

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FIMI
Facultad de
Ingeniería Mecánica
e Industrial

Departamento de Ingeniería Industrial

TRABAJO DE DIPLOMA

Título: Contribución al mejoramiento del nivel de integración programación de la producción - programación del mantenimiento en la UEB Centroplast.

Autor: Dariel Jesús Inerarity Rodríguez

Tutor: M. Sc Ronald Díaz Cazañas

Santa Clara, junio del 2018
Copyright©UCLV

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

Atribución- No Comercial- Compartir Igual



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.

Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419

Pensamiento



Si algún día sientes que no puedes, que tus objetivos son inalcanzables, mira hacia el pasado y descubre que en toda la existencia humana siempre ha habido valientes que han logrado sus metas solamente con su actitud y deseo.

El autor

Dedicatoria

A todas aquellas personas que han formado parte de mi vida, gracias a todos por poner una parte de si en esta historia, en especial a mi mamá y mi abuela que son mi principal fuente de inspiración.

Daniel

Agradecimiento



- ❖ *A mi mamá y mi abuela por estar siempre presente en este proceso tan largo y complejo.*
- ❖ *A mi papá por su ejemplo y sabios consejos.*
- ❖ *A mi abuelo que, a pesar de no estar ya con nosotros, siempre lo llevo bien presente y estoy seguro que debe estar muy orgulloso de mi.*
- ❖ *A mi novia por brindarme tanto amor y apoyo en este momento tan especial.*

- ❖ *A mi tutor Ronald Díaz Cazañas por guiarme sabiamente durante la realización de este trabajo.*
- ❖ *A toda mi familia por todo el apoyo brindado y por ser tan unida.*
- ❖ *A mis amigos por haber hecho de esta experiencia un momento inolvidable.*
- ❖ *A los trabajadores de la UEB Centroplast por su cálida gentileza e incondicional colaboración, especialmente a Bárbara Jiménez Ramos, Eloirel Ajón Pérez y Rogelio Zamora Hernández.*
- ❖ *A todas las personas que de una forma u otra colaboraron para ver este sueño hecho realidad*

A todos...

Muchas gracias.

Resumen

La presente investigación muestra la aplicación de un conjunto de procedimientos dirigidos a la evaluación de la criticidad del desarrollo de un estudio de análisis y mejoramiento del nivel de integración producción - mantenimiento en la UEB Centroplast perteneciente a la “Industria Nacional Productora de Utensilios Domésticos (INPUD) 1ro de Mayo”, la determinación del nivel de integración específicamente entre los subprocesos programación de la producción - programación del mantenimiento. Durante el diagnóstico se hace uso del Modelado Lingüístico Difuso Ordinal, herramienta que ha sido desarrollada para dar tratamiento a la vaguedad con que se presenta la información cualitativa aportada por los expertos. Los principales resultados obtenidos evidencian que la necesidad

de integración Gestión de la producción (GP) - Gestión del mantenimiento (GM) en la entidad es muy alta, mientras que el desempeño del sistema Producción - Mantenimiento es evaluado de medio, por lo que la criticidad (importancia) del desarrollo del estudio calificó de alto. El nivel de integración entre los subprocesos de programación de la producción - programación del mantenimiento es evaluado de bajo. Como solución fundamental y con el objetivo de elevar el nivel de integración y, en consecuencia, la efectividad del sistema se realiza el diseño de un algoritmo para la programación integrada de producción y mantenimiento preventivo el cual tiene como objetivo principal minimizar el tiempo de culminación de los productos (*makespan*).

Abstract

The present investigation shows the application of a set of procedures directed to the evaluation of the criticality of the development of a study of analysis and improvement of the level of integration production - maintenance in the UEB Centroplast pertaining to the "National Production Industry of Domestic Utensils (INPUD) May 1st ", the determination of the level of integration specifically between the subprocesses production programming - maintenance programming. During the diagnosis, the Ordinal Diffuse Linguistic Modeling is used, a tool that has been developed to give treatment to the vagueness with which the qualitative information provided by the experts is presented. The main results obtained show that the need for integration Production management (GP) - Maintenance management (GM) in the

entity is very high, while the performance of the Production - Maintenance system is evaluated in medium, so the criticality (importance) of the development of the study qualified as high. The level of integration between the subprocesses of production programming - maintenance programming is evaluated low. As a fundamental solution and with the objective of raising the level of integration and, consequently, the effectiveness of the system, the design of an algorithm for the integrated programming of production and preventive maintenance is carried out, which has as main objective to minimize the time of completion of the products (*makespan*).

Índice

Introducción	12
Capítulo I: Marco Teórico Referencial	14
1.1. Introducción	14
1.2. El subsistema de producción	14
1.2.1. Gestión de la producción (GP).....	14
1.2.2. Evolución y objetivos de la gestión de la producción / operaciones.	15
1.2.3. Sistemas de producción y sistemas de gestión de la producción	16
1.2.4. El procesos de toma de desiciones en producción / operaciones	17

1.2.5. Tendencias actuales en la gestión de la producción / operaciones	18
1.3. El subsistema de Mantenimiento	20
1.3.1. Gestión del Mantenimiento(GM)	20
1.3.2. Evolución y objetivos de la Gestión del Mantenimiento.....	20
1.3.3. Tipos de mantenimiento	22
1.3.4. Proceso de toma de decisiones en mantenimiento	23
1.3.5. Tendencias actuales de la gestión del mantenimiento	23
1.4. Integración gestión de la producción - gestión del mantenimiento.	24
1.4.1. Modelos desarrollados para lograr una gestión integrada producción - mantenimiento.....	28
1.5. Métodos Heurísticos.....	30
1.5.1. Clasificación de los Métodos Heurísticos	31
1.5.2. Las técnicas metaheurísticas	32
1.5.3. Posibilidades de inclusión de los métodos heurísticos para la gestión integrada producción - mantenimiento.....	34
1.6. Gestión de la producción y gestión del mantenimiento en empresas manufactureras cubanas.....	40
1.6.1. La Gestión de la producción en empresas manufactureras cubanas.....	40
1.6.2. La Gestión del mantenimiento en empresas manufactureras cubanas.....	41
1.6.3. Consideraciones generales y propuestas metodológicas desarrolladas para la evaluación y mejoramiento del nivel de integración GP - GM en empresas manufactureras cubanas.	43
1.7. Conclusiones parciales.....	44
Capítulo II: Evaluación de la criticidad del desarrollo de un estudio para el diagnóstico y mejoramiento del nivel de integración producción - mantenimiento en la UEB Centroplast.	45
2.1. Etapa 1. Planificación del estudio.....	45
2.2. Etapa 2. Caracterización del sistema Producción - Mantenimiento	48
2.3. Etapa 3. Evaluación de la necesidad de integración GP - GM	52
2.3.1. Procedimiento específico para la evaluación, ponderación y agregación de indicadores dentro del proyecto de diagnóstico y mejoramiento del nivel de integración GP - GM	53
2.4. Etapa 4. Evaluación del desempeño del sistema resultado del nivel de integración GP - GM	69
2.5. Etapa 5. Evaluación de la criticidad del proyecto para el diagnóstico y mejoramiento del nivel de integración GP - GM	75
2.6. Conclusiones parciales.....	75
Capítulo III: Diagnóstico del nivel de integración entre la programación de la producción y la programación del mantenimiento en la UEB Centroplast. Diseño de una propuesta de mejora.	76
3.1. Diagnóstico del nivel de integración entre la programación de la producción y la programación del mantenimiento en la UEB Centroplast.....	76

3.2. Diseño de una heurística para la programación integrada de órdenes de producción e intervenciones de mantenimiento preventivo en un ambiente productivo de máquinas paralelas.	79
3.3. Resultados de la aplicación práctica del algoritmo de programación integrada.	84
3.4. Conclusiones parciales.....	89
Conclusiones generales	90
Recomendaciones	91
Bibliografía.....	92
Anexos	99

Introducción

La situación económica actual y el ambiente tan dinámico y cambiante en que se encuentran las empresas hoy en día evidencian la necesidad del logro de integración entre todos los procesos y funciones departamentales que existen en las mismas, se habla de un enfoque por procesos, mediante el cual el flujo de información, el fortalecimiento continuo de las relaciones y la evaluación de los resultados adquiera mayor significación. Dos sectores fundamentales en las empresas son precisamente el departamento de producción y el departamento de mantenimiento. Es una realidad actual que el éxito no se reduce sólo a la inversión en nuevas plantas de producción y a la transferencia de modernas tecnologías, sino que es indispensable utilizar efectivamente las instalaciones existentes, donde uno de los requisitos primordiales es establecer un servicio integral de mantenimiento efectivo, seguro y económico de los activos empresariales. Dos premisas son básicas en el mejoramiento continuo de una industria: en primer lugar, los procesos de mantenimiento deben optimizarse, pues en la vida útil de los activos, el uso, el paso del tiempo, los agentes externos y los accidentes ocasionales, generan un deterioro no apreciado correctamente por el usuario; por lo cual es necesario aumentar la inversión en mantenimiento de los equipos para obtener el mínimo costo total de producción. En segundo lugar, para el éxito de cualquier proyecto, este debe suscitar la cooperación y el interés de todos, además de tener en cuenta las particularidades propias del objeto de estudio práctico.

En materia de mantenimiento, la base para desarrollar un proyecto debe descansar sobre el enfoque moderno del mantenimiento industrial, que no solo previene los paros improductivos, sino que constituye el principal aportante al incremento de las utilidades, mediante programas de eliminación de paradas, reducción del consumo de energéticos, aumento de la calidad de los productos, posibilitando así el mejoramiento de la productividad de la planta. Para lograr una mayor efectividad, se requiere además de los recursos y técnicas adecuadas, del apoyo de producción para que el departamento de mantenimiento sea dirigido con sentido gerencial amplio, es decir, hacer un cambio de visión centralizada por una integral, y lograr la conformación de equipos interdisciplinarios que trabajen con el enfoque sistémico global.

Recientemente las empresas manufactureras y de servicios se han visto sometidas a una enorme presión para ser competitivas y ofrecer una entrega oportuna de productos de alta calidad. Este nuevo entorno ha obligado a los directivos a optimizar todos los sistemas que intervienen en el proceso de producción, con el fin de cumplir los requerimientos por parte de los clientes.

La consolidación de la industria y la competencia mundial están poniendo a las plantas de la actualidad bajo intensa presión financiera, y los presupuestos de producción y de mantenimiento están entre los primeros que deben ser reducidos. Se espera que menos personal trabajando menos horas opere y mantenga el equipo al menor costo, a la vez que entreguen un mayor rendimiento, mayor disponibilidad

y mayores ganancias con activos que se hacen cada vez más viejos. Es una tendencia que no muestra señal de cambio, por lo tanto, las plantas deben incrementar la productividad de sus equipos de mantenimiento y producción existentes, mientras continúan buscando maneras de reducir aún más sus costos y ser a la vez más competitivas.

La situación que caracteriza el sistema Producción - Mantenimiento en la UEB Centroplast está dada por la falta de coordinación entre las actividades de programación de la producción y programación del mantenimiento, lo que se traduce en violaciones reiteradas de la planificación del mantenimiento cuando coinciden ambas actividades sobre un mismo equipo. Esto provoca el aplazamiento de las intervenciones de mantenimiento sin un previo análisis técnico - económico debidamente fundamentado, lo cual constituye una de las consecuencias del aumento de las paradas por roturas del equipamiento y los consiguientes incumplimientos de las entregas en el plazo previsto.

Lo anteriormente planteado constituye la **situación problemática** que enfrenta el presente trabajo de diploma, definiéndose el **problema de investigación** como la ausencia de instrumentos metodológicos dirigidos a evaluar el nivel de integración entre la Gestión de la producción (GP) - Gestión del mantenimiento (GM) en la UEB Centroplast y, de ser necesario, proyectar alternativas para su mejoramiento.

De manera que el **objetivo general** de la presente investigación consiste en aplicar un conjunto de métodos para el diagnóstico y mejoramiento del nivel de integración entre los subprocesos de programación de la producción y programación del mantenimiento en la UEB Centroplast.

Para el logro de este objetivo general se trazan **objetivos específicos** que ayudan al desarrollo eficiente de la herramienta propuesta:

1. Evaluar la criticidad (importancia) del desarrollo de un estudio para el diagnóstico y mejoramiento del nivel de integración GP - GM en la UEB Centroplast.
2. Evaluar el estado del nivel de integración producción - mantenimiento a nivel operativo en la UEB.
3. Diseñar un algoritmo que permita generar un programa integrado de producción y mantenimiento preventivo en la entidad objeto de estudio.
4. Aplicar el algoritmo diseñado como forma de demostrar su factibilidad.

Para cumplir con los objetivos trazados la investigación se compone de tres capítulos. En el I Capítulo se exponen todos los fundamentos teóricos de la investigación. El Capítulo II está referido a evaluar la criticidad del desarrollo de un estudio para el diagnóstico y mejoramiento del nivel de integración GP - GM en la UEB Centroplast, dedicando el Capítulo III al diseño y aplicación de un algoritmo que permita obtener un programa integrado de órdenes de producción y tareas de mantenimiento preventivo. Por último, se exponen un conjunto de conclusiones y recomendaciones que motivan la continuidad de la presente investigación.

Capítulo I: Marco Teórico Referencial

1.1. Introducción

En el presente capítulo se crea la base teórica que sustenta la presente investigación, siguiendo un enfoque de lo general a lo particular y abarcando una serie de cuestiones procedentes del estado del arte y la práctica. La estrategia o hilo conductor seguido para su elaboración se presenta a continuación:



1.2. El subsistema de producción

En el siguiente epígrafe se analizan los aspectos generales relacionados con el diseño y gestión del subsistema de producción. Abordando temas propios del subsistema, mostrando sus objetivos, su evolución, entre otras cuestiones que revisten una gran importancia en su evaluación.

1.2.1. Gestión de la producción (GP)

La gestión de la producción suele ser asociada con diferentes terminologías, entre las más conocidas puede mencionarse: administración de operaciones, administración de la producción y dirección de operaciones. Por esta razón, es importante tener en cuenta las definiciones aportadas desde el punto de vista de diferentes autores.

La administración de operaciones según Schroeder (2005) es la actividad mediante la cual los recursos, fluyendo dentro de un sistema definido, son combinados y transformados de una forma controlada para agregarles valor en correspondencia con los objetivos de la organización. En el sentido más amplio del

concepto, la administración de operaciones se relaciona con la producción de bienes y servicios y representa el estudio de la toma de decisiones en la función de operaciones.

Continuando con este análisis Heizer y Render (2009) plantean que la dirección de operaciones representa el área de la administración de empresas dedicada tanto a la investigación como a la ejecución de todas aquellas acciones tendientes a generar el mayor valor agregado mediante la organización, planificación, dirección y control en la producción tanto de bienes como de servicios, destinado todo ello a aumentar la calidad, productividad, mejorar la satisfacción de los clientes y disminuir los costos.

Una visión similar es brindada por Caba Villalobos (2013) cuando define la administración de operaciones de una forma sencilla, como el arte de combinar los recursos de una organización para elaborar productos o prestar servicios. Considerando entonces que la administración de operaciones está relacionada con la producción de bienes y servicios y plantea que diariamente se tiene contacto con una gama de bienes y servicios, los cuales se producen bajo la supervisión de administradores de operaciones.

Según Vilcarromero Ruiz (2017) la gestión de producción es el conjunto de herramientas administrativas, dirigidas a maximizar los niveles de la productividad de una empresa, por lo tanto la gestión de producción se centra en la planificación, demostración, ejecución y control de diferentes maneras, para así obtener un producto de calidad.

Son varios los autores que han hecho referencia a la gestión de la producción (Schroeder, 2005; Heizer y Render, 2009; Adam y Ebert, 2009; Krajewski y Ritzman, 2010; Caba Villalobos, 2013; Bonnie, 2017; Vilcarromero Ruiz, 2017), de las definiciones se concluye que la gestión de la producción consiste en planificar, organizar, gestionar personal, dirigir y controlar, de tal forma que el aprovisionamiento, el movimiento de los materiales, las operaciones de la mano de obra, la utilización de las máquinas, la distribución de las instalaciones y la coordinación entre los sectores logren la más alta eficiencia, produciendo la cantidad necesaria de productos, con la calidad requerida y en el momento adecuado, respetando las normas vinculadas con la preservación del ambiente y los requerimientos existentes en el orden político y social.

1.2.2. Evolución y objetivos de la gestión de la producción / operaciones.

Entre los años 1930 y 1950 del siglo pasado, se vivió un periodo caracterizado por el desarrollo de técnicas centradas en la eficiencia económica de la manufactura, fundamentalmente los estudios de métodos de trabajo para reducir los gastos de esfuerzos del trabajador y los estudios del comportamiento humano dentro del ambiente de trabajo, para este entonces se aceptó nombrar a la gestión de la producción como ese término que describe la gran variedad de actividades de gestión interrelacionadas, las cuales están involucradas en la manufactura de ciertos productos. (Kumar y Suresh, 2009)

Debido al creciente auge de la actividad de los servicios, se intenta entonces sintetizar en el término operaciones tanto a la actividad de manufactura como a la de prestación de servicios.

De este modo Heizer y Render (2009) señalan que sin importar que el producto final sea un bien o un servicio, las actividades de producción que ocurren en la organización se conocen comúnmente como operaciones. A partir de los criterios emitidos por autores como, (Heizer y Render, 2009; Chase y Aquilano, 1994; Gaither y Frazier, 2012; César Ortega, 2016), puede concluirse que operaciones se refiere a las actividades que se desarrollan en una organización para transformar los recursos necesarios en los productos y servicios que solicitan los clientes, a partir de un proceso de adición de valor.

En la literatura se conoce la “Dirección y Administración de las Operaciones” (POM, por sus siglas en inglés), como el campo de investigación encargado de estudiar el sistema de producción / operaciones. De acuerdo con Singhal et al. (2007) el término POM, tal como se conoce en la actualidad, fue establecido en la década del '60, debiéndose en gran medida a la labor investigativa desarrollada por Elwood Spencer Buffa. De manera más específica los objetivos de la POM han estado relacionados con las denominadas prioridades competitivas de manufactura, (Ibarra Mirón, 2005; Sarache Castro et al., 2005; Vivares Vergara et al., 2014), las cuales constituyen aquellas características de los productos en las cuales debe centrarse el área de producción para aportar ventajas competitivas a la empresa (Ibarra Mirón, 2005). Si bien la composición del mix de prioridades competitivas ha manifestado ciertos cambios, en correspondencia con los diferentes periodos dentro de la evolución de la POM, luego de consultar las contribuciones de algunos autores dentro de esta temática (Ibarra Mirón, 2005; Machuca et al., 2005; Sarache Castro et al., 2011; Vivares Vergara et al., 2014; Cai y Yang, 2014; Longoni y Cagliano, 2015), puede concluirse que, actualmente, siete son las prioridades competitivas fundamentales de manufactura: costo, calidad, flexibilidad, entregas, servicio, innovación, y responsabilidad social y ambiental. En función a este análisis podemos concluir que los principales objetivos de la gestión de la producción son: reducir los costos, aumentar los índices de calidad, potenciar y lograr una mayor flexibilidad empresarial, aumentar y mejorar las entregas, contribuir a la mejora continua de los servicios, desarrollar la innovación y trabajar por alcanzar una mayor responsabilidad social y ambiental.

1.2.3. Sistemas de producción y sistemas de gestión de la producción

Es importante destacar en este marco conceptual los términos sistema productivo, sistema de producción y sistema de gestión de la producción. El primer caso se refiere al conjunto de elementos materiales y conceptuales que realizan la transformación. En su lugar el concepto de sistemas de producción generalmente aparece vinculado con las variadas configuraciones que puede adoptar el proceso productivo (Ibarra Mirón, 2005; Kumar y Suresh, 2009; Casanova Durán, 2013). De acuerdo con este criterio es posible identificar seis tipologías de configuraciones (sistemas de producción)

tradicionales o puras, estas son: por proyectos, job shop, flujo en lotes, flujo en línea acompañado por operarios, flujo en línea acompañado por el equipo y de flujo continuo, así como otras dos tipologías híbridas que surgieron como respuesta a nuevos requerimientos y representan acertadas combinaciones de al menos dos sistemas tradicionales, estas son: las células de manufactura y los sistemas flexibles de fabricación (FMS). (Ibarra Mirón, 2005)

Los sistemas de planificación y control (gestión) de la producción integran las diferentes funciones de planificación y mando de la producción; a partir de la utilización de técnicas, diagramas, gráficos y software que facilitan los cálculos y decisiones en torno a la selección de las mejores variantes de producción. (Ibarra Mirón, 2005)

Dentro de estos el citado autor destaca los siguientes: MRP/ MRP-II (Planeación de Requerimientos Materiales y de Recursos Productivos, surgido en los Estados Unidos en la empresa IBM), JIT (Just in Time, de origen japonés y desarrollado inicialmente por Toyota Motor Co), OPT (Tecnología de Producción Optimizada, desarrollada inicialmente por Eliyahu M. Goldratt, que más tarde dio lugar al surgimiento de la Teoría de las Limitaciones (TOC) y a su aplicación en producción (sistema DBR: drumbuffer-rope)), LOP (Load Oriented Production, control de Producción Orientado a la Carga, sistema desarrollado en Europa Occidental). En este contexto pueden mencionarse los denominados enfoques de manufactura, los cuales, teniendo el mismo propósito de permitir el direccionamiento del sistema de producción, constituyen en sí mismo filosofías de gestión. Como parte de este grupo Vivares Vergara et al. (2014) incluye el JIT, la Gestión de Calidad Total (TQM), el Mantenimiento Productivo Total (TPM), TOC, las 5 S y el Kaizen. También resulta apropiado mencionar aquí dos términos novedosos dentro del área de operaciones, en este caso: manufactura ágil y manufactura esbelta, elementos que pudieran considerarse dentro del grupo de las filosofías de gestión.

1.2.4. El procesos de toma de desiciones en producción / operaciones

El proceso de toma de desiciones en las operaciones ha sido estudiado y evaluado por varios autores, uno de los exponentes más notables es precisamente Schroeder (1992), el cual señala que la diversidad de patrones de clasificación para las áreas claves de decisión en operaciones es resultado de las particularidades de cada empresa y de su organización interna.

Varios autores como son (Schroeder, 1992; Chase y Aquilano, 1994; Machuca et al., 1995; Gaither y Frazier, 2000; Lefcovich, 2002; Schroeder, 2005), brindan sus contribuciones a cerca del proceso de toma de decisiones en producción / operaciones, el cuadro resumen que contiene este tema puede consultarse en el Anexo 1.

Continuando con este análisis Chase et al. (2009), sin presentar un marco formalmente estructurado para las decisiones en operaciones, propone un criterio de clasificación basado en la extensión del horizonte (periodo de tiempo) planeado. De esta forma se tienen decisiones a largo, mediano y corto plazo. En el primer caso se tendría, por ejemplo, el diseño y construcción de una planta nueva,

en el plazo intermedio se ubican las decisiones que determinan el desempeño de la organización entre 3 y 12 meses, mientras que las decisiones de corto plazo suelen abarcar un horizonte de planeación de unos cuantos meses o, incluso, días.

Derivadas de las diferentes disciplinas que puede desarrollar un gerente de operaciones Heizer y Render (2009) identifican diez áreas de decisión en operaciones, las cuales cubren las categorías de diseño de bienes o servicios, diseño del proceso, administración de la calidad, estrategia de localización, distribución de instalaciones, recursos humanos y diseño el trabajo, inventarios, programación a mediano y corto plazo, administración de la cadena de suministro, y mantenimiento. La toma de decisiones efectiva en cada una de estas categorías asegurará un desempeño adecuado en términos de diferenciación, bajo costo y respuesta.

Los autores, (Ibarra Mirón, 2005; Sarache Castro et al., 2005; Sarache Castro et al., 2011; Vivares Vergara et al., 2014) comparten un criterio de clasificación en el cual las decisiones en operaciones se agrupan en estructurales e infraestructurales, las primeras se caracterizan por tener un mayor impacto en el largo plazo, son difíciles de deshacer una vez en ejecución, involucran un volumen elevado de capital en su realización, modificación y/o ampliación, y están asociadas a cambios radicales; en cambio, las infraestructurales tienen impacto a corto plazo, abarcando muchas decisiones cotidianas, no precisan grandes inversiones de capital, se relacionan con sistemas y procedimientos utilizados en la empresa y se asocian a cambios incrementales.

Por su parte Vilcarromero Ruiz (2017) afirma que en el proceso de toma de decisiones se tendrá en cuenta los volúmenes a producir, qué recursos se utilizarán, y a quiénes se los venderá, por lo tanto se seleccionará el mayor beneficio para una cantidad asignada.

1.2.5. Tendencias actuales en la gestión de la producción / operaciones

El ambiente tan dinámico en el que se encuentran las empresas y los cambios significativos ocurridos en los últimos años en las esferas económica, social, tecnológica y ambiental, a escala mundial, entre los que pueden mencionarse los nuevos avances en la tecnología de la información, la globalización de los mercados, la descentralización de las operaciones y el incremento de la conciencia respecto a los problemas ambientales han forzado a las organizaciones a repensar sus paradigmas de gestión, incluyendo los enfoques para la gestión de las operaciones.

Son los autores Gunasekaran y Ngai (2012) quienes señalan que la gestión de operaciones ha evolucionado desde la denominada era de producción en masa hasta un paradigma de “masificación de la personalización”. Durante este cambio de enfoque las compañías han implementado variadas estrategias para competir en un mercado global, entre estas: el JIT, el TQM, los FMS, los sistemas de manufactura integrados por computadoras (CIM), la manufactura ágil (AM), la manufactura o producción esbelta, la reingeniería de los procesos de negocio (BPR), los sistemas de manufactura de respuesta rápida (QRM), y la gestión de la cadena de suministro (SCM).

En el campo de la gestión de operaciones los investigadores han reconocido el hecho de que las fronteras del conocimiento de esta disciplina se han expandido, desde el mero enfoque de la planta de producción o taller hasta el concepto de operaciones globales, desde el énfasis en la eficiencia y la productividad hasta el marcado interés por la competitividad y la innovación, desde la transformación básica del material hasta la creación de nuevo valor, y desde el intercambio de información hasta la colaboración y la creación de sociedades y compañías colectivas.

De acuerdo con (Gunasekaran et al., 1995; Gunasekaran y Ngai, 2012) el desarrollo de la internet ha transformado la forma en que las compañías operan en términos de la adquisición de recursos y de la manera de satisfacer las expectativas de los clientes. Hoy en día la cuestión radica en determinar si los enfoques, principios y técnicas tradicionales de la gestión de operaciones, dentro de los que se incluye la planeación estratégica, la programación de la producción, el control de la calidad, los sistemas de inventario, y la gestión de los recursos humanos son aplicables al contexto empresarial actual, caracterizado en buena medida por la anuencia de varios conceptos novedosos tales como: SCM, planificación de los recursos de la empresa (ERP), la Internet, identificación mediante radio frecuencia (RFID), gestión de la relación con el cliente (CRM), tercerización, y gestión del conocimiento.

Continuando con este estudio (Meredith, 2001; Zhao y Lee, 2009; Gunasekaran y Ngai, 2012) definen como tendencias fundamentales en el campo de gestión de las operaciones la adopción de las teorías basadas en los recursos y en el costo de la transacción; la gestión de la cadena de suministro y el tratamiento, dentro de esta, de elementos tales como la confianza, el compromiso, y su configuración; la selección de operaciones desde una teoría institucional, de contingencia y de configuración; y la relación entre las estrategias de operaciones y de cadena de suministro a través de la teoría de la contingencia y la teoría de la configuración.

La actividad de planificación y control de la producción en la época actual debe adoptar un carácter global, para lo cual la planificación de los recursos empresariales (ERP) debe considerar, como tendencia, su implementación en redes de compañías que ahora tienden a funcionar como sociedades; esto lleva a la necesidad de evaluar constantemente la productividad de los sistemas ERP en lo que refiere al grado de compartimentación y uso real que puedan permitir en la información necesaria para formular las decisiones dentro de la planificación y control.

En cuanto a sistemas de gestión de la producción se refiere, Chase et al. (2009) aseguran que el método de administración de la producción más importante de los últimos 50 años es la producción esbelta o justo a tiempo (JIT). Esta filosofía, que evolucionó del concepto de producción JIT ideado por Toyota, en Japón, se refiere a la eliminación de la mayor cantidad posible de desperdicio, mediante un conjunto integrado de actividades que permiten la producción bajo condiciones de inventario mínimo de materia prima, trabajo en proceso y bienes terminados.

Como resultado del incremento de la conciencia ambiental las organizaciones se han visto en la necesidad de adoptar estrategias de manufactura amigables con el ambiente. En este contexto surge un nuevo paradigma de producción: el paradigma de la manufactura verde, el cual provee a la empresa de un conjunto de estrategias y técnicas para lograr la eco-eficiencia y la sostenibilidad. Estas estrategias incluyen la creación de productos y sistemas pocos consumidores de materiales y de energía, la sustitución de materias primas tóxicas por materiales no tóxicos, la utilización de recursos renovables, la reducción de salidas no deseadas en los procesos productivos, y el reciclaje. (Echeverri Cañas, 2009; González Álvarez, 2013; Castellano y Urdaneta, 2015; Prada Ospina y C. Ocampo, 2017).

1.3. El subsistema de Mantenimiento

En este epígrafe se analizarán los conceptos generales del subsistema de mantenimiento, su evolución, la conformación del proceso de tomas de decisiones y sus principales tendencias actuales, aspectos que son primordiales tanto en el diseño como en la gestión del mismo, constituyendo la base para identificar las formas en que las decisiones tomadas en la GM inciden de manera significativa sobre la GP.

1.3.1. Gestión del Mantenimiento(GM)

Son varios los autores que se han pronunciado entorno a la gestión del mantenimiento, tal es el caso de De la Paz Martínez (2015) quien señala que el mantenimiento consiste en la integración de las acciones técnicas, organizativas y económicas, encaminadas a conservar o restablecer el buen estado de los activos físicos, a partir de la observancia y reducción de su desgaste, con el fin de alargar su vida útil económica, con una mayor disponibilidad y confiabilidad, para cumplir con calidad y eficiencia sus funciones, conservando el medio ambiente y la seguridad del personal.

Uno de los principios para la proyección de la GM, derivados del concepto anterior, consiste en que los objetivos del mantenimiento están subordinados a las exigencias de la producción principal De la Paz Martínez (2015); así mismo, dicha autora define la meta del mantenimiento como la contribución a la competitividad de la organización, dando respuesta a las necesidades del proceso de producción o de servicios, tanto en cantidad como en calidad, lo cual implica la adaptación rápida a los cambios del entorno (flexibilidad) y la racionalidad en los costos de mantenimiento.

1.3.2. Evolución y objetivos de la Gestión del Mantenimiento

En los últimos años, la gestión del mantenimiento ha cambiado, quizás más que cualquier otra disciplina gerencial. Esta opinión sostiene López García (2013) cuando plantea que estos cambios se deben principalmente al enorme aumento en número y variedad de los activos físicos, a la elaboración de diseños más complejos, al uso de nuevos métodos de mantenimiento, y a la existencia de una óptica cambiante en la organización de esta actividad y sus responsabilidades.

Son los autores (García Garrido, 2008; López García, 2013), quienes afirman que son cinco las generaciones que conforman la evolución del mantenimiento, definiendo la primera generación como

una etapa en la cual el mantenimiento solamente se limitaba a reparar lo que se averiaba siendo el propio operario el encargado de su ejecución. Aplicando un mantenimiento correctivo, esta etapa se sitúa entre 1930 y 1950, periodo en el cual se empleaban máquinas robustas, lentas y relativamente sencillas. Luego se habla de una segunda generación a partir de la Segunda Guerra Mundial. Esta evolución surge por la exigencia de una mayor continuidad en la producción y por una mayor complejidad en máquinas y equipos, surgiendo el concepto de mantenimiento preventivo sistemático. Los equipos debían durar lo máximo posible en condiciones óptimas de funcionamiento a los costos más bajos posibles, desarrollándose así las reparaciones, tanto instantáneas como programadas. Se implantan sistemas de planificación de actividades y control de los trabajos realizados, y a partir de los 70 se generaliza el uso de herramientas informáticas (GMAO). A partir de los 80 se habla de una tercera generación del mantenimiento. Sus objetivos se centran en ocho aspectos: disponibilidad de los equipos y sistemas, fiabilidad de los mismos, optimización de los costes, aumento de la seguridad, incremento de la calidad (aparecen las certificaciones ISO 9001 e ISO 9002), aumento de la conciencia de preservar el medio ambiente (teniendo en cuenta la ISO 14001), aumento de la duración de los equipos y vigilancia de la normativa vigente. Las actividades de mantenimiento preventivo ya no son rutinarias, sino ajustadas a la normativa o a su utilidad: se tiene en cuenta su rentabilidad. Aparecen los mantenimientos según condición, los predictivos y otras técnicas como el RCM (mantenimiento centrado en la confiabilidad) y el TPM (mantenimiento productivo total). Los sistemas de gestión se extienden masivamente a equipos, sistemas e instalaciones. Aparece la externalización del mantenimiento como modo de optimizar los costos y de ocupar del mantenimiento a empresas especialistas. Es entonces cuando se comienza a hablar de una cuarta generación del mantenimiento, ya que, integrados todos los conceptos anteriores, la gestión del mantenimiento se orienta hacia la satisfacción del cliente. Se extiende la externalización del servicio de mantenimiento y se fijan ratios medibles para poder calificar el servicio de mantenimiento, con bonificaciones y penalizaciones. Los responsables de mantenimiento deben tener un conocimiento exhaustivo de las normativas para no incurrir en errores legales. Es precisamente a finales del siglo XX y principios del XXI, donde se comienza a abordar la solidificación de una quinta generación del mantenimiento, esto debido a que la importancia de los recursos energéticos por su costo y por su carácter de agotables hace que la eficiencia energética tenga un papel capital en el mantenimiento y explotación de las instalaciones, incluyendo en muchos casos la cesión de los contratos energéticos a las empresas mantenedoras, que en ese caso se encargan de comprar la energía primaria y vender la energía útil transformada garantizando unos ratios establecidos en contrato. De este modo la propiedad puede dedicarse exclusivamente a su actividad principal mientras la empresa mantenedora se dedica a la explotación técnica del edificio.

En relación al objetivo principal del mantenimiento, además de los autores abordados en los estudios referenciados anteriormente, existe un grupo de planteamientos; (Sotuyo Blanco, 2001;

Villanueva Arengas, 2017; Tarazona Daza, 2017), que coinciden en definirlo, de manera general, como: conseguir el nivel máximo de efectividad en el funcionamiento del sistema productivo y/o de servicios con la menor contaminación del medio ambiente y mayor seguridad para el personal al menor costo posible. Todo lo anterior implica conservar el sistema de producción y/o servicios funcionando con el mejor nivel de fiabilidad posible, reducir la frecuencia y gravedad de los fallos, aplicar las normas de higiene y seguridad del trabajo, minimizar la degradación del medio ambiente, adaptarse rápidamente a los cambios del entorno (flexibilidad), y controlar y reducir los costos a su mínima expresión.

1.3.3. Tipos de mantenimiento

El mantenimiento generalmente se categoriza en correctivo y preventivo, aunque también se ha añadido otro: el predictivo (Duffuaa et al., 2001; Ahmad y Kamaruddin, 2012). Independientemente de la diversidad de criterios todos los autores coinciden esencialmente en que estas tres categorías son las más utilizadas.

❖ Mantenimiento correctivo

Entre las definiciones más recientes dadas sobre mantenimiento correctivo se encuentra la de Dao y Zuo (2017) donde lo precisan como la corrección de las averías o fallas, cuando éstas se presentan. Esto incluye acciones como la reparación y el reemplazo. Las consecuencias de practicar solo este tipo de mantenimiento son un alto riesgo de ocurrencia de periodos de improductividad del equipo y pérdidas irre recuperables.

❖ Mantenimiento preventivo

El MP o mantenimiento basado en el Tiempo, consiste en reacondicionar o sustituir a intervalos regulares un equipo o sus componentes, independientemente de su estado en ese momento. Consta de dos categorías, la primera basada en la estadística y la confiabilidad a partir del análisis de los resultados obtenidos de los registros históricos del equipo y la segunda en las condiciones y el funcionamiento (Carrasco, 2015; Chen et al., 2017; Farfán Bertín, 2014; Olives Masip, 2015; Rodríguez Machado, 2012; Silva Franco, 2015; Zhang et al., 2017). Se arriba a la conclusión de que MP es una estrategia alternativa que reduce varios riesgos asociados en la industria y su efectividad se logra cuando se combina con algún sistema de mantenimiento.

❖ Mantenimiento predictivo

Este tipo de mantenimiento surge como necesidad para atenuar las ventajas que posee el mantenimiento preventivo, pues al perseguir el conocimiento del estado o condición de los equipos con la ayuda de mediciones periódicas o continuas va un poco más allá, y esto también ha dado origen a la denominación de Mantenimiento Basado en la Condición (MBC). (Baidya y Kumar Ghosh, 2015; Ahmad y Kamaruddin, 2012; Bernal Matute, 2013; Carrasco, 2015; Mora Gutiérrez, 2012; Olives Masip, 2015; Parra Márquez y Crespo Márquez, 2012; Vishnu y Regikumar, 2016).

1.3.4. Proceso de toma de decisiones en mantenimiento

La autora De la Paz Martínez (2000), plantea que la gestión del mantenimiento recae en la persona, grupo de personas, sección, departamento o subdirección que se encarga de dirigir la organización del mantenimiento, siendo responsable del cumplimiento de las funciones necesarias para alcanzar los objetivos propuestos, por lo cual se sumerge continuamente en un proceso de toma de decisiones.

Al decir de la Asociación Española de Mantenimiento (AEM) los principales aspectos tratados en lo que a gestión del mantenimiento se refiere son: organización del mantenimiento, gastos y presupuestos, mantenimiento contratado, control de los trabajos, informatización del mantenimiento, formación en mantenimiento y dirección del mantenimiento.

Según Díaz Cazañas (2008) es importante destacar que si bien la problemática de la estructura de las decisiones en producción ha sido tratada de manera explícita, no ocurre lo mismo en el caso de mantenimiento donde no se delinea explícitamente un marco conceptual referido a la estructura de las decisiones. No obstante sí existen elementos de gran utilidad para conformar un patrón similar al que se muestra en el Anexo 2 para el caso de la GP.

En este sentido dicho autor, luego de revisar los distintos aspectos que a criterio de la AEM deben ser abordados en el momento de proyectar la GM, y analizar aquellos elementos tratados por otros autores establece una propuesta de clasificación respecto a las posibles decisiones a tomar dentro de la GM, la cual presenta cierta analogía con el esquema definido previamente para la GP, y considera, además, los diferentes niveles del horizonte de planificación, tal y como se estableció en el caso de producción. Dicha propuesta se muestra en el Anexo 3.

1.3.5. Tendencias actuales de la gestión del mantenimiento

Si hablamos de las tendencias actuales en mantenimiento no podemos dejar de mencionar el estándar ISO 55000, el cual incluye todas las herramientas necesarias para lograr una correcta gestión de activos. En relación con este tema los autores (Bedoya Ríos, 2014; Guzman de Posada y Alfonso Llanes, 2014; Medina Robinson, 2015; Márquez Artola et al., 2015) afirman que la aplicación de un sistema de gestión de activos acorde a esta normativa proporciona la seguridad de que los objetivos organizacionales se pueden lograr de manera consistente y sostenible en el tiempo.

En la norma se define un activo como “algo que tiene valor o potencial valor para una organización”, quedando plasmado que la gestión de activos no es más que “la coordinación de las actividades de una organización para crear valor a través de sus activos”, una visión similar expone Oldemar Vargas (2017) cuando plantea que la gestión de activos empresariales es la práctica que busca gestionar todo el ciclo de vida de los activos físicos de una empresa, con el objetivo de ampliar su vida útil y lograr el mayor rendimiento de los mismos.

Para los autores (Quintero Bueno, 2011; Amendola León et al., 2012; Trujillo Corona, 2013; Bedoya Ríos, 2014; Medina Robinson, 2015) los principales beneficios que aporta la gestión de activos son: menos barreras internas y más soporte corporativo, mejores resultados financieros, optimizar el uso de la capacidad instalada, controlar los riesgos de los activos durante todo su ciclo de vida, alargar la vida útil de los activos y optimizar sus costos y maximizar el conocimiento de la organización alrededor de sus activos.

Concluyendo que resulta fundamental lograr que las áreas de mantenimiento vayan más allá de ser simples reparadores de maquinaria, requiriendo para ello la integración de las diferentes áreas de las organizaciones. Logrando la implementación de buenas prácticas de clase mundial en el área de mantenimiento fundamentadas en unos pilares fácilmente conocidos por cada una de las personas que laboran en dichas áreas, como son: inspección, planeación y programación, ejecución y mejoramiento.

Otra visión nos muestra Angel Partida (2016) cuando plantea que algunas de las tendencias actuales existentes que pueden tener incidencia en el mantenimiento. Se describen principalmente mediante la utilización de software, sensores, equipos, sistemas de fabricación, diversos productos que, sin duda, van a influir en el futuro del mantenimiento, de la reindustrialización y de la industria 4.0. Las principales tendencias se relacionan a continuación:

Internet de las cosas: La utilización de sensores que ayuden la monitorización de los equipos, facilitando la conectividad entre los mismos, herramienta que ayuda de forma muy directa a optimizar y mejorar el mantenimiento.

Control de vibraciones: Otra faceta que está evolucionando de forma muy significativa es la del mantenimiento predictivo y el control de vibraciones, optándose por plataformas en la nube y diagnóstico en remoto. Actualmente las empresas de consultoría especializadas se hacen cargo de la instalación de los sensores de vibración, realizando la toma de medidas de vibración en remoto y alojando los datos en plataformas propias en la nube, realizando posteriormente de forma continua el diagnóstico on line de los equipos desde las instalaciones de la consultora.

Software y Big Data: Cada vez se está dando mayor importancia a la utilización de software que nos ayude a mejorar la gestión de mantenimiento. Programas de GMAO cada vez más versátiles y que nos devuelven la información acumulada en datos que facilitan la toma de decisiones.

Hololens, la realidad aumentada: Hololens es el nuevo desarrollo de Microsoft de unas gafas de realidad aumentada y que, por ejemplo, Thyssenkrupp ya está incorporando en el mantenimiento de ascensores. Hololens permite visualizar e identificar problemas, facilitar información, acceso remoto y comunicación directa con técnicos expertos, liberando el uso de las manos para realizar las tareas adecuadas.

1.4. Integración gestión de la producción - gestión del mantenimiento.

Varios autores, entre los que se encuentran, (Mojícar, 2004; Achermann, 2008; Aghezzaf y Najib, 2008; Jin et al, 2009; Najid et al, 2010; Muchiri y Pintelon, 2011; Gaither y Frazier, 2012), plantean que el éxito

de cualquier empresa precisa de una adecuada integración entre cada uno de sus sistemas y procesos. Un caso particular lo constituye la integración entre los procesos de gestión de la producción (GP) y gestión del mantenimiento (GM), debido a los beneficios que, en términos de reducción de costos, aumento de la disponibilidad, eliminación de conflictos interpersonales, entre otros, se lograrían si producción y mantenimiento fueran gestionados con la sinergia que se requiere. Según dichos autores esto se acentúa en las denominadas organizaciones intensivas en capital en las que el mantenimiento del equipamiento juega un papel fundamental en las variables que determinan la competitividad, en la seguridad del personal y en el medio ambiente.

Comprender los inconvenientes que un inadecuado mantenimiento reportaría tanto a producción como a la organización en sentido general, e interiorizar los problemas originados por una deficiente coordinación entre tales subsistemas, contribuiría, a demostrar la pertinencia del desarrollo de un proyecto para la integración y, permitiría perfilar los factores claves que influyen sobre la gestión integrada GP-GM. (Díaz Cazañas, 2008)

En este sentido puede consultarse a Gaither y Frazier (2012) quienes realizan un análisis donde señalan los principales problemas que un deficiente mantenimiento ocasionaría sobre la capacidad y costo de producción, la calidad del producto o servicio, la seguridad de los empleados y la satisfacción del cliente. Sin embargo, según Royo y Berges (2000) en la práctica empresarial la integración entre los departamentos de producción y de mantenimiento es prácticamente nula.

El autor Yori (2005) plantea que la falta de integración entre los subsistemas de producción y mantenimiento puede ser resultado del habitual antagonismo que existe entre los mismos, el cual, si bien resulta inherente a las características a primeras luces diametralmente opuestas de ambos departamentos, se acentúa por la falta de integración y por las degradaciones de las relaciones entre el personal de una y otra área. En el Anexo 4 se presentan algunos elementos característicos de la funcionalidad entre ambos subsistemas devenidos, según el mencionado autor, en causas del antagonismo entre ambos.

Para Royo y Berges (2000) la esencia del problema radica en la falta de conexión entre los sistemas informáticos de ambos subsistemas, así como la existencia de bases de datos independientes cuando muchas veces la información resulta común a ambos.

Siguiendo con este análisis Díaz Cazañas (2008) afirma que otras de las manifestaciones de la falta de integración GP - GM es la duplicidad de módulos en las alternativas informáticas implementadas para asistir la gestión de ambos procesos. De esta forma puede existir, por ejemplo, un módulo de gestión de stock dentro del software para la GP y otro similar, que realice las mismas tareas, dentro del software para la GM.

De acuerdo con los citados autores, en muchas ocasiones los sistemas desarrollados para enfrentar la gestión de la producción operan en paralelo al sistema de planificación del mantenimiento, por lo que

reiteradamente se generan órdenes de producción y de mantenimiento coincidentes sobre un mismo equipo, optándose generalmente por la reprogramación de las intervenciones de mantenimiento, las que finalmente serán realizadas en horario extra.

Esta misma idea comparten Zhu y Pintelon (2001) quienes parten del principio de que para mejorar la GM es vital el análisis de sus interrelaciones con la GP, y orientar la primera dentro del proceso productivo.

Mientras que Ruiz et al. (2004) señala que, generalmente, la programación de las tareas de mantenimiento y la secuenciación de la producción son tratadas de manera independiente tanto en la literatura como en la industria. Una de las conclusiones más importantes planteadas por estos autores es que resulta poco probable que la mejor solución para la secuencia de fabricación, obtenida mediante el empleo de métodos heurísticos y sin considerar las tareas de mantenimiento planificado, coincida con la mejor solución, que cuando se consideran las tareas de mantenimiento.

Estos autores abordan el concepto de gestión integrada producción - mantenimiento como un enfoque basado en el desarrollo del TPM, el RCM y los nuevos cambios acaecidos en materia de organización, cultura, tecnología e ingeniería de mantenimiento; apoyado fundamentalmente en los principios siguientes: otorgamiento de autonomía y participación a los empleados en la toma de decisiones, operadores orientados al mantenimiento, la concepción del departamento de mantenimiento como un órgano asesor y de soporte, y procesos orientados al mantenimiento.

Otro asunto de interés en materia de integración GP - GM está ligado al concepto de mantenibilidad. De acuerdo con Moore (2001) la tendencia consiste en desarrollar la estrategia de mantenimiento luego de la puesta en marcha de la empresa, sin que mantenimiento haya tomado parte en el diseño y construcción de la planta. Esto en muchas ocasiones acarrea problemas de mantenimiento e interrupciones en la producción que quizás no se deriven de la GM implementada, y sí de un inadecuado análisis de mantenibilidad durante la etapa de diseño.

Los elementos anteriores, a criterio de Díaz Cazañas (2008) son ejemplo claro de la necesidad de analizar la integración GP - GM en ambas direcciones, pues si bien al departamento de mantenimiento tradicionalmente se le ha encomendado la tarea de garantizar la disponibilidad necesaria del equipamiento para asegurar el cumplimiento de los programas de producción, producción debe considerar como parte de sus decisiones en torno a la tecnología, el criterio de mantenibilidad para coadyuvar al logro de las metas de mantenimiento.

Dicho autor plantea la conveniencia de analizar algunos puntos de vista y estrategias desarrolladas para dar respuesta a la ausencia de integración GP - GM en las organizaciones, a fin de obtener un mejor desempeño de dichos subsistemas.

En cierta medida el esfuerzo gastado en mantenimiento preventivo puede ser fundamental para la estrategia de producción. Por ejemplo, en empresas enfocadas al producto o muy automatizadas la

descompostura de un equipo puede dejar ocioso a todo el sistema de producción Gaither y Frazier (2000), incluso en fábricas con automatización flexible o en las disposiciones de manufactura celulares. En este escenario, este tipo de empresa pudiera enfatizar una estrategia de mantenimiento preventivo en lugar de correctivo. En otro extremo, las organizaciones enfocadas a procesos, dado que se caracterizan por la retención de inventarios intermedios, los cuales protegen los centros de trabajo de las posibles interrupciones en los puestos, pudieran adoptar una estrategia de reparaciones rápidas y eficientes para evitar la severidad de los fallos.

Para Royo y Berges (2000) la solución se encuentra en el diseño de una única base de datos a la que puedan acceder los software de ambos departamentos, el diseño de un programa informático integrado que evite los módulos redundantes, y la consideración del programa de mantenimiento como otra de las entradas al sistema de planeación de la producción existente.

El autor Zabiski Duardo (2005) ha presentado el diseño de una aplicación informática para el despliegue de la GM en el sector turístico cubano, en la que se ha tenido en cuenta, en cierta medida, los conceptos anteriores, no obstante, esta propuesta dista todavía de lo que conciben Royo y Berges (2000) como un sistema de gestión integrado GP - GM.

Continuando el análisis Yori (2005) plantea la necesidad de lograr una comunicación sinérgica entre el personal de ambos departamentos; con lo que se eliminaría la falta de coordinación, la deficiente realimentación de información entre estos departamentos, y el aumento de la necesidad de supervisión. Otra de las aristas de la problemática que encierra la integración GP - GM, según Díaz Cazañas (2008), lo constituye la manera en que las organizaciones de mantenimiento responden a los cambios acaecidos en el entorno productivo.

Siguiendo esta línea, Acosta y Pérez (1992) hacen referencia a una serie de factores tecnológicos, económicos, organizativos y humanos, que obligan a los responsables de mantenimiento a cambiar su paradigma de gestión, mediante la adopción de novedosas "herramientas" tales como: grupos mixtos de mantenimiento - fabricación, gestión del mantenimiento contratado, implantación del predictivo, bases de datos informáticas, entre otras.

Algunos autores han abordado el tema de la integración GP - GM desde la perspectiva de la adopción, en la GM, de técnicas que tradicionalmente han sido empleadas en el campo de la GP. Al respecto puede citarse a Alfonso et al. (2005), quien señala un conjunto de tareas desarrolladas dentro de la GP, las cuales pudieran emplearse en la GM para atenuar las causas que provocan consecuencias operacionales de algunos fallos. Rodríguez y Verónica (2000) se refieren a las posibilidades de aplicar la metodología MRP para desarrollar con mayor efectividad el cuarto nivel dentro del proceso de planificación y control del mantenimiento, de manera similar a como se hace en producción. Zweig (1992) subraya que la gestión integrada de mantenimiento debe considerar todos los factores y todas las funciones, desde ingeniería hasta recursos humanos, incluyendo calidad, producción, aprovisionamiento

y compras, pero su análisis, según Díaz Cazañas (2008) tiende a correlacionarse en mayor medida al proceso general de gestión del mantenimiento más que al propio análisis de los factores que condicionan la integración GP - GM.

Por su parte Díaz Cazañas (2008) plantea un modelo conceptual donde se conjugan los factores fundamentales que determinan el nivel de integración entre los procesos de GP y GM, dicho modelo parte del reconocimiento de la necesidad de lograr una gestión coordinada entre ambos subsistemas, para la materialización de los elementos de dicho modelo el autor plantea también un procedimiento estructurado en una serie de etapas. Sin embargo, este modelo fue concebido inicialmente para abordar el tema de la integración GP - GM en la esfera de los servicios, específicamente en el sector turístico, además de que incluye elementos que son propios de un procedimiento y no de un modelo.

Las filosofías RCM y TPM son aspectos que no deben dejar de mencionarse en lo referido a la búsqueda de la integración GP - GM. La primera de estas determina la estrategia o sistema de mantenimiento a adoptar para cada activo en función de -entre otros factores- el impacto del fallo sobre los objetivos de producción. Es decir que, bajo esta filosofía, el diseño del subsistema de mantenimiento estará condicionado por parte de la estructura de las decisiones en producción. Por su parte, el TPM logra una estrecha relación entre el personal de una y otra área, para dar paso a la necesaria comunicación sinérgica y la instauración de un efectivo sistema de mejoramiento continuo.

Según se ha mostrado, la problemática que encierra la integración GP - GM tiene variados matices y, en consecuencia, se ha tratado desde diferentes puntos de vista; según Díaz Cazañas (2008), no se ha encontrado un enfoque que logre modelarla en toda su amplitud, de manera que se integren todos o, al menos, la mayoría de los factores fundamentales.

Es en función de esta necesidad de encontrar un enfoque que permita la correcta integración de GP - GM, que el siguiente epígrafe se dedica a la búsqueda de modelos desarrollados que permiten hablar sobre aspectos comunes en la relación producción - mantenimiento.

1.4.1. Modelos desarrollados para lograr una gestión integrada producción - mantenimiento.

Son varios los modelos desarrollados para lograr la integración de GP - GM, en este sentido Al-najjar (2007) aborda el problema de evaluar la transferencia del impacto técnico de mantenimiento en actividades como producción, calidad y finanzas, y cómo puede influir, sobre los beneficios de la empresa y la competitividad. El principal resultado del estudio es el desarrollo de un modelo para la evaluación del impacto del Mantenimiento Basado en Vibraciones (VBM) sobre las consecuencias financieras de la empresa. El modelo puede ser utilizado para dos objetivos adicionales: examinar si la inversión hecha en mantenimiento es rentable o no, y la simulación del impacto financiero del mantenimiento en las áreas de trabajo pertinentes, con el fin de evaluar la inversión requerida antes de seleccionar y aplicar el plan de mejora. Se concluye que la política VBM puede ser introducida como un centro de beneficio, se identifican los mecanismos de transferencia del impacto del mantenimiento, se

determina dónde, por qué y cuánto se debe invertir para mejorar la producción y se evalúa el rendimiento de mantenimiento continuo y rentable.

En correspondencia con este tema, Achermann (2008) propone un modelo el cual se divide en tres partes: módulo de mantenimiento y fallos, módulo logístico y módulo de producción. Dentro de estos módulos se modelan todos los procesos de costo - efectividad. La parte principal del modelo corresponde al módulo de mantenimiento y fallos, que ofrece una representación de diferentes estrategias de mantenimiento e incorpora el efecto de mantenimiento proactivo y mantenimiento correctivo. Este modelo se utiliza para ejecutar optimizaciones referentes a la disponibilidad y maximizar la rentabilidad del sistema de producción mediante estrategias de mantenimiento diferentes, sino también de factores logísticos.

Una perspectiva similar propone Mojicar Caballero (2009), al desarrollar una metodología para evaluar, en primer lugar, la relación Fiabilidad - Producción, con lo que se demuestra cuán importante resulta el logro de un efectivo mantenimiento para la empresa. En este sentido se muestran los indicadores a través de los cuales el citado autor realiza el diagnóstico de la relación Fiabilidad - Producción: a) nivel de mecanización/automatización, b) complejidad tecnológica, c) rigidez del proceso de producción, d) existencia de amortiguadores (buffers), e) variedad tecnológica, f) influencia del tiempo perdido, g) estructura de la fiabilidad del sistema, h) consecuencias de los fallos de los equipos, i) dependencia (trascendencia) de fallos.

Continuando con este análisis Orihuela García (2010) desarrolla un procedimiento dirigido a evaluar el impacto de la gestión de activos sobre el desempeño de operaciones, el cual parte de las relaciones funcionales entre indicadores de la gestión de activos y variables que miden el desempeño de operaciones. Como resultado fundamental del trabajo quedaron establecidas relaciones funcionales que permiten cuantificar el impacto de la gestión de activos sobre el desempeño de producción, en términos de las variables plazo de entrega, calidad y costo. Específicamente, estas relaciones se establecieron entre las variables: plazo de entrega y disponibilidad, costo de producción y costo directo de mantenimiento, calidad del producto y condición del equipo o, en términos de calidad, el impacto que presenta la eficacia del plan de mantenimiento preventivo sobre la cantidad de productos defectuosos debido a fallos parciales del equipamiento.

Considerando la elevada complejidad que caracteriza al proceso de generación de planes integrados producción - mantenimiento los métodos heurísticos han emergido como una estrategia de solución efectiva en este contexto; de ahí que el siguiente epígrafe se dedique al examen de las características de diseño generales de estos métodos, criterios de clasificación y posibilidades de su utilización para el despliegue de la gestión integrada producción - mantenimiento.

1.5. Métodos Heurísticos

Un heurístico es un “procedimiento simple, a menudo basado en el sentido común, que se supone que ofrecerá una buena solución (aunque no necesariamente la óptima) a problemas difíciles, de un modo fácil y rápido”(Zanakis y Evans, 1981).

El término heurístico (o heurística) proviene del griego *heuriskein*, que significa hallar o inventar; en este sentido la Real Academia Española (2012) lo define como técnica de la indagación y del descubrimiento; o como la manera de buscar la solución de un problema mediante métodos no rigurosos, es decir, reglas empíricas. En ciencia, la idea más genérica del término heurístico está vinculada con la tarea de resolver inteligentemente problemas reales empleando el conocimiento disponible, aunque en investigación de operaciones se usa el calificativo como contraposición a exacto. (Melián et al., 2003)

Justamente sobre estas premisas se fundamentan la mayoría de conceptos dados a los métodos heurísticos. Maroto et al. (2002) lo define como las técnicas o procedimientos informales para resolver problemas, basados en la creatividad, la intuición, el conocimiento o la experiencia para hallar buenas soluciones o mejorar una existente; además, agregan que los mismos surgen como la única alternativa en aquellos casos cuyos modelos son muy complejos o intratables desde el punto de vista de los medios computacionales disponibles.

Por su parte, Hillier y Lieberman (2010) explican que, con frecuencia, los métodos heurísticos se refieren a un algoritmo iterativo novedoso, diseñado para abordar un determinado problema y no necesariamente a una gran cantidad de aplicaciones. Dentro de ese procedimiento, cada iteración supone la búsqueda de una nueva solución que eventualmente pudiera ser mejor que una solución encontrada previamente, repitiéndose durante un tiempo razonable.

Una característica fundamental de los métodos heurísticos es que mediante su utilización no se garantiza la solución óptima al problema en cuestión, sino más bien una solución factible muy buena, por lo que los métodos heurísticos se convierten en soluciones ad hoc que buscan más satisfacer que optimizar; de hecho, Martí (2003) acuña que muchos de los métodos heurísticos se han desarrollado para darle solución a un determinado tipo de problema, quedando prácticamente inhabilitados para su aplicación a otros problemas similares. Los métodos heurísticos proporcionan entonces soluciones heurísticas. De allí que, tal como lo plantea Luna (2008) las técnicas de optimización pueden ser de tipo exactas y aproximadas, encontrándose en estas últimas los métodos de naturaleza heurística.

Cuando se desarrollan algoritmos heurísticos, es importante evaluar que el mismo sea eficiente (esfuerzo computacional realista), bueno (solución cercana al óptimo) y robusto (baja probabilidad de obtener una mala solución), para lo cual se pueden emplear procedimientos tales como: comparación con la solución óptima, comparación con una cota, comparación con un método exacto truncado, comparación con otros heurísticos y análisis del peor caso. (Martí, 2003)

1.5.1. Clasificación de los Métodos Heurísticos

El autor Silver (1980) propone la siguiente clasificación de métodos de resolución mediante heurísticos:

- ❖ Métodos constructivos, que se caracterizan por construir una solución definiendo diferentes partes de ella en sucesivos pasos.
- ❖ Métodos de descomposición, dividen el problema en varios más pequeños y la solución se obtiene a partir de la solución de cada uno de estos.
- ❖ Métodos de reducción, tratan de identificar alguna característica de la solución que permita simplificar el tratamiento del problema.
- ❖ Métodos de manipulación del modelo, obtienen una solución del problema original a partir de otra de otro problema simplificado (con menos restricciones, linealizando el problema, etc.)
- ❖ Métodos de búsqueda por entornos, en las que se parte de una solución inicial a la que se realizan modificaciones en sucesivas iteraciones para obtener una solución final. En cada iteración existe un conjunto de soluciones vecinas candidatas a ser nueva solución en el proceso. En este grupo se encuadran las técnicas metaheurísticas.

Mientras que, debido a la naturaleza tan diversa de los métodos heurísticos, Martí (2003) señala que resulta difícil dar una clasificación completa de los mismos, y más bien plantea un conjunto de categorías, no excluyentes, en las que se pudieran ubicar los principales métodos desarrollados. Estas son:

- ❖ Métodos de descomposición: el problema se descompone en subproblemas más fáciles de resolver.
- ❖ Métodos inductivos: busca generalizar propiedades o técnicas identificadas de casos más pequeños y sencillos, al problema complejo o general.
- ❖ Métodos de reducción: tienen como propósito restringir o reducir el espacio de soluciones, simplificando así el problema.
- ❖ Métodos constructivos: se basan en la construcción progresiva de una solución del problema, mediante la selección de la mejor opción en iteraciones sucesivas. Dentro de ellos se pueden mencionar: heurísticos del vecino más próximo, heurísticos de inserción, heurísticos basados en árboles generadores, y heurísticos basados en ahorros.
- ❖ Métodos de búsqueda local: se caracterizan por iniciar con una solución del problema, la cual debe ser mejorada progresivamente a lo largo del procedimiento. Dentro de esta categoría se pueden mencionar: procedimientos de dos intercambios, procedimientos de k intercambio y algoritmo de Lin y Kernighan.
- ❖ Métodos combinados: De todos los métodos mencionados hasta el momento, los métodos constructivos y los métodos de búsqueda local merecen especial atención, debido a que su combinación ha permitido el surgimiento de nuevos métodos heurísticos, llamados métodos combinados y que constituyen el eslabón entre los métodos heurísticos y las metaheurísticas.

Dentro de estos métodos combinados se pueden mencionar: procedimientos aleatorizados, métodos multi-arranque y GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedures).

El examen de la literatura ligada a esta temática demuestra que estas clasificaciones no son excluyentes pues, por ejemplo, muchos de los métodos de búsqueda local y las estrategias evolutivas son métodos iterativos. Autores como Vaessens (1995) y Brucker (2007) identifican varias estrategias evolutivas y algoritmos de memoria a largo plazo como métodos de búsqueda local. Una clasificación más extendida puede verse en Márquez Gómez (2013) el cual aporta criterios relacionados con la fuente de inspiración del método, el número de soluciones para recorrer el espacio de búsqueda, el grado de dinamismos de la función objetivo, entre otros.

Independientemente del esquema de clasificación adoptado resulta un hecho probado el éxito de los algoritmos de búsqueda local como métodos de solución a problemas de optimización combinatoria y, específicamente, a los problemas de programación de la producción. De manera resumida un algoritmo de búsqueda local comienza desde una solución inicial previamente definida y en iteraciones sucesivas genera nuevas soluciones cada una de las cuales se obtiene modificando parte de la estructura de la solución anterior. Las modificaciones que se practican sobre la solución actual se especifican mediante la denominada función de vecindario, la cual asigna a cada solución un conjunto de soluciones vecinas que pueden ser alcanzadas desde la misma mediante un movimiento establecido. Una estrategia de búsqueda específica en cada iteración la solución vecina que será seleccionada como solución inicial en la próxima iteración. Muchas de estas estrategias de búsqueda otorgan mayor preferencia a soluciones vecinas que presenten la mejor calidad, sin embargo, en ciertas ocasiones se eligen soluciones de menor calidad para potenciar la exploración en el espacio de búsqueda y evitar que el algoritmo quede “atrapado” en un óptimo local. De acuerdo con Brucker (2007) un rasgo distintivo entre los diferentes métodos de búsqueda local radica en el criterio utilizado para seleccionar la solución de partida en la siguiente iteración.

Por otra parte, Rodríguez (2010) sugiere otra división para los métodos heurísticos, a los que denomina también algoritmos aproximados, procedimientos inexactos o simplemente heurísticas; de esta forma, propone clasificarlos en métodos constructivos y métodos de búsqueda. Los primeros, definidos como métodos que son capaces de construir una solución a un problema dado, en función a distintas estrategias tales como: voraz de descomposición, de reducción y de manipulación del modelo. Mientras que los métodos de búsqueda parten de una solución factible dada y a partir de ella se intenta mejorarla.

1.5.2. Las técnicas metaheurísticas

Las técnicas metaheurísticas son procedimientos de búsqueda que tampoco garantizan la obtención del óptimo del problema considerado y que también se basan en la aplicación de reglas relativamente sencillas. A diferencia de los heurísticos, las técnicas metaheurísticas tratan de huir de óptimos locales

orientando la búsqueda en cada momento dependiendo de la evolución del proceso de búsqueda. (Sánchez et al., 2008)

La aplicación de las técnicas metaheurísticas es especialmente interesante en caso de problemas de optimización combinatoria: problemas en las que las variables de decisión son enteras (o discretas, al menos) en las que, generalmente, el espacio de soluciones está formado por ordenaciones de valores de dichas variables. Tal es el caso del problema asociado a la programación de la producción y el mantenimiento a muy corto plazo. Sin embargo, las técnicas metaheurísticas se pueden aplicar también a problemas de otro tipo, como con variables continuas, por ejemplo: la lógica de las técnicas metaheurísticas es similar: el punto de partida es una solución (o conjunto de soluciones) que típicamente no es óptima. A partir de ella se obtienen otras parecidas, de entre las cuales se elige una que satisface algún criterio, a partir de la cual comienza de nuevo el proceso. Este proceso se detiene cuando se cumple alguna condición establecida previamente.

Las técnicas metaheurísticas más extendidas son las siguientes: los algoritmos genéticos, la búsqueda tabú, el recocido simulado, la búsqueda "scatter", las colonias de hormigas, la técnica conocida por el nombre inglés GRASP y las redes neuronales, también incluidas entre las técnicas metaheurísticas.

Según Sadiq y Habib (1999) todas las técnicas metaheurísticas tienen las siguientes características:

- ❖ No reconocen si han alcanzado el óptimo por lo tanto se les debe establecer algún criterio de parada.
- ❖ Son algoritmos aproximativos y, por lo tanto, no garantizan la obtención de la solución óptima.
- ❖ Aceptan ocasionalmente malos movimientos (es decir, se trata de procesos de búsqueda en los que cada nueva solución no es necesariamente mejor que la inmediatamente anterior). Algunas veces aceptan soluciones no factibles como paso intermedio para acceder a nuevas regiones no exploradas.
- ❖ Son relativamente sencillos; todo lo que se necesita es una representación adecuada del espacio de soluciones, una solución inicial y un mecanismo para explorar el campo de soluciones.
- ❖ Son generales. Prácticamente se pueden aplicar en la resolución de cualquier problema de optimización de carácter combinatorio. Sin embargo, la definición de la técnica será más o menos eficiente en la medida en que las operaciones tengan relación con el problema considerado.
- ❖ La regla de selección depende del instante del proceso y de la historia hasta ese momento. Si en dos iteraciones determinadas, la solución es la misma, la nueva solución de la siguiente iteración no tiene por qué ser necesariamente la misma, en general, no lo será.

Aunque las soluciones que ofrecen las técnicas metaheurísticas no son las óptimas y, en general, ni siquiera es posible conocer la proximidad de las soluciones al óptimo, permiten estudiar problemas de gran complejidad de una manera sencilla y obtener soluciones suficientemente buenas en tiempos razonables.

A pesar de que estas técnicas son relativamente recientes, los campos de aplicación de las técnicas metaheurísticas son numerosos (electrónica, telecomunicaciones, electromagnetismo, etc.), y entre ellos se encuentra el de la Ingeniería de Organización.

Es por ello que el siguiente epígrafe tiene como meta principal el estudio, análisis y evaluación de la posibilidad de aplicación de los métodos heurísticos para el logro de la gestión integrada GP - GM.

1.5.3. Posibilidades de inclusión de los métodos heurísticos para la gestión integrada producción - mantenimiento.

De manera general los problemas de programación de la producción, fundamentalmente en configuraciones productivas caracterizadas por múltiples máquinas, constituyen problemas de optimización combinatoria muy difíciles; si se considera además el impacto de los fallos y las paradas por mantenimiento programado sobre la disponibilidad del equipamiento el grado de dificultad se hace mayor, convirtiéndose entonces en problemas muy difíciles en sentido estricto. Este hecho provoca la necesidad de adoptar métodos heurísticos o algoritmos aproximados como mecanismos de solución para obtener buenos resultados de manera eficiente.

Son varios los autores Ruiz et al. (2004) que han señalado las posibilidades que ofrecen ciertas heurísticas y metaheurísticas tales como: Búsqueda tabú, Algoritmo genético y Colonias de hormigas, para manejar simultáneamente tareas de producción y de mantenimiento, debido a que en cada una de las iteraciones realizadas por estos métodos es posible evaluar la asignación de las intervenciones de mantenimiento a partir del criterio de posponer el comienzo de los trabajos productivos, siempre y cuando ocurra que el tiempo de funcionamiento acumulado del equipo vaya a sobrepasar el intervalo de tiempo entre tareas preventivas para garantizar una cota mínima de fiabilidad.

El examen de la bibliografía dentro de esta área refleja que las propuestas fundamentales vinculadas a la utilización de los métodos heurísticos como estrategia de solución a modelos integrados de producción y mantenimiento preventivo se centran en los niveles inferiores de la planificación. De esta forma en el nivel táctico pueden citarse autores como Allaoui et al. (2012), quienes presentaron un modelo de programación lineal entero mixto como alternativa de solución al problema de cálculo del tamaño de lote de varios productos considerando restricciones de capacidad debido a tareas de mantenimiento, determinando paralelamente la duración del tiempo óptimo entre intervenciones preventivas. El objetivo fue minimizar una función que integra los costos de preparación, producción, almacenamiento, ruptura de stock y mantenimiento (preventivo y correctivo). Dada la complejidad del problema modelado se utilizó como estrategia de solución una heurística basada en el esquema de relajación lagrangeana.

Machani y Nourelfath (2012) diseñaron un modelo de programación no lineal entero mixto para generar un plan interrelacionado producción - mantenimiento en un sistema de estados o fases múltiples, de

manera que lograra minimizar una función de costo total que incluía las partidas correspondientes a producción, inventario, retrasos de los trabajos, preparación y mantenimiento. Dada la complejidad del problema los autores emplearon como estrategia de solución un algoritmo de búsqueda de vecindario variable.

Allaoui et al. (2012) diseñaron un modelo de programación en enteros mixto incorporando una heurística basada en relajación lagrangeana para investigar la interacción que se genera entre la demanda de la producción y la confiabilidad del equipamiento.

En el nivel operativo es posible encontrar varias propuestas diseñadas en base al tipo de configuración productiva existente. Si bien no es muy común encontrar en la práctica una configuración compuesta por una única máquina, los modelos de este tipo constituyen la base para el diseño de modelos de mayor complejidad. Varios investigadores se han centrado en este tipo de ambiente productivo, demostrando incluso el alto grado de dificultad de este tipo de problema que a primeras luces parece sencillo.

Algunos ejemplos de modelos para este tipo de configuración pueden verse en Chen et al. (2002), quienes abordaron este problema considerando periodos fijos de mantenimiento. Como métodos de solución desarrollaron un algoritmo de ramificación y acotamiento para problemas pequeños y una heurística para problemas de mayor tamaño.

Wang y Liu (2013) desarrollaron un modelo teniendo como objetivo minimizar el tiempo de completamiento total ponderado, e incluyendo en su diseño el riesgo de no efectuar mantenimiento preventivo antes de iniciar el procesamiento de cada producto. Como mecanismo de solución estos autores diseñaron un algoritmo de ramificación y acotamiento apoyado en el establecimiento de varias reglas de dominación que permiten reducir el número de posibles soluciones parciales a investigar.

Zahedi y Salim (2017) desarrollaron un modelo de programación no lineal, y un algoritmo para asistir el proceso de búsqueda de la solución, que permite determinar el número de lotes en cada corrida de producción, la secuencia de fabricación de los lotes dentro de cada corrida, además del número de intervenciones de PM y su secuencia, de manera que se minimice el tiempo de flujo total.

Liao et al. (2017) desarrollaron un modelo para la producción en pequeños grupos que consideró el efecto de aprendizaje y olvido, y la degradación que sufre el equipo, producto del uso, sobre el tiempo de procesamiento del producto, además del tiempo de preparación del equipo en función de la secuencia de fabricación establecida. La solución fue obtenida a partir de la implementación de un algoritmo genético.

En un ambiente productivo caracterizado por máquinas paralelas deben tomarse dos decisiones fundamentales: en primer lugar, aquella dirigida a establecer la asignación de recursos (máquinas) a los diferentes trabajos, y, posteriormente, la secuenciación de los trabajos en cada máquina, buscando optimizar alguna función relacionada con el tiempo de completamiento de estos y/o el costo total. Pinedo (2012) destaca el hecho de que cuando se trata este tipo de configuración productiva el makespan se

convierte en un objetivo de especial interés, puesto que en la práctica los programadores de producción intentan frecuentemente lograr un equilibrio adecuado en la utilización de los recursos. En este escenario la decisión respecto a la asignación de las máquinas a los diferentes trabajos posee la mayor importancia, considerando entonces que el tiempo de elaboración de cada uno de los trabajos estará influenciado por las posibles interrupciones debidas a fallos en el equipamiento. En este tipo de problema las estrategias de solución que comprenden algoritmos constructivos generalmente han sido diseñadas sobre la base de la conocida regla de despacho LPT (*Largest Processing Time*) y del algoritmo MULTIFIT propuesto por Coffman et al. (1978) como alternativa de solución al problema general del *Bin Packing*. Considerando dentro de este ambiente de producción el caso de *resumable jobs*, minimizando el makespan, se destacan las contribuciones aportadas por Lee et al. (2000). Este autor estudió dicha configuración productiva cuando las máquinas presentaban un periodo de no disponibilidad durante el horizonte de planificación (pudiendo ser el mantenimiento la causa de la no disponibilidad).

Otras contribuciones importantes en el contexto de máquinas paralelas minimizando el makespan corresponden a Xu et al. (2008) y Lee y Wu (2008). Los primeros estudiaron el problema que se genera cuando se considera un horizonte de programación relativamente largo que incluye varias intervenciones preventivas, y el tiempo entre estas intervenciones no es constante, pero sí determinístico. Presentaron un algoritmo de solución donde se combinan las reglas Best Fit Decreasing (BFD) y LPT, derivando algunos límites para el error que produce el algoritmo respecto al C_{max} óptimo en función del tiempo de procesamiento total y del tiempo de procesamiento mínimo de los trabajos. Sin embargo, realmente en este estudio el C_{max} no estaba referido al completamiento del último trabajo, sino al de la última actividad de mantenimiento preventivo que se ejecuta al completarse el último trabajo. Por su parte Lee y Wu (2008) consideraron un solo periodo de mantenimiento dentro del horizonte de planificación, con instantes de comienzo y terminación conocidos para cada máquina; sin embargo, el tiempo de procesamiento de los trabajos es función del instante en que este se inicia, alargándose en tanto más tarde se inicie el procesamiento del trabajo (*deteriorating jobs*). Desarrollaron dos heurísticas para modelos *resumable* y *no resumable jobs respectivamente*, que de manera general se estructuran en dos fases. En la primera se obtiene una solución inicial a partir de la regla LDR (*largest deterioration rate first*, la cual es análoga a LPT). En la segunda fase la solución inicial es mejorada mediante un conjunto de pasos que toman la idea general del algoritmo MULTIFIT, para de manera iterativa ir generando soluciones cuyo C_{max} sea inferior a un límite superior previamente calculado.

En los últimos años la mayoría de las estrategias de solución para este tipo de problema han estado basadas en algoritmos de búsqueda local, inteligencia artificial y en el uso de la simulación. En este sentido pueden citarse a autores como Mirabedini y Iranmanesh (2014) quienes aplicaron un algoritmo genético dinámico multiobjetivo y un esquema de optimización basado en enjambre de partículas como

métodos de solución alternativos para un modelo donde se buscaba minimizar el makespan, el costo de mantenimiento preventivo, la varianza total del retraso de los trabajos y la varianza total del costo de mantenimiento preventivo. Da et al. (2016) desarrollaron un algoritmo genético de tipo NSGA-II como método de solución para un modelo integrado que incluye máquinas paralelas uniformes, definiéndose como objetivos minimizar el costo de mantenimiento y el makespan, considerando que tanto el equipamiento como el tiempo de procesamiento de los trabajos se deterioran. Se consideró además un ciclo de mantenimiento flexible, una política de PM basada en el tiempo de operación del equipo (run time based maintenance) y la naturaleza aleatoria de los fallos.

En la literatura pueden encontrarse otras contribuciones desarrolladas para este tipo de configuración productiva pero dirigidas a la optimización de objetivos diferentes; tal es el caso de las presentadas por Lee et al. (2015) y Kumar y Kumar - Lad (2016). El primero abordó el caso de minimización de la tardanza total, considerando solo una actividad de mantenimiento preventivo a desarrollarse en cada máquina dentro de un periodo (ventana) de tiempo previamente conocido. En tanto Kumar y Kumar - Lad (2016) desarrollaron un modelo de optimización basado en simulación involucrando elementos de calidad al tomar en cuenta el costo de los productos rechazados. El objetivo era determinar el programa de asignación óptimo de lotes a máquinas, la secuencia de procesamiento de los lotes y el instante de inicio de cada actividad de PM, buscando minimizar una función de costo total.

En el caso de la configuración productiva de tipo flow shop la literatura recoge varios enfoques para dar respuesta a este problema, considerando múltiples aristas dentro de las que pueden mencionarse el número de máquinas del sistema, la posibilidad de mantener inventario en proceso y el hecho de que los trabajos sean de tipo *resumable* o *no resumable* (puedan continuarse, o tengan que ser reiniciados) luego de posibles interrupciones en el procesamiento. Inicialmente la mayoría de los estudios se concentraron al caso de dos máquinas en serie con un periodo de no disponibilidad en una de estas o en ambas, teniendo como objetivo minimizar el makespan ($C_{máx.}$). En este sentido Ma et al. (2010) realizaron una síntesis de varias de las contribuciones más importantes aportadas hasta ese momento por autores como Lee (1996), Allaoui et al. (2012) y Wang y Liu (2013), entre otros, en cuyas propuestas no se consideran restricciones de almacenamiento. De manera general estos autores demostraron el alto grado de dificultad del problema, concluyendo que el mismo se incluye dentro de la clase NP-hard; en algunos casos proporcionaron algoritmos basados en programación dinámica para obtener una solución exacta, mientras que en otros diseñaron heurísticas para alcanzar soluciones aproximadas o establecieron determinadas condiciones bajo las cuales los conocidos algoritmo y regla de Johnson producen soluciones óptimas o soluciones con un margen de error inferior a 1. Cuando cada una de las dos máquinas pueden tener un número arbitrario de periodos de no disponibilidad Blazewicz et al. (2005) desarrollaron dos heurísticas constructivas y una heurística de búsqueda local, basada en recocido simulado, para resolver el problema de manera aproximada.

En un ambiente caracterizado por más de dos máquinas pueden citarse a autores como Naderi et al. (2009), quien desarrolló dos variantes: en la primera, los tiempos de comienzo de las actividades de mantenimiento eran fijos, mientras que en la segunda estos tiempos de comienzo se suponían flexibles. El objetivo continuaba siendo minimizar el $C_{m\acute{a}x}$. Como estrategia de solución se diseñó un método híbrido que hizo uso de un algoritmo genético incorporando búsqueda tabú.

En la actualidad comienzan a desarrollarse modelos que incluyen una mayor cantidad de elementos del problema, por lo que la complejidad se hace mayor y como respuesta las estrategias de solución responden en lo fundamental al diseño de métodos heurísticos basados en algoritmos procedentes del campo de la Inteligencia Artificial (IA). En este sentido Khatami y Zegordi (2014) formularon un modelo de programación lineal entero mixto para representar el problema que surge al intentar establecer la permutación óptima de trabajos y el momento de iniciar las acciones de PM en cada máquina del sistema, teniendo por objetivos minimizar el *makespan* y la no disponibilidad del equipamiento. Se considera que el equipamiento está sujeto a fallos con función de densidad probabilística exponencial, y el mantenimiento preventivo es de tipo flexible al definirse como una de las variables de decisión del modelo el instante de comienzo de la intervención de PM, por lo que el intervalo de tiempo entre dos actividades de PM es variable. Como estrategia de solución se adoptó un algoritmo basado en sistema de colonias de hormigas donde la información se obtiene a partir del método NEH.

Xiao et al. (2015) propusieron una política de mantenimiento preventivo de grupo dentro de un programa integrado en este tipo de ambiente productivo, bajo la cual todas las máquinas del sistema son sometidas a PM cada cierto intervalo de tiempo fijo, considerando que todas las actividades preventivas tienen la misma duración a lo largo del horizonte de planificación y que el procesamiento de los trabajos puede ser interrumpido para emprender PM y más tarde reiniciado en ese punto (*resumable case/job*). Se consideró que el equipamiento estaba sujeto a fallos con función de densidad probabilística de Weibull. El objetivo era encontrar la secuencia de trabajos y el intervalo de tiempo óptimo para la política de PM de grupo que minimizara los costos de retraso y mantenimiento (preventivo y correctivo). El problema fue modelado mediante un modelo de programación en entero mixto y solucionado mediante un algoritmo genético elitista de claves aleatorias.

Feng et al. (2016) abordaron el problema cuando la configuración flow shop se inserta dentro de una célula de manufactura. El modelo diseñado buscaba obtener la secuencia de fabricación de las familias de productos, la secuencia de productos dentro de cada familia, así como el momento de iniciar cada actividad de PM, todo esto minimizando una función compuesta por la suma de los costos debido al retraso de los productos y a mantenimiento (preventivo y correctivo). Como método de solución se aplicó un algoritmo genético, incorporando una estrategia elitista luego de las operaciones de cruzamiento y mutación, y un operador de búsqueda local en cada iteración para mejorar la calidad de la solución.

El grado de complejidad de los problemas de programación integrada producción - mantenimiento se incrementa dentro de la configuración productiva de tipo job shop, pues sencillamente, considerando el mismo número de trabajos y máquinas que en una configuración flow shop, la propia naturaleza del flujo desordenado provoca que aumente significativamente el espacio de soluciones factibles, independientemente de las suposiciones que se puedan establecer sobre los periodos de no disponibilidad. Naderi et al. (2009) resumen algunas contribuciones desarrolladas dentro de este ambiente productivo dirigidas a minimizar el $C_{máx}$ en las que pueden encontrarse métodos heurísticos diseñados como estrategia de solución para este tipo de problema Zhou y Egbelu (1989), modelos de programación en enteros mixto solucionados a partir de métodos heurísticos Choi y Korkmaz (1997) y enfoques híbridos basados en algoritmos genéticos y reglas de despacho Cheung y Zhou (2001).

Naderi et al. (2009) consideraron el efecto que provoca el tiempo de preparación sobre la secuencia integrada en este tipo de ambiente productivo. Realizaron un estudio en el que aplicaron cuatro metaheurísticas para la solución de un conjunto de instancias del problema, teniendo en cuenta tres políticas de mantenimiento preventivo (en intervalos de tiempo fijos predeterminados, modelo de periodo óptimo de PM maximizando la disponibilidad del equipamiento, y mantener un umbral mínimo de confiabilidad para un periodo dado). Estas políticas fueron incluidas en las metaheurísticas híbridas Algoritmo Genético (GA) - Regla de Despacho *Shorter Processing Time*(GA - SPT), Recocido Simulado (SA) - Regla de Despacho *Shorter Processing Time* (SA - SPT), un algoritmo genético utilizado por Cheung y Zhou (2001), el cual fue adaptado a las características concretas del problema, y el Sistema Inmune presentado por Zhou et al. (2006) para la secuenciación en talleres job shop considerando los tiempos de preparación (IA-YZ). Luego de un análisis de varianza se concluyó que el método híbrido SPT-GA mostraba los mejores resultados.

Ben Ali et al. (2011) desarrollaron un algoritmo genético elitista multiobjetivo que proporciona un conjunto de soluciones Pareto - óptimas teniendo como metas minimizar el *makespan* y el costo total de mantenimiento. En esta propuesta la política de mantenimiento preventivo considerada supone que las intervenciones se realizan cada cierto periodo de tiempo fijo. Li y Ma (2017) consideraron la ocurrencia de recirculación en este tipo de ambiente productivo, dado por el hecho de que los trabajos pueden recibir procesamiento en una máquina por la que han pasado previamente. El problema fue representado mediante un modelo matemático no lineal, teniendo por objetivo minimizar el $C_{máx}$. Se adoptó una estrategia de PM a intervalo fijo y para la solución se diseñó un algoritmo híbrido en el que se combinan un método de optimización basado en enjambre de partículas y operadores propios de algoritmos genéticos para evitar que las soluciones queden "atrapadas" en un óptimo local.

Una de las configuraciones productivas en las que la programación de la producción se torna extremadamente compleja es en los denominados talleres flexibles orientados al proceso (*flexible job shop*), en los últimos años ha existido una tendencia a incorporar las restricciones vinculadas a la

disponibilidad del equipamiento dentro del problema de programación en configuraciones job shop flexibles (FJSSP) dado, de una parte, por reflejar en mayor medida la realidad de esta problemática a nivel de piso de taller y, de otra, por el alto grado de complejidad inherente a este problema (Rajkumar et al., 2011) y (Thörnblad et al., 2013).

En este contexto algunos autores han realizado contribuciones importantes, tal es el caso de Zribi et al. (2008) quienes desarrollaron un método heurístico de dos fases para resolver este tipo de problema considerando intervenciones de mantenimiento preventivo con instantes de comienzo y finalización previamente conocidos. En la primera fase se aborda la asignación mediante una heurística basadas en reglas de prioridad, posteriormente la solución es mejorada mediante la implementación de un algoritmo de búsqueda tabú; en la segunda fase se realiza la secuenciación mediante la aplicación de un algoritmo genético.(Gao et al., 2008; Rajkumar et al., 2010; Rajkumar et al., 2011) han abordado este tipo de problemas a partir de enfoques de solución basados en algoritmos híbridos evolutivos.

A pesar de la gran cantidad de técnicas desarrolladas para resolver el problema de programación de la producción y tareas de mantenimiento preventivo, incluyendo modelos matemáticos y metaheurísticas, no se puede afirmar que se ha encontrado la alternativa óptima para su tratamiento debido a las desventajas de todas estas propuestas, siendo una de ellas el hecho de que al ser tan sofisticados necesitan grandes esfuerzos para su codificación e implementación. En otros casos las propuestas desarrolladas poseen características específicas que raramente son aplicables a extensiones del problema original.

Los argumentos anteriores demuestran la alta complejidad que caracteriza al problema de programación integrada de órdenes de producción e intervenciones de mantenimiento preventivo, independientemente de la configuración productiva existente. Esto se agudiza aún más en la medida en que aumente el grado de detalle con el que se consideren los elementos que caracterizan la situación concreta que se presenta a nivel de piso de taller, de manera que el analista deberá sopesar el grado de precisión con que el modelo representa la realidad y el nivel de complejidad asociado.

1.6. Gestión de la producción y gestión del mantenimiento en empresas manufactureras cubanas.

1.6.1. La Gestión de la producción en empresas manufactureras cubanas

Varios son los autores que han estudiado el tema de la gestión de la producción en las organizaciones cubanas. Comenzando con este análisis, podemos citar al autor Cespón Castro (2005) quien desarrolló dos procedimientos que permiten a los directivos y profesionales de empresas manufactureras, seleccionar el tipo de sistema de gestión de la producción que más se ajusta a sus características específicas y a las condiciones en que las mismas operan. Dichos procedimientos han sido aplicados en 40 empresas nacionales; de ellas 12 pertenecen a la industria mecánica, 4 son pertenecientes a la industria textil, 6 empresas subordinadas a la industria de confecciones, y 28 empresas pertenecientes a la industria azucarera. Los resultados que se han estado obteniendo luego varios años de observaciones

permiten afirmar que los procedimientos propuestos satisfacen plenamente el rol para el que fueron concebidos.

Una idea interesante aportan Díaz Cazañas y Pérez Gómez (2007) cuando plantean que el área de Producción - Mantenimiento debe concebirse como un ente activo en la formulación e implementación de la estrategia empresarial debido a sus potencialidades para el logro de ventajas competitivas. Por su parte, y con relación a producción, se plantean las estrategias de focalización por procesos, focalización por productos y la filosofía Just in Time (JIT).

La autora Valdés Gutiérrez (2009) realiza un estudio enfocado en la necesidad de una gestión por procesos, afirmando que es un método de gestión empresarial que abarca los elementos esenciales para lograr satisfacer las expectativas de los clientes en un mercado altamente cambiante y competitivo. Concluyendo que las empresas cubanas tienen la imperiosa necesidad de cambiar sus métodos actuales de gestión, enfocándose hacia una gestión por procesos, eliminando así las barreras que actualmente existen en la gestión empresarial, para lograr la excelencia requerida y el desarrollo económico del país.

Siguiendo con este estudio León López (2015) pretende facilitar a las organizaciones empresariales de la producción y los servicios una herramienta que les permita evaluar el comportamiento de las Exigencias Técnico - Organizativas, así como los Principios de la Organización de la Producción, la que puede contribuir al incremento de la productividad y la eficiencia de las mismas, a partir de la optimización del proceso productivo. Teniendo en cuenta para la realización del trabajo, las nuevas exigencias de la economía nacional, las nuevas "reglas de juego" para la competitividad del sistema empresarial cubano; los nuevos paradigmas, así como las competencias exigidas a la fuerza de trabajo.

1.6.2. La Gestión del mantenimiento en empresas manufactureras cubanas

La gestión del mantenimiento en las organizaciones cubanas ha evolucionado significativamente en los últimos años, la autora De la Paz Martínez (2000) concluye que el sistema de mantenimiento más difundido en la industria cubana es el Sistema de Mantenimiento Preventivo Planificado (MPP) , definiendo además que no obstante a sus múltiples ventajas, el MPP es un sistema caro, con una alta carga de trabajo burocrático, que ha sido adaptado muchas veces sin los estudios necesarios a cualquier tipo de equipo por lo cual el gasto de piezas, materiales y otros recursos es considerable, evidentemente la economía cubana no resiste un sistema de mantenimiento industrial con tales desventajas. Es por ello que dichos autores coinciden en la creación de un Procedimiento General que a través de sus etapas permita revolucionar la organización del mantenimiento en las empresas cubanas, el cambio del sistema MPP a un nuevo sistema ventajoso debido a su alta flexibilidad, es posible y necesario en la industria cubana.

Los autores Raña González et al. (2010) realizaron una evaluación de la función del mantenimiento en empresas transportistas definiendo que los principales problemas que potencian un mal desarrollo de la

actividad de mantenimiento son: motivación del recurso humano, nivel de prevención y soporte informático.

Una visión creativa proponen Herrera Galán y Duany Alfonso (2016), logrando la implementación de una metodología para la gestión de mantenimiento asistido por computadora a través del desarrollo de un programa de mantenimiento. Basándose en el método de Kant, dicho análisis se realizó en la Planta de Productos Naturales del Centro Nacional de Investigaciones Científicas (CNIC), con el objetivo de lograr un profundo cambio a la situación actual, logrando así un mejor control, visualizando una visión clara del futuro y cumpliendo con las exigencias de buenas prácticas en un departamento de mantenimiento. El resultado del proceso de implementación de esta metodología es un departamento de mantenimiento eficiente, preparado para enfrentar cualquier proceso regulatorio.

Evidentemente son varios los autores que se han definido formas, sistemas y metodologías para realizar correctamente el proceso de mantenimiento en las diferentes entidades cubanas. En respuesta a estas necesidades y para ajustar y unificar las soluciones, permitiendo que las mismas logren un mayor beneficio, la Gaceta Oficial de la República de Cuba No. 42 del 3 de octubre del 2017, enviada al Ministerio de Industrias, dicta la Resolución No. 116/2017 con el fin de garantizar el correcto funcionamiento de las máquinas e instalaciones industriales que conforman los procesos productivos y permitir que estos alcancen su máximo rendimiento, resultando necesario establecer las indicaciones metodológicas con los requisitos técnico-organizativos mínimos del sistema de mantenimiento industrial que sirvan de base a las personas jurídicas para la elaboración de sus sistemas de gestión de mantenimiento industrial.

La resolución dispone de VII capítulos, el capítulo I nombrado "Disposiciones generales" cuenta con 4 artículos los cuales están dedicados a la elaboración, aprobación, premisas y principios que debe cumplirse en la correcta utilización del Sistema de Mantenimiento Industrial. El capítulo II denominado "Elaboración del Sistema de Mantenimiento Industrial", cuenta con 17 artículos en los cuales se especifica que el SMI está en correspondencia con las características específicas de cada entidad y toma como base el mantenimiento preventivo planificado. Describiéndose también las etapas, los planes que conforman el proceso de organización del SMI, la necesidad de elaboración de los libros de reparaciones y para la organización de estas reparaciones se establecen los diagramas de trabajo y las rutas críticas con el objetivo de mantener el control de ejecución de las actividades programadas en el tiempo. Mientras que el capítulo III denominado "Indicadores básicos de gestión", dispone de un solo artículo en el cual se definen cuales son los indicadores que deben cumplirse para una correcta aplicación del SMI. El capítulo IV tiene por nombre "De las reservas de equipos instalados en los procesos tecnológicos" contando con 5 artículos que desarrollan este tema. El capítulo V nombrado "Piezas de Respuesto" consta de 2 artículos los cuales tienen como objetivo controlar las piezas de respuestos, materias primas e insumos para la fabricación describiendo los requisitos que se deben

cumplir para garantizar una correcta gestión de las mismas. El capítulo VI recibe el nombre de “Lubricantes, uso, control y almacenaje” contando con 5 artículos que ejemplifican como proceder. El capítulo VII es nombrado “Documentación Técnica” incluyendo 5 artículos en los cuales se definen las principales responsabilidades y personal acreditado para el desarrollo de la normativa.

1.6.3. Consideraciones generales y propuestas metodológicas desarrolladas para la evaluación y mejoramiento del nivel de integración GP - GM en empresas manufactureras cubanas.

La autora Machado Moreno (2010) realizó una investigación dirigida a la evaluación del nivel de integración entre los subprocesos estrategia de operaciones (EO) - estrategia de mantenimiento (EM), identificando así oportunidades que permitan mejorar este nivel de integración, dicho estudio se desarrollo en la planta de embotellado de la cervecería “Antonio Díaz Santana” del municipio de Santo Domingo. Durante el desarrollo de la investigación se utilizaron métodos de investigación como el deductivo, la entrevista, además de técnicas como el Modelado Lingüístico Difuso Ordinal (MLDO) y el trabajo con expertos, obteniéndose una lista de oportunidades de mejora para elevar el nivel de integración EO - EM, y el diseño de una propuesta de un sistema informativo integrado teniendo en cuenta que esta fue identificada como una de las oportunidades de mejora críticas.

Un estudio similar fue desarrollado por Torres Gutierrez (2013) al realizar una investigación en la Subdivisión de Maquinarias Pesadas de la Empresa Planta Mecánica orientada a la aplicación de un procedimiento para evaluar el impacto de la gestión de mantenimiento sobre el desempeño de producción. Su estudio comienza con la identificación de los indicadores de la gestión del mantenimiento y las variables que caracterizan el desempeño de producción logrando así cuantificar su impacto. Enfocándose en el procedimiento elaborado por Orihuela García (2010) el cual permite evaluar el impacto de la gestión de mantenimiento sobre el desempeño de producción. Haciendo uso del método deductivo, la observación directa, entrevistas, y utilizando el software SPSS para la realización de análisis de regresión. Como resultado de la aplicación del procedimiento se logró establecer relaciones funcionales tales como: plazo de entrega - disponibilidad, costo de producción - costo directo de mantenimiento y calidad del producto - confiabilidad. Además se logró cuantificar el impacto de la gestión de mantenimiento sobre el desempeño de producción, en términos de las variables: plazo de entrega, calidad y costo.

Por su parte García Martínez (2014) plantea que la problemática de la integración producción - mantenimiento, a pesar de su reconocida importancia en la práctica empresarial, no se esta desarrollando de la mejor forma, debido a la notable brecha existente entre los procesos de toma de decisiones que tienen lugar en dichos subsistemas, lo que ocasiona resultados desfavorables dentro de las organizaciones.

El citado autor realiza en la subdivisión Maquinarias Pesadas, perteneciente a la empresa Planta Mecánica de Santa Clara un modelo para la gestión integrada Producción - Mantenimiento que sintetiza

los elementos fundamentales para lograr la coordinación requerida entre ambos subsistemas. Siendo el aporte fundamental de esta investigación el despliegue y aplicación de una heurística para secuenciar coordinadamente ordenes de producción y tareas de mantenimiento preventivo.

Los autores Díaz Cazañas y De La Paz Martínez (2016) diseñan un procedimiento para contribuir a la integración planificación de la Producción - planificación del Mantenimiento, a mediano plazo en la Empresa de Cepillos y Artículos Plásticos (CEPIL) Juan Antonio Márquez de Ciego de Ávila. Dicho procedimiento se sustenta en la idea de que lo más importante es lograr el cumplimiento de los objetivos de producción, considerando, paralelamente, que estos deben ser formulados teniendo en cuenta la capacidad de mantenimiento. De esta forma se logra un análisis bidireccional del tema correspondiente a la integración producción - mantenimiento, enfocando, por una parte, la gestión del mantenimiento hacia el logro de los objetivos de producción y, por otra, cuidando que las decisiones en producción sean coherentes con las exigencias y capacidad de mantenimiento. Los resultados fundamentales que aporta el procedimiento consisten en la identificación de las funciones del activo que aportan valor al sistema productivo, indicando si es conveniente realizar modificaciones en algunas de estas para elevar la eficacia; el establecimiento del sistema de mantenimiento más adecuado a cada modo de fallo; la necesidad de efectuar cambios dentro de la planificación táctica de la producción en caso de que posibles incumplimientos del plan de Mantenimiento presenten un impacto significativo sobre los objetivos de producción.

1.7. Conclusiones parciales

1. Mediante la revisión bibliográfica se pudo apreciar que son varios los autores que han planteado la necesidad de lograr un adecuado nivel de integración entre la Gestión de la Producción (GP) y la Gestión del Mantenimiento (GM), sin embargo, en la práctica, este tema no ha sido tratado lo suficiente, lo que justifica la realización de un estudio que permita evaluar el nivel de integración existente y detectar oportunidades para su mejoramiento.
2. El logro de la integración entre los subsistemas de producción y de mantenimiento requiere de un cambio de actitud entre los actores de ambas áreas, debiendo estos estar dispuestos a interiorizar la necesidad de que lo más importante es lograr el desempeño óptimo del sistema, en lugar de tratar de obtener metas departamentales individuales, aspecto que ocurre muchas veces en empresas manufactureras cubanas.
3. El desarrollo de programas integrados producción - mantenimiento constituye un problema de optimización combinatoria altamente complejo, por lo que los enfoques de solución dentro de esta área han estado dominados por la adopción de métodos heurísticos capaces de proveer soluciones satisfactorias en un tiempo razonable; tal es el caso de los denominados algoritmos de búsqueda local procedentes del campo de la inteligencia artificial.

Capítulo II: Evaluación de la criticidad del desarrollo de un estudio para el diagnóstico y mejoramiento del nivel de integración producción - mantenimiento en la UEB Centroplast.

Para el desarrollo del presente capítulo se plantea un procedimiento dirigido a evaluar la criticidad de un proyecto para el mejoramiento del nivel de integración entre los procesos de Gestión de la producción - Gestión del mantenimiento en la UEB Centroplast, con lo que se contribuye a justificar los esfuerzos requeridos para llevar a cabo el estudio mediante la sensibilización y apoyo del personal implicado y en consecuencia la disminución de la resistencia al cambio. Dicho procedimiento esta conformado por 5 etapas y 10 pasos los cuales se exponen a continuación en la figura 2.1:

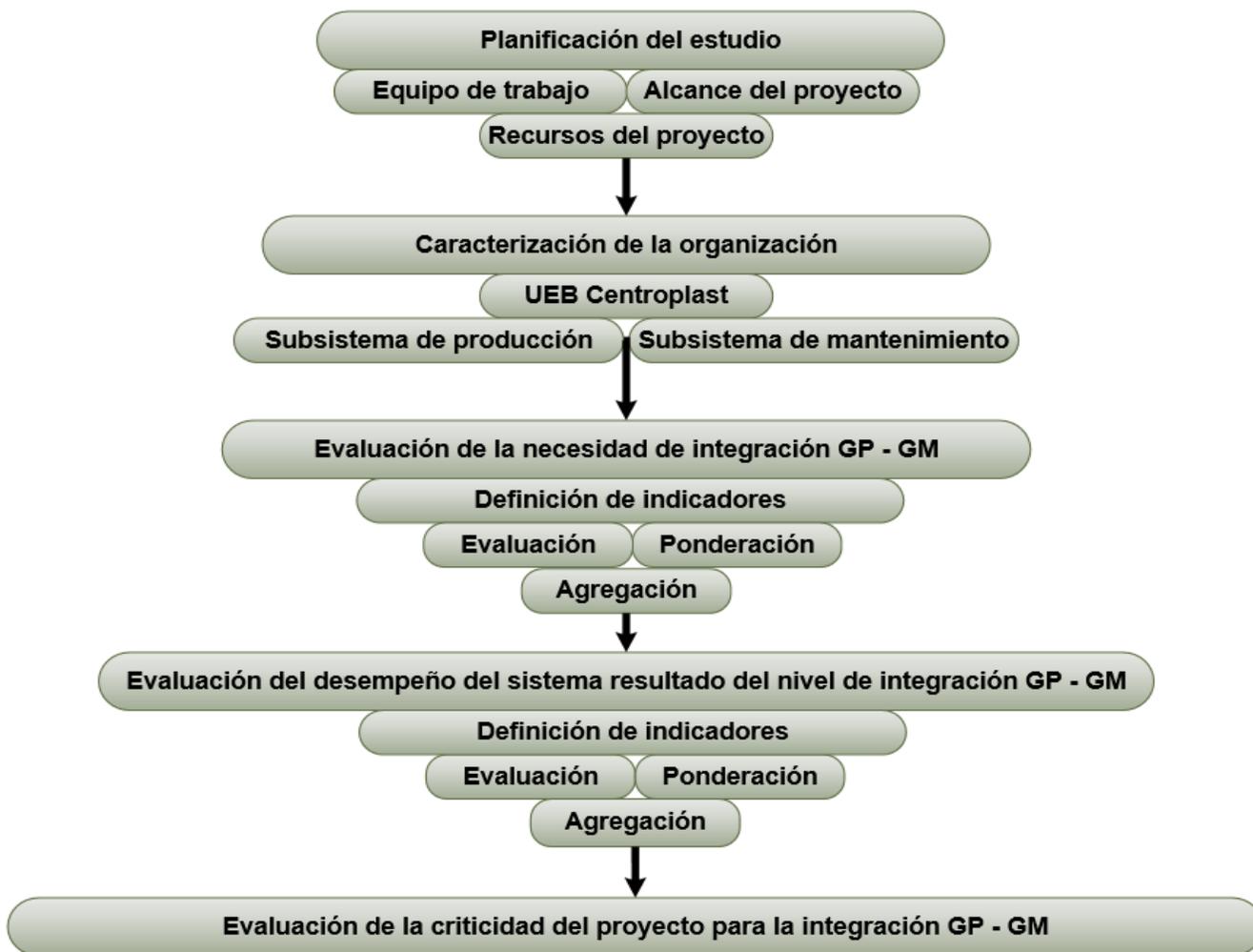


Figura 2.1. Procedimiento general para la evaluación de la criticidad del desarrollo de un estudio para el diagnóstico y mejoramiento del nivel de integración producción - mantenimiento en la UEB Centroplast.

Luego de conocer cada una de las etapas solo resta aplicarlas a la entidad objeto de estudio:

2.1. Etapa 1. Planificación del estudio

Incluye lo relacionado con el establecimiento del equipo de trabajo, la definición del alcance del proyecto para el diagnóstico y mejoramiento del nivel de integración GP - GM, así como los recursos necesarios

para su ejecución. Dentro de este último aspecto adquiere significativa importancia la selección de los expertos que proveerán la información necesaria para la evaluación de indicadores, la valoración de la factibilidad de alternativas de mejora, entre otros aspectos.

Paso 1. Establecimiento del equipo de trabajo

Los integrantes del equipo de trabajo deben tener un nivel de conocimientos adecuado sobre las características fundamentales de los objetos de estudio teórico y práctico. Se hace imprescindible entonces la presencia de operadores, mantenedores y alguna representación de la administración, con el nivel de autoridad requerido para apoyar la realización del estudio y coordinar los elementos necesarios para garantizar el desarrollo exitoso del mismo. Tendrán, entre otras, las funciones de identificar los procesos y actividades de la GP y la GM; organizar y dirigir el trabajo de los expertos, brindando la asesoría y capacitación necesarias en cuanto a terminología, técnicas y enfoques de gestión utilizados; e implementar cada una de las fases del procedimiento general. Teniendo en cuenta estas consideraciones el grupo de trabajo queda conformado de la siguiente forma:

- ❖ Director de la Empresa.
- ❖ Jefe del Departamento de Producción.
- ❖ Jefe del Departamento de Mantenimiento.
- ❖ Tutor de la presente investigación.
- ❖ Autor de la presente investigación.

Paso 2. Establecimiento del alcance del proyecto para la integración GP - GM

El estudio de la integración GP - GM puede comprender desde un diagnóstico dirigido a la identificación de oportunidades de mejoras parciales en ambos subsistemas, que permitan elevar el nivel de integración, hasta un estudio amplio y detallado que culmine con la implantación de un sistema de gestión integrado producción - mantenimiento. O de igual forma, el estudio puede enfocarse en la integración de uno o varios subprocesos de la GP y de la GM. Así mismo, el nivel de calidad que se establezca para las soluciones planteadas requerirá la adopción de técnicas de gestión más o menos sofisticadas, cuya implementación exigirá mayor o menor tiempo y esfuerzo.

Debido a que el estudio se centra en el nivel operativo dentro del enfoque jerárquico de la planificación de la producción, donde una de las decisiones fundamentales que deben tomarse se refiere a la asignación de órdenes de trabajos (recursos) a los diferentes puestos de trabajo (máquinas), se decidió evaluar solamente el nivel de integración entre los subprocesos de programación de la producción y programación del mantenimiento.

Paso 3. Definición de los recursos del proyecto para la integración GP - GM

Se requerirá de recursos humanos, materiales, financieros, informativos y tecnológicos, cuya magnitud estará en correspondencia, lógicamente, con su alcance. Entre estos se considera los recursos humanos como los de mayor importancia para el éxito. Aquí es importante distinguir entre grupo o

equipo de trabajo, definido anteriormente, y grupo de expertos, cada uno con sus correspondientes funciones y requisitos. Específicamente el grupo de expertos tendrá a su cargo la caracterización de la dinámica de los indicadores propuestos y su estado con relación a empresas líderes o similares, la evaluación y ponderación de indicadores y otros ítems que se precisen, la identificación de las causas de los problemas detectados, y la evaluación de la efectividad de las alternativas de solución que se generen. De lo anterior se deduce que el panel de expertos deberá constituirse por trabajadores de gran experiencia, que muestren un nivel de compromiso alto con relación al proyecto para la integración y asuman una actitud imparcial, eliminando las preferencias y siendo objetivos en los análisis. Su número quedará determinado a partir de la expresión utilizada por Hurtado de Mendoza (2003):

$$n_e = \frac{p(1-p)k}{i^2}$$

donde:

i - Nivel de precisión deseado

p - Proporción estimada de errores de los expertos

k - Constante asociada al nivel de confianza elegido

En la expresión se sustituyen los valores de $K = 3,842$ (de acuerdo con un nivel de confianza del 95%), $p = 0,02$ e $i = 0,09$. Luego de efectuarse los cálculos se obtiene que el grupo de expertos deberá estar integrado por 9 miembros, los cuales se mencionan a continuación:

- ❖ Director de la planta.
- ❖ Especialista de producción (Planificadora de la producción).
- ❖ Jefe del departamento de mantenimiento.
- ❖ Jefe del departamento de producción.
- ❖ Especialista de mantenimiento.
- ❖ Jefe del departamento de control de la calidad.
- ❖ Verificadora de la calidad.
- ❖ Jefe de brigada.
- ❖ Recursos humanos

En relación a los recursos informativos y tecnológicos podemos mencionar que el subsistema de producción hace uso del Microsoft Access, herramienta de Microsoft Office que permite relacionar y trabajar con varias bases de datos, lo cual permite un mayor control de la información, mientras que el subsistema de mantenimiento hace uso del programa GMI (Gestor de mantenimiento integral), el cual en la actualidad está deshabilitado debido a que la entidad está en un proceso de cambio mediante el cual se instalará el programa SGestMan (Sistema integral para la gestión de mantenimiento asistido por computadoras).

2.2. Etapa 2. Caracterización del sistema Producción - Mantenimiento

Aunque el levantamiento de la información relevante para el proyecto de la integración GP - GM se centra fundamentalmente en los subsistemas de producción y de mantenimiento es importante conocer las características fundamentales de la organización en la que se enmarca el estudio, las cuales condicionarán en gran medida una serie de valoraciones que deberán realizar los implicados en el proyecto en lo que refiere a efectividad del desempeño de indicadores, pertinencia de posibles alternativas de mejora, entre otros aspectos.

Paso 1. Caracterización general de la organización

En esta etapa se identificarán las características generales de la organización tales como: misión, visión, sector a que pertenece, productos y/o servicios que ofrece, entre otras. Se realizará además una caracterización de los subsistemas de producción y de mantenimiento, por ser esta las áreas involucradas directamente en la investigación.

Es importante antes de realizar este análisis destacar que la INPUD “1ero de Mayo”, esta integrada por 12 unidades empresariales de base (UEB), las cuales tienen bien definidas sus metas y objetivos, nuestro trabajo se enfoca precisamente en la UEB Centroplast, es por ello que a continuación se desarrolla una caracterización de la misma, incluyendo también una caracterización para los subsistemas de producción y mantenimiento respectivamente.

Caracterización de la UEB Centroplast.

La UEB Centroplast forma parte de la “Industria Nacional Productora de Utensilios Domésticos (INPUD) 1ro de Mayo” que fue fundada por el Comandante Ernesto Guevara el 24 de Julio de 1964.

Centroplast fue fundada en el año 1978 con una tecnología y diseño italiana. En sus inicios no funcionaba como unidad estratégica, sino que en lo fundamental producía todos los componentes plásticos del refrigerador, las ollas de presión y cocinas de gas y de queroseno. La UEB Centroplast decide retirar de la producción, por los altos costos de reparación y mantenimiento el viejo parque de máquinas de tecnología italiana y española adquiridas en los inicios. Desarrollando una inversión en la cual adquiere 7 máquinas de inyección de nacionalidad china y un nuevo equipo de procedencia india el cual requiere una mejora del sistema de enfriamiento de la industria, es por ello que se monta una nueva torre de enfriamiento con más capacidad, además para propiciar que el mismo trabajase eficientemente se cambió la ubicación de los equipos cuidando siempre que no se afecte el flujo de producción. Pero esta no fue la última remodelación de la entidad, ya que en la actualidad se compraron 4 máquinas de inyección de nacionalidad china representando estas la inversión más actual de la planta.

La explotación y transformación de resinas, mediante el proceso de inyección se desarrolla en la UEB Centroplast. La planta cuenta con 12 máquinas inyectoras que son indispensables para realizar la producción de piezas de diferentes tamaños y forma.

La UEB Centroplast tiene como **misión** la producción de artículos plásticos destinados al mercado industrial con óptima calidad y una amplia gama de prestaciones, destacándose en la protección de sus productos, para ello cuenta con un personal calificado y tecnología requerida.

La UEB Centroplast tiene como **visión** ser líder en las producciones de artículos plásticos contando con el personal calificado, la tecnología y las herramientas necesarias para producir la amplia gama de artículos demandados; los productos elaborados en la misma cubren gran parte de la demanda del país ya siendo conocidos en el mercado por sus precios competitivos, calidad y diferencias marcadas.

La UEB Centroplast tiene como **objeto social** producir y comercializar de forma mayorista artículos domésticos de uso industrial y sus accesorios, herramientas, envases y artículos plásticos, material para instalaciones eléctricas, luminarias, producciones especializadas para infraestructura y la gastronomía del turismo, así como piezas de repuesto de sus producciones, en moneda nacional y divisas, según nomenclatura aprobada por el Ministerio del Comercio Interior.

Los productos fundamentales de la UEB en los últimos cinco años son los siguientes:

- ❖ Piezas para el programa de la vivienda.
- ❖ Piezas para el programa de ahorro energético.
- ❖ Componentes plásticos de ventiladores, refrigeradores, tomacorrientes e interruptores.
- ❖ Cubeta alba de 4 y 10 litros.

El principal competidor de la planta es la EMI Che Guevara.

La UEB Centroplast está estructurada de la siguiente forma: Un director de la planta al que se le subordinan los diferentes departamentos: calidad, técnico productivo, producción, recursos humanos y la brigada de producción. El régimen de trabajo de la misma es de tres turnos rotativos de lunes a viernes en el área productiva y de un turno en las áreas no productivas. Cada turno representa una brigada integrada por 12 operarios, cada uno laborando en una máquina, además esta brigada también incluye un auxiliar de línea, un controlador de la calidad, un ajustador de línea y un jefe de brigada. El sábado trabaja un turno del área productiva y le corresponde el mismo al turno de trabajo de 7:00 AM a 3:00 PM en el día anterior.

La plantilla de trabajadores de la planta está conformada de la siguiente forma:

Categoría Ocupacional	Aprobada	Cubierta	Vacante	% de Utilización
Dirigentes	1	1	0	100%
Técnicos	5	4	1	80%
Administrativos	0	0	0	0%
Servicio	2	2	0	100%
Obreros	57	57	0	100%
Total de Trabajadores	65	64	1	98%

Una vez presentadas las principales características de la entidad objeto de estudio práctico, se centrará la atención en los subsistemas hacia los cuales va dirigida la presente investigación.

Paso 2. Caracterización del subsistema de producción en la UEB Centroplast.

Las prioridades competitivas en la planta están enfocadas a la optimización de la calidad como principal estrategia; además de desarrollar el producto con rapidez para garantizar entregas oportunas; sin descuidar los costos los cuales son caracterizados por no tener gran variabilidad.

Excluyendo la maquinaria adquirida recientemente los equipos con que se cuenta como mínimo tienen 10 años de explotación, presentando un nivel de deterioro a considerar, debemos señalar que a los mismos no se le explota la posibilidad de trabajo en régimen automático afectando considerablemente la capacidad instalada.

La producción en la entidad se realiza por pedidos, la forma de pago que actualmente ejerce la planta es el pago por resultado. Se cuenta con una estructura organizativa para analizar los principales problemas que se puedan presentar en producción. En la planta se cuenta con un almacén intermedio en el cual se almacenan las producciones diarias, el cual cuenta con todos los recursos necesarios para lograr la correcta protección del producto terminado final, pero los encargados de llevar este control de inventario son los compañeros de la UEB Logística, los cuales si están especializados en las actividades de almacenamiento.

Otro elemento importante a tratar es la mala gestión de mantenimiento a los equipos. No se tiene una cultura de mantenimiento planificado, ni de stop de piezas de repuestos que eviten paradas prolongadas por roturas imprevistas.

Los principales problemas que presenta el área de producción son: roturas de los equipos, problemas eléctricos (bajos voltajes) y escasos de piezas de repuestos.

Paso 3. Caracterización del subsistema de mantenimiento en la UEB Centroplast

Para la caracterización del subsistema de mantenimiento se toma como base la metodología utilizada por Borroto Pentón et al. (2015), en la cual se divide la gestión del mantenimiento en 9 áreas para su análisis: administración del mantenimiento, servicios a terceros, personal de mantenimiento, gestión de piezas de repuesto, evaluación y control, infraestructura, seguridad, medio ambiente y aseguramiento de la calidad, pues se considera proporciona un análisis estructurado e integral del área. La elaboración previa de las preguntas, su calidad y nitidez contribuirá a desarrollar un eficiente proceso de recopilación de información.

Administración del mantenimiento:

Las acciones de mantenimiento que se ejecutan en la planta son contra averías, es decir, se aplica un mantenimiento correctivo a los equipos una vez que estos fallan. Los encargados de aplicar este mantenimiento son los obreros dedicados directamente al mantenimiento, es decir, los compañeros de la UEB Mantenimiento, lo que ocurre algo particular los obreros de mantenimiento rotan en brigadas con

los diferentes turnos de trabajo. Es inaceptable que contándose con una UEB especializada en mantenimiento, las acciones que se realizan al equipamiento sean aplicadas una vez ocurra un fallo, aspecto que demuestra que se está llevando una mala administración del mantenimiento en la entidad. A continuación, se relaciona la plantilla del personal de mantenimiento de la entidad

Categoría Ocupacional	Aprobada	Cubierta	Vacante	% de Utilización
Dirigentes	4	3	1	75%
Técnicos	13	10	3	77%
Administrativos	1	1	0	100%
Servicio	2	1	1	50%
Obreros	73	65	0	89%
Total de Trabajadores	93	80	13	86%

Servicios a terceros:

En la UEB se hizo uso de la estrategia de tercerización, pues para la instalación de las máquinas más modernas se requirió la cooperación entre las organizaciones Maquimotor y Haier para el montaje y puesta en funcionamiento de las mismas, las cuales todavía tienen vigente un periodo de garantía de 5 años, fuera de esta situación todas las actividades relacionadas con el mantenimiento son asignadas a la UEB Mantenimiento de la empresa y su personal es el encargado de efectuarlas.

Personal de mantenimiento:

Una brigada de mantenimiento está integrada por un mecánico, un electricista y un jefe de brigada. Existe un buen nivel de motivación dentro del personal de la planta a pesar de que las condiciones de trabajo no son satisfactorias en su generalidad. La plantilla de mantenimiento se encuentra definida pero no está cubierta en su totalidad, el salario medio es bajo y su trabajo se dificulta por la obsolescencia de las máquinas.

Gestión de piezas de repuesto:

Este es uno de los elementos más importantes a tratar en la planta, ya que se conoce la escases y necesidad de piezas de repuesto que tiene la entidad, ya que no existe una correcta gestión de stock de piezas de repuesto, y no se evalúa ni se conoce con exactitud cuál es el costo de los repuestos de cada equipo, y tampoco se realizan compras de piezas de repuesto para garantizar su existencia en la planta para la hora que sea necesario su uso.

Evaluación y control:

En la planta está definido como norma, la evaluación del mantenimiento como un aspecto importante que se debe cumplir, pero sucede que las propias condiciones de la producción en ocasiones generan que las acciones de mantenimiento sean ejecutadas una vez que ocurre una avería contribuyendo así al incumplimiento del programa de trabajos programados de mantenimiento. A demás de que no se tiene

cuantificado el tiempo de producción perdido por fallos de los equipos, ni tampoco se hace uso de indicadores para realizar la evaluación y control del mantenimiento.

Infraestructura:

La planta está integrada por 12 máquinas de inyección, se sabe que cada máquina tiene su diseño de reparación. Existe una UEB dedicada al mantenimiento exclusivamente, la cual está integrada por varios talleres, ejemplo: taller de maquinado, de enrollado, etc. Por lo que podemos afirmar que se cuenta con una estructura física relativamente buena. Aunque ha aumentado la disponibilidad de herramientas, aún no se cuenta con el utillaje necesario para efectuar el trabajo con la calidad deseada. Es muy frecuente la falta de materiales para ejecutar las reparaciones. En ocasiones cuando ocurre una avería no hay existencia de la pieza de repuesto que se necesita y es necesario ir al torno a fabricarla, actividad que atrasa mucho más la producción, ya que hay que esperar a que se realice el proceso de torneado, y conformado exacto de la pieza.

Seguridad:

En la UEB existe un plan de seguridad contra cualquier riesgo laboral, los trabajadores tienen conocimiento de dicho plan y saben cómo deben actuar ante cualquier situación de emergencia, los trabajadores conocen los riesgos a los que están expuestos durante la jornada laboral, la empresa cuenta con todos los medios de protección individual requeridos, y se exige a los trabajadores su uso obligatorio.

Medio ambiente:

En la planta existe un plan medioambiental, el cual se lleva a cabo correctamente ya que el personal actúa de acuerdo al mismo, en general se respetan las políticas medioambientales.

Aseguramiento a la calidad:

En la planta existe el código de prácticas de higiene, y se conoce que el personal aplica dicho código, además se conocen las reglas de manipulación de los procesos para lograr su inocuidad y se capacita al personal en materia de limpieza y desinfección.

Los principales problemas que presenta el área de mantenimiento son: violaciones del MPP (Mantenimiento preventivo planificado) y escases de herramientas y materiales para realizar el mantenimiento.

2.3. Etapa 3. Evaluación de la necesidad de integración GP - GM

Esta etapa requiere de la valoración de un conjunto de elementos de orden técnico - organizativo que, traducidos en indicadores, permitan conformar un índice general que caracterice cuán necesario resulta mantener un nivel de integración adecuado entre los subsistemas de producción y mantenimiento; por lo que las tareas dentro de la misma consisten en la definición de dichos indicadores, y su evaluación, ponderación y agregación en un índice general denominado necesidad de integración GP - GM (NIPM).

Paso 1. Definición de los indicadores de necesidad de integración GP- GM

La necesidad de integración GP - GM constituye una realidad para cualquier entidad que tenga como objetivo colocarse como una de las potencias más fuertes en el mercado, esta necesidad de integración puede ser medida mediante el uso de varios indicadores que nos posibilitan una mayor calidad y comprensión del tema de estudio tratado. Concretamente, los indicadores definidos son los siguientes. En el Anexo 5 se presenta una breve fundamentación de cada propuesta.

N1. Nivel de automatización/mecanización.

N2. Enfoque hacia la competitividad.

N3. Tasa de intervenciones que deben realizarse con máquina parada.

N4. Complejidad de las reparaciones.

N5. Impacto de los tiempos de parada por mantenimiento sobre los objetivos de producción.

N6. Proporción de insumos que resultan comunes a producción y a mantenimiento.

N7. Nivel de servicio técnico requerido por el equipamiento.

N8. Reconocimiento de la necesidad de gestionar por procesos.

N9. Disponibilidad de recursos para el mantenimiento.

N10. Existencia de equipos redundantes.

Paso 2. Obtención del indicador general de necesidad de integración GP - GM (NIPM)

El NIPM será obtenido a partir de la agregación de los indicadores anteriores, previamente evaluados y ponderados. Una vez obtenido el resultado del NIPM el equipo de trabajo deberá decidir si resulta conveniente o no continuar el estudio. En caso afirmativo se pasaría a la Etapa 4, de lo contrario se evaluaría la posibilidad de continuar monitoreando la evolución de los indicadores anteriores en caso de que se prevean modificaciones significativas en la organización que conduzcan a una mayor necesidad de integración entre los procesos bajo análisis.

Considerando que en más de una etapa del procedimiento general se realizarán evaluaciones, ponderaciones y agregaciones de atributos (indicadores), se decidió elaborar un procedimiento específico para conducir estas actividades de manera eficiente. Una de sus características es que, para enfrentar el proceso de evaluación de atributos, en el caso de que la información se presente con cierto nivel de incertidumbre o vaguedad, recurre al Modelado Lingüístico Difuso Ordinal, un método que, de acuerdo al criterio de varios autores (Porcel Gallego, 2005; Mata Mata, 2006; Espinilla, 2013), ha brindado buenos resultados en el tratamiento de indicadores cualitativos. Seguidamente se muestra su diseño:

2.3.1. Procedimiento específico para la evaluación, ponderación y agregación de indicadores dentro del proyecto de diagnóstico y mejoramiento del nivel de integración GP - GM

Este procedimiento fue estructurado en tres módulos (ver figura 2.2), el primero dedicado a la evaluación de indicadores, el segundo a la obtención de los pesos y el tercero a la agregación, con vistas a obtener

el indicador general que corresponda, según la etapa del procedimiento general en la que se esté. Los pasos para su aplicación se detallan a continuación:

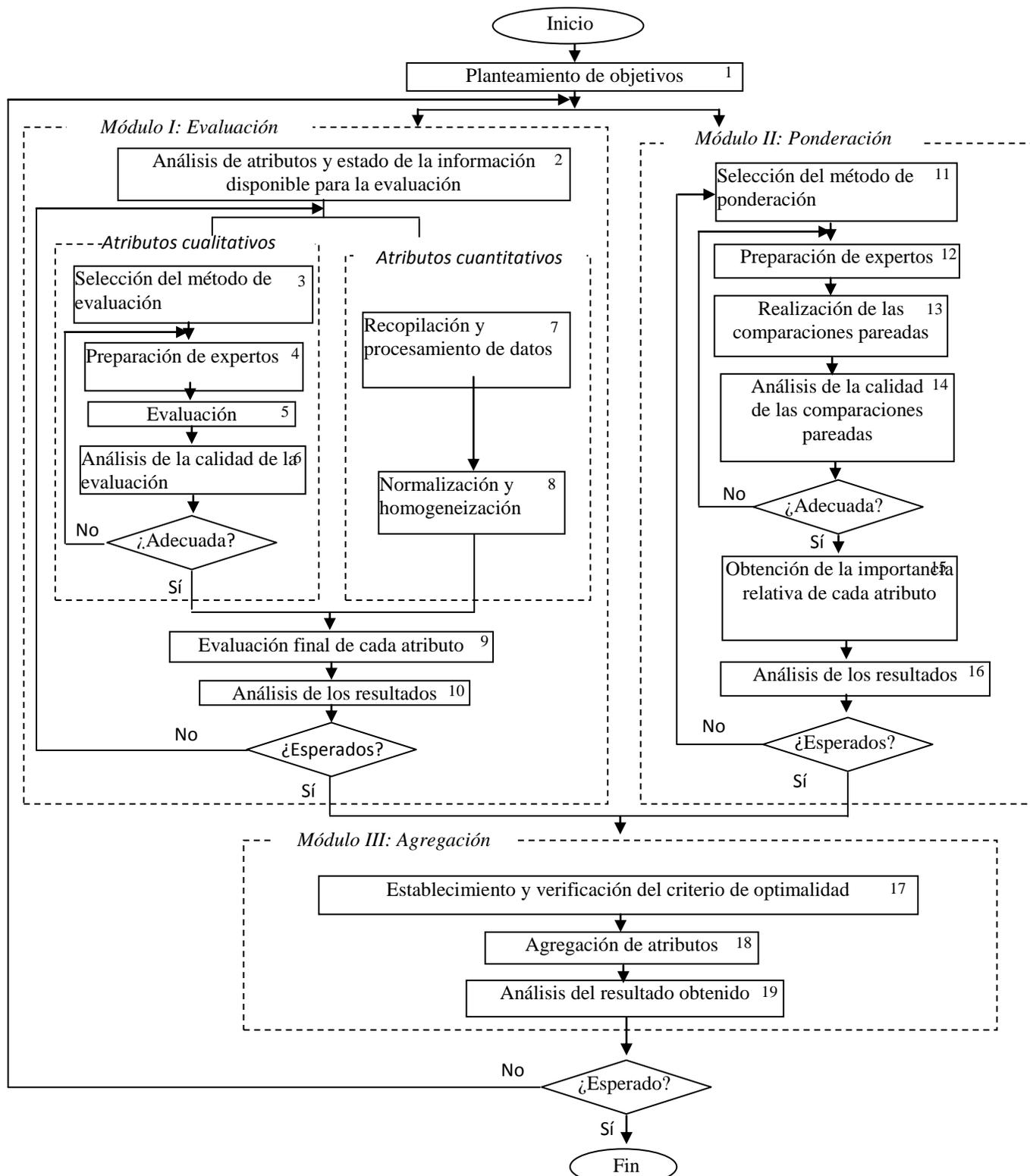


Figura 2.2. Procedimiento propuesto para la evaluación, ponderación y agregación de indicadores dentro del proyecto de diagnóstico y mejoramiento de la integración GP - GM.

Paso 1. Planteamiento de objetivos

En este paso se define la política que va a regir la actividad dentro cada uno de los módulos del procedimiento específico, definiéndose cuestiones tales como los valores objetivos o umbrales establecidos para ciertos parámetros que permiten cuantificar la eficacia de los resultados obtenidos en la evaluación y ponderación de indicadores.

En este estudio se propone que el nivel de consenso logrado por los expertos durante la evaluación de indicadores sea de al menos alto, y que el nivel de consistencia mantenido en el momento de realizar las comparaciones pareadas de atributos sea mayor o igual a 0.80.

Módulo I: Evaluación

Toma como entradas los indicadores establecidos, la información necesaria para su evaluación y algún tipo de software para facilitar los cálculos. Los procesos fundamentales que incluye son el de evaluación y el de análisis de la calidad de la evaluación. Ofrece como salida un conjunto de atributos (en este caso indicadores) evaluados según su estado en el objeto de estudio práctico.

Paso 2. Análisis de las características de los indicadores a evaluar y del estado de la información disponible para su evaluación

El equipo de trabajo deberá analizar cuáles de los indicadores son susceptibles de ser evaluados de manera cuantitativa y cuáles de manera cualitativa, en correspondencia con la naturaleza de estos, pues, por ejemplo, en el caso específico del grupo de indicadores medidores de la necesidad de integración GP - GM, algunos como enfoque hacia la competitividad difícilmente podrán ser cuantificados. Por otra parte, la ausencia de datos cuantitativos provoca el hecho de que indicadores de tal naturaleza tengan que ser evaluados de manera cualitativa.

Paso 3. Selección del método de evaluación de indicadores cualitativos

Se propone el modelado lingüístico difuso ordinal (MLDO) dada sus bondades para el tratamiento de la vaguedad e incertidumbre existentes en la información lingüística aportada por los expertos (Herrera et al., 1996a; Xu, 2004; Porcel Gallego, 2005; Mata Mata, 2006; Cabrerizo et al., 2008; Carrasco, 2011; Rodriguez et al., 2012; Espinilla, 2013).

Aunque autores como Porcel Gallego (2005), Mata Mata (2006) y Cabrerizo et al. (2008) reconocen la utilidad del empleo de las denominadas jerarquías lingüísticas, en las que coexisten escalas con diferente granularidad; en este trabajo se considera suficiente utilizar una única escala formada por un conjunto de siete términos o etiquetas lingüísticas, estas son: *nulo (n)*; *muy bajo*; *bajo (b)*; *medio (m)*; *alto(a)*; *muy alto (ma)*; *perfecto (p)*, tal y como se muestra en la figura 2.3.

n mb b m a ma p

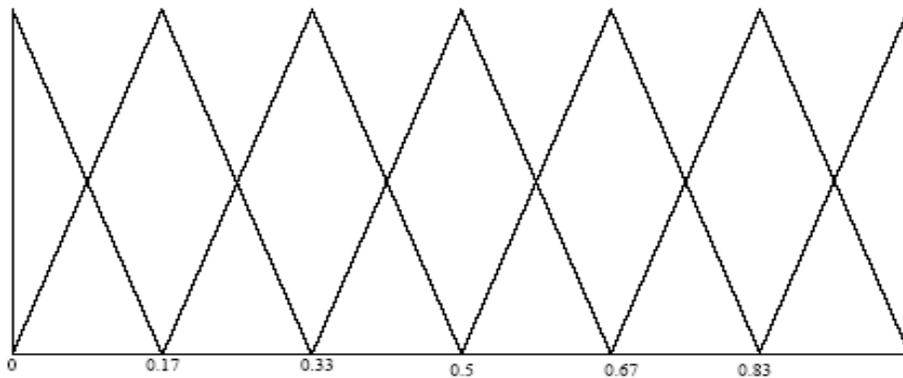


Figura 2.3: Escala utilizada para la evaluación de indicadores cualitativos. Fuente: Porcel Gallego (2005) y Mata Mata (2006).

Para el establecimiento de la semántica del conjunto de términos lingüísticos de la escala se propone una función de pertenencia ($m_A(x)$) de tipo triangular, la cual queda expresada, analíticamente, a partir de la expresión 1 (Chen, 1996; Facchinetti y Ricci, 2004; Porcel Gallego, 2005; Cabrerizo et al., 2008). De manera que estos términos se representarán mediante números difusos triangulares con parámetros a_1 , a_2 , y a_3 , según se muestra en la Figura 2.3.

$$m_A = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq a_1 \\ (x - a_1) / (a_2 - a_1) & \text{si } a_1 \leq x \leq a_2 \\ (a_3 - x) / (a_3 - a_2) & \text{si } a_2 \leq x \leq a_3 \\ 0 & \text{si } x \geq a_3 \end{cases} \quad (1)$$

Denotando por S al conjunto de términos o etiquetas lingüísticas se tendría lo siguiente:

$S_0 = \text{nulo}$ $S_1 = \text{muy bajo}$ $S_2 = \text{bajo}$ $S_3 = \text{medio}$ $S_4 = \text{alto}$ $S_5 = \text{muy alto}$ $S_6 = \text{perfecto}$

Paso 4. Preparación del grupo de expertos para las evaluaciones cualitativas

El grupo de trabajo deberá explicar detalladamente a los expertos el contenido de cada indicador para lograr una correspondencia adecuada entre cada uno de los términos lingüísticos del conjunto S y los posibles estados del sistema, caracterizados por el indicador que se esté evaluando. Para esto se apelará al conocimiento de los expertos sobre el comportamiento de los indicadores en organizaciones similares o su evolución en la propia empresa.

Paso 5. Evaluación de indicadores cualitativos

Cada experto asignará a cada indicador la etiqueta lingüística del conjunto S que, según su criterio, represente con mayor objetividad su estado dentro de la organización. El equipo de trabajo deberá asesorar a los expertos en caso de que se presente alguna duda respecto a la semántica de los indicadores, minimizando así las fuentes de sesgo en la evaluación.

Paso 6. Análisis de la calidad de la información referida a las evaluaciones cualitativas

En este primer módulo del procedimiento específico la calidad de la información se analizará a partir de la cuantificación del nivel de consenso logrado por los expertos durante la evaluación de indicadores

cualitativos. Herrera et al. (1996b) proponen una metodología para determinar el consenso en un contexto lingüístico, basada en el cálculo de un parámetro denominado relación de consenso (RC) y, posteriormente, la aplicación de un cuantificador lingüístico sobre el valor numérico obtenido. Sin embargo aunque esta metodología permite evaluar la distancia entre las valoraciones emitidas por cada experto y una medida de la opinión colectiva, no considera cuán “lejos” pueden estar entre sí los términos lingüísticos emitidos por el propio experto, por lo que la relación de consenso sería la misma si dentro del grupo de expertos existieran evaluaciones de mb y ma o de a y ma , siendo estas dos últimas etiquetas consecutivas según la escala utilizada por lo que, en ese caso, el nivel de consenso debería ser mayor. Por otra parte, se observa que cuando coexisten términos lingüísticos consecutivos con cardinalidades superiores a 1 la relación de consenso produce un nivel de consenso bajo al utilizar el cuantificador lingüístico *muchos*, lo cual manifiesta falta de coherencia con los resultados de la evaluación, si se tiene en cuenta la cercanía de los términos lingüísticos, dado por el hecho de ser valores consecutivos dentro de la escala propuesta. A continuación, se propone una metodología, basada en la referida anteriormente, que intenta superar en alguna medida sus deficiencias. Sus pasos son los siguientes:

1. Para cada indicador (atributo) j obtener un vector $V_{s_i}^j$ cuyas componentes son las etiquetas lingüísticas $s_i \in S$ establecidas por el grupo de expertos como medida de su evaluación.
2. Obtener la cantidad G de subgrupos de expertos que se forman dentro del grupo de acuerdo a las coincidencias en la evaluación del atributo j .

$$G = \# (V_{s_i}^j) \quad \forall s_i \in S$$

Donde $\#$ representa la cardinalidad o número de componentes del vector $V_{s_i}^j$

3. Para cada etiqueta lingüística $s_i \in S$ del vector $V_{s_i}^j$ obtener el número de expertos $m_{s_{ij}}$ que coincidieron en asignarla como medida de evaluación del atributo j .
4. Obtener la proporción de expertos ($P_{s_{ij}}$) que coincidieron en asignar la etiqueta lingüística s_i como medida de la evaluación del atributo j .

$$P_{s_i} = \frac{m_{s_{ij}}}{m} \quad (2)$$

Siendo m el número de expertos

5. Calcular la relación de consenso a partir de la expresión siguiente:

$$RC_i = \begin{cases} 1 & \text{si } G = 1 \\ (\sum_{j=1}^G p_{s_i}^2) & \text{si } G = 2 \text{ y los 2 términos lingüísticos obtenidos son consecutivos} \\ (\sum_{j=1}^G p_{s_i}^2) \times \left(\frac{d_{\min}}{a}\right)^{\min [P_{s_{ij}}]} & \text{si existen términos lingüísticos no consecutivos} \end{cases} \quad (3)$$

Donde:

RC_i : Relación de consenso lograda por los expertos al evaluar el indicador j ;

P_{sij} : Proporción de expertos que coincidieron en asignar la etiqueta s_i como medida del indicador j .

G : Subgrupos de expertos formados en base a la coincidencia en el término utilizado para evaluar el indicador j ;

d_{\min} : Distancia mínima normalizada entre G términos lingüísticos consecutivos de la escala;

\bar{d} : Distancia media normalizada existente entre los términos de la escala empleados por los expertos para la evaluación del indicador j .

Dado que un número difuso triangular A , con parámetros a_1, a_2, a_3 , puede representarse de acuerdo con el concepto de intervalo de confianza de nivel α de la forma siguiente (Morillas Raya, 2000; Castro Bonaño, 2002):

$$A_\alpha = [a_1^\alpha, a_3^\alpha] = [a_1 + (a_2 - a_1)\alpha, a_3 - (a_3 - a_2)\alpha]$$

La distancia normalizada entre dos números difusos triangulares A y B , se calculará a partir de la expresión 4, utilizada por Morillas Raya (2000).

$$d(A, B) = \frac{1}{2(\beta_2 - \beta_1)} \int_0^1 (|a^{\alpha_1} - b^{\alpha_1}| + |a^{\alpha_2} - b^{\alpha_2}|) \hat{\partial}_\alpha \quad (4)$$

Donde:

$$\beta_1 : \text{mín} [a_{1A}; a_{1B}]$$

$$\beta_2 : \text{máx} [a_{3A}; a_{3B}]$$

d : distancia normalizada entre los números difusos A y B con función de pertenencia triangular.

a^α y b^α : representación de los números difusos triangulares A y B , respectivamente, en función del concepto de intervalo de confianza de nivel α (α - corte), donde $a^{\alpha_1} = a_1^\alpha$ y $a^{\alpha_2} = a_3^\alpha$.

$|a^{\alpha_1} - b^{\alpha_1}|$: Distancia a la izquierda entre los números difusos triangulares A y B .

$|a^{\alpha_2} - b^{\alpha_2}|$: Distancia a la derecha entre los números difusos triangulares A y B .

Para obtener d_{\min} se debe obtener la distancia entre todos los subconjuntos de términos consecutivos de tamaño G que se generan a partir de un conjunto de tamaño siete, de acuerdo con la escala de evaluación utilizada (Figura 2.3), y entre estos seleccionar el menor valor de distancia. De esta forma se tiene que:

$$d_{\min} = \text{mín} \{d_{gi}\} \quad \forall i = 1, \dots, N \quad (5)$$

Siendo N el número de subgrupos de términos consecutivos de tamaño G que se pueden generar a partir de siete términos, y d_{gi} la distancia media normalizada entre los G términos lingüísticos del subgrupo i .

6. Selección del cuantificador lingüístico mediante el cual se representará el concepto de mayoría difusa.

Un cuantificador lingüístico es un subconjunto difuso Q, donde para cualquier valor $r \in \mathfrak{R}^+$, Q (r) indica el grado en que el valor r satisface el concepto representado por Q. Herrera et al. (1996b) plantean que los cuantificadores son tipificados por términos tales como: *muchos*, *al menos la mitad*, *todos*, entre otros. Algunos ejemplos pueden verse en la Figura 2.4. La selección del cuantificador dependerá de los objetivos trazados al inicio respecto al nivel de calidad de la información requerida.

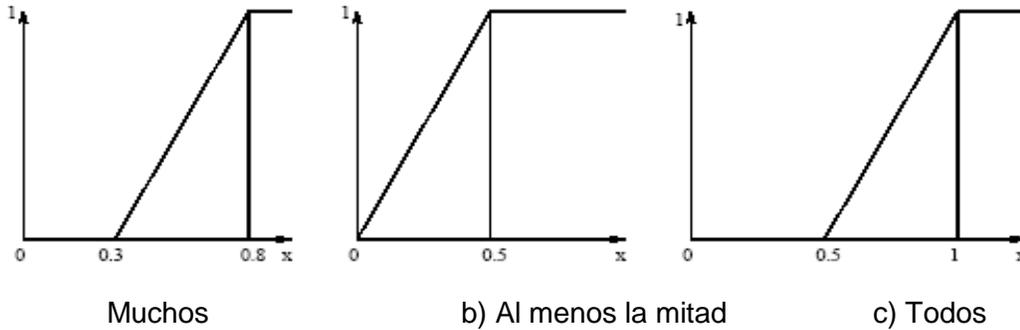


Figura 2.4. Algunos cuantificadores lingüísticos. Fuente: Herrera et al. (1996b)

Cálculo del nivel de consenso (NC_j) logrado sobre cada atributo j

La expresión a utilizar es la siguiente:

$$NC_j = Q^2(RC_j) \tag{6}$$

$$Q^2(r) = \begin{cases} s_0 & \text{si } RC_j < a \\ s_i & \text{si } a \leq RC_j \leq b \\ s_U & \text{si } RC_j > b \end{cases} \tag{7}$$

Siendo s₀ y s_U las etiquetas mínima y máxima del conjunto de términos lingüísticos S utilizado.

$$s_i = \text{Sup}_{s_q \in M} \{s_q\} \tag{8}$$

$$\text{Con } M = \{s_q \in S: \mu_{s_q}(RC_j) = \text{Sup}_{t \in J} \{ \mu_{s_t} \left(\frac{RC_j - a}{b - a} \right) \}} \tag{9}$$

J es la cardinalidad del conjunto S de términos lingüísticos.

7. Cálculo del nivel de consenso global (NCG) obtenido en la evaluación del conjunto de atributos.

El NCG se calculará a partir de la expresión siguiente:

$$NCG = Q^2 \left(\frac{\sum_{j=1}^n RC_j}{n} \right) \tag{10}$$

Siendo n el número de atributos.

Luego de presentar los pasos de la metodología para el cálculo del nivel de consenso el procedimiento específico continúa con lo relativo a la evaluación de indicadores cuantitativos.

Paso 7. Recopilación y procesamiento de datos para las evaluaciones cuantitativas

Se deberá recopilar los datos con el nivel de precisión adecuado y establecer el valor óptimo para cada uno de estos indicadores. Para el caso específico de algunos indicadores de necesidad de integración GP - GM, quizás no sea totalmente adecuado utilizar el término valor óptimo, y resulte más apropiada la idea de identificar aquel valor de comparación que indique la medida en que el estado en que se presenta el indicador en la empresa responde al índice general al cual tributa.

Paso8. Normalización y homogeneización de indicadores cuantitativos

Se proponen tres expresiones a emplear de manera alternativa, tal como se explica a continuación:

Si el valor óptimo del indicador analizado se corresponde con un valor en específico, deseándose minimizar tanto las desviaciones positivas como las negativas respecto a este, el valor normalizado se calculará a partir de la expresión siguiente:

$$Vn_j = 1 - \frac{|Vo_j - Vm_j|}{Vo_j} \quad (11)$$

Si el desempeño del atributo es mejor en tanto mayor sea su magnitud:

$$Vn_j = \frac{Vm_j}{Vo_j} \quad (12)$$

Si el desempeño del indicador es mejor en tanto menor sea su magnitud:

$$Vn_j = \begin{cases} 1 & \text{si } v_{mj} = 0 \text{ ó } v_{mj} \leq v_{oj} \\ \frac{v_{oj}}{v_{mj}} & \text{si } v_{oj} > 0 \text{ y } v_{mj} > 0 \\ 1 - \frac{1}{v_{mj}} & \text{si } v_{oj} = 0 \text{ y } v_{mj} > 1 \\ 1 - v_{mj} & \text{si } 0 \leq v_{mj} \leq 1 \end{cases} \quad (13)$$

Donde:

Vn_j : valor normalizado del indicador (atributo) j ,

Vm_j : valor medido o actual que presenta el indicador j ,

Vo_j : valor óptimo del indicador j

Luego de la normalización se procederá a la homogenización, con el objetivo de que los valores que definen la evaluación de los indicadores queden expresados en una misma escala, en este caso la que se plantea en la Figura 2.3. Esto se realizará mediante la aplicación del cuantificador lingüístico Q^2 , teniendo como dominio el valor normalizado Vn_j , y como imagen alguno de los términos del conjunto S .

Paso 9. Evaluación final de cada indicador

La evaluación final de cada indicador cualitativo se obtendrá agregando cada uno de los términos lingüísticos emitidos por cada experto como medida de su evaluación, luego de haberse demostrado un adecuado nivel de consenso. Para este propósito han sido desarrollado varios operadores de agregación que operan directamente sobre el conjunto de etiquetas lingüísticas (Peláez y Doña, 2003;

Xu, 2004; Cabrerizo et al., 2008; Merigó y Gil Lafuente, 2011). En el marco de la presente investigación se decide aplicar el operador LOWA con algunas modificaciones que se proponen más adelante para obtener el vector de pesos. El desarrollo original de este indicador, de acuerdo con Herrera et al. (1997) se muestra a continuación:

$$\phi(a_1, \dots, a_m) = W \cdot B^T = C^m \{w_k, b_k, k = 1, \dots, m\} = w_1 \otimes b_1 \oplus (1 - w_1) \otimes C^{m-1} \{\beta_h, b_h, h = 2, \dots, m\} \quad (14)$$

Donde W es un vector de pesos $[w_1, \dots, w_m]$, tal que $w_i \in [0; 1]$ y $\sum w_i = 1$; $\beta_h = w_h / \sum_{k=2}^m w_k$, $h = 2, \dots, m$. $B = (b_1, \dots, b_m)$ es un vector asociado a A tal que $B = \sigma(A) = (a_{(\sigma_1)}, \dots, a_{(\sigma_m)})$, siendo $a_{(\sigma_j)} < a_{(\sigma_i)} \forall i \leq j$.

σ es una permutación definida sobre el conjunto de términos A . C^m es el operador de combinación convexa de m etiquetas definido por Delgado et al. (1993).

Para $m = 2$ se tiene que:

$$C^2 \{w_i, b_i, i = 1; 2\} = w_1 \otimes s_j \oplus (1 - w_1) \otimes s_i = S_k, s_i, s_j \in S (j \geq i) \quad (15)$$

$$K = \text{Min} \{T, i + \text{round}(w_1^*(j - i))\} \quad (16)$$

Siendo S el conjunto de términos lingüísticos a agregar con cardinalidad $T + 1$.

Generalmente el vector de pesos W es calculado a partir del empleo de algún cuantificador; sin embargo, en este trabajo se propone obtener los pesos a partir de la cardinalidad de cada uno de los términos a agregar, en correspondencia con el concepto de agregación que abordan los operadores de mayoría sin cuantificador (MA - OWA) según Peláez y Doña (2004).

De esta forma se tiene que:

$$w_i = f_i(b_1, K, b_n) = \frac{\gamma_i^{\delta_{\min}}}{\theta_{\delta_{\max}} \cdot \theta_{\delta_{\max}-1} \dots \theta_{\delta_{\min+1}} \cdot \theta_{\delta_{\min}}} + \frac{\gamma_i^{\delta_{\min+1}}}{\theta_{\delta_{\max}} \cdot \theta_{\delta_{\max}-1} \dots \theta_{\delta_{\min+1}}} + \dots + \frac{\gamma^{\delta_{\max}}}{\theta_{\delta_{\max}}} \quad (17)$$

Donde:

b_i : i -ésimo elemento del conjunto de términos a agregar ordenado de forma ascendente según las cardinalidades

δ_i : Cardinalidad del elemento i

$$\gamma_i^K = \begin{cases} 1 & \text{si } \delta_i \geq K \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (18)$$

$$\theta_i = \begin{cases} (\text{número de elementos con cardinalidad } \geq i) + 1 & \text{si } i \neq \delta_{\min} \\ \text{número de elementos con cardinalidad } \geq i & \text{otro caso} \end{cases} \quad (19)$$

Debido a que el proceso de agregación guiado a partir del operador LOWA es un proceso iterativo, en el que en cada iteración se agrega un elemento del conjunto de términos lingüísticos B con el resultado obtenido en la agregación anterior, en cada iteración i el peso relativo del elemento i tiende a ser dominado por el peso del término lingüístico que se obtuvo como resultado en la agregación $i-1$, dado que el valor de peso con el cual el resultado obtenido en la agregación $i-1$ se agrega en la iteración i es el peso acumulado de todos los términos que ya han sido agregados hasta esa iteración $i-1$. Se propone entonces una modificación en la forma de obtener el vector de pesos β_h donde se logre que el valor del peso de cada elemento refleje la importancia relativa previamente calculada para el mismo respecto a la importancia relativa media de los elementos que le antecedieron en las iteraciones precedentes durante el proceso de agregación. En la expresión (20) se plantea la propuesta de cálculo del vector β_h .

$$\beta_h = \begin{cases} w_h & \text{si } h=1 \\ \frac{w_h * (m-h)}{w_h * (m-h) + \sum_{i=h+1}^m w_i} & \text{si } h=2, \dots, m-1 \\ 1 - \beta_{m-1} & \text{si } h=m \end{cases} \quad (20)$$

Se aplicará el operador LOWA considerando los pesos anteriores (ϕ_F).

En el caso de los atributos cuantitativos la evaluación será obtenida directamente del paso anterior, una vez que se aplique el cuantificador Q^2 sobre el valor homogeneizado Vh_j .

Paso 10. Análisis de los resultados del proceso de evaluación

Se les presentará a los expertos las evaluaciones obtenidas y se verificará el acuerdo del grupo con los resultados. De existir discrepancias respecto a las evaluaciones de algunos atributos se revisará la eficacia de las etapas anteriores, empleando un modo de evaluación conjunta para los atributos implicados, de forma tal que cada experto exponga ante el grupo el porqué de su propuesta y al final se llegue a un resultado consensuado de forma más rápida.

Concluido el proceso de evaluación el procedimiento específico da paso a su siguiente módulo.

▪ Módulo II: Ponderación

Este módulo toma como entradas las características operacionales de algunos métodos de cálculo de pesos, con el fin de seleccionar el más adecuado de acuerdo al contexto en que se desarrolla el estudio; los atributos a ser ponderados; y alguna aplicación informática para facilitar los cálculos. Los procesos fundamentales son el de ponderación y el de evaluación de la calidad de la ponderación. Como salida se obtiene el peso final de cada indicador.

Paso 11. Selección del método de ponderación

De acuerdo con Canada y Sullivan (1997) existen muchos métodos numéricos para asignar pesos. En este estudio se hará uso del Triángulo de Füller, por ser de fácil comprensión y aplicación, no exige grandes requerimientos computacionales y conduce a un proceso de comparación ordenado y efectivo.

Paso 12. Preparación del grupo de expertos para la ponderación

Deberá explicarse a cada experto el sentido de la ponderación, esto es: sobre qué base o en función de qué característica serán comparados los atributos. Tomando como ejemplo los indicadores de necesidad de integración GP - GM, el objetivo sería determinar la importancia relativa de cada atributo en función de su influencia sobre la necesidad de integración, de manera que la pregunta a formular para conducir el trabajo de los expertos podría quedar como sigue: ¿Entre el par de atributos i, j cuál provoca un mayor impacto (positivo o negativo) en la necesidad de integración GP - GM?

Otro elemento a considerar es la definición de la escala para la ponderación. Como se mencionó anteriormente en este trabajo se utilizará el Triángulo de Füller, pero con una modificación en la escala de evaluación para permitir, de una parte, la posibilidad de otorgar igual grado de importancia al comparar dos atributos, y de otra, el análisis de la consistencia a partir de un indicador desarrollado. La escala de evaluación establecida para la comparación pareada de atributos es la siguiente:

$a_{ij} = 2$ si el atributo i es considerado más importante que el atributo j ,

$a_{ij} = 1$ si el atributo i es igual de importante que el atributo j ,

$a_{ij} = 0$ si se considera que el atributo i es menos importante que el j .

Paso 13. Realización de las comparaciones pareadas

El equipo de trabajo deberá decidir el modo de realizar las comparaciones entre pares de atributos. Se tienen dos posibilidades: obtener los valores de los expertos de manera independiente o de manera conjunta. Para decidir se tendrán en cuenta algunas cuestiones prácticas tales como: la posibilidad de hacer coincidir en tiempo y espacio a los miembros del grupo expertos y el tiempo disponible para efectuar este diagnóstico.

Paso 14. Análisis de la calidad de la información obtenida

La calidad será analizada a partir de dos elementos: la concordancia del grupo de expertos, en el caso de que las valoraciones se hayan realizado de manera independiente por cada experto, y el nivel de consistencia mantenido en el momento de realizar las comparaciones de atributos. Se comenzará abordando lo relativo a este último elemento.

Luego de aplicar el Triángulo de Füller (con la modificación señalada en la escala de comparación) se realizará un análisis tomando los atributos de tres en tres, y sobre la base de las reglas que a continuación se plantean se establecerán el grado de inconsistencia y las unidades de inconsistencia que presenta la terna de atributos analizada.

- a) Inconsistencia total. Se define cuando en una terna de atributos se viola de manera total el principio de transitividad de acuerdo con la escala de comparación que se propone, ejemplo: si ocurre que $a_{ij} = 2, a_{jk} = 2$, y $a_{ik} = 0$. En este caso se otorga a la terna una (1) unidad de inconsistencia.
- b) Inconsistencia parcial. Se define cuando en una terna se viola de manera parcial el principio de transitividad, ejemplo: si $a_{ij} = 2, a_{jk} = 2$, y $a_{ik} = 1$. En este caso se otorga a la terna 0,5 unidades de inconsistencia.
- c) Consistente. Se plantea que existe consistencia en la evaluación de una terna de atributos cuando no se pueda afirmar que exista inconsistencia parcial o total, por ejemplo: si $a_{ij} = 2, a_{jk} = 0$, y $a_{ik} = 0$, o si $a_{ij} = 2, a_{jk} = 0$, y $a_{ik} = 1$. En este caso no se asignan unidades de inconsistencia a la terna. Finalmente, el índice de consistencia (IC) se calcula a partir de la expresión siguiente:

$$IC = 1 - \frac{\sum_i^T U_{ic_i}}{T} \quad (21)$$

Donde:

U_{ic_i} : Representa las unidades de inconsistencia asignadas a la terna i .

T: número de ternas generadas

$$T = \frac{n!}{3!(n-3)!} \quad (22)$$

Siendo n el número de atributos o indicadores comparados.

En caso de que las comparaciones entre indicadores hayan sido realizadas de manera individual por parte de los expertos debe obtenerse además el grado de acuerdo existente entre estos. Para esto se propone el cálculo del coeficiente de concordancia de Kendall, aprovechándose la información obtenida a partir de las ponderaciones otorgadas por cada experto, pues estas pueden ser convertidas en valores ordinales. Posteriormente es conveniente realizar la prueba de hipótesis sobre la comunidad de preferencia de los expertos, mediante el cálculo de los estadígrafos de Friedman, cuando $n \leq 7$, o de Chi-cuadrado cuando $n > 7$.

Paso 15. Cálculo del peso de cada atributo

Si las comparaciones pareadas entre indicadores se realizaron de manera consensuada, mediante un solo triángulo de Füller, el peso se obtendrá a partir de este método. De haberse aplicado evaluaciones individuales (generación de un Triángulo de Füller por cada experto) se tomará el valor medio de los rangos (R), obtenido en el paso anterior al calcular el coeficiente de concordancia de Kendall, y a partir de este se le otorgará el puntaje a cada indicador (valor n al de mayor R y valor 1 al de menor R). Luego el peso puede obtenerse mediante alguno de los métodos apropiados como, por ejemplo, el de Ordenación Simple.

Paso 16. Análisis de los resultados del proceso de ponderación

El grupo de expertos analizará los resultados y determinará si estos realmente se corresponden con las diferencias que cabe esperar entre los atributos, de acuerdo con la característica tomada como referencia para la ponderación. Este análisis puede llevar a revisar la eficacia de los pasos anteriores en caso de que no se esté de acuerdo con los resultados obtenidos.

▪ **Módulo III: Agregación**

Este módulo toma como entradas fundamentales el conjunto de indicadores, tanto cuantitativos como cualitativos, previamente evaluados y ponderados.

Paso 17. Establecimiento y verificación del criterio de optimalidad

Se propone el criterio de máximo, por lo que debe verificarse si el sentido de la evaluación en cada atributo es directamente proporcional al índice general al cual tributa. En el caso de aquellos atributos que no son inversamente proporcionales a dicho índice se aplicará el operador de negación (Neg) sobre la etiqueta lingüística que define su evaluación:

$$\text{Neg}(s_j) = s_i \mid j = g - i \quad (23)$$

Paso 18. Cálculo del indicador general

Contando con el conjunto de atributos evaluados en un contexto lingüístico, ponderados y todos en correspondencia con el criterio de optimalidad fijado, solo resta agregarlos. Se hará uso nuevamente del operador LOWA, considerando los pesos obtenidos tras la aplicación del segundo módulo del procedimiento específico. Se ordenarán las etiquetas lingüísticas de manera ascendente, en función del peso asociado a cada una de estas, para posteriormente aplicar el operador de agregación sobre conjunto ordenado obtenido.

Luego de presentar la metodología relacionada con el desarrollo de cada una de los pasos del procedimiento específico para la evaluación, ponderación y agregación de atributos se muestran los resultados obtenidos respecto a los indicadores medidores de la necesidad de integración entre los procesos de GP- GM.

En la Tabla 1 se muestra la evaluación que, según su criterio, cada experto asigna a los diferentes indicadores y la evaluación final que recibió cada indicador luego de hacer uso del operador LOWA para la agregación de los términos lingüísticos emitidos por los expertos como medida de la evaluación del indicador considerado.

Primero se aplica la ecuación 17 para obtener el peso que en relación a su cardinalidad posee cada indicador, auxiliándose además de las expresiones 18 y 19. Una vez obtenido dicho peso se aplican las expresiones 15 y 16 para obtener así la evaluación final de cada indicador.

Indicadores	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	E ₆	E ₇	E ₈	E ₉	E.F
N1	a	ma	ma	ma	ma	ma	a	ma	ma	ma
N2	a	a	ma	a	a	m	a	a	a	a
N3	p	p	a	p	p	ma	p	p	p	p
N4	m	m	m	m	a	m	a	m	m	m
N5	a	ma	a	a	a	a	a	a	a	a
N6	b	mb	mb	mb	n	mb	mb	mb	mb	mb
N7	a	a	a	m	a	a	b	a	a	a
N8	a	a	a	ma	a	ma	a	a	a	a
N9	b	b	b	b	m	b	b	b	b	b
N10	m	m	m	m	m	a	m	a	m	m

En la Tabla 2 se resumen los resultados obtenidos de la aplicación del paso 6 del procedimiento específico referido al análisis de la calidad de la información para el caso de evaluaciones cualitativas. De la Tabla 2 se tiene que $\overline{RC} = 0,670$. Sustituyendo en la expresión 10 se obtiene un nivel de consenso global alto (NCG = a).

$$0,670 - 0,3 / 0,8 - 0,3 = 0,37 / 0,5 = 0,74$$

	V _{si} ^j	G	P _{nj}	P _{mbj}	P _{bj}	P _{mj}	P _{aj}	P _{maj}	P _{pj}	RC _j	NC _j
N1	(a, ma)	2	0	0	0	0	0,222	0,777	0	0,652	a
N2	(m, a, ma)	3	0	0	0	0,111	0,777	0,111	0	0,627	a
N3	(a, ma, p)	3	0	0	0	0	0,111	0,111	0,777	0,627	a
N4	(m, a)	2	0	0	0	0,777	0,222	0	0	0,652	a
N5	(a, ma)	2	0	0	0	0	0,888	0,111	0	0,8	p
N6	(n, mb, b)	3	0,111	0,777	0,111	0	0	0	0	0,619	a
N7	(b, m, a)	3	0	0	0,111	0,111	0,777	0	0	0,625	a
N8	(a, ma)	2	0	0	0	0	0,777	0,222	0	0,652	a
N9	(b, m)	2	0	0	0,888	0,111	0	0	0	0,8	p
N10	(m, a)	2	0	0	0	0,777	0,222	0	0	0,652	a

Una vez concluida la evaluación de estos indicadores, se procedera a ponderarlos haciendo uso del segundo módulo del procedimiento específico. Los resultados se muestran a continuación:

									Indicadores
1^2	1^2	1^2	1^0	1^2	1^1	1^1	1^1	1^1	1
2^0	3^0	4^0	5^2	6^0	7^1	8^1	9^1	10^1	
	2^2	2^0	2^2	2^1	2^2	2^0	2^0	2^0	2
	3^0	4^2	5^0	6^1	7^0	8^2	9^2	10^2	
		3^0	3^0	3^2	3^1	3^2	3^0	3^0	3
		4^2	5^2	6^0	7^1	8^0	9^2	10^2	
			4^0	4^2	4^2	4^2	4^0	4^1	4
			5^2	6^0	7^0	8^0	9^2	10^1	
				5^2	5^2	5^2	5^2	5^2	5
				6^0	7^0	8^0	9^0	10^0	
					6^0	6^1	6^0	6^0	6
					7^2	8^1	9^2	10^2	
						7^0	7^0	7^2	7
						8^2	9^2	10^0	
							8^0	8^2	8
							9^2	10^0	
								9^0	9
								10^2	10

La calidad obtenida en el proceso de ponderación fue medida mediante el nivel de consistencia logrado por los expertos, utilizando la expresión 21, el nivel de consistencia alcanzado en las comparaciones pareadas fue de 0,80. El desarrollo de este segundo modulo del procedimiento específico estuvo apoyado en la aplicación de una herramienta informática desarrollada en Delphi 7.0.

En la Tabla 3 se muestran los pesos correspondientes a cada indicador, mientras que en la Tabla 4 se muestran las evaluaciones finales de cada uno de estos y el término lingüístico a agregar, considerando la proporcionalidad directa o inversa que existe entre el indicador y el índice general al cual tributa. Esto último condujo a aplicar el operador de negación sobre el termino lingüístico que define la evaluación de los indicadores 9 y 10, pues a medida que la evaluación de estos sea mayor, la importancia de la integración GP - GM será menos significativa.

Indicador	Puntos	Orden	Peso
N1	12	3	0,13
N2	7	7	0,08
N3	5	9	0,06
N4	11	4	0,12
N5	16	1	0,18
N6	2	10	0,02
N7	6	8	0,07
N8	8	6	0,09
N9	13	2	0,14
N10	10	5	0,11

Indicadores	Evaluación	Término a agregar	Peso
N1	ma	ma	0,13
N2	a	a	0,08
N3	p	p	0,06
N4	m	m	0,12
N5	a	a	0,18
N6	mb	mb	0,02
N7	a	a	0,07
N8	a	a	0,09
N9	b	a	0,14
N10	m	m	0,11

Luego de conocer los pesos y la evaluación de cada indicador solo queda agregarlos. La existencia de n indicadores a agregar mediante el operador ϕ_F genera un vector ordenado ($B = \sigma(A)$) compuesto por n términos lingüísticos con sus respectivos pesos. Esto implica la realización de $n-1$ iteraciones, teniendo en cuenta que en cada iteración i se agregan dos términos, siendo uno el resultado de la agregación en la iteración $i - 1$ y el otro el $(n - i) - \text{ésimo}$ de los términos a agregar. Los vectores B y W sobre los cuales se aplicará el operador ϕ_F para obtener el índice NIPM son los siguientes:

$$B = (mb, p, a, a, a, m, m, ma, a, a) \quad W = (0,02; 0,06; 0,07; 0,08; 0,09; 0,11; 0,12; 0,13; 0,14; 0,18)$$

Al aplicar la expresión 20 se obtiene el correspondiente vector de pesos ajustados β_h , a partir del cual se obtienen los componentes de peso w_1 y $1-w_1$ a utilizar en cada iteración de agregación de pares de términos lingüísticos.

$$\beta_h = (0,02; 0,34; 0,37; 0,38; 0,40; 0,44; 0,44; 0,45; 0,44; 0,56)$$

En la Tabla 5 se muestran los resultados de la agregación en cada iteración, y finalmente la evaluación del índice NIPM (ma).

Iteraciones	Términos a agregar	i	j	w_1	$1-w_1$	k	ϕ_F
1	a, a	4	4	0,56	0,44	4	a
2	ma, a	4	5	0,45	0,55	4	a
3	a, m	3	4	0,56	0,44	4	a
4	a, m	3	4	0,56	0,44	4	a
5	a, a	4	4	0,40	0,60	4	a
6	a, a	4	4	0,38	0,62	4	a
7	a, a	4	4	0,37	0,63	4	a
8	p, a	4	6	0,34	0,66	5	ma
9	ma, mb	1	5	0,98	0,02	5	ma

2.4. Etapa 4. Evaluación del desempeño del sistema resultado del nivel de integración GP - GM

El procedimiento general continua con su etapa 4 correspondiente a la evaluación del índice que permite medir el desempeño del sistema producción - mantenimiento derivado del nivel de integración existente entre ambos subsistemas (DSPM). De manera similar a la etapa anterior, las tareas en esta se dirigen al establecimiento de un grupo de indicadores, esta vez medidores del desempeño del sistema producción - mantenimiento derivado de la integración lograda en el proceso de toma de decisiones que involucran a ambos subsistemas; además de la evaluación, ponderación y agregación de estos como forma de obtener el indicador general de desempeño.

Paso 1. Definición de los indicadores medidores del desempeño del sistema

El autor Díaz Cazañas (2008) estableció un conjunto de indicadores para evaluar el desempeño del sistema producción - mantenimiento derivado del nivel de integración existente entre ambos subsistemas. La propuesta de estos indicadores parte del análisis de alguna de las posibles decisiones que pueden tomarse en el área de producción y que mayor relación guardan con los subprocesos de la GM. La propuesta general de tales indicadores se presenta en el Anexo 6, debiendo cada organización seleccionar los que más se ajusten de acuerdo a las decisiones tomadas en Producción.

Los resultados de la caracterización efectuada al subsistema de producción de la UEB Centroplast arrojaron que las decisiones a nivel operativo están relacionadas con: minimizar costo de producción, cumplir los plazos de entrega, el proceso de toma de decisión en cuanto a la selección del flujo de proceso (paralelo o por lotes) y definir el grado de mecanización o automatización del proceso, a partir de esta propuesta, los indicadores seleccionados de acuerdo a las características del objeto de estudio práctico son los siguientes:

- D1. Cumplimiento del presupuesto de mantenimiento (CPM)
- D2. Componente del costo de mantenimiento (CCM)
- D3. Progreso en los esfuerzos de reducción de costos (PERC)
- D4. Cumplimiento de la disponibilidad proyectada (CDP)
- D5. Tiempo medio de retraso en las entregas debido a paros por mantenimiento (TMRE)
- D6. Tasa de artículos defectuosos debido a dificultades en el mantenimiento (ADM)
- D7. Productividad de la estrategia de mantenimiento (PEM)
- D8. Utilización del personal de ejecución del mantenimiento (UPM)
- D9. Incumplimiento de la capacidad planeada debido a paros por mantenimiento (ICPM)

Paso 2. Obtención del indicador general de desempeño del sistema resultado del nivel de integración GP - GM (DSPM)

Una vez seleccionados los indicadores de desempeño, el DSPM será obtenido mediante la aplicación del procedimiento específico para la evaluación, ponderación y agregación de atributos descrito anteriormente. Los resultados se muestran a continuación:

Como primer paso de esta etapa se definen cuáles son aquellos indicadores que debido a su imposibilidad de ser evaluados cuantitativamente, debido a escasas de información para poder estimarlos, serán evaluados de manera cualitativa, dichos indicadores son: D3, D5, D6 y D9, mientras que el resto de indicadores será evaluado cuantitativamente.

Comenzaremos evaluando los indicadores cuantitativos:

Indicadores propuestos:

D1. Cumplimiento del presupuesto de mantenimiento (CPM):

El cumplimiento del presupuesto de mantenimiento al 100 % es una medida de la eficacia del sistema, específicamente del subsistema de mantenimiento en respuesta a la política planteada en producción, pues esto contribuirá a la optimización de los costos directos e indirectos de mantenimiento y, en consecuencia, los de producción, por lo que la evaluación de un 51% en este indicador refleja la realidad imperante en la empresa, en relación a los problemas que existen entre producción y mantenimiento.

$$\text{CPM} = \frac{\text{gasto total de mantenimiento}}{\text{presupuesto de mantenimiento}} * 100 = \frac{457752,69}{883000,60} = 0,51 = 51\%$$

D2. Componente del costo de mantenimiento (CCM):

Este indicador permite controlar la relación entre el costo de producción y el de mantenimiento. Según Torres (2003) debe oscilar entre un 5 y un 12 %.

$$\text{CCM} = \frac{\text{gasto total de mantenimiento}}{\text{costo total de producción}} * 100 = \frac{457752,69}{2308332,50} = 0,19 = 19\%$$

D4. Cumplimiento de la disponibilidad proyectada (CDP):

Una de las vías para asegurar el cumplimiento de los plazos de entrega, por parte de mantenimiento, es asegurando la disponibilidad necesaria del equipamiento.

$$\text{CDP} = \frac{\text{disponibilidad real}}{\text{disponibilidad planificada}} = \frac{83\%}{85\%} = 0,97 = 97\%$$

D7. Productividad de la estrategia de mantenimiento (PEM):

En un flujo en paralelo (pieza a pieza), donde generalmente el inventario en proceso es bajo y los puestos no están protegidos de los impactos del fallo (alto riesgo de interrupción en la continuidad del proceso debido al fallo) se deberá hacer énfasis en estrategias para detectar el fallo antes de que ocurra y evitar la pérdida de la continuidad; en cambio cuando el flujo es por lotes existe determinado inventario en proceso mediante el cual disminuye el impacto adverso del fallo sobre la continuidad del proceso, por tal razón pueden implementarse estrategias para conseguir bajos tiempos de reparación -si es que esto resulta menos costoso que prevenir el fallo-. En cualquier caso, la selección debe considerar además otros criterios de factibilidad.

$$PEM = \frac{FTP - TIM}{\text{gasto total de mantenimiento}} = \frac{(88128 - 13191)h}{\$457752,69} = 0,16 \text{ h/\$}$$

Donde:

FTP: fondo de tiempo potencial del proceso productivo

TIM: tiempo de interrupciones en el proceso (pérdida de la continuidad) debido a paros por mantenimiento

D8. Utilización del personal de ejecución del mantenimiento (UPM):

La plantilla de mantenimiento debe estar en correspondencia con el grado de mecanización, número de equipos y finalmente con el volumen de tareas de mantenimientos exigidas por el equipamiento.

$$UPM = \frac{\text{horas hombre necesarias}}{\text{horas hombre disponibles}} * 100 = \frac{5130h}{13540h} = 0,37 = 37\%$$

Una vez obtenido el valor que presenta el indicador, pasaremos a la normalización y homogeneización de los mismos, auxiliándonos del paso 8 del procedimiento específico.

Indicador D1

$$Vn_j = 1 - \frac{|Vo_j - Vm_j|}{Vo_j} = 1 - \frac{|1 - 0,51|}{1} = 1 - 0,49 = 0,51$$

Indicador D2

$$Vn_j = 1 - \frac{|Vo_j - Vm_j|}{Vo_j} = 1 - \frac{|0,12 - 0,19|}{0,12} = 1 - 0,58 = 0,42$$

Indicador D4

$$Vn_j = 1 - \frac{|Vo_j - Vm_j|}{Vo_j} = 1 - \frac{|1 - 0,97|}{1} = 1 - 0,03 = 0,97$$

Indicador D7

$$Vn_j = \frac{Vm_j}{Vo_j} = \frac{0,16}{0,3} = 0,53$$

Indicador D8

$$Vn_j = 1 - \frac{|Vo_j - Vm_j|}{Vo_j} = 1 - \frac{|0,85 - 0,37|}{0,85} = 0,44$$

Luego de contar con estos valores se hace uso del cuantificador lingüístico muchos y de las expresiones 6, 7, 8, 9 para poder saber que etiqueta lingüística de la escala del conjunto S corresponde a cada indicador, en la Tabla 6 se muestra el resultado:

Tabla 6. Evaluación final de los indicadores cuantitativos	
Indicadores	Etiqueta lingüística del indicador
D1	m
D2	mb
D4	p
D7	m
D8	b

Como se menciona anteriormente los indicadores D3, D5, D6 y D9 son evaluados de forma cualitativa debido a la imposibilidad de información relacionada a los mismos. A continuación, se hace mención a dichos atributos y en la Tabla 7 se muestran las evaluaciones asignadas por los expertos a los indicadores y la evaluación final que recibe cada uno luego de realizar todos los cálculos necesarios.

D3. Progreso en los esfuerzos de reducción de costos (PERC)

D5. Tiempo medio de retraso en las entregas debido a paros por mantenimiento (TMRE)

D6. Tasa de artículos defectuosos debido a dificultades en el mantenimiento (ADM)

D9. Incumplimiento de la capacidad planeada debido a paros por mantenimiento (ICPM)

Tabla 7. Evaluaciones dadas por los expertos a los indicadores										
Indicadores	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	E ₆	E ₇	E ₈	E ₉	E.F
D3	mb	b	b	b	b	b	b	b	m	b
D5	a	a	a	m	a	a	m	a	a	a
D6	m	m	m	m	a	m	m	m	m	m
D9	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m

En la Tabla 8 se resumen los resultados obtenidos de la aplicación del paso 6 del procedimiento específico referido al análisis de la calidad de la información para el caso de evaluaciones cualitativas. De la Tabla 8 se tiene que $\overline{RC} = 0,809$. Sustituyendo en la expresión 10 se obtiene un nivel de consenso global perfecto ($NCG = p$).

$$0,809 - 0,3 / 0,8 - 0,3 = 0,509 / 0,5 = 1.018$$

Tabla 8. Niveles de consenso logrado en la evaluación de los indicadores cualitativos											
Indicadores	V _{si} ^j	G	P _{nj}	P _{mbj}	P _{bj}	P _{mj}	P _{aj}	P _{maj}	P _{pj}	RC _j	NC _j
D3	(mb, b, m)	3	0	0,111	0,777	0,111	0	0	0	0,627	a
D5	(m, a)	2	0	0	0	0,222	0,777	0	0	0,652	a
D6	(m, a)	2	0	0	0	0,888	0,111	0	0	0,8	p
D9	(m)	1	0	0	0	1	0	0	0	1	p

Una vez concluida la evaluación de estos indicadores, se procederá a ponderarlos haciendo uso del segundo módulo del procedimiento específico. Los resultados se muestran a continuación:

								Indicadores
1^2	1^2	1^2	1^0	1^2	1^1	1^1	1^1	1
2^0	3^0	4^0	5^2	6^0	7^1	8^1	9^1	
	2^2	2^0	2^2	2^1	2^2	2^0	2^0	2
	3^0	4^2	5^0	6^1	7^0	8^2	9^2	
		3^0	3^0	3^2	3^1	3^2	3^0	3
		4^2	5^2	6^0	7^1	8^0	9^2	
			4^0	4^2	4^2	4^2	4^0	4
			5^2	6^0	7^0	8^0	9^2	
				5^2	5^2	5^2	5^2	5
				6^0	7^0	8^0	9^0	
					6^0	6^1	6^0	6
					7^2	8^1	9^2	
						7^0	7^0	7
						8^2	9^2	
							8^0	8
							9^2	9

La calidad obtenida en el proceso de ponderación fue medida mediante el nivel de consistencia logrado por los expertos, utilizando la expresión 21, el nivel de consistencia alcanzado en las comparaciones pareadas fue de 0,83. El desarrollo de este segundo modulo del procedimiento específico estuvo apoyado en la aplicación de una herramienta informática desarrollada en Delphi 7.0.

En la Tabla 9 se muestran los pesos correspondientes a cada indicador, mientras que en la Tabla 10 se muestran las evaluaciones finales de cada uno de estos y el término lingüístico a agregar, considerando la proporcionalidad directa o inversa que existe entre el indicador y el índice general al cual tributa. Esto último condujo a aplicar el operador de negación sobre el termino lingüístico que define la evaluación de los indicadores D5, D6 y D9, pues a medida que la evaluación de estos sea mayor, la importancia del desempeño del sistema resultado del nivel de integración GP – GM será menos significativa.

Indicadores	Puntos	Orden	Peso
D1	11	3	0,07
D2	7	5	0,11
D3	5	7	0,16
D4	10	4	0,09
D5	14	1	0,02
D6	2	9	0,2
D7	4	8	0,18
D8	6	6	0,13
D9	13	2	0,04

Indicadores	Evaluación	Término a agregar	Peso
D1	m	m	0,07
D2	mb	mb	0,11
D3	b	b	0,16
D4	p	p	0,09
D5	a	n	0,02
D6	m	m	0,2
D7	m	m	0,18
D8	b	b	0,13
D9	m	m	0,04

Luego de conocer los pesos y la evaluación de cada indicador solo queda agregarlos. La existencia de n indicadores a agregar mediante el operador ϕ_F genera un vector ordenado ($B = \sigma(A)$) compuesto por n términos lingüísticos con sus respectivos pesos. Esto implica la realización de $n-1$ iteraciones, teniendo en cuenta que en cada iteración i se agregan dos términos, siendo uno el resultado de la agregación en la iteración $i - 1$ y el otro el $(n - i) - \text{ésimo}$ de los términos a agregar. Los vectores B y W sobre los cuales se aplicará el operador ϕ_F para obtener el índice DSPM son los siguientes:

$$B = (n, m, m, p, mb, b, b, m, m) \quad W = (0,02; 0,04; 0,07; 0,09; 0,11; 0,13; 0,16; 0,18; 0,2)$$

Al aplicar la expresión 20 se obtiene el correspondiente vector de pesos ajustados β_h , a partir del cual se obtienen los componentes de peso w_1 y $1-w_1$ a utilizar en cada iteración de agregación de pares de términos lingüísticos.

$$\beta_h = (0,02; 0,23; 0,33; 0,37; 0,40; 0,42; 0,46; 0,47; 0,53)$$

En la Tabla 5 se muestran los resultados de la agregación en cada iteración, y finalmente la evaluación del índice DSPM (m).

Iteraciones	Términos a agregar	i	j	w_1	$1-w_1$	k	ϕ_F
1	m, m	3	3	0,53	0,47	3	m
2	m, b	2	3	0,54	0,46	3	m
3	m, b	2	3	0,58	0,42	3	m
4	m, mb	1	3	0,60	0,40	2	b
5	p, b	2	6	0,37	0,63	3	m
6	m, m	3	3	0,33	0,67	3	m
7	m, m	3	3	0,23	0,77	3	m
8	m, n	0	3	0,98	0,02	3	m

2.5. Etapa 5. Evaluación de la criticidad del proyecto para el diagnóstico y mejoramiento del nivel de integración GP - GM

En esta etapa se propone un tercer indicador general, en este caso el indicador de criticidad del proyecto para el diagnóstico y mejoramiento del nivel de integración GP - GM (CRIPM). Este se obtendrá a partir de la agregación de los indicadores generales de necesidad de integración (NIPM) y de desempeño del sistema (DSPM), empleando el operador LOWA con pesos fijos (ϕ_F) luego de aplicar el operador de negación sobre la etiqueta lingüística que define la evaluación del indicador de desempeño, ya que este es inversamente proporcional al (CRIPM).

Deberá decidirse si el resultado del CRIPM es significativo a los efectos de justificar o no la continuidad del proyecto. En caso afirmativo se procedería con el estudio, de lo contrario se continuaría con la observancia periódica de la evolución del NIPM y el DSPM, pues modificaciones en el entorno interno y externo de la organización pudieran revertir la decisión de abortar el proyecto.

Asignando igual importancia al NIPM y al DSPM se obtuvo:

$$\text{CRIPM} = (\phi_F) = (m_a, m) = 0,5 * 5 + (1 - 0,5) * 3$$

$$K = \text{Min} \{5, 3 + \text{round} \{0,5(5 - 3)\}$$

$$K = 4 \text{ Alto}$$

Este indicador se presenta a un nivel alto, lo que fundamenta la necesidad de continuar el proyecto para la integración.

2.6. Conclusiones parciales

1. Se lograron niveles de consenso y de consistencia adecuados en los juicios de los expertos relativos a las evaluaciones y comparaciones pareadas de atributos, sin necesidad de efectuar excesivas rondas, lo que demuestra un grado de dominio y apreciación similares de cada uno de los expertos.
2. El procedimiento general diseñado para evaluación de la criticidad del desarrollo de un estudio de diagnóstico y mejoramiento del nivel de integración GP - GM mostró su factibilidad de aplicación en el objeto de estudio práctico corroborándose la necesidad de mantener un alto nivel de integración entre ambas áreas, dadas las características técnicas organizativas de la UEB, así como la existencia de reservas para el mejoramiento de dicho nivel de integración, lo cual se fundamenta en el resultado alcanzado por el índice de desempeño, en este caso evaluado de medio .
3. La agregación de los índices de NIPM y DSPM, arrojó como resultado que la criticidad del proyecto de mejoramiento del nivel de integración GP - GM (CRIPM) se presenta a un nivel alto, lo que fundamenta la necesidad de continuar el estudio.

Capítulo III: Diagnóstico del nivel de integración entre la programación de la producción y la programación del mantenimiento en la UEB Centroplast. Diseño de una propuesta de mejora.

Este capítulo comenzará con el diagnóstico del nivel de integración que existe entre los subprocesos de programación de la producción y programación del mantenimiento. En un segundo momento se plantea el desarrollo de un método heurístico para la programación integrada de las actividades de producción y mantenimiento preventivo.

3.1. Diagnóstico del nivel de integración entre la programación de la producción y la programación del mantenimiento en la UEB Centroplast.

Este epígrafe hace uso del procedimiento específico utilizado en el capítulo II para la evaluación, ponderación y agregación de indicadores. Para este caso específico en el primer paso se establecen los indicadores a partir de los cuales se obtendrá el índice que evalúa el nivel de integración entre los subprocesos de programación de la producción y programación del mantenimiento (IPM), tomando como base la propuesta realizada por Díaz Cazañas (2008), la misma puede ser consultada en el anexo 7. Además de los indicadores ya establecidos por este autor el equipo de trabajo decidió agregar otros para obtener una evaluación más exhaustiva del nivel de integración programación de la producción - programación del mantenimiento. El grupo de indicadores se muestra a continuación:

- I1. Se considera el riesgo de fallo en el equipamiento, disponibilidad de recursos para enfrentar averías potenciales, así como las intervenciones programadas como uno de los factores en el momento de evaluar el riesgo de interrupción del programa de producción.
- I2. Se garantiza el cumplimiento de los parámetros de operación del equipo.
- I3. Se prevé el volumen de material que pudiera desecharse durante la operación, causado por deficiencias en el mantenimiento del equipamiento, y se considera la magnitud en el momento de determinar las necesidades de materiales en caso de tomar un valor significativo.
- I4. Se realiza un análisis exhaustivo en el momento de decidir la tarea a reprogramar cuando coinciden una actividad de la ejecución de la producción y una de la ejecución del mantenimiento.
- I5. Se aprovechan las ventanas de oportunidad en la programación de las operaciones para programar intervenciones de mantenimiento siempre que el tiempo entre intervenciones establecido lo permita.
- I6. Los programas de producción y mantenimiento se generan de manera integrada.
- I7. Se cumple el programa de mantenimiento según lo establecido.

Una vez definidos los indicadores que integran este grupo se comenzará con la aplicación del procedimiento específico descrito anteriormente.

En la Tabla 12 se muestra la evaluación que, según su criterio, cada experto asignó a los diferentes indicadores y la evaluación final que recibió cada indicador luego de hacer uso del operador LOWA para

la agregación de los términos lingüísticos emitidos por los expertos como medida de la evaluación del indicador considerado.

Primero se aplica la ecuación 17 para obtener el peso que en relación a su cardinalidad posee cada indicador, auxiliándose además de las expresiones 18 y 19. Una vez obtenido dicho peso se aplican las expresiones 15 y 16 para obtener así la evaluación final de cada indicador.

Tabla 12. Evaluaciones dadas por los expertos a los indicadores										
Indicadores	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	E ₆	E ₇	E ₈	E ₉	E.F
I1.	b	m	b	b	b	m	b	b	b	b
I2.	ma	a	ma	ma						
I3.	m	mb	m	m	m	b	m	m	m	m
I4.	b	b	b	b	b	b	b	b	m	b
I5.	mb	b	mb	mb	mb	mb	b	mb	mb	mb
I6.	n	mb	b	mb	mb	mb	mb	mb	mb	mb
I7.	mb	b	mb	mb	mb	mb	mb	b	mb	mb

En la Tabla 13 se resumen los resultados obtenidos de la aplicación del paso 6 del procedimiento específico referido al análisis de la calidad de la información para el caso de evaluaciones cualitativas. De la Tabla 13 se tiene que $\overline{RC} = 0,687$. Sustituyendo en la expresión 10 se obtiene un nivel de consenso global muy alto (NCG = ma).

$$0,687 - 0,3 / 0,8 - 0,3 = 0,387 / 0,5 = 0,774$$

Tabla 13. Niveles de consenso logrado en la evaluación de los indicadores cualitativos											
Indicador	V _{si} ^j	G	P _{nj}	P _{mbj}	P _{bj}	P _{mj}	P _{aj}	P _{maj}	P _{pj}	RC _j	NC _j
I1	(b, m)	2	0	0	0,777	0,222	0	0	0	0,652	a
I2	(a, ma)	2	0	0	0	0	0,111	0,888	0	0,8	p
I3	(mb, b, m)	3	0	0,111	0,111	0,777	0	0	0	0,627	a
I4	(b, m)	2	0	0	0,888	0,111	0	0	0	0,8	p
I5	(mb, b)	2	0	0,777	0,222	0	0	0	0	0,652	a
I6	(n, mb, b)	3	0,111	0,777	0,111	0	0	0	0	0,627	a
I7	(mb, b)	2	0	0,777	0,222	0	0	0	0	0,652	a

Una vez concluida la evaluación de estos indicadores, se procederá a ponderarlos haciendo uso del segundo módulo del procedimiento específico. Los resultados se muestran a continuación:

						Indicadores
1^2	1^0	1^1	1^2	1^1	1^2	1
2^0	3^2	4^1	5^0	6^1	7^0	
	2^0	2^1	2^1	2^2	2^2	2
	3^2	4^1	5^1	6^0	7^0	
		3^2	3^2	3^2	3^2	3
		4^0	5^0	6^0	7^0	
			4^0	4^1	4^1	4
			5^2	6^1	7^1	
				5^2	5^2	5
				6^0	7^0	
					6^1	6
					7^1	7

La calidad obtenida en el proceso de ponderación fue medida mediante el nivel de consistencia logrado por los expertos, utilizando la expresión 21, el nivel de consistencia alcanzado en las comparaciones pareadas fue de 0,85. El desarrollo de este segundo modulo del procedimiento específico estuvo apoyado en la aplicación de una herramienta informática desarrollada en Delphi 7.0.

En la Tabla 14 se muestran los pesos correspondientes a cada indicador, mientras que en la Tabla 15 se muestran las evaluaciones finales de cada uno de estos y el término lingüístico a agregar, considerando la proporcionalidad directa o inversa que existe entre el indicador y el índice general al cual tributa. En este ultimo grupo de indicadores no es necesario aplicar el operador de negación sobre el termino lingüístico que define la evaluación de los mismos, pues a medida que la evaluación de estos sea mayor, la importancia de la integración GP - GM será más significativa.

Tabla 14. Peso de cada indicador

Indicadores	Puntos	Orden	Peso
1	8	2	0,07
2	6	4	0,14
3	12	1	0,04
4	4	5	0,18
5	7	3	0,11
6	3	6	0,21
7	2	7	0,25

Tabla 15. Término lingüístico a agregar y peso de cada indicador.

Indicadores	Evaluación	Término a agregar	Peso
1	b	b	0,07
2	ma	ma	0,14
3	m	m	0,04
4	b	b	0,18
5	mb	mb	0,11
6	mb	mb	0,21
7	mb	mb	0,25

Luego de conocer los pesos y la evaluación de cada indicador solo queda agregarlos. La existencia de n indicadores a agregar mediante el operador ϕ_F genera un vector ordenado ($B = \sigma(A)$) compuesto por n términos lingüísticos con sus respectivos pesos. Esto implica la realización de n-1 iteraciones, teniendo en cuenta que en cada iteración i se agregan dos términos, siendo uno el resultado de la agregación en

la iteración $i - 1$ y el otro el $(n - i) - \text{ésimo}$ de los términos a agregar. Los vectores B y W sobre los cuales se aplicará el operador ϕ_F para obtener el IPM son los siguientes:

$$B = (m, b, mb, ma, b, mb, mb) \quad W = (0,04; 0,07; 0,11; 0,14; 0,18; 0,21; 0,25)$$

Al aplicar la expresión 20 se obtiene el correspondiente vector de pesos ajustados β_h , a partir del cual se obtienen los componentes de peso w_1 y $1-w_1$ a utilizar en cada iteración de agregación de pares de términos lingüísticos.

$$\beta_h = (0,04; 0,69; 0,36; 0,40; 0,44; 0,46; 0,54)$$

En la Tabla 5 se muestran los resultados de la agregación en cada iteración, y finalmente la evaluación del índice IPM (b).

Iteraciones	Términos a agregar	i	j	w_1	$1-w_1$	k	ϕ_F
1	mb, mb	1	1	0,54	0,46	1	mb
2	b, mb	1	2	0,44	0,56	1	mb
3	ma, mb	1	5	0,40	0,60	3	m
4	m, mb	1	3	0,64	0,36	2	b
5	b, b	2	2	0,69	0,31	2	b
6	m, b	2	3	0,04	0,96	2	b

El resultado final que muestra el operador LOWA (ϕ_F) en la Tabla 16 corresponde con el valor del IPM, en este caso: bajo, lo cual indica que existen reservas para su mejoramiento. En este sentido, como parte, de los esfuerzos de mejora el epigrafe siguiente, se muestra el diseño de un método heurístico para contribuir al desarrollo de programas integrados de producción y mantenimiento preventivo en la UEB.

3.2. Diseño de una heurística para la programación integrada de órdenes de producción e intervenciones de mantenimiento preventivo en un ambiente productivo de máquinas paralelas.

En este caso el sistema productivo consta de un conjunto de 10 máquinas, dispuestas en paralelo, capaces de procesar indistintamente n tipos de productos. Cada producto recibe todo el procesamiento en una y solo una de las máquinas disponibles, las cuáles por demás se asumen idénticas en el sentido de que el tiempo de procesamiento de cada trabajo (producto) es igual para todas las máquinas. El tiempo de procesamiento de los trabajos se asume constante y conocido, y una vez iniciado el procesamiento de un trabajo este no será interrumpido, a menos que ocurran perturbaciones inevitables en el proceso tales como fallo del equipo, ausencia del fluido eléctrico, etc, en cuyo caso, luego de restablecidas las condiciones de operación se continuará el procesamiento del producto (lo que se

denomina en la literatura (*resumable case*). El algoritmo que se propone se dirige entonces a establecer una asignación de trabajos a las diferentes máquinas disponibles, indicando además el momento más conveniente de efectuar las intervenciones de mantenimiento preventivo sobre las máquinas, para minimizar el tiempo total de fabricación (*makespan*). Se considera una política de mantenimiento preventivo del tipo *as good as new*, o sea, luego de ejecutar la intervención preventiva sobre el equipo se restablecen totalmente las condiciones operativas del mismo. El diseño del algoritmo se presenta a continuación:

3.2.1. Definición de variables y parámetros del algoritmo heurístico

n : número de trabajos (productos)

m : número de máquinas

J : conjunto de trabajos (productos) a ser programados

M : conjunto de máquinas

r_j : instante de tiempo en que el trabajo j se encuentra disponible para iniciar su procesamiento

p_j : Tiempo de procesamiento del trabajo j

t_p : Tiempo medio de duración de la parada por mantenimiento preventivo.

t_r : Tiempo medio de duración de la parada por mantenimiento correctivo

β_k : Parámetro de forma de la distribución Weibull de la variable tiempo entre fallos correspondiente a la máquina k .

η_k : Parámetro de escala de la distribución Weibull de la variable tiempo entre fallos correspondiente a la máquina k .

j_l, j_t : Subíndices utilizados para denotar los trabajos

I_k : Número de trabajos asignados a la máquina k

Tt_k : Tiempo de terminación de la máquina k .

$a_{k(lk^-)}$: Edad efectiva de la máquina k antes de iniciar el procesamiento del trabajo $l_{(k-ésimo)}$

$a_{k(lk)}$: Edad efectiva de la máquina k luego de terminar el procesamiento del trabajo $l_{(k-ésimo)}$

TCE_{lk} : Tiempo de completamiento esperado del trabajo l en la máquina k

TE_{lkPM1} : Tiempo de elaboración del trabajo l en la máquina k si la actividad de mantenimiento preventivo se realiza en esa máquina antes de procesar el trabajo $l_{(k-ésimo)}$

TE_{lkPM0} : Tiempo de elaboración del trabajo l en la máquina k si no se realiza mantenimiento preventivo en esa máquina antes de iniciar su procesamiento

\overline{TCE}_{lkPM1} : Tiempo de completamiento medio esperado de los primeros I_k trabajos procesados en la máquina k si la actividad de mantenimiento preventivo se realiza en esa máquina antes de iniciar el procesamiento del trabajo $l_{(k-ésimo)}$

\overline{TCE}_{IkPM0} : Tiempo de completamiento medio esperado de los primeros I_k trabajos procesados en la máquina k si no se realiza mantenimiento preventivo en esa máquina antes de iniciar el procesamiento del trabajo $l_{(k-\text{ésimo})}$

PM_{lk} : Variable binaria que indica si la intervención de mantenimiento preventivo se realizará en la máquina k antes de iniciar el procesamiento del trabajo l

$A(k), B(k)$: Arreglos que representan los subconjuntos de trabajos asignados a la máquina k , así como las intervenciones de mantenimiento preventivo que deben realizarse antes de iniciar el procesamiento de cada trabajo

$\#(\alpha)$: Cardinalidad del subconjunto α

$C_{\text{máx}}$: Valor del makespan asociado a la asignación de trabajos e intervenciones de mantenimiento establecida como solución

$\hat{C}_{\text{mín}}$: Cota mínima para el valor del makespan obtenida mediante la aplicación de algún método de asignación

ρ : Límite para el error de la solución obtenida por la primera fase del algoritmo (pasos del 1 al 6)

3.2.2. Pasos del algoritmo:

1. Inicializar: $Tt_k = I_k = 0 \forall k \in M; l = 0; A(1) = A(2) = \dots = A(m) = \emptyset; r_j \forall j = \{1, 2, \dots, n\}$

2. Formar el conjunto J de trabajos ordenados de manera no creciente según p_j

3. Hacer: $t = 1; S = \emptyset; P = \emptyset; l = l + 1$

Si $r_l = \min(r_j) \forall j = \{l, l + 1, \dots, n\}$ asignar el trabajo l a la máquina $k | TCE_{lk} = \min\{TCE_{lk}\} \forall k \in M$. En caso de empate seleccionar la máquina k arbitrariamente.

$$I_k = I_k + 1$$

$$TCE_{lk} = \begin{cases} \text{máx}(Tt_k; r_l) + TE_{lkPM1} & \text{si } \overline{TCE}_{IkPM1} < \overline{TCE}_{IkPM0} \\ \text{máx}(Tt_k; r_l) + TE_{lkPM0} & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (1)$$

$$PM_{lk} = \begin{cases} 1 & \text{si } \overline{TCE}_{lkPM1} < \overline{TCE}_{lkPM0} \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

$$TE_{lkPM1} = p_l + t_p + t_r \left[\left(\frac{p_l}{\eta_k} \right)^{\beta_k} \right] \quad (2)$$

$$TE_{lkPM0} = p_l + t_r \left[\left(\frac{a_{k(lk^-)} + p_l}{\eta_k} \right)^{\beta_k} - \left(\frac{a_{k(lk^-)}}{\eta_k} \right)^{\beta_k} \right] \quad (3)$$

$$a_{k(lk^-)} = \begin{cases} 0 & \text{si } PM_{lk} = 1 \\ a_{k(lk^-)} + p_{lk^-} & \text{si } PM_{lk} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\overline{TCE}_{IkPM1} = \frac{\sum_{j=1}^{I_k} p_j + \sum_{j=1}^{I_k-1} PM_{jk} * t_p + \sum_{j=1}^{I_k-1} t_r \left[\left(\frac{a_{k(j)}}{\eta_k} \right)^{\beta_k} - \left(\frac{a_{k(j^-)}}{\eta_k} \right)^{\beta_k} \right] + t_p + t_r \left[\left(\frac{p_l}{\eta_k} \right)^{\beta_k} \right]}{I_k} \quad (5)$$

$$\overline{TCE}_{IkPM0} = \frac{\sum_{j=1}^{I_k} p_j + \sum_{j=1}^{I_k-1} PM_{j_k} * tp + \sum_{j=1}^{I_k} t_r \left[\left(\frac{a_{k(j)}}{\eta_k} \right)^{\beta_k} - \left(\frac{a_{k(j^-)}}{\eta_k} \right)^{\beta_k} \right]}{I_k} \quad (6)$$

$Tt_k = TCE_{lk}$; $A(k) = A(k) \cup \{j_l\}$.

Si $\sum_{k=1}^m I_k < n$ repetir el paso 3 si no obtener $C_{m\acute{a}x} = \max \{Tt_k\} \forall k \in M$

Si $r_l \neq \min(r_j) \forall j = \{1, 2, \dots, n\}$ ir al paso 4

4. Generar el subconjunto $P \subset J \setminus \{j_l; A(k) \forall k \in M\} | r_l > r_p \forall p \in P$ de trabajos ordenados de manera no decreciente segun r_j ; hacer $I_k = I_k + 1 \forall k \in M$ y calcular el tiempo de completamiento esperado del trabajo t en cada m\acute{a}quina k aplicando la ecuaci3n 1.

Identificar la m\acute{a}quina $k | TCE_{tk} = \min \{TCE_{tk}\}$. En caso de empate, seleccionar arbitrariamente

Si $\min \{TCE_{tk}\} \leq r_l Tt_k = TCE_{tk}$; $S = S \cup \{j_t\}$; $I_k = I_k - 1 \forall k \setminus k: Tt_k = TCE_{tk}$; si no $I_k = I_k - 1 \forall k = \{1, 2, \dots, m\}$

Hacer $t = t + 1$. Si $t \leq \#(P)$ repetir el paso 4, si no ir al paso 5

5. Si $S \neq \emptyset$ asignar los trabajos del subconjunto S aplicando la regla combinada $r_j - LPT$ y actualizar los arreglos $A(k)$. Actualizar los valores de Tt_k en cada m\acute{a}quina $k | \exists j_t \in A(k)$

$A(k) = A(k) \cup \{j\} | j \in A(k)$ y actualizar los valores $I_k \forall k \in M$

$Tt_k = TCE_{tk} \forall k | j_t \in A(k)$

Si $S = \emptyset$ ir al paso 6

6. Asignar el trabajo l a la m\acute{a}quina $k | TCE_{lk} = \min \{TCE_{lk}\} \forall k = \{1, 2, \dots, m\}$. En caso de empate seleccionar la m\acute{a}quina k arbitrariamente; $A(k) = A(k) \cup \{j_l\}$. Actualizar Tt_k y los valores $I_k \forall k \in M$

$Tt_k = TCE_{lk}$

Si $\sum_{k=1}^m I_k < n$ ir al paso 3, si no obtener $C_{m\acute{a}x} = \max \{Tt_k\} \forall k \in M$

Si $C_{m\acute{a}x} \leq \rho * \hat{C}_{m\acute{a}n}$ el algoritmo termina, estableciendo para cada m\acute{a}quina k la asignaci3n dada por los arreglos $A(k)$ y PM_{lk} , siendo el makespan igual a $C_{m\acute{a}x}$

Si no ir al paso 7

7. Si $C_{m\acute{a}x} > \rho * \hat{C}_{m\acute{a}n}$ restablecer el conjunto J de trabajos ordenados de manera no creciente segun p_j y reajustar: $Tt_k = I_k = 0 \forall k = \{1, 2, \dots, m\}$; $B(1) = B(2) = \dots = B(m) = \emptyset$; $l = 1$; $k = 1$; $LS = C_{m\acute{a}x}$ e ir al paso 8.

8. Calcular el tiempo de completamiento esperado del trabajo l en la m\acute{a}quina k (TCE_{lk}) utilizando la ecuaci3n 1.

Si $TCE_{lk} < LS$ $Tt_k = TCE_{lk}$; $C = C \cup \{j_l\}$; $l = l + 1$ y repetir el paso 8

Si $TCE_{lk} > LS$ hacer $l = l + 1$

Si $l \leq \#(J)$ repetir el paso 8; si no ir al paso 9

9. Si $C \neq \emptyset$ asignar los trabajos de C a k aplicando la regla $r_j - LPT$ y obtener $B(k)$; actualizar Tt_k y reajustar $J = J \setminus C$

10. Incrementar $k = k + 1$ y ajustar $l = 1$. Si $k \leq m$ repetir el paso 8, si no ir al paso 11
11. Si $J = \emptyset$ establecer $C_{m\acute{a}x} = \acute{m}ax \{Tt_{ki}\} \forall k \in M$; reemplazar A (k) por B (k) $\forall k = \{1, 2, \dots, m\}$ e ir al paso 7; si no el algoritmo termina estableciendo para cada máquina k la asignación dada por los arreglos A (k) y PM_{lk} , siendo el makespan igual a LS

3.2.3. Definición de la regla combinada r – LPT

1. Ajustar $t_0 = \acute{m}ax \left(\acute{m}in(r_j), \acute{m}in(Tt_k) \right) \forall j \in S, k \in M, JA = \emptyset, MA = \emptyset$
2. Formar el subconjunto de trabajos $JA \subset S | r_j \leq t_0 \forall j \in S$.
3. Formar el subconjunto de máquinas $MA \subset M | Tt_k \leq t_0 \forall k \in M$
4. Si $\#(JA) \leq \#(MA)$ asignar en el instante t_0 cada trabajo de JA a alguna máquina k de MA, si no asignar los trabajos de JA a las máquinas de MA según la regla LPT.

Actualizar $A(k) \forall k \in MA$ y $Tt_k = TCE_{jk} | j \in A(k) \forall k \in MA$

5. Ajustar $S = S \setminus \{j \in JA | j \in A(k) \forall k \in MA\}$. Si $S \neq \emptyset$ repetir el paso 1 si no terminar.

3.2.4. Pasos para obtener $\hat{C}_{mín}$

1. Obtener el tiempo de procesamiento incrementado p'_j de cada trabajo j

$$p'_j = p_j + \frac{\bar{t}p * \bar{N}p + \bar{t}r * Nf_{mín}}{n * m}$$

$$Nf_{mín} = \sum_{j=1}^n \left(\frac{p_j}{\eta_{m\acute{a}x}} \right) \beta_{mín}$$

2. Obtención del número de trabajos $\bar{N}p$ procesados hasta el inicio de la actividad de PM

Generar la ecuación de tiempo total dedicado a mantenimiento (TTM) en función de N_p

$$TTM = t_p \frac{n}{N_p} + t_r \left[\frac{n}{N_p} * \left(\frac{\sum_{j=1}^{N_p} p_{m\acute{a}x}}{\bar{\eta}} \right)^{\bar{\beta}} \right]$$

- 2.1. Obtener el valor N_p^* tal que $TTM_{(N_p^*-1)} > TTM_{(N_p^*)} < TTM_{(N_p^*+1)}$ y Hacer $\overline{Np} = \left\lfloor \frac{n}{N_p} \right\rfloor - 1$ si $n \bmod N_p = 0$, si no $\overline{Np} = \left\lfloor \frac{n}{N_p} \right\rfloor$

3. Aplicar alguna de las heurísticas conocidas para minimizar el makespan en ambiente de máquinas paralelas, como por ejemplo: LPT, sin considerar la influencia del mantenimiento, tomando los nuevos tiempos de procesamiento $p'_j, \forall j = \{1, 2, \dots, n\}$

$$\hat{C}_{mín} = \acute{m}ax(Tt_k) \forall k \in M$$

Los primeros 6 pasos del algoritmo (los que pudieran formar parte de una denominada fase 1) se dirigen a buscar una solución inicial tomando como base el enfoque general de la regla LPT, pero con una ligera modificación que se implementa en el paso 3 donde se considera que el trabajo de mayor tiempo de procesamiento que se encuentre disponible en un momento dado será asignado a aquella máquina que logre para este un menor tiempo de completamiento esperado, en lugar de asignarlo directamente a la

primera máquina disponible, tal como lo indica LPT. De esta forma se considera el impacto de las interrupciones por fallos sobre el tiempo de elaboración de los trabajos.

En el paso 6 se decide si la calidad de la solución obtenida hasta ese momento es adecuada como para finalizar el algoritmo. Para ello se compara el makespan obtenido ($C_{m\acute{a}x}$) con una cota mínima calculada para el mismo ($\hat{C}_{m\acute{i}n}$) incrementada una cantidad ρ . Para obtener el valor de $\hat{C}_{m\acute{i}n}$ se propone un algoritmo que aprovecha el carácter convexo de la función TTM. En este algoritmo se considera que todos los trabajos son procesados en una única máquina (ficticia) cuyos parámetros β y η de la distribución del tiempo entre fallos se corresponden con el valor mínimo y el máximo, respectivamente, del conjunto de valores de β y η correspondientes a las máquinas del sistema real.

Los pasos del 7 al 11 buscan refinar la solución en caso de que no se cumpla el criterio de parada establecido en el paso 6, para lo cual se implementa un enfoque de búsqueda exhaustiva donde en cada iteración se trata de mejorar la solución obtenida en la iteración previa, finalizando cuando no sea posible obtener mejoras.

3.3. Resultados de la aplicación práctica del algoritmo de programación integrada.

La UEB está integrada por 12 máquinas de inyección, de ellas 2 están en desuso, la TTI-210 está en reconversión, mientras la TTI-80-2 está fuera de servicio. A continuación, en la Tabla 17 se muestra la asignación de los trabajos a las diferentes máquinas realizada en la empresa, incluyendo el tiempo de procesamiento de cada producto en las máquinas, el tamaño del lote a producir y el tiempo de procesamiento final de los lotes (incluyendo en este último dato el tiempo de preparación del equipo para comenzar a realizar la tarea, el cual es de 30 minutos para cada una de las máquinas).

Tabla 17: Datos productivos de la UEB Centroplast				
Máquinas	Productos	Tiempo de elaboración (h)	Tamaño del lote (u)	Tiempo de producción (h)
TTI-130-1	1. Asa del gabinete	0,0054	61222	360,60
	2. Decoración del mango FOK	0,0071	16198	145,01
	3. Decoración del mango WYA 40	0,0071	13463	125,59
	4. Decoración mango YBD40A	0,0071	6337	74,99
	5. Decoración YBXB40-80C	0,0071	2988	51,21
	6. Placa soporte 2 puestos (vivienda)	0,0069	56301	418,48
	7. Cubierta placa 2 puestos (vivienda)	0,0017	122000	237,4
TTI-130-2	8. Cubierta del tomacorriente aterrado (vivienda)	0,0016	217567	378,11
	9. Recipiente medidor	0,0153	26745	439,20
	10. Base del tomacorriente aterrado (vivienda)	0,0014	184570	288,40
TTI-300	11. Hélice 12' Repuesto	0,0195	42022	849,43
	12. Botón de ajuste tiempo	0,0058	3976	53,06
	13. Localizador YBXB40-80C	0,0190	25736	518,98
	14. Caja 2x4 vivienda	0,0072	21699	186,23

IJ-300-120-3	15. Asa Superior de la olla arrocera	0,0064	31293	230,27
	14. Caja 2x4 vivienda	0,0072	30721	251,19
	16. Caja 4x4 vivienda	0,0072	43857	345,77
	17. Tapa lateral	0,0055	33084	211,96
	18. Tapa tanque CK	0,0058	16804	127,46
EM-300	19. Columna base VE 79	0,0207	30694	665,37
	20. Tuerca protector Vietnam	0,0043	19167	112,42
	14. Caja 2x4 vivienda	0,0072	41648	329,87
	21. Base VE 79	0,0156	6002	123,63
	22. Tapa base VE 78	0,0173	8310	173,76
EM-480	23. Hélice VE 79	0,0229	19056	466,38
	24. Hélice 16 repuesto	0,0229	792	48,14
	25. Gaveta para vegetales	0,0229	2740	92,75
	26. Panel frontal	0,0172	2289	69,37
	27. Marco congelador	0,0229	1704	69,02
JM-650	28. Panel superior	0,0533	1740	122,74
	29. Anillo protector VE 79	0,0110	14412	188,53
HDJS-128	30. Tapa del Teclado VE78	0,0073	1120	38,18
HDJS-168	16. Caja 4x4 vivienda	0,0072	499	33,59
HDJS-328	31. Base VE78	0,0231	309	37,14

Se decidió analizar 31 productos, los cuales requirieron un tiempo total de elaboración de 1504 horas. La producción comenzó el 03/01/2017 y culminó el día 25/03/17, fecha en la que finalizó el último trabajo. Este periodo comprende la etapa de 59 días hábiles laborables y 11 sábados en los que se trabaja un solo turno al día.

Para la aplicación del algoritmo es necesario conocer los tiempos de fallos y los tiempos entre fallos de los equipos (tiempos de operación) y demostrar que los mismos se ajustan a una distribución Weibull, puesto que esto último constituye una de las premisas del algoritmo diseñado. Para el logro de este objetivo se utiliza el modelo universal de medición CMD (Confiablez - Mantenibilidad - Disponibilidad) desarrollado por Mora Gutiérrez (2012), el cual propone utilizar las pruebas Kolmogorov - Smirnov, Anderson - Darling y Chi cuadrado para demostrar el ajuste de los datos a una distribución determinada en este caso la Weibull, afirmando que deben cumplirse como mínimo dos de estas pruebas para demostrar que el ajuste es adecuado.

Los resultados de las pruebas aplicadas al tiempo de fallos y los tiempos de operación se muestran en los anexos 10 y 11.

Los valores de T_p (tiempo medio de mantenimiento preventivo) son determinados mediante el tiempo establecido a cada una de las intervenciones que definen el ciclo del Mantenimiento preventivo planificado (MPP) vigente en el manual de cada una de los equipos, mientras que el T_r (tiempo de mantenimiento correctivo) es calculado mediante la expresión 7 planteada por Mora Gutiérrez (2012).

$$T_r = \eta * \Gamma(1 + \frac{1}{\beta}) \tag{7}$$

Donde:

T_r : Tiempo medio de mantenimiento correctivo

η : Parámetro de escala de la distribución Weibull

β : Parámetro de forma de la distribución Weibull

Γ : Operador correspondiente a la distribución Gamma.

Una vez que se realizan estos análisis los mismos son relacionados en la Tabla 18, incluyendo los valores β y η de la distribución Weibull asociados a la variable tiempo entre fallos.

Tabla 18. Datos de operación y fallos del equipamiento				
Máquinas	T_r	T_p	β	η
TTI-130-1	139,36	33,45	1,76	576,51
TTI-130-2	120,87	33,45	1,89	980,08
TTI-300	147,36	33,45	1,86	376,08
IJ-300-120-3	125,78	35,54	1,98	1456,88
EM-300	106,62	27,29	1,82	2154,72
EM-480	134,76	27,29	1,94	911,79
JM-650	112,61	27,29	1,96	1790,76
HDJS-128	138,64	33,45	1,75	1474,43
HDJS-168	141,02	33,45	1,86	560,25
HDJS-328	342,26	33,45	1,52	149,02

El algoritmo propuesto fue programado utilizando la herramienta informática MATLAB R2015a. Para definir el criterio de parada se estableció $\rho = 1$, el valor de \hat{C}_{\min} obtenido al aplicar los pasos que se muestran en el subepígrafe 3.2.4 es de 860,50 horas.

A continuación, se presentan las salidas del software, en la primera salida puede observarse la asignación de trabajos realizada a cada máquina, teniendo en cuenta las actividades preventivas de mantenimiento, las cuales se representan con el número 100.

En la segunda salida se muestra el valor del makespan (tiempo de culminación del último trabajo) el cual es de 970,84 horas, demostrándose que el algoritmo produce una mejora significativa respecto a la solución obtenida por el objeto de estudio. Luego de estas salidas se confeccionó una tabla resumen para una mayor comprensión de la información obtenida:

MATLAB R2015a

HOME PLOTS APPS

Search Documentation

New Variable Analyze Code Preferences Community
 Run and Time Set Path Request Support
 Clear Commands Clear Workspace Parallel Help Add-Ons

FILE VARIABLE CODE SIMULINK ENVIRONMENT RESOURCES

Current Folder: C:\Users\ronalddc\Desktop\matlab functions\parallel machines\artm

```

1 function [ TCEj ] = TCEj_Jobs( m,Jobs,e0,tp,tr,beta,eta )
2 %funcion para calcular solamente el TCE del trabajo ubicado en la pos 1 de Job
3 %la var de salida es el vector TCE con el tiempo de comp del job de MP en cada
4 global A I eiaj eidj Tt TEij TCEj PMj;
5 TCEj = zeros(1,m);
6 for i = 1:m
7     I(i) = I(i) + 1;
8     A(i,I(i)) = Jobs(2,1);
9     if I(i) == 1
10        eiaj(i,I(i)) = e0(i);

```

Command Window

```

scheduleB =
Columns 1 through 14
     6    100    15    20     0     0     0     0     0     0     0     0     0     0
    23     7     3    30     0     0     0     0     0     0     0     0     0     0
     8    100    22   100    28     0     0     0     0     0     0     0     0     0
    19     2    25     0     0     0     0     0     0     0     0     0     0     0
    11    27     0     0     0     0     0     0     0     0     0     0     0     0
     9   100     1    12     0     0     0     0     0     0     0     0     0     0
    14    21    24     0     0     0     0     0     0     0     0     0     0     0
    13    17    18     5     0     0     0     0     0     0     0     0     0     0
    16   100    10    26    31     0     0     0     0     0     0     0     0     0
    29   100     4     0     0     0     0     0     0     0     0     0     0     0

```

Workspace

Name	Value
beta	[1.7600 1.8900 1.8600 ...]
Cmin	857.2700
datos	3x31 double
e0	[0 0 0 0 0 0 0 0]
eta	[576.5100 980.0800 37...
makespan	970.8362
maq	10
tp	[33.4500 33.4500 33.4...
tr	[139.3600 120.8700 14...
trab	31

MATLAB R2015a

HOME PLOTS APPS

Search Documentation

New Variable Analyze Code Preferences Community
 Run and Time Set Path Request Support
 Clear Commands Clear Workspace Parallel Help Add-Ons

FILE VARIABLE CODE SIMULINK ENVIRONMENT RESOURCES

Current Folder: C:\Users\ronalddc\Desktop\matlab functions\parallel machines\artm

```

1 function [ TCEj ] = TCEj_Jobs( m,Jobs,e0,tp,tr,beta,eta )
2 %funcion para calcular solamente el TCE del trabajo ubicado en la pos 1 de Job
3 %la var de salida es el vector TCE con el tiempo de comp del job de MP en cada
4 global A I eiaj eidj Tt TEij TCEj PMj;
5 TCEj = zeros(1,m);
6 for i = 1:m
7     I(i) = I(i) + 1;
8     A(i,I(i)) = Jobs(2,1);
9     if I(i) == 1
10        eiaj(i,I(i)) = e0(i);

```

Command Window

```

Tj2B =
Columns 1 through 8
  11.0000   14.0000   19.0000   13.0000   23.0000    9.0000    6.0000   16.0000
 869.0220  788.6767  692.0200  541.2803  496.0797  471.8686  497.7786  447.6452

Columns 9 through 16
   8.0000    1.0000   10.0000    7.0000   15.0000   17.0000   29.0000   22.0000
526.9529  882.0427  810.5044  768.4183  789.2098  771.5459  677.8610  769.2111

Columns 17 through 24
   2.0000   18.0000    3.0000   21.0000   28.0000   20.0000   25.0000    4.0000
849.7564  912.1964  917.5294  919.5821  943.7610  957.3478  951.9298  906.8128

Columns 25 through 31
  26.0000   27.0000   12.0000    5.0000   24.0000   30.0000   31.0000
919.3238  941.0354  948.9719  969.1478  970.8362  963.5367  968.8125

makespan =
 970.8362

```

Workspace

Name	Value
beta	[1.7600 1.8900 1.8600 ...]
Cmin	857.2700
datos	3x31 double
e0	[0 0 0 0 0 0 0 0]
eta	[576.5100 980.0800 37...
makespan	970.8362
maq	10
tp	[33.4500 33.4500 33.4...
tr	[139.3600 120.8700 14...
trab	31

3 notificaciones nuevas

Tabla 19. Resumen de las salidas del software:

Máquinas	Productos				
TTI-130-1	6. Placa soporte 2 puestos (vivienda)	Mantenimiento preventivo	15. Asa Superior de la olla arrocera	20. Tuerca protector Vietnam	
TTI-130-2	23. Hélice VE 79	7. Cubierta placa 2 puestos (vivienda)	3. Decoración del mango WYA 40	30. Tapa del Teclado VE78	
TTI-300	8. Cubierta del tomacorriente aterrado (vivienda)	Mantenimiento preventivo	22. Tapa base VE 78	Mantenimiento preventivo	28. Panel superior
IJ-300-120-3	19. Columna base VE 79	2. Decoración del mango FOK	25. Gaveta para vegetales		
EM-300	11. Hélice 12' Repuesto	27. Marco congelador			
EM-480	9. Recipiente medidor	Mantenimiento preventivo	1. Asa del gabinete	12. Botón de ajuste tiempo	
JM-650	14. Caja 2x4 vivienda	21. Base VE 79	24. Hélice 16 repuesto		
HDJS-128	13. Localizador YBxB40-80C	17. Tapa lateral	18. Tapa tanque CK	5. Decoración YBxB40-80C	
HDJS-168	16. Caja 4x4 vivienda	Mantenimiento preventivo	10. Base del tomacorriente aterrado (vivienda)	26. Panel frontal	31. Base VE78
HDJS-328	29. Anillo protector VE 79	Mantenimiento preventivo	4. Decoración mango YBD40A		

3.4. Conclusiones parciales

1. Se evaluó el nivel de integración entre los subprocesos de programación de la producción y programación del mantenimiento, el cual resultó ser bajo, lo que evidenció la necesidad de desarrollar propuestas de mejoras.
2. Se logró diseñar un algoritmo de asignación que contribuye a la integración entre la Gestión de Producción y la Gestión de Mantenimiento, a nivel operativo, dirigido específicamente a la programación conjunta de actividades de producción y tareas de mantenimiento preventivo en un ambiente caracterizado por máquinas paralelas.
3. La aplicación del método heurístico propuesto permitió obtener una asignación de productos e intervenciones de mantenimiento preventivo dirigido a minimizar el tiempo final de terminación de los trabajos.
4. El algoritmo propuesto exige pocos esfuerzos de codificación, es de fácil comprensión por lo que puede ser aplicado sin grandes dificultades en entornos productivos de características similares.

Conclusiones generales

1. Los grupos de indicadores para la determinación de los índices de necesidad de integración Producción - Mantenimiento (NIPM) y desempeño del sistema (DSPM), fueron evaluados, mostrándose como resultados índices de muy alto y medio en NIPM y DSPM respectivamente, lo cual condujo a que la criticidad del proyecto de mejoramiento del nivel de integración GP - GM (CRIPM) fuera evaluada de alta, lo que fundamentada la necesidad de llevar a cabo el proyecto para el mejoramiento del nivel de integración GP - GM.
2. Se evaluó el nivel de integración entre los subprocesos de programación de la producción y programación del mantenimiento, mediante la definición del índice IPM el cual resulto ser bajo, lo cual evidenció la necesidad de desarrollar propuestas de mejoras.
3. Para contribuir a mejorar el nivel de integración entre los subprocesos de programación de la producción y programación del mantenimiento se elaboró un algoritmo heurístico para la asignación conjunta de órdenes de producción y tareas de mantenimiento preventivo en talleres de máquinas paralelas dirigido a minimizar el tiempo total de fabricación de los trabajos.

Recomendaciones

1. Extender el diagnóstico del nivel de integración a los restantes pares de subprocesos de la GP y la GM no considerados en la presente investigación.
2. Continuar aplicando el algoritmo propuesto en talleres productivos con configuraciones similares a las del objeto de estudio práctico.
3. Analizar la posibilidad del diseño de una propuesta que abarque el análisis de máquinas paralelas no relacionadas y tiempos de fallo con función de densidad probabilística diferente de la Weibull.
4. Analizar la posibilidad de la adopción de algoritmos de búsqueda local como métodos de solución al problema de programación integrada abordado en la investigación.

Bibliografía

1. Acosta y Pérez 1992. La adaptación de la función Mantenimiento a los cambios del entorno productivo. *Revista Mantenimiento*, # 55.
2. Achermann, D. 2008. Modelling, Simulation and optimization of Maintenance Strategies under Consideration of Logistic Processes. *Swiss Federal Institute of Technology Zurich*.
3. Adam, E. E. & Ebert, R. J. 2009. Administración de la producción y las operaciones. Conceptos, modelos y funcionamiento.
4. Aghezzaf Y Najib 2008. Integrated production planning and preventive maintenance in deteriorating production systems. *Information Sciences*.
5. Ahmad, R. & Kamaruddin, S. 2012. An overview of time-based and condition-based maintenance in industrial application. *Computers & Industrial Engineering*, 63 (1) 135–149.
6. Al-Najjar, H. 2007. "Maintenance impact on company's profitability and competitiveness - Applied at Kongabruk plant in Småland". Tesis en opción al grado académico de Master en Diseño Tecnológico., Universidad de Vaxjo, Suecia.
7. Alfonso et al, A. 2005. Integración Mantenimiento (RCM) – Gestión de la Producción. Su influencia en el mejoramiento de la Confiabilidad Operacional de la empresa.
8. Allaoui, M., Najid, N. M. & Mohafid, A. 2012. Lagrangian Relaxation Based Heuristic for an Integrated Production and Maintenance Planning Problem. *International Journal of Production Research*., 3630–3642.
9. Amendola León, J. L., Depool, T. & Artacho Ramírez, M. A. 2012. "Metodología de Diagnóstico en la Gestión Integral de activos físicos en la industria. Caso: Industria Eléctrica".
10. Angel Partida 2016. Tendencias tecnológicas en mantenimiento.
11. Baidya, R. & Kumar Ghosh, S. 2015. Model for a Predictive Maintenance System Effectiveness Using the Analytical Hierarchy Process as Analytical Tool. *Elsevier*.
12. Bedoya Ríos, C. M. 2014. ISO 55000 Gestión de activos. Una mirada hacia el futuro desde el área de mantenimiento.
13. Ben Ali, M., Sassi, M., Gossa, M. & Harrath, Y. 2011. Simultaneous scheduling of production and maintenance tasks in the job shop. *International Journal of Production Research*.
14. Bernal Matute, Á. A. 2013. *Manejo y optimización de las operaciones de mantenimiento preventivo y correctivo en un taller automotriz*.
15. Blazewicz, J., Sadfi, C., Penz, B., Rapine & Cand Formanowicz, P. 2005. An improved approximation algorithm for the single machine total completion time scheduling problem with availability constraints. *European Journal of Operational Research*, Vol. 161, pp.3–10.
16. Bonnie, E. 2017. *Introducción a la gestión de operaciones* [Online].
17. Borroto Pentón, Y., Alfonso Llanes, A. & De La Paz Martínez, E. M. 2015. "Gestión de mantenimiento". Diplomado de Administración y Gestión empresarial. UCLV, Cuba.
18. Brucker, P. 2007. *Scheduling Algorithms*.
19. Caba Villalobos, N. 2013. *Gestión de la Producción y Operaciones*.
20. Cabrerizo, F., J.; Alonso, S. & Herrera Viedma, E. 2008. A consensus model for group decisions making problems with unbalance fuzzy linguistic information. *International Journal of Information Technology & Decision Making*.
21. Cai, S. & Yang, Z. 2014. On the relationship between business environment and competitive priorities: The role of performance frontiers.
22. Canada, J. & Sullivan, W. 1997. Análisis de la inversión de capital para ingeniería y administración. Segunda edición.
23. Carrasco, G. 2015. *Mantenimiento Preventivo y Correctivo*, Modern Machine Shop.
24. Carrasco, R. A. 2011. A linguistic multi-criteria decision making model applied to the integration of education questionnaires. *International Journal of Computational Intelligence Systems*., vol. 4, p. 946-959.
25. Casanova Durán, A. 2013. *Sistemas de Producción*.

26. Castellano, S. & Urdaneta, J. A. G. 2015. Estrategias de mercadeo verde utilizadas por empresas a nivel mundial. 17.
27. Castro Bonaño, J. M. 2002. *Indicadores de Desarrollo Sostenible Urbano. Una aplicación para Andalucía*. Tesis presentada en opción al grado científico de doctor en ciencias técnicas., Universidad de Málaga.
28. César Ortega 2016. Dirección de la Producción y las Operaciones. "Production and Operations Management (POM)".
29. Cespón Castro, R., Santiago Ibarra Mirón Y Fernando Marrero Delgado 2005. *La selección del sistema de gestión de la producción en empresas manufactureras*.
30. Coffman, E. G., Garey, M. R. & Johnson, D. S. 1978. An application of Bin-Packing to multiprocessor scheduling. Vol. 7, Pp. 1 – 17.
31. Chase, R. B. & Aquilano, N. J. 1994. Dirección y administración de la producción y de las operaciones.
32. Chase, R. B., Jacobs, F. R. & Aquilano, N. J. 2009. *Administración de Operaciones. Producción y cadena de suministros*.
33. Chen, L., Ying, S. & Ala-Nissila, T. 2002. Finding transition paths and rate coefficients through accelerated Langevin dynamics.
34. Chen, S. M. 1996. Evaluating weapon systems using fuzzy arithmetic operations., 265-276.
35. Chen, Y., Cowling, P., Polack, F., Remde, S. & Mourdjis, P. 2017. Dynamic optimisation of preventative and corrective maintenance schedules for a large scale urban drainage system. *European Journal of Operational Research*, 257, 494-510.
36. Cheung, W. & Zhou, H. 2001. Using Genetic Algorithms and Heuristics for Job shop Scheduling with Sequence-dependent Setup Times. *Annals of Operations Research*, 65-81.
37. Choi, I. C. & Korkmaz, O. 1997. Job shop scheduling with separable sequence-dependent setups. Volume 70, pp 155–170.
38. Da, W., Feng, H. & Pan, E. 2016. Integrated preventive maintenance and production scheduling optimization on uniform parallel machines with deterioration effect. En Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM). International Conference on. IEEE.
39. Dao, C. D. & Zuo, M. J. 2017. "Selective maintenance of multi-state systems with structural dependence". *Reliability Engineering & System Safety*, 159, 184-195.
40. De La Paz Martínez, E. M. 2015. "Una nueva visión en la gestión del mantenimiento".
41. De La Paz Martínez, E. M. L. E., Humberto Y Aquilera Martínez, Allán 2000. *Evolución del mantenimiento en Cuba y la participación de las universidades cubanas en el proceso*.
42. Delgado, M., Verdegay, J. L. & Vila, M. A. 1993. On Aggregation Operations of Linguistic Labels. *International Journal of Intelligent Systems.*, 351 – 370.
43. Díaz Cazañas, R. 2008. Modelo conceptual y Procedimiento General para el Diagnóstico y mejoramiento del nivel de integración Operaciones-Mantenimiento.
44. Díaz Cazañas, R. & De La Paz Martínez, E. M. 2016. Procedimiento para la planeación integrada Producción – Mantenimiento a nivel táctico. 37.
45. Díaz Cazañas, R. & Pérez Gómez, Y. 2007. *Evaluación del desempeño en Operaciones* [Online].
46. Duffuaa, S., Ben-Daya, M., Al-Sultan, K. & Andijani, A. 2001. A generic conceptual simulation model for maintenance systems. *Journal of Quality in Maintenance Engineering and System Safety*, 7 (3), 207-219.
47. Echeverri Cañas, L. M. 2009. Acciones y prácticas de mercadeo verde en empresas colombianas (Casos de estudio).
48. Espinilla, M. A., R; Martínez, F, J; Martínez, L. A 2013. 360 degree performance appraisal model dealing with heterogeneous information and dependent criteria. *Information Sciences*.
49. Facchinetti, G. & Ricci, R. 2004. A characterization of a general class of ranking functions on triangular fuzzy numbers., 297–312.
50. Farfán Bertín, F. M. 2014. *Realizar un plan de mantención preventiva del chancador primario fuller en division Codelco Andina* Tesis para optar al Título de Ingeniero Civil en Obras Civiles. Universidad Austral de Chile.

51. Feng, H., Da, W., Huang, H., Xi, L. & Pan, E. 2016. Joint Optimization of Flowshop Sequence-Dependent Manufacturing Cell Scheduling and Preventive Maintenance. *Proceedings of the 2016 IEEE IEEM*.
52. Gaither, N. & Frazier, G. 2000. *Administración de producción y operaciones*.
53. Gaither, N. & Frazier, G. 2012. *Administración de producción y operaciones*.
54. Gao, J., Gen, M. & Sun, L. 2008. A hybrid genetic and variable neighborhood descent algorithm for flexible job shop scheduling problems. *Computers & Operations Research*, 2892 – 2907.
55. García Garrido, S. 2008. Las cinco generaciones de mantenimiento.
56. García Martínez, C. M. 2014. *Perfeccionamiento del modelo para la gestión integrada Produccion - Mantenimiento*.
57. González Álvarez, R. E. 2013. Evolución de las estrategias empresariales hacia un marketing ecológico y sostenible.
58. Gunasekaran, A., Korukonda, A. R., Virtanen, I. & Yli-Olli, P. 1995. Optimal investment and lot-sizing policies for improved productivity and quality. *International Journal of Production Research*.
59. Gunasekaran, A. & Ngai, E. W. T. 2012. The future of operations management: An outlook and analysis. 135, 687-701
60. Guzman De Posada , O. & Alfonso Llanes, A. 2014. "Evaluación de la Gestión de activos en la empresa Combinado Lácteos de Morón".
61. Heizer, J. & Render, B. 2009. *Dirección de la Producción. Direcciones Estratégicas*.
62. Herrera, F., E. Herrera-Viedma & J.L. Verdegay 1996a. A model of consensus in group decision making under linguistic assessments. *Fuz O' Sets and Systems*.
63. Herrera, F., Herrera-Viedma, E. & Verdegay, J. L. 1996b. A model of consensus in group decision making under linguistic assessments., 73 - 87.
64. Herrera, F., Herrera - Viedma, E. & Virtanen, I. 1997. Aggregation Operators for Linguistic Weighted Information. *IEEE Transactions On Systems, Man, And Cybernetics. Systems And Humans.*, Vol. 27.
65. Herrera Galán & Duany Alfonso 2016. Metodología e implementación de un programa de gestión de mantenimiento.
66. Hillier, F. & Lieberman, G. 2010. *Introducción a la investigación de operaciones*.
67. Hurtado De Mendoza, S. 2003. "Criterio de expertos. Su procedimiento a través del método Delphi".
68. Ibarra Mirón, S. 2005. *Sistemas de planificación y control de la producción*.
69. Jin Et Al, X. L., L; Ni, J. 2009. Option model for joint production and preventive maintenance system. *International Journal of Production Economics*.
70. Khatami, M. & Zegordi, S. H. 2014. Coordinative production and maintenance scheduling problem with flexible maintenance time intervals. *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 28, p. 857-867.
71. Krajewski, L. J. & Ritzman, L. P. 2010. *Administración de Operaciones, estrategia y análisis*.
72. Kumar, S. & Kumar – Lad, B. 2016. Integrated production and maintenance planning for parallel machine system considering cost of rejection. *Journal of the Operational Research Society*, Pp. 1 - 3.
73. Kumar, S. A. & Suresh, N. 2009. *The Impact of Operations Performance on Customer Loyalty Service Science*.
74. Lee, C. Y. 1996. Machine scheduling with an availability constraint. *Journal of Global Optimization*, 9, 395-416.
75. Lee, C. Y., He, Y. & Tang, G. 2000. A note on “parallel machine scheduling with non-simultaneous machine available time”. *Discrete Applied Mathematics*. .
76. Lee, W., Ch. & Wu, C., Ch. 2008. Multi machine scheduling with deteriorating jobs and scheduled maintenance. *Applied Mathematical Modelling*. 362–373.
77. Lee, W. C., Wang, J. Y. & Lee, L. Y. 2015. A hybrid genetic algorithm for an identical parallel machine problem with maintenance activity. *Journal of the Operational Research Society*, Pp. 1–13.

78. Lefcovich, M. L. 2002. Productividad, su gestión y mejora continua.
79. León López, F. D. J. 2015. *Diagnóstico de la Gestión de la Producción en el proceso de reparación de pailas* [Online].
80. Li, M. & Ma, L. 2017. Partition mixture of 1D wavelets for multi-dimensional data.
81. Liao, W., Zhang, X. & Jiang, M. 2017. Multi-objective group scheduling optimization integrated with preventive maintenance. *Engineering Optimization*, 1-15.
82. Longoni, A. & Cagliano, R. 2015. "Environmental and social sustainability priorities: Their integration in operations strategies". *International Journal of Operations & Production Management.*, Vol. 35.
83. López García, J. 2013. Las cinco generaciones del mantenimiento.
84. Luna, F. 2008. *Metaheurísticas avanzadas para problemas reales en redes de telecomunicaciones*.
85. Ma, Y., Chu, C. & Zuo, C. 2010. A survey of scheduling with deterministic machine availability constraints. *Computers & Industrial Engineering*, 199–211.
86. Machado Moreno, L. 2010. *Evaluación y mejoramiento del nivel de integración estrategia de Operaciones – estrategia de Mantenimiento en la planta de Embotellado de la Empresa Cervecería “Antonio Díaz Santana”*. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.
87. Machani, M. & Nourelfath 2012. A variable neighbourhood search for integrated production and preventive maintenance planning in multi-state systems. *International Journal of Production Research.*, 50, pp. 3643–3660.
88. Machuca, J. A. D., Díaz, M. S. & Gil, M. J. Á. 2005. Performance measurement systems, competitive priorities, and advanced manufacturing technology Some evidence from the aeronautical sector. *International Journal of Production and Operations Management*, vol. 25, p. 781-799.
89. Machuca, J. A. D., Gil, M. J. Á., González, S. G., Machuca, M. A. D. & Jiménez, A. R. 1995. Dirección de Operaciones: aspectos estratégicos en la producción y los servicios. *McGraw Hill. España*.
90. Maroto, C., Alcáraz, J. & Ruíz, R. 2002. Investigación operativa: modelos y técnicas de optimización.
91. Márquez Artola, F., Alfonso Llanes, A. & Borroto Pentón, Y. 2015. *"Evaluación de la Gestión de activos a partir de la ISO 55 000. Consideraciones teóricas"* Tesis de Diploma. Universidad Marta Abreu de Las Villas. Santa Clara, Cuba.
92. Márquez Gómez, M. 2013. Las metaheurísticas: tendencias actuales y su aplicabilidad en la ergonomía. *Ingeniería Industrial. Actualidad y Nuevas Tendencias*, Vol. IV.
93. Martí, R. 2003. Procedimientos metaheurísticos en optimización combinatoria.
94. Mata Mata, F. 2006. *Modelos para sistemas de apoyo al consenso en problemas de toma de decisión en grupo definidos en contextos lingüísticos multigranulares*. Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Informática., Universidad de Jaén.
95. Medina Robinson, J. 2015. ISO 55000, ISO 31000 y API RP 581 ALIADOS FUNDAMENTALES PARA LA GENERACIÓN DE VALOR EN GESTIÓN DEL RIESGO DE LOS ACTIVOS FÍSICOS. *Mantenimiento en Latinoamérica 7*.
96. Melián, B., Moreno, J. A. & Moreno, J. M. 2003. Metaheurísticas: una visión global. . *Revista iberoamericana de inteligencia artificial*, 19
97. Meredith, J. R. 2001. Hopes for the future of operations management. *Journal of Operations Management*, 19.
98. Merigó, J. M. & Gil Lafuente, A. M. 2011. Fuzzy induced generalized aggregation operators and its application in multi-person decision making. *Expert Systems with Applications.*, 9761–9772.
99. Mirabedini, S., N. & Iranmanesh, H. 2014. A scheduling model for serial jobs on parallel machines with different preventive maintenance (PM).
100. Mojicar Caballero, S. 2009. Procedimiento para la evaluación de la gestión del mantenimiento en las empresas cubanas.

101. Mojícar, S. 2004. Procedimiento para la evaluación de la gestión del mantenimiento en las empresas cubanas. *IV Congreso de Mantenimiento. Universidad Central de Las Villas.*
102. Moore, C. 2001. Mantenibilidad. Otra oportunidad de mejorar el Mantenimiento.
103. Mora Gutiérrez, A. 2012. *Mantenimiento Industrial Efectivo.*
104. Morillas Raya, A. 2000. *Introducción al análisis de datos difusos.* Curso de doctorado en Economía Cuantitativa., Universidad de Málaga.
105. Muchiri & Pintelon 2011. Development of maintenance function performance measurement framework and indicators. *International Journal of Production Economics.*
106. Naderi, B., Zandieh, M. & Fatemi Ghomi, S. 2009. A study on integrating sequence dependent setup time flexible flow lines and preventive maintenance scheduling. *Journal of Intelligent Manufacturing* 20, 683-694.
107. Najid Et Al, N. A., M; Mouhafid, A. 2010. An integrated production and maintenance planning model with time windows and shortage cost. *International Journal of Production Research.*
108. Oldemar Vargas 2017. Gestión de activos empresariales.
109. Olives Masip, R. 2015. *Mantenimiento preventivo*, Barcelona, Dirección General de Relaciones Laborales y Calidad en el Trabajo.
110. Orihuela García, D. 2010. Procedimiento para la evaluación del impacto de la gestión de activos sobre la gestión de operaciones, en UEB Embotellado de la Cervecería "Antonio Díaz Santana".
111. Parra Márquez, C. & Crespo Márquez, A. 2012. *Ingeniería de Mantenimiento y Fiabilidad Aplicada en la Gestión De Activos*, Sevilla, España, INGEMAN
112. Peláez, J., I. & Doña, J., M. 2003. LAMA: A Linguistic Aggregation of Majority Additive Operator. *International Journal of Intelligent Systems.*, 809 – 820.
113. Peláez, J., I. & Doña, J., M. 2004. Opinión de mayoría en toma de decision en grupo mediante el operador QMA – OWA.
114. Pinedo, M. L. 2012. *Scheduling. Theory, Algorithms, and Systems.*
115. Porcel Gallego, C. 2005. *Sistemas de acceso a la información basados en información lingüística difusa y técnicas de filtrado.* Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Informática., Universidad de Granada.
116. Prada Ospina, R. & C. Ocampo, P. 2017. La batalla entre consumismo y el medio ambiente. Una responsabilidad de todos. 3.
117. Quintero Bueno, A. J. 2011. "Modelo para implementar y auditar un sistema de Gestión de activos".
118. Rajkumar, M., Asokan, P., Anilkumar, N. & Page, T. 2011. A GRASP algorithm for flexible job-shop scheduling problem with limited resource constraints. *International Journal of Production Research.*
119. Rajkumar, M., Asokan, P. & Vamsikrishna, V. 2010. A GRASP algorithm for flexible job-shop scheduling with maintenance constraints. *International Journal of Production Research.*
120. Raña González Et Al, L. D. A. O. C. A., Jorge Baste González, José Luís Falcón Cuadra 2010. *Evaluación de la función mantenimiento en empresas transportistas.*
121. Real Academia Española 2012. Diccionario de la lengua española. . *Diccionario de la lengua española.*
122. Rodríguez & Verónica 2000. MRP II Aplicado al mantenimiento productivo total.
123. Rodríguez, C. 2010. Algoritmos heurísticos y metaheurísticos para el problema de localización de regeneradores.
124. Rodríguez Machado, A. 2012. *Manual de Gestión de Mantenimiento.* Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniería Industrial, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
125. Rodriguez, R. M., Martinez, L. & Herrera, F. 2012. Hesitant fuzzy linguistic term sets for decision making. vol. 20, p. 109-119.
126. Royo & Berges 2000. Integración Producción-Mantenimiento y su influencia en la planificación de la empresa.

127. Ruiz Et Al, R., García, C., Maroto, C. 2004. Secuenciación y mantenimiento preventivo en talleres de flujo. 28.
128. Sadiq, S. M. & Habib, Y. 1999. Iterative Computer Algorithms with Applications in Engineering. .
129. Sánchez, Á. G., Bedia, L. M. A. & Mier, M. O. 2008. "Metaheuristics for Scheduling in Industrial and Manufacturing Applications".
130. Sarache Castro, W. A., Cárdenas Aguirre, D. M. & Giraldo, J. A. 2005. Procedimiento para la definición y jerarquización de prioridades competitivas de fabricación. Aplicaciones en las PyMEs de la industria metalmecánica. . Volumen 7, 84-91.
131. Sarache Castro, W. A., Castrillón, O. D. & Giraldo, J. A. 2011. Prioridades competitivas para la industria de la confección., 89 – 110.
132. Schroeder, R. G. 1992. Administración de operaciones. Toma de decisiones en la función de Operaciones.
133. Schroeder, R. G. 2005. *Administración de operaciones. Casos y conceptos contemporáneos.*
134. Silva Franco, A. 2015. *Diseño de un plan de mantenimiento preventivo para el sistema de empaque de la línea Quantum de la empresa Papeles Nacionales S.A.* Trabajo de grado presentado para optar al título de Ingeniero Mecánico, Universidad Tecnológica de Pereira.
135. Silver, E. A. 1980. A tutorial on Heuristic Methods. *European Journal of Operational Research.*, Vol. 5.
136. Singhal, K., Singhal, J. & Starr, M. K. 2007. The domain of production and operations management and the role of Elwood Buffa in its delineation.
137. Sotuyo Blanco, S. 2001. Optimización integral del mantenimiento.
138. Tarazona Daza, B. R. 2017. *Sistema de información para la gestión de mantenimiento de los equipos utilizados en el cuerpo de bomberos voluntarios de Ocaña Norte de Santander.*
139. Thörnblad, K., Strömberg, A. B., Patriksson, M. & Almgren, T. 2013. Scheduling optimization of a real flexible job shop including fixture availability and preventive maintenance. *Revised for publication in European Journal of Industrial Engineering.*
140. Torres Gutierrez, I. 2013. *Evaluación del impacto de la gestión de mantenimiento sobre el desempeño de producción en la Subdivisión de Maquinarias Pesadas de la Empresa "Planta Mecánica".* Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
141. Trujillo Corona, G. 2013. "Aplicación de la Norma ISO 55000 para la Gestión de Activos Físicos".
142. Vaessens, R. 1995. *Generalized Job Shop Scheduling: Complexity and Local Search.* Eindhoven University of Technology.
143. Valdés Gutiérrez, T. 2009. Características de la gestión por proceso y la necesidad de su implementación en la empresa cubana. 3.
144. Vilcarromero Ruiz, R. 2017. Gestión de la producción. Segunda Edición.
145. Villanueva Arengas, O. E. 2017. *Mejoramiento del plan de mantenimiento de la planta extractora de aceite de palma.*
146. Vishnu, C. & Regikumar, V. 2016. Reliability Based Maintenance Strategy Selection in Process Plants: A Case Study. *Procedia Technology*, 25, 1080-1087.
147. Vivares Vergara, J. A., Sarache Castro, W. A. & Naranjo Valencia, J. C. 2014. "The content of manufacturing strategy: A case study in colombian industries". 81, 140-147.
148. Wang, S. & Liu, M. 2013. A branch and bound algorithm for single-machine production scheduling integrated with preventive maintenance planning., 847–868.
149. Xiao, L., Song, S., Chen, X. & Coit, D. W. 2015. Joint optimization of production scheduling and machine group preventive maintenance. *Reliability Engineering and System Safety.*
150. Xu, D., Sun, K. & Li, H. 2008. Parallel machine scheduling with almost periodic maintenance and non-preemptive jobs to minimize makespan. *Computers & Operations Research.*
151. Xu, Z., S. 2004. EOWA and EWG Operator for aggregating linguistic labels based on linguistic preference relations. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and knowledge based systems.*, 791 – 810.
152. Yori, E. J. 2005. Gente de Producción. *Revista Mantener*, #13.

153. Zabiski Duardo, E. 2005. Propuesta de un Sistema de Gestión de Mantenimiento Asistida por Computadora, personalizado al sector Turístico Cubano.
154. Zahedi, Z. & Salim, A. 2017. Integrating Preventive Maintenance Scheduling As Probability Machine Failure and Batch Production Scheduling. *ComTech: Computer, Mathematics and Engineering Applications*. vol. 7, p. 105-112.
155. Zanakins, S. H. & Evans, J. R. 1981. Heuristic 'Optimization': Why, When and How to Use It". Vol. 11.
156. Zhang, Y., Kim, C., Tee, K. & Lam, J. 2017. Optimal sustainable life cycle maintenance strategies for port infrastructures. *Journal of Cleaner Production*, 142, Part 4, 1693-1709.
157. Zhao & Lee 2009. Developments and emerging research opportunities in operations strategy and supply chain management. *International Journal of Production Economics*.
158. Zhou, C. & Egbelu, P. J. 1989. Scheduling in a manufacturing shop with sequence - dependent setup. *Robotice and CIM*, vol 5.
159. Zhou, X., Xi, L. & Lee, J. 2006 Methodology and theory a dynamic opportunistic maintenance policy for continuously monitored systems. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 12 pp. 294-305.
160. Zhu, G. & Pintelon, L. 2001. Integrated production maintenance management as an enterprise approach to maintenance management.
161. Zribi, N., Kamel, A. E. & Borne, P. 2008. Minimizing the makespan for the MPM job-shop with availability constraints. *International Journal of Production Economics.*, 151–160.
162. Zweig, C. 1992. La integración de Mantenimiento con las restantes áreas de la empresa. *Revista Mantenimiento*.

Anexos

Anexo 1. Estructura de las decisiones en producción de acuerdo al criterio de algunos autores consultados. Fuente: Elaboración propia tomado de Díaz Cazañas (2008).

Autor	Esquema de clasificación propuesto					
Schroeder (1992)	Área de toma de decisiones	Decisiones de diseño (estratégicas)			Decisiones de uso (tácticas)	
	Procesos	Selección del tipo de proceso. Selección del equipo.			Análisis del flujo de proceso Provisión del mantenimiento del equipo	
	Capacidad	Determinación del tamaño de las instalaciones. Determinación de la ubicación de las instalaciones. Fijación de los niveles de la fuerza de trabajo.			Decisión sobre el tiempo extra Subcontratistas Programación	
	Inventarios	Fijación del nivel general de inventarios Diseño del control de inventarios Decisión de donde conservar el inventario			Decidir cuánto y cuándo ordenar	
	Fuerza de trabajo	Diseño de puestos Selección del sistema de compensación Diseño del reglamento de trabajo			Supervisión Establecimiento de estándares de trabajo	
	Calidad	Establecimiento de estándares de calidad Definición de la organización para la calidad			Decisión sobre la cantidad de inspecciones Control de la calidad para cumplir con las especificaciones	
Chase & Aquilano (1994)	Esquema de clasificación propuesto					
	Nivel jerárquico	Nivel directivo	Horizonte temporal	Alcance	Nivel de detalle	Relacionado con:
	Estratégico	Senior	Medio-largo	Amplio	Bajo	Diseño del producto. Localización Tecnología Nuevas instalaciones
	Táctico	Medio	Medio	Moderado	Moderado	Nivel de empleo. Volumen de producción. Selección de inversiones.
Acciones	Bajo	Corto	Estrecho	Alto	Horarios del personal. Ajustes en el ritmo	

						de producción. Gestión de inventarios. Aprovisionamiento.
	Esquema de clasificación propuesto					
Domínguez Machuca (1995)	Decisiones estratégicas			Decisiones tácticas y operativas		
	De posicionamiento		De diseño		Relacionadas con la planeación de la producción y el manejo de los recursos	
	Fijación de objetivos a largo plazo. Establecimiento de las prioridades competitivas. Fijación de la gestión de la calidad. Selección de productos. Selección de procesos		Diseño del producto Diseño del proceso Mano de obra Nuevas tecnologías Capacidad Localización Distribución en planta		Planeación y programación de la producción. Elección de alternativas para eliminar la brecha entre la capacidad y la demanda. Inventarios. Selección de las técnicas de gestión apropiadas.	
Gaither&Frazier (2000)	Esquema de clasificación propuesto					
	Decisiones estratégicas		Decisiones de operación		Decisiones de control	
	Lanzamiento de proyectos de desarrollo de nuevos productos. Diseño del proceso de producción para un nuevo producto. Asignación de recursos escasos entre oportunidades comerciales nuevas y existentes. Decidir qué fabricas nuevas se necesitan y dónde ubicarlas.		Nivel de inventario de bienes terminados a mantener para cada producto. Tipos de productos y cantidad de cada tipo a incluir en el programa de producción del próximo mes. Elección de la estrategia apropiada para aumentar la capacidad productiva en cada centro de trabajo. Decidir sobre los detalles de un plan para la adquisición de las materias primas necesarias para el próximo mes.		Acciones correctivas a tomar ante el incumplimiento de alguna meta que afecte la rentabilidad del sistema. Desarrollar estándares de costo de mano de obra para un diseño revisado del producto. Decidir el nuevo criterio de aceptación de control de calidad ante una modificación en el diseño del producto. Frecuencia de mantenimiento en una pieza clave de la maquinaria.	
	Esquema de clasificación propuesto					
	Áreas de decisión (estratégicas)			Algunas preguntas a responder		
	Diseño del producto y del servicio			¿Qué productos o servicios debemos ofrecer? ¿Cómo debemos diseñarlos?		
	Gestión de la calidad			¿Quién es responsable de la calidad? ¿Cómo definimos la calidad que queremos en nuestros productos o servicio?		
Diseño del proceso y planificación de la capacidad			¿Qué procesos necesitarán estos productos y en qué orden?			

Lefcovich (2002)		¿Qué equipo y tecnología son necesarios para estos procesos?
	Localización	¿Dónde situaremos las instalaciones? ¿En qué criterio nos basaremos para elegir la localización?
	Diseño de la organización	¿Cómo organizaremos la instalación? ¿Qué tamaño debe tener para cumplir el plan?
	Recursos humanos y diseño del Trabajo	¿Cómo proporcionar un entorno de trabajo razonablemente bueno? ¿Cuánto se puede esperar que produzcan nuestros empleados?
	Gestión del abastecimiento	¿Deberíamos fabricar determinado componente o comprarlo? ¿Quiénes son nuestros proveedores y quién puede quedar integrado en nuestro programa electrónico?
	Inventarios, planificación de necesidades de materiales y JIT.	¿Cuántos inventarios de artículos debemos llevar? ¿Cuándo volvemos a pedir?
	Programación intermedia, planificación a corto plazo y planificación del proyecto	¿Es una buena idea subcontratar la producción? ¿Es mejor despedir a la gente o mantenerlos en nómina en los periodos de baja demanda?
	Mantenimiento	¿Quién se hace responsable del mantenimiento?
Schroeder (2005)	Esquema de clasificación propuesto	
	Categoría o área de decisión	Decisiones
	Proceso	Selección de equipo Selección de la tecnología. Establecimiento de los flujos de proceso. Disposición física. Diseño de puestos. Políticas relativas a la fuerza laboral
	Calidad	Establecimiento de estándares Inspecciones al producto o servicio. Establecimiento de especificaciones para productos nuevos Definición del nivel de servicio al cliente (de conjunto con otros departamentos)
	Capacidad	Tamaño de las instalaciones Localización. Subcontratación de proveedores confiables. Número de turnos de trabajo Subcontratación de producción Cantidad de personal Programación de empleados, equipos e instalaciones.
Inventario	Qué, cuanto y cuando ordenar. Ubicación del inventario. Selección del sistema de control de inventario.	

Anexo 2. Algunas de las posibles decisiones a tomar en la Gestión de Producción. Fuente:
Elaboración propia tomado de Díaz Cazañas (2008)

Área de decisión	Decisiones estratégicas	Decisiones tácticas	Decisiones operativas
Estrategia de producción	Misión Competencia distintiva Objetivos / prioridades Políticas Decisiones de diseño y de posicionamiento para cada una de las restantes áreas		
Producto	Selección del tipo de producto Diseño del producto Tecnología del producto Lanzamiento de proyectos de desarrollo de nuevos productos	Análisis del valor	
Proceso	Selección y diseño del proceso Selección del equipo Tecnología del proceso	Análisis del flujo del proceso Desarrollar estándares de costo de mano de obra para un diseño revisado del producto Decidir el nuevo criterio de aceptación de calidad ante una modificación en el diseño del producto	Selección de rutas de proceso alternativas ante exigencias de capacidad
Capacidad	Tamaño de las instalaciones Localización Nuevas instalaciones Distribución en planta	Decisiones de ajuste de la capacidad al plan de productos: contrataciones y despidos, subcontratación, variaciones en el volumen de inventarios, otras	Decisiones para equilibrar el programa de producción y la capacidad disponible: horas extras, programación de vacaciones, rutas de procesos alternativas, reajuste de los tamaños de lotes, otras
Inventarios	Política de inventario de productos terminados (para inventario o según pedido) Selección del sistema de gestión de inventarios Diseño del control de inventarios Decisión relativa a donde conservar el inventario	Nivel de inventario de bienes terminados a mantener	Decidir cuánto y cuándo ordena
Fuerza de trabajo	Diseño de puestos (nivel de especialización,	Supervisión Establecimiento y/o	Acciones de conducción de la fuerza de trabajo para

	habilidades...) Número de trabajadores (fijos) Selección del sistema de compensación Diseño del reglamento de trabajo	reajuste de estándares de trabajo Desarrollo de planes de carrera Contrataciones y despidos Horarios del personal	actuar sobre la capacidad del sistema de producción
Calidad	Definición de la organización para la calidad Establecimiento de estándares de calidad Elección o diseño del sistema de calidad Nivel de calidad a incorporar en el producto/servicio Diseño de productos para la calidad Diseño de procesos para la calidad Política de proveedores	Decisión sobre la cantidad de inspecciones y la forma de realizarlas	Control. Despliegue de acciones correctivas
Sistemas de gestión de la producción	Selección o diseño del sistema de gestión		Evaluación del sistema de gestión y acciones correctivas ante las desviaciones
Planificación y control de la producción	Determinación del nivel de actividad a larga plazo Especificación de las políticas para orientar las decisiones en los niveles táctico y operativo Diseño del sistema de control	Elección de las distintas estrategias de plan agregado	Asignación de recursos a las diferentes tareas Secuenciación de tareas Control de los objetivos de producción e implementación de las medidas correctivas

Anexo 3. Algunas de las posibles decisiones a tomar en la Gestión de Mantenimiento. Fuente:
Elaboración propia tomado de Díaz Cazañas (2008)

Área de decisión	Decisiones estratégicas	Decisiones tácticas	Decisiones operativas
Estrategia de mantenimiento	Misión Objetivos Establecimiento de políticas para las restantes áreas Establecimiento de sistemas de mantenimiento		
Organización del mantenimiento	Tercerizar o no Forma de centralización	Relativas al diseño de procedimientos de las tareas de ejecución Relativas a la estructura del sistema	

		informativo Relativas al diseño de lugares de trabajo	
Planificación del mantenimiento	Magnitud del presupuesto para el largo plazo Nivel de actividad (intervenciones de mantenimiento) establecido para el largo plazo	Desglose del presupuesto entre las distintas actividades Determinación del nivel de actividad en cada uno de los periodos del medio plazo Establecimiento de las frecuencias de intervenciones	Establecimiento de prioridades Asignación de los trabajos Orden de ejecución Relativas a la sincronización de las distintas actividades
Formación en mantenimiento (Personal)	Relativas al diseño de planes de carrera Nivel de formación en aquellas técnicas que incluyen la confiabilidad de talento	Necesidades de personal Selección Contratación Aplicación Evaluación del desempeño	Asignación de actividades
Gestión de stock	Política de proveedores	Tipo de materiales e insumos para la ejecución del mantenimiento Selección de proveedores Selección del sistema de control de inventarios Niveles de inventario de los diferentes repuestos	Tipo de material o repuesto a solicitar Cantidad a solicitar de cada material Frecuencia del pedido
Informatización del mantenimiento	Desarrollar o adquirir el sistema GMAC Establecimiento de criterios para la adopción del sistema GMAC	Relativas a la implantación del sistema	Actualización del sistema GMAC
Control de los trabajos	Selección de los indicadores y herramientas para el control Establecimiento de valores objetivos para dichos indicadores	Frecuencia de control de cada uno de los elementos de la gestión del mantenimiento	Acciones correctivas ante las desviaciones

Anexo 4. Algunos elementos característicos de la funcionalidad de los subsistemas de producción y de mantenimiento. Fuente: Yori (2005)

Elementos característicos	Producción	Mantenimiento
Estado del equipo durante la	En marcha	Detenido

actuación sobre este		
Tiempo de actuación sobre el equipo	Trata de realizar largas corridas de producción	Trata de disminuir el tiempo de intervención
Evaluación de resultados	A largo plazo	De inmediato
Impacto de su actuación sobre el equipamiento	Degrada el equipamiento	Renueva el equipamiento
Esencia de la actividad	Centrada en la acción	Centrada en la reflexión
Centro de atención	Productos fabricados	Activos fijos
Dirección del mejoramiento	Disminución de efectivos	Aumento de la competitividad

Anexo 5. Indicadores para evaluar la importancia de la integración GP – GM. Fuente: Elaboración propia

Indicadores	Fundamentación
1. Nivel de automatización / mecanización.	De acuerdo con Swanson (1997) y Royo Sánchez et al (2004) en empresas caracterizadas por una alta complejidad técnica y procesos productivos altamente dependientes del equipamiento la necesidad de lograr una gestión integrada Producción-Mantenimiento es más crítica que en aquellas entidades que son intensivas en mano de obra. Jonsson (2000), Pinjala et al (2006) y Garg y Deshmukh (2009) plantean que en plantas altamente automatizadas el mantenimiento se convierte en un elemento relevante para mantener la gestión de operaciones productiva y rentable
2. Enfoque hacia la competitividad.	Conseguir las metas respecto a las prioridades competitivas requiere de la integración entre todos los departamentos, siendo un caso particular la integración GP – GM. Pinjala et al. (2006) y Garg and Deshmukh (2009) destacan que compañías con diferentes prioridades competitivas siguen diferentes estrategias de mantenimiento.
3. Tasa de intervenciones que deben realizarse con máquina parada.	De ser elevado origina la necesidad de que la estrategia de Mantenimiento se oriente a la disminución del tiempo medio de intervenciones. Exige la coordinación entre ambos departamentos para aprovechar al máximo las “ventanas de oportunidad” que ofrece el programa de producción.
4. Complejidad de las reparaciones.	A medida que disminuye la mantenibilidad y las intervenciones de mantenimiento duren más tiempo la integración entre ambos subsistemas debe ser mayor para atenuar el impacto negativo sobre la disponibilidad. Debe existir un trabajo coordinado para aprovechar al máximo las ventanas de oportunidad, programas integrados producción-mantenimiento para la optimización del tiempo total de preparación y el makespan, entre otros.
5. Impacto de los tiempos de parada por mantenimiento sobre los objetivos de producción.	Es un elemento que debe considerar Mantenimiento para el desarrollo de estrategias de prevención o de reducción de consecuencias, definición de criticidad del equipamiento, etc. Swanson (1997) señala que las áreas funcionales en sistemas con pequeños (o ausencia de) buffers deben trabajar estrechamente, de lo contrario pequeñas interrupciones o fallos del equipamiento pueden afectar todo el sistema
6. Proporción de insumos que resultan comunes a Producción y a Mantenimiento.	Royo Sánchez et al (2004) reconocen que este es un elemento que debe ser tenido en cuenta para eliminar los problemas provocados por la redundancia de la información. Mientras mayor sea este indicador mayores deberán ser las necesidades de integración en áreas como gestión de inventario, gestión de proveedores, diseño e implementación de soluciones informáticas en ambos subsistemas

7. Nivel de servicio técnico requerido por los equipos.	De ser alto exige una mayor integración que puede llevar a desarrollar una estrategia de Mantenimiento Autónomo y/o de subcontratación del mantenimiento.
8. Reconocimiento de la necesidad de gestionar por proceso.	De manera similar al enfoque hacia la competitividad, la gestión por proceso fuerza la integración en la gestión de estos, siendo un caso particular los procesos de GP y de GM
9. Disponibilidad de recursos para el mantenimiento.	De acuerdo con Garg and Deshmukh (2009) este es uno de los elementos que soporta la calidad del mantenimiento. De presentarse en un nivel elevado en la organización, garantiza la disminución de tiempos de respuestas y calidad de la ejecución, lo cual reduce en cierta medida la necesidad de integración para garantizar la continuidad del sistema productivo. La falta de recursos para el mantenimiento puede conducir a la búsqueda de estrategias en ambas áreas para mantener o alcanzar el nivel de disponibilidad deseado.
10. Existencia de equipos redundantes	Según Jonson (2000) este elemento provoca una reducción en los costos de mantenimiento y en las necesidades de formación del personal. Se reducen las tensiones en el momento de buscar coordinación entre la programación de tareas de producción y de mantenimiento, puesto que evita detenciones en el flujo productivo debido a imprevistos o a mantenimientos planeados que puedan coincidir con órdenes de producción.

Anexo 6. Indicadores propuestos para medir el desempeño del sistema Producción - Mantenimiento a partir de algunas de las decisiones que comúnmente se toman en Producción.
Fuente: Elaboración propia

Decisiones en Producción	Indicadores propuestos	Denominación
Minimizar costo.	1. <i>Cumplimiento del presupuesto de mantenimiento.</i>	<i>CPM</i>
	2. <i>Componente del costo de mantenimiento.</i>	<i>CCM</i>
	3. <i>Progreso en los esfuerzos de reducción de costos.</i>	<i>PERC</i>
Cumplir plazos de entrega / entregas rápidas.	4. <i>Cumplimiento de la disponibilidad proyectada.</i>	<i>CDP</i>
	5. <i>Tiempo medio de retraso en las entregas debido a paros por mantenimiento.</i>	<i>TMRE</i>
Maximizar calidad.	6. <i>Tasa de artículos defectuosos debido a dificultades en el mantenimiento.</i>	<i>ADM</i>
Aumentar la flexibilidad en volumen de producción / servicio	7. <i>Cumplimiento de la disponibilidad proyectada.</i>	<i>CDP</i>
	8. <i>Tiempo medio de retraso en las entregas debido a paros por mantenimiento.</i>	<i>TMRE</i>
Seleccionar el flujo de proceso (paralelo o por lotes)	9. <i>Productividad de la estrategia de mantenimiento</i>	<i>PEM</i>
Automatizar	10. <i>Flexibilidad del personal de ejecución del mantenimiento</i>	<i>FPEM</i>
Definir el grado de	11. <i>Utilización del personal de ejecución del</i>	<i>UPM</i>

mecanización o automatización del proceso	<i>mantenimiento</i>	
Establecer una forma de pago a rendimiento	<i>12. Tasa de descomposturas en las máquinas debido a violaciones en el régimen de explotación motivado por la forma de pago</i>	<i>DVRE</i>
Implementar un sistema de gestión DBR	<i>13. Cumplimiento de la disponibilidad proyectada en el equipo limitante</i>	<i>CDPEL</i>
Diseñar u optimizar el sistema informativo	<i>14. Tiempo medio de retraso de los partes de averías</i>	<i>TMRPA</i>
	<i>15. Nivel de redundancia de la información almacenada que resulta común a la gestión de ambos procesos</i>	<i>RIA</i>
Planear la capacidad disponible	<i>16. Incumplimiento de la capacidad planeada debido a paros por mantenimiento.</i>	<i>ICPM</i>
Establecer criterios para la selección de la materia prima	<i>17. Tasa de averías causadas por el impacto del material sobre el activo.</i>	<i>AIA</i>
Programa a afectar en caso de coincidencias de actividades de ejecución de la producción y ejecución del mantenimiento sobre un mismo equipo o instalación	<i>18. Tasa de intervenciones de mantenimiento reprogramadas, por coincidencias con actividades de la ejecución de la producción, sin una justificación técnico económica adecuada.</i>	<i>IMREP</i>
Seleccionar el sistema de gestión de inventario y los proveedores de cada tipo de producto	<i>19. Disimilitud entre los sistemas de gestión de inventario para productos comunes tanto a operaciones como a mantenimiento.</i>	<i>DSGI</i>
Transferir a los operadores tareas de mantenimiento menor.	<i>20. Nivel de limpieza, ajuste y lubricación del equipamiento mantenido por el operador</i>	<i>LALO</i>
Determinar causas del atraso en el programa de producción	<i>21. Tiempo medio de retraso en el programa de producción debido al retraso en las reparaciones programadas durante el periodo</i>	<i>TMRPP</i>

Anexo 7. Indicadores propuestos para medir el nivel de integración entre los subprocesos de programación de la producción y programación del mantenimiento. Fuente: Elaboración propia

Algunas de las decisiones en producción	Factores claves a considerar para el logro de la integración	Indicadores propuestos
Maximizar la utilización de la capacidad	Diseñar y/o reajustar el programa de mantenimiento en función de las ventanas de oportunidad creada por el	Se aprovechan ventanas de oportunidad en la programación de las operaciones para programar intervenciones de mantenimiento siempre que el tiempo entre intervenciones establecido lo permita.

	PMP	
Determinar los recursos materiales necesarios para la ejecución de la producción	Valorar la magnitud de la merma en la materia prima reflejada en los artículos defectuosos que se obtienen como resultado de deficiencias en el mantenimiento, e incluir este por ciento en el cálculo de las necesidades de materiales de tomar un valor significativo.	Se prevé el volumen de material que pudiera desecharse durante la operación, causado por deficiencias en el mantenimiento del equipamiento, y se considera la magnitud en el momento de determinar las necesidades de materiales en caso de tomar un valor significativo.
Analizar el riesgo de incumplimiento del programa de Producción		Se considera el riesgo de fallo en el equipamiento, disponibilidad de recursos para enfrentar averías potenciales, así como las intervenciones programadas como uno de los factores en el momento de evaluar el riesgo de interrupción del programa de Producción
Analizar la factibilidad del programa maestro de producción, decidiendo los elementos a reprogramar en caso necesario	Analizar la factibilidad de reprogramar actividades de la ejecución de la producción o de la ejecución del mantenimiento en caso de coincidencias.	Se realiza un análisis exhaustivo en el momento de decidir la tarea a reprogramar cuando coinciden una actividad de la ejecución de la producción y una de la ejecución del mantenimiento.

Anexo 8. Tiempos de operación de los equipos. Fuente: Elaboración propia

TTI-130-1	TTI-130-2	TTI-300	IJ-300-120-3	EM-300	EM-480	JM-650	HDJS-128	HDJS-168	HDJS-328
493.62	809.54	314.83	1182.57	1833.15	765.15	1596.64	1271.68	468.51	126.78
1136.58	1863.99	724.92	2722.91	4220.90	1761.80	3676.34	2928.09	1078.75	291.92
320.34	525.36	204.32	767.44	1189.64	496.56	1036.16	825.27	304.04	82.28
494.76	811.41	315.56	1185.30	1837.38	766.92	1600.33	1274.61	469.59	127.08
155.04	254.27	98.89	371.43	575.77	240.33	501.49	399.42	147.15	39.82
183.54	301.01	117.06	439.71	681.61	284.50	593.67	472.84	174.20	47.14
896.04	1469.51	571.50	2146.64	3327.61	1388.94	2898.30	2308.40	850.45	230.14
1640.46	2690.35	1046.30	3930.05	6092.15	2542.86	5306.17	4226.20	1557.00	421.34
200.64	329.05	127.97	480.67	745.11	311.01	648.98	516.89	190.43	51.53
402.42	659.97	256.67	964.08	1494.46	623.79	1301.65	1036.73	381.95	103.36
246.24	403.83	157.05	589.92	914.46	381.69	796.48	634.37	233.71	63.24
625.86	1026.41	399.18	1499.37	2324.25	970.14	2024.38	1612.36	594.02	160.75
392.16	643.14	250.12	939.50	1456.36	607.88	1268.47	1010.29	372.21	100.72
262.2	430.01	167.23	628.15	973.73	406.43	848.10	675.49	248.86	67.34
750.12	1230.20	478.43	1797.06	2785.71	1162.75	2426.31	1932.48	711.96	192.66
328.32	538.44	209.40		1219.28	508.92	1061.97	845.83	311.62	84.33
111.72	183.22	71.26		414.89	173.18	361.37	287.82	106.04	28.69

1130.88	1854.64	721.28		4199.73	1752.96	3657.90	2913.40	1073.34	290.46
597.36	979.67	381.00		2218.41	925.96	1932.20	1538.94	566.97	153.43
165.3	271.09	105.43		613.87	256.23	534.67	425.85	156.89	42.46
79.8	130.87	50.90			123.70	258.12	205.58	75.74	
515.28	845.06	328.65			798.73	1666.70	1327.48	489.06	
499.32	818.88	318.47			773.99		1286.36	473.92	
1328.1	2178.08	847.07			2058.67		3421.49	1260.53	
959.88	1574.20	612.22			1487.90		2472.87	911.04	
50.16	82.26	31.99			77.75		129.22	47.61	
241.68	396.36	154.15			374.63		622.62	229.38	
916.56	1503.16	584.59			1420.75			869.93	
1244.88	2041.60	793.99			1929.67			1181.54	
420.66	689.88	268.30			652.06			399.26	
181.26	297.27	115.61			280.97			172.04	
506.16	830.10	322.83			784.59			480.41	
248.52		158.51			385.23			235.88	
1386.24		884.15			2148.79			1315.71	
278.16		177.41			431.17			264.01	
245.1		156.33			379.93			232.63	
93.48		59.62			144.90			88.72	
705.66		450.07			1093.83			669.76	
752.4		479.89			1166.29			714.12	
31.92		20.36			49.48			30.30	
979.26		624.58			1517.94			929.44	
793.44		506.06						753.07	
510.72		325.74						484.74	
96.9		61.80						91.97	
216.6		138.15						205.58	
839.04		535.15						796.35	
346.56		221.04						328.93	
1101.24		702.38						1045.21	
549.48		350.46						521.52	
329.46		210.13						312.70	
97.12									
523.83									
754.54									
124.56									
541.78									

Anexo 9. Tiempos de parada de los equipos. Fuente: Elaboración propia

TTI-130-1	TTI-130-2	TTI-300	IJ-300-120-3	EM-300	EM-480	JM-650	HDJS-128	HDJS-168	HDJS-328
106.21	114.18	52.78	51.09	16.41	31.48	66.60	54.21	54.56	303.36
244.56	262.91	121.53	117.65	37.79	72.48	153.34	124.82	125.62	698.50
68.93	74.10	34.25	33.16	10.65	20.43	43.22	35.18	35.41	196.87
106.46	114.45	52.90	51.21	16.45	31.55	66.75	54.34	54.68	304.06
33.36	35.86	16.58	16.05	5.15	9.89	20.92	17.03	17.14	95.28
39.49	42.46	19.63	19.00	6.10	11.70	24.76	20.16	20.29	112.80

192.81	207.27	95.81	92.75	29.79	57.14	120.89	98.41	99.04	550.67
352.99	379.46	175.41	169.80	54.54	104.62	221.32	180.16	181.31	1008.16
43.17	46.41	21.45	20.77	6.67	12.80	27.07	22.04	22.18	123.31
86.59	93.09	43.03	41.65	13.38	25.66	54.29	44.20	44.48	247.31
52.98	56.96	26.33	25.49	8.19	15.70	33.22	27.04	27.22	151.33
134.67	144.77	66.92	64.78	20.81	39.91	84.44	68.73	69.17	384.63
84.38	90.71	41.93	40.59	13.04	25.01	52.91	43.07	43.34	241.01
56.42	60.65	28.04	27.14	8.72	16.72	35.37	28.80	28.98	161.14
161.41	173.51	80.21	77.64	24.94	47.84	101.20	82.38	82.91	460.99
70.65	75.95	35.11	33.98	10.92	20.94	44.29	36.06	36.29	201.77
24.04	25.84	11.95	11.56	3.71	7.12	15.07	12.27	12.35	68.66
243.34	261.59	120.92	117.06	37.60	72.12	152.57	124.20	124.99	695.00
128.54	138.18	63.88	61.83	19.86	38.09	80.59	65.60	66.02	367.11
35.57	38.24	17.68	17.11	5.50	10.54	22.30	18.15	18.27	101.59
17.17	18.46	8.53	8.26	2.65	5.09	10.77	8.76	8.82	49.04
110.88	119.19	55.10	53.34	17.13	32.86	69.52	56.59	56.95	316.67
107.44	115.50	53.39	51.68	16.60	31.84	67.36	54.84	55.19	306.86
285.77	307.21	142.01	137.47		84.70	179.18	145.86	146.79	816.20
206.54	222.04	102.64			61.21		105.42	106.09	589.91
10.79	11.60	5.36			3.20		5.51	5.54	
52.00	55.90	25.84			15.41		26.54	26.71	
197.22	212.01	98.01			58.45		100.66	101.30	
267.87	287.96	133.11			79.39		136.72	137.59	
90.52	97.31	44.98			26.83		46.20	46.49	
39.00	41.93	19.38			11.56		19.91	20.03	
108.91	117.08	54.12			32.28		55.59	55.94	
53.48	57.49	26.57			15.85		27.29	27.47	
298.28	320.66	148.23			88.40			153.22	
59.85		29.74			17.74			30.74	
52.74		26.21			15.63			27.09	
20.11		10.00			5.96			10.33	
151.84		75.46			45.00			77.99	
161.90		80.45			47.98			83.16	
116.87		3.41			2.04			3.53	
210.71		104.71			62.45			108.23	
170.73		84.84			50.60			87.70	
109.89		54.61			32.57			56.45	
20.85		10.36			6.18			10.71	
46.61		23.16			13.81			23.94	
180.54		89.72			53.51			92.74	
74.57		37.06			22.10			38.30	
236.96		117.76			70.23			121.72	
118.23		58.76			35.04			60.73	
70.89		35.23			21.01			36.41	
110.36		57.70			34.41				
240.63		55.69			30.52				
58.96		60.45			25.46				
54.79		39.89			60.60				
469.10		47.98							
103.45		89.15							

58.16		65.14							
496.23		89.65							
105.34		46.39							
105.95		54.89							
		87.56							
		96.34							

Anexo 10. Valores de parámetros para los tiempos de fallo asociados a la distribución Weibull.

Fuente: Elaboración propia

TTI-130-1

RRY	1/(N+1)	K-M	K-M 2	MLE
1.465	1.42		1.52	
138.9776	139.75		158.09	

K-S1	K-S2	A-D1	A-D2	Chi	Correlación
Dreal	0.1043 Dreal	0.1043 Areal	0.5813 Areal	0.5963 P-value	0.1507 R
Dcrit	0.1756 Dcrit	0.1756 Acrit	0.7570 Acrit	0.7570	0.9867

TTI-130-2

RRY	1/(N+1)	K-M	K-M 2	MLE
1.384	1.32		1.42	
141.7850	143.01		162.18	

K-S1	K-S2	A-D1	A-D2	Chi	Correlación
Dreal	0.1025 Dreal	0.1025 Areal	0.3519 Areal	0.3640 P-value	0.3188 R
Dcrit	0.2320 Dcrit	0.2320 Acrit	0.7570 Acrit	0.7570	0.9897

TTI-300

RRY	1/(N+1)	K-M	K-M 2	MLE
1.477	1.42		1.52	
66.2512	66.67		75.52	

K-S1	K-S2	A-D1	A-D2	Chi	Correlación
Dreal	0.0465 Dreal	0.0591 Areal	0.1432 Areal	0.1469 P-value	0.3043 R
Dcrit	0.1727 Dcrit	0.1727 Acrit	0.7570 Acrit	0.7570	0.9980

IJ-300-120-3

RRY	1/(N+1)	K-M	K-M 2	MLE
1.457	1.37		1.48	
61.2182	61.82		69.27	

K-S1	K-S2	A-D1	A-D2	Chi	Correlación
Dreal	0.1080 Dreal	0.1080 Areal	0.3024 Areal	0.3148 P-value	0.2615 R
Dcrit	0.2748 Dcrit	0.2748 Acrit	0.7570 Acrit	0.7570	0.9839

EM-300

RRY	1/(N+1)	K-M	K-M 2	MLE
-----	---------	-----	-------	-----

1.499	1.41	1.52
18.4683	18.65	20.82

K-S1		K-S2		A-D1		A-D2		Chi		Correlación	
Dreal	0.1049	Dreal	0.1049	Areal	0.2764	Areal	0.2879	P-value	0.9747	R	0.9840
Dcrit	0.2796	Dcrit	0.2796	Acrit	0.7570	Acrit	0.7570				

EM-480

RRY	1/(N+1)	K-M	K-M 2	MLE
1.399	1.35		1.44	
38.1941	38.46		43.80	

K-S1		K-S2		A-D1		A-D2		Chi		Correlación	
Dreal	0.0603	Dreal	0.0603	Areal	0.1678	Areal	0.1724	P-value	0.4316	R	0.9972
Dcrit	0.1851	Dcrit	0.1851	Acrit	0.7570	Acrit	0.7570				

JM-650

RRY	1/(N+1)	K-M	K-M 2	MLE
1.457	1.37		1.48	
79.7919	80.57		90.28	

K-S1		K-S2		A-D1		A-D2		Chi		Correlación	
Dreal	0.1079	Dreal	0.1079	Areal	0.3025	Areal	0.3149	P-value	0.2615	R	0.9838
Dcrit	0.2748	Dcrit	0.2748	Acrit	0.7570	Acrit	0.7570				

HDJS-128

RRY	1/(N+1)	K-M	K-M 2	MLE
1.407	1.34		1.44	
64.4378	65.00		73.54	

K-S1		K-S2		A-D1		A-D2		Chi		Correlación	
Dreal	0.1014	Dreal	0.1014	Areal	0.3166	Areal	0.3276	P-value	0.0666	R	0.9903
Dcrit	0.2340	Dcrit	0.2340	Acrit	0.7570	Acrit	0.7570				

HDJS-168

RRY	1/(N+1)	K-M	K-M 2	MLE
1.355	1.30		1.39	
65.2425	65.72		75.09	

K-S1		K-S2		A-D1		A-D2		Chi		Correlación	
Dreal	0.0572	Dreal	0.0572	Areal	0.1934	Areal	0.1989	P-value	0.1991	R	0.9962
Dcrit	0.1923	Dcrit	0.1923	Acrit	0.7570	Acrit	0.7570				

HDJS-328

RRY	1/(N+1)	K-M	K-M 2	MLE
1.460	1.38		1.49	
376.1055	379.68		425.71	

K-S1		K-S2		A-D1		A-D2		Chi		Correlación	
Dreal	0.0994	Dreal	0.0994	Areal	0.2494	Areal	0.2593	P-value	0.3131	R	0.9863
Dcrit	0.2700	Dcrit	0.2700	Acrit	0.7570	Acrit	0.7570				

Anexo 11. Valores de parámetros para los tiempos de operación asociados a la distribución Weibull. Fuente: Elaboración propia

TTI-130-1

RRY	1/(N+1)	K-M	K-M 2	MLE
1.761	1.31		1.40	
576.5124	580.32		663.10	

K-S1		K-S2		A-D1		A-D2		Chi		Correlación	
Dreal	0.0556	Dreal	0.0640	Areal	0.1914	Areal	0.1965	P-value	0.8473	R	0.9951
Dcrit	0.1834	Dcrit	0.1834	Acrit	0.7570	Acrit	0.7570				

TTI-130-2

RRY	1/(N+1)	K-M	K-M 2	MLE
1.892	1.32		1.42	
980.0763	988.98		1120.14	

K-S1		K-S2		A-D1		A-D2		Chi		Correlación	
Dreal	0.0995	Dreal	0.0995	Areal	0.2589	Areal	0.2680	P-value	0.3139	R	0.9920
Dcrit	0.2360	Dcrit	0.2360	Acrit	0.7570	Acrit	0.7570				

TTI-300

RRY	1/(N+1)	K-M	K-M 2	MLE
1.855	1.30		1.39	
376.4906	379.22		433.33	

K-S1		K-S2		A-D1		A-D2		Chi		Correlación	
Dreal	0.0572	Dreal	0.0572	Areal	0.1934	Areal	0.1989	P-value	0.1991	R	0.9962
Dcrit	0.1923	Dcrit	0.1923	Acrit	0.7570	Acrit	0.7570				

IJ-300-120-3

RRY	1/(N+1)	K-M	K-M 2	MLE
1.984	1.46		1.61	
1456.8810	1473.48		1618.96	

K-S1		K-S2		A-D1		A-D2		Chi		Correlación	
Dreal	0.1528	Dreal	0.1528	Areal	0.3784	Areal	0.3979	P-value	0.7165	R	0.9572
Dcrit	0.3380	Dcrit	0.3380	Acrit	0.7570	Acrit	0.7570				

EM-300

RRY	1/(N+1)	K-M	K-M 2	MLE
1.822	1.42		1.55	
2154.7199	2175.90		2415.69	

K-S1		K-S2		A-D1		A-D2		Chi		Correlación	
Dreal	0.1139	Dreal	0.1139	Areal	0.3803	Areal	0.3973	P-value	0.8013	R	0.9678
Dcrit	0.2940	Dcrit	0.2940	Acrit	0.7570	Acrit	0.7570				

EM-480

RRY	1/(N+1)	K-M	K-M 2	MLE
1.943	1.24		1.33	
911.7851	919.65		1055.36	

K-S1		K-S2		A-D1		A-D2		Chi		Correlación	
Dreal	0.0746	Dreal	0.0746	Areal	0.2070	Areal	0.2135	P-value	0.2028	R	0.9954
Dcrit	0.2124	Dcrit	0.2124	Acrit	0.7570	Acrit	0.7570				

JM-650

RRY	1/(N+1)	K-M	K-M 2	MLE
1.962	1.37		1.49	
1790.7579	1809.27		2023.07	

K-S1		K-S2		A-D1		A-D2		Chi		Correlación	
Dreal	0.0883	Dreal	0.0883	Areal	0.2701	Areal	0.2816	P-value	0.9476	R	0.9826
Dcrit	0.2844	Dcrit	0.2844	Acrit	0.7570	Acrit	0.7570				

HDJS-128

RRY	1/(N+1)	K-M	K-M 2	MLE
1.349	1.27		1.37	
1474.4292	1489.85		1689.80	

K-S1		K-S2		A-D1		A-D2		Chi		Correlación	
Dreal	0.0865	Dreal	0.0865	Areal	0.2013	Areal	0.2091	P-value	0.4653	R	0.9927
Dcrit	0.2580	Dcrit	0.2580	Acrit	0.7570	Acrit	0.7570				

HDJS-168

RRY	1/(N+1)	K-M	K-M 2	MLE
1.855	1.30		1.39	
560.2569	564.33		644.84	

K-S1		K-S2		A-D1		A-D2		Chi		Correlación	
Dreal	0.0572	Dreal	0.0572	Areal	0.1934	Areal	0.1989	P-value	0.1991	R	0.9962
Dcrit	0.1923	Dcrit	0.1923	Acrit	0.7570	Acrit	0.7570				

HDJS-328

RRY	1/(N+1)	K-M	K-M 2	MLE
1.522	1.42		1.55	
149.0226	150.49		167.07	

K-S1		K-S2		A-D1		A-D2		Chi		Correlación	
Dreal	0.1139	Dreal	0.1139	Areal	0.3803	Areal	0.3973	P-value	0.8013	R	0.9678

Dcrit 0.2940 Dcrit 0.2940 Acrit 0.7570 Acrit 0.7570