

INNOVACIÓN EN PROCESO: MODELO MATEMÁTICO PARA PROGRAMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN EN LA EMPRESA METALMECÁNICA

MARINO VALENCIA RODRÍGUEZ

Universidad de San Buenaventura Cali–Universidad Libre Cali, Facultad de Ciencias Económicas, Colombia
mvalenciaro@gmail.com - mvalencia3@usbcali.edu.co

CLAUDIA XIMENA AYORA PIEDRAHITA

Universidad de San Buenaventura Cali, Facultad de Ingenierías, Colombia
cayora@usbcali.edu.co

RESUMEN

La nueva dinámica del mercado, le plantea a las empresas la necesidad de crear y aprovechar los diferentes factores, como su capacidad de innovación, para mantener un buen desempeño y afrontar los cambios del entorno. La innovación de proceso tiene un papel fundamental en la programación de tareas productivas efectivas, para el crecimiento de la productividad y competitividad de la empresa. Luego, un proceso de producción requiere de un análisis detallado, que permita proponer modelos de solución que atiendan, tanto las restricciones, como los objetivos y los lineamientos con los cuales deben ser tomadas las decisiones. En este contexto, en el presente estudio empírico se analizó la influencia de la programación de la producción en el rendimiento de la empresa metalmeccánica. Estas empresas cuentan con sistemas productivos tipo taller, lo cual hace necesario recurrir al empleo de herramientas computacionales que faciliten la función de programación y alinear los recursos de la empresa a las necesidades del mercado. En el estudio, se utilizó como metodología el enfoque cualitativo y el estudio explicativo. Igualmente, se realizó un análisis sistémico de la problemática de la empresa, a través de la teoría de restricciones. Para dar solución a los problemas de la programación del proceso de producción tipo taller, se diseñó un modelo de pensamiento, para identificar las restricciones físicas y políticas. De acuerdo a las simulaciones realizadas se mejoró el porcentaje de cumplimiento de los pedidos, se redujo los días de atraso y se redujo el tiempo de ciclo de los pedidos. Se concluye que la programación de la producción exige una correcta sincronización de los procesos de apoyo y el tener en cuenta las restricciones con las exigencias del cliente. Por tanto, la empresa debe seleccionar los criterios que mejor representen las necesidades e influyan de manera positiva en el rendimiento.

Palabras clave: Innovación en proceso, programación de la producción, sistemas productivos tipo taller, teoría de restricciones, modelo matemático.

1. INTRODUCCIÓN

Las empresas se enfrentan cada día a decisiones que relacionan la ejecución de actividades productivas y logísticas, las cuales determinan en gran medida el cumplimiento en la entrega de los pedidos a los clientes y la inversión de los recursos requeridos para su ejecución. De ahí, que la programación de la producción se ha constituido en un elemento de preocupación en las

empresas productoras de bienes o servicios. Luego, la programación es comprendida como uno de los principales elementos de trabajo para lograr los niveles de productividad y competitividad que les permitan mantenerse activas en un mercado global. En este sentido, en las últimas décadas se han desarrollado esfuerzos importantes en la construcción de modelos de planeación y programación de la producción, los cuales han sido ampliamente difundidos y han logrado constituirse como una base fundamental para la competitividad de las empresas en términos de calidad, costo, flexibilidad, confiabilidad y desarrollo sostenible. Por esta razón, las empresas colombianas buscan como estrategia de crecimiento la participación en mercados internacionales, para lo cual, deben construir modelos de planeación y programación que les permitan alinear los recursos de la empresa a las necesidades del mercado competitivo.

En este estudio se pretende encontrar una solución viable al problema de programación de la producción para máquinas paralelas en una empresa metalmeccánica tipo taller, con una función multiobjetivo que busca mejorar el cumplimiento de los pedidos a los clientes, la reducción del tiempo global de proceso y la tardanza en las entregas. Para ello, se organizó una base de conocimientos y metodológicamente se desarrolló un modelo matemático para la asignación de los pedidos a la máquina y la secuenciación de los mismos.

En la sección 1 se presentan los conceptos relacionados con la innovación en proceso, la programación de la producción, la medición del desempeño y la programación para un proceso de producción tipo taller. En la sección 2 se expone la metodología del estudio. La sección 3 muestra el desarrollo del estudio, en el cual se explica el diagnóstico del proceso de programación en la empresa, el modelo de solución y la simulación y pruebas del modelo. La sección 4 contiene las conclusiones del estudio. Finalmente se presenta la bibliografía.

1.1 INNOVACIÓN EN PROCESO

La innovación organizacional se puede entender como la introducción de una nueva metodología en la práctica del negocio, la organización del lugar de trabajo, cualquier tipo de traslado o mejoría en un producto, proceso o tipo de organización de producción en la empresa, o las relaciones externas que no han sido usadas anteriormente; es decir, la innovación es el resultado de decisiones estratégicas tomadas por la empresa (Lemos, 2001).

Según el Manual de Oslo (2005) “una *innovación* es la introducción de un nuevo, o significativamente mejorado, producto (bien o servicio), de un proceso, un nuevo método de marketing, o un nuevo método organizacional de las practicas internas del negocio, de la organización del lugar de trabajo o de las relaciones externas”. De ahí, la *innovación de proceso*: es la implementación de un nuevo o significativamente mejorado proceso de producción, método de distribución o actividad de soporte para los bienes o servicios.

Peres & Stumpo (2002) en su estudio: “La dinámica de las pequeñas y medianas empresas industriales en América Latina y el Caribe”, realizado en catorce países señala que los niveles de productividad de las pymes son menores en comparación con las grandes empresas, factor asociado a los bajos procesos de innovación en las mismas. Por lo tanto, la innovación a través de estrategias como la introducción de nuevos productos, la creación de nuevos procesos, la creación o rediseño de la formas de comercialización ayuda para que la pyme responda con éxito a los diferentes cambios del entorno (Jiménez & Sanz, 2004), es decir que la pyme sea más productiva,

a menores costos. No obstante, la actividad innovadora de la empresa es una función compleja que resulta de la interacción de múltiples factores, los cuales pueden variar en intensidad y orden de importancia en cada caso en particular (García, 2004).

1.1.1 La innovación en proceso y la programación de tareas productivas

Los mercados turbulentos y competitivos han provocado que las pymes le presten mayor atención a sus estrategias relacionadas con la innovación, con el propósito de mejorar sus niveles de rendimiento empresarial. Las pymes, en especial aquellas que buscan un crecimiento sostenible, deben realizar la programación de tareas productivas para sobrevivir en el mercado competitivo. Luego, el líder busca sistemáticamente la innovación y la mejora continua, entusiasma a la gente y trabaja fuerte para ponerla en práctica (Goldratt & Cox, 1996). La razón principal para prestar atención es su importancia en el control del costo de producción, en la calidad del producto y en la satisfacción del cliente. Lo cual, les permiten minimizar los problemas como: conflictos entre recursos, aumento del inventario de producto en proceso, tiempos ociosos de maquinaria y personal, retrasos en los tiempos de entrega, insatisfacción del cliente y pérdida de la cuota de mercado. Todo esto conlleva a una disminución en los ingresos percibidos por la empresa y, a la vez, elevan los costos de producción (afectando negativamente la rentabilidad de la misma) (Álvarez et al., 2010).

Fagerberg, Mowery & Nelson (2004) señalan que la innovación de procesos puede tener un efecto positivo en el crecimiento de los ingresos y el empleo debido a su naturaleza de reducción de costos, es decir la innovación en procesos, es la combinación de diferentes logros. De ahí, que elementos de la producción como la velocidad, la difusión, la calidad, la flexibilidad, y la eficiencia en costos, se encuentran altamente relacionados con el rendimiento de la empresa (Quadros, Furtado, Bernardes & Franco 2001; Koufteros & Marcoulides, 2006). Liu, Li & Wei (2009) exponen en su estudio empírico una la relación positiva entre la flexibilidad operativa, el desarrollo de nuevos procesos y productos con el éxito de la empresa. Para Peters (2008) no todas las innovaciones de procesos, conducen a un ahorro de costos, pero en algunos casos, la organización logra su objetivo y puede entrar al mercado con productos a precios competitivos. Con base en las anteriores explicaciones, se plantea la siguiente hipótesis de investigación:

H1: La programación de la producción influye de manera positiva en el rendimiento empresarial de la empresa.

1.2 PROGRAMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN: DEFINICIÓN Y ALCANCE

La programación de la producción es el proceso de asignación de los recursos productivos para la ejecución de las tareas planeadas que son requeridas para el cumplimiento de las órdenes de fabricación, las cuales deben ser priorizadas y secuenciadas (Bozorgirad et al., 2013). Luego, un proceso de producción requiere de un análisis detallado, que permita proponer modelos de solución que atiendan, tanto las restricciones, como los objetivos y los lineamientos con los cuales deben ser tomadas las decisiones (Ribas et al., 2010).

Al respecto, se consideran restricciones las características del proceso que deben ser consideradas en conjunto para hacer viable la ejecución del programa de producción propuesto. Algunas restricciones comunes en los procesos productivos son la capacidad de almacenamiento de los

inventarios, la disponibilidad de máquinas, la disponibilidad de recurso humano, reglas de despacho o almacenamiento de material, condiciones en las entregas de los proveedores, condiciones técnicas del proceso, entre otras (Muñoz, 2009). Los objetivos, son las variables que se espera sean mejorados a partir de la ejecución del programa de producción propuesto. En la mayoría de los casos los objetivos tienden a ser opuestos, lo cual dificulta en forma considerable la selección de la mejor secuencia. Por tanto, la programación de la producción permite definir con claridad las tareas que serán desarrolladas en cada puesto de trabajo de la empresa, en cada momento de tiempo, siendo el punto de partida para la ejecución de otras actividades como la programación de personal, pruebas de calidad, despachos, órdenes de mantenimiento, preparación de materiales en el almacén y todos aquellos procesos relacionados con la definición de recursos requeridos para la ejecución de las órdenes de producción. Asimismo, los recursos, son todos los elementos integrados al proceso de programación para la asignación de una carga de trabajo, lo cual permite identificar conflictos en la disponibilidad de los mismos y asignar recursos alternos para el cumplimiento de la tarea.

1.2.1 Técnicas de aproximación y reglas de prioridad para la solución de problemas de la programación de la producción

Las empresas buscan la mejor secuencia para cumplir con los pedidos del cliente, reduciendo el tiempo máximo de ciclo, mientras se mantiene o se reduce el costo de producción (Kamaruddin et al., 2013). De ahí, la existencia de diferentes heurísticas para la secuenciación de trabajos en una o varias estaciones. Antes es importante comprender que las órdenes a secuenciar pueden corresponder a dos tipos de sistemas según sea la forma como llegan las órdenes para ser procesadas, estos son: sistema estático y sistema dinámico.

Existen reglas de programación con mayor afinidad a los diferentes sistemas, la asignación de las mismas a la solución de los problemas de programación deben ser probadas y ajustadas a cada proceso productivo (Uzorh & Innocent, 2014). Algunas de las reglas de secuenciación que usualmente se utilizan son: primero en llegar primero en servir, menor tiempo de proceso o tiempo de procesamiento más corto, menor número de estaciones restantes para el trabajo, fecha de vencimiento más temprana, menor suma de los tiempos de proceso, mayor penalidad unitaria, menor coeficiente crítico, número de trabajos tardíos, tiempo ocioso restante, tiempo ocioso restante por operación, proporción crítica, último en llegar primero en trabajarse, orden aleatorio.

Otros métodos de solución parten de la aplicación de heurísticas o metaheurísticas como el método Tabu, la cual es una heurística de búsqueda local con memoria adaptativa, en la cual se parte de una solución inicial usualmente definida al azar y posteriormente se desplaza a la mejor solución de su vecindario. Los atributos de la mejor solución se guardan en una lista tabú (opciones que no deben ser visitadas) con el fin de evitar que se vuelvan a evaluar opciones ya revisadas previamente basado en cuatro aspectos: reciente, calidad, influencia, frecuencia (Li, et al., 2010). Existen aplicaciones de búsqueda tabú con permutación de celdas de trabajo. (Chen, 2013). Algoritmo genético (GA), son algoritmos de búsqueda y optimización basados en los mecanismos de selección natural y genética. Los Algoritmos genéticos considera la sobrevivencia de los individuos con la mejor capacidad de adaptación al problema. Con los individuos de mayores valores se realiza la reproducción generando nuevas alternativas de solución, en la que se toma lo mejor de cada uno de los padres. Cuando termine el ciclo se tendrán alternativas que se acerquen a la solución óptima. Existen soluciones aplicadas a problemas de programación

dinámica para un caso de programación tipo taller en máquinas paralelas, obteniendo buenos resultados para problemas de tamaños pequeños, la efectividad del resultado se reduce a medida que incrementa el tamaño del problema (Fattahi & Fallahi, 2010).

Vinod et al., (2007) consideran que los tiempos de preparación están incluidos en los tiempos de proceso y se realiza un análisis de las reglas de programación propuestas por la teoría mediante una simulación experimental aplicando un método Taguchi. Yang (2015) propone la aplicación de reglas de secuenciación, al comparar la aplicación de la regla SPT (Tiempo más corto de proceso) y la heurística de greedy que mide el tiempo restante de culminación del pedido. Khalouli et al. (2009) plantean un método de solución a través de la heurística colonia de hormigas basado en la aplicación de reglas de secuenciación y aplicando el concepto general del JIT. Los autores M., et al, (2010) realizan un resumen de los diferentes métodos de programación para la demanda determinística de diferentes consideraciones del sistema productivo, entre ellos la aplicación de reglas de secuenciación, las cuales además de la facilidad en su aplicación generan tiempos computacionales bajos como también se demuestra mediante la aplicación de la técnica ramificación y poda (Baker, 2013).

1.3 MEDICIÓN DEL DESEMPEÑO

La medición del desempeño de un modelo de programación de la producción debe ser realizada en términos de los objetivos que se desean lograr. En la mayoría de los casos los objetivos son contradictorios entre sí, se requiere de la aplicación de métodos de solución conocidos como multiobjetivo o multicriterio. Estos métodos no buscan una única solución, sino un conjunto de soluciones, las cuales son valoradas para facilitar la toma de decisiones. Algunos ejemplos son: la teoría de la utilidad multiatributo, método de análisis jerárquico, método de superación, método de programación Scoring, modelos de optimización matemática entre otros (Shao et al., 2013). Gahm et al., (2012) proponen la implementación de una heurística para la generación de un MPS (Master production Schedule) multiobjetivo que permita cumplir con los requerimientos en términos de servicio al cliente y costo, buscando nivelar el uso de los recursos productivos y reducir el tiempo de entrega.

Por otra parte, Wahaba et al., (2008), proponen un modelo de programación de la producción en términos de flexibilidad, en el cual plantean la evaluación de diferentes atributos y parámetros para medir el impacto del modelo propuesto en el incremento de la flexibilidad en un máquina y en una ruta de producción. Parte de las variables evaluadas son por ejemplo el número de rutas alternas que pueda seguir un mismo producto, relacionado con la capacidad de reacción de los puestos de trabajo críticos. Otra forma de abordar la solución de un modelo multiobjetivo de programación de la producción, consiste en la aplicación de técnicas de modelación del costo, incorporando variables de costo de producción, costo de inventario, costo de venta perdida o penalizaciones; lo cual permite llevar todos los elementos de la función objetivo a un elemento común expresado en términos financieros (Pehrsoon, 2012). Adicional a los criterios planteados anteriormente, el desempeño de un modelo debe ser evaluado en términos del esfuerzo computacional requerido para su solución (Sinnen, 2014). Hmida et al., (2010) proponen la solución de un problema de producción flexible tipo taller (flexible job shop) con el objetivo de encontrar el mínimo tiempo de finalización con la aplicación de algoritmo genético, búsqueda tabú y el algoritmo genético híbrido.

Existen diferentes indicadores que permiten medir el impacto de un programa de producción en términos de tiempo de proceso (Ziaee, 2013), tales como: inventarios, fechas de entrega, costos de producción entre otros. Es posible que una empresa pueda elegir varios indicadores y requerir de un proceso de evaluación multiobjetivo para seleccionar el método de programación indicado. Asimismo, Yaghoubi et al., (2013) desarrollaron un modelo de solución para un problema de capacidad finita con una demanda independiente para productos con diferentes piezas y tiempos de ciclo variable; considerando tiempos de espera en cada estación de trabajo. Los autores aplican un sistema diferencial que permite obtener la distribución del tiempo de proceso para cualquier tipo de producto. Posterior a esto aplican otras técnicas para modelar una solución multiobjetivo que permita mejorar el servicio al cliente, tiempo de proceso y el costo de producción. Baker (2013) utiliza un método de solución de ramificación y poda partiendo de la necesidad de cumplir las fechas de entrega con el nivel de servicio como restricción. Detienne (2014) desarrolla un método de solución para la reducción del número de trabajo con atrasos procesados en un puesto de trabajo. Melloulli et al, (2009) generan una solución para un problema de máquinas paralelas con restricción de capacidad, minimizando el tiempo de proceso de las órdenes.

1.4 PROGRAMACIÓN PARA UN PROCESO DE PRODUCCIÓN TIPO TALLER

Una producción tipo taller (Job shop) se caracteriza por la fabricación de una variedad de productos, cada uno de los cuales tiene una ruta de producción conocida, en la que una serie de operaciones deben ser desarrolladas en diferentes máquinas. Una de las representaciones clásicas se realiza a través del grafo disyuntivo (Pezzela & Merelli., 2000).

Una variante de la fabricación tipo taller es la fabricación flexible (flexible job shob), en la cual las operaciones pueden ser desarrolladas en diferentes máquinas aprobadas para ello. Este problema se divide en dos, el primer consiste en la asignación de la operación a la máquina de un grupo de posibles máquinas (problema de ruta) y el segundo en la secuenciación de los trabajos en la máquina asignada. Yuan & Xu (2013) proponen una solución con el objetivo de minimizar el tiempo total de proceso a partir de la aplicación de algoritmos evolutivos (LNS). Pezzela et al., (2010) y Wang et al., (2012) encontraron una solución eficiente a partir de la aplicación del método de colonia de hormigas. Xing et al., (2009) utilizaron un método de simulación mientras que en el mismo año generaron una solución a partir de un método constructivo para el mismo problema. Fattahi et al, (2009) demuestra que la aplicación del concepto de overlapping permite mejorar el tiempo total de proceso y la utilización de los equipos.

2. METODOLOGÍA

En el estudio se realizó una investigación empírica en una empresa metalmecánica, con un enfoque cualitativo estudiando un fenómeno contemporáneo dentro del contexto de la vida real, cuyos límites entre el fenómeno y su contexto no son claramente evidentes (Yin, 1994). El tipo es un estudio explicativo buscando las causas de los fenómenos y generando un sentido de entendimiento mejor del objeto de estudio. Es de corte transversal, se realizó la investigación en un lapso de tiempo de un año (2015-2016).

La metodología de teoría de restricciones (TOC), permite realizar un análisis sistémico de la problemática de la empresa con el objetivo de incrementar la utilidad a partir del mejoramiento de la capacidad de la empresa para hacer dinero, la reducción de los inventarios y/o la reducción

del costo directo (Goldratt & Cox, 1996). Con el fin de comprender la problemática del incumplimiento actual de los pedidos y plantear las soluciones pertinentes, se aplica el modelo de pensamiento TOC, a partir del cual se pueden identificar dos clases de restricciones: unas físicas y unas políticas.

Las restricciones físicas se relacionan con el mercado y el sistema de manufactura; mientras que las políticas se relacionan con los procedimientos, sistemas de control y conceptos, las cuales afectan los recursos y deben ser analizadas previamente a las restricciones físicas. El uso del modelo de pensamiento de teoría de restricciones permite realizar un análisis incluyente con una visión sistémica del problema evitando pasar por alto necesidades y oportunidades de todos los procesos relacionados.

La solución de programación presentada para el proceso de producción tipo taller se realiza en dos etapas. En la primera etapa se utilizan métodos constructivos de aproximación para resolver el problema de definición de la secuencia con la cual los pedidos van a ser procesados. En una segunda etapa se utilizan métodos constructivos de aproximación para definir una solución propia para el problema de asignación de la máquina a los pedidos en la cual van a ser trabajados. En ambas etapas se utiliza como técnica de evaluación de las alternativas de solución el modelo scoring, atendiendo a la necesidad de considerar diferentes objetivos. Para la valoración de los resultados, se realizaron procesos de simulación en Microsoft Project y Excel.

3. DESARROLLO DEL ESTUDIO

3.1 DIAGNOSTICO DEL PROCESO DE PROGRAMACIÓN EN LA EMPRESA

Para la identificación de las causas raíz y los conflictos en el proceso de programación de la producción se construyen el árbol de realidad actual, a partir de la definición de los efectos no deseados y la relación con sus posibles causas. Se concluyó que la ejecución de una programación rígida y poco flexible generan efectos no deseados como: la poca disponibilidad de pedidos a tiempo para la entrega al cliente, altos niveles de inventario e incremento en los costos logísticos.

A través de la metodología de construcción de las nubes se identifican el objetivo a alcanzar, las dos condiciones necesarias para alcanzarlo y el conflicto generado entre estas acciones. El objetivo es mejorar la flexibilidad del proceso productivo. Como condiciones necesarias para alcanzarlo se tienen las siguientes: incrementar la capacidad de los procesos críticos, con el fin de abastecer la demanda en cantidad y mezcla requerida. Por otra parte, se requiere sincronizar el proceso productivo con los procesos logísticos para garantizar el flujo del producto y reducir el exceso de inventarios y el efecto que esto trae en la eficiencia del proceso. El conflicto se genera ante el paradigma de que el incremento de capacidad se logra con la especialización y el incremento del tamaño de lotes respecto a la necesidad de lograr versatilidad en las líneas y reducir los lotes de producción.

Construcción de causalidades y directrices: identificados los conflictos, se realiza el análisis de causalidad en el cual se registran las razones que se consideran pueden modificar los efectos no deseados. Adicionalmente se incorporan (inyectan) directrices sobre prioridades del negocio, minimizando o eliminando el efecto de los conflictos lo cual permite evaporar la nube. A partir

del análisis realizado, se identifica que los conflictos están relacionados con la generación de inventario y la versatilidad de las líneas. Respecto a las prioridades del negocio se determina que el cumplimiento de la fecha de los clientes es prioritario, aunque se puede alterar el orden de los pedidos siempre y cuando no afecte el cumplimiento de entrega de los mismos y se mejore el flujo de los pedidos para reducir los inventarios.

Construcción del árbol de solución futura: se identifica que la definición de una metodología de programación de la producción es la acción crítica para mejorar los efectos no deseados de falta de disponibilidad de pedidos para entregar al cliente, altos niveles de inventario y el incremento en los costos logísticos.

3.2 MODELO DE SOLUCIÓN

3.2.1 Definición del problema

El modelo de solución TOC, como primera acción identifica el recurso cuello de botella. Este debe ser programado buscando el número máximo de unidades a producir en un período de tiempo determinado, buscando generar flujo con unidades de transferencia pequeñas y en función del cumplimiento de las fechas de entrega. Los puestos de trabajo que preceden al puesto de trabajo cuello de botella se programan bajo el concepto de Justo a Tiempo, considerando el buffer que debe ser definido para amortiguar los sucesos inesperados y evitar que el cuello de botella se quede sin material. Los puestos de trabajo sucesores se programan de acuerdo a la orden en que los pedidos salen del recurso cuello de botella hasta que sean entregados para el despacho al cliente. El tamaño del buffer para el proceso previo al cuello de botella se calcula de la siguiente forma.

$$\text{si } tp_{ijq} > tp_{i+1jq} \text{ entonces } \text{buffer} = ((tp_{ijq} - tp_{i+1jq}) * b_j) + E_{jq} + B_q + (h_{i+1} - h_i)$$

Para la Teoría de restricciones se considera como cuello de botella el proceso cuya capacidad es igual o inferior a la demanda. Como primer paso se identificaron los puestos de trabajo críticos utilizando el método de la ruta crítica y posterior a ello se utilizó un diagrama de redes para la identificación del puesto de trabajo cuello de botella, en este caso el puesto de trabajo de doblez.

El puesto de trabajo cuello de botella cuenta con dos máquinas que trabajan en paralelo. La máquina manual no tiene restricciones técnicas y puede ser utilizada para cualquier producto, mientras que la máquina automática tiene restricciones técnicas que le impide fabricar mástiles y en algunos casos postes de iluminación. Los tiempos de proceso y el costo de procesar una pieza en cada una de las máquinas difieren, siendo más costoso procesar un producto en la máquina manual; es decir, que es más económico programar la máquina automática, sacrificando turnos de la máquina manual. Sin embargo esto afectaría el tiempo de proceso de pedidos e incrementaría el inventario de producto en proceso.

El problema de programación a resolver se define como un conjunto de pedidos m_w planeados para su fabricación en la semana w , los cuales deben pasar por un número a_j de operaciones para las cuales pueden existir m_q máquinas. Se define como cuello de botella el proceso de doblez, en donde el tiempo tp_{jq} correspondiente a la ejecución del pedido j en la máquina q es diferente para cada máquina.

3.2.2 Definición de los objetivos de la programación

Para la primera etapa de solución, correspondiente a la secuenciación de pedidos, el objetivo consiste en maximizar el valor de la ecuación que busca evaluar tres criterios (Tabla 1 y 2), cada uno con un factor de ponderación asignado por los expertos.

Tabla 1. Notaciones

<p>SUBÍNDICES</p> <p>j Subíndice de referencia para pedidos $j = \{1 \dots m\}$ i Subíndice referencia para operaciones $i = \{1 \dots ac_j\}$ q Subíndice de referencia para máquinas o puesto de trabajo $q = \{1 \dots mq\}$ k Alternativa a evaluar $k = \{1 \dots z\}$ w Semana de fabricación $w = \{1 \dots W\}$</p>	<p>VARIABLES DE DECISIÓN</p> <p>y_j Indica el cumplimiento del pedido j. Toma valor 0 si el pedido no se entrega antes de la fecha de vencimiento o 1 si se entrega antes o en la fecha de vencimiento. v Indica si el pedido será asignado a la dobladora 1 (automática). Toma valor de 1 si el pedido se asigna a la máquina 1, 0 si se asigna a la máquina 2 (manual). Para $y, v \in$ binarios (0,1)</p> <p>$q, j, i, k, m_w, m_q, z, F_j, f_j, FR_j, b_j, D, W, p_j, g_j, r_{jq}, MQ_{qj}, ac_j \in$ enteros ≥ 0,</p> <p>$tp_{ijq}, E_{jq}, tp_{jq}, d_j, r, t_j, h_i, tf_{jq}, tf_{ji}, ti_{jq}, td_{ji}, td_q, \beta, \gamma, \alpha, TDELL_j, HI_{qj}, MQ_{qj}, C_{wk}, MK_{jk}, TM_k \in$ Números decimales > 0</p>
<p>PARÁMETROS</p> <p>m_w Número de pedidos programados para entregada en la semana w ($m = 1,2, \dots \dots M$) m_q Número de máquinas ($m_q = 1,2, \dots \dots MQ$) z No. alternativas solución a evaluar ($z = 1,2, \dots \dots Z$) F_j Fecha de vencimiento del pedido j FR_j Fecha de entrega a logística del pedido j f_j Fecha requerida por cliente del pedido j en sitio d_j Duración en días del transporte por grupo de vehículos para el pedido j t_j Duración en horas del cargue pedido j al vehículo r Días restricción vehicular, paro de transportadores, fiesta de la empresa h_i Horas programadas ejecución actividad i en un día tp_{jq} (j,q) Tiempo en horas del pedido j en máquina q E_{jq} Indica en mínimo tiempo en horas que debe pasar después de iniciar un pedido j en una máquina q para que pueda empezar en el puesto de trabajo sucesor tp_{ij} (i,j) Duración en horas operación i para pedido j B_q Horas promedio parada de máquina q por turno Horas promedio de parada de la máquina q por turno b_j Cantidad en unidades del pedido j D Fecha en la que se realiza la programación C_1 Criterio de evaluación 1 C_2 Criterio de evaluación 2 C_2 Criterio de evaluación 3 β Peso asignado al criterio 1 γ Peso asignado al criterio 2 α Peso asignado al criterio 3 W Semanas de fabricación ($w= 1,2,3,\dots \dots W$)</p>	<p>VARIABLES</p> <p>tf_{jq} (j, q) Tiempo de terminación del pedido j en días y en horas en la máquina q tf_{ji} (j, i) Tiempo de terminación del pedido j en días y en horas en la actividad i ti_{jq} (j,q) Tiempo de inicio del pedido j en días y en horas en la máquina q td_{ji} (j,i) Tiempo en días y en horas en el que el pedido j está disponible para ser trabajado en la operación i td_q Tiempo en días y en horas en el que la máquina q está disponible para trabajar p_j Pedidos salen terminados del proceso productivo g_j Pedidos que entran al proceso productivo r_{jq} Pedidos asignados a la máquina q en el instante t para $t = (0 \dots \dots \infty)$ $TDELL_j$ Tiempo de llegada del pedido j al puesto de trabajo de doblez HI_{qj} (q,j) Hora de inicio del pedido j en la máquina q HF_{qj} (q,j) Hora finalización pedido j en la máquina q MQ_{qj} (q,j) Máquina asignada a fabricación del pedido j u_{jq} Unidades de pedido de j asignado a la máquina q u'_{jq} Unidades de pedido j fabricados en la máquina q C_{wk} Indicador de cumplimiento de los pedidos de la semana w para la alternativa k ac_j Número operaciones requeridas para fabricar pedido j MK_{jk} Tiempo total de proceso para la alternativa k TM_k Tardanza media para la alternativa k</p>

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2. Objetivos de la programación de la producción

<p>TARDANZA MEDIA: Tiempo que transcurre entre la fecha real entrega y la fecha comprometida de entrega.</p> $TM_k = \frac{\sum_{j=1}^{m_w} FR_j - f_j}{m_w}$	<p>REDUCCIÓN DEL TIEMPO TOTAL DE PROCESO</p> <p>MK_{jk} Tiempo total de proceso</p> $MK_{jk} = \sum_{j=1}^{m_w} tf_{j,i=ac_j} - td_{j,i=1}$
<p>CUMPLIMIENTO FECHAS DE VENCIMIENTO: Mide el porcentaje de los pedidos entregados antes o en la fecha de vencimiento.</p> <p>C_{wk} Indicador de cumplimiento global</p> <p>F_j Fecha de vencimiento del pedido j</p> $F_j = f_j - (d_j + \frac{t_j}{h_i} + r)$ <p>FR_j Fecha en que el pedido j es entregado a logística para despacho</p> <p>$y_j = 1$ para $F_j - FR_j \geq 0$</p> $C_{wk} = \frac{(\sum_{j=1}^{m_w} y_j)}{m_w}$	<p>FUNCIÓN OBJETIVO</p> <p>VO_k Valor objetivo de la alternativa k</p> <p>fo Maximizar $VO_k = \beta MK_{jk} + \gamma C_{wk} + \alpha TM_k$</p> <p>Sa $\sum_{j=1}^{m_w} p_j = \sum_{j=1}^{m_w} g_j$ (1)</p> <p>$td_{ji} = 0 \quad \forall j$ cuando $i = 1$ (2)</p> <p>$td_q = 0 \quad \forall q$ (3)</p> <p>$tf_{jq} = ti_{jq} + tp_{jq}$ (4)</p> <p>$ti_{jq+1} = ti_{jq} + \epsilon_{jq}$ (5)</p> <p>para $\forall q$ en t $\sum_{j=1}^m r_{jq} = 1$ (6)</p>

Fuente: Elaboración propia

El porcentaje de cumplimiento a pedidos, se considera relevante dado que la empresa abastece producto para la ejecución de proyectos de energización en campo, lo cual exige la ubicación de clientes en zonas geográficas de difícil acceso y el alquiler de maquinaria especial, lo cual debe ser programado con anticipación. El incumplimiento en la entrega genera un alto impacto en el cliente y en la comunidad por lo cual se requiere lograr mejorar la confiabilidad en las fechas planeadas de entrega. Otro de los objetivos planteados es el tiempo de proceso, dado que el producto manipulado es de grandes dimensiones y requiere de equipos auxiliares para su manipulación. Un incremento en el tiempo de proceso genera no solo inventarios sino tiempos muertos por falta de medios auxiliares para su manipulación. Un último objetivo seleccionado, es la tardanza, dado que la ejecución de pólizas está supeditada al número de días de atraso.

De acuerdo al juicio de expertos se asigna el porcentaje de peso a cada uno de los criterios. De esta forma la función objetivo consiste en maximizar la ecuación resultante de la calificación de cada criterio por el factor de peso asignado (β 30 % Peso asignado al criterio 1, γ 50% Peso asignado al criterio 2, α 20% peso asignado al criterio 3).

La calificación de cada criterio se dará con la siguiente puntuación. Si $z = 4$ se asigna un valor de 1 al valor menos deseado, 9 al valor más deseado, 7 al segundo valor más deseado y 3 al segundo valor menos deseado. Si $z = 3$ se asigna 1, 6, 9 respectivamente.

El desempeño de los métodos de asignación de la máquina de doblez se realizará de acuerdo al incremento del flujo del proceso (un/hr).

$$\frac{\sum_{j=1}^{m_w} \sum_{q=1}^2 (tf_{jq} - ti_{jq})}{\sum_{j=1}^{m_w} b_j} \quad \text{Para } j = (1, \dots, m_w) \text{ para el } i \text{ correspondiente al proceso de doblez}$$

3.2.3 Modelo de solución para la definición de la secuencia de los pedidos

Para definir el mejor método de secuenciación de las órdenes de producción se prueban cuatro métodos (Tabla 3): fecha de vencimiento más temprana con menor tiempo de proceso restante, tiempo ocioso restante, radio crítico y programación aleatoria. Una vez realizada la simulación se evalúan las opciones acorde a los indicadores definidos.

Tabla 3. Reglas de secuenciación

<p>FVMT- MTR Fecha de vencimiento más temprana, menor tiempo de proceso restante Se ordenan los pedidos de acuerdo a la fecha de vencimiento más cercana. Cuando las fechas de vencimiento de los pedidos son iguales, se da prioridad al pedido que menos tiempo de proceso requiera para salir del sistema.</p> <p>TR_j Tiempo de proceso restante</p> $TR_j = \sum_{i=1}^{ac_j} (tp_{ij} / h_i)$ <p>Se da prioridad al pedido con el menor valor de TR o tiempo restante.</p>	<p>Proporción crítica: Se calcula como la diferencia entre la fecha de vencimiento y la fecha actual dividida entre el número de días hábiles que quedan. Se ejecutan primero con los pedidos con el menor PC.</p> <p>PC_j Proporción crítica</p> <p>F_j Fecha de vencimiento del pedido</p> <p>D Fecha actual</p> <p>H Número de días hábiles entre fecha de vencimiento y fecha actual</p> $PC_j = \frac{F_j - D}{H}$ <p>Para $PC \in \text{Números decimales} > 0$, $H \in \text{entero} \geq 0$</p>
<p>TOR Tiempo ocioso restante: Se priorizan los pedidos acorde a la holgura que se tenga para la terminación del pedido, dando prioridad a los pedidos de menor holgura. TOR_j Tiempo ocioso restante</p> $TOR_j = f_j - TR_j$	<p>Programación aleatoria: Se generan número aleatorios para indicar el orden de los pedidos</p>

Fuente: Elaboración propia

3.2.4 Modelo de solución para la asignación de los pedidos a las máquinas de doblez

La asignación de los pedidos a las máquinas de doblez se realiza a partir de la aplicación de un método de aproximación en el cual se evalúan cuatro alternativas de solución (Tabla 4).

3.3 SIMULACIÓN Y PRUEBAS DEL MODELO

3.3.1 Pruebas del método de secuenciación de pedidos

Para la realización de las pruebas de secuenciación se tomaron como datos de entrada los 742 pedidos creados para las primeras 32 semanas del año 2015, los cuales presentan un comportamiento irregular en términos de demanda y mezcla de productos. Utilizando una base de datos en Excel se realizó la secuenciación de los pedidos según el método seleccionado; información que posteriormente fue cargada a Microsoft Project para el cálculo de la fecha de terminación del pedido acorde con la disponibilidad de los puestos de trabajo, el calendario de producción y la precedencia de las actividades. Según el análisis realizado el mejor desempeño lo tiene la alternativa de proporción crítica. La mejor fecha de terminación para el plan de producción la genera el método de proporción crítica y fecha de vencimiento temprana con menor tiempo restante.

Tabla 4. Heurística de asignación de la máquina al pedido

<p>Primero en desocuparse primero en asignarse: Se asignan los pedidos completos a la máquina que primero se desocupe. SI las dos máquinas están desocupadas se da prioridad a la máquina automática siempre y cuando se haya definido que pueda trabajar el pedido a asignarse.</p> <p style="text-align: center;">Cálculo de HI_{qj} si $TDELL_j$ $\leq HF_{qj-1} \rightarrow HI_{jq}$ $= HF_{qj-1}$, si no $HI_{jq} = TDELL_j$ $HF_{qj} = HI_{qj} + tp_{jq}$</p> <p>Para $q=1$ para la máquina automática y $q = 2$ para la máquina manual</p> <p style="text-align: center;">si $v = 1$ $HF_{1j-1} < HF_{2j-1} \rightarrow MQ_j = 1$ $= 1$ Si no $MQ_j = 2$ si $v = 0$ $MQ_j = 2$</p>	<p>Método mixto: Se asigna a la máquina 2 los pedidos que pueden ir sólo por esta máquina. En primera instancia el pedido se asigna a la máquina que primero se desocupe. Sin embargo se compara si el pedido siguiente al ser asignado a otra máquina terminaría primero que su sucesor. De ser así el pedido se divide entre las dos máquinas buscando igualar el tiempo de terminación. Cuando el tiempo de terminación sea el mismo y el pedido no sea exclusivo de la máquina 2 se asigna primero a la máquina 1 y se realiza el mismo análisis.</p> <p style="text-align: center;">si $v = 1$ $HF_{1j-1} < HF_{2j-1} \rightarrow MQ_j = 1$ Si no $MQ_j = 2$ si $v = 0$ $MQ_j = 2$ si $v = 1$ y $HF_{2j+2} < HF_{1j+1} \rightarrow$ $(HF_{2j} - HI_{1j+1})/tp_{(j+1)1} = u'_{(j+1)1}$ $b_{j+1} = u'_{(j+1)1} + u_{1(j+1)} + u_{(j+1)2}$ $tp_{(j+1)1} * u_{(j+1)1} = tp_{(j+1)2} * u_{(j+1)2}$ $\frac{tp_{(j+1)2}}{tp_{(j+1)1}} * u_{(j+1)2} + u_{(j+1)2} = b_{(j+1)} - u'_{(j+1)1}$</p> <p>Si si $v = 1$ y $HF_{1j+2} < HF_{2j+1} \rightarrow (HF_{1j} - HI_{2j+1})/tp_{(j+1)2} = u'_{(j+1)2}$ $b_{j+1} = u'_{(j+1)2} + u_{j(j+1)} + u_{(j+1)2}$ $tp_{(j+1)1} * u_{(j+1)1} = tp_{(j+1)2} * u_{(j+1)2}$ $\frac{tp_{(j+1)2}}{tp_{(j+1)1}} * u_{(j+1)2} + u_{(j+1)2} = b_{(j+1)} - u'_{(j+1)1}$</p>
<p>Programación en paralelo de los pedidos en las máquinas disponibles: Se asigna el pedido por partes iguales a las dos máquinas disponibles solo si este puede ser programado en la máquina 1, si no se asigna a la máquina 2.</p> <p style="text-align: center;">si $v = 1 \rightarrow u_{j1} + u_{j2} = b_j$ $tp_{j1} * u_{j1} = tp_{j2} * u_{j2}$ $\frac{tp_{j2}}{tp_{j1}} * u_{j2} + u_{j2} = b_j$</p> <p>si $v = 0$ $MQ_j = 2$ y $u_{j2} = b_j$ y $MQ_{j+1} = 1$</p>	<p>Especialización de máquinas</p> <p style="text-align: center;">Si $v = 1 \rightarrow u_{j1} = b_j$ si no Si $v = 0 \rightarrow u_{j2} = b_j$</p>

Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente se realizó el análisis de distribución en el cual se observa que en el 69% de las semanas evaluadas el método de proporción crítica muestra los mejores resultados, mientras que el método FVMT_MTR en el 31% de las semanas tiene el segundo mejor desempeño. El método TOR y el método aleatorio no son recomendables. La diferencia en días para la terminación de cada propuesta.

3.3.2 Asignación de la máquina a los pedidos

Para la definición de la regla que será utilizada para la asignación de los pedidos a la máquina de doblez, se realizan 100 simulaciones considerando la llegada aleatoria de pedidos de cada una de las tres familias, con diferentes niveles de demanda y diferentes mezclas de productos. Las pruebas son realizadas en Excel bajo las siguientes consideraciones: Los pedidos generados aleatoriamente simulan el orden en que deben ser ejecutados, como premisa se debe buscar que el

orden de salida corresponda al orden de entrada, las máquinas se programan los mismos turnos, si los pedidos no son terminados en la semana programada pueden terminarse en la semana siguiente, los pedidos no pueden empezar la semana antes de la semana programada, el tiempo de ajuste está contemplado en el tiempo de ciclo definido para cada una de las máquinas, todos los productos que nos sean excluyentes para la máquina tienen el mismo nivel de preferencia para la máquina 1 que para la máquina 2, los pedidos llegan en forma aleatoria de los pedidos anteriores.

De acuerdo a los resultados obtenidos en el 58% de las simulaciones el método mixto permite incrementar las unidades por hora y reducir el tiempo total de proceso razón por la cual se considera la mejor alternativa.

3.3.3 Impacto de las propuestas respecto a la situación actual

De acuerdo a las simulaciones realizadas se mejora el porcentaje de cumplimiento a pedidos del 26% al 65% lo cual generaría una mejora del 150% respecto a la situación actual, se reducen los días de atraso de 7.86 días a 2.8 días de adelanto y el tiempo de ciclo del pedido pasa de 16 días a 13 días.

4. CONCLUSIONES

La programación de la producción determina en gran medida el nivel de servicio al cliente. Componentes del servicio como el cumplimiento a la fecha de entrega, el tiempo de entrega y el costo se ven afectados por las decisiones que tomen los responsables del proceso en términos de secuenciación de los pedidos, asignación de tareas a máquinas y a personas y programación de tiempo extra. Adicionalmente, la programación de la producción incide en los días de atraso y en el tiempo de ciclo de la orden.

Los proyectos de programación de la producción exigen un alto compromiso de todas las personas involucradas, la correcta sincronización de los procesos de apoyo y el realizar un análisis de las posibles barreras políticas, culturales, tecnológicas, de información y físicas, para realizar acciones que reduzcan el riesgo de ocurrencia. Además, tener presente los problemas de calidad que afectan directamente la ejecución del proceso de programación.

El modelo de programación propuesto alinea la estrategia de la empresa con la caracterización de productos y clientes. Igualmente, tiene en cuenta las restricciones relacionadas con las exigencias del cliente para la entrega, espacio para el almacenamiento de producto terminado y producto en proceso, disponibilidad de la capacidad instalada, recurso humano capacitado, impactos en cambios y alistamientos, disponibilidad de la materia prima, entre otros. Se debe seleccionar los criterios que mejor representen las necesidades de la empresa y construir funciones que permitan lograr el mejor desempeño. También, en el modelo propuesto se considera que los pedidos con problemas de calidad entrarán nuevamente al proceso como un pedido nuevo, conservando la fecha comprometida para incrementar su prioridad. El modelo se validó en diferentes escenarios, en los cuales se identificaron las variables que impactaban el desempeño del modelo.

REFERENCIAS

- Abir BenHmida, A., Haouari, M., Huguet, M., Lopez, P., (2010). Discrepancy search for the flexible job shop scheduling problem. *Computers & Operations Research* 37
- Alvarez P., L.; Caicedo C., C; Malaver G., M. & Méndez G., G. (2010). Investigación y desarrollo de un prototipo de Sistema Experto para Scheduling en Pymes con entorno Job Shop. *Revista científica*, 12, 125-136
- Baker, K. (2014). Setting optimal due dates in a basic safe-scheduling model. *Computers & Operations Research*, 41, 109–114.
- Bozorgirad, M. A., & Logendran, R. (2013). Bi-criteria group scheduling in hybrid flowshops. *International Journal of Production Economics*, 145(2), 599-612.
- Chen, C. F., Wu, M. C., & Lin, K. H. (2013). Effect of solution representations on Tabu search in scheduling applications. *Computers & Operations Research*, 40(12), 2817-2825.
- Detienne, B., (2014). A Mixed Integer Linear Programming approach to minimize the number of late jobs with and without machine availability constraints. *European Journal of Operational Research*, 235(3), 540-552
- Fagerberg, J.; Mowery, D.C. & Nelson, R.R. (2004). *The Oxford Handbook of Innovation*. USA: Oxford University Press.
- Fattahi, P., Jolai, F., & Arkat, J. (2009). Flexible job shop scheduling with overlapping in operations. *Applied Mathematical Modelling*, 33(7), 3076-3087.
- Fattahi, P. & Fallahi, A. (2010). Dynamic scheduling in flexible job shop systems by considering simultaneously efficiency and stability. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2(2), 114-123
- Gahm, C., Dünnwald B., & Sahamie, R. A multi criteria master production scheduling approach for special purpose machinery. *International Journal of Production Economics*.149, 89-101.
- Garcia, H. (2004). Ciencia y desarrollo: una visión desde la economía. En Ciencia y uso del conocimiento en Venezuela. Caracas: Fundación Polar, p. 19-60.
- Goldratt, E.M. & Cox, Jeff (1996), *La Meta*, México: Ediciones Castillo, S.A. de C.V.
- Hmida, A. B., Haouari, M., Huguet, M. J., & Lopez, P. (2010). Discrepancy search for the flexible job shop scheduling problem. *Computers & Operations Research*, 37(12), 2192-2201.
- Jiménez, D. & Sanz, R. (2004). Determinantes del éxito de la innovación. *Revista de empresa*, 7, 24-38.
- Kamaruddin, S., Khan, Z., Noor Siddiquee, A., & Wong, Y.S. (2013). The impact of the variety of orders and different number of workers on production scheduling performance. A simulation approach. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 24(8), 1123-1142.
- Lemos, C. (2001). Inovação em Arranjos e Sistemas de MPME. *Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro*.
- Li, J. Q., Pan, Q. K., & Liang, Y. C. (2010). An effective hybrid tabu search algorithm for multi-objective flexible job-shop scheduling problems. *Computers & Industrial Engineering*, 59(4), 647-662.
- Liu, Y.; Li, Y. & Wei, Z.L. (2009). How organizational flexibility affects new product development in an uncertain environment: Evidence from China. *International Journal of Production Economics*, 120(1), 18-29

- Ma, Y., Chu, C., & Zuo, C. (2010). A survey of scheduling with deterministic machine availability constraints. *Computers & Industrial Engineering*, 58(2), 199–211
- Mellouli, R., Sadfi, Ch., Chu, Ch., & Kacem, I. Identical parallel-machine scheduling under availability constraints to minimize the sum of completion times. *European Journal of Operational Research*, 197(3), 1150–1165.
- Koufteros, X., & Marcoulides, G.A. (2006). Product development practices and performance: A structural equation modeling-based multi-group analysis. *International Journal of Production Economics*, 103 (1), 286-307.
- Muñoz, N., (2009). *Administración de operaciones. Enfoque de administración de procesos de negocios*. Cengage Learning Editors S.A. México, p. 341
- OCDE (2005). Oslo Manual: Proposed Guidelines for Collecting and Interpreting Technological Innovation Data. Paris.
- Pehrsson, L., Ng, A., & Stockton, D. (2012). Industrial cost modelling and multi-objective optimisation for decision support in production systems development. *Computers & Industrial Engineering*, 66(4), 1036-1048
- Peres, W. & Stumpo, G. (2002). La dinámica de las pequeñas y medianas empresas industriales en América Latina y el Caribe. En Peres, W. & Stumpo, G. (Eds.). *Pequeñas y medianas empresas industriales en América Latina y el Caribe*. México: Siglo XXI editores/Naciones Unidas, p. 9-34.
- Peters, B. (2008). Innovation and firm performance: An empirical investigation for German firms. Working Paper Center for European Economic Research, Germany: Mannheim
- Pezzella, F. & Merelli E. (2000). A taboo search method guided by shifting bottleneck for the Job Shop Scheduling Problem. *European Journal of Operational Research*, 120(2), 297-310
- Pezzella, F, Morganti G. & Ciaschetti G. (2010). A genetic algorithm for the flexible job-shop scheduling problem. *Computers & Operations Research*, 35(10), 3202–3212.
- Quadros, R.; Furtado, A.; Bernardes, R. & Franco, E. (2001). Technological innovation in Brazilian industry: An assessment based on the São Paulo innovation survey. *Technological Forecasting and Social Change*, 67(2), 203–219.
- Ribas, I., Leinsten, R., & Framiñan, J., (2010). Review and classification of hybrid flow shop scheduling problems from a production system and a solutions procedure perspective. *Computers & Operations Research*, 37(8), 1439–1454
- Shao, X., Liu, W., Liu, Q., & Zhang, C. (2013). Hybrid discrete particle swarm optimization for multi-objective flexible job-shop scheduling problem. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67(9-12), 2885-2901.
- Sinnen, O. (2014). Reducing the solution space of optimal task scheduling. *Computers & Operations Research*, 43, 201-214.
- Uzorh, A.C., & Innocent, N. (2014). Solving Machine Shops Scheduling Problems using Priority Sequencing Rules Techniques. *The International Journal Of Engineering And Science (IJES)*, 3(6), 15-22
- Vinod, V., Sridharan, R. (2007). Scheduling a dynamic job shop production system with sequence-dependent setups: An experimental study. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 2(3), 435–449.
- Wahaba, M.I.M, & Stoyanb, S.J.. (2008). A dynamic approach to measure machine and routing flexibilities of manufacturing systems. *International Journal of Production Economics*, 113(2), 895-913.
- Wang L ,Zhou G, Xu Y, Wang S, & Liu M. (2012). An effective artificial bee colony algorithm for the flexible job-

shop scheduling problem. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 60(1), 303–315

Xing, L. N., Chen, Y. W., & Yang, K. W. (2009). Multi-objective flexible job shop schedule: Design and evaluation by simulation modeling. *Applied Soft Computing*, 9(1), 362–376.

Yaghoub, S., Noori, S. & Azaron, A. (2013). Lead time control in multi-class multi-stage assembly systems with finite capacity. *Computers & Industrial Engineering*, 66(4), 808 – 817

Yang, J. (2015). Minimizing total completion time in a two-stage hybrid flow shop with dedicated machine so the first stage. *Computers & Operations Research*, 58, 1-8

Yin, R.K. (1994). *Case study research. Design and methods*. California, USA: Sage Publications.

Yuan, Y., & Xu, Hua. (2013). An integrated search heuristic for large-scale flexible job shop scheduling problems. *Computers & Operations Research*, 40(12), 2864–2877

Ziaee, M. (2014). Job shop scheduling with makespan objective: A heuristic approach. *International Journal of Industrial Engineering Computations* , 5(2), 273-280.