName 024	10	FORMING	WC001	Trabajo Conf	4.575	5	88	2.0	51.548	0.0	0.0	257.74
18	2462	IT00012	ItemName 012	10	FORMING	WC001	Trabajo Conf	4.587	9	72	3.5	56.1350000000	0.0	0.0	505.2150000
19	2523	IT00020	ItemName 020	10	FORMING	WC001	Trabajo Conf	4.7608999999	7	152	1.5	60.8959000000	0.0	0.0	426.2713000
20	2283	IT00002	ItemName 002	10	FORMING	WC001	Trabajo Conf	5.4118	1	72	1.0	66.3077000000	0.0	0.0	66.30770000
21	2505	IT00016	ItemName 016	10	FORMING	WC001	Trabajo Conf	6.625	6	112	2.0	72.9327000000	0.0	0.0	437.5962000
22	2564	IT00025	ItemName 025	10	FORMING	WC001	Trabajo Conf	6.625	4	112	2.0	79.5577000000	0.0	0.0	318.2308000
23	2522	IT00019	ItemName 019	10	FORMING	WC001	Trabajo Conf	7.0	7	152	2.0	86.5577000000	0.0	0.0	605.9039
24	2607	IT00035	ItemName 035	10	FORMING	WC001	Trabajo Conf	7.1786	10	32	2.5	93.7363000000	61.7363000000	617.36300000	937.3630000
25	2501	IT00015	ItemName 015	10	FORMING	WC001	Trabajo Conf	8.7188	6	112	2.0	102.4551000000	0.0	0.0	614.7306000

Figura 26: Pantalla de resultados del método TPC

“TPPC Resultados”: Muestra la Programación de la Producción ordenada según el Tiempo de Procesado Ponderado más Corto. Para ello se hace uso de la variable Pi (tiempo de proceso) y Wi (peso) cargadas.

“FEC Resultados”: Muestra la Programación de la Producción ordenada según la Fecha de entrega más cercana. Para ello se hace uso de la variable DI (tiempo para entrega) cargada.

“H Resultados”: Muestra la Programación de la Producción ordenada según el algoritmo de Hodgson.

“TCP Resultados”: Muestra la Programación de la Producción ordenada según el tiempo de preparación más corto. Para ello se hace uso de la variable TPi (tiempo preparación) cargada.

“MP Resultados”: Muestra la Programación de la Producción ordenada según un método que pondera los resultados de la aplicación del resto de algoritmos.

“ECF Resultados”: Muestra la Programación de la Producción ordenadas según un nuevo método propuesto en esta tesis que pondera los

resultados del histórico de Huella de carbono, Pérdidas total de energía por las piezas y Pérdida total de energía por rendimiento operacional OEE detallado en el punto 4.4.

view OEE Results																		
ID	Prod	ItemId	ItemName	OpNu	OpCode	WorkCenter	WorkDescript	Process	Imports	DeliveryDate	SetupTime	Work Flow tin	Delay (Ti)	W*Ti	W*Fi	CARBONFOO	TOTALLOSSEPC	TOTALLOSSEOE
1	2462	IT00012	ItemName 012	10	FORMING	WC001	Trabajo Conf:	4.587	9	72	3.5	4.587	0	0	41.283	0.3276	214.375	114.375
2	2574	IT00025	ItemName 025	10	FORMING	WC001	Trabajo Conf:	2.8649	4	32	2.0	7.2519	0	0	28.8076	0.3276	214.375	114.375
3	2283	IT00022	ItemName 022	10	FORMING	WC001	Trabajo Conf:	5.4118	1	72	1.0	12.8637	0	0	12.8637	0.3276	214.375	212.375
4	2279	IT00001	ItemName 001	10	FORMING	WC001	Trabajo Conf:	1.7553	1	72	1.0	14.599	0	0	14.599	0.3276	214.375	214.375
5	2327	IT00003	ItemName 003	10	FORMING	WC001	Trabajo Conf:	10.8235	10	-8	2.0	25.4225	33.4225	334.225	254.225	0.3276	214.375	214.375
6	2351	IT00004	ItemName 004	10	FORMING	WC001	Trabajo Conf:	10.1923	3	72	2.5	35.6148	0	0	106.8444	0.3276	214.375	214.375
7	2368	IT00007	ItemName 007	10	FORMING	WC001	Trabajo Conf:	9.8333	3	72	1.5	45.4481	0	0	136.3443	0.3276	214.375	214.375
8	2367	IT00006	ItemName 006	10	FORMING	WC001	Trabajo Conf:	11.5	3	72	1.5	56.9481	0	0	170.8443	0.3276	214.375	214.375
9	2372	IT00009	ItemName 009	10	FORMING	WC001	Trabajo Conf:	9.8333	3	72	1.5	66.7814	0	0	200.3442	0.3276	214.375	214.375
10	2411	IT00010	ItemName 010	10	FORMING	WC001	Trabajo Conf:	14.9167	10	40	2.0	81.6981	41.6981	416.981	81.6981	0.3276	214.375	214.375
11	2423	IT00011	ItemName 011	10	FORMING	WC001	Trabajo Conf:	29.7778	10	40	2.0	111.4759	71.4759	714.759	111.4759	0.3276	214.375	214.375
12	2407	IT00013	ItemName 013	10	FORMING	WC001	Trabajo Conf:	3.6667	8	112	2.0	115.1426	3.1426000000	25.1426000000	921.1408	0.3276	214.375	214.375
13	2505	IT00016	ItemName 016	10	FORMING	WC001	Trabajo Conf:	6.625	6	112	2.0	121.7676	9.7676000000	58.6056000000	730.6056	0.3276	214.375	214.375
14	2518	IT00018	ItemName 018	10	FORMING	WC001	Trabajo Conf:	10.1081	7	152	2.0	131.8757	0	0	923.1299	0.3276	214.375	214.375
15	2523	IT00020	ItemName 020	10	FORMING	WC001	Trabajo Conf:	4.7609	7	152	1.5	136.6366	0	0	956.4562	0.3276	214.375	214.375
16	2522	IT00019	ItemName 019	10	FORMING	WC001	Trabajo Conf:	7.0	7	152	2.0	143.6366	0	0	1005.4562	0.3276	214.375	214.375
17	2537	IT00021	ItemName 021	10	FORMING	WC001	Trabajo Conf:	4.5	9	112	1.5	148.1366	36.1366	325.2294	1333.2294	0.3276	214.375	214.375
18	2543	IT00022	ItemName 022	10	FORMING	WC001	Trabajo Conf:	3.7727	9	112	1.5	151.9093	39.9093	359.1837	1367.1837	0.3276	214.375	214.375
19	2559	IT00024	ItemName 024	10	FORMING	WC001	Trabajo Conf:	4.575	5	88	2.0	156.8843	68.8843	342.4215	782.4215	0.3276	214.375	214.375
20	2564	IT00025	ItemName 025	10	FORMING	WC001	Trabajo Conf:	6.625	4	112	2.0	163.1093	51.1093	204.4372	652.4372	0.3276	214.375	214.375
21	2575	IT00027	ItemName 027	10	FORMING	WC001	Trabajo Conf:	3.7778	4	32	2.0	166.8871	134.8871	539.5484	667.5484	0.3276	214.375	214.375
22	2586	IT00028	ItemName 028	10	FORMING	WC001	Trabajo Conf:	1.9333	3	112	1.5	168.8204	56.8204	170.4612	506.4612	0.3276	214.375	214.375
23	2589	IT00030	ItemName 030	10	FORMING	WC001	Trabajo Conf:	1.1	3	112	1.0	169.9204	57.9204	173.7612	509.7612	0.3276	214.375	214.375
24	2588	IT00029	ItemName 029	10	FORMING	WC001	Trabajo Conf:	2.1	3	112	2.0	172.0204	60.0204	180.0612	516.0612	0.3276	214.375	214.375
25	2594	IT00031	ItemName 031	10	FORMING	WC001	Trabajo Conf:	2.05	3	112	1.5	174.0704	62.0704	186.2112	522.2112	0.3276	214.375	214.375

Figura 27: Pantalla de resultados del método ECF de optimización de pérdidas de energía y huella de carbono.

Esta funcionalidad de cálculo de métodos de programación de la producción por centro de trabajo se ha desarrollado en un módulo aparte “CalculateByWC”, y es utilizada como librería con objeto de que pueda aplicarse con mayor facilidad.

La segunda opción de aplicar este cálculo de algoritmos por centro de trabajo es a través de la aplicación de la llamada de otros centros de trabajo que se verá a continuación. En ese caso se hará la llamada al módulo “CalculateByWCSONAR” que realiza los mismos cálculos, pero únicamente del método de programación de producción solicitado en la llamada por otro centro de trabajo.

## 6.5 Diseño y desarrollo de la comunicación mediante ficheros

- 4- Diseño y desarrollo de la comunicación mediante ficheros:

- Para posibilitar la posterior aplicación del algoritmo de Sonar Industrial, se ha desarrollado el proceso de comunicación entre centros de trabajo. Existen diversas formas de comunicación entre centros de trabajo, pero en este caso, por motivos de facilidad y flexibilidad en las pruebas, se ha considerado un método de comunicación básica a través de ficheros planos .txt o .csv. No obstante, podría aplicarse cualquier otro método.

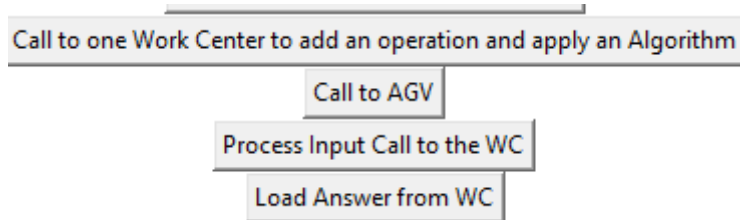


Figura 28: Opciones de llamada y procesamiento de respuestas para la comunicación entre centros de trabajo

- La funcionalidad del botón “Call to one Work Center to add an operation and apply an Algorithm” consiste en lo siguiente: Se introduce la operación finalizada en el centro de trabajo de una determinada operación y mediante el botón “Call to the WC” se le envía un fichero al centro de trabajo que tenga que ejecutar la siguiente operación de la orden de producción. El fichero generado se denomina “salida” y corresponde a un fichero .csv.

Send a Production Order Operation to one Work Center to be Planned with a specific Algorithm

Production Order	2279
Item Id	IT00001
Item Name	Item Name 001
Operation Number	20
Operation Code	POLISH
Work Center	WC02
Work Description	Trabajo Pulido
Process Time	0.7656
Importance	1
Delivery Date	72
Setup Time	1.0
Algorithm	ECF

---

salida

Archivo Editar Ver

```

ProdId,ItemId,ItemName,OpNumber,OpCode,WorkCenter,WorkDescription,ProcessTime,Importance,DeliveryDate,SetupTime,Algorithm
2279,IT00001,Item Name 001,20,FORMING,WC02,Trabajo conformado,0.7656,1,72,1.0,ECF

```

Figura 29: Pantalla para la comunicación entre centros de trabajo y fichero "salida" generado

En este fichero se le envía la nueva operación a realizar y un algoritmo a aplicar, por ejemplo “ECF”, para que, considerando dicha operación y el resto de las asignadas a ese centro de trabajo de destino, lleve a cabo la planificación de la producción aplicando dicho algoritmo. El objetivo final es una respuesta de dicho centro de trabajo.

- La funcionalidad del botón “Process Input Call to the WC” permite la recepción de la llamada del centro de trabajo inicial (de la operación 10) a través de la lectura del fichero “salida” en la cual se recibe una operación y la orden de aplicar un determinado algoritmo con dicha operación y el resto de

operaciones pendientes del centro de trabajo. Este botón hace la llamada a la librería “CalculateByWCSONAR” y como Resultado genera un fichero .csv de respuesta llamado “respuesta” al centro de trabajo que ha realizado la llamada con la programación de operaciones siguiendo ese algoritmo “ECF”.

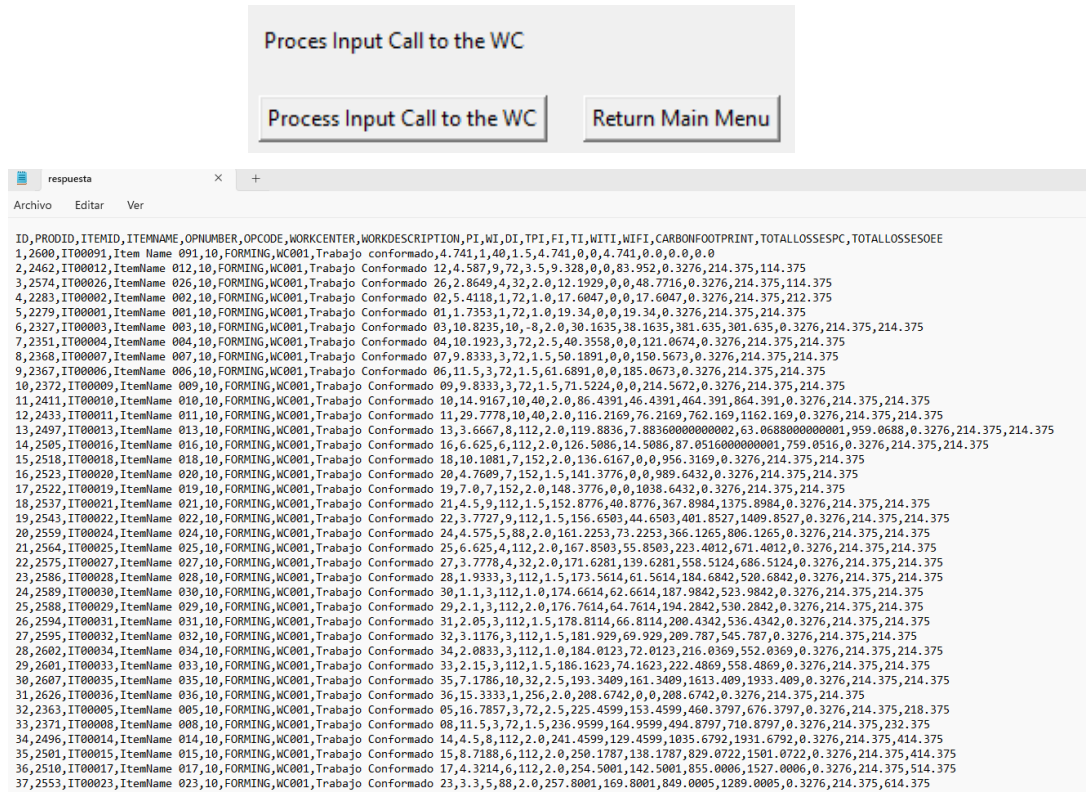


Figura 30: Pantalla para el procesamiento de la llamada, la aplicación del algoritmo por centro de trabajo ordenado y fichero de "respuesta" generado

El centro de trabajo 10 realizará llamadas tanto a los centros de trabajo alternativos de la operación 20 como a centros de trabajo de la operación 30, y así tendremos ficheros de “respuesta\_20” y “respuesta\_30” con los que poder aplicar posteriormente el algoritmo de Sonar Industrial.

- La funcionalidad del botón “Load Answer from WC” importa los ficheros de respuesta .csv de los distintos centros de trabajo “respuesta\_WC02\_20”, “respuesta\_WC03\_20”, “respuesta\_WC04\_30”, etc, y los carga en una tabla de la BBDD

para poder posteriormente procesar con ellos el Algoritmo de Sonar Industrial, ya bien sea para aplicar el Algoritmo de Johnson para optimizar el  $C_{max}$ , o algoritmos más avanzados que consideren y ponderen tanto el  $C_{max}$ , como las pérdidas de energía, como el tiempo de transporte entre centros.

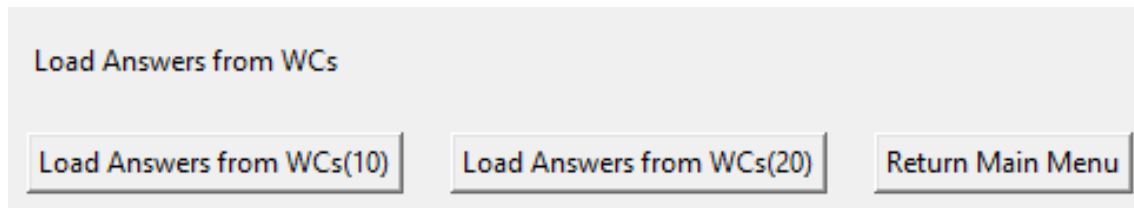


Figura 31: Pantalla para el procesamiento de los ficheros de respuesta de los distintos centros de trabajo

- La funcionalidad del botón “Call to AMR/AGV” permite enviar órdenes al AMR/AGV con las operaciones de producción a trasladar a otros centros de trabajo, así como recibir respuesta sobre su estado y tiempo de transporte entre centros para la posterior aplicación del algoritmo Sonar Industrial.

## 6.6 Diseño y desarrollo de la aplicación del algoritmo Sonar Industrial

- 5- Diseño y desarrollo de la aplicación del algoritmo Sonar Industrial:
  - La aplicación del algoritmo de Sonar Industrial propiamente dicha se realiza a través del botón “Process Industrial Sonar Algorithm”. Este proceso tiene en cuenta las respuestas de los centros de la operación 20 y 30 cargados previamente, y les aplica el Algoritmo Sonar Industrial. Se han considerado tres posibilidades de ejecución del algoritmo de Sonar Industrial con objeto de presentar los resultados y realizar las comparaciones;
    - La primera aplicando un algoritmo que optimice sólo  $C_{max}$ : Algoritmo de Johnson.

- La segunda aplicando un algoritmo que optimiza los costes de energía reduciendo las pérdidas de energía.
- Y, por último, un algoritmo más avanzado donde ya ponderamos tanto el Cmax, como las pérdidas de energía, como el tiempo de transporte a considerar en función de la disponibilidad de AMR/AGV correspondiente.

### Process Industrial Sonar Algorithm

Process Industrial Sonar																		
Process Industrial Sonar																		
view Industrial Sonar refresh																		
Export datos Industrial Sonar																		
Return Main Menu																		
ID	Proid	Itemid	Ite	OpCode	WorkCenter	WorkDescript	Process	Importa	DeliveryDate	SetupTime	Work Flow tin	Delay (Ti)	Wi-Ti	Wi-Fi	CARBONFOO	TOTALLOSSE	TOTALLOSSE	CMAX
1	2600	IT00091	Ite	10	FORMING	WC001	Trabajo confc	4.741	1	40	1.5	4.741	0.0	0.0	4.741	0.0	0.0	4.74
2	2462	IT00012	Ite	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	4.587	9	72	3.5	9.328	0.0	0.0	83.952	0.3276	214.375	114.375 184.19
3	2574	IT00026	Ite	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	2.8649	4	32	2.0	12.1929	0.0	0.0	48.7716	0.3276	214.375	114.375 121.92
4	2283	IT00002	Ite	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	5.4118	1	72	1.0	17.6047	0.0	0.0	17.6047	0.3276	214.375	212.375 194.36
5	2279	IT00001	Ite	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	1.7353	1	72	1.0	19.34	0.0	0.0	19.34	0.3276	214.375	214.375 7.58
6	2327	IT00003	Ite	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	10.8235	10	-8	2.0	30.1635	38.1635	381.635	301.635	0.3276	214.375	214.375 40.63
7	2351	IT00004	Ite	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	10.1923	3	72	2.5	40.3558	0.0	0.0	121.0674	0.3276	214.375	214.375 29.81
8	2368	IT00007	Ite	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	9.8333	3	72	1.5	50.1891	0.0	0.0	150.5673	0.3276	214.375	214.375 240.35
9	2367	IT00006	Ite	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	11.5	3	72	1.5	61.6891	0.0	0.0	185.0673	0.3276	214.375	214.375 52.13
10	2372	IT00009	Ite	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	9.8333	3	72	1.5	71.5224	0.0	0.0	214.5672	0.3276	214.375	214.375 250.18
11	2411	IT00010	Ite	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	14.9167	10	40	2.0	86.4391	46.4391	464.391	864.391	0.3276	214.375	214.375 78.55
12	2433	IT00011	Ite	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	29.7778	10	40	2.0	116.2169	76.2169	762.169	1162.169	0.3276	214.375	214.375 151.7
13	2497	IT00013	Ite	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	3.6667	8	112	2.0	119.8836	7.8836000000	63.0688000000	959.0688	0.3276	214.375	214.375 158.48
14	2505	IT00016	Ite	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	6.625	6	112	2.0	126.5086	14.5086	87.0516000000	759.0516	0.3276	214.375	214.375 200.99
15	2518	IT00018	Ite	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	10.1081	7	152	2.0	136.6167	0.0	0.0	956.3169	0.3276	214.375	214.375 19.62
16	2523	IT00020	Ite	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	4.7609	7	152	1.5	141.3776	0.0	0.0	988.6432	0.3276	214.375	214.375 188.95
17	2522	IT00019	Ite	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	7.0	7	152	2.0	148.3776	0.0	0.0	1038.6432	0.3276	214.375	214.375 214.61
18	2537	IT00021	Ite	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	4.5	9	112	1.5	152.8776	40.8776	367.8984	1375.8984	0.3276	214.375	214.375 170.53
19	2543	IT00022	Ite	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	3.7727	9	112	1.5	156.6503	44.6503	401.8527	1409.8527	0.3276	214.375	214.375 162.25
20	2559	IT00024	Ite	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	4.575	5	88	2.0	161.2253	73.2253	366.1265	806.1265	0.3276	214.375	214.375 179.6
21	2564	IT00025	Ite	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	6.625	4	112	2.0	167.8503	55.8503	223.4012	671.4012	0.3276	214.375	214.375 207.61
22	2575	IT00027	Ite	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	3.7778	4	32	2.0	171.6281	139.6281	558.5124	686.5124	0.3276	214.375	214.375 166.03
23	2586	IT00028	Ite	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	1.9333	3	112	1.5	173.5614	61.5614	184.6842	520.6842	0.3276	214.375	214.375 9.51
24	2589	IT00030	Ite	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	1.1	3	112	1.0	174.6614	62.6614	167.9842	523.9842	0.3276	214.375	214.375 5.84
25	2588	IT00029	Ite	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	2.1	3	112	2.0	176.7614	64.7614	194.2842	530.2842	0.3276	214.375	214.375 116.9

Figura 32: Pantalla para el procesamiento del algoritmo de Sonar Industrial, y resultados del algoritmo una vez procesado

## 6.7 Diseño y desarrollo de gráficas con los resultados

- 6- Diseño y desarrollo de gráficas con los resultados:
  - Para comparar los resultados de los tres escenarios o posibilidades de ejecución previamente comentados, se ha desarrollado la funcionalidad “Gráfica Matplotlib”, que permite representar de forma gráfica los resultados de aplicación del Algoritmo Sonar Industrial.

Gráfica Matplotlib Graphical comparison

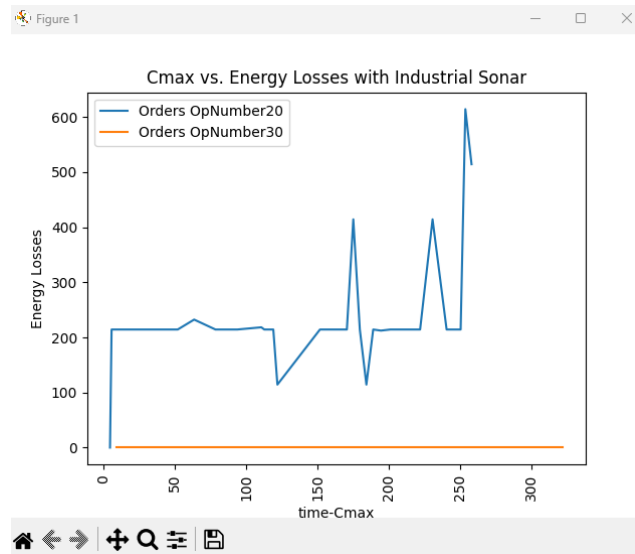


Figura 33: Pantalla para la presentación de la gráfica de comparación de Cmax vs. Energy Losses para los datos del algoritmo Sonar Industrial aplicado

## 6.8 Diseño y desarrollo de simulación animada del proceso

- 7- Diseño y desarrollo de simulación animada del proceso:
  - Finalmente, y únicamente como representación a nivel visual del proceso, se ha realizado con pygame una aplicación animada del proceso que se llevaría a cabo entre centros de trabajo en un taller de flujo de dos máquinas

Nota: dicha animación no está conectada en tiempo real con el algoritmo.

Draw

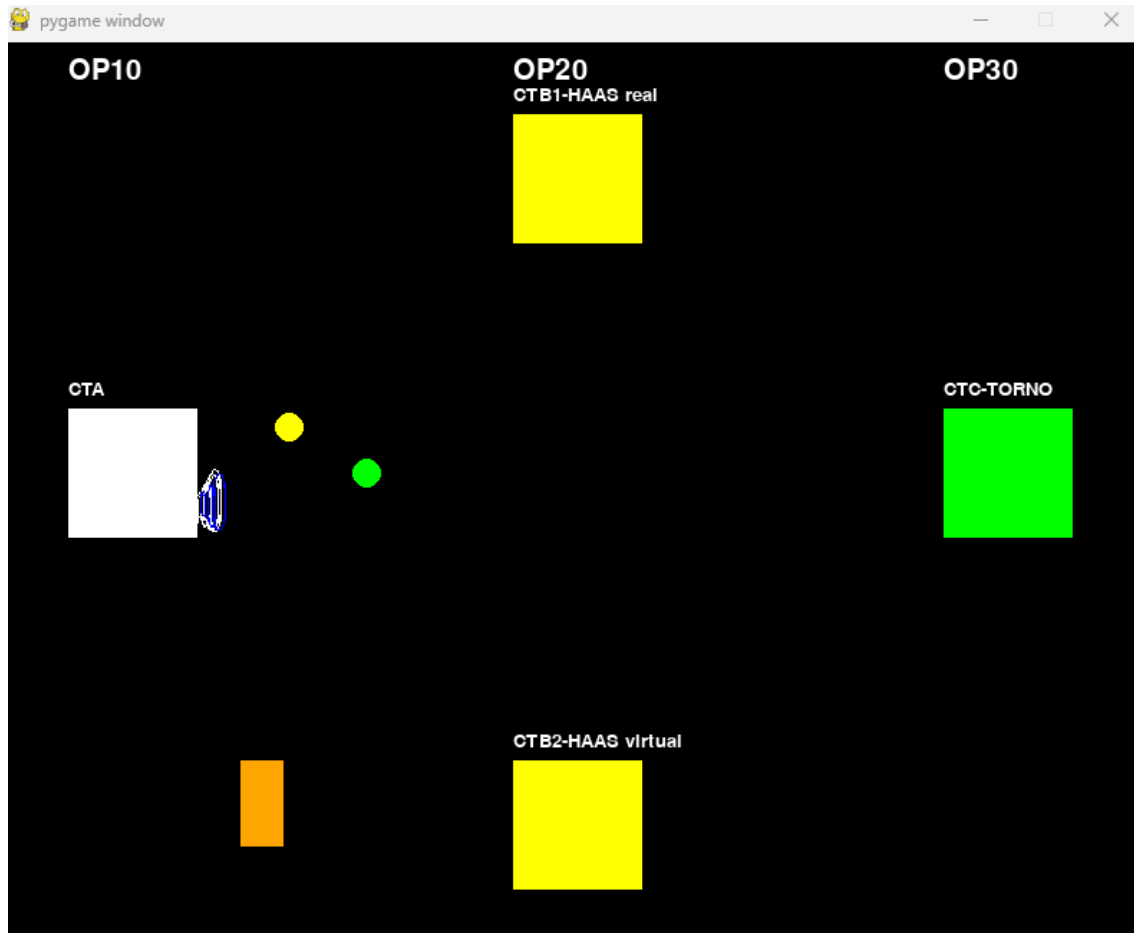


Figura 34: Representación animada del proceso llevado a cabo durante la aplicación del algoritmo de Sonar Industrial

## 7. Validación del modelo Sonar Industrial

### 7.1 Validación del modelo de Sonar Industrial: parada de máquina

Para la validación del modelo de Sonar Industrial se han tomado como referencia diversos trabajos con una fecha inicial y una fecha final previstas para los que se habían de realizar dos operaciones consecutivas en dos centros de trabajo diferentes (máquina CNC HaaS y el torno) con sus centros de trabajo alternativos. Durante la fabricación de estos trabajos se han forzado una serie de circunstancias para comprobar el modelo.

Por un lado, se ha forzado la circunstancia de una parada de máquina debida a una avería que ocurre el día 23/01/2024 a las 13:07 en la máquina CNC Haas, que afecta a los trabajos de ese día y, que obliga a que la planificación prevista ya no sea válida y sea necesaria una replanificación aplicando el algoritmo Sonar Industrial.

A continuación, se muestran las fechas de inicio y fin de dichos trabajos y cómo su planificación se ha visto afectada (Tabla 10). Se han producido modificaciones en la programación de una proporción considerable de trabajos. De los de 79 Trabajos programados en los distintos centros de trabajo, el 29%, es decir 23, se han visto afectados.

El modelo Sonar Industrial aplicado para el desvío automático de la carga de trabajo a centros de trabajo alternativos reprograma la producción minimizando esos retrasos (Tabla 11), consiguiendo mantener el tiempo total de fabricación próximo al  $C_{max}$  previo calculado, y manteniendo la fecha de finalización del 78% de los trabajos con desviación (18) en la fecha prevista.

- Previsto: 23/01/2024 10:01 hasta 26/01/2024 12:04
- Avería: hasta 26/01/2024 12:41
- Algoritmo: hasta 26/01/2024 12:24, se reduce en un 46% la desviación del  $C_{max}$ .

Trabajo	Fecha inicio previo a parada de máquina	Fecha fin previo a parada de máquina	Fecha inicio posterior a parada de máquina	Fecha fin posterior a parada de máquina
2252	24/01/2024 10:25	24/01/2024 11:16	25/01/2024 08:25	25/01/2024 09:16
2253	24/01/2024 11:17	24/01/2024 15:01	25/01/2024 09:17	25/01/2024 13:01
2254	24/01/2024 14:17	25/01/2024 08:11	25/01/2024 12:17	25/01/2024 14:10
2255	25/01/2024 08:01	25/01/2024 09:01	25/01/2024 13:14	25/01/2024 14:14
2281	23/01/2024 10:01	23/01/2024 10:52	24/01/2024 08:01	24/01/2024 08:52
2282	23/01/2024 10:53	24/01/2024 10:23	24/01/2024 08:53	25/01/2024 08:23
2283	23/01/2024 15:21	24/01/2024 11:08	25/01/2024 08:01	25/01/2024 11:46
2284	24/01/2024 09:38	24/01/2024 11:31	25/01/2024 10:16	25/01/2024 12:09
2285	25/01/2024 12:40	25/01/2024 15:01	25/01/2024 13:32	25/01/2024 15:53
2288	24/01/2024 10:56	24/01/2024 11:37	25/01/2024 11:34	25/01/2024 12:15
2289	24/01/2024 10:56	24/01/2024 11:37	25/01/2024 11:34	25/01/2024 12:15
2294	24/01/2024 15:03	24/01/2024 15:54	25/01/2024 13:03	25/01/2024 13:54
2295	24/01/2024 15:55	25/01/2024 10:26	25/01/2024 13:55	26/01/2024 08:26
2296	25/01/2024 10:27	25/01/2024 11:43	26/01/2024 08:27	26/01/2024 09:43
2297	25/01/2024 15:03	25/01/2024 15:44	26/01/2024 09:11	26/01/2024 09:52
2328	25/01/2024 10:28	25/01/2024 11:19	26/01/2024 08:28	26/01/2024 09:19
2329	25/01/2024 11:20	25/01/2024 13:49	26/01/2024 09:20	26/01/2024 11:49
2330	25/01/2024 13:04	25/01/2024 14:19	26/01/2024 11:04	26/01/2024 12:19
2331	25/01/2024 13:56	25/01/2024 14:34	26/01/2024 11:57	26/01/2024 12:35
2332	26/01/2024 11:17	26/01/2024 12:04	26/01/2024 09:29	26/01/2024 10:16
2333	26/01/2024 10:28	26/01/2024 11:15	26/01/2024 10:18	26/01/2024 11:05
2336	25/01/2024 14:42	25/01/2024 14:56	26/01/2024 12:27	26/01/2024 12:41
2337	25/01/2024 14:26	25/01/2024 14:40	26/01/2024 12:27	26/01/2024 12:41

Tabla 10: Trabajos afectados por la parada de la máquina CNC HaaS entre las 13:08 y las 15:53 horas del día 23/01/2024

Trabajo	Fecha inicio previo a parada de máquina	Fecha fin previo a parada de máquina	Fecha inicio posterior a parada de máquina	Fecha fin posterior a parada de máquina
2252	24/01/2024 10:25	24/01/2024 11:16	24/01/2024 10:45	24/01/2024 11:36
2253	24/01/2024 11:17	24/01/2024 15:01	24/01/2024 11:37	24/01/2024 15:21
2254	24/01/2024 14:17	25/01/2024 08:11	24/01/2024 14:37	25/01/2024 08:31
2255	25/01/2024 08:01	25/01/2024 09:01	25/01/2024 08:21	25/01/2024 09:21
2281	23/01/2024 10:01	23/01/2024 10:52	23/01/2024 10:21	23/01/2024 11:12
2282	23/01/2024 10:53	24/01/2024 10:23	23/01/2024 11:13	24/01/2024 10:43
2283	23/01/2024 15:21	24/01/2024 11:08	23/01/2024 15:41	24/01/2024 11:28
2284	24/01/2024 09:38	24/01/2024 11:31	24/01/2024 09:58	24/01/2024 11:51
2285	25/01/2024 12:40	25/01/2024 15:01	25/01/2024 13:00	25/01/2024 15:21
2288	24/01/2024 10:56	24/01/2024 11:37	24/01/2024 11:16	24/01/2024 11:57
2289	24/01/2024 10:56	24/01/2024 11:37	24/01/2024 11:16	24/01/2024 11:57
2294	24/01/2024 15:03	24/01/2024 15:54	24/01/2024 15:23	24/01/2024 15:59
2295	24/01/2024 15:55	25/01/2024 10:26	25/01/2024 08:35	25/01/2024 10:26
2296	25/01/2024 10:27	25/01/2024 11:43	25/01/2024 10:47	25/01/2024 12:03
2297	25/01/2024 15:03	25/01/2024 15:44	25/01/2024 15:18	25/01/2024 15:59
2328	25/01/2024 10:28	25/01/2024 11:19	25/01/2024 10:48	25/01/2024 11:19
2329	25/01/2024 11:20	25/01/2024 13:49	25/01/2024 11:40	25/01/2024 14:09
2330	25/01/2024 13:04	25/01/2024 14:19	25/01/2024 13:24	25/01/2024 14:39
2331	25/01/2024 13:56	25/01/2024 14:34	25/01/2024 14:16	25/01/2024 14:54
2332	26/01/2024 11:17	26/01/2024 12:04	26/01/2024 11:37	26/01/2024 12:24
2333	26/01/2024 10:28	26/01/2024 11:15	26/01/2024 10:48	26/01/2024 11:35
2336	25/01/2024 14:42	25/01/2024 14:56	25/01/2024 15:02	25/01/2024 15:16
2337	25/01/2024 14:26	25/01/2024 14:40	25/01/2024 14:46	25/01/2024 15:00

Tabla 11: Trabajos replanificados por algoritmo Sonar Industrial tras la parada de la máquina

## 7.2 Validación del modelo de Sonar Industrial: fallo entrega de suministro

Por otro lado, se ha forzado la circunstancia de un fallo en el suministro de una materia prima por retraso en la entrega por parte del proveedor. Este retraso obliga a que sea necesaria una replanificación aplicando el algoritmo Sonar Industrial.

A continuación, se muestran las fechas de inicio y fin de dichos trabajos y cómo su planificación se ha visto afectada. El modelo Sonar Industrial aplicado a centros de trabajo alternativos reprograma la producción adelantando los trabajos no afectados por dicha falta de material y retrasando o llevando a otros centros de trabajo los afectados por esos retrasos en el suministro:

De 119 trabajos programados, 49 (41%) se han visto afectados por la falta de material. De estos 49, 21 (43%) se han retrasado, y 28 se han adelantado. De ellos, 9 (18%) se han retrasado de día y 17 (35%) se han adelantado de día. Se valida un comportamiento adecuado del algoritmo Sonar Industrial, que además posibilita el desvío de todos los trabajos con dicha falta de material a un mismo centro de trabajo alternativo, para que sean procesados en dicho centro una vez se reciba el material, y de esta forma, no altere cualquier posible demora adicional al resto de la planificación establecida.

Trabajo	Fecha inicio previo al fallo en la entrega	Fecha fin previo al fallo en la entrega	Fecha inicio posterior al fallo en la entrega	Fecha fin posterior al fallo en la entrega
2244	26/01/2024 09:14	26/01/2024 10:44	26/01/2024 09:46	26/01/2024 11:16
2256	25/01/2024 08:15	25/01/2024 09:56	26/01/2024 08:01	26/01/2024 09:41
2257	25/01/2024 08:44	25/01/2024 10:14	26/01/2024 08:29	26/01/2024 09:59
2258	25/01/2024 08:51	25/01/2024 10:52	26/01/2024 08:36	26/01/2024 10:37
2259	25/01/2024 09:32	25/01/2024 11:13	26/01/2024 09:17	26/01/2024 10:58
2271	25/01/2024 09:58	25/01/2024 10:23	25/01/2024 08:15	25/01/2024 08:41
2272	25/01/2024 10:54	25/01/2024 12:47	25/01/2024 08:20	25/01/2024 10:13

2273	25/01/2024 11:47	25/01/2024 13:02	25/01/2024 09:13	25/01/2024 10:28
2279	25/01/2024 12:34	25/01/2024 13:04	25/01/2024 10:00	25/01/2024 10:31
2291	26/01/2024 12:34	26/01/2024 13:04	25/01/2024 14:31	25/01/2024 15:01
2292	27/01/2024 08:14	27/01/2024 08:44	26/01/2024 14:30	26/01/2024 15:01
2298	26/01/2024 08:09	26/01/2024 08:43	26/01/2024 09:43	26/01/2024 10:17
2299	26/01/2024 08:30	26/01/2024 09:01	26/01/2024 10:04	26/01/2024 10:34
2300	26/01/2024 09:13	26/01/2024 09:53	26/01/2024 10:39	26/01/2024 11:20
2301	26/01/2024 09:26	26/01/2024 10:00	26/01/2024 10:53	26/01/2024 11:27
2302	25/01/2024 10:25	25/01/2024 15:25	25/01/2024 08:43	25/01/2024 13:43
2303	25/01/2024 13:25	25/01/2024 15:30	25/01/2024 11:43	25/01/2024 13:48
2304	26/01/2024 13:22	26/01/2024 14:34	26/01/2024 11:40	26/01/2024 12:52
2305	25/01/2024 15:48	26/01/2024 14:05	25/01/2024 14:06	26/01/2024 12:23
2306	25/01/2024 15:27	25/01/2024 15:47	25/01/2024 13:45	25/01/2024 14:05
2322	25/01/2024 15:49	26/01/2024 08:07	25/01/2024 14:07	25/01/2024 14:24
2323	25/01/2024 15:54	26/01/2024 09:11	25/01/2024 14:12	25/01/2024 15:28
2324	26/01/2024 08:31	26/01/2024 09:21	25/01/2024 14:48	25/01/2024 15:38
2326	26/01/2024 09:06	26/01/2024 09:26	25/01/2024 15:22	25/01/2024 15:42
2338	31/01/2024 14:54	31/01/2024 15:31	31/01/2024 15:50	01/02/2024 08:28
2339	28/01/2024 09:33	28/01/2024 10:10	28/01/2024 10:28	28/01/2024 11:04
2345	26/01/2024 15:15	26/01/2024 15:56	27/01/2024 08:22	27/01/2024 09:02
2346	27/01/2024 08:07	27/01/2024 08:43	27/01/2024 10:33	27/01/2024 11:28
2347	27/01/2024 08:14	27/01/2024 09:02	27/01/2024 10:40	27/01/2024 11:28
2348	27/01/2024 08:27	27/01/2024 09:08	27/01/2024 10:53	27/01/2024 11:34
2349	26/01/2024 08:45	26/01/2024 14:46	26/01/2024 10:19	27/01/2024 08:20
2350	26/01/2024 12:26	26/01/2024 14:56	27/01/2024 08:01	27/01/2024 10:31
2351	27/01/2024 14:16	27/01/2024 15:42	27/01/2024 15:12	28/01/2024 08:39
2352	26/01/2024 15:13	27/01/2024 14:44	27/01/2024 08:10	27/01/2024 15:40
2353	26/01/2024 14:48	26/01/2024 15:13	25/01/2024 14:26	25/01/2024 14:50
2354	27/01/2024 09:31	27/01/2024 09:58	25/01/2024 15:19	26/01/2024 08:12
2355	26/01/2024 15:35	27/01/2024 08:49	25/01/2024 14:34	25/01/2024 15:46
2359	27/01/2024 08:45	27/01/2024 09:46	25/01/2024 14:33	25/01/2024 15:34

2361	27/01/2024 09:21	27/01/2024 09:58	25/01/2024 15:09	25/01/2024 15:46
2363	24/01/2024 15:57	25/01/2024 08:39	25/01/2024 13:50	25/01/2024 14:31
2368	26/01/2024 15:28	27/01/2024 08:05	25/01/2024 08:29	25/01/2024 09:05
2369	26/01/2024 15:58	27/01/2024 09:19	25/01/2024 14:52	25/01/2024 15:12
2370	27/01/2024 09:04	27/01/2024 10:34	26/01/2024 11:22	26/01/2024 12:52
2371	27/01/2024 09:54	27/01/2024 10:55	26/01/2024 12:12	26/01/2024 13:13
2372	27/01/2024 10:25	27/01/2024 10:58	25/01/2024 15:35	26/01/2024 08:09
2373	27/01/2024 10:35	27/01/2024 10:59	26/01/2024 12:53	26/01/2024 13:17
2379	27/01/2024 10:41	27/01/2024 11:38	27/01/2024 10:53	27/01/2024 11:50
2380	27/01/2024 10:41	27/01/2024 11:38	27/01/2024 08:52	27/01/2024 09:49
2382	27/01/2024 10:41	27/01/2024 11:38	27/01/2024 08:52	27/01/2024 09:49

Tabla 12: Trabajos afectados por el fallo en la entrega de suministros de materia prima reprogramados por el algoritmo Sonar Industrial

## 8. Resultados

### 8.1 Implementación y aplicación del algoritmo Sonar Industrial

Se realiza el análisis de los resultados obtenidos mediante el método de Sonar Industrial sobre un proceso de fabricación real, que consiste en una secuencia de operaciones realizadas en dos centros de trabajo diferentes: una máquina de control numérico (CNC) Haas y un torno. Cada una de estas máquinas dispone de un centro de trabajo alternativo.

Se ha desarrollado un método basado en Python para programar tareas de producción en el centro de trabajo. Este método secuencia las tareas de operación de producción de un centro de trabajo basándose en datos históricos sobre las pérdidas de producción anteriores del artículo en el centro de trabajo.

A partir de estos datos históricos el sistema captura las pérdidas de energía en base a piezas, pérdidas de energía basado en OEE (eficacia general del equipo) y la huella de carbono. Estos datos son considerados en el cálculo del algoritmo (Figuras 35 y 36).

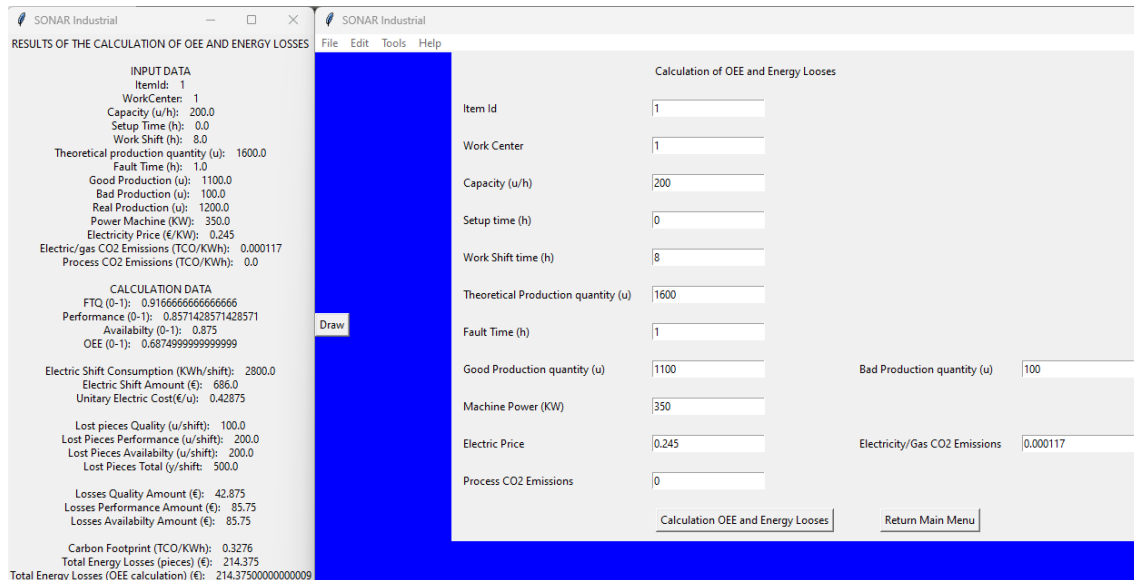


Figura 35: Pérdidas de energía calculadas para el artículo y el centro de trabajo

Esta figura ilustra un ejemplo de las pérdidas de energía calculadas para un artículo y centro de trabajo, con los distintos términos del cálculo detallados: las pérdidas de energía en base a piezas, pérdidas de energía basadas en OEE (efectividad general del equipo) y la huella de carbono.

ID	Ita	W	Ci	Se	W	Theoretical F	Fa	Good Prods	Bad Product	Real Product	Power Mach	Electricity Pr	Electricity Pr	FTO (0-1)	P-Performance	A-Availability	OEE (0-1)	Electric Shift	Electric Shift	Unitary Elect	Lost Pieces C	Lost Pieces F	Lost Pieces J	Lost Pieces T	Losses Qual	Losses Perf	Losses Avail	CARBONFOOT	TOT	TC	
1	IT	W	20	01	81	1600.0	1.1	1100.0	100.0	1200.0	350.0	0.245	0.000117	0.1	0.91666	0.8571428	0.875	0.687499	2000.0	686.0	0.42875	100.0	200.0	200.0	500.0	42.875	85.75	85.75	0.3276	214	21

Figura 36: Datos históricos sobre cálculos de pérdida de energía de los elementos del centro de trabajo

Esta figura presenta un ejemplo de datos históricos registrados en los cálculos de pérdidas de energía para los artículos en el centro de trabajo. Estos datos históricos son considerados por el algoritmo para programar las operaciones de producción por pérdidas de energía.

Se ha diseñado y desarrollado una estrategia de comunicación en Python para facilitar el Intercambio de solicitudes y respuestas entre centros de trabajo. La estrategia consiste en enviar datos de la orden de producción a centros de trabajo alternativos para la siguiente operación, con una solicitud de aplicar un algoritmo específico basado en la combinación del SPT y las pérdidas de energía según criterios OEE, algoritmo ECF (Figura 37).

ID	ProdId	Itemid	ItemName	OpNum	OpCode	WorkCenter	WorkDescript	ProcessT	Importar	DeliveryDate	SetupTime	Work Flow tin	Delay (Ti)	WpTi	WpFi	CARBONFOO	TOTALLOSSESPC	TOTALLOSSESOE
1	2462	IT00012	ItemName 012	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	4.587	9	72	3.5	4.587	0	0	41.283	0.3276	214.375	114.375
2	2574	IT00026	ItemName 026	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	2.8649	4	32	2.0	7.4519	0	0	29.8076	0.3276	214.375	114.375
3	2283	IT00002	ItemName 002	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	5.4118	1	72	1.0	12.8637	0	0	12.8637	0.3276	214.375	214.375
4	2279	IT00001	ItemName 001	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	1.7333	1	72	1.0	14.599	0	0	14.599	0.3276	214.375	214.375
5	2327	IT00003	ItemName 003	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	10.8235	10	-8	2.0	25.4225	33.4225	334.225	254.225	0.3276	214.375	214.375
6	2351	IT00004	ItemName 004	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	10.1923	3	72	2.5	35.8148	0	0	106.8444	0.3276	214.375	214.375
7	2368	IT00007	ItemName 007	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	9.8333	3	72	1.5	45.4481	0	0	136.3443	0.3276	214.375	214.375
8	2367	IT00006	ItemName 006	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	11.5	3	72	1.5	56.9481	0	0	170.8443	0.3276	214.375	214.375
9	2372	IT00009	ItemName 009	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	9.8333	3	72	1.5	66.7814	0	0	200.3442	0.3276	214.375	214.375
10	2411	IT00010	ItemName 010	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	14.9167	10	40	2.0	81.6981	41.6981	416.981	816.981	0.3276	214.375	214.375
11	2433	IT00011	ItemName 011	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	29.7778	10	40	2.0	111.4759	71.4759	714.759	1114.759	0.3276	214.375	214.375
12	2497	IT00013	ItemName 013	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	3.6667	8	112	2.0	115.1426	3.1426000000	25.1408000000	921.1408	0.3276	214.375	214.375
13	2505	IT00016	ItemName 016	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	6.625	6	112	2.0	121.7676	9.7676000000	58.6056000000	730.6056	0.3276	214.375	214.375
14	2518	IT00018	ItemName 018	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	10.1081	7	152	2.0	131.8757	0	0	923.1299	0.3276	214.375	214.375
15	2523	IT00020	ItemName 020	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	4.7609	7	152	1.5	136.6366	0	0	956.4562	0.3276	214.375	214.375
16	2522	IT00019	ItemName 019	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	7.0	7	152	2.0	143.6366	0	0	1005.4562	0.3276	214.375	214.375
17	2537	IT00021	ItemName 021	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	4.5	9	112	1.5	148.1366	36.1366	325.2294	1333.2294	0.3276	214.375	214.375
18	2543	IT00022	ItemName 022	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	3.7727	9	112	1.5	151.9093	39.9093	359.1837	1367.1837	0.3276	214.375	214.375
19	2559	IT00024	ItemName 024	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	4.575	5	88	2.0	156.4843	68.4843	342.4215	782.4215	0.3276	214.375	214.375
20	2564	IT00025	ItemName 025	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	6.625	4	112	2.0	163.1093	51.1093	204.4372	652.4372	0.3276	214.375	214.375
21	2575	IT00027	ItemName 027	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	3.7778	4	32	2.0	166.8871	134.8871	539.5484	667.5484	0.3276	214.375	214.375
22	2586	IT00028	ItemName 028	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	1.9333	3	112	1.5	168.8204	56.8204	170.4612	506.4612	0.3276	214.375	214.375
23	2589	IT00030	ItemName 030	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	1.1	3	112	1.0	169.8204	57.8204	173.7612	509.7612	0.3276	214.375	214.375
24	2588	IT00029	ItemName 029	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	2.1	3	112	2.0	172.0204	60.0204	180.0612	516.0612	0.3276	214.375	214.375
25	2594	IT00031	ItemName 031	10	FORMING	WC001	Trabajo Confc	2.05	3	112	1.5	174.0704	62.0704	186.2112	522.2112	0.3276	214.375	214.375

Figura 37: Secuencia de tareas de producción ordenadas según criterios solicitados de pérdidas de energía

Esta figura muestra un ejemplo de la secuencia de tareas de producción devueltas por un centro de trabajo de la siguiente operación, ordenado según los criterios solicitados de SPT + pérdidas de energía basadas en OEE, algoritmo ECF). Estos datos son resultado de la Comunicación 1.

Simultáneamente, los datos de producción se comunican a los centros de trabajo de la subsiguiente operación (la siguiente de la siguiente operación) solicitando la aplicación de un algoritmo específico que combina el SPT y las pérdidas de energía según criterios OEE (Figura 38).

ID	ProdId	Itemid	ItemName	OpNum	OpCode	WorkCenter	WorkDescript	ProcessT	Importar	DeliveryDate	SetupTime	Work Flow tin	Delay (Ti)	WpTi	WpFi	CARBONFOO	TOTALLOSSESPC	TOTALLOSSESOE
1	2462	IT00012	ItemName 012	20	FINISH	WC002	Trabajo Acabu	4.587	9	72	3.5	4.587	0	0	41.283	0.3276	214.375	114.375
2	2574	IT00026	ItemName 026	20	FINISH	WC002	Trabajo Acabu	2.8649	4	32	2.0	7.4519	0	0	29.8076	0.3276	214.375	114.375
3	2283	IT00002	ItemName 002	20	FINISH	WC002	Trabajo Acabu	5.4118	1	72	1.0	12.8637	0	0	12.8637	0.3276	214.375	214.375
4	2279	IT00001	ItemName 001	20	FINISH	WC002	Trabajo Acabu	1.7333	1	72	1.0	14.599	0	0	14.599	0.3276	214.375	214.375
5	2327	IT00003	ItemName 003	20	FINISH	WC002	Trabajo Acabu	10.8235	10	-8	2.0	25.4225	33.4225	334.225	254.225	0.3276	214.375	214.375
6	2351	IT00004	ItemName 004	20	FINISH	WC002	Trabajo Acabu	10.1923	3	72	2.5	35.8148	0	0	106.8444	0.3276	214.375	214.375
7	2368	IT00007	ItemName 007	20	FINISH	WC002	Trabajo Acabu	9.8333	3	72	1.5	45.4481	0	0	136.3443	0.3276	214.375	214.375
8	2367	IT00006	ItemName 006	20	FINISH	WC002	Trabajo Acabu	11.5	3	72	1.5	56.9481	0	0	170.8443	0.3276	214.375	214.375
9	2372	IT00009	ItemName 009	20	FINISH	WC002	Trabajo Acabu	9.8333	3	72	1.5	66.7814	0	0	200.3442	0.3276	214.375	214.375
10	2411	IT00010	ItemName 010	20	FINISH	WC002	Trabajo Acabu	14.9167	10	40	2.0	81.6981	41.6981	416.981	816.981	0.3276	214.375	214.375
11	2433	IT00011	ItemName 011	20	FINISH	WC002	Trabajo Acabu	29.7778	10	40	2.0	111.4759	71.4759	714.759	1114.759	0.3276	214.375	214.375
12	2497	IT00013	ItemName 013	20	FINISH	WC002	Trabajo Acabu	3.6667	8	112	2.0	115.1426	3.1426000000	25.1408000000	921.1408	0.3276	214.375	214.375
13	2505	IT00016	ItemName 016	20	FINISH	WC002	Trabajo Acabu	6.625	6	112	2.0	121.7676	9.7676000000	58.6056000000	730.6056	0.3276	214.375	214.375
14	2518	IT00018	ItemName 018	20	FINISH	WC002	Trabajo Acabu	10.1081	7	152	2.0	131.8757	0	0	923.1299	0.3276	214.375	214.375
15	2523	IT00020	ItemName 020	20	FINISH	WC002	Trabajo Acabu	4.7609	7	152	1.5	136.6366	0	0	956.4562	0.3276	214.375	214.375
16	2522	IT00019	ItemName 019	20	FINISH	WC002	Trabajo Acabu	7.0	7	152	2.0	143.6366	0	0	1005.4562	0.3276	214.375	214.375
17	2537	IT00021	ItemName 021	20	FINISH	WC002	Trabajo Acabu	4.5	9	112	1.5	148.1366	36.1366	325.2294	1333.2294	0.3276	214.375	214.375
18	2543	IT00022	ItemName 022	20	FINISH	WC002	Trabajo Acabu	3.7727	9	112	1.5	151.9093	39.9093	359.1837	1367.1837	0.3276	214.375	214.375
19	2559	IT00024	ItemName 024	20	FINISH	WC002	Trabajo Acabu	4.575	5	88	2.0	156.4843	68.4843	342.4215	782.4215	0.3276	214.375	214.375
20	2564	IT00025	ItemName 025	20	FINISH	WC002	Trabajo Acabu	6.625	4	112	2.0	163.1093	51.1093	204.4372	652.4372	0.3276	214.375	214.375
21	2575	IT00027	ItemName 027	20	FINISH	WC002	Trabajo Acabu	3.7778	4	32	2.0	166.8871	134.8871	539.5484	667.5484	0.3276	214.375	214.375
22	2586	IT00028	ItemName 028	20	FINISH	WC002	Trabajo Acabu	1.9333	3	112	1.5	168.8204	56.8204	170.4612	506.4612	0.3276	214.375	214.375
23	2589	IT00030	ItemName 030	20	FINISH	WC002	Trabajo Acabu	1.1	3	112	1.0	169.8204	57.8204	173.7612	509.7612	0.3276	214.375	214.375
24	2588	IT00029	ItemName 029	20	FINISH	WC002	Trabajo Acabu	2.1	3	112	2.0	172.0204	60.0204	180.0612	516.0612	0.3276	214.375	214.375
25	2594	IT00031	ItemName 031	20	FINISH	WC002	Trabajo Acabu	2.05	3	112	1.5	174.0704	62.0704	186.2112	522.2112	0.3276	214.375	214.375

Figura 38: Tareas de producción ordenadas según criterios (OEE + tiempo de transporte)

Esta figura muestra un ejemplo de la secuencia de tareas de producción devueltas por un centro de trabajo. para la operación que sigue a la operación actual (la siguiente operación) con un orden específico basado en los criterios solicitados (SPT-OEE + tiempo de transporte). Estos datos son resultado de la Comunicación 2.

Como ejemplo de planificación en tiempo real, se aplica el algoritmo Industrial Sonar a los datos anteriores. Este algoritmo está diseñado para reducir el makespan y los costes de energía. Se incluye un cálculo en el algoritmo para reducir el tiempo de transporte de los AMR entre centros de trabajo. Se obtienen los siguientes resultados (Figura 39).

ID	Preld	Itemid	Itemh	OpNo	OpCode	WorkCenter	WorkDescript	Process	Imports	DeliveryDate	SetupTime	Work Flow tir	Delay (Ti)	Wt*Ti	Wt*Fi	CARBONFOO	TOTALLOSS	TOTA	CMAJ
124	2575	IT00027	Itemh	20	FINISH	WC002	Trabajo Acab.	3.7778	4	32	2.0	33.6516	1.6516	6.6064000000	134.6064	None	None	None	291.41
125	2510	IT00017	Itemh	20	FINISH	WC002	Trabajo Acab.	4.3214	6	112	2.0	37.973	0.0	0.0	227.838	None	None	None	295.71
126	2496	IT00014	Itemh	20	FINISH	WC002	Trabajo Acab.	4.5	8	112	2.0	42.473	0.0	0.0	339.784	None	None	None	300.21
127	2537	IT00021	Itemh	20	FINISH	WC002	Trabajo Acab.	4.5	9	112	1.5	46.973	0.0	0.0	422.757	None	None	None	304.71
128	2559	IT00024	Itemh	20	FINISH	WC002	Trabajo Acab.	4.575	5	88	2.0	51.548	0.0	0.0	257.74	None	None	None	309.31
129	2462	IT00012	Itemh	20	FINISH	WC002	Trabajo Acab.	4.587	9	72	3.5	56.135	0.0	0.0	505.215	None	None	None	313.91
130	2600	IT00091	Item I	20	FINISH	WC002	Trabajo Acab.	4.741	1	40	1.5	60.876	20.876	20.876	60.876	None	None	None	318.61
131	2523	IT00020	Itemh	20	FINISH	WC002	Trabajo Acab.	4.7609	7	152	1.5	65.6369	0.0	0.0	459.4583	None	None	None	323.41
132	2283	IT00002	Itemh	20	FINISH	WC002	Trabajo Acab.	5.4118	1	72	1.0	71.0487	0.0	0.0	71.0487	None	None	None	328.81
133	2505	IT00016	Itemh	20	FINISH	WC002	Trabajo Acab.	6.625	6	112	2.0	77.6737	0.0	0.0	466.0422	None	None	None	335.41
134	2564	IT00025	Itemh	20	FINISH	WC002	Trabajo Acab.	6.625	4	112	2.0	84.2987	0.0	0.0	337.1948	None	None	None	342.01
135	2522	IT00019	Itemh	20	FINISH	WC002	Trabajo Acab.	7.0	7	152	2.0	91.2987	0.0	0.0	639.0909	None	None	None	349.01
136	2607	IT00035	Itemh	20	FINISH	WC002	Trabajo Acab.	7.1786	10	32	2.5	98.4773	66.4773	664.773	984.773	None	None	None	356.21
137	2501	IT00015	Itemh	20	FINISH	WC002	Trabajo Acab.	8.7188	6	112	2.0	107.1961	0.0	0.0	643.1766	None	None	None	364.91
138	2368	IT00007	Itemh	20	FINISH	WC002	Trabajo Acab.	9.8333	3	72	1.5	117.0294	45.0294	135.0882	351.0882	None	None	None	374.81
139	2372	IT00009	Itemh	20	FINISH	WC002	Trabajo Acab.	9.8333	3	72	1.5	126.8627	54.8627	164.5881	380.5881	None	None	None	384.61
140	2518	IT00018	Itemh	20	FINISH	WC002	Trabajo Acab.	10.1081	7	152	2.0	136.9708	0.0	0.0	958.7956	None	None	None	394.71
141	2351	IT00004	Itemh	20	FINISH	WC002	Trabajo Acab.	10.1923	3	72	2.5	147.1631	75.1631	225.4893	441.4893	None	None	None	404.91
142	2327	IT00003	Itemh	20	FINISH	WC002	Trabajo Acab.	10.8235	10	-8	2.0	157.9866	165.9866	1659.866	1579.866	None	None	None	415.71
143	2367	IT00006	Itemh	20	FINISH	WC002	Trabajo Acab.	11.5	3	72	1.5	169.4866	97.4866	292.4598	508.4598	None	None	None	427.21
144	2371	IT00008	Itemh	20	FINISH	WC002	Trabajo Acab.	11.5	3	72	1.5	180.9866	108.9866	326.9598	542.9598	None	None	None	438.71
145	2411	IT00010	Itemh	20	FINISH	WC002	Trabajo Acab.	14.9167	10	40	2.0	195.9033	155.9033	1559.033	1959.033	None	None	None	453.71
146	2626	IT00036	Itemh	20	FINISH	WC002	Trabajo Acab.	15.3333	1	256	2.0	211.2366	0.0	0.0	211.2366	None	None	None	469.01
147	2363	IT00005	Itemh	20	FINISH	WC002	Trabajo Acab.	16.7857	3	72	2.5	228.0223	156.0223	468.0669	684.0669	None	None	None	485.81

Figura 39: Resultado del algoritmo Sonar Industrial utilizando el software 'Sonar Industrial' desarrollado en Python

Esta figura muestra el resultado de aplicar el algoritmo de Sonar Industrial desarrollado en Python para probar la hipótesis de esta investigación, con los datos devueltos por las comunicaciones con los centros de trabajo en las Figuras 37 y 38.

## 8.2 Comparativa de los resultados del algoritmo Sonar Industrial analizando su aplicación en diferentes escenarios

Los siguientes gráficos ilustran la relación entre los objetivos de Cmax y las pérdidas de energía (Figura 40). La solución óptima se compara bajo los tres escenarios previamente descritos con tres condiciones diferentes:

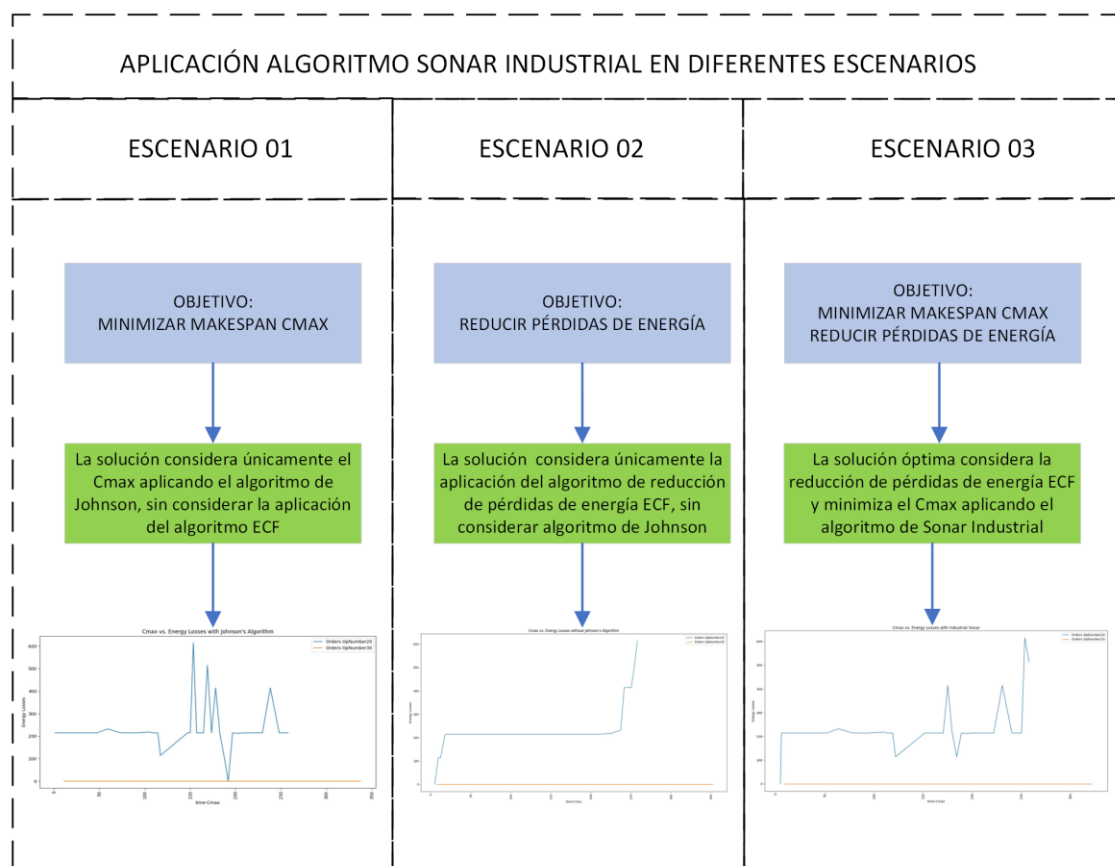


Figura 40: Diferentes escenarios de aplicación de algoritmo Sonar Industrial para su comparativa

- Escenario 01: En primer lugar, considerando únicamente el objetivo de Cmax (minimizar el makespan).
- Escenario 02: En segundo lugar, considerando sólo el orden de las pérdidas de energía.

- Escenario 03: Finalmente, considerando ambos objetivos, minimizando  $C_{max}$  y ordenando por Pérdidas de energía, mediante la aplicación del Algoritmo de Sonar Industrial

**Escenario 01:** La solución óptima considera únicamente el objetivo de  $C_{max}$  utilizando el algoritmo de Johnson (Figura 41).

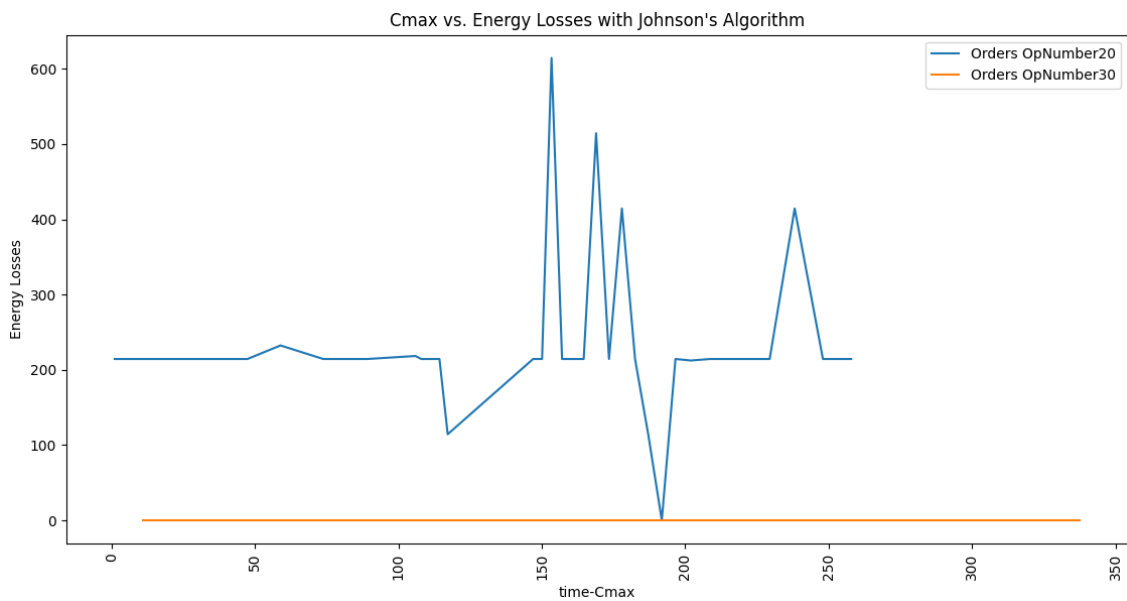


Figura 41: Gráfico de la aplicación del algoritmo de Johnson para optimizar  $C_{max}$

Esta figura muestra la relación entre los objetivos de  $C_{max}$  y la pérdida de energía en el centro de trabajo para todas las operaciones programadas aplicando el algoritmo de Johnson. En este caso, en la aplicación del algoritmo de Johnson, solo se realiza la optimización de los valores de  $C_{max}$ .

**Escenario 02:** La solución óptima considerando sólo el objetivo de pérdidas de energía, sin aplicar el criterio de  $C_{max}$  que aporta el algoritmo de Johnson se muestra en la Figura 42.

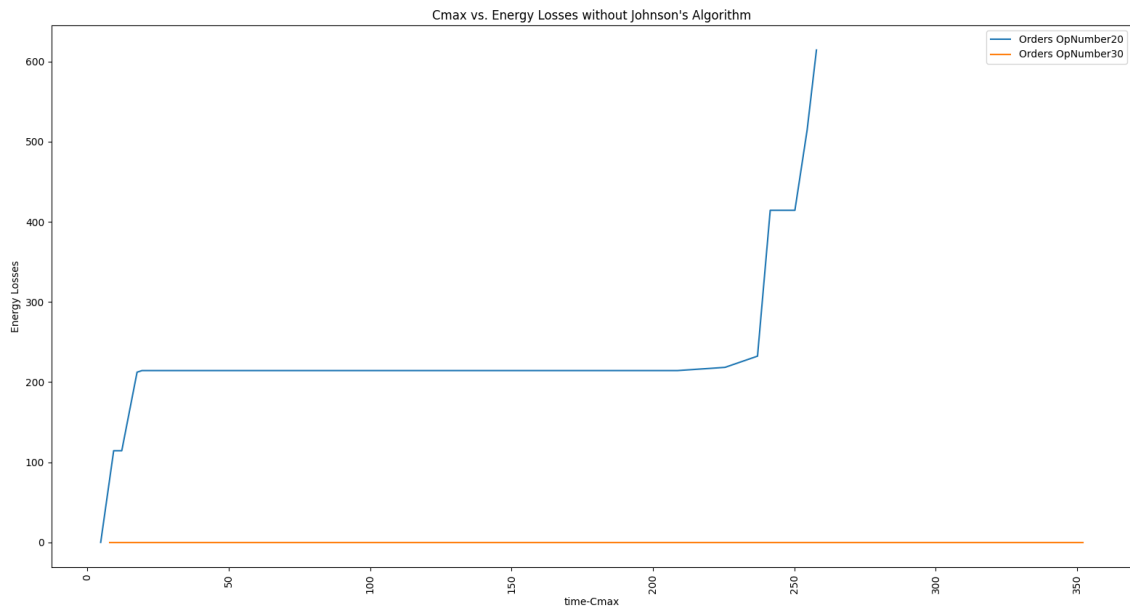


Figura 42: Gráfico de la aplicación del algoritmo para reducir y optimizar las pérdidas de energía

Esta figura muestra la relación entre Cmax y los objetivos de pérdida de energía en el centro de trabajo para todas las operaciones programadas, aplicando un algoritmo para reducir y optimizar las pérdidas energéticas.

**Escenario 03:** La solución óptima propuesta considerando tanto el objetivo de reducir Cmax como las pérdidas de energía utilizando el algoritmo de Sonar Industrial se muestran en la Figura 43.

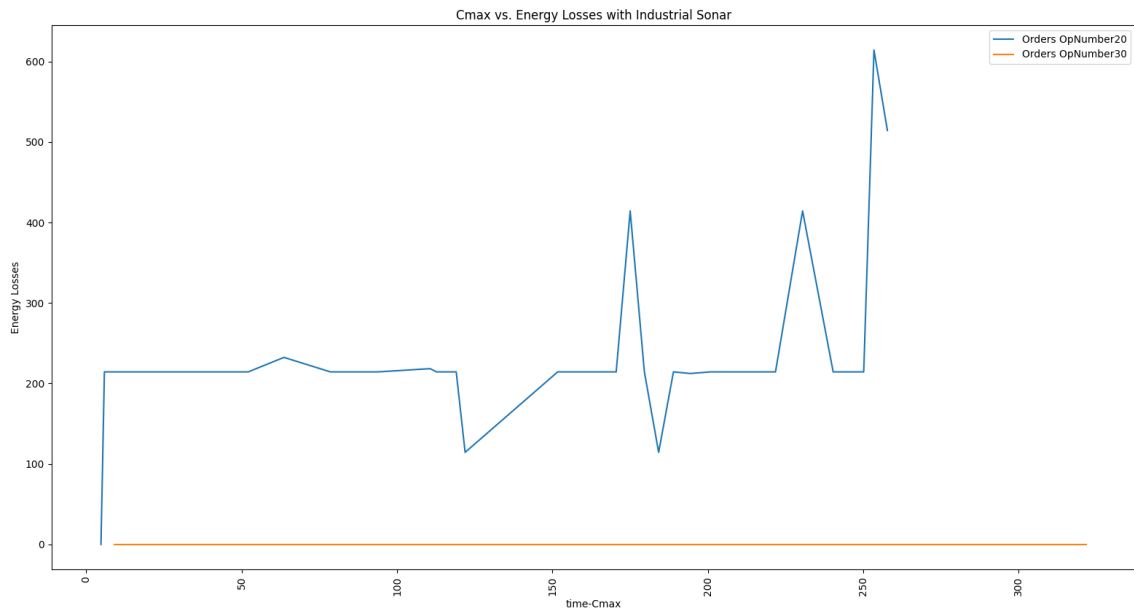


Figura 43: Gráfico de la aplicación del algoritmo Sonar Industrial para reducir y optimizar el Cmax y las pérdidas de energía

Esta figura muestra la relación entre Cmax y los objetivos de pérdida de energía en el centro de trabajo para todas las operaciones programadas, aplicando un algoritmo de Sonar Industrial para reducir y optimizar el Cmax, la pérdida de energía y el tiempo de transporte.

A través de las Figuras 41, 42 y 43 se puede realizar un análisis comparativo de ellas para contrastar sus errores con respecto a la solución óptima de cada variable.

Se observa que la Figura 43, que aplica el algoritmo de Sonar Industrial, utiliza un Cmax ligeramente superior (2%) para completar las operaciones de producción respecto a la figura 41, en la que se aplica el algoritmo de Johnson. Sin embargo, como contrapartida se puede conseguir una distribución más uniforme de las operaciones para optimizar el consumo energético y minimizar las pérdidas de energía. Para lograr esto, se recomienda distribuir las operaciones en rangos horarios con menor coste de energía (tarifa horaria). En este caso, se consigue ubicar más del 50% de las operaciones con mayores pérdidas de energía en una tarificación horaria más adecuada.

Comparando la Figura 43 con la Figura 42, que sólo considera las pérdidas de energía, podemos ver que la distribución de las operaciones por pérdidas de energía es

ligeramente menos uniforme respecto a la distribución horaria. Sin embargo, este enfoque conduce a una mayor aproximación al  $C_{max}$  óptimo obtenida en la Figura 41.

## 8.3 Implementación de la estrategia de Sensor de Planificación y comparativa de resultados

Se realiza el análisis de los resultados aplicando el Algoritmo de Sonar Industrial en la estrategia de colocación de un sensor de planificación vinculado a los contenedores de trabajo en curso de producción. Estos resultados se obtuvieron en un entorno de producción real de una industria de máquina herramienta, en el que se ejecutaron diferentes operaciones de producción para fabricar diferentes piezas mecanizadas. La secuencia de operaciones considerada fue una operación de conformado 10 realizada en un centro de trabajo de control numérico (CNC) y una segunda operación de acabado 20 realizada en el centro de trabajo de torno.

Para contrastar los resultados se ha desarrollado un Algoritmo ECF en Python para secuenciar operaciones de producción en función de diferentes criterios. Estos incluyen la secuenciación:

1. en base a las pérdidas de energía en base a la OEE,
2. en base a la huella de carbono,
3. o en función de secuenciarlas ponderando ambos criterios.

Posteriormente se empleó el Algoritmo de Sonar Industrial ISA desarrollado en Python para ponderar los resultados del análisis de pérdidas de energía y huella de carbono antes mencionado, combinado con el objetivo de optimizar  $C_{max}$ .

En el Centro de trabajo 1 se cargaron datos de una serie de operaciones de producción, junto con un conjunto de datos basado en un historial de cálculo de OEE. Este conjunto de datos incluye las correspondientes pérdidas de energía en función del OEE obtenido,

así como la huella de carbono. Se ha llevado a cabo un proceso similar para el Centro de trabajo 2. La Figura 44 y la Figura 45 ilustran la entrada de datos.

ID	Prod	ItemId	ItemName	OpNumber	OpCode	WorkCenter	WorkDescript	ProcessTime (	Weight/Impo	Work Delivery	SetupTime (
1	2171	CA00001	Cap 001	10	SHAPING	WC001	Shaping 01	0.7361	1	72	1.0
2	2133	CA00002	Cap 002	10	SHAPING	WC001	Shaping 02	4.3218	1	72	1.0
3	2327	AD00003	Adapter 003	10	SHAPING	WC001	Shaping 03	7.8435	10	-8	2.0
4	2451	AD00004	Adapter 004	10	SHAPING	WC001	Shaping 04	6.6323	3	72	2.5
5	2363	CA00005	Cap 005	10	SHAPING	WC001	Shaping 05	14.2857	3	72	2.5
6	2368	CA00007	Cap 007	10	SHAPING	WC001	Shaping 07	8.3332	3	72	1.5
7	2567	CA00006	Cap 006	10	SHAPING	WC001	Shaping 06	10.0	3	72	1.5
8	2171	BR00008	Bracket 008	10	SHAPING	WC001	Shaping 08	11.2	3	72	1.5
9	2672	BR00009	Bracket 009	10	SHAPING	WC001	Shaping 09	8.3333	3	72	1.5
10	2111	BR00010	Bracket 010	10	SHAPING	WC001	Shaping 10	12.9167	10	40	2.0
11	2433	BR00011	Bracket 011	10	SHAPING	WC001	Shaping 11	27.7778	10	40	2.0
12	2442	SP00012	Sonar part 01	10	SHAPING	WC001	Shaping 12	1.087	9	72	3.5
13	2297	CA00013	Cap 013	10	SHAPING	WC001	Shaping 13	1.6667	8	112	2.0
14	2492	CA00014	Cap 014	10	SHAPING	WC001	Shaping 14	2.5	8	112	2.0
15	2503	CA00015	Cap 015	10	SHAPING	WC001	Shaping 15	6.7188	6	112	2.0
16	2525	SP00016	Sonar part 01	10	SHAPING	WC001	Shaping 16	4.625	6	112	2.0
17	2520	SP00017	Sonar part 01	10	SHAPING	WC001	Shaping 17	2.3214	6	112	2.0
18	2318	SH00018	Shaft 018	10	SHAPING	WC001	Shaping 18	8.1081	7	152	2.0
19	2323	SH00020	Shaft 020	10	SHAPING	WC001	Shaping 20	3.2609	7	152	1.5
20	2542	BR00019	Bracket 019	10	SHAPING	WC001	Shaping 19	4.0	7	152	2.0
21	2337	BR00021	Bracket 021	10	SHAPING	WC001	Shaping 21	3.0	9	112	1.5
22	2443	CA00022	Cap 022	10	SHAPING	WC001	Shaping 22	2.2727	9	112	1.5
23	2453	AD00023	Adapter 023	10	SHAPING	WC001	Shaping 23	1.8	5	88	2.0
24	2555	AD00024	Adapter 024	10	SHAPING	WC001	Shaping 24	2.575	5	88	2.0
25	2544	CA00025	Cap 025	10	SHAPING	WC001	Shaping 25	4.625	4	112	2.0

Figura 44: Datos de operaciones de órdenes de producción a realizarse en centro de trabajo wc001

ID	ItemId	WorkCent	Capo	Setup1	WorkGr	Theoretic	Fault Ti	Good Produ	Bad Product	Real Power	Power Mach	Electric	Electric(gas C	Process CO2	FTQ (g-1)	P- Performa	A-Avalabi	OE (D	Electric	Unitary	Lost Pw	Lost Pw	Lost Pw	Losses	Losses	Losses	CARBONFC	TOTALLOSSE	TOTAL		
1	CA00001	WC001	2001	0.0	8.0	1440.0	1.0	1131.0	50.0	1181.0	350.0	0.245	0.000117	0.0003	0.957663	0.973701	0.875	0.7854	2800.0	686.0	0.47638	50.0	79.0	180.0	309.0	23.8194	37.6347	85.75	0.3279	142.204	147.204
2	CA00002	WC001	1701	0.0	8.0	1360.0	1.0	1166.0	65.0	1166.0	350.0	0.245	0.000117	0.0001	0.944254	0.979831	0.875	0.80991	2800.0	686.0	0.50441	65.0	24.0	170.0	259.0	32.7867	10.1058	85.75	0.3277	130.6426	130.642
3	AD00003	WC001	1901	0.0	8.0	1520.0	1.0	1080.0	98.0	1178.0	350.0	0.245	0.000117	0.0002	0.916881	0.885714	0.875	0.7105	2800.0	686.0	0.45131	98.0	152.0	190.0	440.0	44.2289	68.6	85.75	0.3278	198.5789	198.578
4	AD00004	WC001	2001	0.0	8.0	1600.0	1.0	1232.0	65.0	1297.0	350.0	0.245	0.000117	0.0001	0.949884	0.950428	0.875	0.77	2800.0	686.0	0.42875	65.0	103.0	200.0	368.0	27.8807	44.1612	85.75	0.3277	157.78	157.78
5	CA00005	WC001	1911	0.0	8.0	1576.0	1.0	1215.0	80.0	1295.0	350.0	0.245	0.000117	0.0002	0.938214	0.939086	0.875	0.7786	2800.0	686.0	0.45238	80.0	84.0	191.0	361.0	34.8233	36.5634	85.75	0.3278	157.157	157.157
6	CA00007	WC001	1751	0.0	8.0	1400.0	1.0	1078.0	90.0	1168.0	350.0	0.245	0.000117	0.0001	0.932945	0.935469	0.875	0.77	2800.0	686.0	0.49	90.0	57.0	175.0	322.0	44.1	27.83	85.75	0.3278	157.78	157.78
7	BR00008	WC001	2101	0.0	8.0	1680.0	1.0	1200.0	78.0	1278.0	350.0	0.245	0.000117	0.0002	0.939867	0.889387	0.875	0.7142	2800.0	686.0	0.40833	78.0	192.0	210.0	480.0	31.8499	78.4	85.75	0.3278	196.0	196.0
8	BR00009	WC001	1911	0.0	8.0	1520.0	1.0	1045.0	102.0	1147.0	350.0	0.245	0.000117	0.0001	0.91107	0.857991	0.875	0.6839	2800.0	686.0	0.44895	102.0	190.0	191.0	483.0	45.7932	65.301	85.75	0.3277	216.8442	216.844
9	BR00010	WC001	1911	0.0	8.0	1520.0	1.0	1110.0	75.0	1185.0	350.0	0.245	0.000117	0.0002	0.939709	0.881312	0.875	0.7155	2800.0	686.0	0.4974	75.0	180.0	195.0	450.0	32.9607	70.1538	85.75	0.3279	197.8848	197.884
10	BR00011	WC001	1911	0.0	8.0	1520.0	1.0	1034.0	61.0	1095.0	350.0	0.245	0.000117	0.0002	0.94429	0.86604	0.875	0.71802	2800.0	686.0	0.47638	61.0	165.0	180.0	406.0	29.0597	78.6041	85.75	0.3278	193.4138	193.413
11	SP00012	WC001	2051	0.0	8.0	1640.0	1.0	1200.0	100.0	1300.0	350.0	0.245	0.000117	0.0001	0.920207	0.809923	0.875	0.7317	2800.0	686.0	0.41828	100.0	135.0	205.0	440.0	41.8282	56.4895	85.75	0.3277	184.6487	184.648
12	CA00013	WC001	2001	0.0	8.0	1600.0	1.0	1130.0	78.0	1208.0	350.0	0.245	0.000117	0.0001	0.93943	0.86235	0.875	0.7062	2800.0	686.0	0.42875	78.0	192.0	200.0	470.0	33.4423	62.32	85.75	0.3277	201.5125	201.512
13	CA00014	WC001	1941	0.0	8.0	1552.0	1.0	1082.0	85.0	1172.0	350.0	0.245	0.000117	0.0002	0.927878	0.86671	0.875	0.7036	2800.0	686.0	0.442	85.0	181.0	194.0	460.0	37.5708	60.8038	85.75	0.3278	203.2447	203.244
14	CA00015	WC001	2001	0.0	8.0	1600.0	1.0	1100.0	100.0	1200.0	350.0	0.245	0.000117	0.0002	0.916662	0.857442	0.875	0.68748	2800.0	686.0	0.42875	100.0	200.0	200.0	500.0	42.875	65.75	85.75	0.3279	214.375	214.375
15	SP00016	WC001	1801	0.0	8.0	1440.0	1.0	1131.0	50.0	1181.0	350.0	0.245	0.000117	0.0003	0.957563	0.973701	0.875	0.7854	2800.0	686.0	0.47638	50.0	79.0	180.0	309.0	23.8194	37.6347	85.75	0.3279	147.204	147.204
16	SP00017	WC001	1701	0.0	8.0	1360.0	1.0	1166.0	65.0	1166.0	350.0	0.245	0.000117	0.0001	0.944254	0.979831	0.875	0.80991	2800.0	686.0	0.50441	65.0	24.0	170.0	259.0	32.7867	10.1058	85.75	0.3277	130.6426	130.642
17	SH00018	WC001	1911	0.0	8.0	1520.0	1.0	1080.0	98.0	1178.0	350.0	0.245	0.000117	0.0002	0.916881	0.885714	0.875	0.7105	2800.0	686.0	0.45131	98.0	152.0	190.0	440.0	44.2289	68.6	85.75	0.3278	198.5789	198.578
18	SH00020	WC001	2001	0.0	8.0	1600.0	1.0	1232.0	65.0	1297.0	350.0	0.245	0.000117	0.0001	0.949884	0.950428	0.875	0.77	2800.0	686.0	0.42875	65.0	103.0	200.0	368.0	27.8807	44.1612	85.75	0.3277	157.78	157.78
19	BR00019	WC001	1911	0.0	8.0	1520.0	1.0	1110.0	75.0	1185.0	350.0	0.245	0.000117	0.0002	0.939709	0.881312	0.875	0.7155	2800.0	686.0	0.4974	75.0	180.0	195.0	450.0	32.9607	70.1538	85.75	0.3279	197.8848	197.884
20	SH00020	WC001	1911	0.0	8.0	1520.0	1.0	1045.0	102.0	1147.0	350.0	0.245	0.000117	0.0001	0.91107	0.857991	0.875	0.6839	2800.0	686.0	0.44895	102.0	190.0	191.0	483.0	45.7932	65.301	85.75	0.3277	216.8442	216.844
21	BR00021	WC001	1751	0.0	8.0	1400.0	1.0	1078.0	90.0	1168.0	350.0	0.245	0.000117	0.0002	0.932945	0.935469	0.875	0.77	2800.0	686.0	0.49	90.0	57.0	175.0	322.0	44.1	27.83	85.75	0.3278	157.78	157.78
22	CA00022	WC001	2101	0.0	8.0	1680.0	1.0	1200.0	78.0	1278.0	350.0	0.245	0.000117	0.0002	0.939867	0.889387	0.875	0.7142	2800.0	686.0	0.40833	78.0	192.0	210.0	480.0	31.8499	78.4	85.75	0.3278	196.0	196.0
23	AD00023	WC001	1951	0.0	8.0	1560.0	1.0	1110.0	75.0	1185.0	350.0	0.245	0.000117	0.0003	0.939709	0.881312	0.875	0.7155	2800.0	686.0	0.4974	75.0	180.0	195.0	450.0	32.9607	70.1538	85.75	0.3279	197.8848	197.884
24	AD00024	WC001	1951	0.0	8.0	1560.0	1.0	1110.0	75.0	1185.0	350.0	0.245	0.000117	0.0002	0.94429	0.86604	0.875	0.71802	2800.0	686.0	0.47638	61.0	165.0	180.0	406.0	29.0597	78.6041	85.75	0.3278	193.4138	193.413
25	CA00025	WC001	1801	0.0	8.0	1440.0	1.0	1131.0	50.0	1181.0	350.0	0.245	0.000117	0.0003	0.957563	0.973701	0.875	0.7854	2800.0	686.0	0.47638	50.0	79.0	180.0	309.0	23.8194	37.6347	85.75	0.3279	147.204	147.204

Figura 45: Datos históricos de pérdidas de energía y huella de carbono

La estrategia es la siguiente: en el lugar de trabajo se dispusieron varios contenedores para recibir las piezas de trabajo que sirven como materia prima o producto semielaborado en WIP. En cada uno de estos contenedores se colocó un dispositivo IoT

Configuración y Readaptación Inteligente de Software para la Transmisión e Interacción de Algoritmos.

que se utiliza como Sensor de Planificación. En su entrada al centro de trabajo, este sensor de planificación ha recibido la información del dispositivo IoT del centro de trabajo con la información de la operación de producción, así como toda la información que debe controlar el sensor de planificación. A pesar de su tamaño relativamente pequeño, estos dispositivos IoT son capaces de ejecutar el software desarrollado en Python correspondiente a los algoritmos anteriormente indicados, así como de comunicarse en todo momento con los dispositivos correspondientes de cada centro de trabajo.

Durante el proceso productivo se emplearon estos sensores de planificación para monitorizar los controles de tolerancia en base a la información proporcionada por el centro de trabajo. Además, se utilizaron para monitorizar posibles señales que les puedan enviar desde el centro de trabajo o desde una conexión externa autorizada. De esta manera, se realizaron determinadas simulaciones para que los sensores de planificación disparasen de forma automática y sin intervención humana la llamada al Algoritmo de Sonar Industrial ISA, que se encarga de realizar las llamadas a los correspondientes centros de trabajo de la operación y la posterior operación. Esto se hace con el objetivo de buscar una opción de planificación alternativa en tiempo real.

La simulación se realizó implementando el algoritmo ECF en las tres opciones mencionadas anteriormente, en combinación con el algoritmo Industrial Sonar. Los datos resultantes se presentan a continuación.

La siguiente figura (Figura 46) presenta los resultados de aplicar el algoritmo ECF para secuenciar operaciones de producción basadas en el algoritmo Johnson y las pérdidas de energía, medidas por la OEE (efectividad general del equipo).

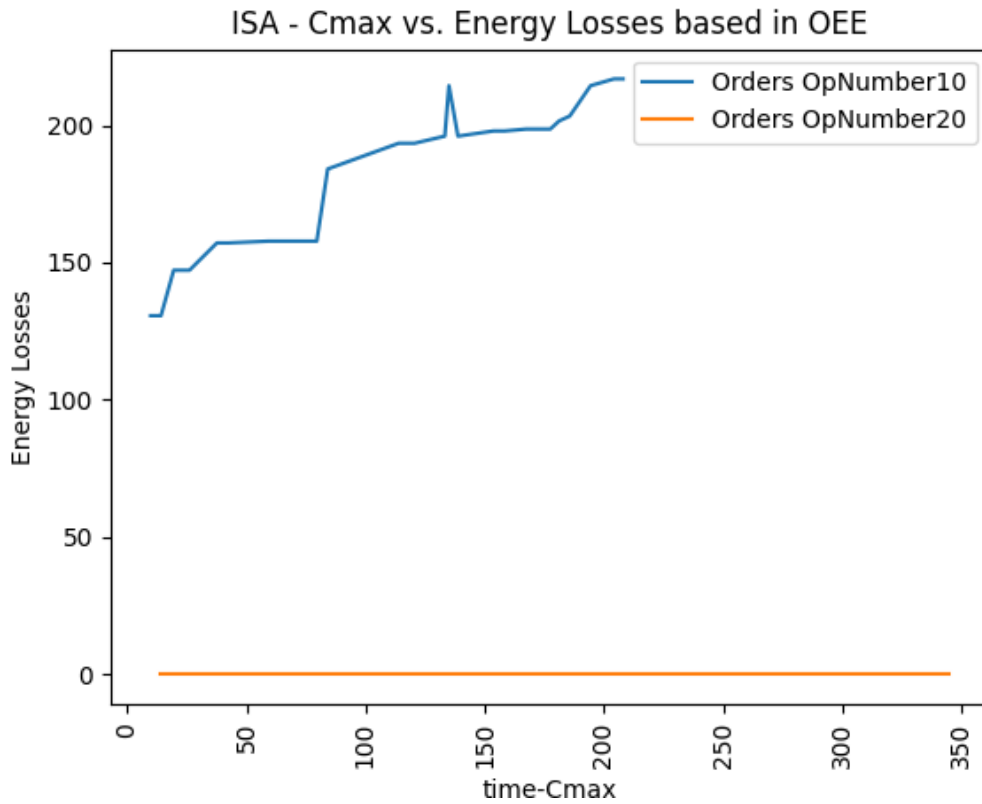


Figura 46: Gráfico de evolución de las pérdidas de energía vs. Cmax en el centro de trabajo wc001 secuenciado basándose en la aplicación de la ponderación de ECF+algoritmo de Johnson

La siguiente figura (Figura 47) muestra los resultados de la secuenciación del algoritmo ECF en función de la huella de carbono.

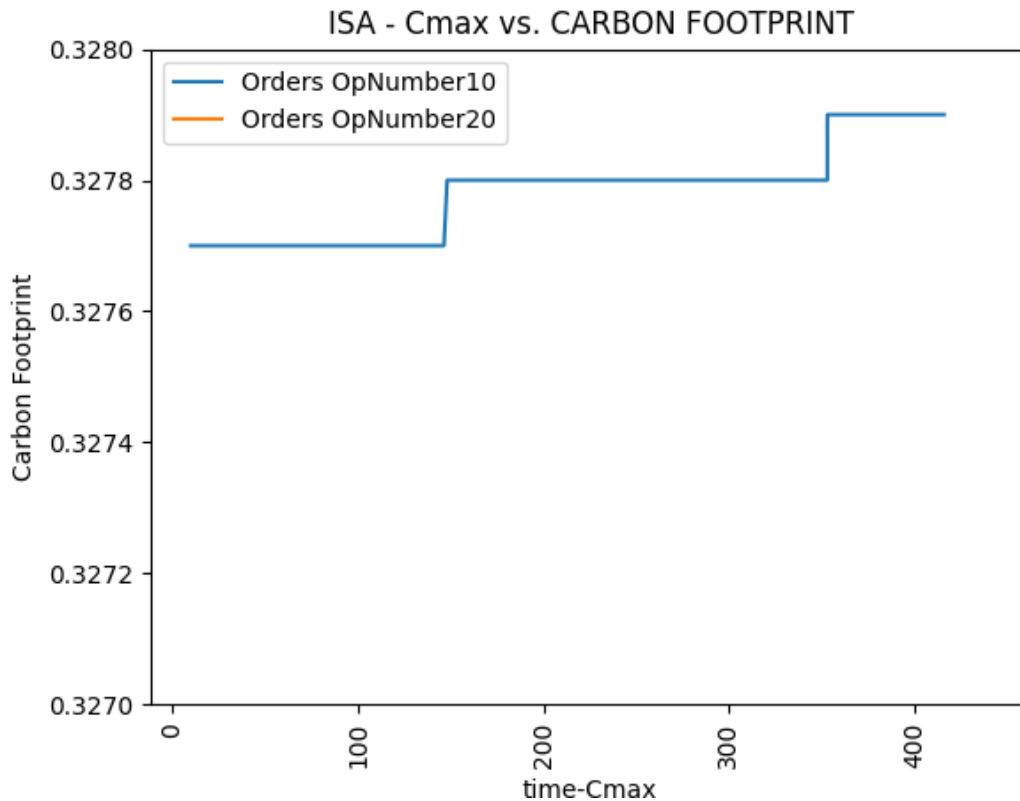


Figura 47: Gráfico de la evolución de la huella de carbono vs. Cmax en el centro de trabajo wc001 secuenciado basado en la aplicación de forma ponderada de ECF+algoritmo de Johnson

Una comparación de las Figuras 46 y 47 revela que la optimización de Cmax es superior cuando se aplica la secuenciación basada en el algoritmo ECF para pérdidas de energía por OEE que aplicándolo por Huella de carbono. En estos casos, se secuenció las operaciones de producción basándose en el algoritmo de Johnson y las pérdidas de energía. En cualquier caso, es posible comparar la huella de carbono con las pérdidas de energía basadas en OEE para conocer su relación, lo cual se refleja en la siguiente figura (Figura 48).

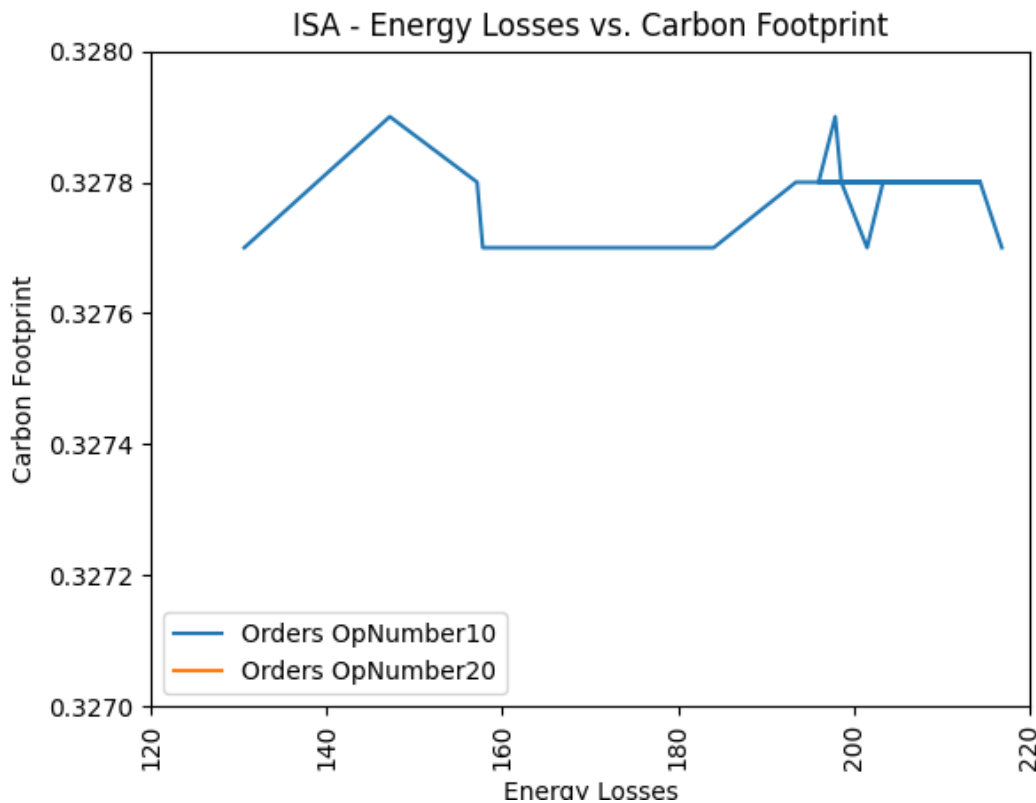


Figura 48: Pérdidas de energía vs. huella de carbono en el centro de trabajo wc001 con una secuenciación basada en la aplicación de ECF+algoritmo de Johnson

## 8.4 Comparativa de los resultados del algoritmo Sonar Industrial respecto a un ejemplo de algoritmo genético

Se ha realizado la comparativa de los resultados del algoritmo Sonar Industrial analizados en el Escenario 03 de los puntos 8.1 y 8.2 respecto a un ejemplo de algoritmo genético multiobjetivo que trata de minimizar el makespan y reducir las pérdidas de energía. Se ha seleccionado un algoritmo genético desarrollado en Python basado en la librería PyGAD, una biblioteca Python de código abierto para implementar el algoritmo genético y entrenar algoritmos de aprendizaje automático.

El objetivo de este algoritmo de ejemplo es doble. Por un lado, sirve para generar una planificación inicial de la secuencia de órdenes de producción en los distintos centros de trabajo basada en los objetivos de minimizar el makespan y reducir las pérdidas de energía, y de esta forma demostrar la posibilidad de colaboración del algoritmo Sonar Industrial con otros algoritmos heurísticos. Y, por otro lado, sirve para comparar la planificación en tiempo real de algoritmo Sonar Industrial con la planificación de dicho algoritmo genético, para así analizar y poder estimar las diferencias de los resultados desde tres perspectivas distintas: a nivel de rapidez, de flexibilidad y a nivel eficacia (Sonar Industrial vs. Algoritmo Genético). Estas perspectivas se analizan en distintos escenarios en función de la concurrencia de un número de circunstancias no previstas que obligan a modificar la producción. Podemos comprobar que los beneficios del algoritmo Sonar Industrial mejoran cuando mayor es el número de incidencias que sucedan durante la producción.

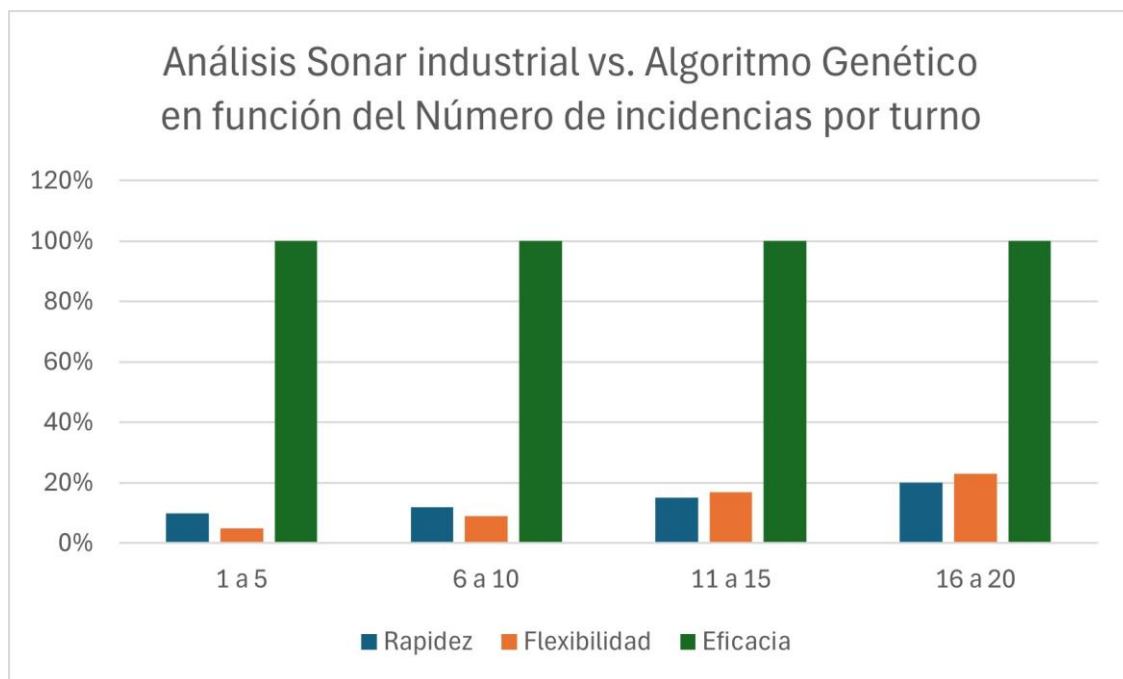


Figura 49: Análisis del rendimiento de aplicación del algoritmo Sonar Industrial respecto a un ejemplo de algoritmo genético

Se ha analizado la rapidez en base al tiempo de respuesta de las distintas ejecuciones de los algoritmos. Se estudia el porcentaje de reducción de tiempo conseguido. De esta

forma, se identifican reducciones del 10% de tiempo cuando se producen entre 1 y 5 incidencias, 12% entre 6 y 10, 15% entre 11 y 15, y un 19% entre 16 y 20. Se detecta que a mayor número de circunstancias que obligan a replanificar, menor tiempo total se emplea en la ejecución de los algoritmos en el caso del algoritmo Sonar industrial.

Se compara la flexibilidad teniendo en cuenta el número de operaciones de los distintos centros de trabajo que ven afectados su planificación tras cada ejecución. Se estudia el porcentaje de reducción de operaciones que sufren modificaciones conseguido. De esta forma, se identifica una reducción de las afecciones del 5% cuando se producen entre 1 y 5 incidencias, 9% entre 6 y 10, 17% entre 11 y 15, y un 23% entre 16 y 20. Se detecta que a mayor número de circunstancias mayor es la flexibilidad del algoritmo Sonar Industrial.

Se analiza la eficacia en base a los resultados de la reducción del tiempo total de fabricación makespan y las pérdidas de energía obtenidas. Se estudia el porcentaje en que la ejecución del algoritmo Sonar Industrial ha obtenido mejores resultados respecto al algoritmo genético estudiado, obteniendo el 100%, es decir mejor resultado en todos los casos analizados.

Esta comparativa entre algoritmos requiere de un mayor estudio para analizar el rendimiento del algoritmo Sonar Industrial respecto a otros algoritmos heurísticos más evolucionados, pero señala que, en términos de rapidez, flexibilidad y eficacia, su uso puede ser beneficioso para dar soluciones a la planificación en tiempo real de los entornos de producción.

## 9. Conclusiones y desarrollos futuros

### 9.1 Conclusiones

En el trabajo de investigación de esta tesis se propone una **nueva estrategia** de simulación de **ecolocalización** con el fin de establecer un método capaz de resolver problemas de **planificación en tiempo real**. Este método aprovecha las posibilidades que ofrecen las nuevas tecnologías en términos de adquisición y comunicación de datos en tiempo real, de forma que aporta siempre soluciones óptimas. Este enfoque o método puede utilizarse tanto como alternativa o como complemento a los métodos ya utilizados en la literatura en planificación dinámica para resolver este problema. Tanto usado como alternativa, como empleado como complemento, la aportación que ofrece, es que, en lugar de desarrollar algoritmos heurísticos, que por definición sólo pueden proporcionar soluciones aproximadas al problema, se utiliza un algoritmo que siempre busca la **solución óptima** en cada momento.

Se ha desarrollado un **algoritmo de Sonar Industrial** que se utiliza para optimizar la programación de producción en diferentes centros de trabajo cumpliendo con los siguientes objetivos: reducir el makespan, reducir el tiempo de transporte de los AMR, y disminuir los costes energéticos y la huella de carbono. De esta forma, este trabajo presenta una nueva metodología de planificación en tiempo real que combina diferentes estrategias para reducir los tiempos de producción y transporte, minimizar los costes de energía y disminuir la huella de carbono. Y, por lo tanto, responde a un vacío en la literatura al integrar estas variables y objetivos para analizar y estudiar alternativas de programación de la producción que incorporen aspectos operativos y sostenibles a los entornos productivos.

Además, esta nueva estrategia puede utilizarse como estrategia correctiva, para responder a las dificultades que puedan surgir durante la producción, y también como

herramienta predictiva y preventiva de simulación para diseñar procesos de producción más flexibles y capaces de reaccionar rápidamente ante cualquier circunstancia.

Por otro lado, el algoritmo Sonar Industrial propone una **estrategia flexible** que se puede aplicar a cualquier tipo de empresa o industria, adaptándose a las especificidades de cada negocio pudiendo seleccionar para cada empresa el método de comunicación más adecuado y la forma más apropiada de combinación de algoritmos en cada centro de trabajo.

En este trabajo de investigación se ha desarrollado un **algoritmo** que se puede utilizar para optimizar la planificación de operaciones en el centro de trabajo en base a los criterios de reducción de la huella de carbono, **reducción de pérdidas de energía** en base al historial de piezas fabricadas, y reducción de pérdidas en base al desempeño histórico calculado. Esta optimización permite secuenciar las operaciones en función de dichos criterios, y además situarlas en aquellas franjas horarias en las que suponen una mayor reducción del coste energético total.

El algoritmo desarrollado en este trabajo contribuye a alcanzar los objetivos de desarrollo sostenible a través de la innovación aportada, promoviendo el consumo y la producción responsables, dentro de la respuesta global para luchar contra el cambio climático intentando reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

Paralelamente, se ha realizado una **comparativa** del algoritmo de optimización de pérdidas de energía y huella de carbono con varios tipos de algoritmos de planificación de operaciones por Centro de Trabajo, con el fin de demostrar los beneficios que aporta su uso.

Esta investigación propone un concepto de sensor novedoso, el **sensor de planificación**, inspirado en el uso del algoritmo de sonar industrial. Este algoritmo combina algoritmos existentes desarrollados por centros de trabajo con algoritmos diseñados para la planificación conjunta de múltiples centros de trabajo. El concepto de sensor de planificación, desarrollado con dispositivos IoT básicos y de bajo coste,

ilustra su funcionamiento. Este concepto abre la puerta a una planificación en tiempo real que no requiere de intervención humana.

La investigación desarrollada en esta tesis supone un “**puente**” que **conecta** los **algoritmos** de primera generación desarrollados para entornos de Trabajo de una sola máquina, como puedan ser Algoritmo SPT, o el Algoritmo de Hodgson, con algoritmos más complejos desarrollados para entornos de Trabajo de máquinas multipropósito (MPM) como puedan ser el Algoritmo de Johnson o los Algoritmos genéticos. Este puente o conexión de ambas tipologías de algoritmos viene a rellenar el hueco existente en la literatura entre ambas tipologías de algoritmos y abre todo un mundo de posibilidades de interconexión que hasta estos momentos no se había explorado. Así mismo, plantea múltiples ejemplos para su combinación, alguno de las cuales se han expuesto a lo largo de esta tesis.

Este trabajo de investigación abre nuevos horizontes en el tratamiento de los algoritmos que actúan en la optimización de las rutas de los **vehículos autónomos** como puedan ser AGV-Autonomous Guided Vehicles, AMR-Autonomous Mobile Robots, AUV-Autonomous Underwater Vehicles, UUV-Unmanned Underwater Vehicles. La multitud de posibilidades de variación de comportamiento que pueden darse en determinados entornos de trabajo en los que actúan estos vehículos, hace que la flexibilidad que proporciona el uso del algoritmo de Sonar Industrial que propone esta tesis, sea un hito fundamental en la implantación de algoritmos que gestione la secuenciación y comunicación de dichas máquinas. La optimización del tiempo de transporte que emplean estos robots se convierte en una variable básica adicional para una aplicación de la planificación en tiempo real sin la intervención humana.

Esta tesis demuestra la aplicación del algoritmo de Sonar Industrial en un ejemplo concreto de entorno real industrial de fabricación de máquina herramienta, pero su **aplicación** puede ser **transversal** a los distintos entornos de trabajo industriales y a su vez, en los entornos logísticos, en los que la difícil predictibilidad de las situaciones que

pueden darse convierte la ayuda de este tipo de algoritmos en herramientas de urgencia imprescindibles para trabajar con efectividad.

## 9.2 Desarrollos futuros

Como posible desarrollo futuro, la aplicación en tiempo real del algoritmo de Sonar Industrial entre centros de trabajo se puede comparar y combinar con otros algoritmos heurísticos utilizados para calcular la secuencia de operaciones de producción de todos los centros de producción. Esta comparativa permitirá sacar conclusiones sobre los tiempos de respuesta, la flexibilidad y la validez de los resultados en términos de tiempo y pérdidas de energía.

Como tarea futura, se propone aplicar este algoritmo a diversos procesos de negocio para determinar los métodos de comunicación más adecuados para cada proceso y las formas más eficaces de algoritmos para cada centro de trabajo.

Como sugerencia para futuras investigaciones se podría aplicar el algoritmo de Sonar Industrial como una herramienta virtual para diseñar procesos de producción flexibles que puedan adaptarse rápidamente a cualquier circunstancia. Esta propuesta estaría dirigida específicamente a determinados tipos de industria de fabricación de máquina herramienta, pero podría extenderse a todos.

Como proyecto de futuro se propone vincular el algoritmo de Industrial Sonar con programas de control de producción MES/ERP. Esto permitirá automatizar no sólo la programación en tiempo real, sino también su aplicación automática en producción, incluida la gestión del movimiento de AMR entre centros de trabajo, y la incorporación de más objetivos y variables a los algoritmos.

Como desarrollo futuro se propone la conexión del algoritmo Sonar Industrial con un software como FlexSim para simular operativamente los procesos realizados por el algoritmo Sonar Industrial y/o su representación gráfica en tiempo real en Pygame, con

el objetivo de establecer un gemelo digital de las operaciones de fábrica para hacer simulaciones de la Programación de Producción aplicando la estrategia del Sonar Industrial.

Se propone que futuros desarrollos implementen el concepto de Sensor de Planificación con dispositivos más pequeños y lo extiendan a dispositivos móviles y de realidad virtual que el personal de la fábrica pueda llevar, incluidos teléfonos móviles, tabletas y gafas de realidad virtual. Esto permitiría el seguimiento externo de las lecturas de datos del centro de trabajo, la replanificación que se produce en un lugar de trabajo remoto y el seguimiento autónomo de la toma de decisiones. También facilitaría la gestión de alertas sobre dichas decisiones para intervención manual, en caso de ser necesario.

Para futuras investigaciones, se recomienda analizar la implementación de este concepto de sensor de planificación en tiempo real no sólo en un entorno industrial, sino también en entornos laborales en los que los centros de trabajo sean seres humanos. Dichos entornos pueden incluir centros comerciales, entornos logísticos y entornos de oficinas, en los que es necesaria una supervisión y coordinación especiales para optimizar el tiempo y lograr objetivos.

## 10. Plan de diseminación

Durante la investigación de la tesis se ha desarrollado tres artículos de los cuales se ha publicado uno de ellos:

- 1) "Real-Time Production Scheduling and Industrial Sonar and Their Application in Autonomous Mobile Robots"
  - (<https://doi.org/10.3390/app14051890>)
  - Este primer artículo fue publicado el 25, de Febrero de 2024 en la revista Applied Sciences (Q1 in "Engineering, General Engineering").
  - En dicho artículo se presenta a la comunidad científica el Algoritmo de Sonar Industrial para la planificación en tiempo real, que es la base de la tesis. Se explica la hipótesis de trabajo, los materiales y métodos, y la arquitectura en la que está basado el software de Sonar Industrial, así como se detallan alguno de los resultados y las posibles conclusiones y desarrollos futuros.
- 2) "The Planning Sensor, a strategy for autonomous real-time production planning without human intervention".
  - Artículo presentado al Congreso CILOG 2024-Congreso Internacional de Logística, en Mayo de 2024. Y tras la revisión y propuesta por parte de los organizadores del Congreso, a la conferencia híbrida EAI COMPSE 2024, que se celebra dentro del CILOG 2024, en Junio de 2024. Está pendiente la aceptación y publicación del artículo.
- 3) "Real Time Production Planning, State Of The Art":
  - Artículo pendiente de publicación.
  - Al ser un artículo sobre el Estado del arte y por ello, ser más difícil su publicación en revistas Q1 y Q2, se ha considerado dar prioridad a los otros dos artículos. Y una vez asentados los resultados, como así ha ocurrido con la publicación del primer artículo, y la presentación al congreso de CILOG del segundo, se retomará el intento de su publicación de nuevo.

# 11. Objetivos de Desarrollo Sostenible

Los objetivos de esta Tesis están alineados con los siguientes Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y metas, de la Agenda 2030:

- Objetivo 9 - Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación.
  - Meta 9.4 De aquí a 2030, modernizar la infraestructura y reconvertir las industrias para que sean sostenibles, utilizando los recursos con mayor eficacia y promoviendo la adopción de tecnologías y procesos industriales limpios y ambientalmente racionales, y logrando que todos los países tomen medidas de acuerdo con sus capacidades respectivas.
  - Meta 9.5 Aumentar la investigación científica y mejorar la capacidad tecnológica de los sectores industriales de todos los países, en particular los países en desarrollo, entre otras cosas fomentando la innovación y aumentando considerablemente, de aquí a 2030, el número de personas que trabajan en investigación y desarrollo por millón de habitantes y los gastos de los sectores público y privado en investigación y desarrollo.

## 12. Referencias – Bibliografía

### Bibliografía

- Ahmadov, Y., & Helo, P. (2018). A cloud based job sequencing with sequence-dependent setup for sheet metal manufacturing. *Annals of Operations Research*, 270, 5–24.
- Al-Hinai, N., & Elmekawy, T. (2011). Robust and stable flexible job shop scheduling with random machine breakdowns using a hybrid genetic algorithm. *International Journal of Production Economics*, 132, 279–281.
- Araz, O., & Salum, L. (2010). A multi-criteria adaptive control scheme based on neural networks and fuzzy inference for DRC manufacturing systems. *International Journal of Production Research*, 48, 251-270.
- Aytug, H., Lawley, M., McKay, K., Mohan, S., & Uzsoy, R. (2005). Executing production schedules in the face of uncertainties: a review and some future directions. *European Journal of Operational Research*, 161, pp. 86-110.
- Bagheri, B., Yang, S., Kao, H., & Lee, J. (2015). Cyber-physical systems architecture for self-aware Machines in Industry 4.0 environment. *15th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing* (pags. 48,1622–1627). Canada: IFAC-PapersOnLine.
- Bellifemine, F., Caire, G., & Greenwood, D. (2018). *Developing Multi-Agent Systems With JADE*. Italy: Wiley Series in Agent Technology, John Wiley & Sons.
- Bititci, U., Garengo, P., Dörfler, V., & Nudurupati, S. (2012). Performance Measurement: Challenges for Tomorrow. *Int. J. Manag. Rev.*, 14, 305–327.
- Boyes, H., Hallaq, B., Cunningham, J., & Watson, T. (2018). The industrial internet of things (IIoT): An analysis framework. *Computers in Industry*, 101, 1–12.
- Brucker, P. (2012). *Scheduling Algorithms*. Springer.
- Budenny, S., Lazarev, V., Zakharenko, N., Korovin, A., Plosskaya, O., Dimitrov, D., . . . Zhukov, L. (2022). eco2AI: Carbon Emissions Tracking of Machine Learning Models as the First Step Towards Sustainable AI. *Doklady Mathematics*, S118-S128.
- Bueno, A., Godinho, M., & Frank, A. (2020). Smart production planning and control in the Industry 4.0 context: A systematic literature review. *Computers & Industrial Engineering*, 149.
- Burillo, F., Lambán, M., Royo, J., Morella, P., & Sánchez, J. (2024). Article: Real-Time Production Scheduling and Industrial Sonar and Their Application in Autonomous Mobile Robots. *Applied Science*, 14(5), 1890. <https://doi.org/10.3390/app14051890>
- Cetnarowicz, K., & Kozlak, J. (2021). Multi-agent system for flexible manufacturing systems Management. From Theory to Practice in Multi-Agent Systems. *Second International Workshop of Central Eastern Europe of Multi-Agent Systems CEEMAS* (págs. Berlin Heidelberg 2001, pp. 73-82). Poland: Springer.
- Chan, A., & Chan, A. (2004). Key performance indicators for measuring construction success. *Benchmarking Int. J.*, 11, 203–221.

- Chang, K. (2014). Bluetooth: a viable solution for IoT? *IEEE Wireless Communications*, 21, 6–7.
- Chryssolouris, G., & Subramaniam, V. (2001). Dynamic scheduling of manufacturing job shops using genetic algorithms. *J. Intell. Manuf.*, 12, 281–293.
- Chukwueke, D., Schjøberg, P., Rødseth, H., & Stube, A. (2016). Reliable, robust and resilient systems: towards development of a predictive maintenance concept within the industry 4.0 environment. *Proceedings of EFNMS Euro Maintenance Conference*. Athens, Greece.
- Chunyang, Y., Xun, X., & Yuqian, L. (2016). Computer-Integrated Manufacturing, Cyber-Physical Systems and Cloud Manufacturing –Concepts and relationships. *Manufacturing Letters*, 6, 5-9.
- Church, L., & Uzsoy, R. (1992). Analysis of periodic and event-driven rescheduling policies in dynamic shops. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 5, 153-163.
- Dai, M., Tang, D., Giret, A., & Salido, M. (2019). Multi-objective optimization for energy-efficient flexible job shop scheduling problem with transportation constraints. *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, 59, 143–157.
- Davies, S., Khuller, S., & Zhang, S. (2022). Balancing Flow Time and Energy Consumption. *SPAA '22: Proceedings of the 34th ACM Symposium on Parallelism in Algorithms and Architectures* (págs. 369-380). New York, NY, USA: Association for Computing Machinery.
- Demir, H., & Erden, C. (2020). Dynamic Integrated process planning scheduling and due-date using and colony optimization. *Computers & Industrial Engineering*, 149.
- Dev, N., Shankar, R., & Qaiser, F. (2020). Industry 4.0 and circular economy: Operational excellence for sustainable reverse supply chain performance. *Resour. Conserv. Recycl.*, 153, 104583.
- Ding, Y., Qin, X., Liu, L., & Wang, T. (2015). Energy efficient scheduling of virtual machines in cloud with deadline constraint. *Future Generation Computer Systems*, 50, 62-74.
- Duffie, N. (1990). Synthesis of Heterarchical manufacturing systems. *Comput. Ind.*, 14, 167–174.
- Fang, J., Qu, T., Li, Z., & Xu, G. (2013). Agent-based gateway operating system for RFID-enabled ubiquitous manufacturing enterprise. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 29, 222–231.
- Fang, Y., Peng, C., Lou, P., Zhou, Z., Hu, J., & Yan, J. (2019). Digital-Twin-Based Job Shop Scheduling Toward Smart Manufacturing. *IEEE Trans. Ind. Inform.*, 15, 6425-6435.
- Fettermann, D., Sa Cavalcante, C., Domingues de Almeida, T., & Tortorella, G. (2018). How does Industry 4.0 contribute to operations management? *Journal of Industrial and Production Engineering*, 35, 255-268.
- Fitzgerald, J., Ingram, C., & Romanovsky, A. (2016). Concepts of dependable cyber-physical systems engineering: model-based approaches. En *Trustworthy Cyber-Physical Engineering* (págs. 27-48). Chapman and Hall/CRC.

- Fysikopoulos, A., Papacharalampopoulos, A., Pastras, G., Stavropoulos, P., & Chryssolouris, G. (2013). Energy Efficiency of Manufacturing Processes: A Critical Review. *Procedia CIRP*, Volume 7.
- Günther, O., Kletti, W., & Kubach, U. (2006). *RFID in Manufacturing*. Poland. Springer.
- Hermann, M., Pentek, T., & Otto, B. (2016). Design principles for industry 4.0 scenarios. *Proceedings of the 49th Hawaii International Conference on System Sciences*, (págs. 3928–3937.).
- Hofmann, E., & Rusch, M. (2017). Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics. *Computers in Industry*, 89, 23–34.
- Holloway, C., & Nelson, R. (1974). Job shop scheduling with due dates and overtime capability. *Management Science.*, 21, 68-78.
- Holmström, J., & Romme, A. (2012). Five steps towards exploring the future of operations management. *Operations Management Research*, 5, 37–42.
- Hosseinabadi, A., Siar, H., Shamshirband, S., Shojafar, M., & Nasir, M. (2015). Using the gravitational emulation local search algorithm to solve the multi-objective flexible dynamic job shop scheduling problem in small and medium enterprises. *Ann. Oper. Res.*, 229, 451-474.
- Hu, H., Jia, X., He, Q., Fu, Q., & Liu, K. (2020). Deep reinforcement learning based AGVs real-time scheduling with mixed rule for flexible shop floor in industry 4.0. *Comput. Ind. Eng.*, 149, 106749.
- Jeschke, S., Brecher, C., Meisen, T., Ozdemir, D., & Eschert, T. (2017). *Industrial Internet of Things and Cybermanufacturing Systems*. Springer Series in Wireless Technology.
- Jha, S., Babiceanu, R., & Seker, R. (2020). Formal modelling of cyber-physical resource scheduling in IIoT cloud environments. *J. Intell. Manuf.*, 31, 1149–1164.
- Jiang, S., Zheng, Z., & Liu, M. (2017). A multi-stage dynamic soft scheduling algorithm for the uncertain steelmaking-continuous casting scheduling problem. *Appl. Soft Comput.*, 60, 722–736.
- Kagermann, H., & Lukas, W. (2011). Industrie 4.0: With the Internet of Things on the Way to the 4th Industrial Revolution. *VDI Nachrichten*, 13, 2-3.
- Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 221-232.
- Klei, C., & Kim, J. (1996). AGV dispatching. *Int. J. Prod. Res.*, 34, 95–110.
- Kouiss, K., Pierreval, H., & Mebarki, N. (1997). Using multi-agent architecture in FMS for dynamic scheduling. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 8, 41-47.
- Kundakci, N., & Kulak, O. (2016). Hybrid genetic algorithms for minimizing makespan in dynamic job shop scheduling problem. *Computers & Industrial Engineering*, 96, 31-51.
- Liu, Q., Wang, C., Li, X., & Gao, L. (2023). A multi-population co-evolutionary algorithm for green integrated process planning and scheduling considering logistics system. *Eng. Appl. Artif. Intell.*, 126 Pt C, 107030.

- Lu, M., & Romanowski, R. (2013). Multicontextual dispatching rules for job shops with dynamic job arrival. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67, 19-33.
- Luo, H., Fang, J., & Huang, G. Q. (2015). Real-time scheduling for hybrid flowshop in ubiquitous manufacturing environment. *Comput. Ind. Eng.*, 84, 12-23.
- Mangla, S., Kusi-Sarpong, S., Luthra, S., Bai, C., Jakhar, S., & Khan, S. (2019). Operational excellence for improving sustainable supply chain performance. *Resources Conservation and Recycling*, 142, pp. 277-278.
- Mansouri, S., & Aktas, E. (2016). Minimizing energy consumption and makespan in a two-machine flowshop scheduling problem. *Journal of the Operational Research Society*, 67, 1382-1394.
- Monostori, L., Kadar, B., Bauernhansl, T., Kondoh, S., Kumara, S., Reinhart, G., . . . Ueda, K. (2016). Cyber-physical systems in manufacturing. *CIRP Annuals-Manufacturing Technology*, 65, 621–641.
- Mourtzis, D., Angelopoulos, J., & Zogopoulos, V. (2021). Integrated and adaptive AR maintenance and shop-floor rescheduling. *Comput. Ind.*, 125, 103383.
- Mourtzis, D., Zogopoulos, V., & Xanthi, F. (2019). Augmented reality application to support the assembly of highly customized products and to adapt to production re-scheduling. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 105, 3899–3910.
- Mousavi, M., Yap, H., Musa, S., Tahiri, F., & Md Dawal, S. (2017). Multi-objective AGV scheduling in an FMS using a hybrid of genetic algorithm and particle swarm optimization. *PLoS ONE*, 12, E0169817.
- Muhleman, A., Lockett, A., & Farn, C. (1982). Job shop scheduling heuristics and frequency of scheduling. *International Journal of Production Research*, 20, 227-241.
- Nakajima, S. (1988). Introduction to TPM: Total Productive Maintenance. *Productivity Press*.
- Negri, E., Fumagalli, L., & Macchi, M. (2017). A review of the roles of digital twin in CPS-based production systems". *27th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing* (págs. vol. 11, pp 939-948). Italy: Procedia Manufacturing.
- Ng Corrales, L., Lambán, M., Hernandez Korner, M., & Royo, J. (2020). Overall Equipment Effectiveness: Systematic Literature Review and Overview of Different Approaches. *Applied Sciences*, 10(18):6469.
- Otto, A., & Li, X. (2020). Product sequencing in multiple-piece-flow assembly lines. *Omega*, 91, 102055.
- Ouelhadj, D., & Petrovic, S. (2009). A survey of dynamic scheduling in manufacturing systems. *Journal Of Scheduling*, 12, 417-431.
- Pierreval, H., & Mebarki, N. (1997). Dynamic scheduling selection of dispatching rules for manufacturing system. *International Journal of Production Research.*, 35, 1575-1591.
- Pinedo, M. L. (2016). *Scheduling Theory, Algorithms and Systems*. Springer.
- Psarommatis, F., Martiriggiano, G., Zheng, X., & Kiritsis, D. (2021). A generic methodology for calculating rescheduling time for multiple unexpected events in the era of zero defects manufacturing. *Front. Mech. Eng.*, 7, 646507.

- Qian, C., Zhang, Y., Jiang, C., Pan, S., & Rong, Y. (2020). A real-time data-driven collaborative mechanism in fixed-position assembly systems for smart manufacturing. *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, 61, 101841.
- Reike, D., Vermeulen, W., & Witjes, S. (2017). The circular economy: New or Refurbished as CE 3.0? — Exploring Controversies in the Conceptualization of the Circular Economy through a Focus on History and Resource Value Retention Options. *Resources, Conservation and Recycling*, 135, 246-264.
- Ren, S., Zhang, Y., Liu, Y., Sakao, T., Huisin, D., & Almeida, C. (2019). A comprehensive review of big data analytics throughout product lifecycle to support sustainable smart manufacturing: a framework, challenges and future research directions. *Journal of Cleaner Production*, 210, 1343–1365.
- Rho, S., Vasilakos, A., & Chen, W. (2016). Cyber physical systems technologies and applications. *Future Generation Computer System-The International Journal of Science*, 56, 436–437.
- Rodrigues, R., Goncalves, P., Miranda, M., Portela, F., Santos, M., Neves, J., . . . Machado, J. (2012). Monitoring intelligent system for the intensive care unit using RFID and multi-agent systems. *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)* (págs. pp. 851–855). Hong Kong: IEEE.
- Rodríguez-Andara, A., Rio-Belver, R., & Garcia-Marina, V. (2020). Sustainable university institutions: determination of gases greenhouse effect in a university center and strategies to decrease them. *DYNA*, 95(1). 47-53.
- Roldán, J., Crespo, E., Martín-Barrio, A., Pena, E., & Barrientos, A. (2019). A training system for industry 4.0 operators in complex assemblies based on virtual reality and process mining. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 59, 305–316.
- Romano, C. A. (2017). *Optimización Metaheurística para Ingenieros: Aplicaciones en Organización Industrial*. Delta Publicaciones.
- Romano, C. (s.f.). *Secuenciación en taller de flujo de dos máquinas*. Obtenido de <https://www.upv.es/visor/media/ab9434a7-ab80-5545-be2c-43caa965592c/c>
- Romano, C. (s.f.). *Secuenciación en taller de flujo de tres máquinas usando el Algoritmo de Johnson*. Obtenido de <https://www.upv.es/visor/media/9ca137ee-1b78-1a4e-8cfb-5ed9b6a8105b/c>
- Rosen, R., von Wichert, G., Lo, G., & Bettenh, K. (2015). About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing. *15th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing* (págs. 48, 567–572). Canada: IFAC-PapersOnLine.
- Rossi, A. (2014). Flexible job shop scheduling with sequence-dependent setup and transportation times by ant colony with reinforced pheromone relationships. *Int. J. Prod. Econ.*, 153, 253–267.
- Sahin, C., Demirtas, M., Erol, R., Baykasoglu, A., & Kaplanoglu, V. (2017). A multi-agent based approach to dynamic scheduling with flexible processing capabilities. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 28, 1827-1845.
- Saidi-Mehrabad, M., Dehnavi-Arani, S., Evazabadian, F., & Mahmoodian, V. (2015). An Ant Colony Algorithm (ACA) for solving the new integrated model of job

- shop scheduling and conflict-free routing of AGVs. *Comput. Ind. Eng.*, 86, 2–13.
- Sehnm, S., Charbel, Chiappetta Jabbour, C., Farias Pereira, S., & Lopes de Sousa Jabbour, A. (2019). Improving sustainable supply chains performance through operational excellence: circular economy approach. *Resources, Conservation and Recycling*, 149, 236-248.
- Sharma, P., & Jain, A. (2016). New setup-oriented dispatching rules for a stochastic dynamic job shop manufacturing system with sequence-dependent setup times. *Concurrent Engineering-Research and Applications*, 24, 58-68.
- Shukla, O. J., Soni, G., Kumar, R., & Sujil, V. (2018). An agent-based architecture for production scheduling in dynamic job-shop manufacturing system. *At-Automatisierungstechnik*, 66, 492-502.
- Smith, R. (1980). The Contract Net Protocol: High-Level Communication and Control in a Distributed Problem Solver. *IEEE Trans. Comput.*, 29, 1104–1113.
- Sullivan, D., Luijff, E., & Colbert, E. (2016). Components of industrial control systems. *Cyber-Security of SCADA and Other Industrial Control Systems*, 63, 15–28.
- Tan, Q., Tong, Y., Wu, S., & Li, D. (2019). Modelling, planning, and scheduling of shop-floor assembly process with dynamic cyber-physical interactions: a case study for CPS-based smart industrial robot production. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105, 3979–3989.
- Tang, D., Dai, M., Salido, M., & Giret, A. (2016). Energy-efficient dynamic scheduling for a flexible flow shop using an improved particle swarm optimization. *Comput. Ind.*, 81, 82–95.
- Tang, L., Liu, W., & Liu, J. (2005). A neural network model and algorithm for the hybrid flow shop scheduling problem in a dynamic environment. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 16, 361-370.
- Tao, F., & Zhang, M. (2017). Digital twin shop-floor: A new shop-floor paradigm towards smart manufacturing. *IEEE Access*, 5, 20418–20427.
- Tao, F., Zhan, H., Liu, A., & Nee, A. (2019). Digital twin in industry: State-of-the-art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15, 2405–2415.
- Thaman, J., & Singh, M. (2017). Green cloud environment by using robust planning algorithm. *Egyptian Informatics Journal*, 18, 205-214.
- Tian, S., Wang, T., Zhang, L., & Wu, X. (2019). Real-time shop floor scheduling method based on virtual queue adaptive control: Algorithm and experimental results. *Measurement*, 147, 106689.
- Tortorella, G., & Fettermann, D. (2018). Implementation of Industry 4.0 and lean production in Brazilian manufacturing companies. *International Journal of Production Research*, 56, 2975-2987.
- Ulusoy, G., Sivrikaya, Serifoglu, F., & Bilge, Ü. (1997). A genetic algorithm approach to the simultaneous scheduling of machines and automated guided vehicles. *Comput. Oper. Res.*, 24, 335–351.
- Umar, U., Ariffin, M., Ismail, N., & Tang, S. (2015). Hybrid multiobjective genetic algorithms for integrated dynamic scheduling and routing of jobs and automated-guided vehicle (AGV) in flexible manufacturing systems (FMS) environment. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 81, 2123-2141.

- Vieira, G., Herrmann, J., & Lin, E. (2000). Predicting the performance of rescheduling strategies for parallel machine systems. *Journal Of Manufacturing Systems*, 19, 256-266.
- Villalobos, J., Muñoz, L., & Gutierrez, M. (2005). Using fixed and adaptive multivariate SPC charts for online SMD assembly monitoring. *International Journal of Production Economics*, 95, 109–121.
- Vollmann, T., Berry, W., & Clay, D. (1997). *Manufacturing Planning and Control Systems*. New York, NY, USA: McGraw-Hill.
- Wang, H., Jiang, Z., Wang, Y., Zhang, H., & Wang, Y. (2018,). A two-stage optimization method for energy-saving flexible job-shop scheduling based on energy dynamic characterization. *J. Clean. Prod.*, 188, 575–588.
- Wang, J., Yang, J., Ren, S., & Liu, Y. (2020). Infinitely repeated game based real-time scheduling for low-carbon flexible job shop considering multiple periods. *J. Clean. Prod.*, 247, 119093.
- Wang, S., Xi, L., & Zhou, B. (2008). FBS-enhanced agent-based dynamic scheduling in FMS. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 21, 644-657.
- Want, R., Schilit, B., & Jenson, S. (2015). Enabling the Internet of Things. *Computer*, 48, 28–35.
- Witkowski, K. (2017). Internet of things, big data, industry 4.0—innovative solutions in logistics and supply chain management”. *Preceding of 7th International* (págs. 182, 763–769, 10). Poland: Procedia Engineering Conference on Engineering, Project and Production Management.
- Xanthopoulos, A., Koulouriotis, D., Tourassis, V., & Emiris, D. (2013). Intelligent controllers for bi-objective dynamic scheduling on a single machine with sequence-dependent setups. *Applied Soft Computing*, 13, 4704-4717.
- Xu, L., He, W., & Li, S. (2014). Internet of things in industries: a survey. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 10, 2233–2243.
- Xu, L., Wang, C., Bi, Z., & Yu, J. (2012). AutoAssem: an automated assembly planning system for complex products. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 8, 669–678.
- Xu, X. (2012). From cloud computing to cloud manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 28, 75–86.
- Yang, Q., Yu, M., Liu, S., & Chai, Z. (2011). Path planning of robotic fish based on genetic algorithm and modified dynamic programming. *In Proceedings of the 2011 International Conference on Advanced Mechatronic Systems*. Zhengzhou, China, 11–13 August 2011.
- Zambrano Rey, G., Bekrar, A., Prabhu, V., & Trentesaux, D. (2014). Coupling a genetic algorithm with the distributed arrival-time control for the JIT dynamic scheduling of flexible job-shops. *International Journal of Production Research*, 52, 3688-3709.
- Zbib, N., Pach, C., Sallez, Y., & Trentesaux, D. (2012). Heterarchical production control in manufacturing systems using the potential fields concept. *Intell. Manuf.*, 23, 1649–1670.
- Zhang, Y., Guo, Z., Lv, J., & Liu, Y. (2018). A framework for smart production logistics systems based on CPS and industrial IoT. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14, 4019–4032.

- Zhang, Y., Qian, C., Lv, J., & Liu, Y. (2017). Agent and cyber-physical system based self-organizing and self-adaptive intelligent shopfloor. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 13, 737–747.
- Zhang, Y., Wang, W., Du, W., Qian, C., & Yang, H. (2018). Coloured petrinet-based active sensing system of real-time and multi-source manufacturing information for smart factory. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94, 3427–3439.
- Zhang, Y., Zhang, G., Du, W., Wang, J., Ali, E., & Sun, S. (2015). An optimization method for shopfloor material handling based on real-time and multi-source manufacturing data. *Int. J. Prod. Econ.*, 165, 282–292.
- Zhang, Y., Zhu, Z., & Lv, J. (2018). CPS-based smart control model for shopfloor material handling. *IEEE Transaction on Industrial Informatics*, 14, 1764–1775.
- Zhao, F., Hong, Y., Yu, D., Yang, Y., & Zhang, Q. (2010). A hybrid particle swarm optimisation algorithm and fuzzy logic for process planning and production scheduling integration in holonic manufacturing systems. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 23, 20-39.
- Zhong, R., Xu, X., Klotz, E., & Newman, S. (2017). Intelligent manufacturing in the context of Industry 4.0: a review. *Engineering*, 3, 616-630.
- Zhou, J., Wang, T., Cong, P., Lu, P., Wei, T., & Chen, M. (2019). Cost and makespan-aware workflow scheduling in hybrid clouds. *Journal of Systems Architecture*, 100, 101631.
- Zhuang, C., Liu, J., & Xiong, H. (2018). Digital twin-based smart production management and control framework for the complex product assembly shop-floor. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96, 1149–1163.

## **Anexo A:**

## A.1 Función ejemplo de aplicación del algoritmo de Johnson en Python

```

1  def processJohnsonAlgorithm():
2      # Me conecto a la tabla SONARANSWER y creo el registro en SONARINDTABLE para la operación 10
3      miConexion=sqlite3.connect("SonarIndustrial")
4      miCursor=miConexion.cursor()
5      miCursor.execute("SELECT * FROM SONARANSWER ORDER BY OPNUMBER ASC")
6      callregistro=miCursor.fetchall() # Devuelve un array aunque sólo haya un registro
7      TotPI=0
8      orderi=0
9      orderj=0
10     for registroc in callregistro:
11         orderi=orderi+1
12         TotPI+=float(registroc[8])
13         datosSonarAnswer= registroc[1],registroc[2], registroc[3], registroc[4], registroc[5], registroc[6],
registroc[7], registroc[8], registroc[9], registroc[10], registroc[11], registroc[12], registroc[13], registroc[14],
registroc[15], registroc[16], registroc[17], registroc[18], TotPI, orderi
14         print("PBJ",datosSonarAnswer)
15         miCursor.execute("INSERT INTO SONARINDTABLE VALUES(NULL,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?)",
(datosSonarAnswer))
16     miConexion.commit()
17     # Me conecto a la tabla SONARANSWER y creo el registro en SONARINDTABLE para la operación 20
18     miConexion=sqlite3.connect("SonarIndustrial")
19     miCursor=miConexion.cursor()
20     miCursor.execute("SELECT * FROM SONARANSWER20 ORDER BY OPNUMBER ASC")
21     callregistro=miCursor.fetchall() # Devuelve un array aunque sólo haya un registro
22     for registroc in callregistro:
23         orderj=orderj+1
24         TotPI+=float(registroc[8])
25         datosSonarAnswer= registroc[1],registroc[2], registroc[3], registroc[4], registroc[5], registroc[6],
registroc[7], registroc[8], registroc[9], registroc[10], registroc[11], registroc[12], registroc[13], registroc[14],
registroc[15], registroc[16], registroc[17], registroc[18], TotPI, orderj
26         print("PBJ",datosSonarAnswer)
27         miCursor.execute("INSERT INTO SONARINDTABLE VALUES(NULL,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?)",
(datosSonarAnswer))
28     miConexion.commit()

```

```

29      # Establezco un Orden basado en la búsqueda del menor tiempo de proceso y aplicando el algoritmo de
        Johnson
30      miConexion=sqlite3.connect("SonarIndustrial")
31      miCursor=miConexion.cursor()
32      miCursor.execute("SELECT * FROM SONARINDTABLE ORDER BY PI ASC" )
33      callregistro=miCursor.fetchall() # Devuelve un array aunque sólo haya un registro
34      orden10=[]
35      orden20=[]
36      i=0
37      j=0
38      for registroc in callregistro:
39          r=registroc[1]
40          print(r, registroc[4], registroc[8], i, j)
41          if registroc[4]=="10":
42              if r in orden20:
43                  print("ya existe en orden20")
44              else:
45                  orden10.insert(i,r)
46                  i=i+ 1
47              else:
48                  if r in orden10:
49                      print("ya existe en orden10")
50                  else:
51                      orden20.insert(j,r)
52                      j=j+ 1
53      orden=orden10+orden20
54      print (orden)
55      miConexion.commit()
56      # Actualizar el Orden en la tabla de sonar industrial basado en el orden del algoritmo de Johnson
57      miConexion=sqlite3.connect("SonarIndustrial")
58      miCursor=miConexion.cursor()
59      miCursor.execute("SELECT * FROM SONARINDTABLE order by PRODID, OPNUMBER ASC" )
60      callregistro=miCursor.fetchall() # Devuelve un array aunque sólo haya un registro
61      ordenreverso=[]
62      for sublista in orden:
63          ordenreverso.insert(0,sublista)
64      print(ordenreverso)
65      for registroc in callregistro:
66          if registroc[4]=='10':
67              indice=orden.index(registroc[1])+1

```

```

68          miCursor.execute("UPDATE SONARINDTABLE SET ORDERSON='%s' WHERE ID='%d'"
% (indice,registroc[0]))
69          else:
70          indice=ordenreverso.index(registroc[1])+1
71          miCursor.execute("UPDATE SONARINDTABLE SET ORDERSON='%s' WHERE ID='%d'"
% (indice,registroc[0]))
72          miConexion.commit()
73          # Actualizar el CMAX en la tabla de sonar industrial
74          miConexion=sqlite3.connect("SonarIndustrial")
75          miCursor=miConexion.cursor()
76          miCursor.execute("SELECT * FROM SONARINDTABLE order by ORDERSON, OPNUMBER ASC" )
77          callregistro=miCursor.fetchall() # Devuelve un array aunque sólo haya un registro
78          TotPI10=0
79          rTotPI10=0
80          TotPI20=0
81          rTotPI20=20
82          for registroc in callregistro:
83              if registroc[4]=='10':
84                  TotPI10+=float(registroc[8])
85                  rTotPI10=round(TotPI10,2)
86                  miCursor.execute("UPDATE SONARINDTABLE SET TOTALPI='%s' WHERE ID='%d'" %
(rTotPI10,registroc[0]))
87              else:
88                  if TotPI20==0:
89                      TotPI20=TotPI10
90                      TotPI20+=float(registroc[8])
91                  if TotPI10>TotPI20:
92                      TotPI20+=TotPI10+float(registroc[8])
93                      rTotPI20=round(TotPI20,2)
94                      miCursor.execute("UPDATE SONARINDTABLE SET TOTALPI='%s' WHERE ID='%d'" %
(rTotPI20,registroc[0]))
95          print(registroc)
96          miConexion.commit()

```

## A.2 Función ejemplo de algoritmo básico de Sonar Industrial en Python

### EJEMPLO DE ALGORITMO BÁSICO DE SONAR INDUSTRIAL

```

1 def processIndustrialSonarNJ():
2     # Me conecto a la tabla SONARANSWER y creo el registro en SONARINDTABLE para la
operación 10
3     miConexion=sqlite3.connect("SonarIndustrial")
4     miCursor=miConexion.cursor()
5     miCursor.execute("SELECT * FROM SONARANSWER ORDER BY OPNUMBER ASC" )
6     callregistro=miCursor.fetchall() # Devuelve un array aunque sólo haya un registro
7     TotPI=0
8     orderi=0
9     orderj=0
10    for registroc in callregistro:
11        orderi=orderi+1
12        TotPI+=float(registroc[8])
13        datosSonarAnswer= registroc[1],registroc[2], registroc[3], registroc[4],
registroc[5], registroc[6], registroc[7], registroc[8], registroc[9], registroc[10], registroc[11], registroc[12],
registroc[13], registroc[14], registroc[15], registroc[16], registroc[17], registroc[18], TotPI, orderi
14        print("PBJ",datosSonarAnswer)
15        miCursor.execute("INSERT INTO SONARINDTABLE
VALUES(NULL,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?), (datosSonarAnswer))
16        miConexion.commit()
17    # Me conecto a la tabla SONARANSWER y creo el registro en SONARINDTABLE para la
operación 20
18        miConexion=sqlite3.connect("SonarIndustrial")
19        miCursor=miConexion.cursor()
20        miCursor.execute("SELECT * FROM SONARANSWER20 ORDER BY OPNUMBER ASC" )
21        callregistro=miCursor.fetchall() # Devuelve un array aunque sólo haya un registro
22        for registroc in callregistro:
23            orderj=orderj+1
24            TotPI+=float(registroc[8])
25            datosSonarAnswer= registroc[1],registroc[2], registroc[3], registroc[4],
registroc[5], registroc[6], registroc[7], registroc[8], registroc[9], registroc[10], registroc[11], registroc[12],
registroc[13], registroc[14], registroc[15], registroc[16], registroc[17], registroc[18], TotPI, orderj
26            print("PBJ",datosSonarAnswer)
27            miCursor.execute("INSERT INTO SONARINDTABLE
VALUES(NULL,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?), (datosSonarAnswer))
28            miConexion.commit()
29    # Actualizar el Orden en la tabla de sonar industrial basado en el orden actual
existente devuelto
30        miConexion=sqlite3.connect("SonarIndustrial")
31        miCursor=miConexion.cursor()
32        miCursor.execute("SELECT * FROM SONARINDTABLE" )
33        callregistro=miCursor.fetchall() # Devuelve un array aunque sólo haya un registro
34        orden10=[]
35        orden20=[]
36        i=0
37        j=0

```

```

38     for registroc in callregistro:
39         r=registroc[1]
40         print(r, registroc[4], registroc[8], i, j)
41         if registroc[4]=="10":
42             if r in orden20:
43                 print("ya existe en orden20")
44             else:
45                 orden10.insert(i,r)
46                 i=i+1
47         else:
48             if r in orden10:
49                 print("ya existe en orden10")
50             else:
51                 orden20.insert(j,r)
52                 j=j+1
53     orden=orden10+orden20
54     print (orden)
55     miConexion.commit()
56     # Actualizar el Orden en la tabla de sonar industrial
57     miConexion=sqlite3.connect("SonarIndustrial")
58     miCursor=miConexion.cursor()
59     miCursor.execute("SELECT * FROM SONARINDTABLE order by PROPID, OPNUMBER
        ASC" )
60     callregistro=miCursor.fetchall() # Devuelve un array aunque sólo haya un registro
61     ordenreverso=[]
62     for sublista in orden:
63         ordenreverso.insert(0,sublista)
64     print(ordenreverso)
65     for registroc in callregistro:
66         if registroc[4]=="10":
67             indice=orden.index(registroc[1])+1
68             miCursor.execute("UPDATE SONARINDTABLE SET
        ORDERSON='%s' WHERE ID='%d'" % (indice,registroc[0]))
69         else:
70             indice=ordenreverso.index(registroc[1])+1
71             miCursor.execute("UPDATE SONARINDTABLE SET
        ORDERSON='%s' WHERE ID='%d'" % (indice,registroc[0]))
72     miConexion.commit()
73     # Actualizar el CMAX en la tabla de sonar industrial
74     miConexion=sqlite3.connect("SonarIndustrial")
75     miCursor=miConexion.cursor()
76     miCursor.execute("SELECT * FROM SONARINDTABLE order by ORDERSON,
        OPNUMBER ASC" )
77     callregistro=miCursor.fetchall() # Devuelve un array aunque sólo haya un registro
78     TotPI10=0
79     rTotPI10=0
80     TotPI20=0
81     rTotPI20=20
82     for registroc in callregistro:
83         if registroc[4]=="10":
84             TotPI10+=float(registroc[8])
85             rTotPI10=round(TotPI10,2)
86             miCursor.execute("UPDATE SONARINDTABLE SET TOTALPI='%s'
        WHERE ID='%d'" % (rTotPI10,registroc[0]))
87         else:
88             if TotPI20==0:
89                 TotPI20=TotPI10
90             TotPI20+=float(registroc[8])
91             if TotPI10>TotPI20:
92                 TotPI20+=TotPI10+float(registroc[8])

```

```
93                                     rTotPI20=round(TotPI20,2)
94                                     miCursor.execute("UPDATE SONARINDTABLE SET TOTALPI='%s'
WHERE ID='%d'" % (rTotPI20,registroc[0]))
95                                     print(registroc)
96                                     miConexion.commit()
```

## A.3 Función ejemplo de cálculo de pérdidas de energía y huella de carbono en Python

```

1 # function to create a calculation of OEE and Energy Losses in the BBDD
2 def EnergyLossesOEEcalculation():
3     EnergyResults = tk.Toplevel(app)
4
5     miConexion=sqlite3.connect("SonarIndustrial")
6     miCursor=miConexion.cursor()
7
8     D1=sendEltemId.get() # Artículo
9     D2=sendEWorkCenter.get() # Centro de trabajo #
10
11     Dejo espacio para el D3 que sería la operacion
12     D4=float(sendECapacity.get()) # D4- Capacidad u/h
13     D5=float(sendESetupTime.get()) # D5- Tiempo de
14     cambio u/h
15     D6=float(sendEWorkShiftTime.get()) # D6- Duración de
16     turno h (normalmente 8 h)
17     D7=float(sendETheoreticProd.get()) # D7- Producción Teórica
18
19     D8=float(sendEFaultTime.get()) # D8-
20     Tiempo de averías (h)
21     D9=float(sendEGoodPROD.get()) # D9- Producción
22     buena (u)
23     D10=float(sendEBadPROD.get()) # D10-
24     Producción mala (u)
25     D11=D9+D10
26     # D11- Producción real (D9+D10) (u) - calculado
27     D12=float(sendEMachPower.get()) # D12-
28     Potencia maquinaria (KW)
29     D13=float(sendElectricPrice.get()) # D13- Precio
30     electricidad (Euros/KW)
31     D14=float(sendECO2Emissions.get()) # D14- Emisiones de
32     CO2 equivalente en Toneladas de CO2 por kWh
33     D15=D9/(D9+D10) #
34     D15- FTQ - First Time To Quality - Rendimiento de calidad (D9/(D9+D10))
35     D16=D11/(D4*(D6-D8)) # D16-
36     P - Performance - Rendimiento de velocidad (D11/(D4*(D6-D8)))
37     D17=(D6-D8)/(D6+D5) #
38     D17- A - Availabilty - Disponibilidad operacional ((D6-D8)/(D6+D5))
39     D18=D15*D16*D17 #
40     D18- OEE - Overall Equipment Effectiveness - Redimiento operacional
41     (D15*D16*D17)
42     D19=float(sendEMCO2Emissions.get()) # D19- Medidad de
43     emisiones CO2 durante el proceso productivo
44     D20=D12*D6 # D20-
45     Consumo eléctrico en el turno (D12*D6)
46     D21=D20*D13 # D21-
47     Consumo eléctrico del turno (D20*D13)
48     D22=D21/D7 # D22-

```

```

32                                     Coste eléctrico de producción teórico unitario (D21/D7)                                     #
33                                     Dejo espacio para el consumo eléctrico por si es necesario algún dato adicional
D24=D10                                     #                                     D24-
34                                     Piezas perdidas por mala calidad (D10)
D25=D4*(D6-D8)-D11                                     #                                     D25-
35                                     Piezas perdidas por mal rendimiento de velocidad (D4*(D6-D8)-D11)
D26=D8*D4                                     #                                     D26-
36                                     Piezas perdidas por mala disponibilidad operacional (D8*D4)
D27=D24+D25+D26                                     #                                     D27-
37                                     Piezas perdidas totales (D24+D25+D26)
Dejo espacio para las piezas perdidas totales por si es necesario algún dato adicional                                     #
38                                     D29=D24*D22                                     #                                     D29-
39                                     Pérdida de energía por calidad (D24*D22)
D30=D25*D22                                     #                                     D30-
40                                     Pérdida de energía por rendimiento de velocidad (D25*D22)
D31=D26*D22                                     #                                     D31-
41                                     Pérdida de energía por disponibilidad operacional (D26*D22)
D32=(D20*D14)+D19                                     #                                     D32-
42                                     Huella de carbono, Emisiones CO2 totales ((D20*D14)+D19)
D33=D29+D30+D31                                     #                                     D33-
43                                     Pérdida total de energía (por las piezas) (D29+D30+D31)
D34=D21*(1-D18)                                     #                                     D34- Pérdida total
de energía (calculado por rendimiento operacional) (D21*(1-D18))

44                                     datosEnergy=D1,D2,D4,D5,D6,D7,D8,D9,D10,D11,D12,D13,D14,D19,D15,D16,D17,D18,
D20,D21,D22,D24,D25,D26,D27,D29,D30,D31,D32,D33,D34
45                                     miCursor.execute("INSERT INTO ENERGYLOSSES
VALUES(NULL,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?), (datosEnergy))

46                                     miConexion.commit()
## messagebox.showinfo("BBDD", "Record created and calculated OEE and Energy
Losses successfully")

47                                     miConexion=sqlite3.connect("SonarIndustrial")
48                                     miCursor=miConexion.cursor()
49                                     miCursor.execute("SELECT *,oid FROM ENERGYLOSSES")
50                                     records = miCursor.fetchall()
51                                     print(records)
52                                     print_records=""
53                                     for record in records:
54                                         if record[1]==D1:
55                                             print_records = "RESULTS OF THE CALCULATION OF OEE AND
ENERGY LOSSES"+"\\n"

56                                             print_records = print_records+"\\n"+"INPUT DATA"+"\\n"
57                                             print_records = print_records+"ItemId: "+ str(D1) + "\\n" +
"WorkCenter: " + str(D2) + "\\n" + "Capacity (u/h): " +str(D4) + "\\n"+ "Setup Time (h): " +str(D5)+"\\n"
58                                             print_records = print_records+"Work Shift (h): " +str(D6)+
"\\n"+"Theoretical production quantity (u): " + str(D7)+"\\n" + "Fault Time (h): " +str(D8)+"\\n"
59                                             print_records = print_records+"Good Production (u): "
+str(D9)+"\\n"+"Bad Production (u): " +str(D10)+ "\\n" + "Real Production (u): " +str(D11)+ "\\n"
60                                             print_records = print_records+"Power Machine (KW):
"+str(D12)+ "\\n" + "Electricity Price (€/KW): " +str(D13)+ "\\n"+"Electric/gas CO2 Emissions (TCO/KWh):
61                                             "+str(D14)+"\\n"+"Process CO2 Emissions (TCO/KWh): " +str(D19)+"\\n"
62                                             print_records = print_records+"\\n"+"CALCULATION DATA"+"\\n"
63                                             print_records = print_records+ "FTQ (0-1): "
+str(D15)+"\\n"+"Performance (0-1): " +str(D16)+ "\\n" + "Availabilty (0-1): " +str(D17)+ "\\n" + "OEE (0-1): "
+str(D18)+ "\\n"

64                                     print_records = print_records+"\\n"+"Electric Shift Consumption

```

```

(KWh/shift): "+str(D20)+"\n"+"Electric Shift Amount (€): "+str(D21)+ "\n" + "Unitary Electric Cost(€/u): "
+str(D22)+ "\n"
65 print_records = print_records+"\n"+"Lost pieces Quality (u/shift):
"+str(D24)+"\n"+"Lost Pieces Performance (u/shift): "+str(D25)+ "\n" + "Lost Pieces Availabilty (u/shift): "
+str(D26)+ "\n" + "Lost Pieces Total (y/shift: "+str(D27)+ "\n"
66 print_records = print_records+"\n"+"Losses Quality Amount (€):
" +str(D29)+"\n"+"Losses Performance Amount (€): "+str(D30)+ "\n" + "Losses Availabilty Amount (€): "
+str(D31)+ "\n"
67 print_records = print_records+"\n"+"Carbon Footprint
(TCO/KWh): "+str(D32)+"\n"+"Total Energy Losses (pieces) (€): "+str(D33)+"\n"+"Total Energy Losses (OEE
calculation) (€): "+str(D34)+ "\n"
68
69 query_label = Label(EnergyResults,text=print_records)
70 query_label.grid(row=1,column=0)
71

```

## A.4 Función ejemplo de aplicación de algoritmo básico ECF ordenado por pérdidas de energía por OEE en Python

```

1 def OEE():
2     #-----Rellenamos la tabla OEERESULTS para el Algoritmo OEE-
   Ordenación Según Criterio OEE Pérdida Total de energía por rendimiento operacional-
3     # Selecciono los registros de la tabla PRODROUTECALC de la BBDD y los ordeno por
   OEE
4     miConexion=sqlite3.connect("SonarIndustrial")
5     miCursor=miConexion.cursor()
6     ## miCursor.execute("SELECT * FROM PRODROUTECALC ORDER BY TOTALLOSSES0EE
   ASC")
7     miCursor.execute("SELECT * FROM PRODROUTECALC ORDER BY TOTALLOSSES0EE
   ASC")
8     elregistro=miCursor.fetchall() # Devuelve un array aunque sólo haya un registro
9     # calculamos Fi-Tiempo de flujo de trabajo, si el tiempo de proceso mayor que cero, se
   lo asignamos a Fi
10    miFi=0
11    for registro in elregistro:
12        miPiTpi=registro[12]
13        if miPiTpi>0 and miFi==0:
14            miFi=miPiTpi
15        elif miPiTpi>0 and miFi>0:
16            miFi= miFi+miPiTpi
17        else:
18            miFi=0
19        # calculamos Ti-Tardanza del Trabajo, si Fi es mayor que cero, considerando
   la Fecha entrega de la orden
20        # si Fi-FechaEntrega o registro[10] es mayor que 0, asigno la tardanza como
   Fi-FechaEntrega, sino le asigno 0
21        if miFi>0:
22            if registro[10]!=0:
23                if miFi-registro[10]<0:
24                    miTi=0
25                else:
26                    miTi=miFi-(registro[10])
27            else:
28                miTi=0
29        else:
30            miTi=0
31        # calculamos WITI, el producto entre Peso (registro[9] y Tardanza
32        if registro[9]>0:
33            if miTi>0:
34                miWiTi=miTi*registro[9]
35            else:
36                miWiTi=0
37        else:
38            miWiTi=0

```

```
39         # calculamos WIFI, el producto entre Peso y Flujo
40         if registro[9]!=0:
41             if miFi>0:
42                 miWiFi=miFi*registro[9]
43             else:
44                 miWiFi=0
45         else:
46             miWiFi=0
47         print(registro[1],registro[2], registro[21],registro[22],registro[23] )
         datosOEE= registro[1],registro[2], registro[3], registro[4], registro[5],
         registro[6], registro[7], miPiTpi, registro[9], registro[10], registro[11], miFi,miTi,miWiTi,miWiFi, registro[21],
         registro[22], registro[23]
48         miCursor.execute("INSERT INTO OEERESULTS
49 VALUES(NULL,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?)", (datosOEE))
50         miConexion.commit()
51         messagebox.showinfo("BBDD", "OEE Results created correctly")
```

## **Anexo B:**

## B.1 Ejemplo de aplicación de algoritmo de Johnson en la literatura para un taller de flujo de 2 y 3 máquinas

- El Algoritmo de Johnson para la optimización del makespan o  $C_{max}$ 
  - Algoritmo de Johnson para resolver la secuenciación de un taller de flujo de 2 máquinas:
    - 1) Se colocan los Trabajos  $J_i$  en una lista con el tiempo  $p_{ij}$  que requiere en cada operación de cada máquina ( $M_1$  y  $M_2$ ).
    - 2) Se ordena la lista por menor tiempo de actividad considerando tanto el tiempo de la máquina  $M_1$  como  $M_2$  en orden ascendente. Se elige el que tenga menor tiempo, y se asignan las operaciones del trabajo a ambas máquinas.
      - Si el menor tiempo corresponde a la primera máquina, el trabajo se coloca al principio.
      - Si el menor tiempo corresponde a la segunda máquina, el trabajo se coloca al final.
    - 3) Una vez el trabajo está asignado en ambas máquinas, se elimina de la lista.
    - 4) Se sigue en orden ascendente de tiempo de procesamiento, con los siguientes trabajos procediendo de la misma manera, aplicando los pasos 2 y 3 para los trabajos restantes, colocándolos hacia el centro de la secuencia.
  - Algoritmo de Johnson para la resolución de un taller de flujo de 3 máquinas:
    - Existe una solución óptima si se cumple una de las siguientes condiciones:
      - El menor de los tiempos de proceso en  $M_1$  es mayor o igual que el mayor de los tiempos de proceso en  $M_2$ .

$$\min \{p_{i1}\} \geq \max \{p_{i2}\}$$

- El menor de los tiempos de proceso en  $M_3$  es mayor o igual que el mayor de los tiempos de proceso en  $M_2$ .
$$\min \{p_{i3}\} \geq \max \{p_{i2}\}$$
- Si considerando por separado el problema a  $M_1-M_2$ , y a el problema  $M_2-M_3$ , y aplicando el algoritmo de Johnson para 2 máquinas, la secuencia obtenida es la misma.
- Para aplicar el algoritmo de Johnson se transforma el problema de 3 máquinas en un problema de dos máquinas virtuales A y B:
  - sumando por un lado los tiempos de la máquina virtual  $A (M_1-M_2)$ , como  $P_{i,A}=P_{i,1} + P_{i,2}$ .
  - y sumando por otro los tiempos de la máquina virtual  $B (M_2-M_3)$ , como  $P_{i,B}=P_{i,2} + P_{i,3}$ .
  - Y a continuación, se aplica el algoritmo de Johnson con esas dos máquinas virtuales.

## B.2 Ejemplos de algoritmos heurísticos y metaheurísticos en la literatura

Algunos algoritmos son:

- Procedimientos Heurísticos
  - Regla C.D.S: Que aplica el algoritmo de Johnson k veces, y se queda con la menor.
  - De Búsqueda Aleatoria
  - De Búsqueda en entornos basado en la mejora iterativa simple
  - De Búsqueda local con reinicio aleatorio
  - De Mejora Iterativa aleatorizada
  - De Descenso rápido o exhaustivo
- Procedimientos Metaheurísticos
  - GRASP-Greedy Randomized Adaptive Search Procedure
  - Búsqueda local iterativa (ILS-Iterative Local Search)
  - Búsqueda en Entorno variable (VNS-Variable Neighborhood Search)
    - Ejemplo de Algoritmo Mejora Iterativa (Algorithm Iterative Improvement). Siendo  $s$  una solución,  $N(s)$  unos registros locales (neighborhood) seleccionados, y  $c(s)$  los valores obtenidos:
      - 1 Elegir una solución inicial  $s \in S$
      - 2 REPETIR
      - 3  $s := s'$
      - 4 Generar la mejor solución  $s' \in N(s)$
      - 5 HASTA  $c(s') \geq c(s)$
  - Búsqueda por Entornos variables descendente (VND- Variable Neighborhood Descent).
  - Recocido Simulado (“simulated annealing”)
    - Ejemplo de Algoritmo de Recocido simulado (Algorithm Simulated Annealing). Siendo  $s$  una solución,  $N(s)$  unos registros

locales (neighborhood) seleccionados,  $c(s)$  los valores obtenidos,  $g(c_i)$  una función de dichos valores

- 1 inicializar Variable  $i := 0$
  - 2 Elegir una solución inicial  $s \in S$
  - 3  $mejor := c(s)$
  - 4  $s^* := s$
  - 5 REPETIR
  - 6 Generar aleatoriamente una solución  $s' \in N(s)$
  - 7  $SI \text{ random}[0,1] < \min \left\{ 1, \exp \left( -\frac{c(s')-c(s)}{c_i} \right) \right\}$
  - 8  $ENTONCES s := s'$
  - 9  $SI c(s') < mejor \text{ ENTONCES}$
  - 10 COMIENZA
  - 11  $s^* := s'$
  - 12  $mejor := c(s')$
  - 13  $c_{i+1} := g(c_i)$
  - 14  $i := i + 1$
  - 15 HASTA fin del criterio
- Búsqueda Exhaustiva
  - Búsqueda Tabú “Tabu Search”
    - Ejemplo de Algoritmo búsqueda Tabú. Siendo  $s$  una solución,  $N(s)$  unos registros locales (neighborhood) seleccionados.  $c(s)$  los valores obtenidos,  $cand(s)$  soluciones candidatas.
      - 1 Elegir una solución inicial  $s \in S$
      - 2  $mejor := c(s)$
      - 3  $s^* := s$
      - 4  $Tabu - list := \emptyset$
      - 5 REPETIR
      - 6  $Cand(s) :=$

- 7  $\{s'N(s)|\text{el movimiento de } s \text{ a } s' \text{ no es tabu}$
  - 8  $O s' \text{ satisface el criterio } \}$
  - 9 Generar solución  $s'' \in \text{Cand}(s)$
  - 10 Actualizar la lista tabú
  - 11  $s := s''$
  - 12  $SI c(s) < \text{mejor ENTONCES}$
  - 13 COMIENZA
  - 14  $s^* := s$
  - 15  $\text{mejor} := c(s)$
  - 16 FIN
  - 17 HASTA fin criterio
- Búsqueda Tabú basada en atributos
  - Búsqueda Tabú incorporando memoria a largo plazo
  - Algoritmos Branch-and-Bound
    - Ejemplo de algoritmo Branch-and-Bound
      - 1  $LISTA := \{S\}$
      - 2  $U := \text{valor de solución heurística}$
      - 3  $\text{mejoractual} := \text{solución heurística}$
      - 4 MIENTRAS  $LISTA \neq \emptyset$  HACER
      - 5 COMIENZA
      - 6 Elegir un nodo  $k$  de la rama de LISTA
      - 7 Eliminar  $k$  de la LISTA
      - 8 Generar hijo  $\text{hijo}(i)$  de  $i = 1, \dots, n$
      - 9 y calcular los límites inferiores  $LB_i$
      - 10 DESDE  $i := 1$  HASTA  $n_k$  HACER
      - 11  $SI \text{hijo}(i) \text{ es solución única ENTONCES}$
      - 12 COMIENZA
      - 13  $U := LB_i$
      - 14  $\text{mejoractual} := \text{solución hijo}(i)$

- 15 FIN
- 16 *SINO añadir hijo(i) a LISTA*
- 17 FIN
- Algoritmos genéticos
  - Ejemplo de algoritmo genético:
    - 1 Inicialización
    - 2 Generar y evaluar una población de soluciones
    - 3 REPETIR hasta que se cumpla criterio de parada
    - 4 REPETIR
    - 5 Seleccionar soluciones
    - 6 Aplicar cruce o mutación en las soluciones
    - 7 Evaluar individuos generados
    - 8 Usar para reemplazar individuos población
    - 9 HASTA completar número individuos a seleccionar
    - 10 HASTA que se cumpla el criterio de parada
    - 11 MOSTRAR solución el mejor individuo de población final
- Procedimientos metaheurísticos para resolver problemas multiobjetivo
  - Algoritmos genéticos multiobjetivo. En este caso se aplica el concepto de “Dominancia de Pareto” para determinar la solución a elegir, siguiendo el siguiente principio “Una solución domina a la otra si es mejor o igual respecto a todas las funciones objetivo y estrictamente mejor respecto al menos a una de ellas”.
    - Ejemplo de algoritmo para obtener soluciones No dominadas:
      - 1 Inicializar  $i := 1$
      - 2 Crear Conjunto  $ND = \{\emptyset\}$  de soluciones no dominadas
      - 3 MIENTRAS cada solución  $j \neq i$  comprobar si  $j$  domina a  $i$
      - 4 HACER

- 5                    *SI la domina*
- 6                     $i := i + 1$
- 6                    SI se han revisado todas soluciones
- 7                    MOSTRAR ND
- 8                    FINALIZAR
- 9                    *SI NO la domina*
- 10                  SI más soluciones por comprobar
- 11                   $j := j + 1$
- 12                  SI NO hay más sol. por comprobar
- 13                   $ND := ND + 1$
- 14                  FIN