

**Programa de trabajo a desarrollar durante la Estancia Académica en la empresa
Spirings Window Fashions de Victoria.
(Del 21/10/2019 al 30/04/2020)**

Nombre del Proyecto de investigación:
“Programación de tareas en una línea de producción utilizando búsqueda Tabú”

1. Objetivo general

Desarrollo de un algoritmo de búsqueda tabú enfocado a reducir la Tardanza Total, el cual pueda ser usado para hacer más eficiente la programación de tareas en línea de producción.

2. Objetivos específicos

Para poder desarrollar el objetivo general, es necesario cumplir con los siguientes objetivos específicos:

- Observación del flujo de trabajos en la línea de producción
- Planeación de tareas utilizada para los trabajos diarios en planta
- Identificación de los atrasos
- Obtención de datos y tratamiento para utilizarse con el algoritmo de Búsqueda Tabú

3. Actividades en la empresa SWF de Victoria

Durante la estancia y dentro de las reglas de operación se establecieron las siguientes actividades:

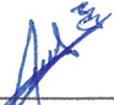
- Observación e identificación de procesos
- Identificación de las características de los pedidos
- Observación y caracterización del proceso de planeación
- Recopilación de datos reales para su posterior procesamiento
- La fase de diseño y pruebas del algoritmo se desarrollaran fuera de planta por políticas de la empresa, dado que se prohíbe el uso e ingreso de equipo de cómputo.

4. Resultados esperados

- Identificación de la tardanza
- Obtención de datos útiles para las pruebas del algoritmo y del modelo
- Creación de un modelo de planeación de tareas
- Mostrar la reducción de los valores de tardanza y las ventajas del modelo

5. Cronograma de actividades

| Actividades | 2019 | | | 2020 | | | |
|--|--------|-----------|-----------|-------|---------|-------|-------|
| | Ocubre | Noviembre | Diciembre | Enero | Febrero | Marzo | Abril |
| Observación e identificación de procesos | | | | | | | |
| Identificación de las características de los pedidos | | | | | | | |
| Observación y caracterización del proceso de planeación | | | | | | | |
| Recopilación de datos reales para su posterior procesamiento | | | | | | | |


Martín Josué Castillo Montes
Estudiante de Maestría en Sistemas
Instituto Tecnológico de Cd. Victoria


Dra. Adriana Mexicano Santoyo
Directora de tesis
Instituto Tecnológico de Cd. Victoria


M.II. Mario Alejandro González Lara
Tutor de tesis en la empresa
Springs Window Fashions

DEPARTAMENTO RECURSOS HUMANOS
Springs Window Fashions de Victoria
S. de R.L. de C.V.
R.F.C. 097090623116
 Ave. Transformación #101 Parque Industrial
 Huevo Santander C.M. 36100 Cd. Victoria, Tamaulipas Méx.
 Tel: 834-15-383-00 y 383-1199 Fax: 834-15-383-94

Cd. Victoria, Tamaulipas, 6 de julio de 2020

INFORME FINAL DE RESULTADOS DEL PROYECTO:

**Programación de tareas en una línea de producción Utilizando
búsqueda Tabú**

Estancia en la empresa:

SPRINGS WINDOW FASHIONS DE VICTORIA

Elaboró:

Martín Josué Castillo Montes

Bajo la dirección de:

Dra. Adriana Mexicano Santoyo

Ciudad Victoria, Tamaulipas

Julio 2020

INTEGRANTES DEL PROYECTO:



Dra. Adriana Mexicano Santoyo

Director de tesis

Instituto Tecnológico de Cd. Victoria



Ing. Martín Josué Castillo Montes

Estudiante de la Maestría en Sistemas

Instituto Tecnológico de Cd. Victoria

Recibe y acepta



M.I.I Mario Alejandro González Lara
Gerente del Departamento de Mantenimiento
Springs Window Fashions de Victoria

CONTENIDO

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 4 |
| 2. ACTIVIDADES REALIZADAS DURANTE LA ESTANCIA..... | 5 |
| 2.1 Definición del problema..... | 5 |
| 2.2 El impacto del problema de la generación de la Tardanza..... | 6 |
| 2.3 Generación de una solución..... | 6 |
| 2.3 Simulación de una jornada de trabajo..... | 8 |
| 3. CONCLUSIONES..... | 19 |
| 4. RESULTADOS OBTENIDOS..... | 20 |

Índice de tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1 Cronograma..... | 4 |
| Tabla 2 Secuencia de ejemplo | 7 |
| Tabla 3 Tarea Agregada al final de la secuencia..... | 7 |
| Tabla 4 Intercambio de posición de las ultimas 2 tareas | 7 |
| Tabla 5 Corrida 1 de 100 trabajos..... | 8 |
| Tabla 6 Segunda corrida de 100 tareas + 5 tareas para solventar de la secuencia anterior..... | 9 |
| Tabla 7 Tercera corrida de 100 tareas + 7 tareas | 10 |
| Tabla 8 Cuarta corrida de 100 tareas + 7 tareas..... | 11 |
| Tabla 9 Quinta corrida de 100 tareas + 9 tareas | 11 |
| Tabla 10 Sexta corrida de 100 tareas + 8 tareas agregadas..... | 12 |
| Tabla 11 Séptima corrida de 100 tareas +8 agregados..... | 13 |
| Tabla 12 Octava corrida de 100 tareas + 8 tareas agregados | 14 |
| Tabla 13 Novena corrida de 100 tareas + 10 tareas agregados | 15 |
| Tabla 14 Décima corrida de 100 tareas + 9 tareas agregados..... | 16 |
| Tabla 15 Resultados de la simulación de 1000 tareas y 10 corridas..... | 17 |
| Tabla 16 Resumen de Resultados | 18 |
| Tabla 17 Tardanza obtenida por los diferentes algoritmos en la instancia real..... | 19 |

1. INTRODUCCIÓN

Durante la estancia en la empresa *Springs Window Fashions*, fue posible determinar y detectar la tardanza, la empresa usa un modelo de programación de tipo *FIFO*, el cual después de evaluarlo se detectó que la tardanza no se estima debido a que el modelo utilizado estima la capacidad diaria y de acuerdo a dicha capacidad, se estima la programación por corridas de acuerdo a una clasificación por colores, dicho lo anterior, cuando durante la producción se produce un error en alguno de los productos, se genera un atraso en dos puntos: en la línea de empaque y en el pedido dado que el producto defectuoso se regresa a alguno de las 3 fases de ensamble de las persianas, además de no resultar visible el atraso, esto debido a que es imperativo terminar la programación durante el día y que el producto a corregir se atiende una vez terminado el *FIFO*, por lo que el objetivo se cumple, pero no resulta eficiente además, que en programación de tareas mediante reglas de despacho, es conocido que el *makespan* no se modifica en ninguna regla, aunque exista tardanza, lo que puede reflejar falsos óptimos reportados.

La calendarización de las actividades realizadas es la siguiente:

Tabla 1 Cronograma

| Actividades | 2019 | | | 2020 | | | |
|--|---------|-----------|-----------|-------|---------|-------|-------|
| | Octubre | Noviembre | Diciembre | Enero | Febrero | Marzo | Abril |
| Observación e identificación de procesos | | | | | | | |
| Identificación de las características de los pedidos | | | | | | | |
| Observación y caracterización del proceso de planeación | | | | | | | |
| Recopilación de datos reales para su posterior procesamiento | | | | | | | |
| Tratamiento de Datos | | | | | | | |
| Experimentación | | | | | | | |

| | | | | | | | | |
|----------|--|--|--|--|--|--|--|--|
| Modelado | | | | | | | | |
|----------|--|--|--|--|--|--|--|--|

2. ACTIVIDADES REALIZADAS DURANTE LA ESTANCIA

Durante la estancia y dentro de las reglas de operación se establecieron las siguientes actividades de manera interna (dentro de las instalaciones):

- Observación e identificación de procesos
- Identificación de las características de los pedidos
- Observación y caracterización del proceso de planeación
- Recopilación de datos reales para su posterior procesamiento

De manera externa (fuera de las instalaciones) por políticas internas de la empresa, se realizó lo siguiente:

- Tratamiento de los datos para la realización de experimentos
- Experimentación con los datos obtenidos con el algoritmo
- Modelado de la programación de tareas

2.1 Definición del problema

Para poder identificar la tardanza fue necesario identificar el proceso de fabricación, el área de fabricación de persianas de una pulgada es el área con mayor volumen de producción, la cual tenía diferentes problemas, aquí el problema principal se observaba en la cantidad de *scrap* o desperdicio generado, esto debido generalmente al *setup* necesario al cambiar de bobina cuando se requería un color diferente, la solución se encontró en agrupar los colores y ejecutarse en lotes del mismo color. Si bien soluciona directamente el problema de *scrap* y el problema de tiempos de *setup* de manera indirecta, también es una restricción importante a considerar.

Por otra parte en el área de empaque y envío se presentaba el problema de atraso, esto dado por la fragmentación generada a partir de la etapa de ensamble *Fast Line*, que es dónde se detectan los problemas o fallas en los pedidos y se devuelven a SANI (línea de corte de hojas) o a RAM (corte de rieles), por lo que entrar nuevamente en la secuencia es generalmente al finalizar las tareas, dado que la prioridad actual es no romper el FIFO, esto mismo implica el atraso del pedido completo, por lo que la reorganización de la secuencia resulta aplicable para hacer más eficiente la salida de los trabajos y evitar el atraso.

2.2 El impacto del problema de la generación de la Tardanza

El hecho de que se produzcan atrasos, sin un adecuado tratamiento de la secuencia de trabajo, impide que se efectúe de manera eficiente, esto se debe principalmente a que la estrategia usada es efectiva, dado que se atiende generalmente el 100% de los trabajos planeados, el problema es que el orden no resulta efectivo y a su vez impide visualizar el atraso como tal, dado que si para un día se atienden 2000 piezas, aunque no represente el 100% de la capacidad diaria, pareciera que el desempeño es óptimo, pero no resulta así visto desde una perspectiva y medición diferente. La tardanza total es un parámetro de eficiencia del funcionamiento, por ello es necesario asumir su existencia y su magnitud para poder tratar el problema y atacarlo con una buena estrategia.

2.3 Generación de una solución

Dentro de la literatura científica especializada se conocen 2 tipos de modelo de tardanza, la Tardanza Total y la Tardanza Total Ponderada, al diseñar una solución para esta última, es posible resolver la primera con modificaciones muy ligeras, además que la Tardanza Total Ponderada resulta más adecuada para la problemática existente en la empresa, dónde al asumir tiempos fijos (promedio) de producción dado la variabilidad existente de las características de un pedido, se asignan diferentes pesos de acuerdo a la fecha de entrega establecida, asumiendo mayores valores entre más cercano sea el *Due Date*, por otra parte dado que la empresa usa un modelo de capacidad diaria para las planeaciones del día y sus corridas, es posible asumir el *makespan* como *Due Date*, aunque en primera instancia pudiera parecer que refleja valores sin atraso, es posible observar de esta manera la tardanza y una manera de lidiar con ella mediante el uso de la optimización combinatoria.

Un ejemplo claro sería de un conjunto de 125 tareas de las cuales se muestran las últimas 5 en orden *FIFO* de ejecución, por lo que el atraso resulta en 0 sin importar el orden dado que no sobrepasa el tiempo de entrega, como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2 Secuencia de ejemplo

| Índice | Pt | Wj | Dd | Trabajo | T |
|--------|----|----|------|---------|---|
| 121 | 14 | 1 | 2000 | 2353052 | 0 |
| 122 | 14 | 1 | 2000 | 2353093 | 0 |
| 123 | 14 | 1 | 2000 | 2353254 | 0 |
| 124 | 28 | 1 | 2000 | 2353803 | 0 |
| 125 | 42 | 3 | 2000 | 2353597 | 0 |

Si a la secuencia anterior se le agrega una tarea más, producto de un atraso en una secuencia anterior, es posible medir el atraso generado al atenderse al final de la secuencia, como se visualiza en la Tabla 3.

Tabla 3 Tarea Agregada al final de la secuencia

| Índice | Pt | Wj | Dd | Trabajo | T |
|--------|-----|----|------|---------|-----|
| 121 | 14 | 1 | 2000 | 2353052 | 0 |
| 122 | 14 | 1 | 2000 | 2353093 | 0 |
| 123 | 14 | 1 | 2000 | 2353254 | 0 |
| 124 | 28 | 1 | 2000 | 2353803 | 0 |
| 125 | 42 | 3 | 2000 | 2353597 | 0 |
| 126 | 168 | 1 | 2000 | 2342417 | 168 |

El atraso total es posible minimizarlo, ya que dejar las tareas atrasadas al final, implica romper el *FIFO* y generar mayores problemas al retrasar un pedido completo, lo que ocasionaría congestión en el área de empaque y envío. Para disminuir la tardanza, se intercambié el último par de tareas en sus posiciones y se observa que el valor de tardanza disminuye, como se visualiza en la Tabla 4.

Tabla 4 Intercambio de posición de las últimas 2 tareas

| Índice | Pt | Wj | Dd | Trabajo | T |
|--------|-----|----|------|---------|-----|
| 121 | 14 | 1 | 2000 | 2353052 | 0 |
| 122 | 14 | 1 | 2000 | 2353093 | 0 |
| 123 | 14 | 1 | 2000 | 2353254 | 0 |
| 124 | 28 | 1 | 2000 | 2353803 | 0 |
| 125 | 168 | 1 | 2000 | 2342417 | 0 |
| 126 | 42 | 3 | 2000 | 2353597 | 126 |

Es observable la reducción del valor de tardanza intercambiando la posición de los pedidos, además de respetar el principio de justicia que se busca en el enfoque *FIFO*, por lo que el uso de la combinatoria puede ser efectivo para buscar una secuencia que reduzca la tardanza reduciendo así el impacto del atraso.

2.3 Simulación de una jornada de trabajo

Para demostrar lo anterior se generó un algoritmo de Búsqueda Tabú y un experimento con una serie de corridas de tamaño fijo y cantidad variable de elementos con atraso extraídos de manera aleatoria, en cual consta de 10 corridas simulando una carga de trabajo diaria, cada corrida consta de 100 trabajos, a partir de la segunda corrida se agregan cantidades variables de trabajos de la corrida anterior, los cuales se extrajeron de manera aleatoria de la corrida anterior, dichas tareas simulan tareas pendientes o con defecto que se devuelven para subsanar errores y se enlistan en la corrida posterior. Para obtener una secuencia se utilizó el algoritmo Tabú M con la finalidad de medir su eficiencia respecto al ordenamiento *FIFO*.

Cabe señalar que se estableció un número fijo del conjunto de tareas de cada corrida con fines ilustrativos, esto para que sea más simple apreciar el proceso y resultado de la aplicación del algoritmo. De la misma manera que el ejemplo anterior, se muestran los últimos 10 elementos de la secuencia original de 100 trabajos más los que se agregan a la secuencia y el valor de tardanza obtenido en cada secuencia resultante, además se han agregado 2 columnas al final, dónde se muestra la secuencia obtenida por la secuencia *FIFO* (columna Trabajo *FIFO*) y el valor de tardanza obtenido (columna *T(FIFO)*).

Tabla 5 Corrida 1 de 100 trabajos

| Índice | Pt | Wj | Dd | Trabajo | T (Tabu M) | Trabajo (FIFO) | T(FIFO) |
|--------|----|----|-------|---------|------------|----------------|---------|
| 91 | 28 | 5 | 11606 | 2313943 | 0 | 2313943 | 0 |
| 92 | 14 | 5 | 11606 | 2313956 | 0 | 2313956 | 0 |
| 93 | 14 | 6 | 11606 | 2313988 | 0 | 2313988 | 0 |

| | | | | | | | |
|-----|------|---|-------|---------|---|---------|---|
| 94 | 14 | 6 | 11606 | 2314129 | 0 | 2314129 | 0 |
| 95 | 14 | 6 | 11606 | 2314210 | 0 | 2314210 | 0 |
| 96 | 1218 | 6 | 11606 | 2314266 | 0 | 2314266 | 0 |
| 97 | 28 | 6 | 11606 | 2314549 | 0 | 2314549 | 0 |
| 98 | 28 | 6 | 11606 | 2314552 | 0 | 2314552 | 0 |
| 99 | 14 | 6 | 11606 | 2314772 | 0 | 2314772 | 0 |
| 100 | 28 | 6 | 11606 | 2315327 | 0 | 2315327 | 0 |

En la Tabla 22 se muestra la primera corrida, de esa secuencia se extrajeron 5 tareas de manera aleatoria y se agregaron a la segunda corrida, en la Tabla 23 se muestra la secuencia obtenida por el algoritmo Tabu M y la tardanza obtenida para la segunda corrida.

Tabla 6 Segunda corrida de 100 tareas + 5 tareas para solventar de la secuencia anterior

| Índice | Pt | Wj | Dd | Trabajo | T (Tabu M) | Trabajo (FIFO) | T(FIFO) |
|--------|-----|----|------|---------|------------|----------------|---------|
| 91 | 28 | 6 | 4074 | 2322299 | 0 | 2324508 | 0 |
| 92 | 28 | 6 | 4074 | 2317514 | 0 | 2324545 | 0 |
| 93 | 560 | 4 | 4074 | 2320377 | 0 | 2324577 | 0 |
| 94 | 28 | 5 | 4074 | 2325389 | 0 | 2324586 | 0 |
| 95 | 28 | 6 | 4074 | 2317477 | 0 | 2324775 | 0 |
| 96 | 28 | 6 | 4074 | 2321142 | 0 | 2324929 | 84 |
| 97 | 28 | 4 | 4074 | 2279007 | 0 | 2324984 | 140 |
| 98 | 28 | 6 | 4074 | 2308024 | 0 | 2325013 | 210 |
| 99 | 28 | 5 | 4074 | 2317149 | 0 | 2325029 | 504 |
| 100 | 14 | 5 | 4074 | 2316049 | 0 | 2325088 | 490 |
| 101 | 42 | 5 | 4074 | 2318162 | 0 | 2325132 | 560 |
| 102 | 42 | 5 | 4074 | 2320379 | 0 | 2325252 | 756 |
| 103 | 56 | 5 | 4074 | 2317145 | 0 | 2325327 | 840 |
| 104 | 56 | 5 | 4074 | 2324250 | 0 | 2325329 | 1008 |

| | | | | | | | |
|-----|-----|---|------|---------|-----|---------|-----|
| 105 | 504 | 4 | 4074 | 2320000 | 784 | 2325389 | 980 |
|-----|-----|---|------|---------|-----|---------|-----|

En la segunda corrida, el atraso obtenido al calcular la tardanza con el ordenamiento *FIFO* (usado por la empresa) es de **5,572**. El valor resultante de la secuencia obtenida por Tabú M es de **784**. Es observable la reducción de la tardanza mediante el uso del algoritmo Tabú M. De esta segunda corrida se extrajeron 7 tareas de manera aleatoria para insertarse en la secuencia de la Tabla 7 de 100 tareas que corresponde a la tercera corrida.

Tabla 7 Tercera corrida de 100 tareas + 7 tareas

| Índice | Pt | Wj | Dd | Trabajo | T (Tabu M) | Trabajo (FIFO) | T(FIFO) |
|--------|------|----|------|---------|------------|----------------|---------|
| 91 | 756 | 3 | 5250 | 2330604 | 0 | 2330604 | 0 |
| 92 | 14 | 5 | 5250 | 2330658 | 0 | 2330658 | 0 |
| 93 | 14 | 5 | 5250 | 2330762 | 0 | 2330762 | 0 |
| 94 | 28 | 5 | 5250 | 2330821 | 0 | 2330821 | 0 |
| 95 | 14 | 5 | 5250 | 2330938 | 0 | 2330938 | 0 |
| 96 | 14 | 5 | 5250 | 2330973 | 0 | 2330973 | 0 |
| 97 | 14 | 6 | 5250 | 2330976 | 0 | 2330976 | 0 |
| 98 | 14 | 5 | 5250 | 2331020 | 0 | 2331020 | 0 |
| 99 | 14 | 5 | 5250 | 2331040 | 0 | 2331040 | 0 |
| 100 | 14 | 5 | 5250 | 2331064 | 0 | 2331064 | 0 |
| 101 | 14 | 5 | 5250 | 2331113 | 0 | 2331113 | 0 |
| 102 | 14 | 5 | 5250 | 2331191 | 0 | 2331191 | 0 |
| 103 | 28 | 5 | 5250 | 2331303 | 0 | 2331303 | 0 |
| 104 | 14 | 5 | 5250 | 2331377 | 0 | 2331377 | 0 |
| 105 | 686 | 3 | 5250 | 2331400 | 0 | 2331400 | 378 |
| 106 | 98 | 5 | 5250 | 2327420 | 0 | 2331439 | 700 |
| 107 | 1596 | 2 | 5250 | 2326802 | 308 | 2331504 | 770 |

En el caso de la Tabla 29 el atraso del ordenamiento *FIFO* es de **1,848**, el cual se redujo a **308** aplicando el algoritmo Tabú M. De la tercera corrida se extrajeron 7 tareas de manera aleatoria, las cuales se agregaron a la cuarta corrida correspondiente a la Tabla 8.

Tabla 8 Cuarta corrida de 100 tareas + 7 tareas

| Índice | Pt | Wj | Dd | Trabajo | T (Tabu M) | Trabajo (FIFO) | T(FIFO) |
|--------|------|----|------|---------|------------|----------------|---------|
| 91 | 42 | 5 | 2716 | 2331608 | 0 | 2335063 | 6650 |
| 92 | 42 | 5 | 2716 | 2334907 | 0 | 2335069 | 6930 |
| 93 | 42 | 5 | 2716 | 2333743 | 0 | 2335116 | 7000 |
| 94 | 42 | 5 | 2716 | 2331881 | 0 | 2335141 | 7070 |
| 95 | 56 | 5 | 2716 | 2334382 | 0 | 2335188 | 7140 |
| 96 | 56 | 5 | 2716 | 2333792 | 0 | 2335206 | 7210 |
| 97 | 56 | 5 | 2716 | 2335473 | 0 | 2335216 | 7280 |
| 98 | 56 | 5 | 2716 | 2333181 | 0 | 2335226 | 7350 |
| 99 | 56 | 5 | 2716 | 2335069 | 0 | 2335242 | 7490 |
| 100 | 70 | 5 | 2716 | 2333503 | 0 | 2335265 | 7560 |
| 101 | 70 | 3 | 2716 | 2332520 | 0 | 2335273 | 7630 |
| 102 | 70 | 5 | 2716 | 2331920 | 0 | 2335375 | 7770 |
| 103 | 84 | 5 | 2716 | 2329716 | 0 | 2335405 | 6552 |
| 104 | 84 | 4 | 2716 | 2335405 | 0 | 2335435 | 8400 |
| 105 | 112 | 5 | 2716 | 2334474 | 0 | 2335450 | 8470 |
| 106 | 252 | 5 | 2716 | 2334237 | 840 | 2335457 | 8540 |
| 107 | 1596 | 2 | 2716 | 2326802 | 4368 | 2335473 | 8820 |

En la Tabla 25 el valor de tardanza aplicando *FIFO* es de **279,860**, el cual después de aplicar el algoritmo Tabú M, se redujo a **4,638**. En la quinta corrida se agregaron 9 tareas de manera aleatoria extraídos de la corrida 4.

Tabla 9 Quinta corrida de 100 tareas + 9 tareas

| Índice | Pt | Wj | Dd | Trabajo | T (Tabu M) | Trabajo | T(FIFO) |
|--------|----|----|----|---------|------------|---------|---------|
|--------|----|----|----|---------|------------|---------|---------|

| | | | | | M) | (FIFO) | |
|-----|-----|---|------|---------|-----|---------|------|
| 91 | 28 | 5 | 3808 | 2331870 | 0 | 2337977 | 0 |
| 92 | 28 | 5 | 3808 | 2335867 | 0 | 2337982 | 0 |
| 93 | 28 | 5 | 3808 | 2335889 | 0 | 2338024 | 0 |
| 94 | 28 | 5 | 3808 | 2336070 | 0 | 2338153 | 0 |
| 95 | 28 | 5 | 3808 | 2336285 | 0 | 2338394 | 0 |
| 96 | 28 | 5 | 3808 | 2335960 | 0 | 2338412 | 0 |
| 97 | 56 | 5 | 3808 | 2336066 | 0 | 2338452 | 56 |
| 98 | 28 | 5 | 3808 | 2335715 | 0 | 2338486 | 210 |
| 99 | 28 | 5 | 3808 | 2335714 | 0 | 2338527 | 280 |
| 100 | 28 | 5 | 3808 | 2335712 | 0 | 2338530 | 280 |
| 101 | 28 | 4 | 3808 | 2336240 | 0 | 2338546 | 420 |
| 102 | 28 | 5 | 3808 | 2336149 | 0 | 2338555 | 560 |
| 103 | 28 | 5 | 3808 | 2334952 | 0 | 2338576 | 630 |
| 104 | 42 | 5 | 3808 | 2332623 | 0 | 2338597 | 560 |
| 105 | 42 | 5 | 3808 | 2336870 | 0 | 2338615 | 770 |
| 106 | 28 | 4 | 3808 | 2337966 | 0 | 2338619 | 840 |
| 107 | 56 | 5 | 3808 | 2338394 | 0 | 2338632 | 910 |
| 108 | 168 | 5 | 3808 | 2335638 | 0 | 2338669 | 1050 |
| 109 | 504 | 3 | 3808 | 2337836 | 672 | 2338674 | 1120 |

En la quinta corrida el valor de tardanza aplicando *FIFO* es de **7,686**, después de aplicar el algoritmo Tabú M, el valor se redujo a **672**. De esta corrida se extrajeron 9 tareas los cuales se agregaron a la sexta corrida que corresponde a la Tabla 10.

Tabla 10 Sexta corrida de 100 tareas + 8 tareas agregadas

| Índice | Pt | Wj | Dd | Trabajo | T (Tabu M) | Trabajo (FIFO) | T(FIFO) |
|--------|----|----|------|---------|------------|----------------|---------|
| 91 | 14 | 5 | 4494 | 2341575 | 0 | 2341575 | 0 |
| 92 | 28 | 5 | 4494 | 2341588 | 0 | 2341588 | 0 |

| | | | | | | | |
|-----|-----|---|------|---------|-----|---------|-----|
| 93 | 14 | 5 | 4494 | 2341613 | 0 | 2341613 | 0 |
| 94 | 14 | 5 | 4494 | 2341620 | 0 | 2341620 | 0 |
| 95 | 14 | 5 | 4494 | 2341640 | 0 | 2341640 | 0 |
| 96 | 84 | 5 | 4494 | 2341644 | 0 | 2341644 | 0 |
| 97 | 56 | 5 | 4494 | 2341649 | 0 | 2341649 | 0 |
| 98 | 14 | 5 | 4494 | 2341651 | 0 | 2341651 | 0 |
| 99 | 14 | 5 | 4494 | 2341655 | 0 | 2341655 | 0 |
| 100 | 14 | 5 | 4494 | 2341670 | 0 | 2341670 | 0 |
| 101 | 28 | 5 | 4494 | 2341688 | 0 | 2341688 | 0 |
| 102 | 42 | 5 | 4494 | 2341718 | 0 | 2341718 | 0 |
| 103 | 56 | 5 | 4494 | 2341746 | 0 | 2341746 | 0 |
| 104 | 42 | 5 | 4494 | 2341751 | 0 | 2341751 | 140 |
| 105 | 28 | 5 | 4494 | 2341756 | 0 | 2341756 | 280 |
| 106 | 56 | 5 | 4494 | 2341760 | 0 | 2341760 | 560 |
| 107 | 28 | 5 | 4494 | 2335710 | 0 | 2341762 | 630 |
| 108 | 28 | 5 | 4494 | 2336444 | 0 | 2341779 | 700 |
| 109 | 182 | 4 | 4494 | 2338817 | 672 | 2341785 | 840 |

En la sexta corrida el valor de tardanza *FIFO* es de 3,150, después de aplicar el algoritmo Tabú M, el valor se redujo a 672. De esta corrida se extrajeron 8 tareas que se agregaron a la séptima corrida que corresponde a la Tabla 11.

Tabla 11 Séptima corrida de 100 tareas +8 agregados

| Índice | Pt | Wj | Dd | Trabajo | T (Tabu M) | Trabajo (FIFO) | T(FIFO) |
|--------|----|----|------|---------|------------|----------------|---------|
| 91 | 42 | 5 | 2898 | 2344107 | 0 | 2344107 | 0 |
| 92 | 14 | 5 | 2898 | 2344204 | 0 | 2344204 | 0 |
| 93 | 28 | 5 | 2898 | 2344213 | 0 | 2344213 | 0 |

| | | | | | | | |
|-----|-----|---|------|---------|-----|---------|------|
| 94 | 98 | 5 | 2898 | 2343046 | 0 | 2344223 | 0 |
| 95 | 14 | 5 | 2898 | 2344260 | 0 | 2344260 | 0 |
| 96 | 28 | 5 | 2898 | 2344270 | 0 | 2344270 | 0 |
| 97 | 14 | 5 | 2898 | 2344289 | 0 | 2344289 | 0 |
| 98 | 14 | 3 | 2898 | 2344307 | 0 | 2344307 | 0 |
| 99 | 84 | 5 | 2898 | 2344352 | 0 | 2344352 | 0 |
| 100 | 84 | 4 | 2898 | 2344367 | 0 | 2344367 | 224 |
| 101 | 28 | 5 | 2898 | 2338904 | 0 | 2344370 | 350 |
| 102 | 14 | 4 | 2898 | 2344377 | 0 | 2344377 | 336 |
| 103 | 14 | 5 | 2898 | 2344384 | 0 | 2344384 | 490 |
| 104 | 14 | 5 | 2898 | 2344389 | 0 | 2344389 | 560 |
| 105 | 42 | 5 | 2898 | 2344425 | 0 | 2344425 | 770 |
| 106 | 84 | 5 | 2898 | 2342332 | 0 | 2344434 | 840 |
| 107 | 84 | 4 | 2898 | 2343001 | 168 | 2344458 | 910 |
| 108 | 168 | 3 | 2898 | 2342889 | 798 | 2344466 | 1050 |

En la séptima corrida el valor de tardanza *FIFO* es de **5,530**, después de aplicar el algoritmo Tabú M, el valor se redujo a **798**. De esta corrida se extrajeron 8 tareas que se agregaron a la octava corrida que corresponde a la Tabla 12.

Tabla 12 Octava corrida de 100 tareas + 8 tareas agregados

| Índice | Pt | Wj | Dd | Trabajo | T (Tabu M) | Trabajo (FIFO) | T(FIFO) |
|--------|----|----|------|---------|------------|----------------|---------|
| 91 | 14 | 3 | 2296 | 2346294 | 0 | 2346563 | 0 |
| 92 | 14 | 5 | 2296 | 2346492 | 0 | 2346610 | 0 |
| 93 | 14 | 4 | 2296 | 2346500 | 0 | 2346647 | 0 |
| 94 | 14 | 5 | 2296 | 2346610 | 0 | 2346651 | 0 |
| 95 | 14 | 5 | 2296 | 2346647 | 0 | 2346744 | 0 |
| 96 | 56 | 5 | 2296 | 2345182 | 0 | 2346821 | 56 |
| 97 | 14 | 5 | 2296 | 2346303 | 0 | 2346836 | 112 |

| | | | | | | | |
|-----|----|---|------|---------|------|---------|------|
| 98 | 14 | 4 | 2296 | 2346885 | 0 | 2346848 | 280 |
| 99 | 14 | 4 | 2296 | 2346821 | 0 | 2346859 | 280 |
| 100 | 14 | 4 | 2296 | 2346836 | 0 | 2346866 | 490 |
| 101 | 14 | 4 | 2296 | 2346271 | 0 | 2346870 | 560 |
| 102 | 14 | 4 | 2296 | 2346859 | 0 | 2346885 | 504 |
| 103 | 14 | 5 | 2296 | 2346261 | 0 | 2346902 | 700 |
| 104 | 14 | 4 | 2296 | 2344910 | 0 | 2346924 | 770 |
| 105 | 42 | 5 | 2296 | 2346221 | 0 | 2346945 | 840 |
| 106 | 84 | 4 | 2296 | 2344367 | 336 | 2346959 | 980 |
| 107 | 98 | 5 | 2296 | 2344924 | 1246 | 2346960 | 1120 |
| 108 | 84 | 4 | 2296 | 2346302 | 2310 | 2346984 | 1330 |

En la octava corrida el valor de tardanza *FIFO* es de **8,022**, después de aplicar el algoritmo Tabú M, el valor se redujo a **2,310**. De esta corrida se extrajeron 10 tareas que se agregaron a la novena corrida que corresponde a la Tabla 13.

Tabla 13 Novena corrida de 100 tareas + 10 tareas agregados

| Índice | Pt | Wj | Dd | Trabajo | T (Tabu M) | Trabajo (FIFO) | T(FIFO) |
|--------|----|----|------|---------|------------|----------------|---------|
| 91 | 14 | 3 | 2198 | 2350800 | 0 | 2351298 | 0 |
| 92 | 14 | 4 | 2198 | 2351378 | 0 | 2351302 | 0 |
| 93 | 14 | 4 | 2198 | 2351372 | 0 | 2351309 | 0 |
| 94 | 14 | 4 | 2198 | 2350847 | 0 | 2351310 | 0 |
| 95 | 14 | 4 | 2198 | 2351353 | 0 | 2351322 | 0 |
| 96 | 14 | 4 | 2198 | 2351309 | 0 | 2351326 | 0 |
| 97 | 14 | 3 | 2198 | 2351310 | 0 | 2351334 | 0 |
| 98 | 70 | 4 | 2198 | 2351187 | 0 | 2351352 | 0 |
| 99 | 14 | 5 | 2198 | 2351352 | 0 | 2351353 | 0 |
| 100 | 14 | 3 | 2198 | 2350874 | 0 | 2351370 | 224 |

| | | | | | | | |
|-----|----|---|------|---------|------|---------|-----|
| 101 | 14 | 3 | 2198 | 2351334 | 0 | 2351372 | 280 |
| 102 | 14 | 3 | 2198 | 2351210 | 0 | 2351378 | 336 |
| 103 | 28 | 4 | 2198 | 2350981 | 0 | 2351393 | 448 |
| 104 | 28 | 4 | 2198 | 2349294 | 0 | 2351398 | 616 |
| 105 | 42 | 4 | 2198 | 2351398 | 0 | 2351400 | 672 |
| 106 | 28 | 3 | 2198 | 2350620 | 0 | 2351411 | 784 |
| 107 | 28 | 3 | 2198 | 2350988 | 84 | 2351422 | 630 |
| 108 | 56 | 3 | 2198 | 2350804 | 336 | 2351427 | 896 |
| 109 | 70 | 4 | 2198 | 2349008 | 952 | 2351436 | 952 |
| 110 | 98 | 4 | 2198 | 2347164 | 1960 | 2351441 | 756 |

En la novena corrida el valor de tardanza *FIFO* es de **6,594**, después de aplicar el algoritmo Tabú M, el valor se redujo a **1,960**. De esta corrida se extrajeron 9 tareas que se agregaron a la novena corrida que corresponde a la Tabla 14.

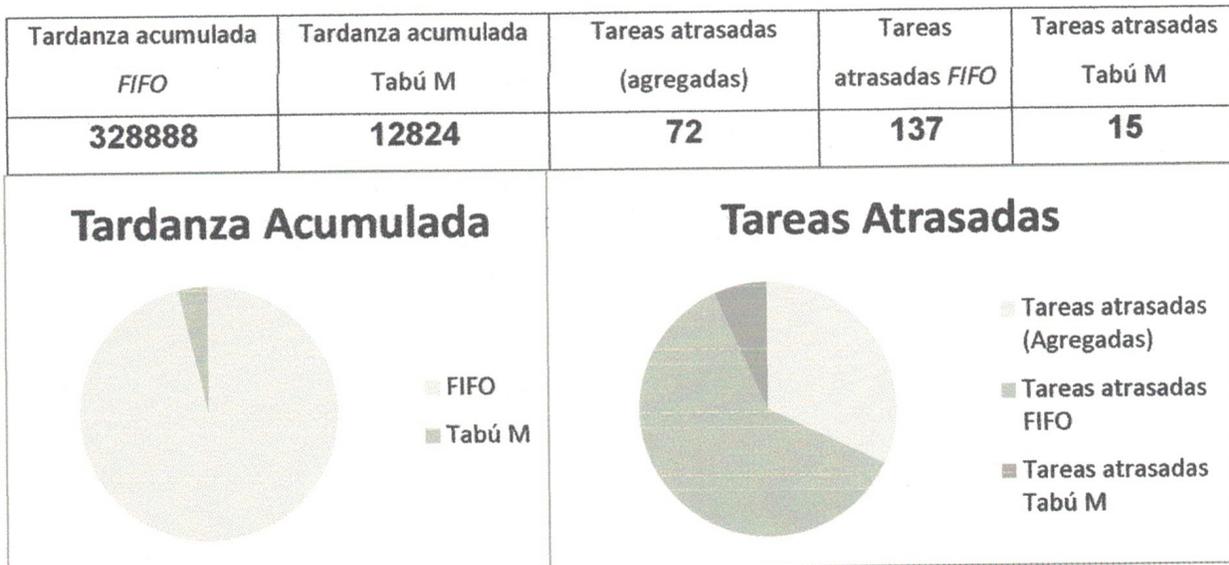
Tabla 14 Décima corrida de 100 tareas + 9 tareas agregados

| Índice | Pt | Wj | Dd | Trabajo | $T(\text{Tabu } M)$ | Trabajo (FIFO) | $T(\text{FIFO})$ |
|--------|----|----|------|---------|---------------------|----------------|------------------|
| 91 | 14 | 4 | 2142 | 2353355 | 0 | 2353355 | 0 |
| 92 | 14 | 4 | 2142 | 2353387 | 0 | 2353387 | 0 |
| 93 | 14 | 3 | 2142 | 2353388 | 0 | 2353388 | 0 |
| 94 | 28 | 4 | 2142 | 2353392 | 0 | 2353392 | 0 |
| 95 | 14 | 4 | 2142 | 2353406 | 0 | 2353406 | 0 |
| 96 | 14 | 4 | 2142 | 2353420 | 0 | 2353420 | 0 |
| 97 | 14 | 4 | 2142 | 2353431 | 0 | 2353431 | 0 |
| 98 | 28 | 4 | 2142 | 2353433 | 0 | 2353433 | 0 |
| 99 | 14 | 4 | 2142 | 2353453 | 0 | 2353453 | 0 |
| 100 | 84 | 4 | 2142 | 2353462 | 0 | 2353462 | 224 |

| | | | | | | | |
|-----|-----|---|------|---------|-----|---------|-----|
| 101 | 14 | 3 | 2142 | 2348997 | 0 | 2353466 | 280 |
| 102 | 14 | 4 | 2142 | 2353477 | 0 | 2353477 | 336 |
| 103 | 14 | 4 | 2142 | 2353479 | 0 | 2353479 | 392 |
| 104 | 70 | 4 | 2142 | 2349008 | 0 | 2353483 | 504 |
| 105 | 14 | 4 | 2142 | 2353492 | 0 | 2353492 | 560 |
| 106 | 14 | 4 | 2142 | 2353520 | 0 | 2353520 | 616 |
| 107 | 28 | 4 | 2142 | 2351411 | 0 | 2353522 | 672 |
| 108 | 70 | 4 | 2142 | 2351498 | 168 | 2353532 | 728 |
| 109 | 154 | 4 | 2142 | 2351504 | 952 | 2353535 | 784 |

En la décima corrida el valor de tardanza *FIFO* es de **5,096**, después de aplicar el algoritmo Tabú M, el valor se redujo a **952**. En este punto terminan las ejecuciones de la simulación obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 15 Resultados de la simulación de 1000 tareas y 10 corridas



Los resultados de la Tabla 15 representan una reducción del valor original a casi un 4% ($12824 \cdot 100 / 328888 = 3.899$) del valor obtenido por *FIFO*, cuando es usado el algoritmo Tabú M. Las tareas agregadas en un principio se agregan al final de la secuencia, después de aplicar *FIFO* nuevamente se modifica su orden, moviéndose al principio de la

secuencia, lo cual modifica el valor de tardanza, la cual se expresa como Tardanza Acumulada dado que es la suma de las tardanzas de los 10 conjuntos de prueba.

En relación a las tareas atrasadas se redujo en más de 3 veces el número de tareas respecto a las tareas agregadas, después de aplicar *FIFO* se modifica el valor a 148 tareas atrasadas por lo que se reduce a casi un 10% el número de tareas atrasadas mediante Tabú M ($15 \cdot 100 / 137 = 10.94$). Cabe destacar que en 4 de 10 corridas el algoritmo Tabú M obtuvo solamente una tarea atrasada y en 8 de los 9 casos que es dónde se insertaron tareas, menos de 5 las tareas mostraron atraso.

En la Tabla 16 se muestran los valores promedio de las corridas y sus valores obtenidos resumiendo así los resultados de cada corrida del experimento ejecutado, el tiempo de ejecución corresponde al del algoritmo Tabú M, el cual muestra el valor de la función objetivo del ordenamiento *FIFO* antes de realizar el cálculo de la solución mediante Búsqueda Tabú.

Tabla 16 Resumen de Resultados

| Corrida | Tareas agregadas | Tareas atrasadas <i>FIFO</i> | Tareas atrasadas Tabú M | Tardanza <i>FIFO</i> | Tardanza Tabú M | Tiempo de ejecución (Seg) |
|-----------------|------------------|------------------------------|-------------------------|----------------------|-----------------|---------------------------|
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2.887 |
| 2 | 5 | 10 | 1 | 5572 | 784 | 3.382 |
| 3 | 7 | 3 | 1 | 1848 | 308 | 3.541 |
| 4 | 7 | 59 | 2 | 279860 | 4368 | 3.49 |
| 5 | 9 | 13 | 1 | 7686 | 672 | 3.74 |
| 6 | 9 | 9 | 1 | 3150 | 672 | 3.702 |
| 7 | 8 | 9 | 2 | 5530 | 798 | 3.592 |
| 8 | 8 | 13 | 3 | 8022 | 2310 | 3.667 |
| 9 | 10 | 11 | 4 | 6594 | 1960 | 3.791 |
| 10 | 9 | 10 | 2 | 5096 | 952 | 3.7 |
| PROMEDIO | 7.2 | 13.7 | 1.7 | 32335.8 | 1282.4 | 3.5492 |

La diferencia obtenida entre las diferentes versiones de Tabú respecto a Tabú M se muestran en la Tabla 17, dónde se observa que se obtienen pocas desviaciones por el algoritmo desarrollado, lo que puede garantizar que en la mayoría de los casos no se producirán mayores desviaciones.

Tabla 17 Tardanza obtenida por los diferentes algoritmos en la instancia real

| Instancia | FIFO | Tabú +EDD | Tabú +SPT | Tabú +FIFO | Tabú M |
|-----------|--------|-----------|-----------|------------|--------|
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 5572 | 784 | 784 | 784 | 784 |
| 3 | 1848 | 1820 | 308 | 308 | 308 |
| 4 | 279860 | 52332 | 4368 | 25802 | 4368 |
| 5 | 7686 | 1456 | 672 | 966 | 672 |
| 6 | 3150 | 3052 | 672 | 672 | 672 |
| 7 | 5530 | 1134 | 798 | 798 | 798 |
| 8 | 8022 | 2254 | 2240 | 2338 | 2310 |
| 9 | 6594 | 2044 | 2002 | 2002 | 1960 |
| 10 | 5096 | 952 | 952 | 952 | 952 |

Puede observarse que en el caso de la instancia 8 no produce el menor de los resultados, el cual es obtenido por Tabú +EDD, con una diferencia de 56 unidades, en cambio en la instancia 9 el algoritmo reporta una mejora respecto a los otros algoritmos de 42 unidades en el caso de Tabú +SPT y Tabú +FIFO.

3. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se muestra cómo es posible identificar la tardanza y cómo es su tratamiento para mejorar la eficiencia de la producción, además de mostrar las limitaciones de la programación *FIFO*, por lo que se puede concluir lo siguiente:

- El uso de Metaheurísticas como herramienta de apoyo en la toma de decisiones para la programación de tareas resulta efectiva, ya que realizar las operaciones de manera manual requiere mucho tiempo.
- Asumir la existencia de la tardanza no es un defecto de producción en sí, sino una medida de la eficiencia de la producción.
- El uso del modelo de Tardanza Total Ponderada, resulta útil en entornos variables dando prioridad a las tareas según los criterios de la empresa, en este caso, se asignan la prioridad de acuerdo a su fecha de entrega más próxima, así mismo puede usarse para clientes importantes, asegurando que se atiendan los pedidos de manera adecuada.
- Es importante señalar, que el encargado de la programación, así como los coordinadores de cada etapa son importantes, dado que ellos están en contacto

directo con la producción, por lo que se puede mejorar el modelo propuesto, cómo un proceso de mejora continua.

4. RESULTADOS OBTENIDOS

- Identificación de la Tardanza mediante la observación de los procesos
- Limitaciones identificadas del uso de *FIFO* en los pedidos
- Recopilación de datos para el diseño de la solución de planeación
- Generación de un algoritmo metaheurístico efectivo de Búsqueda Tabú