

Trabajo de grado en modalidad de aplicación

[183030] Diseño de un sistema de información y control para la reducción de productos no conformes en una empresa metalmecánica.

Paula Andrea Casallas Vargas 1^{a,c} , Paula Andrea Góngora Garzón 2^{a,c} , Daniela Rayo Bolívar 3^{a,c},

Christian Ricardo Zea Forero^{b,c}

^aEstudiante de Ingeniería Industrial

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

^cPontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia

Summary

PROVEMEL LTDA. is a metalworking company focused on continuous quality improvement of its products and services. During 2018 the company increase the number of non-conforming products for a total of 28,200 pieces. For this reason, the need to implement an information system that allows documenting, controlling and evaluating the production scheduling process and maintenance of machinery under a Job Shop production environment was identified.

In order to recognized and define the parameters and variables for programming the situation of the company was analyzed in a general way. Subsequently, a mathematical model of linear programming was proposed. This structure the decisive model and condensed the collected information through an application that incorporates the programming of production and preventive maintenance. As a result, two heuristics (SPT, LPT) and a metaheuristic (TABÚ SEARCH) were designed to allow a sequence of works with the objective of minimize the makespan.

Additionally, a comparison between the heuristic methods and the mathematical model was made, demonstrating that the Tabú search algorithm is able to find solutions close to the global optimum with a *gap* of 10%. The application was developed using the Visual Basic for Application tool of Microsoft Excel that allowed the programming of the production with the preventive maintenance. Finally, a test was carried out in the company for six weeks. The decrease in the reprocessing percentage could be seen, going from 29% to 18% for reference 323217 and from 20% to 15% for reference 323221 in the period analyzed.

To achieve these results, the application was developed from the work taking into account the order of operations, execution times and maintenance requirements such as: function, frequency of failures and repair time.

1. Justificación y planteamiento del problema

La industria metalmecánica se constituye en la cadena manufacturera como una fuente de transformación de acero, necesaria para la elaboración de bienes de capital productivo (Rodríguez, 2017). Las actividades comprendidas por esta industria incluyen la transformación, la reparación o el ensamble de los productos elaborados. Los bienes se caracterizan por ser de consumo, los cuales se preparan para su comercialización a través de distribuidores especializados o de manera directa. El sector metalmecánico hace parte de la industria manufacturera, en donde, actualmente en Colombia existen cerca de 1600 empresas dedicadas al sector metalmecánico, esto ha contribuido al desarrollo y consolidación industrial de la economía colombiana (Procolombia, 2016).

El sector manufacturero es la base de la economía nacional de países en vía de desarrollo. En Colombia representa un aporte del 12.0% a precios corrientes del PIB con un crecimiento del 3.7% respecto al año 2017 (DANE, 2018). En este sector la industria metalmecánica permitió que para el año 2017 Colombia se estableciera como el tercer productor más grande de acero en Suramérica y el cuarto en Latinoamérica (G&J empresas de acero, 2018) con una producción promedio de 106.007 toneladas de acero crudo y 112.418 toneladas de laminado largo (ANDI, 2018) este crecimiento brinda a las empresas oportunidades en el mercado, pero también las obliga a mejorar sus estándares de calidad y competitividad, por lo que deberían optar por certificaciones en normas técnicas de calidad como ISO y QS.

La aplicación del sistema de gestión de calidad es un factor estratégico del que dependen la mayor parte de las organizaciones (Cuatrecasas, 2010) dado que permite planear, ejecutar y controlar actividades necesarias para el cumplimiento de los objetivos corporativos. Grandes empresas nacionales e internacionales pertenecientes al sector industrial han implementado un sistema de gestión de calidad mediante la certificación ISO 9001, entre ellas, Grupo Familia, Carvajal empaques, Mexichem Resinas Colombia, Industrias HACEB, Sumincol S.A.S, Batz e Isidro Bordas. El presente estudio se desarrollará teniendo como punto de partida la compañía metalmecánica PROVEMEL LTDA que de igual manera cuenta con certificación de calidad ISO 9001:2015.

PROVEMEL LTDA. es una empresa colombiana del sector metalmecánico, creada en 1981 orientada al mejoramiento continuo en la calidad de sus productos y servicios. Cuenta con aproximadamente 350 referencias de productos entre las cuales se destacan piezas arquitectónicas, accesorios metalmecánicos, accesorios para estructuras en vidrio y piezas automotrices. Los procesos de fabricación exigen especialización y precisión dado que cada una de las referencias tiene características diferentes que requieren de un conjunto parámetros como máquinas determinadas y un tiempo establecido para su producción.

Actualmente, la compañía presenta deficiencias en el área de operaciones toda vez que los procesos de producción no están controlados y documentados correctamente, esto reduce la calidad de los productos y el incumplimiento de la NTC ISO 9001: 2015 en los puntos expuestos a continuación: los numerales 8.1.b, 8.1.d, 8.1.e en los que se hace énfasis en la planeación y control operacional, desde el establecimiento de criterios para los procesos, implementación del control, determinación y mantenimiento de información documentada. Los numerales sobre la revisión de los requisitos especificados por el cliente y por la organización 8.2.3.1.a, 8.2.3.1.c, documentación de resultados de revisión o nuevos requisitos 8.2.3.2 y control sobre procesos con proveedores externos 8.4.1.c. Por último, el control de la producción y la provisión del servicio bajo condiciones de disponibilidad de información, recursos e implementación actividades de seguimiento en los numerales 8.5.1.a, 8.5.1.b, 8.5.1.c. Durante el año 2018 PROVEMEL LTDA ha experimentado un incremento en la cantidad de productos no conformes por un total de 28.200 piezas, evento que tomó 110,008 horas adicionales para su aceptación, generando un costo total por reproceso de \$82.631.862.

En este orden de ideas, se realizó un análisis basado en la información adquirida para determinar la causa originaria de las deficiencias mencionadas, esto permitió establecer que la maquinaria, debido a la falta de mantenimiento y conflictos en su programación, elabora productos no conformes de cada una de las referencias.

Actualmente, las máquinas son programadas según el orden de prioridad de cada producto, así: AA, A, B, C, etc. (en donde AA representa la mayor prioridad seguido por A, B y C). Esta programación se realiza de manera manual por el encargado del área de producción quien asigna las máquinas de acuerdo con lo que considera conveniente, teniendo en cuenta la prioridad y características de los productos. En el cronograma de producción se crean conflictos debido a la posible programación de una máquina para el procesamiento de dos referencias en el mismo espacio de tiempo. Para cumplir con la fecha de entrega establecida se acelera el ritmo de la producción en las máquinas, aumentando el número de unidades fabricadas y en consecuencia la

cantidad de productos no conformes tras la pérdida de control en los procesos y desgastes prematuros en la herramienta de las máquinas.

Adicionalmente, en PROVEMEL LTDA. no se tiene en cuenta la programación de los mantenimientos preventivos, ocasionando la detención inesperada de la producción por fallo de la máquina. Lo anterior expone la necesidad de diseñar un sistema de control con parámetros establecidos para la programación efectiva de la maquinaria y sus respectivos mantenimientos. Este sistema logrará un incremento en la conformidad de productos y así mismo generará un mejor análisis de desempeño y control en los procesos.

Para dar solución a deficiencias en la calidad, similares a las mencionadas anteriormente se han desarrollado propuestas para otras compañías del sector. Estas proponen la implementación de un sistema de gestión de calidad basado en la NTC ISO 9001:2015 y un control estadístico de procesos CEP (Cevallos, 2017), se exponen metodologías de mejoramiento continuo tales como Lean manufacturing y DMAIC (Quispe, 2017), 5's (Tipian, 2017), MES (Agudelo, 2016), entre otros. Sin embargo, se evidencian falencias que pueden ser mejoradas mediante la sistematización de actividades para el control y toma de decisiones de los procesos.

El presente estudio propone la implementación de un sistema de información que permita documentar, controlar y evaluar el proceso de programación y mantenimiento de la maquinaria. A partir de parámetros estandarizados que faciliten el mejoramiento del desempeño y la integración efectiva de la cadena de producción como se muestra en la ilustración 1.

Ilustración 1. Cadena de producción



Fuente: Construcción de las autoras.

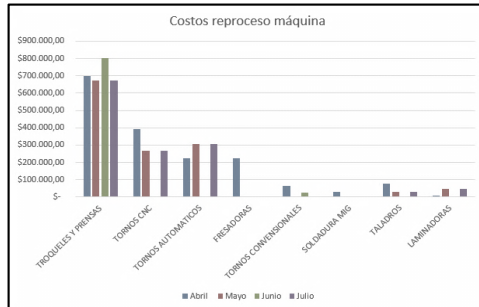
La solución busca beneficiar a la compañía a través de la reducción de productos no conformes y la disminución de los tiempos asociados. Realizando un análisis de desempeño basado en datos reales y verificables para garantizar la satisfacción de los requerimientos de los clientes.

Se tomará en consideración para el diseño de la propuesta la NTC ISO 9001:2015 en sus numerales 8.5.1.b y 8.5.1.c los cuales establecen: b) la disponibilidad y el uso de los recursos de seguimiento y c) la implementación de actividades de seguimiento y medición en las etapas apropiadas para verificar que se cumplen los criterios para el control de los procesos o sus salidas, y los criterios de aceptación para los productos y servicios (ICONTEC, 2015). Esto permite definir el propósito de la planeación mediante un sistema de gestión de control de calidad.

La empresa PROVEMEL LTDA se encuentra certificada con la NTC ISO 9001:2015 cuyo alcance es la fabricación y venta de productos metalmecánicos utilizados como componentes en productos automotrices y electrodomésticos. Una vez identificado el alcance, se analizaron factores influyentes en la elaboración de los productos basados en el desempeño de las máquinas. Los datos suministrados por la compañía reflejan

aquellas máquinas con mayores costos por reprocesos asociados, obteniendo los resultados mostrados en la ilustración 2.

Ilustración 2. Costos de reproceso por máquina



Fuente: Construcción de las autoras

En la ilustración 2, se observa que, del total de las máquinas involucradas en el proceso de fabricación de las referencias, aquellas que más generan costos por reproceso son los troqueles y prensas con un porcentaje de 41% para abril, 51% en mayo, 97% en junio y 51% en julio de 2018. Actualmente, la empresa cuenta con 84 máquinas de las cuales tres son troqueles y 10 prensas equivalentes al 16% del total. Las referencias y maquinaria que será utilizada en el presente estudio se seleccionarán teniendo como criterio el número de reprocesos por referencia y que para su elaboración utilizan troqueladoras y prensas mediante un diagrama de Pareto que nos permite encontrar esta relación, el cual se puede observar a continuación en la ilustración 3.

Ilustración 3. Pareto unidades reprocesadas por referencia



Fuente: Construcción de las autoras

Finalmente, se seleccionaron 5 referencias que representaban el 83.75% de los reprocesos, así como, 5 equipos a saber: una troqueladora, dos prensas, un calentador por proyección eléctrico y una tamboreadora que hacían parte del proceso productivo de dichas referencias. La ejecución de este proyecto se realizará basado en el ciclo PHVA, que permite una mejora integral de la competitividad basado en la dirección estratégica y la mejora continua, para reducir los reprocesos que actualmente tiene PROVEMEL LTDA y permitiendo responder la pregunta:

¿Cómo disminuir los productos no conformes mediante el diseño de un sistema de información y control que permita la programación y el mantenimiento de la maquinaria en la empresa PROVEMEL LTDA?

2. Antecedentes

PROVEMEL LTDA. durante sus 38 años de trayectoria se ha caracterizado por ser una empresa comprometida en ofrecer productos y servicios con altos estándares de calidad, debido a lo anterior desde el año 2006 empezó un proceso de certificación bajo la norma ISO 9001:2008. Con la implementación de dicha

norma se ejecutó un registro de los procesos para garantizar la calidad de los productos, la planeación operativa y las correcciones en las actividades que presentaban fallas. Es preciso destacar que esta información no se encontraba registrada de manera adecuada lo que dificulta el seguimiento y control de los procesos.

En el año 2018 la empresa recibió la certificación ISO 9001:2015, la cual surge como un proceso de actualización de la norma ISO 9001:2008. El desarrollo de esta norma se propone como estrategia competitiva, para garantizar a los usuarios que los productos ofrecidos cuentan con la calidad exigida a nivel nacional e internacional. El alcance de la certificación actual se encuentra enmarcado en la fabricación y venta de productos metalmecánicos utilizados como componentes en productos automotrices y electrodomésticos al igual que la ISO 9001:2008 previamente mencionada.

En la actualización de esta norma, se realizó un cambio en el esquema de contenido y se evidencia la acentuación de los términos riesgo, enfoque por procesos, eficacia, gestión de cambio, entre otros. La empresa PROVEMEL LTDA. dedicó un periodo de tres años en la ejecución de actividades que corresponden a: El enfoque preventivo mediante la realización de un análisis de riesgos y oportunidades, la determinación de factores externos e internos que afectan su dirección estratégica y la gestión de la calidad de los productos, para garantizar la certificación en la nueva norma.

El área de calidad actualmente maneja un indicador de reprocesos utilizando la herramienta Excel, en donde se identifica la pieza con su respectiva referencia, cantidad de unidades reprocesadas, defecto, acción correctiva, costos asociados, responsable y lecciones aprendidas. Lo anterior le permite a la compañía tomar decisiones y tener un registro de los reprocesos generados con cifras específicas y el detalle de los problemas de cada pieza (diámetros, rebabas, cortes, descentrados, errores de soldadura, troquelado inadecuado, etc.). La planeación del mantenimiento se realiza de manera correctiva, lo cual implica que la reparación se hace en el mismo instante en el que se presenta la falla. Adicionalmente, se identificó que existen oportunidades de mejora en la programación del mantenimiento, la planeación y asignación de actividades dentro de los procesos y la salida de productos no conformes.

La planeación y asignación se consideran parámetros determinantes para el análisis del presente estudio dado que, permiten dar solución a los inconvenientes que PROVEMEL LTDA. presenta en cuanto a la calidad de sus productos. La detención de las máquinas que requieren reparación genera cuellos de botella, tiempos ociosos y recursos como mano de obra y materia prima desperdiciados. Por esta razón, se hace énfasis en el mantenimiento y el debido desarrollo de un plan de prevención para reducir los productos no conformes y lograr el mejoramiento de los procesos.

A continuación, se muestran los métodos de solución planteados por los diferentes autores para resolver las dificultades descritas previamente en la empresa, estos se encuentran divididos por calidad, planeación y asignación y mantenimiento. Se toma como referencia esta bibliografía para tener conocimiento sobre cuáles han sido los resultados más próximos al tema en cuestión y definir una metodología adecuada para el desarrollo de la solución.

CALIDAD

En esta sección, se presentan artículos que proponen soluciones para los problemas de calidad en diferentes compañías a nivel nacional e internacional mediante la aplicación de herramientas de mejora de procesos. Por ejemplo, para la reducción de productos no conformes y reprocesos, en Perú, la empresa Consermer s.a.c. desarrolló un sistema de gestión de calidad mediante las herramientas de lean manufacturing, a través del DMAIC para la optimización y la estandarización de los procesos bajo las exigencias de la norma ISO 9001:2015. Esto permitió reducir los costos en la línea de producción por devoluciones y reprocesos anuales en \$101'896,463.55 pesos colombianos y desarrollar el cumplimiento de la norma ISO 9001:2015 en un

81.61% (Quispe, 2017). De igual manera, la compañía FRUCOSA. S.A mediante la implementación de un sistema de control estadístico de procesos (CEP) para establecer patrones de comportamiento logró disminuir el índice de reproceso en 0.67% entre el 2013 y 2014, demostrando así, una mejora en los procesos productivos e incrementó su eficiencia en 0.19%, estos niveles de eficiencia están dados por los kilogramos producidos de cada tipo de producto y el tiempo laboral utilizado (Cevallos, 2017).

En cuanto a estrategias para la mejora de la calidad, se ha propuesto un modelo de integración que permite a través de la captura de eventos construir la línea de tiempo de los dos estados “operación” y “paro” de una estación de trabajo de manufactura. Dichos eventos correlacionados brindan información que facilita la gestión y generan oportunidades para la toma de decisiones. El modelo propuesto además de permitir evaluar el rendimiento gestiona las órdenes de producción e incrementa la calidad en los productos ofrecidos. Esto se logra mediante los sistemas de ejecución de manufactura (MES), modelado mediante DES (Discrete Event System) e integrando indicadores clave KPI (Agudelo, 2016). La compañía manufacturera Maresa desarrolla una propuesta de mejora continua a través de la metodología 5S's para identificar las causas que dan origen a los reprocesos en esta línea de producción y generar un desempeño eficaz y eficiente en el proceso de pintado y así mismo disminuirlos (Quispe, 2017).

Por último, en la empresa metalúrgica Vulcano SA se desarrolló la estandarización de procesos productivos mediante 7 herramientas de mejora continua: Diagrama causa efecto, 5S'S, Hoja de verificación, Pareto, Gráficos de control, Diagrama de flujo, Histograma con lo cual se logró la disminución del índice de reproceso y entregas fuera de tiempo (Tipian, 2017). Se evidencia que existen diferentes métodos para la solución de inconvenientes relacionados con la calidad de los productos los cuales, pueden ser utilizados para la realización de este proyecto, sin embargo, el presente estudio requiere tener en cuenta más variables para su solución.

PLANEACIÓN Y ASIGNACIÓN

En esta sección se muestra cómo se ha dado solución al conflicto en la planeación y asignación de máquinas junto a la producción y cuáles han sido los procedimientos para el correcto funcionamiento de estas. Marte Collado propone un modelo para la programación de la producción en máquinas paralelas sujeto a adelantos, retrasos y fechas, con el fin de minimizar los adelantos y retrasos ponderados de máquinas en paralelo no relacionadas. Se formula la planeación de la producción a través de un modelo matemático de programación lineal entera mixta implementado en Lingo versión 17. El método es un algoritmo genético probado con evaluaciones estadísticas para su calibración. Finalmente se logró una reducción considerable en el valor de la función objetivo (Marte, 2017).

Otros métodos de solución como el de (*MILP*) proponen minimizar el consumo total de energía a través de un modelo *Job Shop*, proponiendo seis soluciones matemáticas convertidas en dos grandes modelos con diferentes variables. Uno de estos con tiempo ocioso y el otro con energía ociosa, una vez ejecutados los modelos, los compara al propuesto por Zhang Et y encuentra en las dos iniciales una mejor solución para racionalizar la producción. En otro caso, enfocado al proceso productivo *Jop Shop* para una secuencia dependiente de tiempos de alistamiento, se propone el análisis del algoritmo *Tabú* para minimizar el *makespan* y a través un diseño computacional solucionar los problemas de programación productivos. (Shen, Dauzère-pèrès, & Neufeld, 2018)

Con el fin de mejorar la planeación del mantenimiento para ejecutar la producción a través de las funciones, las causas y los modos de fallos de los activos se presenta la aplicación de un modelo correctivo y habilitación de un subsistema de mantenimiento preventivo limitado a una máquina, a través de la aplicación de metodologías como MCC, Análisis del Valor y la Teoría del Control Borroso. (Díaz-Cazañas & De La Paz- Martínez, 2016).

MANTENIMIENTO

Respecto al mantenimiento, se muestra cómo diferentes autores han planteado soluciones para evitar inconvenientes relacionados con el cuidado de la maquinaria, disminuyendo imprevistos y mejorando la producción. El primer caso de estudio propone una gestión integral, determinada a partir de parámetros de mantenimiento y disponibilidad. Se plantean modelos que tiene en cuenta recursos humanos y materiales, la planeación productiva y la calidad, con el fin de lograr una definición asertiva de los parámetros de funcionamiento, de riesgo, de error y de avería. (García Garrido, 2003)

Dentro de la planeación del mantenimiento es fundamental definir la *curva de la bañera*, diagrama que permite identificar en qué etapa de vida se encuentra la maquinaria (fallos iniciales, fallos relativos o fallos por desgaste). Esta herramienta permite definir indicadores de falla y análisis de tiempos (PROPYMES, 2014). Una vez se encuentra definida la etapa, es posible realizar el análisis probabilístico para definir los tipos de avería, los periodos de reparación y definir el tipo de mantenimiento requerido. (Navarro Elola, Pastor Tejedor, Lacabrera, & Jaime Miguel, 2016)

Asimismo, J. Diestra, Esquiviel, & Guevara proponen el desarrollo de un Plan de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad a partir de un análisis de modos y efectos de falla (AMEF) y un Árbol Lógico de Decisión, para determinar el tipo de mantenimiento adecuado y así establecer las actividades que deben ser realizadas en la máquina crítica lo cual permite disminuir la ocurrencia de fallas (J. Diestra, Esquiviel, & Guevara, 2017). Por otro lado, en la empresa EMECA SAC se ha mejorado la productividad mediante la implementación de un plan de mantenimiento preventivo en el área de producción, con la elaboración de una matriz MCR (Matriz de criticidad de riesgo) la cual permite evaluar el factor de riesgo y jerarquizar los principales sistemas que componen la planta de la empresa EMECA SAC a través de la técnica AHP y por medio de estadística descriptiva utilizando SPSS para la validación de hipótesis de las variables evaluadas (Simón, 2017).

Por otro lado, Sunción desarrolla un programa de gestión del mantenimiento efectivo e integrado a través de la aplicación del TPM para mejorar la calidad del producto, seguridad, calidad de vida de la maquinaria, capacidad de respuesta ante una emergencia, costos, confiabilidad, disponibilidad, y prolongación de la vida útil de los equipos. Esto con el fin de reducir la cantidad de desperdicios en los procesos productivos (Sunción, 2017). Finalmente, para incrementar la operatividad de las Máquinas de la Empresa Metal Work Industrias SAC, se diseña un plan de Gestión de Mantenimiento Preventivo mediante la revisión de documentos, observación y entrevistas que permiten identificar los indicadores de desempeño adecuados para el mantenimiento (H. M. Diestra, 2017).

Teniendo en cuenta lo anterior, se evidencia que no se han abordado de manera integral los factores claves de la problemática planteada en la empresa PROVEMEL LTDA. No obstante, se utilizarán algunas nociones para el planteamiento de la solución de este estudio. Entre estas se encuentran: el uso de herramientas de mejora continua para definir el estado actual de los procesos tales como diagramas y gráficas, la recolección de información cuantitativa y cualitativa para la definición de parámetros de mantenimiento y la selección de un modelo de programación acorde a la dinámica productiva que pueda ser adaptada a la planeación integral del mantenimiento.

3. Objetivos

- **Objetivo General:**

Diseñar un sistema de información y control que permita la programación y el mantenimiento de la maquinaria, para la reducción de productos no conformes.

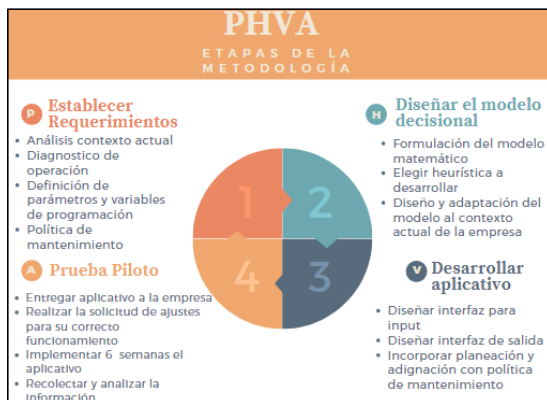
Objetivos específicos:

- Establecer los requerimientos de programación y mantenimiento de la maquinaria seleccionada.
- Diseñar el modelo decisional para la elaboración del sistema de información teniendo en cuenta los requerimientos identificados.
- Desarrollar el sistema de información basado en el modelo decisional y en los parámetros establecidos.
- Verificar mediante una prueba piloto el desempeño de la implementación del sistema de información en las referencias y máquinas seleccionadas.

4. Metodología

A continuación, se evidencian las etapas para abordar los objetivos planteados. En primer lugar, se analizó de manera general la situación de la empresa profundizando en el problema a estudiar con el fin de identificar y definir los parámetros y variables necesarias. Posteriormente, se planteó un modelo matemático que permitió estructurar el modelo decisional y condensar la información recopilada. Finalmente, se realizó el aplicativo que permitió realizar la programación de la producción teniendo en cuenta la política de mantenimiento desarrollada y reduciendo de esta manera la cantidad de reprocesos y productos no conformes para las cinco referencias seleccionadas. Esta última etapa fue comprobada a través de una prueba piloto de seis semanas en la cual se evaluó la funcionalidad del aplicativo.

Ilustración 4. Etapas metodología



Fuente: Construcción de las autoras

Objetivo 1: Establecer los requerimientos de programación y mantenimiento de la maquinaria seleccionada.

Este objetivo corresponde a una primera fase basada en información cualitativa. Para su desarrollo se definieron herramientas que permitieron determinar los parámetros y variables necesarias para construir el modelo decisional y el aplicativo final. Simultáneamente, se realizó la elección de la política de mantenimiento de acuerdo con la naturaleza de los procesos, su ejecución garantizó que los equipos fueron estudiados de acuerdo a su función, las tareas de mantenimiento y la frecuencia con la que se deben realizar. (García Garrido, 2003)

Inicialmente se cuenta con el mapa general de procesos el cual permite entender la estructura interna de la compañía, en este se encuentra la planeación de la fabricación de los productos y la manera como se ejecuta el mantenimiento y control de herramientas ([ver Anexo 1](#)). A partir de esta información se elaboró un diagrama de procesos en donde se muestran los actores principales y las actividades claves de la producción. En razón de lo expuesto, se puede observar que el orden de realización y asignación de tareas son

fundamentales para el éxito operativo. ([ver Anexo 2](#)). Posteriormente, se realizó un diagrama de Pareto a partir de la cantidad de reprocesos de todos los productos elaborados en la empresa durante el año 2018 (marzo a diciembre), seleccionando las cinco referencias que reflejaban la mayor cantidad de productos no conformes.

Cada una de las cinco referencias seleccionadas fue analizada mediante un diagrama de flujo para identificar las máquinas que intervienen en sus procesos ([ver Anexo 3](#)). Lo anterior, permitió realizar una matriz de análisis de operación, en donde se encuentra la información de los parámetros y variables más importantes para la programación de la producción. Los parámetros destacados corresponden a tiempo de procesamiento y alistamiento para de las operaciones a realizar en la máquina, hora de inicio de producción de la máquina, tiempo en el que se puede empezar a procesar el trabajo y número de operaciones del trabajo. Por ejemplo, se sabe para la fabricación del Bracket Aveo (323217) son necesarias tres operaciones que tardan 64 segundos por pieza y requiere 7800 segundos de alistamiento para las tres máquinas de su proceso. Adicional a ello, se identificaron variables binarias sobre la precedencia de la operación de un trabajo sobre otro y de la asignación de la operación de un trabajo en una máquina, hora de terminación de la operación a realizar del trabajo programado y *makespan* (Tiempo total entre el inicio y la terminación de la programación.). ([ver anexo 4](#))

Asimismo, para la definición de la política de mantenimiento se identificaron las fallas o averías de las máquinas durante el año 2018 y los requerimientos de mantenimiento sugeridos por el fabricante. Esto permitió definir el tipo, las actividades y la frecuencia con la que debería realizarse el mantenimiento. Para cada máquina se estableció una zona de la *curva de bañera*, gráfico que permite ver la etapa de funcionalidad en la que se encuentra la maquinaria. Este análisis puntualizó la frecuencia ideal para la ejecución del mantenimiento de manera preventiva de acuerdo con el tiempo medio entre falla y el tiempo medio para reparar calculado. ([ver anexo 5](#))

Objetivo 2: Diseñar el modelo decisional para la elaboración del sistema de información teniendo en cuenta los requerimientos identificados.

Los parámetros y las variables identificadas en el objetivo 1 permiten formalizar el modelo matemático. Este brinda una solución al problema agrupando la información que caracteriza los procedimientos necesarios para la realización de los productos, a partir del cumplimiento de las restricciones de la programación de la producción y los mantenimientos de las máquinas. El diseño de este modelo requiere ser dividido en dos etapas. La primera corresponde a la definición del problema en donde se puntualizan los aspectos a tener en cuenta en este caso de estudio. La segunda, a la estructura matemática que sigue el programa para encontrar una respuesta funcional.

1. Definición del problema

Se define el problema como un modelo de programación de producción *Job Shop*, donde cada trabajo tiene una cantidad fija de operaciones con un tiempo determinado. Las operaciones deben ser programadas en aquellas máquinas que hacen parte del proceso productivo de cada trabajo respetando la secuencia preestablecida. Así mismo, se debe incorporar una política de mantenimiento preventivo previamente establecida para cada máquina involucrada.

2. Formulación matemática

A continuación, se define el siguiente el modelo de programación lineal:

Conjuntos

Tabla 1. Conjuntos del modelo matemático

Expresión	Descripción
I: {1 ... n}	Conjunto de trabajos programados según demanda
J: {1 ... 5}	Conjunto de operaciones preestablecidas para cada referencia
K: {1 ... 5}	Conjunto de máquinas involucradas en el proceso productivo de las referencias
B: {1 ... 3}	Conjunto de turnos disponibles para la producción

Fuente: Construcción de las autoras

Parámetros

Tabla 2. Parámetros del modelo matemático

Símbolo	Parámetro
P_{ijk}	Tiempo de procesamiento de la operación j del trabajo i en la máquina k
T_{ijk}	Tiempo de alistamiento de la operación j del trabajo i en la máquina k
L_i	Tiempo en el que se puede empezar a procesar el trabajo i
N_i	Número de operaciones del trabajo i
O_{ij}	Índice de la operación j del trabajo i
Q	Número muy grande
H_{kb}	Hora de inicio del bache b en la máquina k.
D_{kb}	Duración del bache b en la máquina k

Fuente: Construcción de las autoras

Variables

Tabla 3. Variables del modelo matemático

Símbolo	Variable
X_{ijrv}	Binaria, 1 si la operación j del trabajo i precede a la operación v del trabajo r, 0 de lo contrario
Y_{ijkb}	Binario, 1 si la operación j del trabajo i es asignada a la máquina k en el bache b, 0 de lo contrario
C_{ij}	Hora de terminación de la operación j del trabajo i
C_{max}	Makespan

Fuente: Construcción de las autoras

La función objetivo busca minimizar el *Makespan* (1)

$$\text{Minimizar } Z = C_{max} \quad (1)$$

Sujeta a las siguientes restricciones:

$$C_{max} \geq C_{ij} \quad \forall i \in I, j \in J \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{b=1}^B Y_{ijkb} = 1 \quad \forall i \in I, j \in J \setminus j > 0, j \leq N_i \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{N_i} Y_{ijkb} (P_{ijk} + T_{ijk}) \leq D_{kb} \quad \forall k \in K, b \in B \quad (4)$$

$$C_{ij} \geq C_{i,j-1} + \sum_{k=1}^K \sum_{b=1}^B Y_{ijkb} P_{ijk} \quad \forall i \in I, j \in J \setminus j > 0, j \leq N_i \quad (5)$$

$$C_{ij} \geq \sum_{k=1}^K \sum_{b=1}^B Y_{ijkb} (H_{kb} + P_{ijk} + T_{ijk}) \quad \forall i \in I, j \in J \setminus j > 0, j \leq N_i \quad (6)$$

$$C_{ij} \leq \sum_{k=1}^K \sum_{b=1}^B Y_{ijkb} (H_{kb} + D_{kb}) \quad \forall i \in I, j \in J \setminus j > 0, j \leq N_i \quad (7)$$

$$C_{ij} \geq C_{rv} + P_{ijk} + T_{rvk} - Q(2 - Y_{ijkb} - Y_{rvkb} + X_{ijrv}) \quad \forall i \in I, j \in J, r \in I, v \in J, \quad (8)$$

$$C_{rv} \geq C_{ij} + P_{rvk} + T_{ijk} - Q(3 - Y_{ijkb} - Y_{rvkb} - X_{ijrv}) \quad \forall i \in I, j \in J, r \in I, v \in J, \quad (9)$$

$$C_{i0} = L_i \quad \forall i \in I \quad (10)$$

$$X_{ijrv} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, j \in J, r \in I, v \in J \quad (11)$$

$$Y_{ijkb} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, b \in B \quad (12)$$

$$C_{ij} \geq 0 \quad \forall i \in I, j \in J \quad (13)$$

Una vez obtenida la formulación matemática las restricciones aplicadas al modelo, se describen como: (2) la disponibilidad de la máquina al momento de hacer la asignación ya que determina el tiempo de finalización del último trabajo, (3) que cada operación de cada trabajo sea asignada únicamente a un solo bache de una máquina, (4) que todas las operaciones asignadas a un mismo bache puedan ser procesadas antes de que la máquina entre en mantenimiento, (5) que se respete la secuencia de operaciones para cada trabajo, (6) y (7) aseguran que la operación de cada trabajo sea completamente procesada dentro de la duración del bache asignado, (8) y (9) permiten el correcto flujo de operaciones en cada bache de cada máquina respetando el orden de precedencia, (10) que un trabajo no pueda empezar a procesarse antes del tiempo de liberación definido, finalmente (11), (12) y (13) son las restricciones de no negatividad para las variables de decisión. En el [anexo 6](#) se presenta el modelo de programación lineal mencionada desarrollado en gusek.

A manera de ejemplo, se toma la referencia Bracket Aveo (323217). El orden de fabricación corresponde a troquelado, soldadura y punzonado, esta precedencia se debe respetar tanto en operación como en máquina. En este caso la troqueladora (J1) debe contar con una disponibilidad de 8 segundos, tiempo de procesamiento que debe efectuarse antes de entrar en mantenimiento y que debe completarse para dar paso a una nueva operación. Adicionalmente, se debe garantizar que la totalidad de las piezas de esta referencia que han sido programadas sean realizadas en el turno asignado de la máquina.

Objetivo 3: Desarrollar el sistema de información basado en el modelo decisional y en los parámetros establecidos.

Se busca diseñar y desarrollar un aplicativo que permita la programación de la producción para cinco referencias, las cuales tuvieron el mayor número de reprocesos durante los meses analizados en el año 2018. Así mismo, incluir la programación del mantenimiento preventivo para las máquinas que intervienen en su proceso productivo, todo esto orientado a las necesidades de la empresa metalmecánica PROVEMEL LTDA.

Es necesario considerar que los requerimientos de desempeño del aplicativo corresponden a una interfaz amigable para el usuario, con un menú de instrucciones que facilita el ingreso de información y el análisis de los resultados. El aplicativo debe ser capaz de generar una respuesta en menos de 10 minutos mostrando los resultados a partir de un *diagrama de Gantt* y de completar un formato que facilite la documentación física (impresa) de la programación de la producción y mantenimiento.

Por otro lado, se consideran una serie de restricciones que deben ser tenidas en cuenta. En primer lugar, la compañía no cuenta con una base de datos organizada ni debidamente documentada que permita la estructuración del modelo decisional para el sistema. Lo anterior, confirma que la restricción principal

identificada corresponde al suministro completo de la información. Sin embargo, se realizó el levantamiento que permitió la definición de los parámetros basados en la realidad y en la necesidad actual.

En segundo lugar, el diseño se realizará únicamente para las referencias críticas en términos de productos no conformes y reprocesos: Bracket Aveo, Bracket S3, Bracket Mazda 2, Guía y Guía superior resorte - TMP1084. Por otro lado, las máquinas involucradas en la programación fueron aquellas que hacen parte del proceso productivo de las referencias previamente mencionadas: Prensa Hidramilano 300NT, Prensa Alemana, Troqueladora Ambold, calentador por proyección eléctrico y Tamboreadora Sweco. Por lo tanto, en el aplicativo, se tiene en cuenta solamente la información de las referencias y maquinaria mencionadas.

Por último, la empresa no está dispuesta a asignar recursos financieros para la adquisición de un software o programa para la propuesta. Dado lo anterior, se desarrolló a través de la herramienta Excel garantizando que no se generen gastos adicionales.

Teniendo en cuenta el modelo matemático previamente establecido en el objetivo 2, se procede con el diseño del aplicativo a través de la herramienta Visual Basic For Application de Microsoft Excel para solucionar el problema de programación de la producción. Esta herramienta permite adicionar una mayor cantidad de trabajos y la política de mantenimiento preventivo. Para ello, se diseñaron dos heurísticas (*SPT*, *LPT*) y una *meta heurística* que garantiza mayor calidad de solución (*TABÚ SEARCH*), brindando al usuario la oportunidad de seleccionar una respuesta de acuerdo al resultado con menor *makespan*.

A continuación, se presentan los diagramas de los modelos desarrollados.

Heurística SPT

Este modelo busca la programación de la producción basado en la regla de prioridad *SPT* (Shortest processing time), en donde se define la secuencia de acuerdo al menor tiempo de procesamiento de cada trabajo.

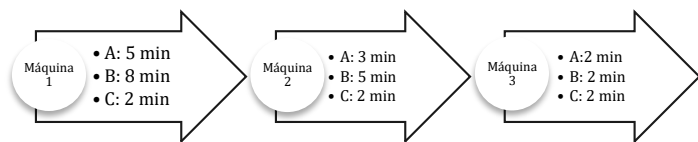
Por ejemplo, se desean programar los trabajos A, B y C, los cuales utilizan las mismas máquinas 1, 2 y 3 y siguen la secuencia que se muestra en la ilustración 5. Primero, utilizan la máquina 1, siguiendo con la máquina 2 y por último la máquina 3. La tabla 4 muestra el tiempo de procesamiento total para cada uno de los trabajos mientras que la ilustración 5 presenta el tiempo de procesamiento en cada máquina:

Tabla 4. Ejemplo regla despacho SPT

Trabajo	Tiempo procesamiento
A	10 min
B	15 min
C	6 min

Fuente: Construcción de las autoras

Ilustración 5. Tiempo de procesamiento unitario ejemplo SPT



Fuente: Construcción de las autoras

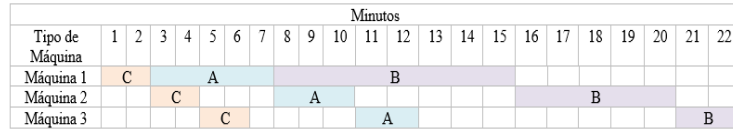
Una vez identificados estos parámetros, los trabajos deben ser ordenados de acuerdo al menor tiempo de procesamiento. La tabla 5 presenta la secuencia que debe seguir la programación de la producción para el ejemplo presentado bajo la regla de despacho *SPT*. El trabajo C tiene el menor tiempo de procesamiento seguido por el trabajo A y finalmente el trabajo B. Es decir, que la secuencia para la programación de la producción es elaborar el trabajo C, luego el A y finalmente el B. Los resultados se pueden observar en el diagrama de Gantt de la ilustración 6.

Tabla 5. Trabajos ordenados ejemplo SPT

Trabajo	Tiempo procesamiento
C	6 min
A	10 min
B	15 min

Fuente: Construcción de las autoras

Ilustración 6. Diagrama de Gantt ejemplo SPT



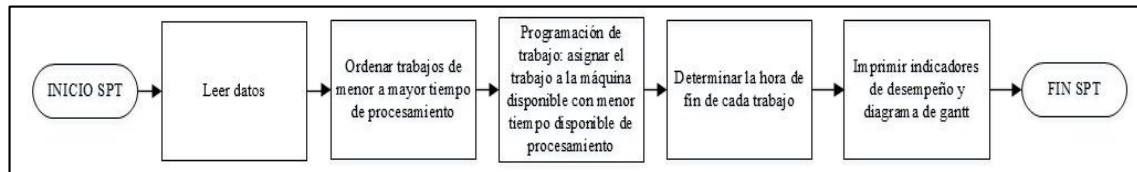
Fuente: Construcción de las autoras

El aplicativo diseñado funciona de acuerdo a la explicación previa utilizando las máquinas y referencias de este caso de estudio. Los pasos que sigue la programación se muestran a continuación:

Pseudo código

- 1) El usuario debe ingresar la información de la cantidad de trabajos asignados para la programación, fecha inicio de la programación, cantidad de unidades a procesar, el tipo de referencia y la programación de los mantenimientos.
- 2) Una vez leídos estos datos, los trabajos se organizan de acuerdo a la regla de priorización *SPT* en donde se ordenan de **menor a mayor** tiempo de procesamiento.
- 3) Cuando se tienen los trabajos ordenados se programan respetando la secuencia de sus operaciones y son asignados a la máquina que se encuentre disponible para realizar la operación.
- 4) Se determina la hora de finalización de cada trabajo de acuerdo al tiempo de procesamiento de la cantidad de unidades ingresadas.
- 5) Finalmente, se debe imprimir el resultado de la programación a través de un formato que muestra la secuencia obtenida, *Makespan* y el *diagrama de Gantt* que brinda una ayuda visual del resultado.

Ilustración 7. Pseudo código SPT



Fuente: Construcción de las autoras

Heurística LPT

Este modelo busca la programación de la producción basado en la regla de prioridad *LPT* (Largest processing time), en donde se define la secuencia de acuerdo al mayor tiempo de procesamiento para cada trabajo asignado.

Utilizando los mismos datos para la regla de despacho *SPT*, la regla *LPT* ordenar los trabajos de acuerdo al mayor tiempo de procesamiento. El trabajo B será el primero en ser programado, seguido por el trabajo A y finalmente el trabajo C. Este resultado se puede observar en la tabla 6 y en el *diagrama de Gantt* presentado en la ilustración 8.

Tabla 6. Trabajos ordenados ejemplo LPT

Trabajo	Tiempo procesamiento
B	15 min
A	10 min
C	6 min

Fuente: Construcción de las autoras

Ilustración 8. Diagrama de Gantt ejemplo LPT



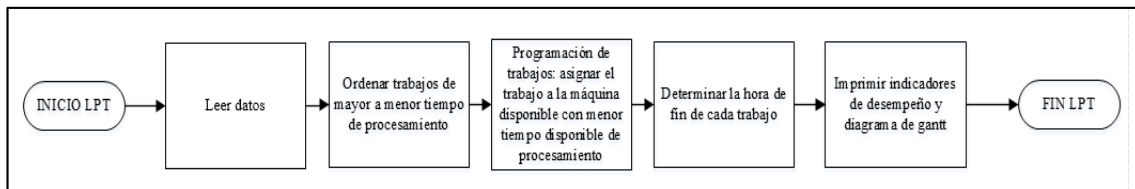
Fuente: Construcción de las autoras

El aplicativo diseñado funciona de acuerdo a la explicación previa utilizando las máquinas y referencias de este caso de estudio. Los pasos que sigue la programación se muestran a continuación:

Pseudo código

- 1) El usuario debe ingresar la información de la cantidad de trabajos asignados para la programación, fecha inicio de la programación, cantidad de unidades a procesar, el tipo de referencia y la programación de los mantenimientos.
- 2) Una vez leídos estos datos, los trabajos se organizan de acuerdo a la regla de priorización *LPT* en donde se ordenan de **mayor a menor** tiempo de procesamiento.
- 3) Cuando se tienen los trabajos ordenados se programan respetando la secuencia de sus operaciones y son asignados a la máquina que se encuentre disponible para realizar la operación.
- 4) Se determina la hora de finalización de cada trabajo de acuerdo al tiempo de procesamiento de la cantidad de unidades ingresadas.
- 5) Finalmente, se debe imprimir el resultado de la programación a través de un formato que muestra la secuencia obtenida, *Makespan* y el *diagrama de Gantt* que brinda una ayuda visual del resultado.

Ilustración 9. Pseudo código LPT

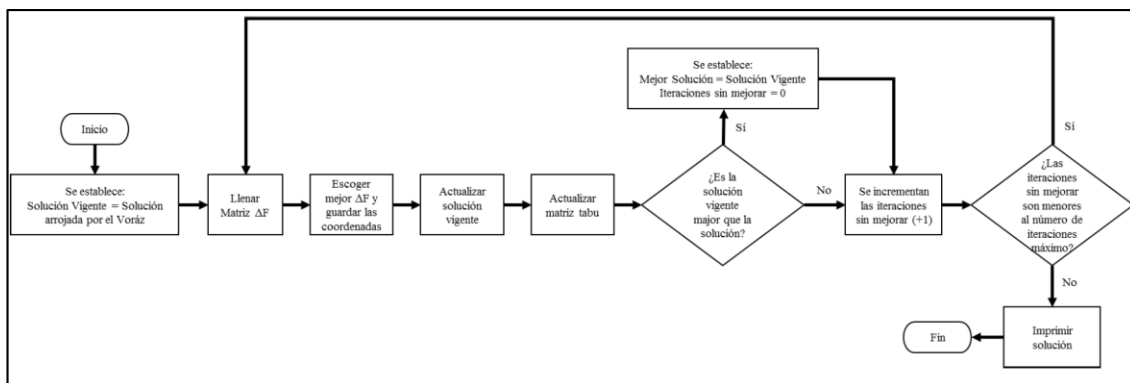


Fuente: Construcción de las autoras

Meta heurística TABÚ SEARCH

Este modelo busca la programación de la producción basado en un método de optimización que mediante el uso de estructuras de memoria realiza diferentes iteraciones hasta encontrar la mejor solución.

Ilustración 10. Pseudo código meta heurística Tabú



Fuente: Construcción de las autoras

Pseudo código

El código inicializa la solución actual y la mejor solución a partir de un orden inicial determinado, luego ingresa a un ciclo en donde se deben realizar los siguientes pasos:

- 1) Llenar la matriz delta f, en donde se calculan los cambios de la función objetivo sustituyendo una posición i con una posición j en el vector orden.
- 2) Escoger el mejor delta f respetando la restricción de cambio prohibido y el criterio de aspiración.
- 3) La solución se actualiza con el mejor cambio encontrado.
- 4) Se actualiza la lista *tabú* donde se marca como prohibido el mejor cambio realizado, luego se evalúa si la solución encontrada en la iteración actual es mejor que la mejor encontrada hasta el momento y se actualiza la mejor solución si es necesario, de lo contrario se aumenta en una unidad el contador de iteraciones sin mejorar.
- 5) Por último, se evalúa si la cantidad de iteraciones sin mejorar ha alcanzado su límite, en dado caso se para de iterar.

solucionActual = calcularF(solucionActual.orden)

MejorSolucion = solucionActual

Hacer

1) llenarMatrizDeltaF

2) choseBestCambio

3) updatesolucionActual

4) updateMatrizTabu

SI (solucionActual.FO < MejorSolucion.FO) Entonces

 MejorSolucion = solucionActual

 itersinmejorar = 0

Sino

 itersinmejorar = itersinmejorar + 1

Mientras (itersinmejorar < MaxIteraciones)

La función calcularF devuelve la función objetivo asociada a un orden de procesamiento de trabajos determinado, para ello recibe como parámetro el vector order() en donde están organizados los trabajos y la programación de cada máquina por medio del procedimiento asignarMaq, este último recibe como parámetro un trabajo i y una operación j, y se encarga de que dicha operación sea asignada a una máquina capaz de procesarla y terminarla antes que las demás, teniendo en cuenta las restricciones de capacidad de los baches y que una máquina solo puede procesar un solo trabajo a la vez.

calcularF

para i = 1 hasta número de trabajos

 para j = 1 hasta número de operaciones del trabajo i

 AsignarMaq(order(i), j)

 siguiente j

siguiente i

Por ejemplo, si se desean programar los trabajos 1 y 2 como se muestra en la tabla 7. El aplicativo realizará el Tabú a partir de diferentes iteraciones comparando la función objetivo que para este caso sería el *Makespan*. (Ilustración 11). En comparación con el método LPT (ilustración 12) el resultado obtenido en el tabú presenta una mejor solución indicando que el intervalo de tiempo en el que se procesan todos los trabajos es menor.

Tabla 7. Ejemplo programación trabajos Tabú.

Trabajo	Fecha de entrega	Descripción	Referencia	Total producción
1	30/09/2019	Bracket Mazda 2	323329	5
2	30/09/2019	Bracket S3	323469	4

Fuente: Construcción de las autoras

Ilustración 11. Resultado simulación Tabú.

Provemel Ltda.		ASIGNACIÓN MAQUINARIA				Código formato: QF-011						
FECHA DE ELABORACIÓN: Enero del 2018		SPT		LPT		Tabu						
MAKE SPAN: 4,594722222												
ITEM	Trabajo	Operación	Máquina	Lote	P	T	P+T	Inicio	Fin	Fecha terminación	Fecha acordada	Tardanza
1	1	1	1	1	0,0222	1	1,0222	1,018	2,04	1/09/2019	30/09/2019	0
2	1	2	2	1	0,0833	1	1,0222	2,047	3,15	1/09/2019	30/09/2019	0
3	1	3	3	1	0,0875	0,667	1,0222	3,321	4,0753	1/09/2019	30/09/2019	0
4	1	4	4	1	0,0194	0,5	1,0222	4,075	4,5947	1/09/2019	30/09/2019	0
5	2	1	1	1	0,0178	1	1,0833	0	1,0178	1/09/2019	30/09/2019	0
6	2	2	2	1	0,0489	1	1,0833	1,018	2,067	1/09/2019	30/09/2019	0
7	2	3	4	1	0,0533	0,667	1,0833	2,067	2,7867	1/09/2019	30/09/2019	0
8	2	4	3	1	0,0344	0,5	1,0833	2,787	3,3211	1/09/2019	30/09/2019	0
9	2	5	5	1	0,0156	0,167	1,0833	3,321	3,5033	1/09/2019	30/09/2019	0

Fuente: Construcción de las autoras

Ilustración 12. Resultado simulación LPT.

Provemel Ltda.		ASIGNACIÓN MAQUINARIA				Código formato: QF-011						
FECHA DE ELABORACIÓN: Enero del 2018		SPT		LPT		Tabu						
MAKE SPAN: 4,815833333												
ITEM	Trabajo	Operación	Máquina	Lote	P	T	P+T	Inicio	Fin	Fecha terminación	Fecha acordada	Tardanza
1	1	1	1	1	0,0222	1	1,0222	0	1,0222	1/09/2019	30/09/2019	0
2	1	2	2	1	0,0833	1	1,0222	2,1056	1,092	1/09/2019	30/09/2019	0
3	1	3	3	1	0,088	0,667	1,0222	2,106	2,897	1/09/2019	30/09/2019	0
4	1	4	4	1	0,019	0,5	1,0222	2,86	3,392	1/09/2019	30/09/2019	0
5	2	1	1	1	0,018	1	1,0833	1,0222	2,04	1/09/2019	30/09/2019	0
6	2	2	2	1	0,049	1	1,0833	2,106	3,144	1/09/2019	30/09/2019	0
7	2	3	4	1	0,053	0,667	1,0833	3,329	4,092	1/09/2019	30/09/2019	0
8	2	4	3	1	0,034	0,5	1,0833	4,099	4,636	1/09/2019	30/09/2019	0
9	2	5	5	1	0,016	0,167	1,0833	4,634	4,6136	1/09/2019	30/09/2019	0

Fuente: Construcción de las autoras

Para este caso de estudio se adaptaron las reglas de despacho (*SPT* y *LPT*) junto con la *meta heurística* (*Tabú*), estas se ejecutan dentro del sistema de información para las referencias seleccionadas, teniendo en cuenta los mantenimientos que deben ser realizados a las máquinas y los requerimientos de la programación de la producción. La interfaz del sistema se define a través del menú descrito a continuación:

- Introducción: Menú en donde se encuentran las pestañas para el ingreso de datos y visualización de resultados (Ilustración 13).

Ilustración 13. Menú de inicialización del aplicativo



Fuente: Construcción de las autoras

- Definición valores: Determinación de los valores de entrada para inicializar la programación (Ilustración 14).

Ilustración 14. Definición de valores de entrada

PASO 1 DETERMINE LOS SIGUIENTES VALORES EN LA HOJA "DEFINICIÓN VALORES"

Num trabajos	10
Num máquinas	5
Num lotes	2
Num iteraciones	2
Lista tabu	2
Fecha inicio programación	23/05/2019
inicio jornada	6:00:00 a. m.
fin jornada	10:00:00 p. m.

Num trabajos

*Ingrese el número de trabajos que desea programar

Num máquinas

*Máquinas disponibles para utilizar en la programación

Num lotes

*Lotes disponibles en la empresa (1,2)

Num iteraciones

*50 iteraciones según parametrización, mantener este número fijo.

Lista Tabu

*3 según parametrización, mantenerlo fijo.

Fecha inicio programación

*Ingrese la fecha en la cual desea iniciar su programación.

Fuente: Construcción de las autoras

- Trabajos a programar: Asignación de trabajos según fecha de entrega, referencia y cantidad de unidades a producir (Ilustración 15).

Ilustración 15. Trabajos a programar en el aplicativo

PASO 2 INGRESE PARA CADA TRABAJO LA FECHA DE ENTREGA, LA DESCRIPCIÓN, EL CÓDIGO DE REFERENCIA Y EL TOTAL DE PRODUCCIÓN EN LA HOJA "TRABAJOS A PROGRAMAR"

Trabajo	Fecha de entrega	Descripción	Referencia	total producción
1	29/05/2019	Bracket Mazda 2	323329	626
2	30/05/2019	Bracket Aveo	323217	1001
3	31/05/2019	Bracket Aveo	323217	907
4	1/06/2019	Guia	323221	4646

→

TENGA EN CUENTA	
Las referencias disponibles son:	
Bracket Aveo	323217
Guia	323221
Bracket Mazda 2	323329
Bracket S3	323469
Guia	140110013Y

Fuente: Construcción de las autoras

- Mantenimiento: Asignación de mantenimientos por máquina según fecha y duración (Ilustración 16).

Ilustración 16. Programación del mantenimiento

PASO 3 POLÍTICA DE MANTENIMIENTO: PARA CADA MÁQUINA INGRESAR MES, DÍA Y HORA DE CADA MANTENIMIENTO PREVENTIVO Y SU DURACIÓN EN LA HOJA "MANTENIMIENTO"
Esta política ya se encuentra preestablecida y puede ser consultada en la hoja "Política de mantenimiento"

Máquina	Fecha	Duración
1	viernes, 7 de junio de 2019	1,5
1	viernes, 14 de junio de 2019	2
2	viernes, 7 de junio de 2019	1,5
2	viernes, 14 de junio de 2019	4,5

→

Máquina	Fecha	Duración
1	TROQUELADORA 160 TN (J1)	Corresponde a los mantenimientos que se deben realizar en el mes en el cuál se está programando la producción
2	PRENSA ALEMANA (N9)	Se debe ingresar en horas y depende del tipo de mantenimiento a realizar
3	CALENTADOR PROYECCIÓN ELÉCTRICO (P)	
4	PRENSA MILANO (M6)	
5	TAMBOREADORA SWECCO (K8)	

Fuente: Construcción de las autoras

- Resultados: Simulación de métodos de solución y consolidación descriptiva de los trabajos (Ilustración 17).

Ilustración 17. Hoja de resultados activando los métodos

PASO 4 EN LA HOJA RESULTADOS, PRESIONE EL BOTÓN DEL MÉTODO QUE DESEA EJECUTAR

Provemel Ltda. ASIGNACIÓN MAQUINARIA Código formato: QF-011

FECHA DE ELABORACIÓN: Enero del 2018
MAKE SPAN: 27.13333333

SPT LPT Tabu

ITEM	Trabajo	Operación	Máquina	Lote	P	T	P+T	Inicio	Fin	Fecha terminación	Fecha acordada	Tardanza
1	1	1	1	1	2,4889	1	3,4889	0	3,4889	1/09/2019	30/09/2019	0
2	1	2	2	1	6,8444	1	3,4889	3,489	11,333	1/09/2019	30/09/2019	0
3	1	3	4	1	7,4667	0,667	3,4889	11,33	19,467	2/09/2019	30/09/2019	0
4	1	4	3	1	4,8222	0,5	3,4889	19,47	24,789	2/09/2019	30/09/2019	0
5	1	5	5	1	2,1778	0,167	3,4889	24,79	27,133	2/09/2019	30/09/2019	0

Fuente: Construcción de las autoras

- Gantt: Representación gráfica de resultados simulados (Ilustración 18).

Ilustración 18. Diagrama de Gantt para ver programación final

PASO 5 EN LA HOJA GANTT PODRÁ VER LA PROGRAMACIÓN DE LAS OPERACIONES DE LOS TRABAJOS EN CADA MÁQUINA

periodo	0,25	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75	2	2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5	3,75	4	4,25	4,5	4,75	5	5,25	5,5	5,75	6
hora	06:15:00	06:30:00	06:45:00	07:00:00	07:15:00	07:30:00	07:45:00	08:00:00	08:15:00	08:30:00	08:45:00	09:00:00	09:15:00	09:30:00	09:45:00	10:00:00	10:15:00	10:30:00	10:45:00	11:00:00	11:15:00	11:30:00	11:45:00	12:00:00
hora	16:20:19	16:20:19	16:20:19	16:20:19	16:20:19	16:20:19	16:20:19	16:20:19	16:20:19	16:20:19	16:20:19	16:20:19	16:20:19	16:20:19	16:20:19	16:20:19	16:20:19	16:20:19	16:20:19	16:20:19	16:20:19	16:20:19	16:20:19	16:20:19
maquina 1	OP.10.1 OP.10.1																							
maquina 2	OP.6.2 OP.6.2																							
maquina 3																								
maquina 4																								
maquina 5	OP.10.2 OP.10.2																							

Fuente: Construcción de las autoras

Como se describió en las ilustraciones, la interfaz del aplicativo satisface los requerimientos establecidos pues cuenta con una interfaz amigable para ingresar los datos y visualizar fácilmente los resultados. El

aplicativo tiene en cuenta los parámetros, variables y restricciones definidas para cada uno de los métodos. El aplicativo puede ser observado y ejecutado en el [anexo 7](#).

Objetivo 4: Verificar mediante una prueba piloto el desempeño de la implementación del sistema de información en las referencias y máquinas seleccionadas.

Una vez finalizado el desarrollo del aplicativo se evalúa el desempeño de los 3 métodos propuestos y se realiza una comparación con el modelo en gusek para estimar los *gaps* entre las soluciones encontradas por el aplicativo y la solución óptima del problema. Para esto, se definieron 10 escenarios diferentes tomando como referencia los trabajos realizados por la empresa durante el año 2018. Asimismo, se realizó la parametrización de la *meta heurística TABÚ SEARCH* con el fin de encontrar los valores más eficientes para los parámetros lista *tabú* y máximo de iteraciones sin mejorar.

Además, se llevó a cabo una capacitación del uso y beneficios de la herramienta al personal del área de producción de la empresa PROVEMEL LTDA. Posterior a esto se procedió con la ejecución de la prueba piloto que tuvo una duración de 6 semanas en donde se recolectó información para medir los resultados en términos de disminución de productos no conformes y reprocesos. Estos datos serán analizados en la sección de resultados.

El desempeño de la propuesta de mejora con los métodos de solución fue evaluado en la empresa durante 4 semanas de mayo y 2 de junio de 2019 recopilando los datos de porcentajes de reprocesos por referencia. Se evidencia una mejora para las referencias con mayor demanda (323217 y 323221), ya que la empresa presentaba periodos con altos niveles de reprocesos, llegando a márgenes por encima del cincuenta por ciento. De esta manera al implementar la herramienta de programación de la producción incorporando una política de mantenimiento preventivo, la empresa logra reducir este margen significativamente, pasando de 46% y 64% de reprocesos en el mes de abril, a 29% y 20% en el mes mayo y finalmente llegar a 18% y 15% para las dos referencias fabricadas.

5. Resultados

• Interacción entre modelo matemático y aplicativo

Con el fin de conseguir una relación operativa entre el modelo matemático y el aplicativo se estableció la modificación de la lectura de datos, debido a que el aplicativo se encuentra en Excel y los parámetros de ejecución en hojas específicas. Se construye para cada parámetro un archivo en versión CSV, este tipo de formato permite que la información sea dividida por comas (columnas) y los saltos de línea (filas), de esta manera se forma una tabla que facilita la lectura en Gusek. Posteriormente, se dispone a realizar la lectura de la información (Ilustración 19). En este caso la lectura se generó para los parámetros, pero también podría realizarse para los conjuntos presentes en el modelo.

Ilustración 19. Lectura parámetros en CSV para gusek

```
param P(i in I, j in J, k in K: >0); #tiempo de procesamiento del trabajo i operacion j en la maquina k
param T(i in I, j in J, k in K); #set up time del trabajo i, operacion j en la maquina k
param L(i in I); #release time del trabajo i
param N(i in I); #numero de operaciones del trabajo i
param O(I, J); #id de la operación
param Q; #numero muy grande
param H(k in K, b in B); # hora inicio del lote b en la maquina k
param D(k in K, b in B); # Duracion del lote b en la maquina k

#leer parametros desde CSV
table TABLA IN "CSV" "P.csv": [I, J, K], P~P;
table TABLA IN "CSV" "T.csv": [I, J, K], T~T;
table TABLA IN "CSV" "L.csv": [I], L~L;
table TABLA IN "CSV" "O.csv": [I, J], O~O;
table TABLA IN "CSV" "N.csv": [I], N~N;
table TABLA IN "CSV" "H.csv": [K, B], H~H;
table TABLA IN "CSV" "D.csv": [K, B], D~D;
```

Fuente: Gusek

En este caso se facilitaría la lectura de cada uno de los escenarios propuestos. Una vez se realice la lectura los datos se ejecutan por el programa y generan la respuesta.

- **Política de mantenimiento**

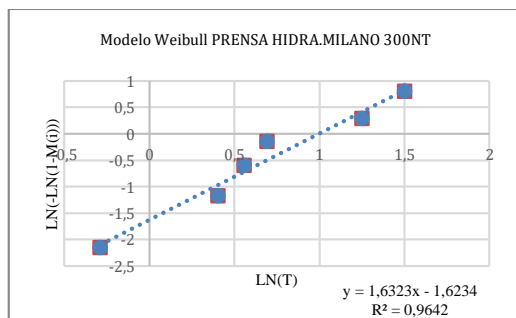
Una vez expuestos los objetivos y la metodología para desarrollarlos, se obtuvieron los resultados que serán descritos a lo largo de esta sección. Para complementar los parámetros mencionados en el objetivo 1, se definió una la política de mantenimiento utilizada en la programación como se muestra a continuación:

Para cada una de las máquinas se utilizó la información histórica de las fallas o averías y las recomendaciones de la empresa, estas fueron definidas como actividades para la creación de la política de mantenimiento preventivo. Una vez definidas las actividades específicas de cada máquina, se estableció como parámetro el tiempo medio para reparar y la frecuencia ideal entre cada reparación a través del cálculo de la mantenibilidad, la cual hace referencia a la probabilidad de reparar un equipo en un tiempo determinado después que ha sufrido una falla.

Según Gabriel M. (2003) la mantenibilidad puede ser estimada mediante la aproximación de los datos a modelos específicos, entre los más utilizados se encuentran: Exponencial, normal y Weibull. Por esto, para cada una de las maquinas se desarrollaron los diferentes modelos presentados con el fin de identificar cual se ajustaba mejor y seria definido como parámetro. Por ejemplo, la prensa Hidra Milano 300T tiene 6 fallas registradas a saber: 1) medición voltaje en breaker principal, 2) verificación de los relevos, 3) revisión de consumo del motor y presión de la bomba hidráulica, 4) verificar estado de las mangueras, 5) verificar nivel de aceite hidráulico y 6) verificación y ajustes generales. Estas fallas son las actividades que se tomaron para crear la política de mantenimiento.

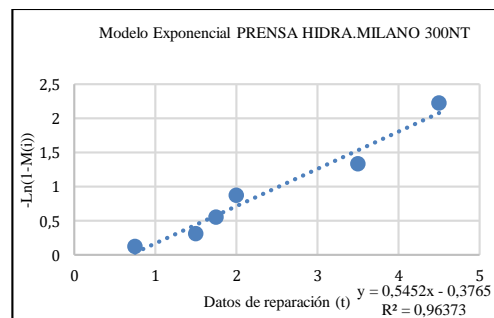
Realizando la comparación entre las distribuciones weibull, exponencial y normal fue posible determinar que el modelo que más se ajusta de acuerdo con el error cuadrático medio para la Prensa Hidra. Milano 300NT es la distribución Normal. De igual manera se realizó la comparación para las cinco maquinas lo cual permitió establecer que todas se encuentran en la Fase III de la *curva de la bañera* siguiendo una distribución normal (tabla 8), esto implica que se encuentran en etapa de envejecimiento y las fallas se presentan principalmente por desgaste. A continuación, se muestran a manera de ejemplo las gráficas de comparación en donde se evidencia que debido a R^2 sigue una distribución normal, esto puedo encontrarse en mayor detalle en el [anexo 5](#).

Gráfica 1. Modelo Weibull Prensa Hidramilano



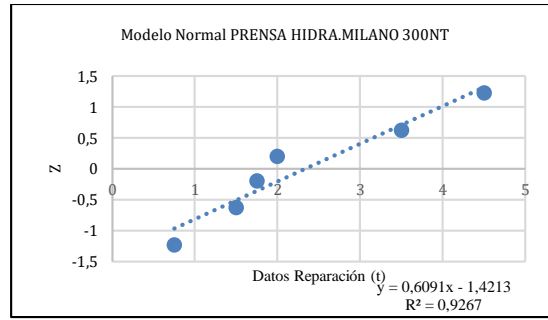
Fuente: Construcción de las autoras

Gráfica 2. Modelo exponencial Prensa Hidramilano



Fuente: Construcción de las autoras

Gráfica 3. Modelo normal Prensa Hidramilano



Fuente: Construcción de las autoras

Tabla 8. Recopilación datos mantenimiento

Equipos	Código	# Fallas	Tiempo TR	Fase Bañera	Distribución
Prensa hidra milano 300 nt	M6	6	14	Fase III	Normal
Troqueladora 160 tn giangsu	J1	8	20,75	Fase III	Normal
Calentador por proyección eléctricos	P4	5	13,5	Fase III	Normal
Tamboreadora sweco	K8	6	12,75	Fase III	Normal
Prensa hidráulica alemana	N9	6	14	Fase III	Normal

Fuente: Construcción de las autoras

A continuación, se describen los criterios tenidos en cuenta para definir la política de mantenimiento:

- 1) Dependiendo de la frecuencia en la cual deberían hacerse los mantenimientos, estos serán realizados de manera bimensual, trimestral o semestral.
- 2) El día seleccionado para realizar los mantenimientos fue el primer viernes de cada mes, en caso de presentarse conflicto se selecciona el siguiente viernes. Esto porque se requiere que la máquina se encuentre en las mejores condiciones para iniciar la producción de la semana siguiente.
- 3) La duración final establecida para el mantenimiento de cada falla depende del tiempo medio de reparación calculado.
- 4) Con el fin de aprovechar el tiempo de producción de las máquinas, se programaron las actividades para que terminaran simultáneamente con la jornada laboral.

La planeación se puede hacer explícita para el caso de la máquina Troqueladora (J1). Esta máquina contempla 8 actividades con un tiempo fijo de duración para el mantenimiento de cada una de ellas, **este fue definido previamente a través de los modelos y al tiempo medio para reparar**. Por ejemplo, la primera actividad (medición voltaje en tracker) tiene una duración de 0,75 horas (45 minutos) e inicia a las 9:00 pm. Esto garantiza que la actividad termine a las 9:45 pm hora en la que está por terminar el turno. Además, se encuentra programada en un periodo semestral, el cual para este caso es en abril 5 y octubre 4. (Tabla 9)

Tabla 9. Matriz de actividades de la política de mantenimiento

MATRIZ DE ACTIVIDADES POLÍTICA DE MANTENIMIENTO PREVENTIVA																		
MAQUINA	REFERENCIA	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICEMBRE	DURACIÓN (H)	HORA MANTENIMIENTO	ACTIVIDAD		
1	J1				5						4			0,75	9:00 p. m.	Medición voltaje en breaker 220v /a.c. verifique conexión línea tierra		
						3						1		1,5	8:00 p. m.	Verificación estado contactores limpieza con di electrónico, en el caso de estar con exceso de sulfatación reemplazarlo por nuevo. ajustar bornas si estas se encuentran sueltas, ajuste de microscopio si es necesario.		
				1			7				6			6	5	5:00 p. m.	Ajuste de tornillería en general para evitar fugas de aceite.	
					12							11			2,75	7:00 p. m.	Limpieza de motor y turbina, eliminación de varita para evitar ruidos.	
					8			5					8		2,25	7:00 p. m.	Verifique si las correas se encuentran alineadas con respecto del motor a la caja de velocidades y/o al husillo.	
						19		14				13			13	2	8:00 p. m.	Verificación y ajustes en sitios donde ocurre el ruido, evaluación estado de los rodamientos y otros.
							10							20	3	7:00 p. m.	Medición estado defletores, verificación estado óptimo de los ventiladores.	
														27	3,5	6:00 p. m.	Verificación estado contactores limpieza con di electrónico en el caso de estar con exceso de sulfatación reemplazarlo por nuevo. ajustar bornas si estas se encuentran sueltas, ajuste de microscopio si es necesario.	

Fuente: Construcción de las autoras

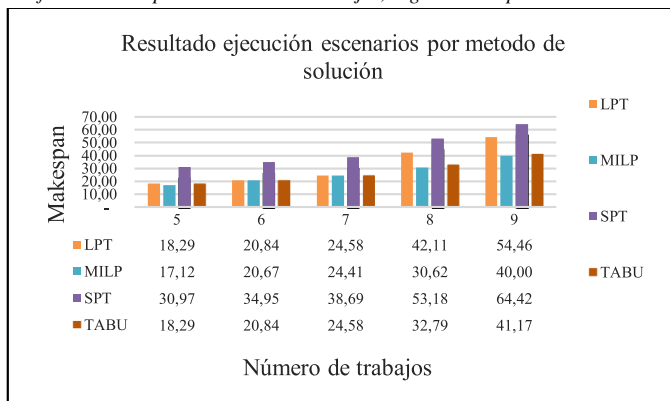
La matriz completa con las actividades, fechas por meses y hora de reparación por falla de cada máquina se encuentra en el [anexo 8](#).

- **Evaluación de los métodos de solución contra el modelo matemático**

En seguida para el objetivo 2 y 3, se presenta la comparación del modelo matemático con los resultados de las *heurísticas* y la *meta heurística*. El modelo de programación lineal entera mixta permite encontrar la solución óptima solo en instancias menores a 10 trabajos. Por su parte, las reglas de despacho estáticas, *SPT* y *LPT* (*heurísticas*) permiten encontrar una solución factible en menos de 10 minutos. Sin embargo, la calidad de la respuesta disminuye a medida que el número de trabajos aumenta. Finalmente, el algoritmo *Tabú search*, (*meta heurística*) aunque puede llegar a tardar lo mismo encuentra una solución de mejor calidad.

De acuerdo con la gráfica 4, donde se realiza la simulación de las soluciones con información de 5 a 9 trabajos para los métodos, se evidencia que el mayor *makespan* se encuentra con las reglas de despacho y que el algoritmo *tabú search* encuentra una mejor solución sin importar el aumento de la cantidad de trabajos. Cabe resaltar que el modelo matemático también muestra una respuesta cercana a la obtenida por la *meta heurística Tabú*, pero a medida que aumenta el número de trabajos no responde a la capacidad necesaria para dar solución al problema.

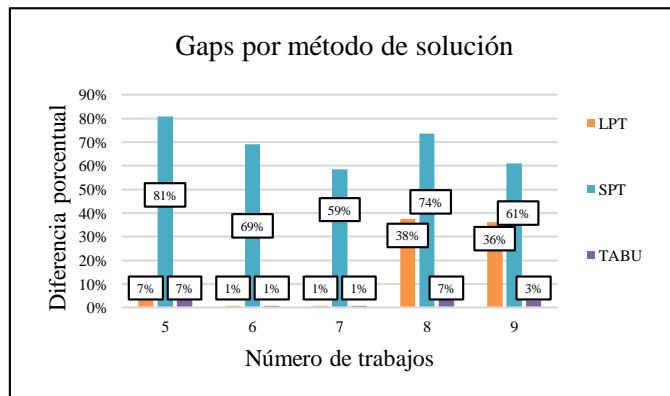
Gráfica 4. *Makespan vs número de trabajos, segmentados por método de solución.*



Fuente: Construcción de las autoras

Para calcular la diferencia porcentual existente entre la solución óptima y los métodos aplicados, se tienen en cuenta los escenarios planteados anteriormente comparando las soluciones (Gráfica 5). La regla *LPT* baja la calidad de solución a medida que el número de trabajos aumenta y la regla *SPT* genera soluciones con *gaps* que superan el 80% de variación comparado con la solución óptima mientras que el algoritmo *tabú*, garantiza soluciones eficientes con un *gap* inferior al 10%. ([ver anexo 9](#))

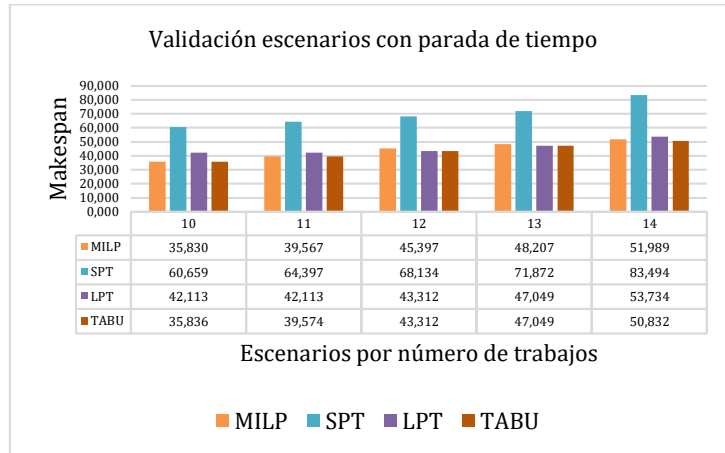
Gráfica 5. *GAP vs número de trabajos, segmentado por método de solución.*



Fuente: Construcción de las autoras

Con el fin de validar los resultados de selección, se ejecutaron durante 2 horas 5 escenarios diferentes en gusek y en el aplicativo. Esta vez contaban con una mayor cantidad de trabajos para validar la minimización del *makespan*. Con los resultados se realizó una gráfica (Gráfica 6) en donde podemos notar que el gusek puede llegar a una solución adecuada, sin embargo, el tiempo en el que realiza las operaciones generaría tardanzas en la programación de la empresa en comparación con otros métodos, que encuentran una buena solución como el tabú en un tiempo menor.

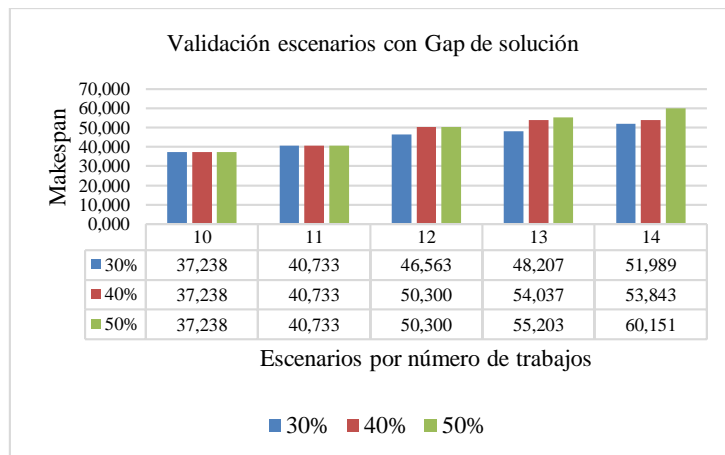
Gráfica 6. Validación de escenarios con parada de tiempo



Fuente: Construcción de las autoras

Adicional a esto, el proceso de correr los datos en gusek podría tardar más de dos horas, es decir que no es posible establecer la duración exacta en la que el programa podría generar una solución, ni garantizar un cambio significativo en la función objetivo a medida que se aumentan los trabajos. Se realizó una prueba con otro parámetro de control de Gusek brindando la mejor solución obtenida a partir de tolerancias de un *gap* de 30%, 40% y 50% en los 4 escenarios, teniendo en cuenta la misma cantidad de trabajos utilizados en la prueba anterior. Con estos resultados podemos notar que el tiempo de ejecución se reduce y que la respuesta no es muy diferente respecto a la obtenida previamente (Gráfica 7). Se evidenció que en una prueba con un *gap* inferior al 20% el resultado tarda mucho tiempo y la memoria a disposición no fue suficiente en el gusek, además generar una respuesta óptima supera las 10 horas. Estos resultados no satisfacen las necesidades de minimización de tiempos en la programación requeridos por la empresa por la demora en su ejecución.

Gráfica 7. Validación de escenarios con GAP de solución



Fuente: Construcción de las autoras

- **Programación de la producción**

Con el fin de evaluar la calidad de solución de los métodos propuestos se desarrolla una prueba piloto para verificar el desempeño de la implementación como se propone en el objetivo 4. Para tal fin se generaron 10 escenarios tomando los datos de demanda entre los meses de marzo a diciembre del año 2018 para sugerir cuál es el mejor método de programación. De igual manera, se parametrizó el algoritmo *tabú* y se realizó la medición de impacto para los reprocesos en la empresa.

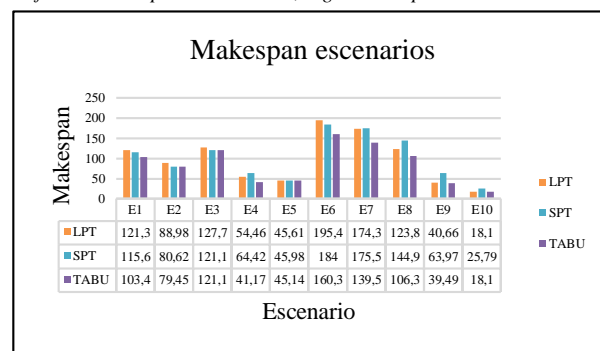
A continuación, se muestra la cantidad de trabajos a ser programados en cada escenario (Tabla 10) y el *makespan* obtenido por los tres métodos de solución. (Gráfica 8)

Tabla 10. Número de trabajos por escenario

ESCENARIO	N° TRABAJOS
1	7
2	6
3	7
4	10
5	3
6	14
7	15
8	9
9	8
10	3

Fuente: Construcción de las autoras

Gráfica 8. Makespan vs escenario, segmentado por método de solución.



Fuente: Construcción de las autoras

Se evidencia que el *tabú* es el método con mejor calidad de solución a lo largo de los 10 escenarios. Para las reglas *SPT* y *LPT* no es posible identificar cuál es la mejor solución ya que *SPT* muestra un mejor resultado en los escenarios E1, E2, E3 y E6 y *LPT* en los demás. En los escenarios con menos de 10 trabajos a programar, la diferencia entre los métodos es reducida, mientras que, en aquellos con mayor cantidad de trabajos el método *tabú* search presenta una mejor solución. (ver anexo 9)

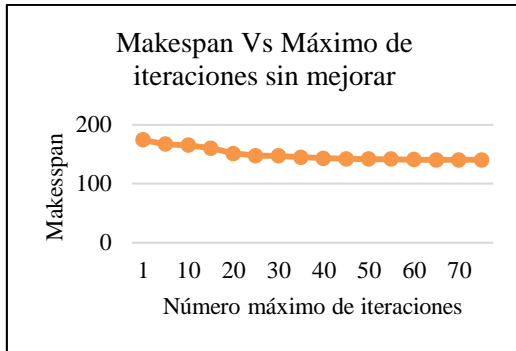
- **Parametrización del algoritmo *Tabú* search**

Con el objetivo de mejorar el desempeño de la *meta heurística Tabú* search, se realiza una parametrización, de tal manera que los valores definidos para el máximo de iteraciones sin mejorar y longitud de lista *tabú* sean los adecuados para obtener la mayor calidad de solución en el menor tiempo posible.

Con un valor de 50 iteraciones sin mejorar, el algoritmo logra encontrar soluciones de alta calidad (Gráfica 9). Esto quiere decir que si se aumenta este valor la calidad de la solución no mejora. Por otro lado, se evidencia que con un tamaño de lista *tabú* de 5 iteraciones es suficiente para que el algoritmo alcance su mayor desempeño, y para valores superiores la calidad de la solución se mantiene constante (Gráfica 10).

Máximo de iteraciones

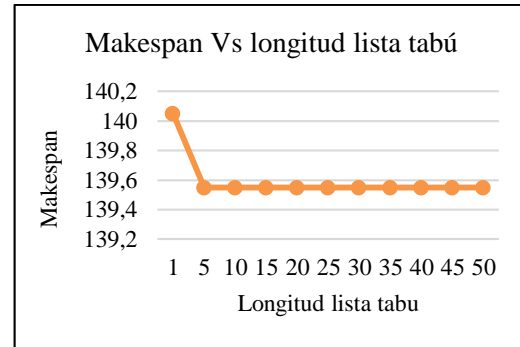
Gráfica 9. Makespan vs máximo de iteraciones sin mejorar.



Fuente: Construcción de las autoras

Longitud de la lista tabú

Gráfica 10. Makespan vs longitud de lista Tabú.

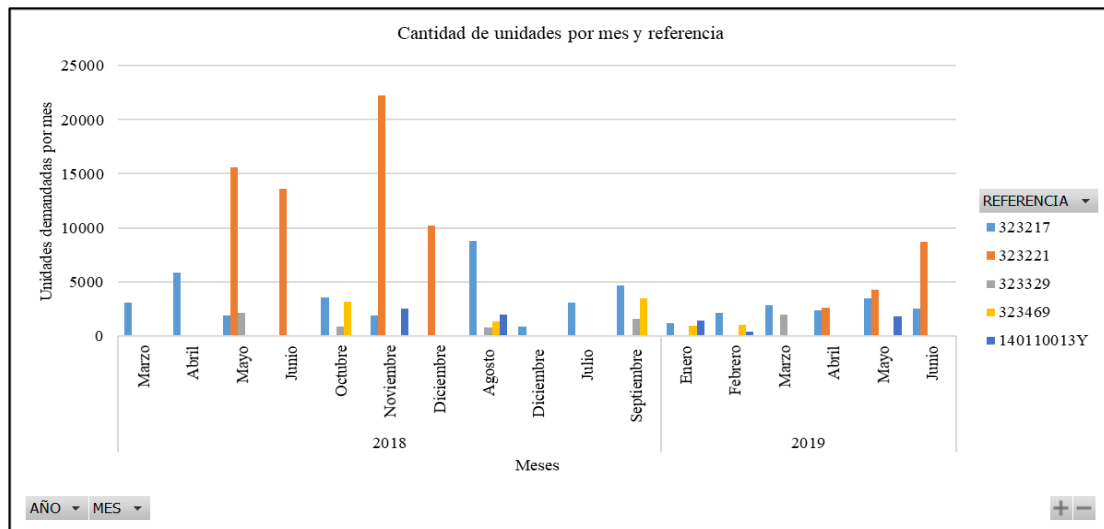


Fuente: Construcción de las autoras

Con los resultados obtenidos para el número de iteraciones y la lista *tabú*, se define la parametrización que permite generar la solución en el aplicativo diseñado con un máximo de 50 iteraciones y una longitud de lista *Tabú* de 5.

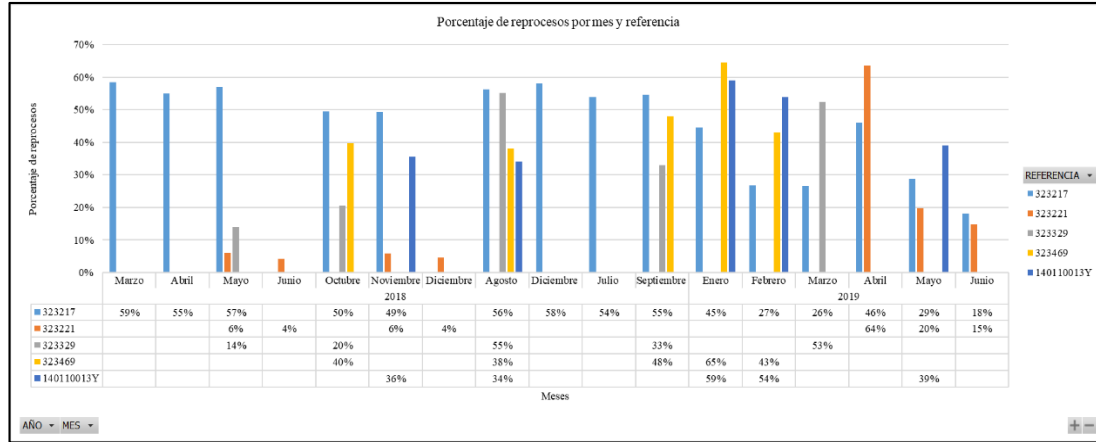
- **Medición del impacto del modelo propuesto sobre el porcentaje de reprocesos**

Gráfica 11. Cantidad de unidades demandadas por mes segmentado por referencia



Fuente: Construcción de las autoras

Gráfica 12. Porcentaje de reprocesos por mes



Fuente: Construcción de las autoras

El desempeño de la propuesta de mejora con los métodos de solución fue evaluado en la empresa durante 4 semanas de mayo y 2 de junio de 2019 recopilando los datos de porcentajes de reprocesos por referencia. Se evidencia una mejora para las referencias con mayor demanda (323217 y 323221), ya que la empresa presentaba periodos con altos niveles de reprocesos, llegando a márgenes por encima del cincuenta por ciento (Gráfica 11). De esta manera al implementar la herramienta de programación de la producción incorporando una política de mantenimiento preventivo, la empresa logra reducir este margen significativamente, pasando de 46% y 64% de reprocesos en el mes de abril, a 29% y 20% en el mes mayo y finalmente llegar a 18% y 15% para las dos referencias fabricadas (Gráfica 12). ([ver anexo 10](#))

6. Conclusiones y recomendaciones.

La problemática encontrada en la compañía PROVEMEL LTDA, relacionada con la cantidad de productos no conformes y la carencia de un programa de mantenimiento preventivo, a pesar de su certificación en la NTC ISO 9001:2015 motivó que en este proyecto se propusiera el diseño de un sistema de información que permitiera la programación de la producción en un entorno *Job Shop* integrando una política de mantenimiento preventivo.

Establecidos los requerimientos de programación y mantenimiento de la maquinaria seleccionada se procedió al diseño y desarrollo de un modelo decisional que tuviera como parámetro la política de mantenimiento preventivo, por lo tanto, se realizó para un horizonte de planeación de 10 meses indicando las actividades, tiempo requerido y periodicidad de cada una de ellas. Posteriormente, se desarrolló un modelo de programación lineal entera mixta que permite encontrar en menos de 2 horas soluciones óptimas para un número de trabajos inferior a 10. Sin embargo, para una solución de más de 10 trabajos el método exacto no garantiza optimalidad, y por ello se programaron dos reglas de despacho estáticas y una *meta heurística*. Esta última demuestra ser más eficiente generando soluciones cercanas al óptimo global, con un *gap* inferior al 10% en 5 instancias pequeñas. Por otro lado, las reglas de despacho no garantizan soluciones de calidad al presentar *gaps* que alcanzan hasta el 80%.

Además, las pruebas de desempeño permiten ajustar los parámetros del algoritmo *tabú* dando como resultado un valor de 50 iteraciones sin mejorar y una longitud de lista *tabú* de 5 iteraciones que garantizan soluciones de calidad.

Una vez identificados estos parámetros, se implementó como prueba piloto en la empresa el aplicativo por un periodo de 6 semanas para las dos referencias fabricadas con el objetivo de medir el impacto, logrando

reducir el porcentaje de reprocesos pasando de 29% y 20% en el mes mayo y finalmente llegar a 18% y 15% en junio.

El aplicativo desarrollado junto con la política de mantenimiento permiten establecer controles en la ejecución de la producción cumpliendo el numeral 8.5.1.b que corresponde a “La disponibilidad y el uso de los recursos de seguimiento y medición adecuados”, mediante una asignación que mejora el ambiente para los procesos y permite aumentar la disponibilidad de los recursos para un debido seguimiento y medición. Asimismo, es necesario evaluar el *makespan* para minimizar el tiempo ocioso de la maquinaria y de los trabajadores. Adicionalmente, el aplicativo permite identificar el tiempo de tardanza, la utilización de las máquinas y los mantenimientos que se deben realizar. Esto facilita el seguimiento de la producción a través del registro y control de los tiempos de entrega, contribuyendo al mejoramiento de la documentación histórica para futuros procesos de mejora cumpliendo el numeral 8.5.1.c. (La implementación de actividades de seguimiento y medición en las etapas apropiadas para verificar que se cumplen los criterios para el control de los procesos o sus salidas, y los criterios de aceptación para los productos y servicios).

Se recomienda que el aplicativo sea extendido a una mayor cantidad de referencias y de máquinas con el fin de mejorar la toma de decisiones e incrementar el impacto en la compañía, en materia de reducción de productos no conformes en otras referencias y disminución de reprocesos incrementando la confianza y satisfacción del cliente. Los resultados obtenidos demuestran que sería recomendable que el modelo pudiera probarse analizando los resultados por un periodo más largo y con un volumen de producción similar a 2018 para facilitar los criterios de análisis y comparación. Con la política de mantenimiento preventivo es posible programar y registrar para cada máquina nuevas fallas que presenten a lo largo del tiempo y convertirlas en información histórica.

De esta manera se ofrece un sistema de información y control que permite la programación y mantenimiento de la maquinaria de producción de la compañía PROVEMEL LTDA, para la reducción de productos no conformes, encontrándose como herramientas para continuar en el mejoramiento de la calidad y de los procesos abordar el enfoque estocástico, donde se incorporan variables aleatorias en el modelo decisional, como tiempos entre fallas para cada máquina, tiempos de reparación, y tiempos de alistamiento estocásticos, y por medio de modelos sim-heurísticos incorporar la política de mantenimientos como variable de decisión en el modelo de optimización.

7. Glosario

- ✓ **CURVA DE LA BAÑERA:** Gráfica que representa los fallos durante la vida útil de una máquina. Se divide en 3 etapas: fallos iniciales (fallas presentadas generalmente por equipos defectuosos, instalaciones incorrectas, errores de diseño, etc.), fallos normales (se dan por accidentes, mala operación o condiciones inadecuadas de uso) y fallos de desgaste (se producen por desgaste natural del equipo). (Blandón, Rodríguez, & Sequeira, 2018)
- ✓ **DIAGRAMA GANTT:** Herramienta que permite planificar y programar tareas a lo largo de un periodo determinado, facilita realizar seguimiento y control de los procesos debido a que muestra gráficamente las tareas, su duración y secuencia. (Gracia, 2018)
- ✓ **GAP:** Se refiere a la diferencia entre el óptimo obtenido de la programación lineal de referencia y el valor de la función objetivo encontrada con el método que este siendo utilizado para el caso de estudio. (Castro, 2010)
- ✓ **HEURÍSTICA:** Trata de procedimientos para encontrar “buenas soluciones” que pueden no ser las óptimas. En este método la rapidez del proceso y la calidad son de igual importancia y es generalmente utilizada cuando no se conoce ningún método exacto para la resolución del problema. (Suárez, 2011)

- ✓ **JOB SHOP:** Sistema de producción que depende principalmente de la demanda real de los productos. Las empresas que trabajan bajo este sistema fabrican productos sujetos a la necesidad de los clientes. (Alomía & Lozano, 2013)
- ✓ **LPT:** Regla de secuenciación de tareas que requiere ordenar los trabajos en orden ascendente de tiempo de procesamiento y posteriormente asignar el trabajo que se encuentra en cola de ejecución a la máquina cuya carga es más pequeña. (Croce & Scatamacchia, 2018)
- ✓ **MAKESPAN:** Tiempo máximo de terminación, es decir, el tiempo total entre el comienzo y la finalización de la programación realizada. (Gómez & Orduz, 2015)
- ✓ **META-HEURÍSTICA:** Estrategia que implica la unión de algoritmos que pueden ser aplicados a diversos problemas de optimización. (Suárez, 2011)
- ✓ **MILP:** Corresponde “Mixed integer Linear Problems” programación lineal entera mixta. Hace referencia a modelos de programación en los cuales algunas de las variables o todas son continuas o enteras, y por tanto es posible separarlas en la función objetivo y en las restricciones. En muchas de las aplicaciones de estos modelos las variables enteras son binarias (toman solo valores 0 o 1). (Cornejo & Mejía, 2005)
- ✓ **PHVA:** También conocido como el ciclo de Deming. Es una metodología que consiste en una secuencia lógica de pasos repetitivos para la mejora continua y el aprendizaje. Los cuatro pasos se definen como: Planear, Hacer, Verificar y Actuar. Con la ayuda de esta metodología se reducen los problemas de rechazo mejorando la calidad del producto o proceso y la productividad. (Patel & Deshpande, 2017)
- ✓ **SPT:** Regla de secuenciación de tareas donde se tiene una fila de tareas que van llegando al sistema, pero aún no se han ejecutado. Las tareas en espera de ejecución se organizan por orden creciente de tiempo de operación. Adicionalmente, garantiza que la(s) máquina(s) nunca queden inactivas dado que siempre que exista una tarea en cola será ejecutada inmediatamente después que termina la tarea anterior. (Montoya, Rodríguez, & Merchán, 2006)
- ✓ **TABÚ:** *Meta-heurística* considerada una técnica global de iteración que restringe la búsqueda e intenta encontrar soluciones óptimas almacenando el historial. Guía el proceso de búsqueda basada en información disponible que puede tener dos o más respuestas. (Branco, Coelho, & Mayerle, 2016)

8. Tabla de Anexos o Apéndices

Nº Anexo	Nombre	Desarrollo	Tipo de archivo	Enlace corto	Relevancia para el documento
1	Mapa general de procesos PROVEMEL LTDA	Propio	PDF	https://bit.ly/301jE1X	4
2	Diagrama de procesos PROVEMEL LTDA	Propio	PDF	https://n9.cl/bmno	3
3	Diagramas de flujo para referencias seleccionadas	Propio	PDF	https://bit.ly/2YoH2pP	3
4	Matriz de análisis de operación	Propio	Excel	https://n9.cl/5is6	5
5	Análisis política de mantenimiento preventiva	Propio	Excel	https://n9.cl/t7xy	5
6	Modelo de programación lineal	Propio	Gusek (.mod)	https://n9.cl/gi6i	4
7	Aplicativo para programación de producción PROVEMEL LTDA	Propio	Excel	https://n9.cl/huud	5

8	Matriz de actividades política de mantenimiento preventiva	Propio	PDF	https://n9.cl/4aic	5
9	Resultado ejecución escenarios por método de solución	Propio	Excel	https://bit.ly/2Jnt9BU	5
10	Resultados disminución de reprocesos	Propio	Excel	https://bit.ly/2LBGusY	5

9. Referencias

- Agudelo, W. (2016). *Modelo para la integración de información de manufactura*. Universida Nacional de Colombia, Manizales. Retrieved from <https://drive.google.com/file/d/1iKcphVMKODiGOHEqKI0sqU9MhZ13XG9Z/view?usp=sharing>
- Alomía, C. A., & Lozano, S. (2013). *Programación de la producción en ambientes Job Shop - Bajo pedido, basado en el enfoque de proyectos con restricciones de recursos*. Universidad del valle.
- ANDI. (2018). Comité colombiano de productores de acero. Retrieved September 25, 2018, from <http://www.andi.com.co/Home/Camara/6-comite-colombiano-de-productores-de-acero>
- Blandón, A. W., Rodríguez, E. F., & Sequeira, R. A. (2018). *Diseño de manual de mantenimiento preventivo asistido por computadora para maquinaria CTP, Roland y Guillotina en impresiones Isanaya Estelí*. Universidad Nacional autónoma de Nicaragua.
- Branco, R. M., Coelho, A. S., & Mayerle, S. F. (2016). Hybrid genetic algorithms : solutions in realistic dynamic and setup dependent job-shop scheduling problems, 4, 75–85. <https://doi.org/10.4995/ijpme.2016.5780>
- Castro, F. I. (2010). *Desarrollo de un método de solución de un problema de programación entera mixta para la planificación de largo plazo en minería a cielo abierto*. Universidad de Chile.
- Cevallos, P. E. (2017). *Análisis y reducción de reprocesos y desperdicios en la línea de producción de la empresa Fruconsa*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito. Retrieved from <https://drive.google.com/file/d/1prDAzCFhVRQx7ix297YuMDgLxjrQSR9wm/view?usp=sharing>
- Cornejo, C., & Mejía, M. (2005). *Modelo de programación lineal entera mixta para el planteamiento de las importaciones en régimen aduanero definitivo*. *Industrial data, Revista de investigación*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Croce, F. Della, & Scatamacchia, R. (2018). *Longest Processing Time rule for identical parallel machines revisited*. Politecnico di Torino.
- Cuatrecasas, L. (2010). *Gestión integral de la calidad: Implantación, control y certificación - Lluís Cuatrecasas Arbós - Google Libros*. (Profit Editorial, Ed.) (1st ed.). Barcelona. Retrieved from https://books.google.com.mx/books?id=uoaaxj6zxZsC&dq=calidad++concepto&hl=es&source=gbs_navlinks_s
- DANE. (2018). Cuentas nacionales trimestrales. Retrieved September 25, 2018, from <http://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/cuentas-nacionales/cuentas-nacionales-trimestrales>
- Díaz-Cazañas, R., & De La Paz- Martínez, E. M. (2016). *Procedimiento para la planeación integrada producción - mantenimiento a nivel táctico*. Instituto Superior Politécnico Jose Antonio Echeverría (Cujae), Valencia. Retrieved from http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59362016000100005
- Diestra, H. M. (2017). *Incremento de la operatividad de las máquinas de la empresa Metal work industrias SAC mediante un plan de gestión de mantenimiento preventivo*. Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo. Retrieved from <https://drive.google.com/file/d/1tavq36UGkVfpqdSwpd5xzOuqjG7kcvDQ/view?usp=sharing>
- Diestra, J., Esquiviel, L., & Guevara, R. (2017). *Programa de mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM), para optimizar la disponibilidad operacional de la máquina con mayor criticidad*. Ciudad de México. Retrieved from <https://drive.google.com/file/d/10iWu67JHqA4BiNJCbuWAdSDozHbVYnoF/view?usp=sharing>
- G&J empresas de acero. (2018). G&J Empresas de Acero. Retrieved September 25, 2018, from <https://gyjferreterias.com/>
- García Garrido, S. (2003). *Organización y gestión integral de mantenimiento*. Madrid.
- Gómez, J. D., & Orduz, E. A. (2015). *Minimización del makespan en el problema de job shop flexible con restricciones del transporte utilizando algoritmo genético*. Escuela de estudios industriales y empresariales.
- Gracia, S. J. (2018). *Uso de las metodologías pert y gantt para el control de la construcción de vías peatonales*. Universidad de Guayaquil.
- ICONTEC. (2015). Norma Técnica Colombiana NTC 9001:2015 Sistemas de gestión de la calidad, (571), 1–47. Retrieved from http://www.minvivienda.gov.co/Documents/Sobre el Ministerio/Sistemas-de-Gestion/NTC_ISO_9001_2015.pdf
- Marte, J. M. (2017). *Programación de la Producción en Máquinas Paralelas sujeto a Adelantos, Retrasos y Fechas Límite*. Universitat Politècnica de valencia. Retrieved from <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/89995/MARTE - Programación de la producción de la producción en máquinas paralelas sujeto a adelantos%2C retrasos y fechas....pdf?sequence=1>
- Meng, L., Zhang, C., Shao, X., & Ren, Y. (2019). MILP models for energy-aware flexible job shop scheduling problem.

- Journal of Cleaner Production*, 210, 710–723. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.021>
- Montoya, J. R., Rodríguez, G., & Merchán, L. (2006). Estudio de algoritmos dinámicos para el problema de secuenciación de trabajo en una máquina simple, *10*(2), 155–178.
- Navarro Elola, L., Pastor Tejedor, A. C., Lacabrera, M., & Jaime Miguel. (2016). Gestión integral de mantenimiento, 112.
- Patel, P. M., & Deshpande, V. A. (2017). Application Of Plan-Do-Check-Act Cycle For Quality And Productivity Improvement - A Review, *5*(I), 369–378.
- Procolombia. (2016). La industria metalmecánica en Colombia | Colombiatrade - Compradores. Retrieved September 25, 2018, from <http://www.procolombia.co/compradores/es/explore-oportunidades/industria-metalmec-nica>
- PROPYMES. (2014). Programa de Gestión del mantenimiento (PGM) El feterioro de los Equipos. MBR, MBT, MBC, *II*, 29.
- Quispe, S. C. (2017). *Propuesta de implementación de un sistema de gestión de calidad basado en la norma ISO 9001:2015 para la reducción de costos en la línea de producción de plataformas de la empresa Consermet S.A.C.* Universidad Privada del Norte, Trujillo. Retrieved from <https://drive.google.com/file/d/1IMp-6cT76nqCSELT0Ww2xB8hiLLUtmpO/view?usp=sharing>
- Rodríguez, A. (2017). *Proyecto de investigación ¿Es la informalidad la raíz del deterioro de la industria metalmecánica en Bogotá?* Bogotá. Retrieved from https://bibliotecadigital.ccb.org.co/bitstream/handle/11520/20158/TNI_R696i.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Shen, L., Dauzère-pérès, S., & Neufeld, J. S. (2018). Solving the flexible job shop scheduling problem with sequence-dependent setup times, *265*, 503–516. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.08.021>
- Simón, E. L. (2017). Implementación de un plan de mantenimiento para mejorar la productividad en la empresa metalmecanica Emeca S.A.C, Comas - Diciembre 2017. Lima. Retrieved from <https://drive.google.com/file/d/1pyivJfNjsC77rCgF6n-bJ108sRLtAVFo/view?usp=sharing>
- Suárez, O. D. A. (2011). Una aproximación a la heurística y metaheurísticas, 44–51.
- Sunción, P. J. (2017). Aplicación del Mantenimiento Productivo Total para incrementar la productividad en la línea de producción en la empresa MGO SAC 2017. Lima. Retrieved from <https://drive.google.com/file/d/1-ZvHwytnW0YQFBqNsQFC16JU8UZHNViH/view?usp=sharing>
- Tipian, E. E. (2017). *Mejoramiento de proceso productivo para reducir el índice de reprocesos utilizando las 7 herramientas de la calidad en la empresa metalúrgica Vulvano SAC, Hiachipa 2017.* Universidad Privada del Norte, Lima. Retrieved from https://drive.google.com/file/d/1tVIZhdVR1UKCdNQ-vJrCweloYYPuB_Kh/view?usp=sharing