

Trabajo de grado en modalidad de aplicación

PROGRAMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN PARA LA EMPRESA TRIDIMENSIONALES M&S S.A.S

Andrés Felipe Yaya Bohórquez^{a,c}, Jorge Enrique León Bernate^{a,c}

Eliana María González Neira^{b,c}

^aEstudiante de Ingeniería Industrial

^bProfesor, Director del Proyecto de Grado, Departamento de Ingeniería Industrial

^cPontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia

Abstract

Production scheduling is one of the most important activities in manufacturing companies due to its influence in customer service level. The company TRIDIMENSIONALES M&S SAS (Footwear Soles maker) consists in a Hybrid Flow Shop production environment which presents a high proportion of tardy jobs, being of 31.73%, 38.24%, and 46.43% in 2015, 2016, and 2017 respectively. The main possible causes are: current Line balancing (78.95%), nonexistence of a *preventive maintenance program* (PM) for machines and molds, and the nonexistence of scheduling methodology. Therefore, this project proposes two solutions simultaneously (one for maintenance and one for scheduling) that are applied in two different scenarios (the actual line balancing and a proposed line balancing). For the PM of both machines and molds, the methodologies Reliability Centered Maintenance and Failure Mode Effects Analysis are proposed. The implementation of proposed PM within 15 days in three different machines resulted in the reduction of the percentage of the fails number, maintenance time, and total costs of corrective maintenance in 61.51%, 62.52%, and 63.56% respectively.

For solving the HFS scheduling problem a mathematical model was proposed firstly, and a Tabu Search (TS) metaheuristic was developed to solve real instances, considering the *NP-hardness* of the problem. The TS was parametrized, and its effectiveness was measured by comparing its results with the mathematical model for small instances of 5 and 10 jobs. In all of them the TS reached the optimal solution. Then, TS was implemented for actual line balancing (78.95%) and proposed line balancing (98.7%) scenarios and the results were compared with the actual manual scheduling procedure, obtaining two main conclusions. Firstly, with overlapping confidence intervals there is not statistically significant difference between percentage of tardy jobs obtained by each one of the Line balancing levels and therefore it would not be justified the hiring of an additional operator at a \$20,678,374 annual cost. Secondly, with a significance of 5% and $p\text{-value} < 0.001$ there is statistically significant difference between the percentage of tardy jobs between actual manual scheduling in comparison with proposed TS (with actual balancing line), where TS presents a reduction of 42.34%, 62.51%, 52.49%, 71.07%, 67.37%, and 71.93% in percentage of tardy jobs for February, March, June, July, August, and September instances respectively, and a global reduction of 61.34%.

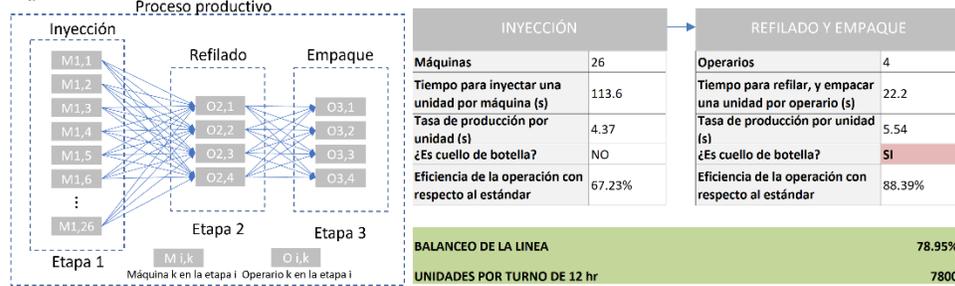
Keywords: Programación de la Producción, Hybrid Flow Shop, Mantenimiento preventivo, Trabajos tardíos, Nivel de servicio.

1. Justificación y planteamiento del problema

Las actividades de mantenimiento, así como las de programación de la producción han recibido una considerable atención tanto en la industria como en la academia debido a su importancia en el campo de la investigación de operaciones y los entornos de manufactura (Azadeh, Farahani, Kalantari, & Zarrin, 2015). El nivel de servicio de un sistema de producción depende principalmente del balanceo de sus estaciones, la existencia de actividades de mantenimiento eficientes, y de las decisiones en la planeación y programación de la producción. Por consiguiente, la integración de las actividades de mantenimiento en el programa de producción tiene una especial importancia debido a que las averías de las máquinas pueden interrumpir el proceso productivo y por lo tanto ocasionar retrasos en la programación, aumentando la cantidad de trabajos tardíos (Assid, Gharbi, & Hajji, 2015).

La empresa TRIDIMENSIONALES M&S SAS, productora de suelas inyectadas para calzado, enfrenta grandes retos debido al aumento en la complejidad de su proceso y en el nivel de demanda en los últimos 3 años. El actual balanceo de la línea (78.95%), la inexistencia de un programa de mantenimiento preventivo de máquinas y moldes, y la falta de una metodología para realizar la programación de la producción se consideran las posibles causas del alto porcentaje de trabajos tardíos. En los últimos 3 años la proporción de trabajos entregados después de la fecha acordada fue de 31.73%, 38.24% y 46.43% para los años 2015, 2016 y 2017 respectivamente. El proceso productivo (Figura 1) consta de tres operaciones: inyección, refilado y empaque. La operación de inyección cuenta con 26 máquinas, y el tiempo de operación estándar 4.37s por unidad. El refilado y el empaque es realizado uno seguido del otro por 4 operarios, es decir, cada uno hace refilado y empaque de la misma pieza. El tiempo estándar actual de esas dos operaciones es de 22.2s por unidad. De esta manera, se puede calcular que el balanceo de la línea es 78.95% (Figura 2), es decir, que en un turno de 12 horas (teniendo en cuenta tiempos de almuerzo, descanso, preparación de máquina, material, tiempos improductivos por máquinas y moldes en reparación y una eficiencia de los operadores de máquina inyectora de 67.23%, operarios de refilado y empaque de 88.39%) se producen máximo 7800 pares.

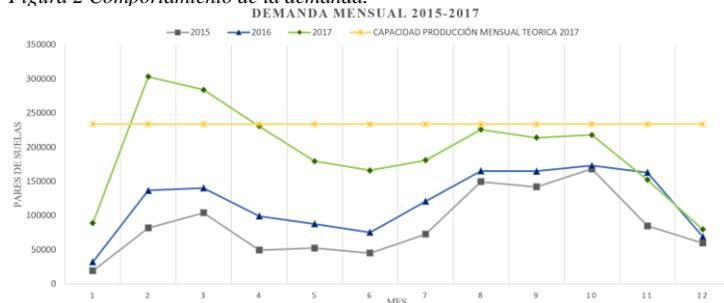
Figura 1 Proceso Productivo de Tridimensionales M&S S.A.S.



Fuente: Elaboración propia con base en el registro de tiempos promedio, jornadas laborales y pedidos diarios.

Adicionalmente, se conoce que la demanda tiene un comportamiento estacional con dos temporadas altas, la primera entre febrero y marzo, y la segunda entre agosto y octubre (Figura 2). De acuerdo con los datos de los pedidos realizados en los años 2015, 2016 y 2017, se identificó que, en el año 2017, la máxima demanda diaria promedio es de 10831 pares (en febrero), y la mínima demanda diaria promedio es de 2667 pares (en diciembre). Por lo tanto, considerando la actual capacidad de la planta y el comportamiento estacional de la demanda, el tiempo de entrega máximo de un pedido debería ser de 2 días. Sin embargo, se sabe que el *lead time* de la compañía supera en muchas instancias los 8 días.

Figura 2 Comportamiento de la demanda.



Fuente: Elaboración propia

La programación de la producción consiste en la asignación de recursos (máquinas u operarios) a las órdenes de trabajo en el tiempo con el fin de lograr uno o más objetivos (Pinedo, 2012). Para hacer la secuenciación se deben utilizar metodologías avanzadas que consideren la configuración del ambiente productivo. En el caso específico de este proyecto, la compañía TRIDIMENSIONALES M&S S.A.S posee un entorno de producción *Hybrid Flow Shop* (HFS). Un HFS consta de S estaciones en serie. Al menos una de las estaciones se compone de dos o más máquinas en paralelo. Todos los trabajos deben visitar todas las estaciones, a sólo una de las máquinas en paralelo de cada estación (Rossi, Pandolfi, & Lanzetta, 2014).

De acuerdo con Allahverdi, Aydilek y Aydilek (2016), el problema de minimizar los trabajos tardíos en un entorno de producción HFS es NP-hard, es decir, que no se pueden obtener soluciones exactas y eficientes en tiempos computacionales razonables. Lo anterior indica que para lograr una programación cercana al óptimo y en tiempos

cortos, es necesario utilizar técnicas heurísticas o metaheurísticas que faciliten la toma de decisiones. Sin embargo, el método actual de la compañía para la programación de la producción no tiene en cuenta la complejidad de su entorno ni se apoya en ninguna herramienta computarizada. De hecho, una vez que las ordenes de producción son recibidas por correo electrónico, mensajería instantánea o telefónicamente, una persona encargada imprime el soporte y alimenta un cuaderno utilizado por el programador, el cual deja acumular los pedidos de cada referencia hasta tener una cantidad de pares que le parezca viable para disminuir los tiempos de preparación. Con este proceso actual se interrumpe el 55% de los trabajos programados para entregar los pedidos de clientes con prioridad (aquellos que pagan de contado) en menor tiempo. Adicionalmente, dado que no se considera un tiempo específico para realizar actividades de mantenimiento, el programa de producción se expone a interrupciones imprevistas por causa de averías, daños o falta de conocimiento del operario al momento de manipular la máquina. Esto aumenta los tiempos de preparación de molde, máquina, material, inventario de producto en proceso y número de trabajos tardíos.

Según Zhou, Li, Xi y Lee (2015) la falta de mantenimiento preventivo conlleva a la falla masiva de los equipos, por lo que una correcta implementación de dicho programa reduce el número de fallas y mantiene los equipos en buenas condiciones. De acuerdo con la información obtenida de paradas de máquinas por averías en el año 2017, se identificó que en promedio el tiempo total fuera de servicio entre todas las máquinas de inyección es de 12 horas al día lo cual representa un 4.45% del tiempo total disponible diario y 432 pares por turno que se dejan de producir. Además, se conoce que cada día se debe reparar en promedio 1 molde durante un tiempo de 4 horas. Esto significa que por causa de la avería de los moldes se deja de producir un estimado de 144 pares en un turno de 12 horas.

Dado que el problema del balanceo depende directamente del presupuesto de inversión de la empresa para contratar más personal o comprar maquinaria que reduzca el tiempo de ciclo de la actividad cuello de botella, el alcance del presente proyecto contempla: i) el diseño de un programa de mantenimiento preventivo para las máquinas y los moldes y ii) el diseño de un algoritmo para la programación de la producción que, teniendo en cuenta los mantenimientos propuestos, minimice el número de trabajos tardíos de la compañía. Esto se hará en dos escenarios de balanceo de la línea, el balanceo actual, y un balanceo propuesto, de tal manera que la empresa pueda decidir si invierte o no en el balanceo de la línea, o si con las propuestas de mantenimiento y programación de la producción obtiene suficiente mejora.

En cuanto a los métodos de solución, para resolver el problema del HFS se han utilizado metodologías exactas, heurísticas y metaheurísticas. Los métodos exactos, que ofrecen soluciones óptimas, requieren un alto costo computacional en problemas complejos (Ziaefar, Tavakkoli-Moghaddam, & Pichka, 2012). Por otro lado, las técnicas heurísticas tienen la desventaja de terminar (en la mayoría de los casos) en un óptimo local que puede ser muy distante del óptimo global (Altassan, El-Sherbiny, & Abid, 2014). Se sabe que la superación de la optimalidad local es un tema crucial en un problema de optimización (Glover, 1986). Por lo tanto, surgen procedimientos metaheurísticos como una buena solución a problemas de optimización complejos, porque por un lado son marcos de referencia (*Frameworks*) que proveen un conjunto de lineamientos o estrategias para desarrollar algoritmos de optimización heurísticos, y por otro lado, son algoritmos heurísticos en sí mismos que se implementan de acuerdo con los lineamientos o estrategias de un determinado *Framework* (Sorensen, Sevaux, & Glover, 2017).

Existen metaheurísticas como el *Genetic Algorithm* (GA), *Greedy Randomized Adaptive Search* (GRASP), *Tabú Search* (TS), *Simulated Annealing* (SA), *Ant Colony Optimization* (ACO), *Iterated Local Search* (ILS), entre otras. Jones, Mirrazavi y Tamiz (2002) encontraron que cerca del 70% de los estudios en el campo de los problemas de optimización combinatoria (COP por sus siglas en inglés), se han desarrollado usando *Evolutionary Algorithms* (EA) dentro de los cuales se encuentra el GA, el 24% con SA, y tan solo el 6% con TS. Sin embargo, a pesar de su poco uso, la mayoría de los casos abordados con el método TS han generado soluciones muy cercanas al óptimo (Gendreau & Potvin, 2010). Igualmente, Youssef, M. Sait y Adiche (2001) demostraron que para determinados problemas, TS presenta el mejor desempeño con respecto a la calidad de las soluciones, y además, con respecto a la complejidad de la implementación, TS y SA requieren menor esfuerzo que GA. El propósito de TS es explorar siempre que se encuentre un óptimo local permitiendo movimientos que no mejoren. Además, el método TS a diferencia de EA y SA, tiene un componente de memoria explícito llamado lista tabú, el cual almacena los movimientos recientes evitando el regreso a soluciones visitadas previamente. Así, con dichas características y con ayuda de otros mecanismos, se logra escapar de óptimos locales (Glover, 1986). Las cualidades del método TS resultan adecuadas para resolver el problema de HFS, y por lo tanto la metodología propuesta en este proyecto se desarrollará con base en la metaheurística TS.

Para los programas de mantenimiento preventivo de máquinas y moldes, se han utilizado técnicas como Análisis modo efectos de falla (AMEF), *Reliability Centered Maintenance* (RCM), *Total Productive Maintenance* (TPM), entre otros. Para este proyecto se utilizará la metodología RCM combinada con AMEF (RCM/AMEF) debido

a la facilidad, practicidad, rapidez y efectividad de su implementación (Rojas, Villarreal, & Morera, 2014). La metodología AMEF será embebida dentro del proceso RCM para la descripción, identificación y evaluación total de los modos de falla potenciales y sus efectos (Braaksma, 2012).

Considerando la problemática mencionada, ¿Cómo se debe diseñar un programa de producción para la empresa TRIDIMENSIONALES M&S S.A.S, que minimice la proporción de trabajos tardíos y que considere dentro de sus restricciones un programa de mantenimiento preventivo de máquinas y moldes, aplicando la metaheurística TS y desarrollar una prueba piloto de su implementación?

2. Antecedentes

Esta sección presenta los trabajos más relevantes realizados en la solución de problemáticas de mantenimiento preventivo de las máquinas y moldes de inyección, así como de la metodología de la programación de la producción en ambientes HFS.

2.1. Mantenimiento de máquinas y moldes.

En el área del mantenimiento preventivo se han realizado diversos estudios que abarcan técnicas como: AMEF, *Overall Equipment Efficiency* (OEE), RCM, TPM, Lubricación Electricidad Mecánica (LEM), entre otras. Cada una de ellas se enfoca en aumentar la disponibilidad de las máquinas y equipos mediante su control e intervención en periodos de tiempos previos a la ocurrencia de una falla. A continuación, se presentan los resultados obtenidos por diferentes autores con el uso de estas técnicas.

El método AMEF fue aplicado por Pinzón, K, & Ruiz (2017). Los autores lograron reducir los gastos totales de mantenimiento en un 43% con respecto al año inmediatamente anterior. Troffe (2010) concluyó que la metodología AMEF considera que los componentes de un equipo son perfectamente identificables, por lo cual, al identificar todos los modos posibles de falla para cada equipo, y listar los sistemas, sub-sistemas, componentes, causas de fallas y descriptores de falla, que se recorren de manera sistemática en una secuencia ordenada, difícilmente quedará por fuera alguna falla supuesta que afecte las funciones de los equipos.

Moubray (1995) propone un cambio de la idea que la rutina de mantenimiento se relaciona solamente con prevenir los fallos. En su lugar, la mencionada rutina debe relacionarse no solo con la prevención de los fallos sino con evitar, reducir y eliminar las consecuencias que en materia de producción, calidad, seguridad y protección del medio ambiente pueden traer las fallas de los equipos. El resultado es la implementación de la metodología RCM que se basa en la criticidad de los fallos, analizándolos desde las consecuencias y no desde las características técnicas. Así mismo, el autor propone que cualquier proceso de RCM debe responder adecuadamente a siete aspectos que indagan sobre las funciones y estándares de desempeño de los equipos, la manera en que pueden presentarse fallas en las funciones del equipo, las causas de cada una de las fallas funcionales, los efectos de cada una de las fallas, la importancia de la ocurrencia de cada una de las fallas, lo que debe hacerse para predecir o prevenir cada falla y lo que se debería hacer si no se puede establecer una tarea proactiva para evitar la falla.

El método de mantenimiento centrado en la confiabilidad ha sido también implementado por varios autores que lograron un aumento en la disponibilidad de las máquinas y una disminución de costos de mantenimiento. Morocho, Rodríguez y Charles (2018) diseñaron un plan de mantenimiento RCM en una empresa peruana de excavadoras hidráulicas. Valdivieso y Amaya (2010) implementaron el método RCM en una planta industrial de plásticos. Esto aumentó la eficiencia de la producción, y redujo las horas paradas por daños en las máquinas.

En cuanto al mantenimiento de moldes, Silva y Uribe (2011) identificaron las variables que afectan el estado de los moldes por medio de un programa de capacitación a los empleados ayudando a evitar fallas en el mantenimiento de moldes de inyección. Calderon (2006) presenta la importancia del mantenimiento de los moldes en el área de inyección de la empresa Indulplastic S.A. Para ello diseñó un programa para el montaje y desmontaje de moldes. Esta propuesta se dividió en 2 partes: 1) mantenimiento preventivo, y 2) elaboración de un formato de hoja de vida del molde. Esto arrojó como resultado un molde en óptimas condiciones y redujo los tiempos muertos cuando se efectúa el cambio de molde.

2.2. Programación de la producción en ambientes HFS

Gran cantidad de investigaciones han sido realizadas en la programación de la producción de entornos HFS. La mayoría de ellas se han concentrado en la minimización del *makespan* considerando máquinas paralelas idénticas en cada estación. No obstante, otras medidas relacionadas con la fecha de entrega de los trabajos y la consideración de máquinas paralelas no relacionadas o inconexas acerca más el problema a los entornos reales. Ruiz, Maroto y Alcaraz (2006) el objetivo era minimizar el *makespan*. Inicialmente los autores desarrollaron un modelo matemático para resolver óptimamente instancias pequeñas. Luego propusieron un GA de rápida implementación y lo compararon con técnicas como otros GA, TS, SA, entre otras, demostrando que el algoritmo propuesto es muy efectivo y al mismo tiempo de fácil implementación para el problema de programación de HFS.

Shahvari, Salmasi, Logendran y Abbasi (2012) resolvieron el problema de programación de la producción en un HFS que consideraba secuencias dependientes de grupos (HFSDGS). Su objetivo fue minimizar el *makespan*. Para ello, desarrollaron un algoritmo TS. Obtuvieron con una confiabilidad de 95% que su algoritmo tiene un mejor desempeño que los algoritmos previamente desarrollados para el mismo problema. Varmazyar y Salmasi (2012) desarrollaron un algoritmo para minimizar el número de trabajos tardíos en un entorno *Hybrid Flow Shop with Dependent Setup Times* (HFSDST), evaluando 5 diferentes metaheurísticas basadas en TS y *Imperialist Competitive Algorithm* (ICA): TS con memoria de corto plazo, TS con intensificación, TS con diversificación, ICA, y un híbrido de ICA y TS, usando ICA primero por un corto periodo de tiempo, y después usando la mejor solución como la inicialización de TS sin ninguna memoria de largo plazo. Concluyeron que el desempeño de ICA es peor que el de otros algoritmos para problemas pequeños y medianos, y que la combinación entre TS y ICA presentó el mejor desempeño que otros algoritmos propuestos para problemas de largo tamaño.

Chen y Chen (2008) resolvieron el problema de programación en un entorno HFS con *Unrelated Parallel Machine* (UPM), cuyo objetivo era minimizar el número de trabajos tardíos. El resultado simulado por computadora superó significativamente a las bien conocidas normas de despacho; *Shortest Process Time* (SPT), *Earliest Due Date* (EDD), *Cost Over Time* (COVERT), *Modified Due Date* (MDD), *Apparent Tardiness Cost* (ATC), *Binary Decision Diagrams* (BDD).

Entre los trabajos desarrollados en entornos HFSDST con UPM, se encuentran Jungwattanakit, Reodecha, Chaovalitwongse y Werner (2009) minimizaron el *makespan* y la cantidad de trabajos tardíos. Se plantearon heurísticas constructivas además de las metaheurísticas SA, TS y los GA. Los experimentos demostraron que los algoritmos SA propuestos son mejores que los TS y los GA entre los algoritmos metaheurísticos iterativos. Varmazyar y Salmasi (2012) minimizaron el número de trabajos tardíos. Probaron tres metaheurísticas diferentes basadas en la búsqueda tabú. El resultado demuestra que el algoritmo cuya lista tabú mantiene el seguimiento del slot para cada trabajo presenta un mejor rendimiento. Lamothe, Marmier, Dupuy, Gaborit y Dupont (2012) probaron diferentes heurísticas como EDD, ATC y *Apparent Tardiness Cost With Setup* (ATCS) para minimizar la tardanza total en una industria farmacéutica. La heurística ATCS mejoró la solución en comparación con los otros modelos, aunque es un modelo complejo de realizar. Rabiee, Sadeghi Rad, Mazinani y Shafaei (2014) desarrollaron una metaheurística híbrida inteligente para minimizar el tiempo total de terminación. El resultado demostró que la metaheurística propuesta *Hybrid Algorithm* (HA) supera estadísticamente a los otros algoritmos de prueba como ICA, *Variable Neighborhood Search* (VNS), SA, GA y ACO en términos de medias de rendimiento.

La mayoría de los estudios en materia de programación de la producción presentados anteriormente, asumen que las máquinas y los equipos se encuentran disponibles durante todo el horizonte de planeación. Sin embargo, este supuesto no es real en el día a día de un sistema de producción, en donde existen largos periodos de máquinas no disponibles, principalmente por actividades de mantenimiento (Azadeh et al., 2015).

Finalmente se encontró que Allaoui & Artiba (2006) resolvieron el problema de minimizar el *Makespan* en un entorno HFS con restricciones de disponibilidad considerando un enfoque determinístico en el cual el tiempo de inicio y duración de los intervalos de mantenimiento son conocidos desde el inicio y con trabajos no reanudables. Lo anterior representa una buena estrategia para llevar a cabo la implementación de una solución que considere intervalos de no producción.

3. Objetivos

General: Diseñar un programa de producción para la empresa TRIDIMENSIONALES M&S S.A.S que minimice la proporción de trabajos tardíos y considere dentro de sus restricciones un programa de mantenimiento preventivo de máquinas y moldes, aplicando la técnica metaheurística Búsqueda Tabú (TS); y desarrollar una prueba piloto de su implementación.

Específicos:

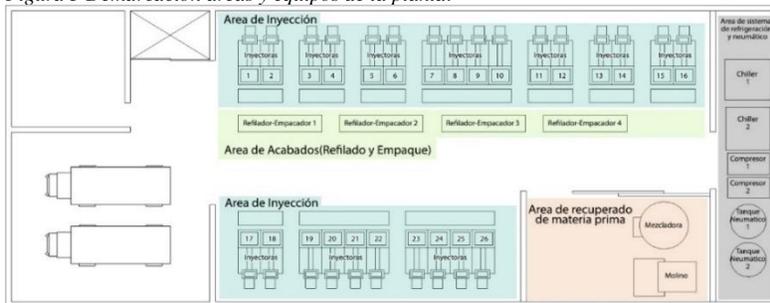
- Diseñar un programa de mantenimiento preventivo para aumentar la disponibilidad de las máquinas y los moldes.
- Diseñar la metaheurística TS para la programación de la producción de la empresa, que minimice el número de trabajos tardíos, teniendo en cuenta el programa de mantenimiento preventivo propuesto.
- Desarrollar una prueba piloto de la implementación de la solución propuesta bajo dos escenarios: el primero manteniendo el balanceo actual, y el segundo, partiendo del supuesto de que la línea se encuentra balanceada.
- Comparar los resultados del número de trabajos tardíos de cada uno de los escenarios propuestos con respecto a la situación diagnosticada inicialmente en la empresa.

4. Programa de mantenimiento preventivo para máquinas y moldes.

4.1. Identificación de los equipos, sus dependencias y valoración de criticidad.

En primera instancia se identificaron 4 áreas principales en la planta de la empresa y los equipos correspondientes: Inyección, Sistemas neumáticos y refrigeración, Recuperado de materia prima y, Acabados. En la Figura 3 se presenta la demarcación de cada una de estas zonas.

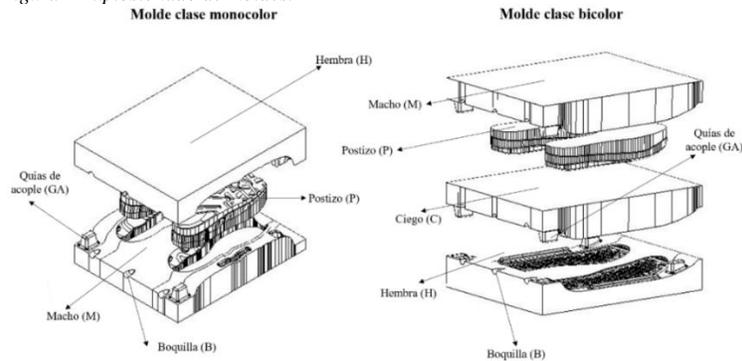
Figura 3 Demarcación áreas y equipos de la planta.



Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a los moldes, se identificó que en la empresa existen dos clases: moldes para suelas bicolor, y moldes para suelas monocolor. En la Figura 4 se muestran las partes que componen a cada una de las clases mencionadas.

Figura 4 Explosionado de moldes.



Fuente: Elaboración propia.

Como se aprecia en la Figura 4, los moldes Monocolor se componen de 3 piezas principales: Hembra (H), macho (M), y postizos (P). Los moldes Bicolor se componen igualmente de H, M, y P, con un elemento adicional

llamado Ciego (C) que permite inyectar un segundo color. Las piezas anteriormente mencionadas no varían en relación con las distintas referencias de la compañía.

Posteriormente, se elaboró una lista inicial de equipos y moldes presentando las relaciones de dependencia y, luego, se le asignó un código a cada uno. Se utilizó un sistema de codificación significativo, es decir, que aporta información sobre el elemento codificado. Por ejemplo, tipo de equipo, área en el que está ubicado, familia a la que pertenece, entre otros. Una vez todas las máquinas fueron identificadas y codificadas, se realizó un análisis de criticidad de parada, identificando las consecuencias de un fallo funcional en cuanto a la producción, calidad y seguridad. De acuerdo con las características identificadas, se asignó un determinado modelo de mantenimiento.

La empresa posee 26 puestos de inyección agrupados en 3 tipos de máquinas inyectoras: Electromodul de 2 puestos, Electromodul de 4 puestos, y Main Group de 2 puestos. Los equipos del área de inyección (INY) son los únicos que se encontraron con criticidad alta, esto corresponde a la naturaleza del negocio de la empresa, puesto que el único tipo de producto que se produce son suelas inyectadas para calzado. En cuanto a los equipos del área de Recuperado de materia prima (REMP) son utilizados solamente 2 días a la semana cuando se ha acumulado suficiente material para recuperar. Por otro lado, se identificó que los equipos del área de Sistema Neumáticos y de refrigeración (NURE) fallaron en un 2.33% en 2017 (7 días de los 300 días trabajados durante 2017). Por las razones anteriores, y en conjunto con el mecánico de la planta, se determinó una criticidad media para los equipos de REMP y NURE. Debido a que los moldes (MOLD) son fundamentales para realizar el proceso de inyección, se determina que tienen una categoría de alta criticidad, y por lo tanto se les asigna un modelo de mantenimiento de alta disponibilidad. En el *anexo No 2 Programa Mantenimiento Preventivo* se encuentran las fichas realizadas en el presente proyecto para cada uno de los equipos y clases de moldes analizados. En estas se pueden encontrar, datos generales, y características detalladas.

4.2. Plan de mantenimiento basado en RCM, AMEF y la norma ISO 14224

La metodología RCM/AMEF se utilizó para reconocer las funciones y estándares de desempeño de los equipos y moldes. Luego, se identificaron los fallos que se pueden presentar durante su operación, las causas, las consecuencias y su criticidad. Posteriormente, se definieron acciones encaminadas a evitar y/o mitigar los efectos de los fallos. La norma ISO 14224 está fundamentada en la metodología RCM, y contiene dos aportes valiosos. El primero, es la presentación de los lineamientos para la especificación, obtención, aseguramiento de calidad, organización y tratamientos de los datos antes y durante la implementación del programa. El segundo, la descomposición de los equipos en jerarquías limitadas solamente por el nivel de detalle al que se desee llegar (Clase de equipo/Equipo/Sistemas/Sub sistemas/Elementos y/o componente (Ítem mantenible)). La Figura 5 presenta la jerarquía y la matriz utilizada para la implementación del programa de mantenimiento preventivo tanto de máquinas inyectoras como de moldes para la empresa Tridimensionales M&S SAS.

Figura 5 Jerarquía utilizada para la descomposición de los equipos de la empresa Tridimensionales M&S SAS.

Equipo		Sistema		Elemento		Componente																
Máquina/Molde (A)	Sistema A1	Elemento A1.1		Componente A1.1.1																		
		Elemento A1.2		Componente A1.2.1																		
	Sistema A2	Elemento A2.1		Componente A2.1.1																		
		Elemento A2.2		Componente A2.2.1																		
Equipo/Clase de molde	Cod	Sistema	Funciones	Cod	Elemento	Función del elemento	Cod	Componente	T. vida útil repuesto	Fallos del elemento	Modo de fallo (causa)	Efecto de la falla	Conse.en la operación	Conse.en la calidad	Conse.en la seguridad	Severidad	Ocurrencia	Detección	NPR	Tareas.mant	Periodicidad	Duración
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23

Fuente: Elaboración propia.

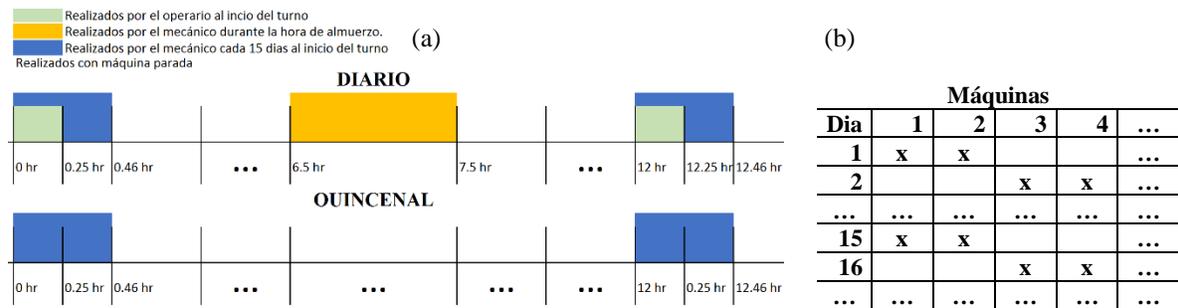
La matriz presentada en la Figura 5, se diseñó con el objetivo de reunir en un único formato la mayoría de los factores que intervienen en la implementación de un programa de mantenimiento preventivo, y facilitar futuras actualizaciones y/o modificaciones dirigidas a mejorar el programa. Los items 1 al 9, representan la jerarquía propuesta en la norma ISO 14224. Los items 10 al 13, permiten llevar a cabo un AMEF y conocer el repuesto asociado y su tiempo de vida útil. Los items 14 al 20, facilitan la evaluación de la criticidad desde el enfoque RCM

(confiabilidad y consecuencias), no sólo de los equipos y moldes, sino de cada uno de los fallos que puede presentar cada componente o sistema de un determinado equipo o molde. Los items 21 al 23 cierran el ciclo de la matriz, mediante la identificación de las tareas de mantenimiento preventivo adecuadas para evitar y/o mitigar los efectos de cada uno de los fallos. Los datos de la matriz se llenaron mediante el análisis del histórico de fallos, entrevistas con el mecánico de la planta, operarios de inyección, taller, diseñadores de moldes y, manuales de uso y mantenimiento de los equipos. Posteriormente, al completar todos los datos de la matriz se agruparon todas las tareas por gamas en función de la frecuencia de realización: diarias, quincenales, mensuales, semestrales y anuales. En el *anexo No 2 Programa Mantenimiento Preventivo* del presente proyecto se encuentra la matriz completa de máquinas inyectoras y clases de moldes.

4.3. Producto del programa de mantenimiento preventivo

Una vez desarrolladas las Gamas de mantenimiento tanto para las máquinas inyectoras, como para los moldes, las tareas de cada gama que requieren que las máquinas estén paradas, se convirtieron en intervalos de mantenimiento preventivo. Los tiempos de inicio y la duración de los intervalos diarios y quincenales se utilizaron como parámetros para la programación de la producción. Las tareas diarias realizadas por el operario deben llevarse a cabo al inicio de cada turno durante 0.25 hr. Las tareas diarias realizadas por el mecánico deben realizarse durante la hora de almuerzo a partir de la hora 6.5 y hasta la hora 7.5, cuando las máquinas se paran rutinariamente. Las tareas quincenales, son realizadas por el mecánico de la planta al inicio del turno y durante 0.466 hr. Debido a que la planta solo cuenta con un mecánico, se deben hacer las tareas quincenales para dos máquinas distintas cada día. En la Figura 6 (a) se presentan los intervalos de mantenimiento preventivo diario y quincenal. Los intervalos azules que se visualizan en la planificación diaria solamente ocurren cada 15 días. En la Figura 6 (b) se presentan los intervalos de mantenimiento preventivo, donde la X representa el día de asignación para realizar las tareas quincenales.

Figura 6 Intervalos de mantenimiento preventivo diario y programación quincenal.



Fuente: Elaboración propia.

La ubicación de los intervalos presentados anteriormente responde al requerimiento de desempeño que solicita ejecutar tareas de mantenimiento preventivo bien sea al comenzar y/o finalizar el turno. Los intervalos presentados corresponden a la totalidad de las tareas de mantenimiento preventivo diarias que requieren paro de máquinas. En la Tabla 1 se presentan, a modo de ejemplo, dos de las tareas diarias que requieren paros de máquina. Sin embargo, tanto la gama diaria como la gama quincenal contemplan otra serie de tareas, que no requieren parar la máquina y permiten identificar anomalías que pueden indicar un futuro fallo.

Tabla 1 Ejemplo Tareas de mantenimiento preventivo diarias que requieren paro de máquina.

DIARIAS							
Id	Tarea	Sistema	Elemento	¿Máquina parada?	Tiempo (min)	Quien lo realiza	En qué momento
3	Inspeccionar que la resistencia este abrazando el cañón.	Eléctrico	Resistencias	Si	2	Operario	Al inicio del turno
5	Revisar que los cables de las resistencias estén bien ajustados	Eléctrico	Resistencias	Si	2	Operario	Al inicio del turno

Fuente: Elaboración propia.

En el *anexo No 2 Programa Mantenimiento Preventivo* se podrán encontrar las gamas diarias, quincenales, mensuales, semestrales y anuales detalladas para el mantenimiento de las máquinas inyectoras, en donde se indican cada una de las tareas a realizar. Algunas tareas quincenales, así como todas las tareas mensuales, semestrales y

anuales fueron programadas los domingos para responder al requerimiento de desempeño que solicita ubicar tareas de mantenimiento largas en horarios no productivos. Igualmente, se anexa la gama única de mantenimiento de moldes.

4.4. Pruebas de rendimiento

Se ejecutó una prueba piloto del programa de mantenimiento preventivo para medir la disminución en la cantidad de fallos, costo y tiempo de mantenimiento obtenidas con el PM propuesto. Para ello se seleccionó una máquina de cada uno de los tres grupos de máquinas inyectoras (MI_{Grupo}) y durante 15 días se le realizaron las tareas de mantenimiento preventivo propuestas. Las demás máquinas no se intervinieron (MNI_{Grupo}) y sus estadísticas se utilizaron como contraste a las estadísticas de las inyectoras intervenidas. Los resultados se presentan en la Tabla 2, mostrando que el PM ayuda a reducir el porcentaje del número de fallos, tiempo de mantenimiento correctivo, y su costo total: entre 42.86% y 75.00%, 46.09% y 76.61% y 48.29% y 74.03% respectivamente. El detalle de los resultados se puede encontrar en el *anexo No 3 Resultados Prueba Piloto PMP*

Tabla 2 Prueba desempeño mantenimiento preventivo.

Grupo	Máquina	#Fallos	Tiempo (hr)	Costo Repuestos	Costo Mano Obra	Costo no producción	Costo no calidad	Costo total
EMODUL 2	MI ₁	4	6.83	0	\$ 60,623	\$ 536,261	\$ 78,200	\$ 675,084
	MNI ₁	7	12.67	\$ 75,000	\$ 112,374	\$ 994,044	\$ 124,200	\$ 1,230,618
EMODUL 4	MI ₂	1	4	0	\$ 35,487	\$ 313,909	\$ 13,800	\$ 363,196
	MNI ₂	4	11.38	\$ 77,000	\$ 100,989	\$ 893,332	\$ 73,600	\$ 1,067,921
MGROUP 2	MI ₃	1	3	0	\$ 26,615	\$ 235,431	\$ 13,800	\$ 275,846
	MNI ₃	3	12.83	\$ 3,000	\$ 13,853	\$ 1,007,123	\$ 41,400	\$ 1,062,376

Fuente: Elaboración propia.

5. Metaheurística TS.

5.1. Levantamiento de datos requeridos (parámetros).

Los parámetros como tiempo de montaje (alistamiento) de moldes, tiempo de procesamiento de cada trabajo en cada estación, factores de velocidad para cada máquina u operario en cada estación, *release time* y *due dates*, fueron entregados por la empresa. Los parámetros relacionados con los intervalos de producción disponibles (hora de inicio y tiempo de duración), se obtuvieron como resultado del programa de mantenimiento preventivo diseñado y mediante los métodos mencionados en el punto 4.3. En el *anexo No 4 Levantamiento de Parámetros* se presentan todos los parámetros y documentos soporte del levantamiento de los datos.

5.2. Identificación y transcripción de las restricciones reales en términos matemáticos.

A continuación, se presenta el modelo matemático que minimiza la proporción de trabajos tardíos en un ambiente HFS con tiempos de preparación, máquinas en paralelo no relacionadas e intervalos destinados a realizar tareas de mantenimiento preventivo. En el *anexo No 5 Código en Gusek* se encuentra el código implementado en Gusek. En la Tabla 3 y Tabla 4 se presenta la descripción de conjuntos, parámetros y variables de decisión.

Tabla 3 Descripción de conjuntos y parámetros.

Conjuntos			
$J : \{1, 2, 3, 4, \dots, n\}$	Trabajos	$S : \{0, 1, 2\}$	Estaciones
$W : \{2, 3, 4, 5, \dots, n\}$	Subconjunto de trabajos a partir del trabajo 2	$M : \{1, 2, 3, 4, 5, \dots, 26\}$	Máquinas
$B : \{1, 2, 3, \dots, b\}$	Intervalos de producción		
Parámetros			
NM_s	Número de máquinas en la estación s	N	Número de intervalos
$F_{m,s}$	Factor de velocidad de la máquina m en la estación s	D_j	Due date del trabajo j
R_j	Release time del trabajo j	Q	Número muy grande
$T_{j,s}$	Tiempo set up del trabajo j en la estación s	$H_{s,m,b}$	Hora inicio del intervalo b en la estación s en la máquina m
$P_{j,s}$	Tiempo de procesamiento del trabajo j en la estación s	$DB_{s,m,b}$	Duración del intervalo b en la estación s en la máquina m
JT	Numero de trabajos		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4 Variables de decisión.

Variables de decisión			
$X_{j,w,s}$	{1 si el trabajo j precede el trabajo w en la estación s, 0 sino	$Y_{j,s,m,b}$	{1 si el trabajo j en la estación s es asignado a la máquina m en el intervalo b, 0 sino
U_j	{1 si el trabajo j es tardío, 0 sino	$C_{\max(j)}$	Hora de entrega del trabajo j
$C_{j,s}$	Hora de terminación del trabajo j en la estación s		

Fuente: Elaboración propia.

$$\begin{aligned} \text{Minimizar } Z &: \frac{\sum_{j \in J} U_j}{JT} \quad (1) \\ C_{\max(j)} &\geq C_{j,2} \quad \forall_{i \in I} \forall_{j \in J} \quad (2) \\ U_j * Q &\geq C_{j,2} - D_j \quad \forall_{j \in J} \quad (3) \\ \sum_{m \in M} \sum_{b \in B} Y_{j,s,m,b} &= 1 \quad \forall_{j \in J} \forall_{s \in S}, m \leq NM_s \quad (4) \\ \sum_{j \in J} Y_{j,s,m,b} * \left(\frac{P_{j,s}}{F_{m,s}} + T_{j,s} \right) &\leq DB_{s,m,b} \quad \forall_{s \in S} \forall_{m \in M} \forall_{b \in B} \quad (5) \\ C_{j,s} - C_{(j,s-1)} &\geq \sum_{m \in M, m \leq NM_s} Y_{j,s,m,b} * \frac{P_{j,s}}{F_{m,s}} + T_{j,s} \quad \forall_{j \in J} \forall_{s \in S} > 0 \quad (6) \\ C_{j,s} &\geq \sum_{m \in M, m \leq NM_s} \sum_{b \in B} Y_{j,s,m,b} * \left(H_{s,m,b} + \frac{P_{j,s}}{F_{m,s}} + T_{j,s} \right) \quad \forall_{j \in J} \forall_{s \in S} > 0 \quad (7) \\ C_{j,s} &\leq \sum_{m \in M, m \leq NM_s} \sum_{b \in B} Y_{j,s,m,b} * (H_{s,m,b} + DB_{s,m,b}) \quad \forall_{j \in J} \forall_{s \in S} > 0 \quad (8) \\ Q * (2 - Y_{j,s,m,b} - Y_{w,s,m,b} + X_{j,w,s}) + C_{j,s} - C_{w,s} &\geq P_{j,s} / F_{m,s} + T_{j,s} \quad \forall_{j \in J} \forall_{w \in W} \forall_{s \in S} \forall_{m \in M} \forall_{b \in B}, j < w, s > 0 \quad (9) \\ Q * (3 - Y_{j,s,m,b} - Y_{w,s,m,b} + X_{j,w,s}) + C_{w,s} - C_{j,s} &\geq P_{w,s} / F_{m,s} + T_{w,s} \quad \forall_{j \in J} \forall_{w \in W} \forall_{s \in S} \forall_{m \in M} \forall_{b \in B}, j < w, s > 0 \quad (10) \\ C_{j,0} &= R_j \quad \forall_{j \in J} \quad (11) \end{aligned}$$

En la Tabla 5, se presenta la explicación detallada de cada una de las restricciones del modelo.

Tabla 5 Descripción de restricciones.

Restricciones	Descripción
(2)	C máx será la hora de terminación del trabajo j en la última estación.
(3)	Cuando la hora de terminación es mayor que la hora de entrega entonces U[j] será igual a 1, ósea que el trabajo j es tardío.
(4)	Cada trabajo j debe ser asignado solamente a un intervalo de producción y una máquina en cada estación s.
(5)	El tiempo de procesamiento de un trabajo j en la estación s debe ser a lo sumo el tiempo de duración del intervalo donde fue asignado.
(6)	El tiempo de terminación de un trabajo j en la estación s debe considerar su tiempo de terminación en la estación anterior sumado a su tiempo de procesamiento en la estación actual.
(7)	El tiempo de terminación de un trabajo j debe ser por lo menos el mismo tiempo de inicio del intervalo donde fue asignado sumado a su tiempo de procesamiento en la estación actual.
(8)	Un trabajo debe finalizarse a lo sumo cuando el intervalo donde fue asignado termine.
(9)	Las restricciones 9 y 10 aseguran la no interferencia de los trabajos j y w siendo procesados en el mismo intervalo de producción b, de la máquina m en la estación s. Si el trabajo j precede al trabajo w en el intervalo b de la máquina m en la estación s, entonces la restricción 9 toma la siguiente forma $Q + C[j, s] - C[w, s] \geq \frac{P[j,s]}{F[j,s]} + T[j, s]$; mientras tanto, la restricción 10 será $C[w, s] \geq \frac{P[j,s]}{F[j,s]} + T[j, s] + C[j, s]$, lo cual garantiza que el trabajo w en el lote b de la máquina m en la estación s no interfiera con el trabajo j con la misma asignación. Cuando se presenta el caso en donde el trabajo w no tiene la misma asignación que el trabajo j, o que el trabajo j no precede al trabajo w, entonces tanto la restricción 9 como la 10 quedan inactivas con la forma $C[j, s] \geq -Q$ y $C[w, s] \geq -Q$, donde -Q es un número muy pequeño.
(11)	El tiempo de terminación de los trabajos j en la estación 0 es igual al tiempo de reléase time.

Fuente: Elaboración propia.

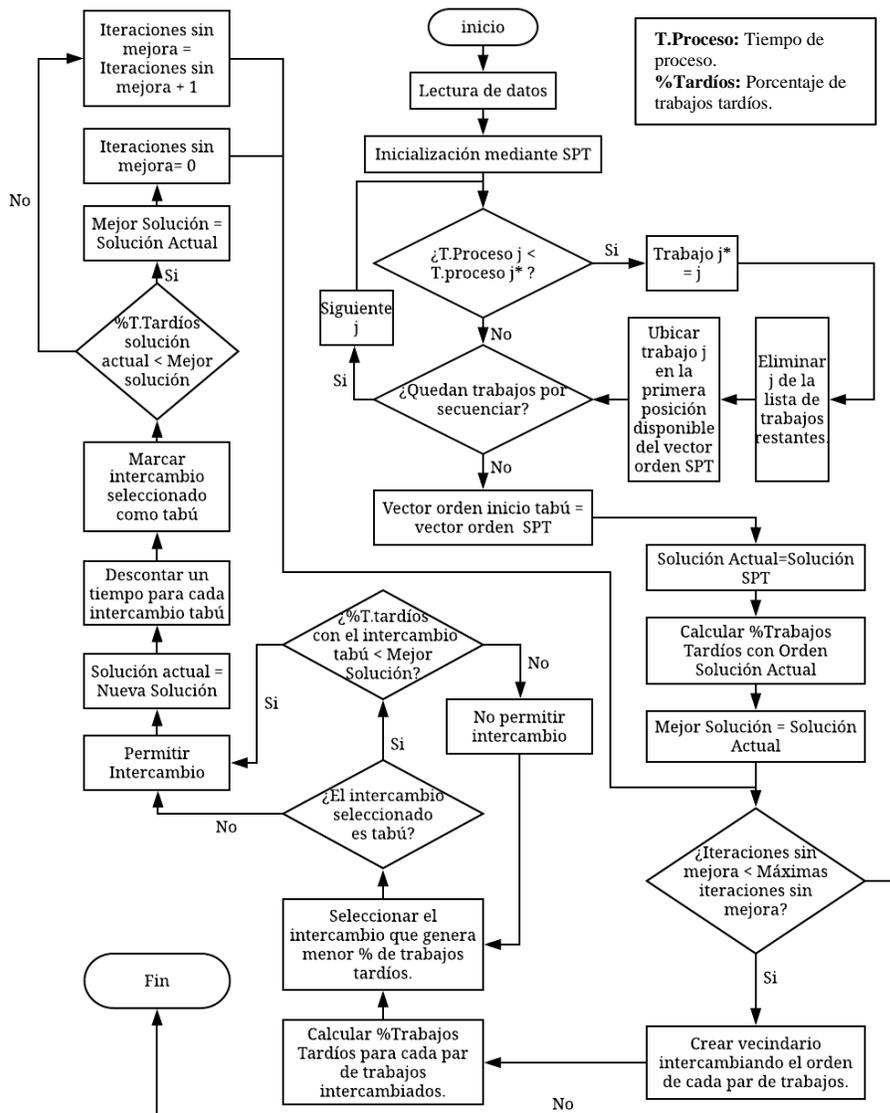
5.3. Programación de la metaheurística TS.

En la Figura 7 se presenta el diagrama de flujo de la metaheurística TS propuesta para la minimización del porcentaje de trabajos tardíos, considerando el programa de mantenimiento propuesto.

5.3.1. Algoritmo de Inicialización y Metaheurística Tabu Search

La implementación de la Metaheurística TS se realizó en el lenguaje de programación *Visual Basic for Applications* (VBA). Tay & Ho (2008), Holthaus & Rajendran (1997) y Raghu & Rajendran (1993) compararon la efectividad de las reglas de despacho SPT, COVERT y ATC frente al objetivo de disminuir la proporción de trabajos tardíos encontrando consistentemente un mejor desempeño con la regla SPT. Por esta razón y debido a la facilidad de implementación de la regla SPT, se seleccionó esta regla como el algoritmo para obtener la solución inicial del TS.

Figura 7 Diagrama de flujo de la metodología Tabú implementada en el presente proyecto.



Fuente: Elaboración propia.

Una vez se tiene el vector orden de la solución inicial, se procede a calcular el valor de la función objetivo mediante la asignación sistemática de los trabajos en cada uno de los intervalos de producción disponibles de cada máquina y seleccionando aquella asignación con la que se obtiene el menor tiempo de terminación. Luego, el

vecindario se halla a través del intercambio de todos los pares posibles de trabajos y se calcula la función objetivo (FO) para cada nueva solución. Posteriormente, se selecciona el intercambio con el cual se obtiene el menor porcentaje de trabajos tardíos, si es tabú pero la FO es mejor que la FO de la iteración anterior, entonces se permite, si no, se prohíbe y se selecciona el segundo mejor intercambio. Finalmente, el intercambio seleccionado es marcado como tabú y se actualizan aquellos que ya lo eran. Si la FO no mejora la anterior FO, entonces se suma una iteración sin mejora y se itera hasta que se alcance el número máximo permitido. En los numerales 5.3.1.1 a 5.3.1.4, se presenta el funcionamiento de la metaheurística con un pequeño ejemplo.

5.3.1.1. Lectura de parámetros.

En primera instancia se hace la lectura de todos los parámetros. En la Tabla 6 se presentan los parámetros del ejemplo.

Tabla 6 Parámetros recibidos por TS

J: Trabajo - **(P):** Tiempo de procesamiento - **(T):** Tiempo de alistamiento - **(L):** Release Time - **(DD):** Due Date - **INY:** Inyección - **RE:** Refilado y empaque - **(H):** Hora inicio intervalo - **(D):** Duración intervalo.
No. Inyectoras: 2 - **No. Estaciones:** 2 - **No. Operario de refilado y empaque:** 1 - **No. Intervalos:** 2

J	(P)(hr)		(T)(hr)		(L) (hr)	(DD)(hr)	Factor de velocidad		
	INY	RE	INY	RE			Máquinas/Operario	Inyectora	Operario
1	3.00	1.50	0.2	0	0	7.5	Máquina/Operario 1	1.17	1
2	3.50	2.00	0.2	0	0	7.5	Máquina/Operario 2	1.44	
3	1.50	0.80	0.2	0	0	7.5			
4	2.50	1.00	0.2	0	0	7.5			

Intervalo de producción (IP)	(H)1	(D)1	(H)2	(D)2
Inyectora 1		0.6	2.7	3.9
Inyectora 2		0.6	2.7	3.9
Operario Refilado Empaque 1		1	7.4	N/A

Fuente: Elaboración propia

5.3.1.2. Obtención de solución inicial con regla de despacho SPT

Se calculan los tiempos de procesamiento total para cada trabajo en todas las máquinas u operarios (dependiendo de la estación) con sus respectivos factores de velocidad (A). Luego, para cada trabajo, se selecciona el menor tiempo de proceso en cada estación (C) y (D), y posteriormente se suman. Finalmente, se organizan los trabajos de mayor a menor tiempo de procesamiento sumado (E). Ver Tabla 7

Tabla 7 Ejemplo inicialización SPT.

J	(A)Estación Inyección		(B)Estación Refilado- Empaque Operario 1	(C)Menor Inyección	(D)Menor Refilado- Empaque	(E)Orden de menor a mayor
	Inyectora 1	Inyectora 2				
1	3/1.17 = 2.56		2.08	1.5	2.08	3
2			2.43	2	2.43	4
3		1.28	1.04	0.8	1.04	1
4		2.14	1.74	1	1.74	2

Fuente: Elaboración propia.

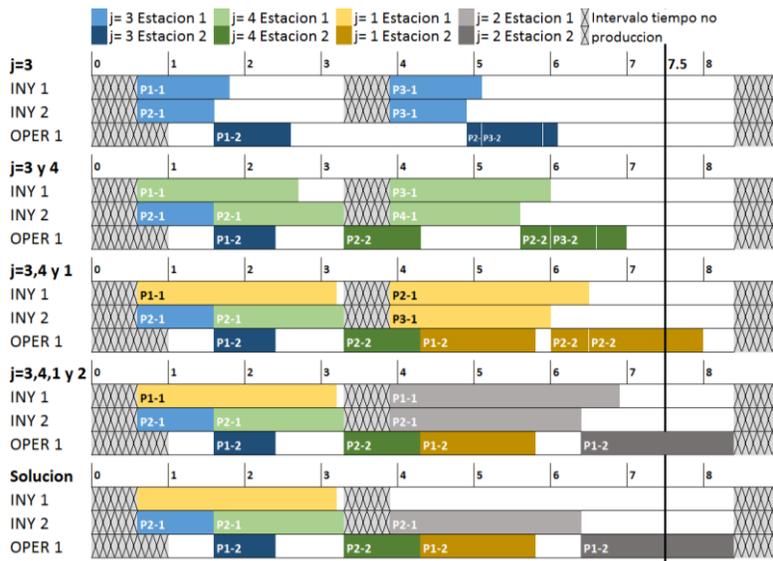
El vector orden inicial es: {3,4,1,2}.

5.3.1.3. Cálculo del porcentaje trabajos tardíos con el vector orden inicial.

En el orden del Vector Orden Inicial {3,4,1,2}, cada trabajo se asigna a cada uno de los intervalos de producción (IP) de todas las máquinas de la estación de inyección y se selecciona el IP de la máquina k que genere el menor tiempo de terminación. Posteriormente, se realiza el mismo proceso con Refilado y empaque, asegurando que el tiempo de inicio en esta estación sea igual o superior al tiempo de terminación del trabajo en la estación de inyección. En la Figura 8 se presenta el procedimiento utilizado para calcular la función objetivo con una secuencia de trabajos dada.

Figura 8 Ejemplo cálculo función objetivo.

P1-1: Posición 1 en la estación 1 – **P2-1:** Posición 2 en la estación 1 – **P1-2:** Posición 1 en estación 2.



Fuente: Elaboración propia

Para realizar la asignación del trabajo 3 en la estación de inyección se prueban 4 posiciones (P1-1, P2-1, P3-1y P4-1). La posición que permite obtener un tiempo de terminación más temprano para j=3 es P2-1 y P1-2 (Intervalo 1 de la máquina inyectora 2). Una vez se ha programado el primer trabajo del vector Orden, se procede a programar el trabajo j=4. Al igual que con j=3, se prueban las 4 posiciones correspondientes a cada uno de los dos intervalos de producción de cada una de las dos máquinas inyectoras. Para j=4, la posición en la que se produce más rápido es P2-1 y P2-2. Para j=1 solo es posible probar 3 posiciones debido a que la capacidad disponible del intervalo 1 de la máquina inyectora 2 es insuficiente para poder asignarlo allí, por lo tanto, P1-1 es la posición de j=1 para obtener la menor hora de terminación. Ahora la capacidad del intervalo 1 de cada una de las máquinas inyectoras es insuficiente para programar j=2, por lo tanto, solo puede probarse en 2 posiciones, P1-1 y P2-1 correspondientes al intervalo 2 de INY 1 e INY 2. La posición que permite terminar el trabajo j=2 más temprano es P2-1. De esta forma, queda realizada la asignación con base en el vector orden generado inicialmente. Como el *due date* de los trabajos es 7.5 hr, la función objetivo para este caso es 1/4, ya que j=2 no alcanza a ser terminado antes de la hora de entrega. En este punto se guarda como la mejor solución encontrada hasta el momento: Vector Orden {3,4,1,2}, asignación de trabajos a máquinas, donde **j**: trabajo, **s**: estación, **m**: máquina y **b**: intervalo. $Y_{j,s,m,b} : Y_{3,1,2,1} = 1, Y_{3,2,1,1} = 1, Y_{4,1,2,1} = 1, Y_{4,2,1,1} = 1, Y_{1,1,1,1} = 1, Y_{1,2,1,1} = 1, Y_{2,1,2,2} = 1, Y_{2,2,1,1} = 1$. Porcentaje de trabajos tardíos: 25%

5.3.1.4. Creación de vecindario, selección de mejor intercambio, lista tabú y definición de solución actual y mejor solución

El vecindario se crea intercambiando las posiciones de cada pareja de trabajos en la matriz. Así, se calcula la función objetivo para cada uno de los nuevos vectores orden (soluciones) y posteriormente la diferencia con respecto a la mejor función objetivo encontrada hasta el momento. Ver Figura 9.

Figura 9 Matrices para la creación del vecindario.

Matriz Intercambios					Matriz diferencias %Trabajos Tardíos				
	1	2	3	4		1	2	3	4
1	-	4-3-1-2	1-4-3-2	2-4-1-3	1	-	0.1	0.15	-0.2
2	4-3-1-2	-	3-1-4-2	3-2-1-4	2	0.1	-	0.05	0.17
3	1-4-3-2	3-1-4-2	-	3-4-2-1	3	0.15	0.05	-	0.07
4	2-4-1-3	3-2-1-4	3-4-2-1	-	4	-0.2	0.17	0.07	-

Fuente: Elaboración propia

De esta manera, se obtiene la matriz de diferencias de la proporción de trabajos tardíos. Se escoge el intercambio que genera la mayor disminución en la función objetivo: 0.17. En este punto, se verifica si el intercambio 2-4 es tabú. En caso afirmativo, se evalúa si la FO generada con la secuencia {3,2,1,4} es menor que la mejor FO

hasta el momento. Si se cumple esta condición, entonces se permite el intercambio. Si no, se prohíbe el movimiento y se escoge la segunda mayor diferencia. Como se trata de la primera iteración, entonces el intercambio aún no ha sido tabú y por lo tanto se permite. Ahora la solución actual es: Vector Orden: {3,2,1,4} y la FO asociada es 8% de trabajos tardíos. A continuación, se descuenta una iteración a todos los movimientos ya eran tabú y posteriormente se ingresa el intercambio 2-4 a la lista tabú durante 2 iteraciones (4 trabajos*0.5). Ver Figura 10.

Figura 10 Matriz tabú.

Descuento en Lista tabú					Ingreso en Lista tabú				
	1	2	3	4		1	2	3	4
1	-	Max(0,valor(1,2) -1)	Max(0,valor(1,3) -1)	Max(0,valor(1,4) -1)	1	-	0	0	0
2	Max(0,valor(2,1)-1)	-	Max(0,valor(2,3) -1)	Max(0,valor(2,4) -1)	2	0	-	0	2
3	Max(0,valor(3,1)-1)	Max(0,valor(3,2) -1)	-	Max(0,valor(3,4) -1)	3	0		-	0
4	Max(0,valor(4,1)-1)	Max(0,valor(4,2) -1)	Max(0,valor(4,3) -1)	-	4	0	0	0	-

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, se evalúa si la FO es menor que la mejor FO encontrada hasta el momento por TS. En caso afirmativo, **Mejor Solución = Solución Actual**. En el caso negativo, no se modifica la Mejor Solución y se suma una iteración sin mejora. En este punto, se evalúa si la cantidad de iteraciones sin mejora ha alcanzado el máximo permitido, si es así, entonces se detiene el algoritmo y se imprimen los resultados de la mejor solución que se alcanzó a encontrar. Si no, entonces se comienza una nueva iteración de la metaheurística TS.

5.3.2. Pruebas de parametrización

La metaheurística TS considera por lo menos dos parámetros utilizados en los procedimientos para escapar de terminaciones locales prematuras. Por un lado, se define el tamaño de la lista tabú, es decir, la cantidad de iteraciones que se prohíbe un determinado movimiento. En segundo lugar, se tiene el criterio de parada que determina el momento en que el algoritmo finaliza. Se sabe que tanto el tamaño de la lista tabú como el criterio de parada, afectan el desempeño del TS. Si el tamaño de la lista tabú es muy pequeño, se regresa siempre a un óptimo local (creación de ciclos). Sin embargo, si el tamaño es muy grande, la función objetivo tiende a deteriorarse debido a la prohibición de una gran cantidad de movimientos, además de un consumo excesivo de tiempo computacional (Glover, Taillard, & De Werra, 1993).

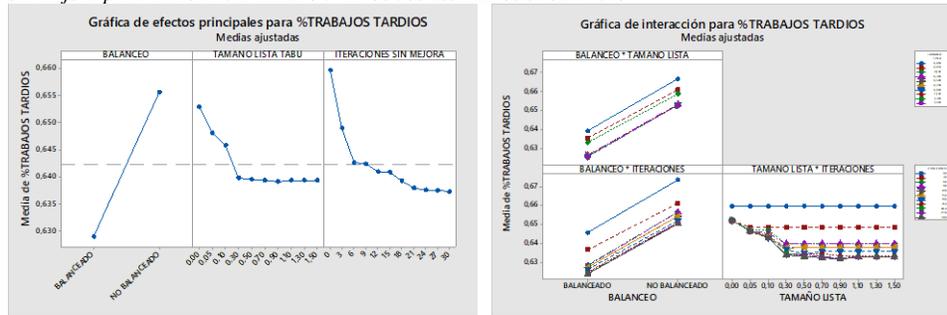
Por lo anterior, resulta necesario para cada caso realizar suficientes pruebas para determinar un tamaño adecuado tanto de la lista tabú como del criterio de parada. Taillard (1991), Tsubakitani & Evans (1998), Yang, Kuo, & Chang (2004) y El Rhazi & Pierre (2009) encontraron que una buena alternativa para probar el tamaño de la lista tabú es definir este parámetro en función del tamaño del vecindario (n) con un intervalo lo suficientemente amplio como para probar tanto valores pequeños como grandes; $n/20$ hasta un máximo de $3n/2$. Adicionalmente, como se trata de un problema de minimizar el número de trabajos tardíos, el parámetro *Due Date* tiene un efecto importante sobre los resultados del TS. Vallada, Ruiz, & Minella (2008) proponen la fórmula [1] para generar *Due dates* adecuados para realizar pruebas en problemas de esta naturaleza. Para realizar las parametrizaciones de la metaheurística propuesta, se hizo uso de los procedimientos propuestos en las anteriores referencias.

$$Distribucion Uniforme \left(P \left(1 - T - \frac{R}{2} \right); P \left(1 - T + \frac{R}{2} \right) \right) \quad [1]$$

Donde, **P** es la Cota mínima del *Makespan*, **T** el *Tardiness Factor*, y **R** el *Due date Range*

Para la parametrización en el presente proyecto se realizó un diseño experimental con tres factores de interés y un factor de bloqueo. Los factores de interés fueron: tamaño de la lista tabú = {0n, 0.05n, 0.1n, 0.3n, 0.5n, 0.7n, 0.9n, 1.1n, 1.3n, 1.5n}; número de iteraciones sin mejora = {0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30} y escenario {con línea balanceada, línea 79% balanceada}. El factor de bloqueo fueron las instancias. Se crearon instancias con n={20,30,40} trabajos para cada una de las cuatro combinaciones de T={0.2, 0.6} y R={0.2, 1}. Esto da un total de 24 instancias diferentes. Los trabajos y los tiempos de procesamiento utilizados en cada instancia fueron tomados de la base de datos de la empresa. Las instancias que se probaron se pueden encontrar en el *anexo No 6 Instancias y resultados de la Parametrización*. Para cada una, se realizaron pruebas ANOVA y Tukey para las proporciones de trabajos tardíos obtenidos con cada una de las 110 combinaciones posibles entre el tamaño de la lista tabú y la cantidad máxima de iteraciones sin mejora permitidas. En la Figura 11 se presentan las gráficas de interacciones y de efectos principales de cada uno de los factores sobre el porcentaje de trabajos tardíos.

Figura 11 Porcentaje de trabajos tardíos para cada una de las 110 combinaciones posibles entre el tamaño de lista tabú e iteraciones sin mejora para la instancia número 7 en los dos escenarios se balanceo.



Fuente: Resultados Minitab

El cumplimiento de los supuestos de normalidad, homocedasticidad e independencia fueron verificados con la gráfica de normalidad, la prueba de Levene y la prueba de corridas respectivamente, demostrando su cumplimiento. El coeficiente de determinación ajustado de 98.56% indica una alta variabilidad explicada de la función objetivo. Los resultados de las pruebas ANOVA-Tukey, indican que con una significancia del 5% y $p\text{-value} < 0.001$ sí existe un efecto significativo de los factores: Tamaño lista tabú, Iteraciones sin mejora y escenario. Por lo tanto, se obtiene diferente porcentaje de trabajos tardíos al probar con distintos niveles de cada factor. Se encontró que el tamaño de lista tabú que genera el menor promedio de porcentajes de trabajos tardíos es: $0.9n$ para el escenario balanceado 78.95% y $0.5n$ para el escenario no balanceado 98.70%. Del mismo modo, se encontró que el número máximo de iteraciones sin mejora que genera el menor promedio de FO en cuestión son: 6 iteraciones para el escenario balanceado y entre 6 a 21 iteraciones para el escenario no balanceado. Para este último caso, se identifica que, si se establecen 21 iteraciones, se logra reducir el porcentaje de trabajos tardíos en 0.566% adicional frente a 6 iteraciones. Sin embargo, se realizó una *trade-off* y se identificó que el tiempo computacional necesario para correr un caso de un tamaño promedio real (110 trabajos) con 21 iteraciones aumenta en 78.33% con respecto al tiempo del mismo caso, pero con 6 iteraciones. Por lo cual, se escoge 6 iteraciones sin mejora como criterio de parada. La proporción de trabajos obtenidos para cada una de las instancias probadas, así como el *trade-off* se encuentran en el *anexo No 6 Instancias y resultados de la Parametrización*.

5.4. Comparativo entre TS y Modelo matemático

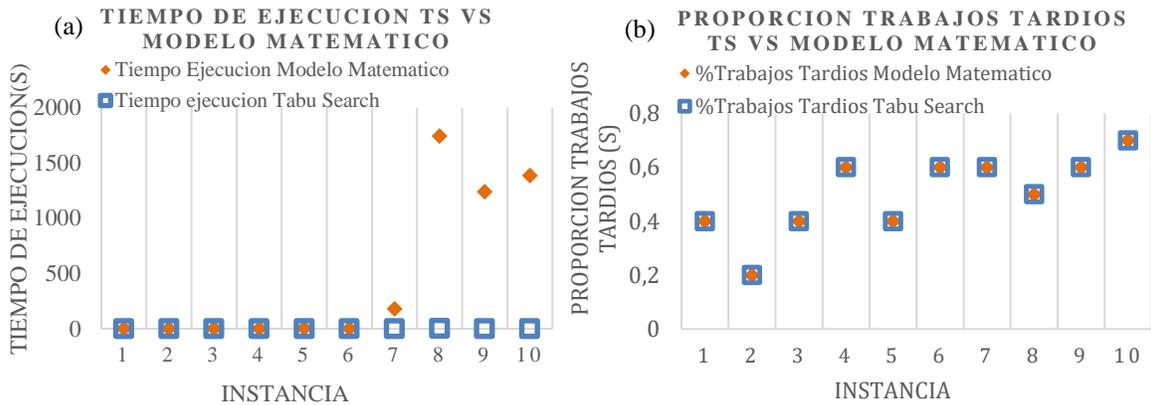
Para evaluar el desempeño del TS respecto al modelo matemático, se redujo la complejidad del problema a un máximo de 10 Trabajos, 3 Máquinas inyectoras, 3 operarios de refilado y empaque, y un único valor para los *Due dates* igual a 6 horas. Se crearon 10 instancias (Tabla 8), 6 de 5 trabajos y 4 de 10 trabajos, cada una con diferentes configuraciones de cantidad de máquinas y operarios. En las Figura 12 (a) y (b) se presentan los gráficos comparativos.

Tabla 8 Instancias para la comparación entre TS y el modelo matemático.

Instancia	Trabajos	Due date (hr)	Máquinas en la estación de inyección	Operario en la estación de refilado	MODELO MATEMÁTICO		TABÚ SEARCH	
					Tiempo ejecución (s)	% trabajos tardíos	Tiempo ejecución (s)	% trabajos tardíos
1	5	6	2	1	0.561	0.4	0.015625	0.4
2	5	6	3	2	1.167	0.2	0.046875	0.2
3	5	6	3	1	1.616	0.4	0.015625	0.4
4	5	6	1	3	1.585	0.6	0.015625	0.6
5	5	6	2	3	3.241	0.4	0.015625	0.4
6	5	6	1	2	0.733	0.6	0.015625	0.6
7	10	6	2	1	179.408	0.6	0.089843	0.6
8	10	6	3	2	1743.5	0.5	1.953125	0.5
9	10	6	3	1	1237.25	0.6	0.0625	0.6
10	10	6	1	3	1385.89	0.7	0.09375	0.7

Fuente: Elaboración propia.

Figura 12 (a) Comparación tiempos de ejecución entre TS y el modelo matemático. (b) Comparación proporción de trabajos tardíos entre TS y el modelo matemático.



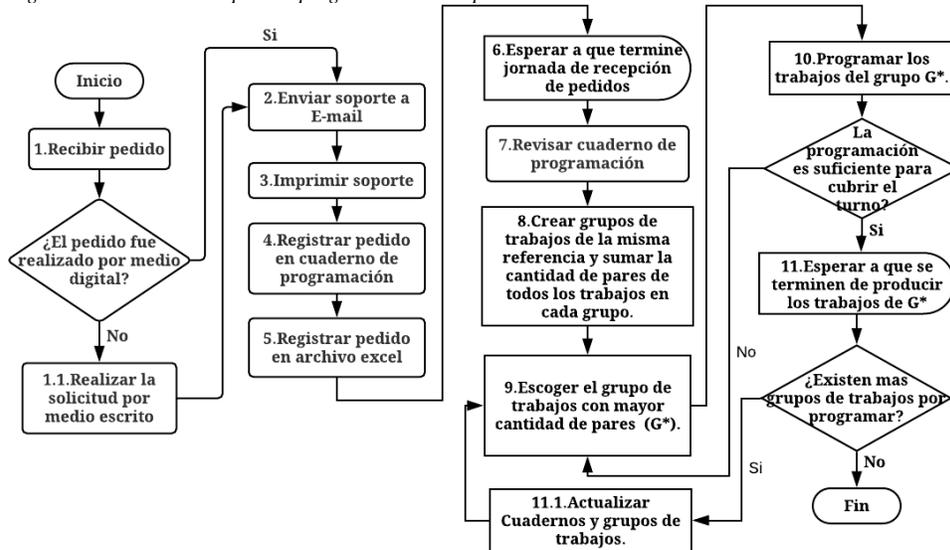
Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con lo observado en la Figura 12 (a) y (b), se evidencia que la metaheurística TS presenta una mayor eficiencia en términos de tiempos de ejecución con respecto al modelo matemático, especialmente para las instancias de 10 trabajos. Por otro lado, como se trata de instancias pequeñas, en el 100% de los casos analizados TS llega al valor óptimo. Por consiguiente, se verifica que el método propuesto es coherente con la formulación matemática del problema de investigación de operaciones planteado y por lo tanto realiza un correcto desempeño en la tarea de disminuir la proporción de trabajos tardíos en un ambiente de producción HFS con intervalos de mantenimiento.

5.5. Estandarización del proceso de programación de la producción.

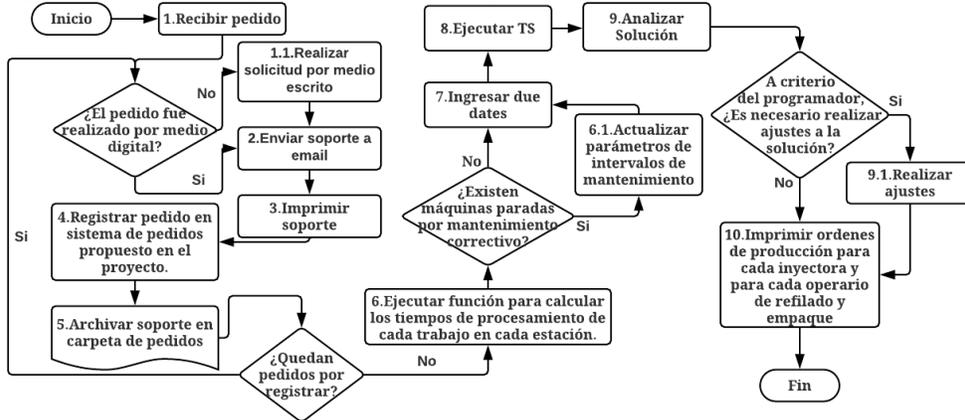
Una futura puesta en marcha de la metodología de programación de la producción basada en TS modificaría el proceso actual que se lleva a cabo para realizar la asignación y secuenciación de los trabajos. Por lo tanto, fue necesario realizar un análisis para determinar una manera correcta de integrar el método propuesto, y definir las actividades estándar que se deben seguir para programar la producción utilizando el aplicativo presentado en este proyecto. La Figura 13 muestra el proceso actual. La Figura 14 presenta el proceso estándar integrando el uso del aplicativo.

Figura 13 Proceso actual para la programación de la producción.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 14 Proceso estándar para la programación de la producción utilizando el aplicativo basado en TS.



Fuente: Elaboración propia.

La Figura 13 demuestra que el proceso actual para programar la producción carece de una metodología rigurosa que facilite la consecución del objetivo de minimizar la proporción de trabajos tardíos. La actividad 9, ocasiona que trabajos por fuera de G* queden rezagados. En la actividad 11, se evidencia que, aun existiendo más trabajos por programar, la programación se detiene si se estima que los trabajos programados alcanzan a cubrir el tiempo del turno, y solo vuelve a ser retomada cada vez que una máquina queda sin programación. Por lo anterior, se retrasa injustificadamente la programación de la producción. En la actividad 11.1, se actualizan los cuadernos de programación con los pedidos que han llegado durante la espera (11), se actualizan los grupos ya creados y se crean otros si es necesario. Sin embargo, si no llegan los suficientes pedidos para aumentar la cantidad total de pares de un grupo, y así hacerlo destacar, entonces todos sus trabajos se van a retrasar hasta que el programador considere que la cantidad de pares es lo suficientemente alto para ser programado.

Por otro lado, la Figura 14 presenta la integración del aplicativo propuesto con la metodología actual. Se mantienen las actividades 1, 2 y 3. A partir de la actividad 4, se realizan modificaciones que permiten hacer un uso eficiente del aplicativo. En lugar de registrar los pedidos manualmente en cuadernos, ahora se deben introducir en un formato diseñado en Excel, que se comunica con la metaheurística para la lectura de los datos necesarios y calcula automáticamente los tiempos de procesamiento según la cantidad y la referencia de cada trabajo. Gracias a que la metaheurística considera intervalos de tiempo de no producción, es posible modificarlos con base en determinadas situaciones que se presentan en el día a día de la empresa; por ejemplo, que una máquina se encuentre parada por mantenimiento correctivo, por falta de operario, entre otros. Luego de introducir los datos de entrada para el aplicativo, se ejecuta y se espera a que se entreguen los resultados. En este punto, se considera adecuado que la persona encargada de realizar la programación analice los resultados de la metaheurística, los interprete y si es necesario, realice los ajustes que considere pertinentes. Posteriormente, se imprimen las ordenes de producción. En el *anexo No 9 Aplicativo TS VBA* se encuentra el aplicativo TS desarrollado para la empresa.

5.6. Pruebas de rendimiento y oportunidades de mejora

A continuación, se presenta una comparación de los tiempos que toma realizar los métodos actual y propuesto de programación de la producción en la empresa. Para hallar los tiempos del método actual se llevó un registro durante un mes y para el método propuesto se calculó el tiempo de ejecución de la metaheurística con un procesador i7 6500U y 8 GB RAM. Los resultados se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9 Comparación de tiempos para llevar a cabo la programación entre el método actual y el método propuesto.

Método actual (Figura 13)		Método propuesto (Figura 14)	
Actividad	Tiempo Promedio(hr)	Actividad	Tiempo Promedio(hr)
7	0.5607	6 y 7	1.024
8	0.347	8	0.167
9	0.107	9	0.25
10	1.0547	9.1	0.417
11.1	0.297	10	0.167
Total	2.366		2.024

Fuente: Elaboración propia.

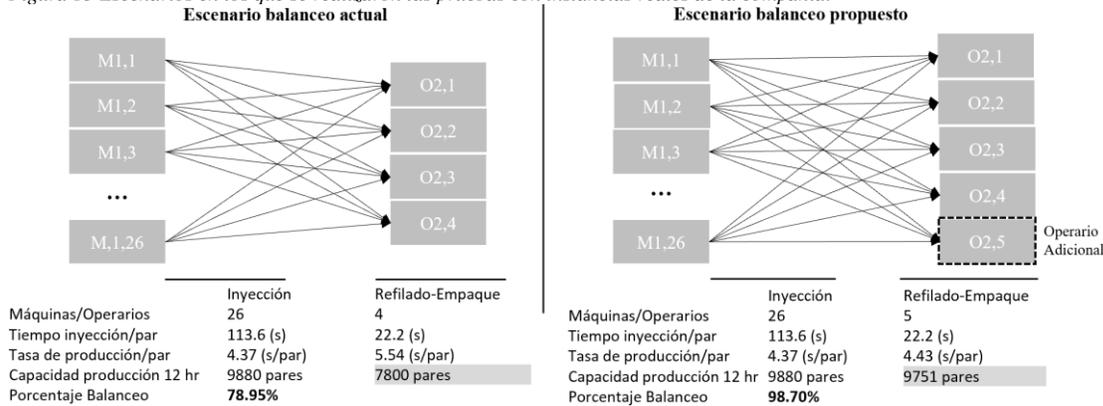
Se observa que el intervalo de tiempo que dura el proceso de programación se ve reducido en 0.342 hr utilizando la metodología propuesta. Además, si se considera que el procedimiento actual implica la participación de dos personas, y que una hora de cada una de ellas le cuesta a la empresa \$11,090, entonces la empresa está pagando \$52,276 al día, y si se tiene en cuenta que es una actividad diaria, su costo anual es de \$16,372,424. Por otro lado, al considerar que el procedimiento propuesto requiere de una persona y que de las 2.024 hr, solamente se requiere de su presencia e intervención durante 1 hr, entonces el costo anual sería de \$3,460,080, alcanzado un ahorro de \$12,912,344.

6. Resultados de la Prueba piloto de la implementación.

En el numeral 1, se presentó la proporción de trabajos tardíos encontrada durante la etapa de diagnóstico. Dicha proporción corresponde a la totalidad de trabajos de cada uno de los años evaluados, y considerando tardíos aquellos trabajos que habían sobrepasado el *due date* que permitía realizar una entrega en máximo 8 días. Sin embargo, la empresa solicitó realizar la prueba piloto utilizando un *lead time* de 48 hr, con un tiempo de transporte de 24 hr, un solo turno de 12 hr y por consiguiente un *due date* de 12 hr. Por esta razón, y considerando que no se probaron todos los meses de 2017, la proporción de trabajos tardíos reales que se compara con los resultados obtenidos con el TS corresponde a aquellos trabajos que se entregaron después de 48 hr (con la base de datos entregada por la empresa es posible calcular la proporción de trabajos tardíos para diferentes *leads time*) y para los meses evaluados, por lo cual difiere de la proporción presentada inicialmente con un *lead time* de 8 días.

La prueba piloto de la implementación se realizó mediante una recreación de lo que hubiera sucedido si, para la programación de los trabajos del mes de febrero, marzo, junio, julio, agosto y septiembre de 2017, se hubiera utilizado la metaheurística TS propuesta. De esta manera, y gracias a que se conocen las instancias reales de los meses anteriormente mencionados, se corrió el TS con tales instancias bajo dos escenarios (Figura 15); el primero, manteniendo el nivel de balanceo actual de la empresa 78.95%, y el segundo, aumentando el balanceo a 98.7% mediante la contratación de un operario adicional para la estación de refilado y empaque.

Figura 15 Escenarios en los que se realizaron las pruebas con instancias reales de la compañía.



Fuente: Elaboración propia.

6.1. Instancias probadas

En total se probaron 153 instancias reales: 25 días de cada uno de los meses febrero, junio y agosto, 27 días de marzo, 24 días de julio y 27 días de septiembre de 2017. Febrero, junio y agosto presentan una relación diferente entre la capacidad promedio diaria de la planta y la demanda promedio diaria. Esto permite analizar la efectividad de la metaheurística en diferentes puntos en la curva de la demanda (capacidad < demanda, capacidad > demanda y capacidad ≈ demanda). Los datos de cada una de las instancias mencionadas se pueden encontrar en el *anexo No 7 Instancias y resultados de la prueba piloto TS*.

6.2. Comparación de escenarios propuestos con TS vs método actual

Con las 153 instancias mencionadas, se llevó a cabo un diseño experimental para evaluar el efecto que tiene cada escenario propuesto y el escenario actual sobre la proporción de trabajos tardíos. Las características del experimento se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10 Diseño experimental: Factores y niveles.

Factores	Niveles
Escenario	TS con Balanceo de 78.95% - TS con Balanceo de 98.7% - Método Actual con Balanceo de 78.95%
Instancias(Bloques)	1,.....,153

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 11 presenta el promedio del porcentaje de trabajos tardíos obtenido con cada uno de los niveles de escenario.

Tabla 11 Resultados del experimento.

Escenario	Media Proporción trabajos tardíos		
	tardíos	Desv.Est.	Intervalo Confianza de 95%
TS con Balanceo de 78.95%	0.1693	0.1561	[0.1440;0.1945]
TS con Balanceo de 98.70%	0.1255	0.1265	[0.1002;0.1508]
Método Actual con Balanceo de 78.95%	0.7827	0.1265	[0.7574;0.8080]

Fuente: Elaboración propia

Se verificó el cumplimiento de los supuestos de normalidad, homocedasticidad e independencia mediante las pruebas Kolmogorov-Smirnov, Levene y corridas, respectivamente. Los resultados del experimento indican con el 95% de confianza y $p\text{-value} < 0.001$ que sí existe diferencia estadísticamente significativa para el factor escenario. En particular, al comparar los niveles, se identificó que los intervalos de confianza de los niveles TS con balanceo 78.95% y TS con balanceo 98.70% se traslapan y por lo tanto no se puede concluir la existencia de diferencia estadísticamente significativa entre su proporción de trabajos tardíos. Sin embargo, si se puede concluir la existencia de diferencia estadísticamente significativa de los anteriores niveles frente al nivel Método actual con balanceo de 78.95%. Por lo anterior, se recomienda utilizar TS con balanceo 78.95% con la cual se obtuvo una disminución en el porcentaje de trabajos tardíos de 61.34%.

Por otro lado, con el fin de conocer las diferencias en la proporción de trabajos tardíos entre los diferentes escenarios en cada uno de los meses analizados, se realizó un experimento por separado para las instancias de cada mes, considerando los mismos factores (Escenario, Instancia como bloque).

La Tabla 12 presenta los resultados para cada uno de los seis experimentos.

Tabla 12 Resultados de los experimentos mensuales

Mes	Escenario	Media Proporción trabajos tardíos	Desv.Est	Interv.Confianza de 95%	R ²	R ² Ajustado
Febrero	TS Balanceo de 78.5%	0.3382	0.1804	[0.2734;0.4030]	65.90%	64.95%
	TS Balanceo de 98.7%	0.2563	0.1514	[0.1914;0.3211]		
	Método Actual Balanceo de 78.5%	0.7616	0.1545	[0.6968;0.8265]		
Marzo	TS Balanceo de 78.5%	0.1091	0.1069	[0.0542;0.1639]	82.12%	81.66%
	TS Balanceo de 98.7%	0.0835	0.0976	[0.0287;0.1383]		
	Método Actual Balanceo de 78.5%	0.7342	0.2012	[0.6794;0.7891]		
Junio	TS Balanceo de 78.5%	0.1276	0.1250	[0.0600;0.1952]	69.61%	67.92%
	TS Balanceo de 98.7%	0.0913	0.1134	[0.0237;0.1589]		
	Método Actual Balanceo de 78.5%	0.6525	0.2404	[0.5849;0.7201]		
Julio	TS Balanceo de 78.5%	0.1396	0.1234	[0.0844;0.1948]	87.04%	86.66%
	TS Balanceo de 98.7%	0.1029	0.1027	[0.0477;0.1581]		
	Método Actual Balanceo de 78.5%	0.8503	0.1714	[0.7951;0.9055]		
Agosto	TS Balanceo de 78.5%	0.1676	0.1453	[0.1153;0.2200]	86.67%	86.30%
	TS Balanceo de 98.7%	0.1249	0.1116	[0.0725;0.1772]		
	Método Actual Balanceo de 78.5%	0.8413	0.1349	[0.7889;0.8937]		
Septiembre	TS Balanceo de 78.5%	0.1376	0.1376	[0.0925;0.1864]	89.35%	89.08%
	TS Balanceo de 98.7%	0.0979	0.0979	[0.0518;0.1457]		
	Método Actual Balanceo de 78.5%	0.8569	0.1284	[0.8099;0.9038]		
Global	TS Balanceo de 78.5%	0.1693	0.1884	[0.1440;0.1945]	78.18%	78.09%
	TS Balanceo de 98.7%	0.1255	0.1561	[0.1002;0.1508]		
	Método Actual Balanceo de 78.5%	0.7827	0.1265	[0.7574;0.8080]		

Fuente: Elaboración propia

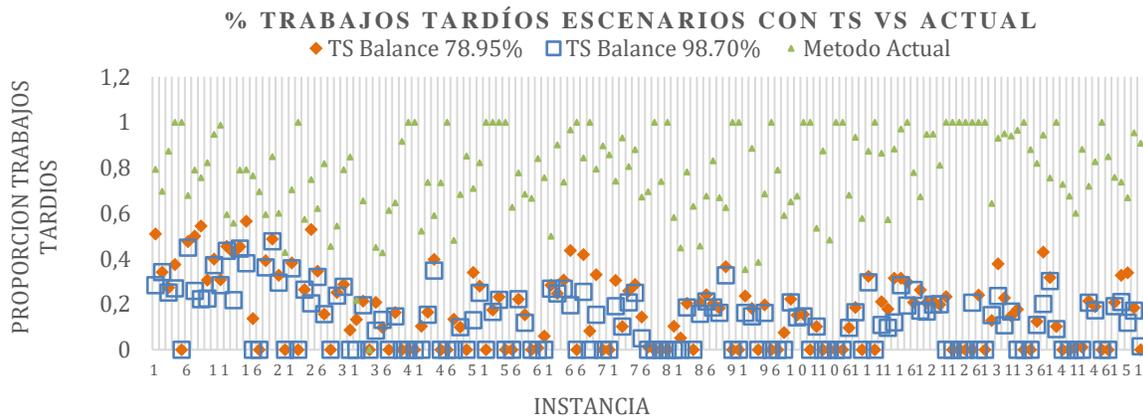
Para cada experimento, se verificaron los supuestos de normalidad, homogeneidad de varianzas e independencia con las pruebas Kolmogorov-Smirnov, Levene y corridas respectivamente, obteniendo el

cumplimiento de estos. El resultado del diseño experimental detallado por mes, (instancias correspondientes a febrero, marzo, junio, julio, agosto y septiembre de 2017) indica que no existe diferencia estadísticamente significativa entre los escenarios TS. Por otro lado, con una confianza de 95% y un $p\text{-value} < 0.001$ sí existe diferencia estadísticamente significativa del promedio de la proporción de trabajos tardíos obtenido con el método actual frente al promedio que se obtuvo con los métodos TS. De hecho, la disminución alcanzada por la metaheurística TS sin mejorar el balanceo de la línea es de 42.34%, 62.51%, 52.49%, 71.07%, 67.37% y 71.93% para febrero, marzo, junio, julio, agosto y septiembre respectivamente.

Adicionalmente, considerando que en total entre los meses evaluados la demanda en pares fue de 1,303,965, y que según los datos suministrados por la empresa el 22.24% de los trabajos que se entregaron tarde en 2017 fueron devueltos. Entonces con un precio promedio de venta por par de \$4,600, y considerando el valor recuperado por concepto de reventa y por recuperación de materia prima *Anexo No 10 Costeo Devoluciones*, si la empresa hubiera programado la producción con TS propuesto hubiera ahorrado cerca de \$424,703,556 en 6 meses y sin necesidad de aumentar el balanceo de la línea.

Por lo tanto, se estima que con el uso de TS con balanceo 78.95%, para puntos de la curva de la demanda donde la capacidad diaria promedio de la planta es inferior a la demanda diaria promedio (febrero), la proporción de trabajos tardíos se ubicaría entre 27.34% y 40.30%. Para puntos donde la demanda diaria promedio es inferior a la capacidad promedio diaria (junio), la proporción se ubicaría entre 6.0% y 19.52%. Finalmente, para puntos donde la demanda promedio diaria es aproximadamente igual a la capacidad promedio diaria (agosto) la proporción de trabajos tardíos se ubicaría entre 11.53% y 22.00%. Lo anterior se presentaría siempre y cuando se utilice una política de entrega de 2 días (considerando 24 hr de envío y un solo turno de producción de 12 horas). En la Figura 16 se presentan la comparación de los resultados de los métodos TS Balance 78.9% y TS Balance 98.70% con respecto a los resultados reales obtenidos con el método actual.

Figura 16 Resultados comparación de métodos.



Fuente: Elaboración propia

Se observan grandes diferencias entre los resultados obtenidos con TS y el método actual. En algunas instancias se logran disminuciones del 100%, es decir que con el método actual todos los trabajos fueron tardíos, pero con la metaheurística TS la proporción de trabajos tardíos fue de 0%. Estos casos son explicados gracias a las características de la metodología actual, que como se explicó en el punto 5.5, genera trabajos rezagados que deben esperar largos periodos de tiempo antes de empezar a ser producidos. Fuera de los casos mencionados con disminuciones del 100%, la máxima disminución alcanzada con TS Balance 78.95% es de 91.76% y la mínima de 8.43%. Con TS Balance 98.7% la máxima disminución es de 96.55% y la mínima es de 15.84%. Los resultados de las corridas con la metaheurística en los dos escenarios, así como del porcentaje de trabajos tardíos obtenidos con el método actual, se encuentran en el *anexo No 7 Instancias y resultados de la prueba piloto TS*

6.3. Análisis costo Beneficio de aumentar el balanceo de la línea

Como se mencionó anteriormente, el balanceo de la línea aumenta 19.75% contratando un operario adicional para la estación cuello de botella. El costo asociado a esta contratación se constituye del salario, subsidio de transporte, ARL, vacaciones, aporte a seguridad social y parafiscales, y pago de horas extras necesarias. Así mismo, es necesario

considerar otros costos como la adecuación de un nuevo puesto de trabajo, entrega de dotación, elementos de seguridad, y costos por capacitación. El costo anual total es de \$20,678,374. *En el anexo No 8 Costo anual operario adicional se puede encontrar el costeo completo.*

Por otro lado, considerando que no se obtuvo diferencia estadísticamente significativa al comparar las medias de la proporción de trabajos tardíos con línea balanceada al 78.95% y con 98.70%, entonces no se podría garantizar la obtención de beneficios relacionados a la disminución del costo de cancelación y/o devolución de pedidos y por lo tanto no se podría justificar la contratación de un operario adicional.

7. Conclusiones y recomendaciones.

Este proyecto abordó el problema de la programación de la producción en la empresa Tridimensionales M&S SAS desde el enfoque determinístico para un entorno de manufactura HFS con máquinas no relacionadas, tiempos de alistamiento e intervalos de mantenimiento preventivo durante los cuales las máquinas no se encuentran disponibles para producción. El programa de mantenimiento preventivo se realizó a través de la metodología RCM/AMEF. Una prueba piloto de la implementación del programa de mantenimiento preventivo se llevó a cabo para estimar la disminución del número de fallas presentadas, así como el costo y tiempo dispuesto para ejecutar tareas de mantenimiento. Se obtuvo una disminución de 8 fallas. Por otro lado, se generó un ahorro de \$2,201,789 y una disminución de 23.05 hr en el tiempo invertido para mantenimiento.

Para la programación de la producción se propuso la metaheurística TS, la cual fue debidamente parametrizada. Para instancias de 5 y 10 trabajos se compararon el tiempo de ejecución y la proporción de trabajos tardíos obtenidos tanto con el modelo matemático como con la metaheurística TS propuesta. Se encontró que, en promedio, la metaheurística se ejecuta 455.27 segundos más rápido, y que a medida que se aumenta el número de trabajos la diferencia también aumenta. Lo anterior indica que para instancias de gran tamaño resulta más conveniente por consumo de tiempo computacional utilizar el TS propuesto. Igualmente, la metaheurística propuesta alcanza la solución óptima para cada una de las 10 instancias pequeñas que se probaron. Esto permite concluir que el algoritmo responde a la formulación matemática realizada, por lo que se respetan todas las restricciones planteadas.

Se identificó que el proceso actual para programar la producción ocasiona que trabajos con pocos pares a producir queden rezagados, y solo comenzarán a ser producidos hasta que se tenga un acumulado suficiente de pedidos sobre la misma referencia. Sin embargo, si no llegan los suficientes pedidos para aumentar la cantidad de pares, no solo se tiene un trabajo retrasado, sino que los demás pedidos que se han sumado al trabajo inicial se retrasan hasta que el programador considere que la cantidad de pares es lo suficientemente alta para ser programado. Lo anterior explica la existencia de tan altos porcentajes de trabajos tardíos.

Se propuso un procedimiento para programar la producción en el cual se integra la metaheurística TS propuesta. Mediante un registro de tiempos y su posterior análisis se concluyó que si se implementara dicho procedimiento el tiempo destinado diariamente a la actividad de programar la producción se vería reducido en 0.342 hr. Si bien no se trata de una gran disminución del tiempo de proceso de programación de la producción, sí se trata de una gran disminución del costo de la actividad de programación, el cual pasaría de 16,372,424 a \$3,460,080, alcanzado un ahorro anual de \$12,912,344. Además, el tiempo de ejecución de la metaheurística podría reducirse si se programara en un lenguaje como Java o C, que son lenguajes más eficientes.

Se llevó a cabo un diseño experimental para identificar si existía diferencia estadísticamente significativa entre el promedio de la proporción de trabajos tardíos obtenido con la metaheurística TS con un balance de 78.95% y con la metaheurística TS con balance de 98.70%. El resultado indicó con un 95% de confianza que no existe diferencia en la proporción de trabajos tardíos de los escenarios con TS (con balanceo de 98.7%, con balanceo actual 78.95%). Por esta razón, no es necesario contratar un operario adicional para la estación de refilado y empaque con el objetivo de balancear la línea al 98.7%.

Se encontró con un 95% de confianza y $p < 0.001$ que sí existe diferencia estadísticamente significativa entre la proporción de trabajos tardíos obtenidos con la metaheurística TS propuesta y el porcentaje de trabajos tardíos obtenidos en el escenario real para las instancias probadas. La disminución alcanzada por la metaheurística TS con el balanceo actual de la línea (78.95%) fue de 42.34%, 62.51%, 52.49%, 71.07%, 67.37% y 71.93% para febrero, marzo, junio, julio, agosto y septiembre respectivamente. En términos globales, se observó una disminución de 61.34% con balanceo de 78.95%. Dichas disminuciones representan un ahorro de \$424,703,556 en 6 meses por concepto de devolución de pedidos tardíos.

Si bien, los intervalos de no producción que contempla la metaheurística TS fueron pensados inicialmente para programar tareas de mantenimiento preventivo, estos intervalos pueden ser utilizados por la empresa para reservar espacios de tiempo para ubicar paradas de otra naturaleza como hora de almuerzo, tiempos de descanso, permisos especiales para los operarios, entre otros.

Debido a las disminuciones presentadas por la metaheurística TS propuesta, se recomienda a la compañía replantear su política de tiempo de entrega de la empresa, ofreciendo un periodo más corto de entrega. Gracias al uso del aplicativo propuesto, la empresa estaría en la capacidad de utilizar uno de los factores más importantes de su sector, los tiempos de entrega, como ventaja competitiva para aumentar el volumen de ventas.

Glosario

Costo computacional: Recursos computacionales requeridos por la ejecución de un programa (tiempo de CPU, etc) (Diaz, 2004).

Heurística: Resuelve un problema con rapidez cuando los métodos clásicos son muy lentos (Judea, 1985).

Lead time: Tiempo total transcurrido desde que se inicia la producción hasta que el producto es entregado al cliente (Mtmingenieros, 2011).

Makespan: Tiempo total transcurrido desde el inicio de la producción hasta el final de esta (SKORIN-KAPOV & VAKHARIA, 1993).

Metaheurística: 1. Marco de referencia que provee un conjunto estrategias para desarrollar algoritmos de optimización heurísticos. 2. Algoritmos heurísticos en sí mismos que siguen una o más estrategias metaheurísticas (Sorensen et al., 2017).

Metodología exacta: Aquel que resuelve un problema de optimización a la optimalidad (Rothlauf, 2011).

Nivel de servicio: Probabilidad esperada de la capacidad de un sistema (Joannès, 2012).

Optimalidad: A partir de una secuencia optima, toda subsecuencia de ella es a su vez óptima (Xumari, 1967).

Optimización combinatoria: Rama de la optimización, relacionada a la investigación de operaciones, teoría de algoritmos y teoría de la complejidad computacional (William et al., 1997).

Refilado: Operación que consiste en eliminar excedentes de material de una pieza (Castro, 2008).

8. Tabla de Anexos o Apéndices

No. Anexo	Nombre	Desarrollo	Tipo de Archivo	Enlace corto (https://goo.gl/)	Relevancia para el documento (1-5)
1	Datos de pedidos y demanda años 2015 a 2017, calculo capacidad instalada y estimación del lead time.	Propio	Excel		5
2	Programa Mantenimiento Preventivo	Propio	Excel		5
3	Resultados Prueba Piloto PMP	Propio	Excel		5
4	Levantamiento de Parámetros	Empresa	Excel		3
5	Código en Gusek	Propio	Gusek	https://goo.gl/T8QD3W	5
6	Instancias y resultados de la Parametrización	Propio	Excel		4
7	Instancias y resultados de la prueba piloto TS	Propio	Excel		4
8	Costo anual operario adicional	Propio	PDF		3
9	Aplicativo TS VBA	Propio	Excel		5
10	Costeo Devoluciones	Propio	Excel		4

Referencias

- Allahverdi, A., Aydilek, A., & Aydilek, H. (2016). Minimizing the number of tardy jobs on a two-stage assembly flowshop. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 33(6), 391–403. <https://doi.org/10.1080/21681015.2016.1151466>
- Allaoui, H., & Artiba, A. (2006). Scheduling two-stage hybrid flow shop with availability constraints. *Computers & Operations Research*, 33(5), 1399–1419. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2004.09.034>
- Altassan, K. M., El-Sherbiny, M. M., & Abid, A. D. (2014). Artificial Immune Algorithm for Solving Fixed Charge Transportation Problem. *Applied Mathematics & Information Sciences*, 8(2), 751–759. <https://doi.org/10.12785/amis/080235>
- Assid, M., Gharbi, A., & Hajji, A. (2015). Joint production, setup and preventive maintenance policies of unreliable two-product manufacturing systems. *International Journal of Production Research*, 53(15), 4668–4683.
- Azadeh, A., Farahani, M. H., Kalantari, S. S., & Zarrin, M. (2015). Solving a multi-objective open shop problem for multi-processors under preventive maintenance. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 78(5–8), 707–722.

- Braaksma, A. J. J. (2012). *Asset information for FMEA-based maintenance*. Faculty of Economics and Business.
- Calderon, R. (2006). PROPUESTA DE UN PROGRAMA DE MANTENIMIENTO GENERAL PARA MOLDES EN EL DEPARTAMENTO DE INYECCIÓN EN LA EMPRESA INDUPLASTIC S. A., 110.
- Castro, N. (2008). *ANÁLISIS DE MERCADERO DE UNA EMPRESA MANUFACTURERA DE SUELAS PREFABRICADAS*. Pontificia Universidad Javeriana. Retrieved from <http://www.javeriana.edu.co/biblos/tesis/economia/tesis41.pdf>
- Chen, C. L., & Chen, C. L. (2008). Bottleneck-based heuristics to minimize tardy jobs in a flexible flow line with unrelated parallel machines. *International Journal of Production Research*, 46(22), 6415–6430. <https://doi.org/10.1080/00207540701352102>
- Diaz, N. (2004). Introducción a la Complejidad Computacional. Retrieved from http://artemisa.unicauca.edu.co/~nediaz/EDDI/cap01.htm#ancla1_2
- El Rhazi, A., & Pierre, S. (2009). A tabu search algorithm for cluster building in wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 8(4), 433–444. <https://doi.org/10.1109/TMC.2008.125>
- Gendreau, M., & Potvin, J.-Y. (Eds.). (2010). *Handbook of Metaheuristics* (Vol. 146). Boston, MA: Springer US.
- Glover, F. (1986). Paths for Integer Programming. *Computers and Operations Research*, 13(5), 533–549.
- Glover, F., Taillard, E., & De Werra, D. (1993). A user's guide to tabu search. *Annals of Operations Research*, 41(20), 3–28.
- Holthaus, O., & Rajendran, C. (1997). Efficient dispatching rules for scheduling in a job shop. *International Journal of Production Economics*, 48(1), 87–105. [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(96\)00068-0](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(96)00068-0)
- Joannès, V. (2012). NIVEL DE SERVICIO DEFINICIÓN Y FORMULA. Retrieved from <https://www.lokad.com/es/nivel-de-servicio-definicion-y-formula>
- Jones, D. ., Mirrazavi, S. ., & Tamiz, M. (2002). Multi-objective meta-heuristics: An overview of the current state-of-the-art. *European Journal of Operational Research*, 137(1), 1–9. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(01\)00123-0](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(01)00123-0)
- Judea, P. (1985). Heuristics: Intelligent search strategies for computer problem solving. *Information Processing & Management*.
- Jungwattanakit, J., Reodecha, M., Chaovalitwongse, P., & Werner, F. (2009). A comparison of scheduling algorithms for flexible flow shop problems with unrelated parallel machines, setup times, and dual criteria. *Computers and Operations Research*, 36(2), 358–378. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2007.10.004>
- Lamothe, J., Marmier, F., Dupuy, M., Gaborit, P., & Dupont, L. (2012). Scheduling rules to minimize total tardiness in a parallel machine problem with setup and calendar constraints. *Computers & Operations Research*, 39(6), 1236–1244.
- Morocho, A., Rodríguez, C., & Charles, E. (2018). Diseño de un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) en la flota de excavadoras hidráulicas 336dl para reducir costos de reparación en la empresa Coansa del Perú Ingenieros S.A.C.
- Moubray, B. J. (1995). MAINTENANCE MANAGEMENT - A New Paradigm - Abstract : PARADIGM : *Maintenance Management - A New Paradigm*-, 1–12. <https://doi.org/maintenanceresources.com/referencelibrary/rcm/maintparadigm.htm>
- mtmingenieros. (2011). ¿Que es el Lead Time? Retrieved from <http://mtmingenieros.com/knowledge/que-es-lead-time/>
- Pinedo, M. L. (2012). *Scheduling: Theory, algorithms and systems*. Springer (4th ed., Vol. 4). New York: Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-2361-4>
- Pinzón, M., K. A., & Ruiz, O. (2017). DESARROLLO DE UN PROGRAMA DE MANTENIMIENTO PLANIFICADO PARA LA EMPRESA “INDUSTRIAS PAYASITO S.A.S. Bogota D.C.
- Rabiee, M., Sadeghi Rad, R., Mazinani, M., & Shafaei, R. (2014). An intelligent hybrid meta-heuristic for solving a case of no-wait two-stage flexible flow shop scheduling problem with unrelated parallel machines. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 71(5–8), 1229–1245. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5375-1>
- Raghu, T. S., & Rajendran, C. (1993). An efficient dynamic dispatching rule for scheduling in a job shop. *International Journal of Production Economics*, 32(3), 301–313. [https://doi.org/10.1016/0925-5273\(93\)90044-L](https://doi.org/10.1016/0925-5273(93)90044-L)
- Rojas, C., Villarreal, A., & Morera, A. (2014). Implementación del análisis de riesgo en la industria alimentaria mediante la metodología AMEF: enfoque práctico y conceptual. *Revista de Medicina Veterinaria*. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.19052/mv.3030>
- Rossi, A., Pandolfi, A., & Lanzetta, M. (2014). Dynamic set-up rules for hybrid flow shop scheduling with parallel batching machines. *International Journal of Production Research*, 52(13), 3842–3857. <https://doi.org/10.1080/00207543.2013.835496>
- Rothlauf, F. (2011). Design of Modern Heuristics, 45–46. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-72962-4>
- Ruiz, R., Maroto, C., & Alcaraz, J. (2006). Two new robust genetic algorithms for the flowshop scheduling problem. *Omega*, 34(5), 461–476. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2004.12.006>
- Shahvari, O., Salmasi, N., Logendran, R., & Abbasi, B. (2012). An efficient tabu search algorithm for flexible flow shop sequence-dependent group scheduling problems. *International Journal of Production Research*, 50(15), 4237–4254. <https://doi.org/10.1080/00207543.2011.604051>
- Silva, F., & Uribe, E. (2011). Optimización de la productividad en la industria de plásticos en Cd. Juárez. *Revista Internacional Administración & Finanzas*, 101–122.
- SKORIN-KAPOV, J., & VAKHARIA, A. J. (1993). Scheduling a flow-line manufacturing cell: a tabu search approach. *International Journal of Production Research*, 31(7), 1721–1734. <https://doi.org/10.1080/00207549308956819>
- Sorensen, K., Sevaux, M., & Glover, F. (2017). A History of Metaheuristics, 1–16. <https://doi.org/10.1093/brain/122.11.2197-a>
- Taillard, E. (1991). Robust tabu search for the quadratic assignment problem. *Parallel Computing*, 17, 443–455.
- Tay, J. C., & Ho, N. B. (2008). Evolving dispatching rules using genetic programming for solving multi-objective flexible job-shop problems. *Computers and Industrial Engineering*, 54(3), 453–473. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2007.08.008>
- Troffe, M. (2010). Análisis Iso 14224-Relación Con Rcm-Fmea ., 1–9. Retrieved from <http://www.mantenimientomundial.com/sites/mm/notas/0605MarioTroffeISO14224.pdf>
- Tsubakitani, S., & Evans, J. R. (1998). Optimizing tabu list size for the traveling salesman problem. *Computers and Operations Research*, 25(2), 91–97. [https://doi.org/10.1016/S0305-0548\(97\)00030-0](https://doi.org/10.1016/S0305-0548(97)00030-0)
- Valdivieso, J., & Amaya, M. (2010). Diseño de un plan de mantenimiento preventivo para la Empresa Extruplas S.A. *Universidad Politécnica Salesiana*.
- Vallada, E., Ruiz, R., & Minella, G. (2008). Minimising total tardiness in the m-machine flowshop problem: A review and evaluation of heuristics and metaheuristics. *Computers and Operations Research*, 35(4), 1350–1373. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2006.08.016>
- Varmazyar, M., & Salmasi, N. (2012). Sequence-dependent flow shop scheduling problem minimising the number of tardy jobs. *International Journal of Production Research*, 50(20), 5843–5858. <https://doi.org/10.1080/00207543.2011.632385>
- William, Cook, W., Cunningham, William, Pulleyblank, & Schrijver. (1997). *Combinatorial Optimization*. John Wiley & Sons.
- Xumari. (1967). Introduction to dynamic programming. *Wilwy & Sons Inc*.

- Yang, T., Kuo, Y., & Chang, I. (2004). Tabu-search simulation optimization approach for flow-shop scheduling with multiple processors - A case study. *International Journal of Production Research*, 42(19), 4015–4030.
- Youssef, H., M. Sait, S., & Adiche, H. (2001). Evolutionary algorithms, simulated annealing and tabu search: a comparative study. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 14(2), 167–181. [https://doi.org/10.1016/S0952-1976\(00\)00065-8](https://doi.org/10.1016/S0952-1976(00)00065-8)
- Zhou, X., Li, Y., Xi, L., & Lee, J. (2015). Multi-phase preventive maintenance policy for leased equipment. *International Journal of Production Research*, 53(15), 4528–4537. <https://doi.org/10.1080/00207543.2014.990116>
- Ziaefar, A., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Pichka, K. (2012). Solving a new mathematical model for a hybrid flow shop scheduling problem with a processor assignment by a genetic algorithm. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 61(1–4), 339–349. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3701-z>