



**Formulación y validación de una heurística para minimizar la  
tardanza total ponderada en el problema de scheduling Job-shop  
Multi-recurso con rutas lineales.**

**Juan David Morales Saavedra**

**Facultad de Ingeniería  
Programa de Ingeniería Electrónica**

Ibagué, 2019



**Formulación y validación de una heurística para minimizar la tardanza total ponderada en el problema de scheduling Job-shop Multi-recurso con rutas lineales.**

**Juan David Morales Saavedra**

Trabajo de grado que se presenta como requisito parcial para optar al título de:  
**Ingeniero Electrónico**

Director:

Dr. Andrés Alberto García León  
Profesor Universidad de Ibagué

**Facultad de Ingeniería**  
**Programa de Ingeniería Electrónica**

Ibagué, 2019





El presente trabajo se lo dedico a mi querida familia, iniciando por mis padres y hermano por ser los pilares fundamentales en mi educación, ya que sin su ayuda y ejemplo de siempre, el cumplimiento de esta meta hubiese sido difícil; por creer en mí por sobre todas las cosas y estar pendientes.





## Agradecimientos

Agradezco de corazón a todas las personas quienes me ayudaron a que esta meta se cumpla y por el apoyo que he recibido desde siempre. Familia que de una u otra manera aportaron con su apoyo, consejos y cariño para que pueda concluir este trabajo. Al Dr. Andrés Alberto García León, mi tutor, por su dedicación y constante ayuda en el proceso de construcción de este trabajo; por estar siempre pendiente, Gracias.





## Resumen

Esta investigación presentó como objetivo principal, lograr la formulación de una heurística fundamentada en la búsqueda local que permitiera optimizar la tardanza total ponderada en el problema de *scheduling Job-shop Multi-recurso* con rutas lineales. De lo anterior, el referido problema clásico evidencia ciertas etapas en los procesos de fabricación y ensamble en las operaciones industriales del diario vivir, para lo cual, debe tenerse como punto de partida un grafo que se conforma por un grupo de máquinas, de las cuales, se seleccionan solo las que presenten un menor tiempo, para luego realizar un proceso de manera secuencial que dé lugar a las operaciones de los pedidos, las cuales, se organizan a partir de la configuración Job-shop. Así, el análisis del algoritmo que aquí se formuló, fue llevado a cabo en virtud de ciertas eventualidades de la literatura, del cual, sus resultados evidenciaron que la heurística cumple con dicho objetivo, que consiste en la mejora de las soluciones como lo es brindar un menor tiempo respecto de la tardanza ponderada.

**Palabras clave:** scheduling, Job-shop, Multi-recursos, heurística, tardanza, ponderada, algoritmo.

## Abstract

This research presented as main objective, to achieve the formulation of a heuristic based on the local search that would allow optimizing the total delay weighted in the problem of scheduling Job-shop Multi-resource with linear routes. Of the above, the referred classical problem evidence certain stages in the manufacturing processes and assembly in the industrial operations of the Daily living.

For this reason, a graph must be taken as a starting point that is formed by a group of machines, of which only those that have a shorter time are selected, and then perform a sequential process that results in the operations of the orders, which are organized from the Job-shop configuration. Thus, the analysis of the algorithm that was formulated here was carried, carried out by virtue of certain eventualities of literature, of which, their results showed that heuristics meet this objective, which is to improve the solutions as it is to provide a shorter time with regard to the weighted delay.

**Key words:** Scheduling, Job-shop, Multi-resources, heuristics, tardiness, weighted, algorithm.



# Contenido

	Pág.
<b>Resumen</b> .....	<b>IX</b>
<b>Lista de figuras</b> .....	<b>XI</b>
<b>Lista de tablas</b> .....	<b>XII</b>
<b>Introducción</b> .....	<b>13</b>
<b>1. Capítulo 1. Formulación del problema</b> .....	<b>15</b>
1.1 Definición problema JSFMRL .....	15
1.2 Grafo problema JSFMRL .....	16
1.3 Complejidad del grafo JSFMRL .....	19
1.4 Funciones la cuales se van a optimizar .....	19
<b>2. Capítulo 2. Proceso de la búsqueda local</b> .....	<b>21</b>
2.1 Factibilidad del movimiento de operaciones críticas .....	21
2.1.1 Inversión de los arcos críticos en grafos.....	22
2.1.2 Reasignación de un recurso de una operación crítica $\epsilon$ .....	23
2.2 Estimación de los tiempos de finalización de los pedidos .....	24
2.2.1 Estimación del movimiento al invertir la ruta $(x, y)$ .....	24
2.2.2 Estimación de reasignar el recurso $L$ de $\epsilon$ a $L'$ entre $j$ y $k$ .....	25
2.3 Heurística y su funcionamiento .....	26
2.4 Solución inicial del problema .....	27
<b>3. Capítulo 3. Resultados</b> .....	<b>29</b>
3.1 Tardanza Ponderada Inicial .....	29
3.2 Optimización de la Tardanza total ponderada.....	31
<b>4. Conclusiones y recomendaciones</b> .....	<b>34</b>
4.1 Conclusiones.....	34
4.2 Recomendaciones.....	35
<b>Bibliografía</b> .....	<b>37</b>



## Lista de figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1 Tipos de Grafos.....	17
Figura 2 Ejemplo de una operación y la asignación de máquinas de dicha operación....	18
Figura 3 Diferentes movimientos para máquinas en una operación.....	21
Figura 4 Movimiento para la inversión de un arco crítico (x, y) .....	22
Figura 5 Predecesores y sucesores (Operación x) .....	23
Figura 6 Ecuación 1 de estimación de $C_i$ al invertir un arco crítico (x, y) .....	25
Figura 7 Ecuación 2 de estimación de $C_i$ al reasignar L de $\epsilon$ a $L'$ entre j y k.....	26
Figura 8 Representación de la solución inicial operación x.....	28
Figura 9 Mejor solución inicial en T para la instancia propuesta .....	29
Figura 10 Due date de cada pedido para la instancia propuesta .....	30
Figura 11 Mejor solución encontrada para la instancia propuesta .....	32



## Lista de tablas

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 Tardanza ponderada inicial para la instancia propuesta .....	31
Tabla 2 Resultados de las tardanzas ponderas.....	31
Tabla 3 Resultados en la minimización de tardanza pondera.....	33



## Introducción

Actualmente, el mundo operacional ha generado que las empresas tiendan a esforzarse para ofrecer productos de mejor calidad y a un menor precio, ello, bajo una optimización de recursos y cuidadosa utilización de las materias primas. Así mismo, en el marco de la estrecha competencia que se presenta en el mercado global, encontramos que las empresas han debido otorgarle una mayor ponderación al recurso humano, esto, para garantizar una mejor atención a los clientes como tal, pues, debe siempre medirse tanto la calidad de los productos y los servicios como el tiempo en el que se prestan los mismos.

Esta investigación tiene por finalidad plantear una teoría o hallazgo que permita reducir como tal lo que se concibe como tardanza ponderada, en el problema de scheduling Job-shop flexible multi-recurso con rutas lineales. De lo anterior, se sabe que la naturaleza de ese problema, consiste básicamente en simular eventos de procesos industriales, en los cuales se plantea una agrupación de máquinas de forma simultánea para, posteriormente, definir algunas de ellas como las que darán lugar al desarrollo de las operaciones de pedidos que se programan conforme a una determinación de patrones de job-shop. En ese sentido, de una parte, la incansable búsqueda de soluciones al problema Job-shop, que aquí es objeto de estudio, ha conllevado a que los resultados de esta investigación puedan ser extensivos o aplicables a todas aquellas otras que se adelanten con la misma finalidad (García-León, 2016); de otro lado, se tiene que a la fecha, han sido detectadas un total de sesenta y ocho instancias como posibles para validar la eficacia de la heurística (Dauzère-Péres, 1998).

Las alternativas a tener en cuenta para efectos de solucionar los problemas planteados por scheduling, se determinan conforme a la cantidad de máquinas que deban aplicarse o vincularse para el caso en concreto, adicionalmente, deberá tenerse en cuenta el número de pedidos así como la flexibilidad de la operación, la cual, en el caso de marras, se presenta al usar diferentes máquinas al tiempo y el flujo que sigue el proceso de transformación (T' Kindt & Billaut, 2006). De igual forma, indicar una solución a un problema de scheduling, desde el ámbito computacional, es considerado *NP-hard*, por ello, dado el caso de presentarse una imposibilidad de solucionar rápidamente dicho problema, se necesitaría de consumo informático, incluso encontrándose ante problemas con pocas máquinas y pedidos y sin flexibilidad (Brucker, 2007).

Así, la mejor forma de analizar e identificar un problema de scheduling y su codificación, es a través de esquemas gráficos que permitan tener dos o más perspectivas del asunto en concreto, por ello, se han formulado de varias formas las matrices usadas por la programación genética y otras teorías que tienen como fundamento la naturaleza y la física (colonia de hormigas, enjambre de abejas y recocido simulado). En ese orden de ideas, se hace posible también determinar el costo computacional para el conteo de soluciones,



esto, en la medida en que el mismo puede llegar a ser representativo siempre y cuando se apliquen ciertas matrices. Luego entonces, para efectos de minimizar lo dificultoso que puede ser el problema a resolver, puede aplicarse un método de búsqueda local, bajo el sustento de almacenar únicamente la solución actual y el resto de soluciones (semejantes desde la perspectiva de la heurística) solo podrían fijarse a través de ponderación de opciones, es decir, de estimaciones o posibles soluciones a las cuales podría llegarse.

Como consecuencia de lo anterior, es correcto afirmar que el método de la búsqueda local se hace eficiente en la medida en que las estimaciones que se formulen frente al problema en concreto, minimizan la divergencia entre lo que se concibe como el valor real y el proyectado mediante valores de referencia.

Así pues, la asistencia aquí expuesta, presenta como finalidad atenuar lo dificultoso que puede llegar a ser el ejercicio computacional al momento de buscar una solución al problema que como tal se esté tratando, por lo tanto, imperioso resulta plantear los siguientes interrogantes, los cuales, nos permitirán abordar en mejor medida el contenido de la misma, a saber:

- ¿Cuáles son los aspectos a tener en cuenta para, de entrada, brindar una posible solución inicial al problema?
- ¿Qué medidas deben adoptarse para acrecentar la calidad de las funciones de estimación que se encuentren en la literatura y que permitan un mejor desempeño de las operaciones críticas al tratar criterios regulares?
- ¿Es posible definir las estrategias o procedimientos al interior del proceso de búsqueda local que permitan reducir la tardanza total ponderada?

Entonces, para efectos de resolver lo antes formulado, se proponen a su vez tres objetivos, los cuales, consisten, en primer lugar, en fijar un algoritmo que permita obtener una eficiente solución inicial de calidad; en segundo lugar, en establecer las funciones de estimación para las operaciones críticas, esto, considerando en estricto sentido el factor tiempo de finalización de los pedidos, sin entrar a discutir el problema de fondo. Por último, en tercer lugar, consiste en validar las etapas de mejoramiento y diversificación en el proceso de búsqueda local al minimizar la tardanza total ponderada.

De lo hasta aquí expuesto, y para efectos de garantizar una mayor comprensión de esta asistencia de investigación, debe saberse que la composición de esta, se enmarca en lo siguiente: un primer capítulo en el que se expone y se plantea el problema objeto de análisis y estudio; un segundo capítulo, a través del cual se dan las instrucciones para la elaboración de la heurística y, un tercer y último capítulo, en virtud del cual se describen las resultas mediante experimentos y ejercicios computacionales.

## 1. Capítulo 1. Formulación del problema

Es importante resaltar, que el problema de formulación para en el caso en concreto se enfatiza con procesos específicos, para ello se abarcará en primera instancia el desarrollo conceptual de problema a resolver, seguidamente se plasmarán la representación simbólica (Grafos) de los elementos constituidos en el problema, esto se caracterizan por ser disyuntivos y conjuntivos. Para culminar, se determina el sentido de las funciones que se pretenden perfeccionar y así mismo delimitar la complicación en ámbito computacional dando paso a la solución del problema en cuestión.

### 1.1 Definición problema JSFMRL

Para el entendimiento propiamente del problema que se atribuye a esta investigación, es importante dar conceptualización al problema peculiar que lo ha de anteceder, para esto se remite al *scheduling Job-shop* “*Job-shop Scheduling problem -JSP-*”. *JSP*, siendo enmarcado este problema como uno de los más dificultosos en materia de optimización combinatoria. En mencionado problema se transcurre a través de una serie de conjuntos de:  $n$  pedidos  $J = \{J_1, \dots, J_n\}$  en un conjunto  $M$  de  $m$ , medios o máquinas que están al alcance para el desarrollo de los pedidos. Cada medio solamente puede ejecutar una actuación en el momento, mientras que lo que se efectúa en cada pedido se manifiesta a través de una serie de acciones fijas que son catalogadas como ruta. En este problema no hay lugar la multiplicidad de operaciones, lo que se transforma en una acción ininterrumpida, los intervalos de los términos deben de ser enteros, conocidos y abarcan los términos de aislamiento. Cada pedido  $J_i$  consta de un momento para su liberación  $r_i$  traduciéndose ello en que  $J_i$  no se permite que inicie antes del término, un peso  $w_i$  que resalta la relevancia de  $J_i$ , y un término de vencimiento  $d_i$  en cual estipula un término antes de que  $J_i$  se deba dar. En si el sentido de tal problema es desarrollar una serie en las operaciones en que los medios y términos establecidos de finalización  $J_i$  que da lugar al perfeccionamiento de un fin.

El modelo JSFMRL (Job-Shop multi-recurso con rutas lineales), es la amplitud del modelo *JSP*, donde cada una de las operaciones requiere como mínimo un recurso para que se pueda ser procesado. Los medios o máquinas están sujetas a las utilidades que requieren la operación dependen de un subconjunto de  $M$ . Para adquirir un resultado conveniente del modelo JSFMRL, las operaciones se deben establecer y realizar en máquinas. La asignación en el modelo JSFMRL se basa en la selección, en cada operación y máquina que la ejecutará, mientras que la serie tiene como finalidad en este modelo la obtención de un orden en las operaciones de cada una de las maquinas escogidas, también se debe destacar que la tardanza total ha de ser ponderada. En pocas palabras la finalidad de JSFMRL es perfeccionar un elemento diversidad de ellos.



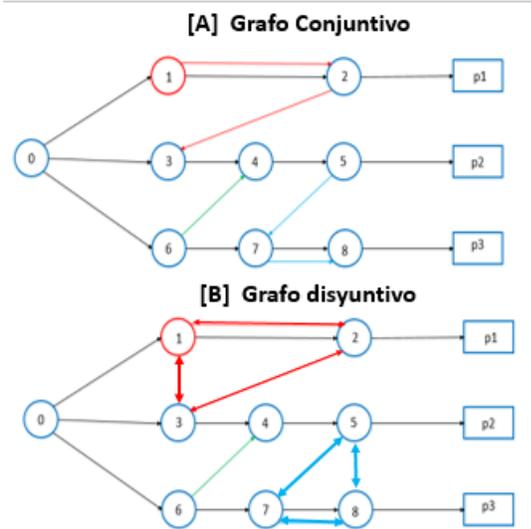
## 1.2 Grafo problema JSFMRL

En primer lugar, el grafo disyuntivo lo creó el gran ilustre (Roy, B. Sussmann, B., 1964), grafo que ha sido empleado para la solución de los problemas peculiares que se presentan en el modelo JSP, sirviendo para la expresión simbólica con rasgos efectivas de distintas limitaciones y particularidades que se presentan en los problemas a la hora de la programación. Seguidamente se realizará una breve explicación de la utilización de mencionado grafo (Disyuntivo) para la representación de un problema con elementos invariables.

El grafo disyuntivo se representa en la siguiente expresión simbólica:  $G = (V; A; E)$ , para esto se explicará de forma entendible el significado de cada una de las variables que tiene la expresión anteriormente escrita. Donde  $V$  representa el conjunto de nodos relacionados con las operaciones de pedidos, clasificándose los nodos como nodo ficticio 0 que es aquel expresa el inicio de cada trabajo y  $n$  nodos  $\phi_i$  donde cada uno representa el término de culminación de un trabajo  $J_i$ . El conglomerado de arcos conjuntivos  $A$  tiene arcos que enlazan dos operaciones continuas perteneciente a cada trabajo, el nodo 0 (ficticio) y cada primera operación perteneciente a cada trabajo, y la operación década trabajo, el cual la última operación de  $J_i$  con el nodo  $\phi_i$ . Últimamente,  $E_k$  es el grupo de arcos disyuntivos, entre dualidad de operaciones destinadas a cualquiera máquina  $k$  y  $E = \cup_{k \in M} E_k$ . El arco de 0 a la primera operación de un trabajo  $J_i$  tiene una longitud igual al término de liberación  $r_i$  de  $J_i$ . Donde el arco conjuntivo o disyuntivo sin importar el restante tiene una longitud igual al tiempo de procesamiento de la operación desde la que comienza.

La primera figura expone dos grafos en los cuales se evidencia el problema de JSP (*Job-shop Scheduling problema*), en esta ocasión con tres pedidos (arcos horizontales) con nodos terminales  $\phi_i$ . Para el primer caso, existen dos operaciones, las cuales son representadas por los nodos 1 y 2. En cuanto a los siguientes nodos 3,4 y 5 hacen referencia al 2 pedido y los otros para el 3 pedido. El grafo disyuntivo (B), podemos evidenciar la controversia en las operaciones y su secuencia; así como los arcos con doble flecha como los de color rojo, en un algoritmo se debe tener en cuenta la dirección de las operaciones o su secuencia para poder perfeccionar alguna posición. Al despejar esta controversia se obtiene un grafo Conjuntivo (A) en donde no debe existir el ciclo en la solución final del problema.

**Figura 1 Tipos de Grafos**



**Fuente:** Elaboración propia

Una selección  $S_k$ , lo cual le corresponde a un desarrollo del JSP (*Job-shop Scheduling problema*), para un fin determinado, esta selección se evidencia fijando una dirección a cada arco disyuntivo en  $E$ . Esta selección se puede realizar cuando el grafo no conduce a un ciclo. Hay que hacer referencia que el grafo contiene bastantes arcos innecesarios que deben ser quitados para poder hacer efectiva la forma en que cada nodo tenga un predecesor y un sucesor en la maquina en que se realice. Por ende, los nodos que corresponden a las operaciones de JSP, tienen dos arcos de entrada y dos de salida, menos la primer o última operación en la secuencia de máquinas las cuales solo portan un arco de entrada o uno de salida.

Mientras que el modelo JSFMRL (Job-Shop multi-recurso con rutas lineales) examina dos tipos de posibilidad al presente problema JSP: Multi-recurso y recurso flexible. Para lo que corresponde a multi-recurso, se debe tener en cuenta que se necesita de una o más máquinas, mientras que Flexible hace referencia a la selección de estas de un conjunto dado. En este orden de ideas, la operación se dará por analizado gracias al mayor tiempo de operación de la maquina seleccionada.

Para reafirmar lo anterior, en la figura 2 se presenta lo que podría ser un ejemplo de la operación que debe tener tres recursos o máquinas. La primer maquina debe ser escogida ente M4, M2 (rectángulo superior en a) y el tiempo de procesamiento está sustentado por el número inferior que se encuentra en los paréntesis. En la segunda maquina la selección se realiza por M2 o M5 y la tercera entre M3 o M4, cabe resaltar que aquí solo se cuenta con una máquina de cada tipo. El rectángulo de inferior (b) expone la asignación que se



hizo en la cual se tuvo en cuenta las maquinas M4, M5 y M3 ya que tiene el menor tiempo de ejecución.

**Figura 2 Ejemplo de una operación y la asignación de máquinas de dicha operación**

<b>M4</b>	1	<b>M2</b>	4
<b>M2</b>	5	<b>M5</b>	2
<b>M3</b>	1	<b>M4</b>	4

**[a] Operación**

<b>M4</b>	1	<b>M2</b>	4
<b>M2</b>	5	<b>M5</b>	2
<b>M3</b>	1	<b>M4</b>	4

**[B]Asignación de maquinas en una operación**

**Fuente:** Elaboración propia

Para poder obtener una solución eficaz para JSFMRL (Job-Shop multi-recurso con rutas lineales) se debe primero solucionar el problema de asignación en las operaciones y la secuencia respectiva de las maquinas sin causar algún ciclo. En cuanto a la representación simbólica (grafo) de cada operación, deben entrar y salir de la misma los recursos que ya estén asignados, el tiempo de inicio de la operación correspondiente será el que se obtenga de una representación simbólica (grafo) el cual contribuye a la formulación de lineamientos para la construcción de heurísticas figura que se explicará más adelante en este texto.

El tiempo que corresponde al inicio de un nodo  $x$   $h_x = L(0, x)$ , el cual se conoce normalmente como cabeza, se encuentra establecido por la longitud de la trayectoria más larga desde 0 o nodo de inicio hasta  $x$ . Por ende, el tiempo de finalización  $C_x$  de la operación  $x$  es  $h_x + p_x$ , donde  $p_x$  es el término de la operación y  $C_i$  es el tiempo de finalización de un trabajo  $J_i$  es igual a  $h_{\phi_i}$ . El nivel  $l_x$  de la operación  $x$  expone la cantidad máxima que existe desde el nodo de inicio a  $x$ . La cola  $q_x^i = L(x, \phi_i) - p_x$  de una operación  $x$  es la mayor longitud desde la culminación de  $x$  hasta el nodo  $\phi_i$  si existe un rumbo de  $x$  a  $\phi_i$  y  $-\infty$  si no existiera. El camino más extenso desde el nodo 0 al nodo  $\phi_i$  es catalogado como ruta crítica de 0 a  $\phi_i$  y su longitud es  $C_i$ . Cada operación  $x$  se asocia con esta ruta crítica según  $J_i$ , satisface  $h_x + p_x + q_x^i = C_i$ . Los arcos  $(x, y)$  que pertenecen a la ruta crítica de 0 a  $\phi_i$  es crítico si las operaciones  $x$  y  $y$  que corresponde a la misma máquina. Es importante mencionar que para el presente caso, si  $(x, y)$  son operaciones que se realizan en la misma máquina y pertenecen a un pedido distinto, donde los recursos que sean comunes y similares se convertirán en arcos críticos.

### 1.3 Complejidad del grafo JSFMRL.

EL JSP (*Job-shop Scheduling problema*), es un problema combinatorio, es decir, que para que este sea solucionado, al perfeccionar un criterio realiza un esfuerzo computacional que expone las distintas secuencias factibles sobre las máquinas. Si se tiene en cuenta la ampliación que se otorga, en caso de que una operación no se pueda ejecutar en una sola maquina seleccionada de un subconjunto es *NP-hard* “*Non-deterministic Polynomial-time hardness*”(Brucker P. , 2007). Muy pocos casos se pueden resolver polinomialmente. En (Brucker, P.; Schlie, R., 1990) para ello se ha propuesto un algoritmo polinomial geométrico para establecer dos pedidos en los que los tiempos de procesamiento de las operaciones no necesariamente depende de la máquina designada. El algoritmo se puede usar para tratar de simplificar cualquier criterio siempre que su característica sea regular. Esta perspectiva geométrica se ha extendido en la actualidad. (Hurink, J.; Jurisch, B.; Thole, M., 1995), ello para estudiar los momentos de lanzamiento y las restricciones que se presentan entre las operaciones.

Por otro lado, (Mati, Y.; Xie, X., 2004), uno de los grandes e ilustres autores plantean que con dos pedidos es *NP-Hard* en cuando los términos de procesamiento de las operaciones están sujetas a la máquina seleccionada. También redondean el anteriormente mencionado enfoque geométrico para sintetizar cualquier criterio e carácter regular, con 2 pedidos en los que solo 1 de ellos es flexible.

Por lo tanto, *la consideración de flexibilidad en JSP (Job-shop Scheduling problema)* es más compleja, ya que se debe tomar determinadas decisiones, a saber, que: la asignación y secuenciación. El *NP-Hardness* es de los casos comunes del *JSP* que estipulan las dificultades para solucionar esta medida en situaciones de índole general con cualquier número de pedidos y de máquinas. Por ende, la solución del problema perteneciente al modelo JSFMRL se enfatiza en resolver el desarrollo de heurísticas que son eficaces y que generan desarrollos de calidad en tiempos mínimos computacionales.

El planteamiento de este tipo de problemas por métodos de optimización así como la Programación Lineal necesitará de tiempos exponenciales para su desarrollo y que con la tecnología computacional actual no se ha podido determinar con precisión su duración, lo cual no contribuye a la toma de una decisión eficaz (Knopp, 2017), en este orden de ideas se puede tener en cuenta que la solución del problema Multi recurso con rutas lineales realmente necesita de un recurso computacional adicional al requerir que las maquinas operen simultáneamente para el procedimiento o procesamiento de los pedidos.

### 1.4 Funciones la cuales se van a optimizar

Un aspecto de relevancia con relación a la función de operaciones es la obtención eficaz del uso de las maquinas ello con el fin de mejorar la productividad con marketing para



perfeccionar en la mayor expresión el servicio al cliente. La productividad y servicio al cliente dependen de la ejecución de funciones teniendo en cuenta los términos de culminación de los pedidos. Diferentes funciones que son objetivas han sido contempladas, entre estos objetivos similares se encuentran los regulares. Se puede un criterio regular siempre y cuando la función que asciende de los términos de culminación ( $C_i \forall i \in J$ ) de los pedidos. Siempre es mejor comenzar los trabajos, pero también culminarlos lo más pronto posible, para que no vaya a traer consigo posibles repercusiones.

Mitigar o minimizar los criterios regulares, hace que se obtengan factores críticos los cuales ponen en peligro su rentabilidad y también su competitividad. La trascendencia de los pedidos y clientes con criterios ponderados, como el número de trabajos tardíos y la suma de los términos de culminación de los pedidos. Se considera una tardanza total ponderada donde la tardanza de un pedido es  $T_i = \max(0, C_i - d_i)$ , y por ende  $T_{max} = \max T_i, \forall i \in J$ .

En el desarrollo de la heurística que se dará más adelante, se encontrará una solución en donde la tardanza máxima sea cero, implica que la solución conlleva a una programación eficaz y concreta en cuanto a la entrega de pedidos.

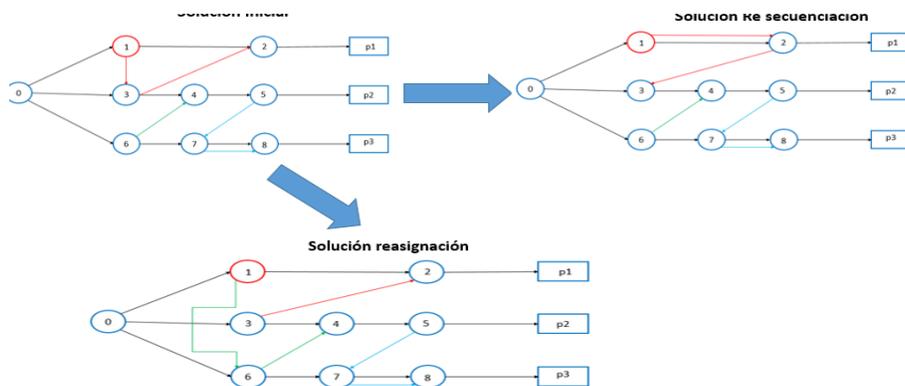
## 2. Capítulo 2. Proceso de la búsqueda local

Empleando el proceso de búsqueda local, se podrá llegar a la respectiva solución del problema, teniendo como objetivo la búsqueda de la solución más eficaz, que permita resolver tal incógnita, aplicando en el caso en específico tal método se puede evidenciar que ello abarca una posible solución plasmada en el grafo de la factibilidad del movimiento en las operaciones, y los términos (tiempo) de culminación de los pedidos sin hacer mutaciones en el procedimiento.

### 2.1 Factibilidad del movimiento de operaciones críticas

En el modelo JSFMRL (Job-Shop multi-recurso con rutas lineales) existen dos tipos de movimientos pueden manifestarse contemplando unas operaciones críticas que se clasifican en la resecuenciación y reasignación. Entendiéndose la resecuenciación como la forma de cambiar una operación en la secuencia de la máquina en que fue asignada y la reasignación que es el reemplazo de un recurso por otro siempre que sea conveniente y justificable tal cambio. En la siguiente figura se logra evidenciar (Figura 3) un grafo conjunto que se es utilizado para graficar y dar mejor entendimiento a las operaciones críticas de la resecuenciación y la reasignación, siendo la operación 1 (encerrada en un círculo de característica discontinuo) es crítica y asimismo está secuenciada mediante la máquina representada por los arcos rojos. La primera operación es la ruta de la máquina. La representación simbólica (Grafo) inferior izquierdo, expresa reasignación, el cual se evidencia que esta operación puede ser ejecutada por la maquina representada en el color verde y en este caso pasaría a ser la primera operación a realizar. Cabe resaltar, que en ambas mutaciones no se deben realizar ciclos. Si se considera la resecuenciación en la representación simbólica (grafo) superior derecho pasa a ubicar en la tercera posición.

**Figura 3 Diferentes movimientos para máquinas en una operación**



Fuente: Elaboración propia



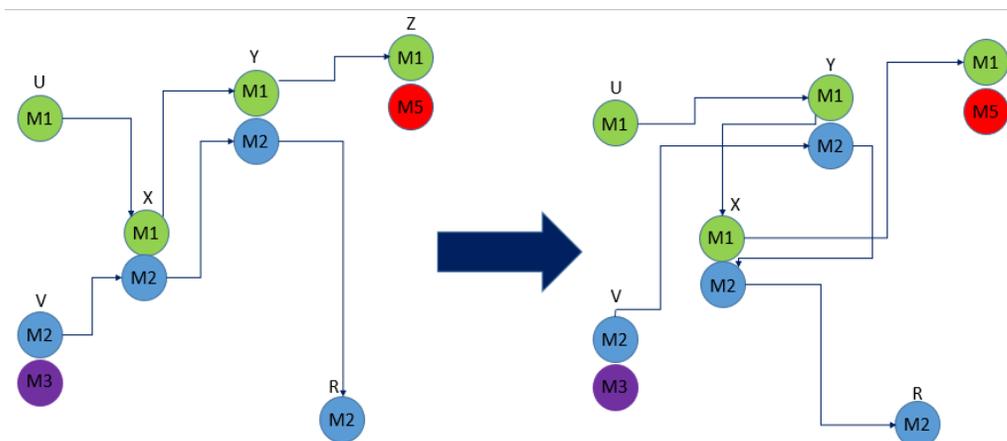
Por otro lado, el determinar esta forma de movimientos en el cual se hace mutaciones en la representación simbólica (Grafo), tiene un costo no considerable en el ámbito computacional, a pesar de ello distintos doctrinantes en esta materia han desarrollado distintas posiciones y opciones para avalar el movimiento, pero siempre y cuando se tenga el conocimiento de determinadas reglas, una clara ejemplificación de ello es el HTA, un test que consiste en demostrar la no presencia de ciclos al mover una operación crítica, teniendo en cuenta los términos (tiempo) de iniciación de las operaciones, el número de los arcos y por último las colas finales de las operaciones (García-León, Dauzère-Pères, & Mati, 2015)

En este orden de ideas, para la solución del problema, y sintetizar de forma más sencilla la solución de mismo, se tendrá en cuenta dos clasificaciones del movimiento: 1. La reasignación de recursos dependiendo la existencia de números de arcos u la inversión de arcos críticos.

### 2.1.1 Inversión de los arcos críticos en grafos

En el modelo JSP (*Job-shop Scheduling problema*), la implementación de arcos críticos es uno de los movimientos que son asequibles sin con el requisito de validarse (Cheng, W.; Zhang, R., 2011). Situación opuesta sucede para el modelo JSFMRL (*Job-Shop multi-recurso con rutas lineales*), esta implementación debe de considerar la presencia de recursos en común entre las operaciones ( $x, y$ ). La Figura 4 ilustra la transformación en los arcos conjuntivos al mutar la secuencia en la asignación de recursos en  $x$  y  $y$  expresados con círculos de diferentes colores. Analícese, que en la zona derecha de la Figura, los arcos señalan de  $y$  a  $x$  y los arcos que provienen de  $u$  y  $v$  (antecesores en los recursos para  $x$  van a desplazarse a  $y$ ). De igual formas, los arcos que inician desde  $x$  no están encaminados a  $y$  sino a los continuadores de los recursos críticos de  $y$  ( $z$  y  $r$ ).

Figura 4 Movimiento para la inversión de un arco crítico ( $x, y$ )



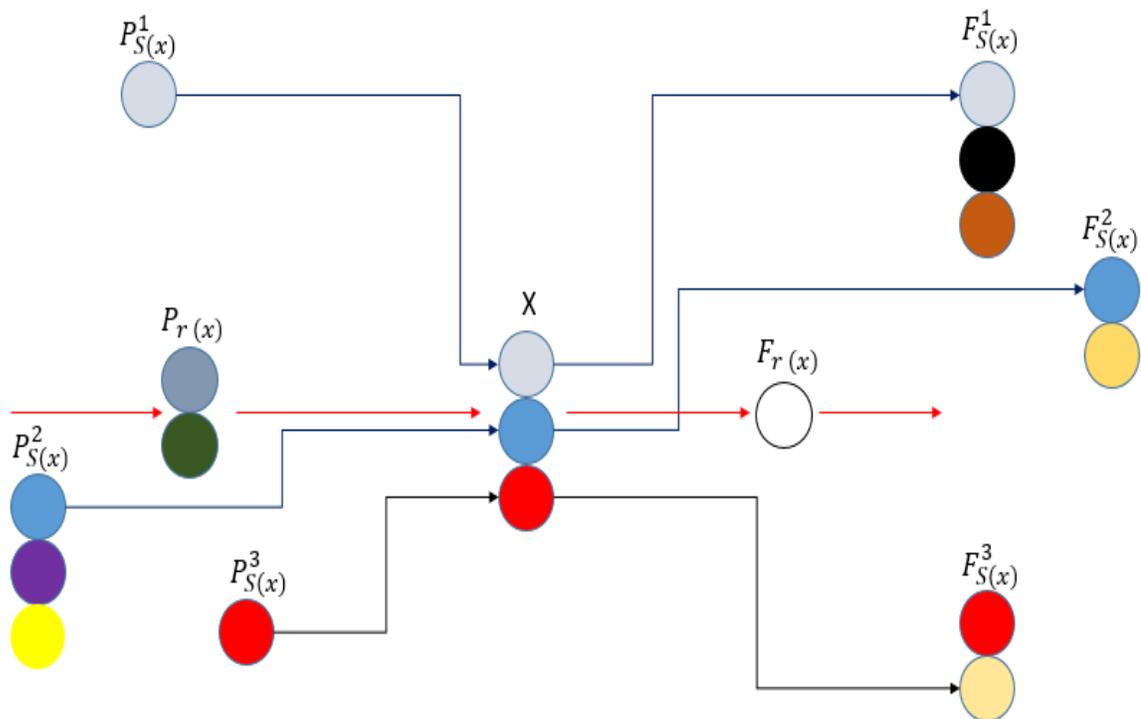
Fuente: Elaboración propia

### 2.1.2 Reasignación de un recurso de una operación crítica $\epsilon$

El porcentaje de los arcos que repercuten en la solución del modelo JSFMRL (Job-Shop multi-recurso con rutas lineales) ya que afecta directamente el alcance del grado de dificultad, porque el procedimiento de investigación debe de garantizar la inexistencia de los ciclos. En tal situación se postula la reasignación de un recurso  $L$  de la operación  $\epsilon$ ,  $\epsilon = x \vee \epsilon = y$  al recurso  $L'$  entre las operaciones  $j$  y  $k$ . Ello con el fin de dar el aval a la reasignación, la conceptualización de antecesores y sucesores de la operación  $x$  son establecidos.

En tal grafica entiéndase que  $P_x$  sea (respectivamente  $F_x$ ), el grupo de inmediatos antecesores (propiamente sucesores) de la operación  $x$ . También sea  $P_{r(x)}$  (respectivamente  $F_{r(x)}$ ) el instantáneo antecesor en el orden de la ruta del pedido al que corresponde  $x$ . Dependiendo de los recursos tenga la operación  $x$ , asimismo será el número de antecesores y sucesores en secuencia de los ellos que tendrá la operación y se representa por  $P_{S(x)}^k$  (propiamente  $F_{S(x)}^k$ ). La Figura 5 expresa de forma minuciosa de lo ya mencionado para el procesamiento de la operación  $x$ .

**Figura 5 Predecesores y sucesores (Operación x)**



**Fuente:** Elaboración Propia



Cuando ya se tiene conocimiento sobre los sucesores y predecesores (o Antecesoros y sucesores), el proceso de investigación tiene finalidad la obtención de la reasignación del recurso  $L$  de  $\epsilon$ , al recurso  $L'$  entre las operaciones  $j$  y  $k$ . DE tal manera, no prospere un ciclo si no exista una ruta el cual se encuentre inmerso los sucesores de  $\epsilon$  (excepto por el recurso en que este asignado) y  $j$ , y entre  $k$  y los predecesores de  $\epsilon$  (excepto por el recurso en que este asignado).

Al efectuarse la realización de mencionada condición da lugar a la siguiente expresión matemática:

**Expresión 1.** La reasignación del recurso  $L$  a  $L'$  con relación a las operaciones  $j$  y  $k$  es conveniente para la existencia de una operación  $\epsilon$ ,  $\epsilon = x$  ó  $\epsilon = y$ . El cual, no afecta a  $q_k^i$ , si:

1.  $l_j \leq \min_{b \in B} \{l_b\}$
2.  $l_k \geq \max_{p \in P_\epsilon} \{l_p\}$ ,  $k \neq p$

**Demostración:** Para la primera estipulación, se implanta que el conjunto  $B = \{F_\epsilon - F_s^L(\epsilon)\}$  Si  $j$  consta de un mínimo número de arcos, por el cual será inexistente la presencia de una ruta entre  $b$  y  $j$ . Con relación a la segunda estipulación si  $k \neq p$  y tiene una amplitud en los arcos, por ende no habrá lugar a la existencia de una ruta. Siendo ello dos situaciones matizada por la imposibilidad.

## 2.2 Estimación de los tiempos de finalización de los pedidos

Ahora bien, para contemplar los términos (tiempos) de culminación de pedidos  $\hat{C}_i \forall i \in J$ , se debe demostrar que tal contemplación cumpla los parámetros de una limitación inferior "lower bound". Traduciéndose ello en que el valor contemplado siempre debe ser menor igual que el real. Para las dos clasificaciones de movimientos se ha dado lugar agrupado de ecuaciones.

### 2.2.1 Estimación del movimiento al invertir la ruta (x, y)

Las transformaciones o denominadas también como mutaciones que se realizan en la representación simbólica (grafo conjuntivo) al invertir la ruta (x, y) se dan a entender en la Figura 4. En la figura 6, la ecuación 1 expresa la forma para delimitar el valor de la estimación o contemplación,  $\hat{C}_i \forall i \in J$ .

**Figura 6 Ecuación 1 de estimación de  $C_i$  al invertir un arco crítico (x, y)**

$$\hat{C}_i = \begin{cases} C_i & \text{if } q_x^i = -\infty \\ \max\{L_1, L_2, L_3\} & \text{En caso contrario} \end{cases}$$

$$L_1 = \hat{h}_y + p_y + \max_{v \in V} \{p_v + q_v^i\}$$

$$L_2 = \hat{h}_x + p_x + \max_{w \in W} \{p_w + q_w^i\}$$

$$L_3 = \max_{\omega \in S_x} \{h_\omega + p_\omega + q_\omega^i\}$$

$$h_y = \max_{u \in U} \{h_u + p_u\}$$

$$\hat{h}_x = \max\{\hat{h}_y + p_y, \max_{r \in R} \{h_r + p_r\}\}$$

$$U = \{\{\mathcal{P}_y - x\} \cup \mathcal{P}_{K_x}\}$$

$$V = \{\mathcal{F}_y - \mathcal{F}_{K_y}\}$$

$$W = \{\{\mathcal{F}_x - y\} \cup \mathcal{F}_{K_y}\}$$

$$R = \{\mathcal{P}_x - \mathcal{P}_{K_x}\}$$

$$S_x = \{\omega \neq i / l_\omega = l_i\}$$

**Fuente:** William Fernando Torres Tapia

En la Ecuación 1. Se determinan dos condiciones que repercuten en la estimación para la culminación de  $J_i$ . La primera está arraigada con la no existencia de una ruta entre la operación  $x$  y  $\phi_i$  que en este caso la  $y$  terminación será igual. En tal circunstancia de que haya lugar a la distancia, se tendrá que analizar tres longitudes representadas por  $L_1$ ,  $L_2$  y  $L_3$ :

- $L_1$  repercuten las rutas que dan inicio y sin tener en cuenta al nodo  $x$  ni los recursos que son críticos  $k \in K$ , el cual se encuentra enlazado a  $x$ .
- En  $L_2$  se estudia las rutas que se mutan o cambian al invertir a  $x$ , lo que se traduce en que todos los sucesores de  $x$  sin y más los recursos críticos desde los cuales había ruta inmediata desde  $y$
- Últimamente  $L_3$  en el que se evalúan los nodos de todo el grafo que tienen igual número de arcos de  $x$ .

Adicionalmente, se han considerado las contemplaciones de los tiempos de inicio de  $x$  ( $h_x$ ) y de  $y$  ( $h_y$ ).

### 2.2.2 Estimación de reasignar el recurso $L$ de $\epsilon$ a $L'$ entre $j$ y $k$

Para la reasignación del recurso  $L$  de  $\epsilon$  a  $L'$  entre  $j$  y  $k$  está representada en la figura 7 la ecuación 2.



**Figura 7 Ecuación 2 de estimación de  $C_i$  al reasignar  $L$  de  $\epsilon$  a  $L'$  entre  $j$  y  $k$**

$$\hat{C}_i = \begin{cases} C_i & \text{if } q_\epsilon^i = q_k^i = -\infty \\ \max\{L_1, L_2\} & \text{En caso contario} \end{cases}$$

$$L_1 = h_{\mathcal{P}_{s(\epsilon)}^l} + p_{\mathcal{P}_{s(\epsilon)}^l} + p_{\mathcal{F}_{s(\epsilon)}^l} + q_{\mathcal{F}_{s(\epsilon)}^l}^i$$

$$L_2 = \hat{h}_\epsilon + p'_\epsilon + \max\{p_k + q_k^i, \max_{b \in B} \{p_b + q_b^i\}\}$$

$$\hat{h}_\epsilon = \max\{\hat{h}_j + p_j, \max_{c \in C} \{h_c + p_c\}\}$$

$$\hat{h}_j = \begin{cases} \max_{p \in \{\mathcal{P}_j - \epsilon\}} \{h_p + p_p\} & \text{if } j = \mathcal{F}_{s(\epsilon)}^L \\ h_j & \text{En caso contario} \end{cases}$$

$$B = \{\mathcal{F}_\epsilon - \mathcal{F}_{s(\epsilon)}^L\}$$

$$C = \{\mathcal{P}_\epsilon - \mathcal{P}_{s(\epsilon)}^L\}$$

**Fuente:** William Fernando Torres Tapia

En la Ecuación 2 que está en cuestión. Existen dos circunstancias que repercute la contemplación para la finalización de  $J_i$ . La primera situación a la que se enfrenta en el caso en concreto se encuentra ligada con la no existencia de una ruta entre la operación  $x$  y  $K$  a  $\phi_i$  caso en el cual la asignación continuará siendo igual. En la situación de que esta ruta exista, es necesario la evaluación de dos longitudes denominadas por  $L_1$  y  $L_2$ .  $L_1$  expresa la ruta que unirá al antecedente con el descendiente de  $\epsilon$  cuando se sea reasignado.  $L_2$  se estudia la posible ruta que enlaza a  $j$  con  $\epsilon$  y las que se estudian al contemplar  $k$  y los siguientes en el orden de recursos distintos a  $L$  para  $\epsilon$ . Cabe resaltar, que la contemplación de  $L_3$  resultaría no eficiente, porque el termino de procesamiento de  $\epsilon$  puede minimizarse por ende las propiedades no cambian del conglomerado que abarca las operaciones con igual porcentaje de arcos.

## 2.3 Heurística y su funcionamiento

Es importante conceptualizar lo que significa heurística, del cual se aportará que tiene por finalidad la obtención de una solución del problema que sea caracterizado por la eficiencia, ello realizado en términos que se traducen a efímeros en el medio computacional, para la obtención de ello se debe partir de una base inicial, que dará lugar al reporte de las rutas críticas de los pedidos que repercuten en un elemento, una ejemplificación de lo anteriormente mencionado, tiene que ver cuando se presenta el fenómeno de la tardanza total ponderada, donde se estima la ruta crítica de los pedidos retrasados. Cuando se evidencien rutas críticas se deberá determina, los aros críticos, donde estos son los elementos necesarios para implementarlos en las Ecuaciones 1 y 2, analizando la conveniencia. A raíz de este resultado se permitirá establecer las inserciones más eficientes junto con sus valores contemplados o estimados, después la heurística mutará

---

la representación simbólica (grafo) que reúna el menor valor criterio del que se encuentra en el momento.

Esta figura de la heurística se efectúa a partir de dos etapas interactivas y dinámicas, catalogadas como mejoramiento y diversificación. En la primera etapa (Mejoramiento) se tiene por objeto el encontrar la mejor estimación con relación al criterio para realizar un cambio en la representación simbólica (grafo). Cuando no se logra lo anterior es que se da lugar a la presencia de la segunda etapa o diversificación, donde se ejecutan movimientos aleatorios en un lapso  $[a,b]$ , en cuanto se mejora el criterio, nuevamente se retoma a la etapa de mejoramiento. Ya el procedimiento de materialización es obtenido por el tiempo, en tal caso en que el valor del criterio sea cero hasta allí llega el proceso de la heurística. Este se manifiesta también en la materia de la tardanza en cuanto la tardanza máxima sea cero, por ende, la tardanza total ponderada también tendrá ese mismo alcance, es decir, cero. Cuando ya llega a su fin el proceso de la heurística, el resultado computado se obtendrá por medio de dos archivos de texto, los cuales son con relación a la solución inicial y la obtenida. Para mejor comprensión se explicará seguidamente el procedimiento para llegar a la solución inicial.

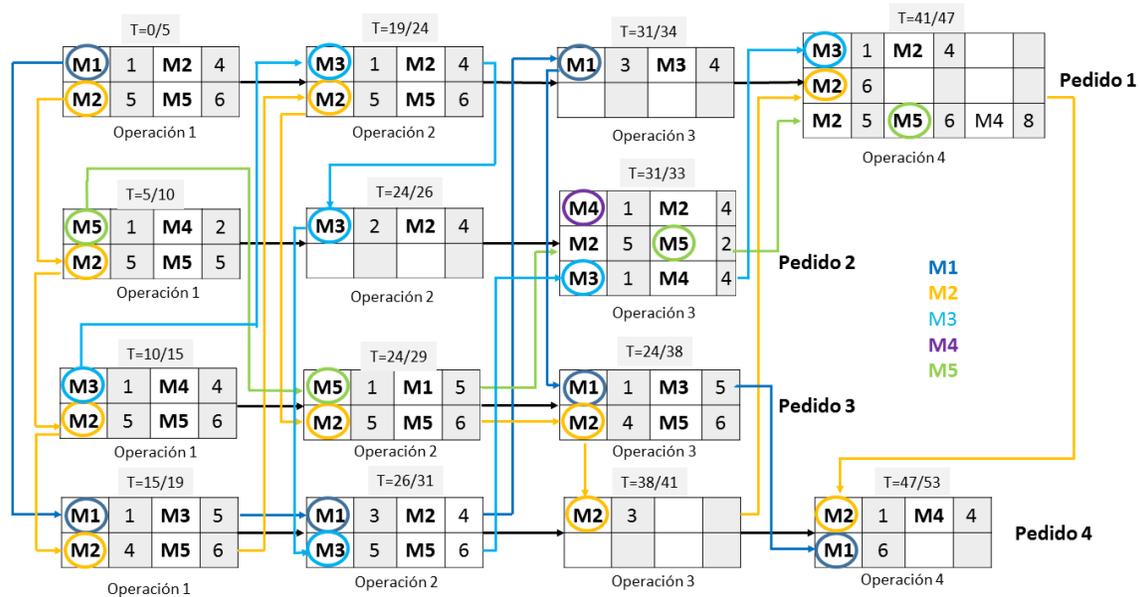
## 2.4 Solución inicial del problema

Para determinar una solución inicial de calidad inicialmente se formula un algoritmo capaz de desarrollar y realizar las operaciones correspondientes para llegar a cabo una solución inicial al problema. Este algoritmo se realiza a partir de un grafo propuesto, que contiene información sobre operaciones y pedidos en un proceso de fabricación. Principalmente lo que busca es continuar de una manera ordenada el número de pedidos y las operaciones que posee el grafo. Posteriormente la selección de máquinas se tomara sobre aquellas que tarden un menor tiempo de finalización. Esta selección se toma en cuenta a partir de cada operación dentro del pedido y que la maquina seleccionada no sea la misma dentro de la operación. Después de tener seleccionadas las máquinas, se propone realizar un recorrido por columnas iniciando de arriba hacia abajo secuencialmente en el grafo.

Una instancia o ejemplo con cinco máquinas (M1, M2, M3, M4 y M5), cuatro pedidos (pedido 1, pedido 2, pedido 3 y pedido 4) es propuesto para ilustrar el algoritmo que representa la solución inicial que se ha propuesto (ver Figura 8). A cada pedido se le ha asignado los siguientes pesos de importancia. Para el pedido 1  $w_1 = 4$ , para el 2  $w_2 = 2$ , para el 3  $w_3 = 2$  y finalmente para el pedido 4  $w_4 = 1$ . Los tiempos de entrega son ( $d_1 = 25$ ,  $d_2 = 14$ ,  $d_3 = 20$  y  $d_4 = 24$ ).



**Figura 8 Representación de la solución inicial operación x**



**Fuente:** Elaboración propia

Nótese que en la Figura 8, la primera operación que se asigna es la Operación 1 del pedido 1. La operación se asigna a las máquinas M1 y M2 con un tiempo de procesamiento de 5, la cual comenzaría en el instante cero (0) para finalizar en 5. La siguiente operación es la Operación 1 del pedido 2, la cual es asignada a M5 y M2. Cuando se finaliza la asignación y secuencia de todas las operaciones, los tiempos de finalización de los pedidos es 47 para el pedido 1 (ver Operación 4 del pedido 1), 33 para el pedido 2, 38 para el pedido 3 y 53 para el pedido 4. Si se ha considerado. Si la tardanza total ponderada se calcula el valor es 191. Es decir  $T = \sum T_i = 4 \times (47 - 25) + 2 \times (33 - 14) + 2 \times (38 - 20) + 1 \times (53 - 24) = 191$ .

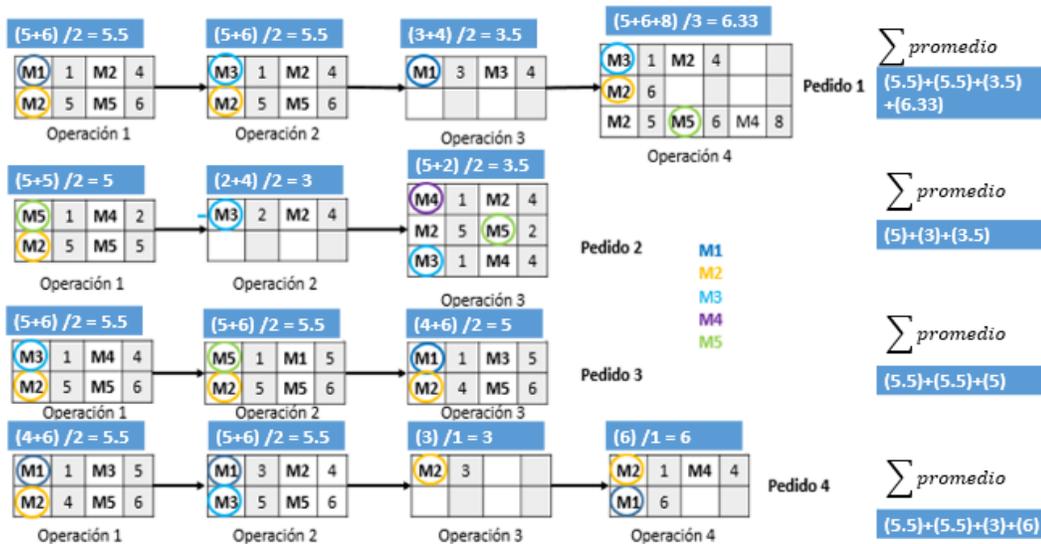
### 3. Capítulo 3. Resultados

En los capítulos que anteceden, a saber, el primero y el segundo, fue posible exponer de manera minuciosa cada uno de los fundamentos y bases como tal, tanto matemáticos como teóricos, en los cuales encuentra sustento lo que se concibe como el diseño de la heurística. Ahora bien, en este capítulo tercero, se procura dar validación a de las resultas del trato que se le proporcionó a cada uno de los objetivos trazados en esta asistencia, ello, en la medida en que estos últimos, proponen específicamente el complemento para la optimización de la tardanza total ponderada inicial y la final; Así, la heurística fue desarrollada en el software Matlab R2015a.

#### 3.1 Tardanza Ponderada Inicial

En ese orden de ideas, para efectos de realizar el cálculo de la tardanza ponderada inicial, es relevante traer a colación el conocimiento de los tiempos de entrega de los pedidos en este caso  $D_i$  obtenidos mediante la solución inicial. Conforme a lo anterior, se tiene que el procedimiento para calcular los tiempos de entrega se basan en (Singer, 1998), ello, obteniendo la solución inicial como muestra la figura 8, pues, el procedimiento consiste en el cálculo de los tiempos promedios del pedido y multiplicarlos por un factor  $f$  considerado por el investigador.

Figura 9 Mejor solución inicial en T para la instancia propuesta



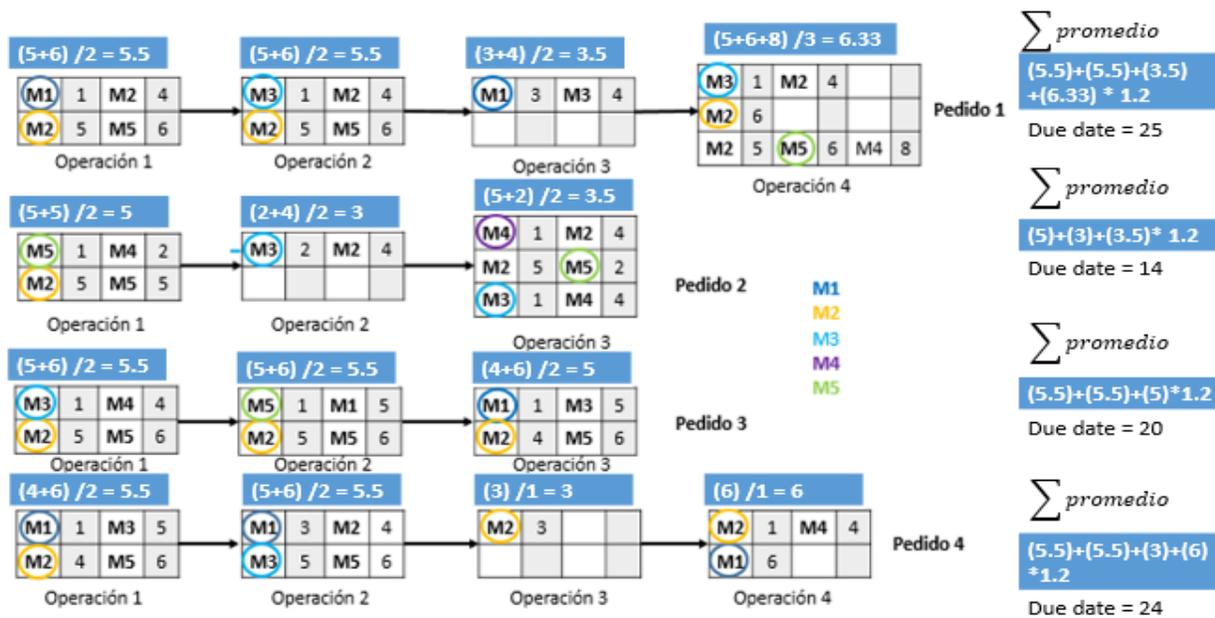
Fuente: Elaboración propia



Como se puede observar en la Figura 9, se toma el máximo tiempo de cada sub-conjunto de recursos y, seguidamente, con estos máximos hallados (5, 5, 3 y 6) se promedian el tiempo de cada operación, verbigracia, de la operación 1 del pedido 1 el máximo tiempo de finalización que es la máquina 2, es allí donde se promedia el tiempo entre las maquinas M2 y M5  $(5+6)/2 = 5.5$  y al final sacando la sumatoria del pedido total.

Luego de haberse evaluado la eficiencia de la heurística en la instancia creada, se procede a calcular el valor de T en las instancias que se están analizando en este caso, para un factor f de 1.2. Posteriormente, se hace necesario realizar la multiplicación de los tiempos promedios de cada pedido f, el resultado *due date* se pasa al número entero y, seguidamente, si resulta un número decimal. Lo anterior, tal como es explicado con un pequeño ejemplo por medio de la Figura 10.

**Figura 10 Due date de cada pedido para la instancia propuesta**



Fuente: Elaboración propia

Por último, para el cálculo de la tardanza ponderada inicial de la instancia propuesta, se realizó teniendo en cuenta la resta de C', es decir, el tiempo de finalización de cada pedido y *Due date* (fecha de entrega) de cada uno de los pedidos. Estos resultados son multiplicados por el peso ponderado y la sumatoria nos da la tardanza ponderada como se muestra en la tabla 1, transcrita a continuación:

**Tabla 1 Tardanza ponderada inicial para la instancia propuesta**

C'	D	TI = (C' - D)	TI*WI	RESULTADO
47	25	22	22*4	88
33	14	19	19*2	38
38	20	18	18*2	36
53	24	29	29*1	29
			TOTAL	191

**Fuente:** Elaboración propia

En la Tabla 2, se hallan las tardanzas ponderadas inicial. De ella es posible inferir que solución óptima se alcanza en la mayoría de las instancias.

**Tabla 2 Resultados de las tardanzas ponderas**

<i>Instancia</i>	<i>T</i>	<i>Instancia</i>	<i>T</i>
<i>mjs01</i>	191	<i>mjs26</i>	34368
<i>mjs02</i>	5029	<i>mjs27</i>	44282
<i>mjs03</i>	3328	<i>Mjs28</i>	44130
<i>mjs04</i>	5823	<i>Mjs29</i>	37142
<i>mjs05</i>	8669		
<i>mjs06</i>	6522		
<i>mjs07</i>	8096		
<i>mjs08</i>	8513		
<i>mjs09</i>	6061		
<i>mjs18</i>	19972		
<i>mjs19</i>	18492		
<i>mjs20</i>	30296		
<i>mjs21</i>	24422		
<i>mjs22</i>	27844		
<i>mjs23</i>	30562		
<i>mjs24</i>	29108		
<i>mjs25</i>	47528		

### 3.2 Optimización de la Tardanza total ponderada

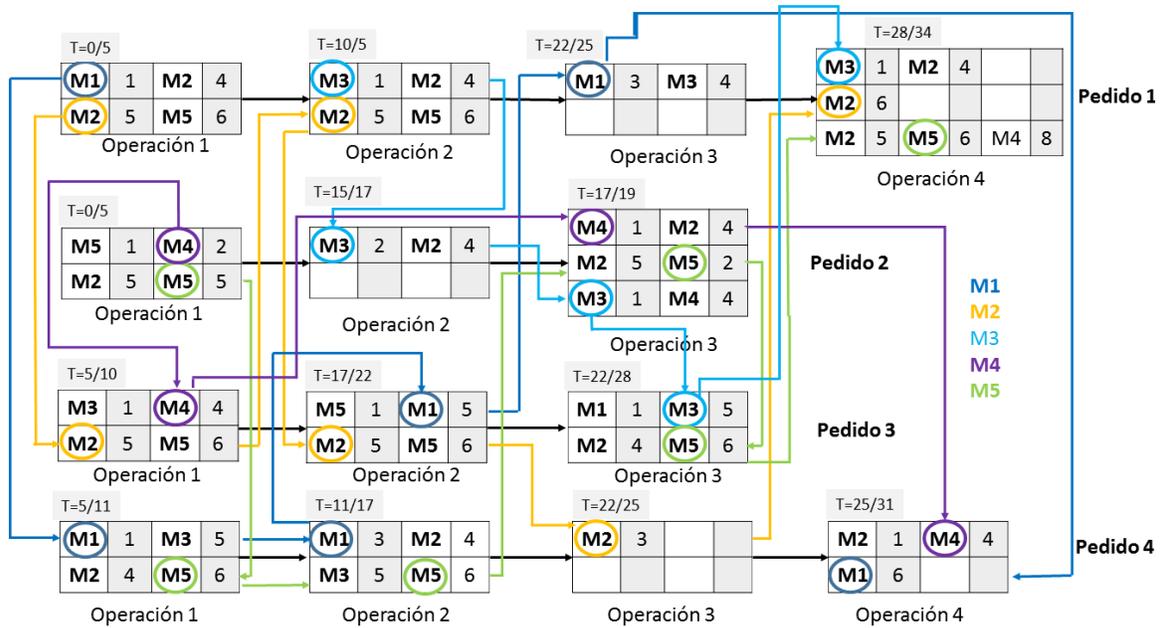
En la Figura 11 se observa la solución óptima encontrada luego de ejecutar la heurística durante seis minutos. Adicionalmente, la imagen que genera el software en la cual se ilustran los tiempos de entrega, los pesos ponderados y la asignación de operaciones a las máquinas con sus respectivas secuencias.



Como se observa, el valor del criterio disminuye de 191 a 69. La solución de 191 se toma de la Figura 6. La solución de 69 es obtenida como se muestra:

$$T = \sum T_i = 4 \times (34 - 25) + 2 \times (19 - 14) + 2 \times (28 - 20) + 1 \times (31 - 24) = 69.$$

**Figura 11 Mejor solución encontrada para la instancia propuesta**



Machine 4: (2, 1)->(0, 5)|| (3, 1)->(5, 10)|| (2, 3)->(17, 19)|| (4, 4)->(25, 31)||

Machine 5: (2, 1)->(0, 5)|| (4, 1)->(5, 11)|| (4, 2)->(11, 17)|| (2, 3)->(17, 19)|| (3, 3)->(22, 28)|| (1, 4)->(28, 34)||

**Fuente:** Elaboración propia

En la Tabla 3, se hallan las tardanzas ponderadas. De ella, es posible inferir cuál solución óptima se alcanza en la mayoría de las instancias.

**Tabla 3 Resultados en la minimización de tardanza pondera**

<i>Instancia</i>	<i>T</i>	<i>Instancia</i>	<i>T</i>
<i>mjs01</i>	69	<i>mjs18</i>	10072
<i>mjs02</i>	179	<i>mjs19</i>	9692
<i>mjs03</i>	864	<i>mjs20</i>	5951
<i>mjs04</i>	3337	<i>mjs21</i>	5080
<i>mjs05</i>	5985	<i>mjs22</i>	5376
<i>mjs06</i>	2924	<i>mjs23</i>	5856
<i>mjs07</i>	6404	<i>mjs24</i>	14698
<i>mjs08</i>	4333	<i>mjs25</i>	9466
<i>mjs09</i>	2775	<i>mjs26</i>	8306
<i>mjs10</i>	6315	<i>mjs27</i>	10180
<i>mjs11</i>	6634	<i>mjs28</i>	9537
<i>mjs12</i>	5358	<i>mjs29</i>	8535
<i>mjs13</i>	5887	<i>Mjs51</i>	434
<i>mjs14</i>	4523	<i>Mjs53</i>	143
<i>mjs15</i>	8857	<i>Mjs55</i>	1528
<i>mjs16</i>	8614	<i>Mjs57</i>	2288
<i>mjs17</i>	11004	<i>Mjs59</i>	1779

## 4. Conclusiones y recomendaciones.

### 4.1 Conclusiones.

Esta investigación permitió la formulación de una heurística eficiente, sustentada en procesos de búsqueda local para la minimización de criterios regulares de forma multi-objetivo para la programación y control de la producción validable en empresas con configuraciones flexibles en el departamento del Tolima. De lo anterior, fueron tenidos en cuenta algunos criterios, entre los cuales, se destaca el consistente en formular un algoritmo para determinar una solución inicial de calidad, que, a su vez, permitió la realización de determinados movimientos de operaciones de una manera ordenada y eficaz. En segundo lugar, se destaca el criterio que permitió establecer funciones de estimación para el movimiento de operaciones críticas, el cual, tuvo por sustento como tal la realización de dos tipos de movimientos, a saber, el de inversión y el de reasignación, permitiendo de esa manera una mejor solución al problema planteado inicialmente. Así, en tercera instancia, el último de los criterios radicó en la validación de las etapas de mejoramiento y diversificación en el proceso de búsqueda local al lograr la reducción de la tardanza total ponderada, pues, este mejoró el tiempo de espera o de tardanza que se logró en el criterio anterior.

Así las cosas, es posible definir que en la reducción de la tardanza ponderada se encontró una mejor solución debido a que se generaron cambios aleatorios reduciendo así el factor tiempo total ponderado.

Luego entonces, en esta asistencia de investigación GINNOVA realizada por el suscrito estudiante, se logró determinar que, en efecto, se contribuye con la elaboración de un software que facilita la solución de problemas scheduling *Job-shop* multi-recurso con rutas lineales, de ello, se tiene además que ese software es eficaz a la hora de utilizarse como objetivo general, pues, lee documentos con formatos *txt* ingresados por el usuario, brindando como resultado dos tipos archivos de texto, a saber:

- Criterio de tardanza ponderada inicial: Archivo de texto con la solución correspondiente.
- Criterio de optimización de la tardanza ponderada final: Archivo de texto con la solución correspondiente.

Se concluye entonces que, a partir de los objetivos propuestos para la asistencia de investigación GINNOVA, fue posible otorgar soluciones eficientes a los problemas clásicos de scheduling *Job-shop*, ello, obteniendo los resultados esperados al interior de esta investigación. Así, no obstante, esta última se caracteriza por no haber sido aplicada a una empresa de la realidad como tal que pretende alcanzar una óptima eficiencia y el bajo costo en la fabricación o ensamble de sus productos, se tuvo que, conforme a problemas



que acaecen en la vida real en las industrias de la producción, y con los resultados aquí logrados, se hace posible la satisfacción del cliente al momento de recibir sus productos de manera diligente y rápida o, en otros términos, de hacer uso del servicio que se oferta al mercado.

## 4.2 Recomendaciones

En procura de mejorar esta asistencia de investigación, se hace pertinente formular las siguientes recomendaciones:

1. Que el grupo de asistencia de investigación GINNOVA cuente con una sala de cómputo debidamente equipada y con instrumentos sofisticados para garantizar una mayor eficacia en los resultados que logren obtenerse, y una mayor facilidad en el acceso a toda aquella información que para ese efecto se requiere. Todo lo anterior, en el momento de la elaboración del software.
2. Considero pertinente recomendar que se realice un estudio previo a diferentes empresas que se encuentren ubicadas en nuestro departamento, las cuales estén interesadas en comprar e implementar la aplicación del software para contribuir con el desarrollo económico de sí mismas y de nuestro mercado local y, sobre todo, en mejorar sus condiciones de efectividad para que los clientes estén, día a día, aún más satisfechos.



## Bibliografía

- Brucker, P. (2007). *Scheduling algorithms*. Springer.
- Brucker, P.; Schlie, R. (1990). Job-shop scheduling with multi-purpose machines. *Computing*, 45(4), 369-375.
- Cheng, W.; Zhang, R. (2011). A simulated annealing algorithm based on block properties for the job shop scheduling problem with total weighted tardiness objective. *Computers & Operations Research*, 38(5), 854-867.
- Cormen, T. H.; Leiserson, C. E.; Rivest, R. L.; Stein, C.;. (2001). *Introduction to algorithms* (Vol. 2). MIT press Cambridge.
- Dauzère-Pérès, S. and Paulli, J. (1997). An integrated approach for modeling and solving the general multiprocessor job-shop scheduling problem using tabu search. *Annals of Operations Research*.
- Dauzère-Pérès, S. R. (1998). Multi-resource shop scheduling with resource Flexibility. *European Journal of Operational Research*(107), 289-305.
- Deb, K. (1989). Genetic Algorithms in Multi-Modal Function Optimization. Master's Thesis. Tuscaloosa: AL; University of Alabama.
- Deb, K. (2001). *Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms*. WILEY.
- Deb, k. et. al. (2001). *Multi-objective optimization using evolutionary algorithms*. John Wiley and Sons Chichester.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & T. , M. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. In IEEE (Ed.).
- Deb, K.; Agrawal, S.; Pratap, A; and Meyarivan, T.;. (2000a). A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA\_II. *Technical Report 200001*. Indian Institute of Technology, Kanpur: Kanpur Genetic Algorithms laboratory(KanGAL).
- Ehrgott, M. (1997). *Multiple criteria optimization: classification and methodology*. Shaker.
- Fattahi, P. (2009). *A Hybrid Multi Objective Algorithm for Flexible Job Shop Scheduling*. Proceedings of World Academy of Science.
- Fonseca, C. M. Fleming, P. J. (1996). *On the Performance Assessment and Comparison of Stochastic Multiobjective Optimizers*. Proceeding PPSN IV Proceedings of the 4th International Conference on Parallel Problem Solving from Nature.



- García-León, A., Dauzère-Pérès, S., & Mati, Y. (2015). Minimizing regular criteria in the Flexible Job-shop scheduling problem. *Multidisciplinary International scheduling Conference: Theory & Applications*, (pp. 443-456). Prague.
- Genova, K., & Guliashki, V. (2015). A survey of solving approaches for multiple objective flexible job shop scheduling problems. *Cybernetics and Information Technologies*, 15(2), 3-22.
- Hansen, M. P. Jaszkiwicz, A. (1998). Evaluating the quality of approximations to the non-dominated set. *IMM Technical Report IMM-REP-1998-7*.
- Hurink, J.; Jurisch, B.; Thole, M. (1995). Tabu search for the job-shop scheduling problem with multi-purpose machines. *OR Spectrum*, 15(4), 205-215.
- Kacem, I. Hammadi, S. and Borne, P. (2002). *Pareto-optimality approach for flexible job-shop scheduling problems: hybridization of evolutionary algorithms and fuzzy logic* (Vol. 60). (M. a. Simulation, Ed.)
- Knopp, S. Y. (2017). A batch-oblivious approach for Complex Job-Shop scheduling problems. *European Journal of Operational Research*, 263, 50-61.
- Knowles, J. D. Corne, D. W. (2000). Approximating the Nondominated Front Using the Pareto Archived Evolution Strategy. *Journal Evolutionary Computation Volume 8 Issue 2*, 149-172.
- Liu, H. Abraham, A. Choi, O. and Moon, S. H. (2006). *Variable Neighborhood Particle Swarm Optimization for Multi-objective Flexible Job-Shop Scheduling Problems* (Vol. 4247). Springer.
- Mati, Y., Dauzère-Pérès, S., & Lahlou, C. (2011a). A general approach for optimizing regular criteria in the job-shop scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 212(1), 33-42.
- Mati, Y.; Xie, X. (2004). The complexity of two-job shop problems with multi-purpose unrelated machines. *European Journal of Operational Research*, 152(1), 159-169.
- qing Li, J. ke Pan, Q. and Liang, Y.-C. (2010). *An effective hybrid tabu search algorithm for multi-objective flexible job-shop scheduling problems* (4 ed., Vol. 54).
- Roy, B. Sussmann, B. (1964). Les problemes d'ordonnancement avec contraintes disjonctives. Note ds,9.
- Schott, J. R. (1995). *Fault tolerant design using single and multicriteria genetic algorithm optimization*. Boston, Massachusetts Institute of Technology.

Dept. of Aeronautics and Astronautics: Massachusetts Institute of Technology.

- Singer, M. P. (1998). A computational study of branch and bound techniques for minimizing the total weighted tardiness in job-shops. (IIE, Ed.) *IIE Transactions*, 30(2), 109-118.
- T`kindt, V., & Billaut, J. (2006). *Multicriteria scheduling : theory, models and algorithms*. Springer.
- Tkindt, V.; Billaut, J. C.; (2006). *Multicriteria scheduling: theory, models and algorithms*. Springer.
- Veldhuizen, D. A. (1999, junio). Multiobjective Evolutionary Algorithms: Classifications. Ph. D. thesis, Graduate School of Engineering of the Air Force Institute of Technology, Air University.
- Vilcot, G. (2007). Algorithmes approchés pour des problèmes d'ordonnancement multicritères de type job shop flexible et job shop multiressource. Autre [cs.OH]. Université François Rabelais - Tours, 2007. Français.
- Vilcot, G. and Billaut, J.-C. (2008). A tabu search and a genetic algorithm for solving a bicriteria general job shop scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 398-411.
- Vilcot, G. and Billaut, J.-C. (2011). A tabu search algorithm for solving a multicriteria flexible job shop scheduling problem. *International Journal of Production Research*(49(23)), 6963–6980.
- Zitzler, E. (1999). Evolutionary Algorithms for Multiobjective Optimization: Methods and Applications. Switzerland: Ph. D. thesis, Swiss Federal Institute of Technology (ETH) Zurich.
- Zitzler, E. a. (1998b). multi objective optimization using evolutionary algorithms. *A comparative case study. In parallel problem solving from Nature V (PPSN-V)*, 292-301.