



Trabajo de grado en modalidad de aplicación

# Diseño de un aplicativo de programación de producción para una empresa de confecciones

Armando José Delgado Vanegas <sup>1<sup>a</sup>, c</sup>, Jhonathan Eduardo Guerrero Cortés <sup>2<sup>a</sup>, c</sup>,

Oriana Roció Cendales Reyes <sup>b, c</sup>

<sup>a</sup> Estudiante de Ingeniería Industrial

<sup>b</sup> Profesor, Director del Proyecto de Grado, Departamento de Ingeniería Industrial

<sup>c</sup> Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia

---

## Resumen de diseño en Ingeniería

The planning and sequencing of work orders in production workshops is recognized as a complex problem within medium and small Colombian companies because their traditional production method does not systematize, register and standardize production processes, affecting the average delay in the delivery of product orders. This, one of the biggest difficulties that this type of company presents is measuring, controlling and evaluating the performance in the work modules, which decreases the effectiveness in the implementation of potential techniques to improve the process.

The application of metaheuristics with a hierarchical approach to the production Scheduling is an approach to this problem, characterized by its ability to achieve good solutions that reduce the number of delayed orders and idle lapses in machines between completion of works and start of another. This thesis presents an application proposal for the company Inversiones Sun Shine S.A.S, focused on the textile sector, which allows solving the problem of production programming in a productive configuration of the combination of Flexible *Open Shop* and *Flexible Open Shop - Job Shop* type, to reduce the average time of delayed orders, contemplate interruptions and times of enlistment dependent on the sequence of each operation. The proposed solution consists of a Tabu Metaheuristic Search technique that has had great performance in multiple *Open Shop* and *Flexible Open Shop - Job Shop* environments described in the literature. This algorithm, without being optimal, given the NP-hard classification of the aforementioned problem, is a good solution as it is demonstrated in the validation of the results of the work, in which 5 orders are programmed in 7 machines capable of processing 42 types of operations with independent times per unit processed for jackets, taking into account that there are 35 average processes for each of the 5 jacket types.

In the process of creating the application, the output parameters that must be registered by the user were determined: type of jacket, quantity of product demanded by the customer and date of delivery agreed with the customer. These are the input parameters that are contemplated in the application: standardized times of operations, operations by type of jacket and order of precedence between operations. Two Tabu Metaheuristic Search programmed in the Visual Basic Developer (VBA) in Microsoft office Excel 2017 were raised. The first application contains an objective function (FO) that minimizes the average delay of the programmed orders, while the second one has a FO that focuses on minimizing the *Makespan* (time of determination of the last programmed order), which does not require the parameter "Delivery date agreed with the customer". Likewise, the main design restrictions are established: reprogramming of operations without finishing the next day, no operation can be interrupted, rule of precedence between operations and discrimination of transport times. The interface of the application is aligned with ISO 25010 which makes it look friendly and intuitive for the user, without additional adornments that may confuse the registration of the parameters. Additionally, it is executed in a Microsoft office program which makes it easy to access and compatible for its implementation in different hardwares. To check the effectiveness of the developed Metaheuristic model, the two applications developed under an EDD order dispatch rule were evaluated and compared with the unimproved simple heuristic. By other hand a dynamic rule of dispatching has been proved and compared with the Taboo and Taboo showed to be the best performing solution using EDD. To do this, the orders previously programmed when performing the simulation were taken into account. The analysis of the results showed that the best application for the

production process of the company Inversiones Sun Shine S.A.S is the design that minimizes the Average Delay because its effectiveness with respect to the unimproved simple heuristic is 100 %; while the design that minimizes the *Makespan* is 64% a simulated situation.

*Palabras claves: Lean Manufacturing, Productividad, Manufactura, Flexible Job Shop, Sistema productivo, Algoritmo Búsqueda Tabú, Metaheurística, Open Shop*

---

## 1. Justificación y planteamiento del problema

Durante los últimos años el sector textil en Colombia ha venido enfrentando una considerable crisis en la manufacturay venta de sus artículos, afrontando un decrecimiento del 13% en la confección de prendas de vestir, hilatura, tejeduría y acabado de productos textiles (Portafolio, 2017); aspecto que ha generado problemas en la competitividad de este sector, debido al negativo efecto proporcionado por las exportaciones, las pérdidas fueron estimadas en US \$60 millones (Ministerio De Industria Y Comercio, 2017 ). Basado en lo anterior, se ha considerado de gran importancia centrar esfuerzos en este sector en Colombia, debido a que, según datos del Departamento Administrativo Nacional de Estadística, durante el periodo 2008 a 2014 la industria textil en Colombia representó el 1.17% de PIB nacional y el 9.82% de la industria manufacturera (Dane, 2012).

Los cambios en los mercados y la alta dinámica en los sectores económicos hacen que actualmente las compañías enfrentan retos, como son el aumento de la competencia, la expansión de los mercados, los tratados de libre comercio, el incremento de las expectativas de los clientes (Umble et al., 2003). Esto ha obligado a las empresas de todos los tamaños a replantear sus estrategias, con el fin de ganar una ventaja competitiva que les permita mantenerse y crecer en el medio, a través de factores como el rediseño y mejoramiento de procesos, implementación de tecnología, innovación en productos y servicios y optimización de la cadena de valor. (Mayorga & Pinzón, 2008). Es por eso, que la programación es uno de los medios para mejorar la productividad de una empresa resulta en una tarea difícil por ser la que determina la utilización de mano de obra, maquinaria, materiales y ruta de producción y por lo tanto el rendimiento de la planta, es la función vital para cumplir con las solicitudes del departamento de ventas" (Meléndez, 2004).

La empresa Inversiones Sun Shine S.A.S, es una de las muchas compañías del sector textil colombiano que está enfocada en el diseño, elaboración, confección y comercialización de gorras, chaquetas, sudaderas, dotaciones y artículos publicitarios. Inversiones Sun Shine S.A.S. cuenta con tres áreas en común para poder cumplir su razón social, la primera área es el diseño de moldes y alistamientos de insumos, en el cual se define tamaños de corte, colores, medidas de prendas que son utilizadas como referencia para luego pasar al área de corte. En esta área es donde se hace la recepción de materia prima de telas, se hace la medición de cortes mediante los moldes y una vez hecho el corte de las telas se pasa al área de confección, en la cual es donde hace la producción de lotes según las órdenes de los clientes de las prendas de vestir. Ya que en el área de confecciones es donde nos podemos enfocar más ante el análisis y mejoramiento de procesos, porque ha tenido varios cambios organizacionales como resultado de la nueva gerencia, que inició a ejercer sus labores desde Abril del 2017, logrando acortar la tardanza promedio, de 17 días a 7 días, mediante el análisis y mejoramiento de los indicadores de la empresa, una nueva organización de máquinas y las respectivas áreas que la componen, permitiendo tener un mejor balance de comunicación del área comercial con la de ventas, toda vez que la relación de beneficio que se obtiene por medio del aplicativo en la reducción de este tiempo promedio impacta directamente en las áreas de ventas y comercial; puesto que se obtiene fidelización de clientes lo cual aumenta la venta de esta categoría con un tiempo de respuesta óptima en la fabricación de productos, además de reducir la utilización o gasto de materias primas, insumos, servicios entre otros para más órdenes y/o comercialización de los productos.

El ciclo de una orden en Inversiones Sun Shine S.A.S. arranca desde que un cliente lleva su diseño para realizar la confección, el equipo de producción define los costos de la orden para dar a conocer al cliente la cotización, se define el modelo con los bordados o estampados y los materiales, se realiza al cliente una muestra si éste lo desea, de no ser así se procede a realizar manualmente el explosionado de materiales para generar la orden de producción en la que se ofrece una promesa de venta al cliente de 10 días, la cual no se está cumpliendo. En el área de corte, la tela es cortada según las especificaciones, con el fin de evitar desperdicios así que se ingresan los datos a un software llamado Opitex® que indica la medida optimizada para la elaboración unitaria del pedido. Una vez las piezas han sido cortadas se envían a bordado o en su defecto a un satélite. Luego llega la orden a producción donde se realiza la confección como tal, en un flujo intermitente en cuanto la ubicación de las estaciones de trabajo con sus respectivas máquinas de pespunte, uniones, encauchado y fileteadoras ANEXO 2.

La empresa tiene un promedio de 7 días tardíos en tiempo de entrega, este resultado se evidencia en el incumplimiento al cliente, ya que actualmente la empresa tiene una regla de asignación de órdenes “Tiempo de entrega más temprano” (EDD), lo cual da a entender que cada orden de trabajo que llega a la empresa se programa dependiendo de la fecha más próxima a vencer, por ende en algunos casos se da la pérdida del cliente; situaciones como la anteriormente enunciada los mantendrán alejados de su visión de consolidarse como una compañía líder en el desarrollo de prendas de vestir, industriales y publicitarias. Es por esta razón que se ve la necesidad de evaluar herramientas mediante la innovación tecnológica que ayuden a dar solución efectiva a la disminución de la tardanza promedio de las órdenes y para lo cual desarrollamos un análisis DOFA donde obtuvimos una relación entre factores y recursos de la empresa donde se logra identificar la necesidad de reducir las amenazas que se presentan, puesto que la tardanza promedio deriva a los demás factores de incumplimiento, baja de procesos productivos, capacidad tecnológica entre otros afectando directamente la imagen y promesa de servicio, por ello se quiso presentar un aplicativo que permitiera simplificar la operación de las órdenes de producción de chaquetas convirtiendo las amenazas en oportunidades de mejora y crecimiento ANEXO 3. Como evidenciamos en este estudio, la venta de chaquetas es el punto fuerte de la compañía, siendo el 73% de los ingresos mensuales en términos de rentabilidad asociada, además, representa una ocupación del 63% del personal encargado del área de confecciones.

Diagrama 1. Tiempos PLM (Delgado, Guerrero 2018).



En cada una de las áreas que componen a la empresa a excepción del área de modelo e insumos, se evidencia un tiempo de tardanza en días, evidenciando la demora en la entrega de las órdenes de producción.

Así mismo, de acuerdo al resultado proporcionado por el diagrama Gantt ANEXO 4, se evidencia que la confección definida desde Filete boca de bolsillo hasta empaque, es el conjunto de operaciones que más demoras presenta para el área de producción debido a que aun estando en el mismo piso es donde más transporte se evidencian, puesto que actualmente es imposible el movimiento de las máquinas para tener un flujo continuo como se demuestra en el ANEXO 5 donde describimos las estaciones con sus máquinas y restricciones respectivas.

Tabla 1. Procesos chaqueta (Delgado, Guerrero 2018).

Numero de Procesos		40	
ID	Nombre Proceso	ID	Nombre Subproceso
1		1	Engastar Mangas
2	Mangas Fierro	1	Pegar Mangas
3		1	Cerrar Mangas
4		2	Pegar Mangas
5	Mangas Externo	2	Cerrar Mangas
6		2	Pespuntar
7	Bolsillos Fierro	3	Preparar Ribete
8		3	Enrollar
9		4	Dobladillar Bolsillos
10		4	Pegar Bolsillos
11		4	Parche
12		4	Tapas Rafilar Voltour
13	Bolsillos Frente x 2	4	Pespuntar
14		4	Pegar Tapas
15		4	Marcar y Pegar Ribete
16		4	Picar Ribete
17		4	Embolillar
18		4	Pespuntar y Cerrar Bolsillos
19		5	Cerrar con Guata
20	Puños x 2	5	Medir para Pegar
21		5	Pespuntar
22		5	Pegar a Manga
23		6	Preparar
24	Armillas	6	Unir
25		6	Pespuntar
26		7	Engastar y refilar cuello
27	Hombros y Cuello Exterior	7	Unir y pespuntar
28		7	Pegar cuello
29		8	Unir Hombros
30	Hombros y Cuello Fierro	8	Pegar Cuello
31		8	Cerrar Forros
32		9	Medir para Pegar
33	Cerrar	9	Pespuntar
34		9	Pegar a Manga
35		9	Cerrar con guata
36	Kompevientos	10	Malla
37	Acolchada	11	Costura en Rombo
38	Camuflado	12	Bolsillo de ribete con cremallera
39	Manga Removible	13	Cremallera en las mangas
40	Multicolor	14	Ribete de colores

En el análisis del proceso y el subproceso en la elaboración de las chaquetas en el área de confecciones, se obtuvieron un total de 40 procesos y 14 subprocesos para los 5 tipos de chaquetas que ofrece la empresa Inversiones Sun Shine S.A.S

Gráfico 1. Diagrama de flujo de proceso por producto en el área de confección Inversiones Sun Shine S.A.S (Delgado, Guerrero 2018).

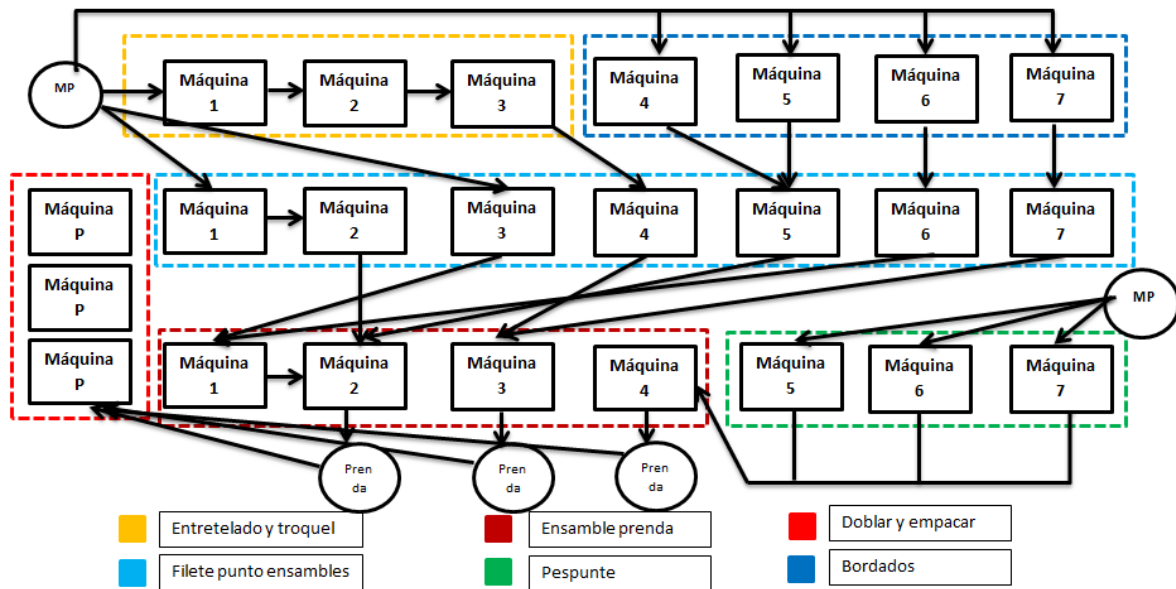
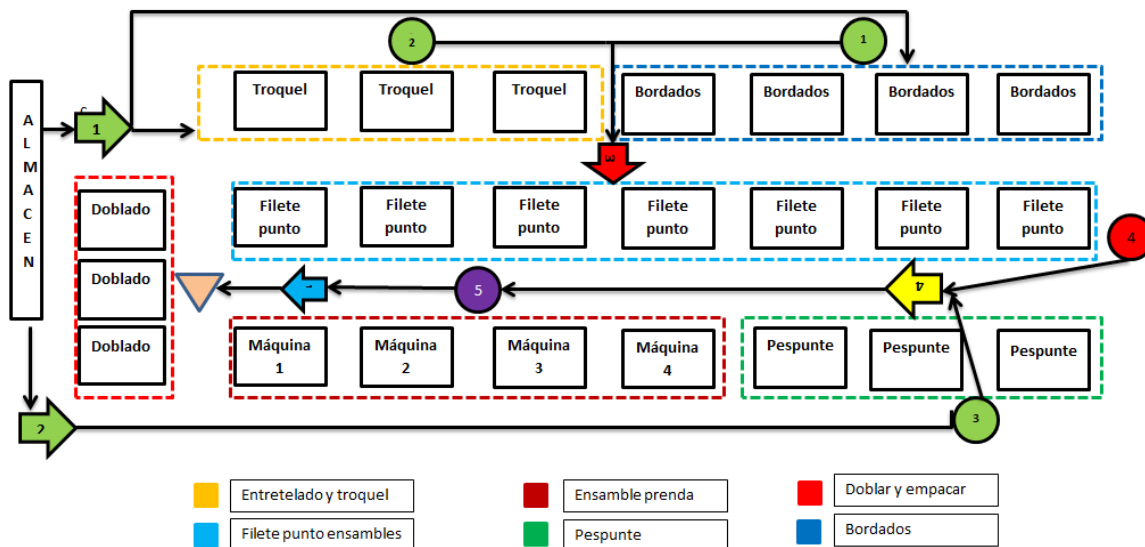


Gráfico 1.1 Diagrama de recorrido de proceso por producto en el área de confección Inversiones Sun Shine S.A.S (Delgado, Guerrero 2018).



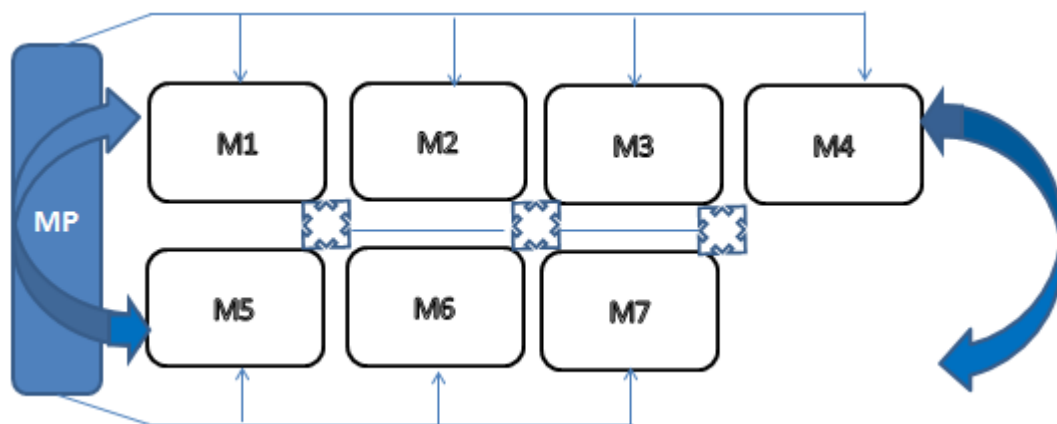
El diagrama muestra el recorrido del producto en este caso son chaquetas, las operaciones en verde son ensambles que se hacen al momento del despacho de materiales desde el almacén (empuñaduras, chalecos, forros), luego pasan a la línea de ensamble (operación 4) donde unen todas las piezas para tener el producto casi terminado antes de acabados y finaliza en ensamble final (operación 5) para luego doblar y almacenar.

Cada vez que la empresa recibe una orden de trabajo funciona bajo la regla de producción “make to order” con regla de desempate EDD para la elaboración de sus productos ya que la empresa como un conjunto de (n) operaciones y (m) máquinas, donde los lotes son los pedidos de los clientes, que tienen que ser procesados en k órdenes de trabajo. Cada estación de trabajo puede tener más de una máquina idéntica en paralelo y todos los trabajos son procesados de diferentes formas, en gran medida por la variedad de productos a ser fabricados, usando un número definido de recursos, pero con

una secuenciación diferente, propia de cada producto, agregando los tiempos de transporte de lotes de una estación a otra y el tiempo que espera ese lote para ser procesado, son restricciones lo cual genera un aumento en la complejidad de la programación de la producción (Pezzella, 2008). Por lo cual podemos definir que el sistema productivo de la empresa está bajo un ambiente de producción combinado *Flexible Open Shop* y *Flexible Job Shop*. Por otro lado, en el desarrollo de los procesos y los subprocesos para la elaboración de pedidos de chaquetas, se tiene claro que para la realización de estos no tiene un orden o una precedencia, lo cual no genera ningún tipo de restricción de procesamiento, es decir, que el sistema productivo de la empresa Inversiones Sun Shine S.A.S., va ligado específicamente, el problema de programación de un sistema *Flexible Open Shop*, el cual cuenta con la característica de ser arbitrario, donde las tareas a realizar no siguen una secuencia definida, cada una adopta una línea diferente e independiente de las demás.

Debido a la gran complejidad de las operaciones y la demanda de un portafolio de productos variado, para este Algoritmo se tendrán en cuenta 7 máquinas que estarán disponibles en su totalidad para la producción de los distintos tipos de chaqueta que logramos estandarizar en Inversiones Sun Shine. S.A.S. De esta forma se garantiza que este taller sea exclusivo para la producción de chaquetas y no se tengan que hacer variaciones en el sistema, convirtiéndolo en un *Flexible Job Shop*. A continuación, se muestra el módulo de confección propuesto para la producción de chaquetas en el área de confección.

Gráfico 1.2 Diagrama del módulo propuesto para producción de chaquetas en Inversiones Sun Shine S.A.S (Delgado, Guerrero 2018).



De esta forma se propone realizar el aplicativo que solucione el problema de órdenes tardías utilizando el algoritmo de Búsqueda Tabú que se plantea de acuerdo con la comparación de la situación actual versus la propuesta de mejora en Visual Basic, para buscar reducir el tiempo de tardanza promedio en una línea de flujo en la confección de prendas. Para minimizar el tiempo promedio de tardanza, se considera la Búsqueda Tabú mantiene información almacenada sobre las últimas soluciones visitadas con el fin de usarla para guiar la búsqueda y evitar que el algoritmo se mueva a soluciones visitadas es decir memoria adaptativa (Aarts y Lenstra, 2003). En este sentido se dice que hay cierto aprendizaje y que la búsqueda es inteligente (Martí, 2003), el cual es un problema típico de las ramas de secuencia de tareas y optimización combinatoria, ambas disciplinas de la investigación de operaciones. Por lo cual se implementa la técnica metaheurística de Búsqueda Tabú que constituyen como una de las técnicas más usadas en planificación de operaciones en planta.

Teniendo en cuenta que el Algoritmo TS se basa en estructura de memoria para no recorrer nuevamente arcos iguales y además escoger el que más se adapte a la función objetivo y tener un balance de diversificación adecuado. De esta manera se evita entrar en la degeneración, puesto que guarda las últimas k secuencias generadas en una lista con algoritmo de memoria adaptativa que no recorre de nuevo rutas con vecinos que resultando en una peor FO.

Se propone una metodología basada en un algoritmo metaheurístico de Búsqueda Tabú para la programación de pedidos en un ambiente híbrido *Flexible Open Shop - Job Shop*. Se vuelve un problema del nivel de complejidad *NP-Hard* debido a la arbitrariedad que cada trabajo puede seguir al momento de ordenarse y secuenciarse en las máquinas, pues no tiene un orden preestablecido en el 95% de los procesos a programar por cada tipo de producto (chaqueta) luego se evidencia un ambiente FJSP que muestra reglas de precedencia en los últimos procesos de ensamblaje.

Teniendo en cuenta la problemática que enfrenta la empresa este proyecto de investigación pretende resolver la siguiente pregunta:

¿Cómo optimizar la programación de órdenes de chaquetas producidas en la empresa Inversiones Sun Shine S.A.S de tal manera que se disminuya la tardanza promedio en las órdenes de producción?

## 2. Antecedentes

En los últimos 25 años han surgido gran cantidad de estrategias para el mejoramiento de los procesos productivos desde el TQM (Total Quality Management), pasando por el BPR (Business Process Reengineering), y llegando hasta las ventajas competitivas de Porter. Recientemente han surgido las técnicas de *Manufactura Esbelta* con las cuales se busca la excelencia industrial (Bilalis, Alvizos, Tsironis, Y Van Wassenhove, 2007).

*Lean Manufacturing* surgió para dar paso a una nueva etapa en los sistemas productivos. Es una filosofía de trabajo que propone obtener mayores beneficios utilizando menos recursos. Ha sido aplicada a una gran variedad de sectores empresariales diferentes al del automóvil, en el que se originó y donde ha tenido su mayor desarrollo (Tejada, 2011). Luego de la Segunda Guerra Mundial, la compañía automovilística más importante de Japón, Toyota, vio que el método de trabajo de la producción en masa no les convenía por diversas situaciones del país. Como resultado, sus ingenieros Eiji Toyoda y Taiichi Ohno, iniciaron lo que Toyota llamaría el Sistema de Producción Toyota, y que más tarde sería *Lean Manufacturing* (Monden Yasuhiro, 1983). *Lean Manufacturing* es la base fundamental para la implementación y el éxito de los sistemas en las empresas; es una estrategia administrativa que permite la generación de valor mientras se reducen los desperdicios (Womack, 1996). Es por esto que dichas técnicas de trabajo han adquirido cada vez mayor importancia entre los directivos de empresas para el desarrollo, aplicación y logro de operaciones de clase mundial en sus compañías para asegurar su competitividad en un mercado cada vez más globalizado (Collins, Cordon, & Julien 1996).

Es necesario, por tanto, innovar no sólo en los procesos productivos sino también en las herramientas de gestión; como lo es en el proceso de programación de producción que cumple un papel preponderante en la industria ya que busca reducir costos y lograr altos niveles de productividad para que las organizaciones mejoren su competitividad, por otro lado ante los numerosos factores que influyen en los sistemas productivos actuales, las metaheurísticas surgen como alternativa de solución porque han demostrado aportar resultados de muy buena calidad a problemas complejos. (López Vargas, 2013). Desde los años sesenta han ido apareciendo diferentes métodos de resolución de problemas conocidos por el nombre de técnicas metaheurísticas. Estas técnicas son de especial interés en el caso de variables enteras, aunque también se aplican a problemas con variables reales. Teniendo en cuenta que la propuesta de este proyecto busca reducir los tiempos de producción sobre una línea de flujo en la confección de prendas, basado en la filosofía lean y partiendo de (n) operaciones y estaciones con (m) máquinas, se ha encontrado que el uso de metaheurísticas para aplicar en la programación de *Job Shop* (n) operaciones y estaciones con (m) máquinas que realizan las mismas operaciones por estación y están ubicadas paralelas a las máquinas de otras estaciones. Con esta filosofía se busca evitar pérdidas de tiempo, puede minimizar la tardanza T o número de trabajos tardíos U. Matemáticamente, el problema consiste en encontrar múltiples permutaciones de las tareas que resulte en un tiempo mínimo de procesamiento de todas ellas, el cual es un problema típico de las ramas de secuencia de tareas y optimización combinatoria, ambas disciplinas de la investigación de operaciones.

Para revisar las ideas más importantes, así como una clasificación de los tipos de metaheurísticos y una descripción de las características deseables en ellos, se puede recurrir a (Hoffman, 2000); una recopilación completa y reciente sobre los más importantes metaheurísticos la exponen (Glover y Kochenberger, 2003). Entre los metaheurísticos más exitosos se encuentran el recocido simulado (*simulated annealing*) que parten de una solución inicial que de modo paulatino es transformada en otras que a su vez son mejoradas al introducirle pequeñas perturbaciones o cambios (tales como cambiar el valor de una variable o intercambiar valores que tienen dos variables). Si este cambio da lugar a una solución mejor que la actual, se sustituye por la nueva, continuando el proceso hasta que no es posible ninguna nueva mejora. (Britto, Mejía, Caballero, 2007), los algoritmos genéticos (*genetic algorithms*) establecen una analogía entre el conjunto de soluciones del problema y el conjunto de individuos de una población natural. Así como las poblaciones de individuos evolucionan en cada generación, el conjunto de soluciones mejora en cada iteración. y las redes neuronales artificiales (*artificial neural networks*). Otras ideas recientes incluyen la optimización por colonias de hormigas (*ant colony optimization*) (Hoffman, 2000), se encuentra también el cuello de botella inicial y establece una secuencia de trabajos óptima para esa máquina. Una vez se ha hecho esta operación, se imponen nuevas restricciones que afectan la secuenciación de las máquinas restantes. Se determina y se secuencia la nueva máquina cuello de botella entre aquellas no secuenciadas y el proceso se repite hasta que no haya máquinas sin secuenciar. (Britto, Mejía, Caballero, 2007), el algoritmo Búsqueda Tabú explora el vecindario de la mejor solución encontrada. Se adopta como mejor solución la mejor

solución en el vecindario, aun si ésta no es mejor que la solución actual. Para que el algoritmo no se quede atrapado en un ciclo, se almacena la información relativa a las soluciones recientemente visitadas en una lista llamada lista Tabú (Sait y Youssef, 1999) y por último la computación evolutiva (*evolutionary computing*), entre otras.

En el trabajo de Arango (Arango et al., 2013), se describe una propuesta de solución al problema de procesar  $n$  trabajos en  $m$  máquinas paralelas no relacionadas considerando solo la etapa de tejeduría. Por otra parte, en una fábrica con tiempos de alistamiento dependientes de la secuencia, se construyeron algoritmos genéticos con distintas soluciones iniciales y métodos de mutación para el problema de programación (Chang et al., 2003). De manera similar, (Serifoglu y Ulusoy, 2004) hacen un acercamiento con algoritmos genéticos para un flow shop híbrido multi-etapa, esta vez con reglas de prioridad SPT (Tiempo de procesamiento más corto), LPT (tiempo de procesamiento más largo) y STPT (tiempo de procesamiento total más corto). Igualmente, se publica una investigación en la que se aplican los algoritmos genéticos en un sistema de planificación de los procesos en una industria textil (Solari y Ocampo, 2006). Mahdavi construye un algoritmo genético para el scheduling del flow shop híbrido con resultados eficientes para cantidades pequeñas de trabajos (Mahdavi et al., 2008). Sin embargo, a pesar de la notable cantidad de trabajos publicados en los últimos tiempos relacionados con el problema de la programación del *flow shop híbrido* (HFS), han sido pocos los que se han centrado en aplicar estas metodologías a los casos reales de la producción (Ribas et al., 2010).

Diversos autores mencionan el problema respecto a la aplicación de esta técnica de programación de producción, introducida por Glover (1986), trabajos como los de Nowicki y Smutnicki (1996) y Pezzella y Merelli (2000), ambos para ambientes *Flexible Open Shop - Job Shop* con Búsqueda Tabú, utilizando distintos vecindarios basados en la ruta crítica. Los trabajos de Rivera (2005) para programación de proyectos con recursos limitados y Osorio (2005) para ambientes Job Shop; ambos utilizando como función objetivo la minimización del tiempo total determinación de un conjunto de trabajos, usualmente llamado makespan.

La secuenciación de sistemas productivos *Flexible Open Shop - Job Shop*, esta combinación ha sido estudiada por investigadores, quienes han propuesto diferentes estrategias que proporcionan soluciones aceptables a problemas de secuenciación; una definición de este tipo de problemas, aceptada por la comunidad científica, es la que lo presentan Kononov et al. (Kononov, Sevastianov, & Tchernykh, 1999) quienes presentan escenarios con tiempos de procesamiento sujetos a distribuciones de probabilidad para “ $n$ ” trabajos resueltos mediante métodos analíticos en tres escenarios puntuales, máquinas con la misma función de distribución de probabilidad, máquinas con diferentes funciones de distribución de probabilidad y máquinas idénticas). Al igual que desarrollan un algoritmo de tiempo polinomial para el caso de dos máquinas y tiempos de procesamiento determinísticos, y definen el problema con tres máquinas como un problema *NP-hard*. Bajo estas condiciones, la solución otorgada por (Kononov, Sevastianov, & Tchernykh, 1999) es presentada en un esquema que permite, a partir de una secuencia para máquinas, generar un programa para máquinas, con  $m > k$ , bajo ciertas condiciones de VOD (*vector of differentiation*). De esto, se deriva una familia de EN – vectores en  $R_m$ , que satisfacen y garantizan una función mínima para la que existe un algoritmo de tiempo polinomial. En vista de la calidad de NP-hard de  $C_{max}$ , se han desarrollado algoritmos heurísticos, enlazados y ramificados para este problema (Andresen, Brasel, Morig, Tusch, & Werner, 2008).

La implementación de algoritmos de búsqueda local Tabú más complejos en las denominadas metaheurísticas, arrojan desarrollos como los presentados por (Ching-Fang, 1999) quien presenta un algoritmo de Búsqueda Tabú para problemas open-shop, donde la estructura del vecindario o espacio de búsqueda está dado por la representación de las soluciones como un grafo disyuntivo con el objetivo de minimizar la tardanza promedio. Una comparación entre dos metaheurísticas es presentada por (Andresen, Brasel, Morig, Tusch, & Werner, 2008), quienes proponen un algoritmo genético donde el individuo es representado por medio de una matriz que denota la secuencia en filas y columnas para máquinas y trabajos respectivamente. El algoritmo de recocido simulado que plantean los autores también representa a las posibles soluciones como la matriz descrita anteriormente, asegurando que para tener una mejor solución en el algoritmo se debe iniciar con una buena solución factible y una temperatura inicial baja. En el caso de [8], resuelven mediante un algoritmo evolutivo un problema *Flexible Job Shop-open-shop* con 15 máquinas y 20 trabajos, logrando mejores resultados respecto a técnicas tradicionales empleadas en su desarrollo, como OMC, OML y Campbell.

Ahora la implementación de la metaheurística Búsqueda Tabú ha sido mostrada en la literatura como una de las metodologías más eficaces en Job shop y en muchos otros problemas de Programación de la producción, mostrando superioridad frente otros algoritmos tales como recocido simulado, algoritmos genéticos y redes neuronales (Madivada & Rao, 2012) y demuestra grandes capacidades en lo que respecta a la búsqueda local (Meeran & Morshed, 2012). Se pueden encontrar referencias muy antiguas sobre esta temática. El paralelismo es frecuente en la industria textil, y autores como Morton (1958), Hurst & McNamara (1967) y Serafini (1996) resolvieron casos relacionados con ese tipo de

industria teniendo en cuenta esa circunstancia. Los trabajos más recientes, en su mayoría, toman como objetivo minimizar el tiempo de tardanza y resuelven el problema por metaheurísticas. Salazar-Hornig & Medina (2013) utilizaron un algoritmo para minimizar el *Makespan* suponiendo máquinas paralelas idénticas. Zhang & Van de Velde (2012) propusieron un algoritmo de aproximación, Driessel & Monch (2011) y James & Almada-Lobo (2011) aplicaron búsqueda en vecindario cercano, Lin et al (2011) resolvieron un problema de paralelismo con un algoritmo voraz; mientras Chang & Chen (2011) adaptaron algoritmos. Ribas-Vila et al. (2009) estudiaron un conjunto de heurísticas teniendo a la vez el criterio de minimizar el tiempo medio de fabricación y la tardanza. Tavakkoli-Moghaddam et al. (2009) y Balasubramanian et al. (2009). Muchos autores (Pezzella y Merelli, 2000; Nowicki y Smutnicki, 1996) han observado que tanto la escogencia de una buena solución inicial como el establecimiento del vecindario son los aspectos más importantes del desempeño del algoritmo en términos de la calidad de la solución y del tiempo computacional. Por ejemplo, en Armentano y Scrich (2000) se usaron varias reglas de despacho como solución inicial a la heurística Búsqueda Tabú en ambientes job shop, y se inicia la búsqueda con la solución que produjo el mejor resultado. También respecto a la función objetivo llamada Tardanza Total, en ambientes Job Shop con Búsqueda Tabú, sobresalen el de He, Yang y Tiger (1996) que abordan el problema mediante el enfriamiento simulado y el de Amaral y Rigao (2000), cuyo vecindario se ha usado en este trabajo y se presenta en detalle en la sección.

### 3. Objetivos

*Diseñar un aplicativo de programación de producción basado en técnica metaheurística de Búsqueda Tabú, en un ambiente combinado Flexible Job Shop-Open Shop para minimizar la tardanza promedio en las órdenes de producción en la empresa Inversiones Sun Shine S.A.S*

#### 3.1. Objetivos específicos

- Formular un modelo metaheurístico que permita evidenciar la tardanza promedio actual mediante la regla de programación de órdenes de producción EDD de la empresa Inversiones Sun Shine S.A.S.
- Diseñar una técnica metaheurística de Búsqueda Tabú que ayude a solucionar la tardanza promedio en la entrega de órdenes de producción.
- Determinar el impacto de la solución que arroja el aplicativo propuesto frente a la solución que arroja el proceso actual.
- Desarrollar una interfaz operativa para el jefe de producción de Inversiones Sun Shine S.A.S.

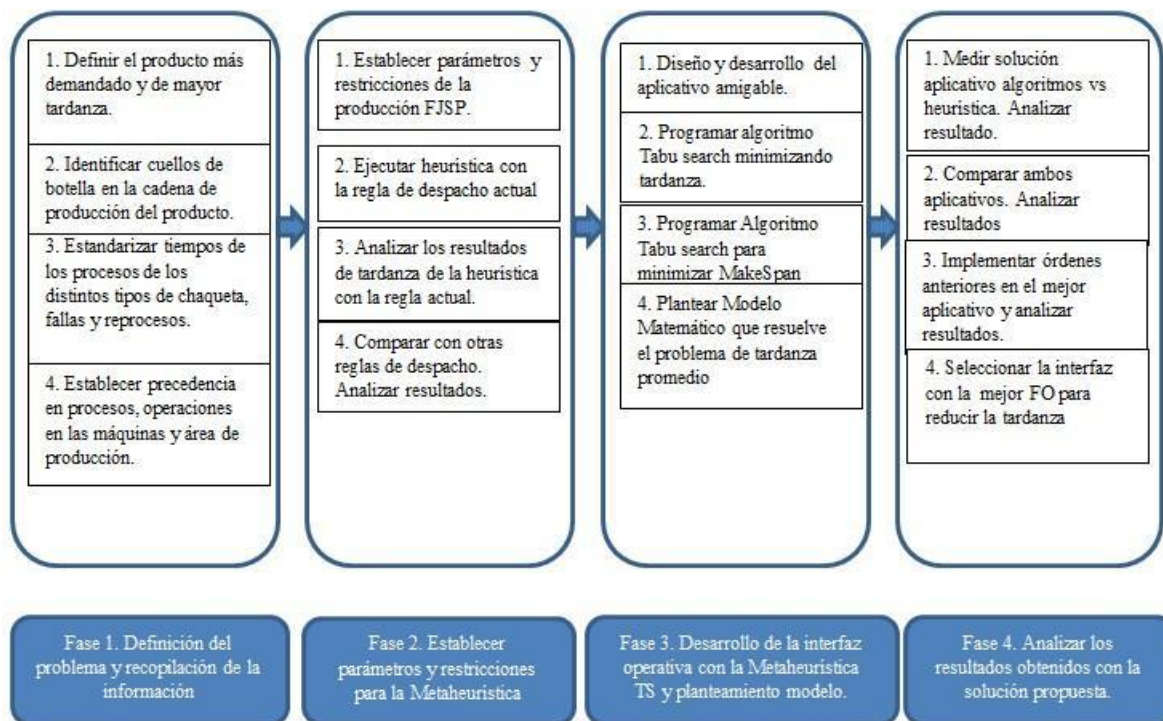
### 4. Cuerpo del documento

#### 4.1. Metodología

El diseño de un aplicativo de programación de producción basado en técnica metaheurística de Búsqueda Tabú, en un ambiente *Flexible Open Shop - Job Shop* para minimizar la tardanza promedio en las órdenes de producción en la empresa Inversiones Sun Shine S.A.S está compuesto por 4 fases (ver diagrama 4). El objetivo de la primera fase es definir el problema mediante la filosofía *Lean Manufacturing* para la implementación de un módulo de producción *Flexible Open Shop - Job Shop* y recopilar la información necesaria para construir la técnica de solución, mediante un análisis de datos que determine su naturaleza determinística y reglas de precedencia en las operaciones. En la segunda fase, se establecen los parámetros y restricciones para la metaheurística utilizando distintas reglas de despacho; se determinan los desempeños de las reglas con indicadores de tardanza, *makespan* y tiempos ociosos, posteriormente se revisa la literatura para definir Búsqueda Tabú como la técnica más reciente y con resultados de cómputo más precisos para un problema *Flexible Open Shop - Job Shop* enmarcado como *NP-Hard*. En la tercera fase, se realiza el diseño y desarrollo de la interfaz junto con la técnica de solución Búsqueda Tabú. Por último, en la fase cuatro, se realiza el análisis de resultados obtenidos comparando los aplicativos desarrollados, con base en las instancias de producción establecidas previamente en los históricos de la empresa para evidenciar el desempeño y los hallazgos.



Diagrama 2. Fases del diseño de un aplicativo de programación de producción en la empresa Inversiones Sun Shine S.A.S. (Delgado, Guerrero 2018).



### Fase 1: Definición del problema y recopilación de la información

En la primera fase se debe conocer el proceso de producción con todo detalle para evitar tener desperdicios en algunas partes del proceso. Por tanto, se realizó un estudio de métodos y tiempos hacia las categorías de producción que tiene la empresa, analizando que la principal falla se origina en el proceso de chaquetas, dado que presenta mayor tardanza en producción, lo que atribuye a este método de Pareto para lograr establecer prioridades, por medio del aplicativo buscando reducir el tiempo promedio mejorando la productividad, la calidad, y como forma de estandarizar los demás procesos y uso de máquinas para no afectar la producción de su oferta en portafolio, sabiendo que el módulo de producción están limitados exclusivamente a la producción de chaquetas y no interfieren órdenes de otros productos, como quiera que estas máquinas pueden procesar un chaqueta con la totalidad de sus operaciones en un 100%.

El cuello de botella se encontró en el área de producción donde se estaban represando insumos para empezar las órdenes de producción, así que, revisando el orden de las máquinas, se encontró que:

1. No tenían módulo o taller de producción enfocado al producto.
2. Tenían órdenes tardías que demostraban el 30% de los retrasos por entregas en el área de confección.
3. La asignación de operaciones a las máquinas se hacía de forma arbitraria por parte del jefe de producción, sin embargo, la programación de trabajos siempre bajo la regla EDD.
4. No tenían estandarizado ni sistematizado los procesos del área de confección.

Se hizo la toma de tiempos a los colaboradores que se encuentran en el área de producción de chaquetas. Se cronometró el tiempo de cada proceso completo y a cada subproceso, desde que empieza hasta que termina, así como elemento a elemento, haciendo una toma de 50 muestras en total para comprobar después si coincide la suma total. Es muy importante no quedarse solo con el tiempo de producción sino teniendo en cuenta los tiempos de holgura y de transporte entre las diferentes estaciones en el área.

Protocolo: se recogió una premuestra de 30 datos, se calculó la desviación estándar y se estima el tamaño de muestra suficiente para estimar un promedio en el intervalo de confianza.

## Estandarización de tiempo con enfoque determinístico

Considerando que un número mayor de muestra de 30 datos es considerado suficiente para una aproximación normal aplicamos el Teorema del Límite Central. Para la estandarización de los tiempos determinísticos de las operaciones a programar en las máquinas se tomó un tamaño de muestra teniendo un nivel de confianza del 95%, se aplicó la forma de hallar n para una media en la que se tiene una desviación estándar promedio de 12,8 Segundos, por lo cual con un margen de error de +- 5 segundos, arrojó una muestra de 25 unidades a medir y así tener una media de tiempo en el intervalo de confianza. Por esta razón se tomaron 50 tiempos por operación, garantizando así llevar el estudio a una distribución normal e implementar los tiempos en una clasificación determinística.

$$n = \frac{N \cdot Z^2 \cdot \sigma^2}{(N - 1) \cdot e^2 + Z^2 \cdot \sigma^2}$$

Debido a que la suma de variables aleatorias se distribuye normal por el teorema de límite central, se definió un tiempo determinístico de set up de media de 45 segundos y tiempo de reparación de fallas de media 13,5 segundos. El promedio de fallas por máquina son 7 en una jornada normal de trabajo. Todo evidenciado en la toma de tiempos anexo y anidado en el archivo de la interfaz.

Debido a la cantidad de pedidos que recibe la empresa Inversiones Sun Shine S.A.S., cada orden que va entrando, va requiriendo cierta cantidad de insumos para su fabricación, es por esto que actualmente la empresa tiene una regla de programación *Make To Order* en la que principalmente va iniciando las órdenes según la disponibilidad de los materiales desde el área de corte y bordados, que a su vez deben esperar al proveedor para iniciar el proceso, por este motivo, cuando tienen dos o más órdenes listas para su producción utilizan la regla EDD organizando primero las ordenes más próximas a despachar y para realizar el desempate de las mismas SPT para la órdenes del mismo día y así aplicar la priorización.

Se estandarizaron 5 tipos de chaquetas de acuerdo a las operaciones que requieren con las restricciones de precedencia para realizar el ensamble final, éstas se plasmaron en la siguiente tabla. En general las variaciones de una chaqueta a otra se centran en el 6% respecto a sus procesos.

Tabla 2. Operaciones requeridas por tipo de chaqueta (Delgado, Guerrero 2018).

Chaqueta	5																																				
Rompe Vientos	35	36	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	36	27	28	29	30	31	32	33	34	36	
Acolchada	36	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	37
Camuflada	36	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	38
Manga Removible	36	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	39	29	30	31	32	33	34	35
Multicolor	35	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	40	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	

Para la producción de los 5 tipos de chaqueta que ofrece la empresa, se hizo un conteo sobre la cantidad de operaciones para la elaboración de cada una, con ello se tuvo un total de 40 procesos, los cuales 35 de ellos son los mismos, sin importar el tipo de chaqueta a producir, para los últimos 5 procesos son propios de cada chaqueta, es decir:

- El proceso 36 que es para la chaqueta Rompevientos corresponde directamente al subproceso malla.
- El proceso 37 que es para la chaqueta Acolchada corresponde directamente al subproceso costura en rombos.
- El proceso 38 que es para la chaqueta Camuflado corresponde directamente al subproceso bolsillo de ribete con cremallera.
- El proceso 39 que es para la chaqueta Manga removible corresponde directamente al subproceso cremallera en las mangas.
- El proceso 40 que es para la chaqueta Multicolor corresponde directamente al subproceso ribete de colores.
- La tabla de operaciones requeridas por tipo de chaqueta sólo evidencia los procesos que tienen en común los 5 tipos de chaqueta, con el fin que, al momento de imprimir la solución en la interfaz, se tenga identificado el subproceso con un número propio para cada una de ellas.

## Fase 2: Parámetros y restricciones que se deben tener en cuenta para la *metaheurística*

### Configuración del *Flexible Open Shop - Job Shop*

En el modelo propuesto se consideran  $M$  máquinas ( $j = 1, 2, \dots, M$ )  $j \in M$  y  $J$  operaciones ( $i = 1, 2, \dots, J$ )  $i \in J$ . A cada Máquina se le asignan  $j$  operaciones. Cada operación  $i$  tiene definido un tiempo de procesamiento en la máquina  $j$ .

En este problema, además, se tienen las siguientes consideraciones:

- Todos los trabajos están disponibles para iniciar su proceso en  $t = 0$ .
- Todas las máquinas se encuentran listas para su operación en  $t = 0$ . (Disponibilidad)
- Se considera que los tiempos de alistamiento son dependientes de la secuencia.
- No se permite la interrupción de los trabajos en las máquinas para procesar otra orden, es decir, que no se puede interrumpir el proceso sin haber terminado en una máquina y pasar a otra, para poder programar la secuencia se tendrá que reiniciar todo el Tabú, las únicas interrupciones que se tienen en cuenta son los *break ups* que se programaron con un modelo estocástico de sucesos y tiempo de reparación.
- Existe recirculación en el *Flexible Open Shop - Job Shop*, es decir que un trabajo puede visitar una máquina en más de una ocasión, permitiendo que todas las operaciones de un trabajo sean procesadas en una sola máquina, esto lo hace un ambiente T-Flexible y permite generar el orden que pueda minimizar el *makespan* y tiempos ociosos de cada orden para reducir la tardanza.
- Una máquina no podrá procesar más de una operación al tiempo. Hasta tanto una operación no haya terminado su procesamiento o haya existido una falla por ruptura de hilo definida con un modelo estocástico, la máquina en la cual se esté realizando dicha operación no se podrá considerar disponible para ningún otro trabajo.
- Todos los trabajos tienen la misma prioridad dentro del sistema (el valor del peso  $w$  es igual para cada uno de ellos).
- Todas las máquinas pueden realizar todas las operaciones.
- Las máquinas que conforman el *Flexible Open Shop - Job Shop* son idénticas (paralelas), luego, los tiempos de procesamiento de las operaciones son los mismos en cada máquina en la que se lleven a cabo, la única variable que se afecta es la cantidad de producto y el tipo de chaqueta que tiene determinados los procesos para su realización.
- Los tiempos de procesamiento de las operaciones son conocidos y determinísticos.
- El tiempo total de procesamiento para una operación es la suma del tiempo de proceso de cada una de las operaciones que lo componen multiplicado por las unidades de la orden, más los *setups* las fallas.
- El orden de las operaciones está predeterminado en las operaciones de ensamble de cada tipo de chaqueta y no se puede modificar.
- Se definieron 5 tipos distintos de chaqueta que comparten los mismos procesos y operaciones a excepción del proceso final, por esta razón al seleccionar cada producto esté dirige a una lista auxiliar que tiene predeterminados las operaciones correspondientes a cada referencia.
- No se consideran tiempos de transporte para los trabajos entre una y otra máquina.
- Un trabajo solamente se considerará terminado en el momento en que sus operaciones hayan sido procesadas totalmente y se haya ensamblado en la última operación.
- Todos los tiempos son determinísticos.

Para realizar el Búsqueda Tabú se hace subdivisión creada en el ANEXO 6 de parámetros dónde se asigna un código a cada trabajo para de esta forma intercambiar las operaciones del proceso inherente a cada tipo de producto entre las máquinas buscando llevar a 0 los tiempos ociosos asignando cada subproceso del proceso de la orden a las máquinas en cada iteración Búsqueda Tabú hasta encontrar la mejor secuenciación.

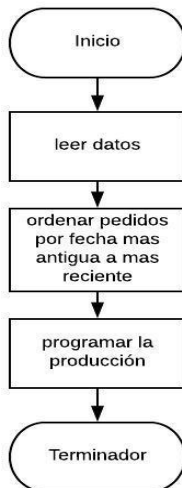
Diagrama 4 Parámetros del *Scheduling*(Delgado, Guerrero 2018).

Parámetros del <i>Scheduling</i> (Gantt)	Definición condición
Fecha de terminación	Fecha de terminación del trabajo J ( <u>Release date</u> )
Fecha de entrega	Fecha de entrega del trabajo J ( <u>Due date</u> )
Número de operaciones	Número de operaciones del trabajo J
Tiempo de proceso	Tiempo de proceso de la operación K.
Tiempo disponibilidad	Tiempo en el que está disponible la maquina M
Tiempo de proceso	Tiempo flujo de proceso de trabajo J
Tiempo remanente	Tiempo de proceso remanente de operación a reprogramar en el siguiente día

Inicialmente se midió el desempeño de las reglas a partir de la heurística con los datos de las órdenes en los libros de la empresa Inversiones Sun Shine S.A.S *Flexible Open Shop - Job Shop*. A partir de la heurística aleatoria del problema con la secuenciación establecida en los parámetros teniendo en cuenta las reglas de precedencia.

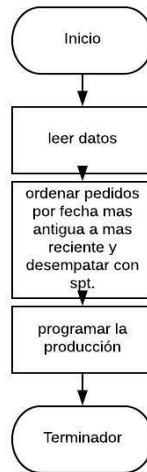
Se probaron diferentes reglas de despacho estáticas y la dinámica ATC que muestra excelentes resultados en los *papers* que funcionan en ambientes *Flexible Open Shop - Job Shop*, ejecutadas con diferentes heurísticas para analizar cuál es la mejor programación de trabajos, a continuación, explicadas:

Diagrama 3 Regla de despacho EDD (Delgado, Guerrero 2018).



EDD (*earliest due date*) Se empieza por leer los datos de las órdenes, luego se ordenan los datos de menor fecha estipulada de entrega a mayor fecha pactada, luego se programan las operaciones con una función que asigna cada trabajo a cada máquina con el horario *non delay* y se determina la fecha de finalización, luego se calcula la tardanza ponderada para imprimir los resultados. Esta regla es la actual utilizada por la empresa.

Diagrama 4 Regla de despacho ATC (Delgado, Guerrero 2018).



Se empieza por leer los datos de las órdenes, luego se ordenan los datos de menor fecha estipulada de entrega a mayor fecha pactada, luego las ordenes con fecha pactada igual se desempatan por SPT (*Short process time*), luego se ejecuta la subrutina de asignar a cada máquina una operación con horario *non delay*, por último, calcular los tiempos de finalización y la tardanza promedio y se imprimen los resultados.

### El problema de asignación y secuenciación

Se programa con horarios *non-delay* (horarios sin demora) estos son programas factibles en los que ninguna máquina se mantiene inactiva en un momento en que podría comenzar a procesar alguna operación, esta asignación sin demora está activa estos son programas factibles en los que ninguna actividad podría iniciarse antes sin retrasar una operación o romper una restricción de precedencia y por lo tanto también semi-activa. En general, buscan eliminar tiempos ociosos en las máquinas. Las operaciones de trabajo se pueden procesar en cualquier orden, en cualquier momento; cada máquina procesa como máximo un trabajo a la vez, y cada trabajo se procesa máximo por una máquina a la vez.

Para este caso en particular en el que los tiempos de alistamiento son dependientes de la secuencia y tenemos break ups, el problema de asignación se centra en determinar en qué máquina serán procesadas las operaciones que conforman un trabajo; esta asignación es tomada como información de entrada para el algoritmo Búsqueda Tabú mediante la heurística que se rige bajo la regla de despacho EDD que busca encontrar la mejor secuencia en cada máquina de tal forma que se minimice la tardanza teniendo en cuenta los tiempos de alistamiento.

### Fase 3: Desarrollo de los aplicativos: Esquema del diseño en la lista de candidatos

Se utilizó un algoritmo Búsqueda Tabú con intercambio entre trabajos vecinos para organizarlos luego de correr una heurística Random en cuanto a la asignación de operaciones en las máquinas que genera una secuenciación determinada, lo que la solución inicial para resolver el problema de asignación de trabajo en un ambiente *Flexible Open Shop - Job Shop* de producción textil enfocado a la producción de 5 tipos de chaquetas estandarizadas.

## 5. Consideraciones Diseño

Para resolver este caso se tienen en cuenta los *Setups* dependientes de la secuencia; posteriormente se resuelve este problema y la secuencia resultante es dividida entre el número de máquinas que conforman el centro de trabajo; tal procedimiento da como resultado la asignación de operaciones a las máquinas y luego, por medio de un modelo de algoritmo Búsqueda Tabú se optimizan los tamaños de las mismas buscando eliminar los tiempos ociosos de producción, por otro lado, las operaciones no siguen una secuencia definida, cada una adopta una línea diferente e independiente de las demás al programarse en las máquinas por esto Flexible Open Shop y al final el ensamble Flexible Job Shop.

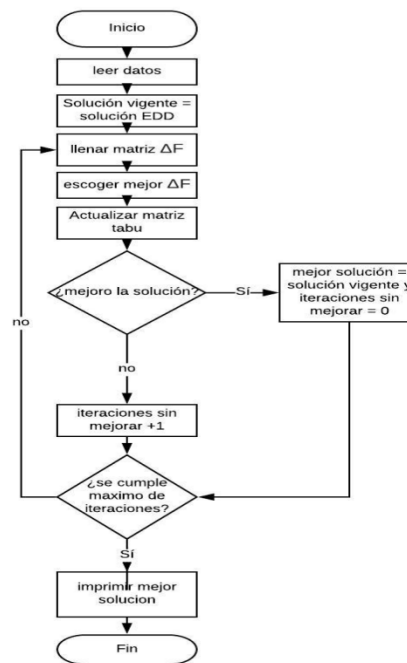
Se escogió adicional del aplicativo con la FO de minimización de tardanza, la FO de minimización del *makespan* con el fin de revisar el rendimiento del aplicativo a implementar, comparando ambos algoritmos para evidenciar su rendimiento a través de los resultados obtenidos en el próximo capítulo.

- FO Tardanza:  $\text{Min } T$
- $1/n T = \text{sum} (\text{Max} (0, C_i - D_i))$
- FO Makespan:  $\text{Min Max } C_i$

### Descripción del algoritmo Búsqueda Tabú

- Se construye una solución inicial usando una heurística con regla de despacho EDD, la heurística asigna aleatoriamente las operaciones en las máquinas.
- Se declara como iteración=0, valor de solución inicial.
- Se calcula la ruta de las operaciones de acuerdo a la regla EDD, se aplica el Tabú en el intercambio con vecinos y se obtiene un resultado que minimiza la tardanza.
- Si el valor de la nueva solución es mejor que la anterior, se guarda este nuevo valor en la lista y se sigue iterando.
- Si no hay trabajos tardíos o se llega a las 10 iteraciones, se deja de iterar.
- Cuando el criterio del nuevo ruteo se cumple: Se evalúa la lista Tabú y se escoge la asignación de operaciones que más se acerca a la región factible “menor tardanza”.

Diagrama 5 Búsqueda Tabú (Delgado, Guerrero 2018).



### Instancia 1: Inicialización del algoritmo

Leer datos

Se define al ciclo en ciclo= 1 para iniciar el contador en la heurística inicial El ciclo del Tabú se define  $Tabú=0$  y se inicia la lista  $Tabú$

### Instancia 2: Se genera la solución inicial

Se inicia la solución tomando el método EDD y se obtiene la solución inicial

### Instancia 3: Iteraciones

Se comienza a iterar en el Tabú, donde se llena la matriz  $\Delta F$ , se intercambia en el vector de orden de trabajos por la regla EDD, el Tabú intercambia la posición de la operación  $i$ , con la operación  $j$  del mismo pool de operaciones. Se busca el mejor  $\Delta F$  y se actualiza a la mejor solución.

Si el ciclo actual es igual a máximo número de iteraciones (10) ir a instancia 8 de lo contrario continúe con instancia 4.

**Instancia 4:**

Guardar el vecino con menor fecha de terminación y que cumple con la mejor FO. Guardar la secuencia de operaciones y trabajos en cada máquina como la actual. El objetivo es no volver a recorrer rutas pasadas con mayor tiempo ocioso.

**Instancia 5:**

Revisar la lista Tabú para encontrar el mejor vecino, si no es el mejor, seguir al paso 6. Tomar el siguiente vecino disponible, guardar como el mejor vecino y comprobar si hay otro vecino con menor tiempo de ciclo.

Encontrar los vecinos con el menor tiempo de ciclo y cambiarlo en la nueva lista Tabú. Guardar la nueva lista creada con el mejor vecino con menor tiempo de ciclo.

Se actualiza esta lista como la actual y se buscan nuevos vecinos para comparar.

**Instancia 6:**

Guardar la lista Tabú como la mejor secuenciación de vecinos.

El tamaño de esta lista es de 10 por lo que prohíbe repetir los mismos intercambios por 10 iteraciones.

**Instancia 7:**

Ciclo = ciclo+1; ir al paso 3 hasta completar el máximo de ciclos.

**Instancia 8:**

FO1: Encontrar la secuencia con menor tardanza y guardarla en la lista.

**Instancia 9:**

FO1: Menor tardanza.

Se tiene una variable que guarda la última hora en que está disponible la máquina  $i$ , luego con la regla FIFO *non delay* se distribuyen las operaciones en las máquinas. Logrando disminuir tiempos ociosos con el objetivo de llevarlos a 0.

**Pruebas de rendimiento**

Las pruebas realizadas evidenciadas en el documento representan las instancias en que la regla EDD y el algoritmo Búsqueda Tabú efectivamente ayudan a reducir la tardanza promedio en las órdenes.

Se utilizaron 3 computadores distintos con características similares (solo varía la velocidad normal de 1,7 GHz a 1,8 GHz) del PC de torre que utiliza el jefe de producción de Inversiones Sun Shine S.A.S. para revisar el rendimiento del aplicativo con parámetros iguales, se encontró que la variación en el tiempo cronometrado de corrida del algoritmo de un PC a otro es de 7 segundos. Además, es una interfaz amigable que se puede programar intuitivamente y es de fácil empalme en caso de rotación de personal en la empresa.

Por medio del documento donde se explican los parámetros de entrada para la interfaz y la interpretación de la solución resultante, además se hace un refuerzo con una capacitación programada al equipo de producción de Inversiones Sun Shine S.A.S. Al ingresar los datos a la interfaz y estos no coincidan con el formato establecido, se generan mensajes de advertencia informando sobre la forma correcta de uso. Debido al gran tiempo de cómputo del algoritmo, el tiempo máximo estimado para programar fechas de entrega se actualiza al día en que se usa con un horizonte de tiempo máximo de 30 días.

Los parámetros de entrada reciben la cantidad demanda por cada tipo de orden y la fecha acordada con el cliente para entregar el producto. El objetivo es reducir la tardanza promedio, por tanto, luego se comparan las soluciones que arroja el aplicativo vs la heurística de con los mismos datos de una programación pasada y la forma en que la desarrollan antes de establecer el taller de producción, así se pueden medir indicadores de desempeño en *makespan*, tardanza promedio y tiempos ociosos. Se diseñó y desarrolló la interfaz teniendo en cuenta los requerimientos de la heurística para programar las órdenes, así que cuando el jefe de producción requiera programar las órdenes, la interfaz solo le pedirá el tipo de chaqueta programar, la cantidad demandada por el cliente y la fecha pactada de entrega. El algoritmo se actualiza diariamente con la fecha actual.

Se diseñó y desarrolló la interfaz teniendo en cuenta los requerimientos de la heurística para programar las órdenes, así que cuando el Jefe de producción requiera programar las órdenes, la interfaz solo le pedirá el tipo de chaqueta programar, la cantidad demandada por el cliente y la fecha pactada de entrega. El algoritmo se actualiza diariamente con la fecha actual.

El resultado de la interfaz luego de aplicar el algoritmo o heurística para que lo interprete el operador se imprime de la siguiente forma:

Diagrama 6 Cuadro ejemplo de los datos requeridos por la interfaz. (Delgado, Guerrero 2018)

Producto	Cantidad	Fecha	+
Acolchada	0	2/9/2019	

Hora Inicio	7
Hora Fin	18
Duracion	
Desayuno	600
Almuerzo	3600

ID Orden	Nombre	Cantidad	Entrega
1	Camuflada	38	2/09/2019
2	Acolchada	45	2/09/2019
3	Multicolor	28	2/09/2019
4	Rompe Vientos	35	2/09/2019
5	Acolchada	42	2/09/2019


  

Limpiar

EDD

ATC

Tabu



La calidad del aplicativo desarrollado está diseñada bajo unas características esenciales de calidad de un software:

- **Adecuación funcional:** el aplicativo está diseñado teniendo en cuenta que no necesitarán modificaciones, mejoras o cambios durante su periodo de funcionamiento El sistema debe ejecutarse sobre unos computadores estándar, esto hace que nuestro sistema no pueda ser demasiado exigente con los recursos hardware. Puede trabajar con cualquier sistema operativo, aunque deberá tener el paquete de Office Profesional 2017
- **Seguridad:** Será un sistema integró que se comunicará con una sola base de datos alojada en el propio sistema. Ha dicho sistema se podrá acceder gente del entorno de la empresa a la cual se la dotará de un usuario y una contraseña dándole al sistema unas características de autenticidad.
- **Fiabilidad:** El aplicativo presenta una fiabilidad alta ya que, sólo presentaría problemas en el sistema de tipo técnico, ya que en lo que se refiere a tener problemas software con toda seguridad no tendremos ya que es un sistema que utiliza pocos recursos.
- **Compatibilidad:** el sistema está ideado para funcionar sobre un sistema operativo Windows, ya que correrá en una decodificación VBA, aunque no presenta ninguna restricción con el sistema operativo,
- **Portabilidad:** Debido a que el sistema no es exigente a la hora de utilizar recursos hardware, este sistema podrá ser ejecutado en cualquier computadora estándar como puede ser un ordenador portátil o un ordenador de escritorio. Este sistema está diseñado para que sea totalmente portable a cualquier sistema operativo que disponga del paquete de Office Profesional 2017.

El siguiente diagrama muestra: (ID de la orden secuenciada) | Número de la operación secuenciada | nombre del Subproceso | ID Proceso, de esta forma el jefe de producción podrá interpretar los resultados para asignar las operaciones

Diagrama 7 Ejemplo de solución generada por el aplicativo (Delgado, Guerrero 2018)

Día 1	(1)11 - Enguatar Mangas - 11	(5)143 - Enguatar Mangas - 11	(1)115 - Marcar y Pegar Ribete - 41	(1)127 - Unir y respuntar - 71	(1)131 - Cerrar Forros - 91
Maquina 1	(1)12 - Pegar Mangas - 11	(1)10 - Pegar Bolsillos - 41	(1)21 - Respuntar - 51	(1)126 - Enguatar y refilar cuello - 71	(1)128 - Pegar cuello - 71
Maquina 2	(1)13 - Cerrar Mangas - 11	(1)18 - Entalegar - 31	(1)111 - Parche - 41	(1)124 - Unir - 61	(1)132 - Medir para Pegar - 91
Maquina 3	(1)14 - Pegar Mangas - 21	(1)112 - Tapas Refilar Voltrear - 41	(1)117 - Embolsillar - 41	(1)120 - Medir para Pegar - 51	(1)123 - Preparar - 61
Maquina 4	(1)15 - Cerrar Mangas - 21	(1)114 - Pegar Tapas - 41	(1)116 - Picar Ribete - 41	(1)122 - Pegar a Manga - 51	(1)136 - Bolsillo de ribete con cremallera - 12
Maquina 5	(1)16 - Respuntar - 21	(1)113 - Respuntar - 41	(1)118 - Respuntar y Cerrar Bolsillos - 41	(2)142 - Respuntar - 21	(2)150 - Pegar Tapas - 41
Maquina 6	(1)17 - Preparar Ribete - 31	(1)119 - Cerrar con Guata - 51	(1)125 - Respuntar - 61	(1)129 - Unir Hombros - 81	(1)135 - Cerrar con guata - 91
Día 2					
Maquina 1	(2)158 - Pegar a Manga - 51	(2)171 - Cerrar con guata - 91	(3)178 - Respuntar - 21	(3)187 - Marcar y Pegar Ribete - 41	(3)198 - Enguatar y refilar cuello - 71
Maquina 2	(2)159 - Preparar - 61	(2)168 - Medir para Pegar - 91	(3)173 - Enguatar Mangas - 11	(3)179 - Preparar Ribete - 31	(3)128 - Pegar cuello - 71
Maquina 3	(2)162 - Enguatar y refilar cuello - 71	(2)165 - Unir Hombros - 81	(2)172 - Costura en Rombos - 111	(3)177 - Cerrar Mangas - 21	(3)194 - Pegar a Manga - 51
Maquina 4	(2)163 - Unir y respuntar - 71	(2)164 - Pegar cuello - 71	(2)169 - Respuntar - 91	(3)176 - Pegar Mangas - 21	(3)186 - Ribete de colores - 141
Maquina 5	(2)154 - Respuntar y Cerrar Bolsillos - 41	(3)175 - Cerrar Mangas - 11	(3)180 - Entalegar - 31	(3)182 - Pegar Bolsillos - 41	(3)184 - Tapas Refilar Voltrear - 41
Maquina 6	(2)161 - Respuntar - 61	(2)166 - Pegar Cuello - 81	(2)170 - Pegar a Manga - 91	(3)183 - Parche - 41	(3)193 - Respuntar - 51
Maquina 7	(2)160 - Unir - 61	(2)167 - Cerrar Forros - 91	(3)174 - Pegar Mangas - 11	(3)181 - Doblardilar Bolsillos - 41	(3)195 - Preparar - 61
					(3)185 - Respuntar - 41



Tabla 3 Impresión de Gantt para Jefe de producción (regla ATC ejemplo) (Delgado, Guerrero 2018).

Minuto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Maquina 1	orden1(35)	orden1(35)	orden1(35)	orden1(35)	orden1(35)	orden1(35)	orden1(35)	orden1(35)	orden1(35)	orden2(49)	orden2(49)	orden2(49)	orden2(49)
Maquina 2	orden1(36)	orden1(36)	orden1(36)	orden1(36)	orden1(36)	orden1(36)	orden1(36)	orden1(36)	orden1(36)	orden1(36)	orden1(36)	orden1(36)	orden1(36)
Maquina 3	orden1(1)	orden1(1)	orden1(1)	orden1(1)	orden1(1)	orden1(1)	orden1(1)	orden1(1)	orden1(1)	orden1(1)	orden1(1)	orden1(1)	orden1(1)
Maquina 4	orden1(2)	orden1(2)	orden1(2)	orden1(2)	orden1(2)	orden1(2)	orden1(2)	orden1(2)	orden1(2)	orden1(2)	orden1(2)	orden1(2)	orden1(2)

Cada vez que se corre una solución desde la interfaz, automáticamente se imprime un *Gantt* como guía para el jefe de producción y así saber en qué minuto debe programar cada operación en cada máquina de la orden indicada.

**Para la FO**

Se penaliza la función objetivo cuando hay incumplimiento.

La minimización de la tardanza promedio se define de la siguiente forma:

$$\text{Min } T = \sum_{i=1}^n \max(0, C_i - D_i)$$

Se define T como el tiempo de tardanza, es decir el tiempo que se entrega un trabajo después de la fecha estipulada, la idea del algoritmo será llevar este valor a 0 o lo más cercano. De esta forma, se consiguen dos diseños aplicables para el problema propuesto: el primero minimiza la tardanza promedio de entrega del producto y el segundo minimizar el *makespan*. A partir de estos dos diseños, se realizan los respectivos análisis y comparaciones para obtener el mejor aplicativo para la empresa, según el objetivo general propuesto.

**6. Resultados Fase 4: Análisis**

**Resultados obtenidos a partir de los aplicativos desarrollados:**

Los resultados obtenidos en el análisis de reglas de despacho se presentan a continuación:

La siguiente tabla representa el tiempo en segundos que varía una regla frente a otra en la heurística simple que organiza de manera aleatoria las operaciones en las máquinas implementando cada regla de despacho especificada. Con 3 órdenes de 60 unidades de chaquetas de distinto tipo con fechas de entregas separadas a dos días de por medio desde la fecha de inicio.

Diagrama 8 Comparación reglas de despacho (Delgado, Guerrero 2018).

Regla	Makespan Segs	Tardanza promedio Segs
FIFO	152,782	1,983
SPT	152,318	1,876
EDD	151,387	1,520

Teniendo en cuenta que nuestro objetivo es minimizar la tardanza, podemos evidenciar que la regla EDD es mejor frente a FIFO en un 30,46%, y 23, 42% frente a SPT, lo cual demuestra que la regla EDD es la mejor opción de regla de despacho para implementar en nuestro algoritmo. En este caso exclusivamente analizamos reglas de despacho estáticas para analizar entre ellas la mejor opción a comparar con la dinámica ATC con mejores resultados en los papers.

El programa corrió a en un hardware de 6 GB de RAM un procesador de 1.7GHz con tecnología Turbo Boost hasta 2,6 GHz Intel Core i5-3317U, se logra obtener la solución en menos de 3 minutos de ejecución el programa incluyendo 5 órdenes de producción de Chaquetas programadas en el día. Se generaron soluciones con cada uno de los aplicativos desarrollados, aplicando la regla de despacho EDD y teniendo en cuenta que eran órdenes que contaban con la materia prima disponible y tenían una fecha de entrega próxima. Se consideró la siguiente orden para esta evaluación de desempeño del aplicativo:

Diagrama 9 órdenes de producción (Delgado, Guerrero 2018).

Orden	Día Fecha Estimada	Cantidad	Tipo de chaqueta
1	9 Enero	38	Camuflada
2	9 Enero	45	Acolchada
3	9 Enero	28	Multicolor
4	10 Enero	35	Rompevientos
5	10 Enero	42	Acolchada

Diagrama 10 Metaheurística Tabú resolviendo FO Makespan- Día 1 (Delgado, Guerrero 2018).

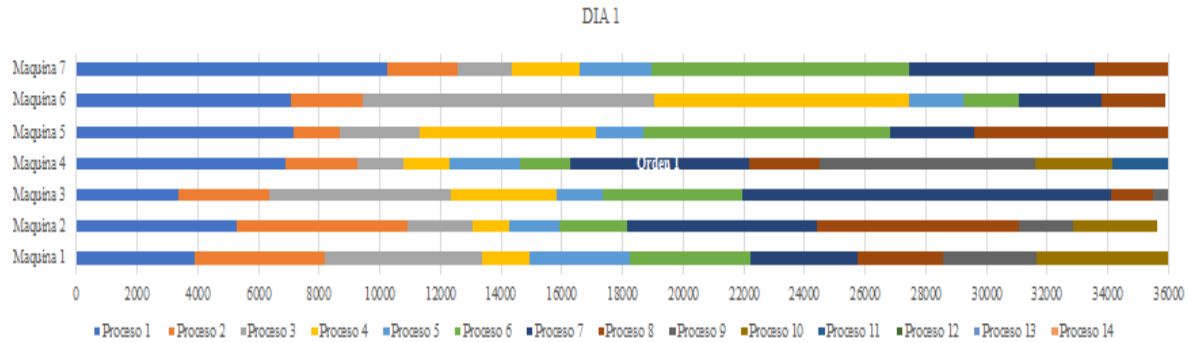


Diagrama 11 Metaheurística Tabú resolviendo FO Makespan- Día 2 (Delgado, Guerrero 2018).

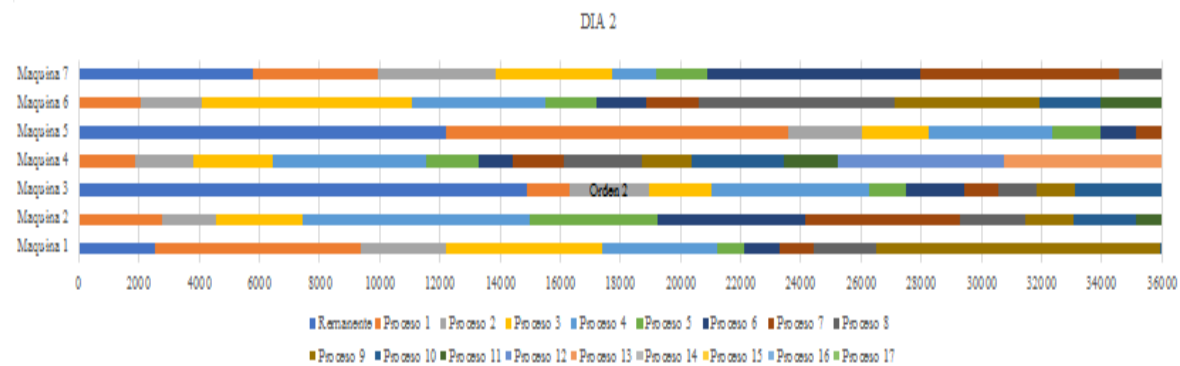
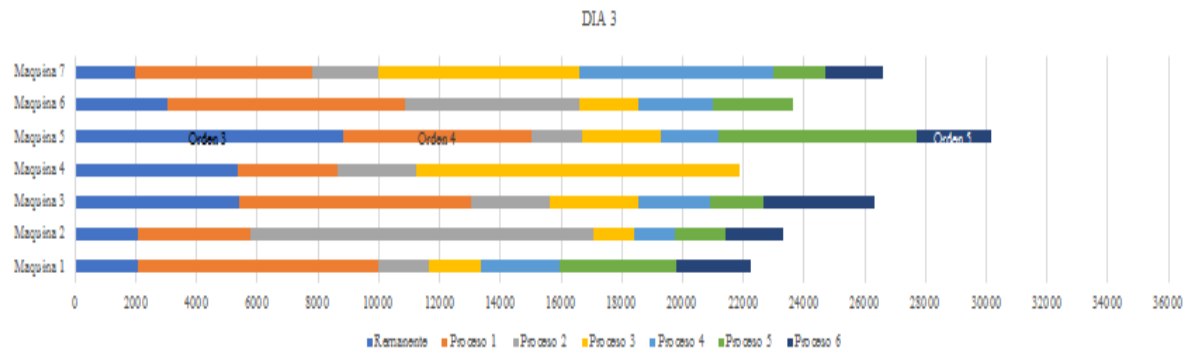


Diagrama 12 Metaheurística Tabú resolviendo FO Makespan- Día 3 (Delgado, Guerrero 2018).



Este Gantt representa los resultados generados por el aplicativo que tiene como función objetivo reducir el makespan, por lo cual el Tabú busca iterar con el propósito llevar los tiempos ociosos a 0 y organizar las operaciones de tal forma que el tiempo de terminación de la última orden sea el menor. Se puede evidenciar un *makespan* de 96,070 Segundos y una secuencia generada que incluso evidencia el tiempo de terminación de 3 de sus órdenes en el último día.

Diagrama 13 Aplicativo Minimizar Tardanza Día 1 (Delgado, Guerrero 2018)

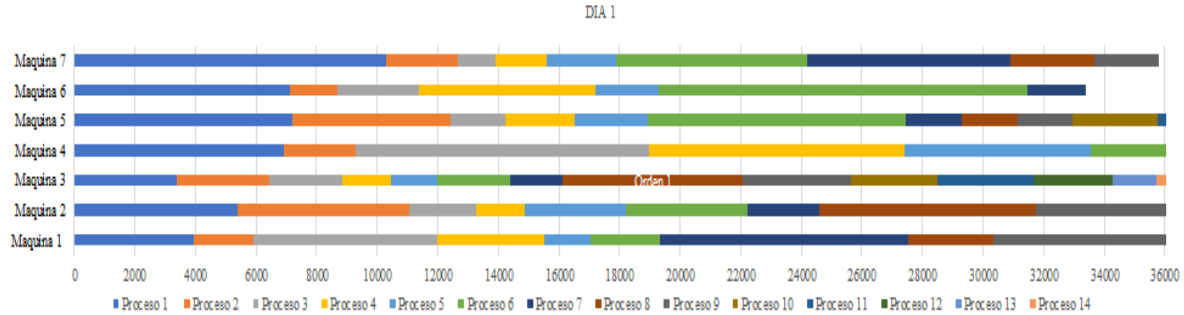


Diagrama 14 Aplicativo Minimizar Tardanza Día 2 (Delgado, Guerrero 2018)

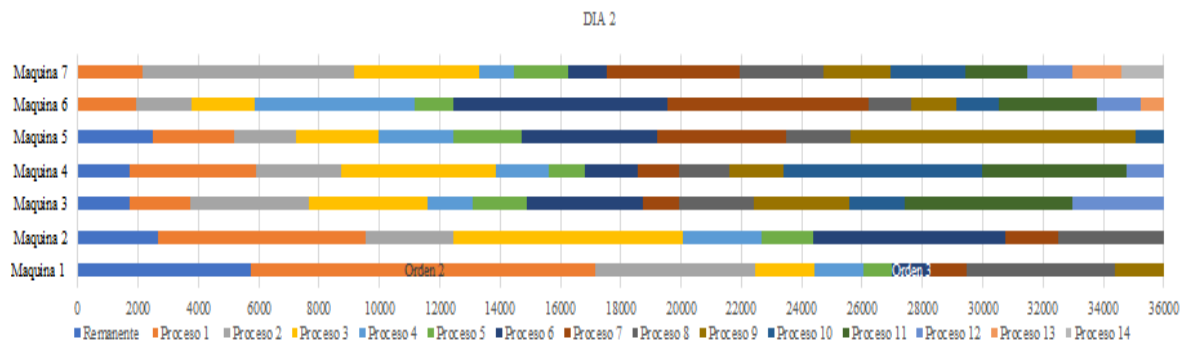
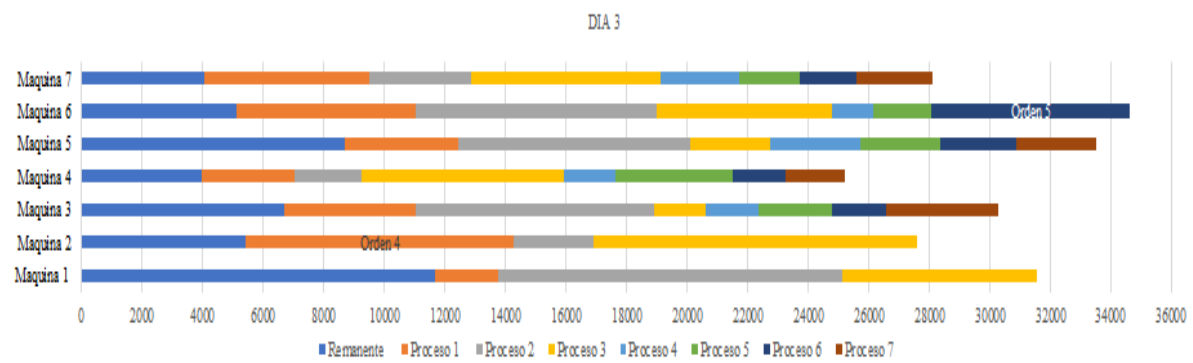
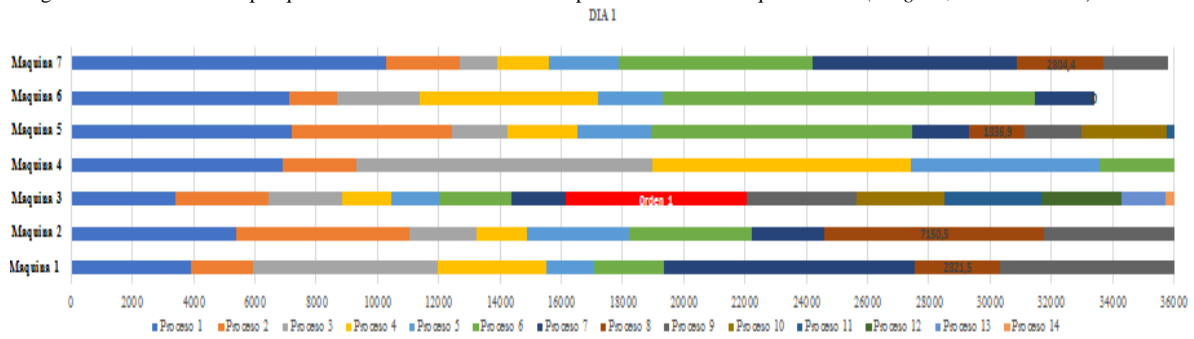


Diagrama 15 Aplicativo Minimizar Tardanza Día 3 (Delgado, Guerrero 2018)



Este Gantt representa los resultados generados por el aplicativo que tiene como función objetivo reducir el tiempo de tardanza promedio de las órdenes, por lo cual el Tabú iterar con el fin de secuenciar operaciones para lograr terminar las órdenes lo antes posible a la fecha estipulada. Se puede evidenciar que no hay órdenes tardías, por lo cual el tiempo promedio de tardanza es 0 segundos.

Diagrama 16 Heurística simple que secuencia aleatoriamente las operaciones en las máquinas Día 1 (Delgado, Guerrero 2018)



En la interpretación del diagrama de Gantt, dependiendo de la magnitud de la orden a producir se analizó el tiempo de finalización de la última operación de la chaqueta por orden, identificando el día y la máquina en la cual termina. En este caso en el día 1, resaltamos que la orden 1 se acabó en la máquina 3, resaltando la casilla con color rojo o en caso contrario etiquetando la casilla con el número de la orden que se finalizó, por otro lado en algunos intervalos de duración en el diagrama se etiquetó los datos que representan la duración del proceso en segundos.

Diagrama 17 Heurística simple que secuencia aleatoriamente las operaciones en las máquinas Día 2 (Delgado, Guerrero 2018)

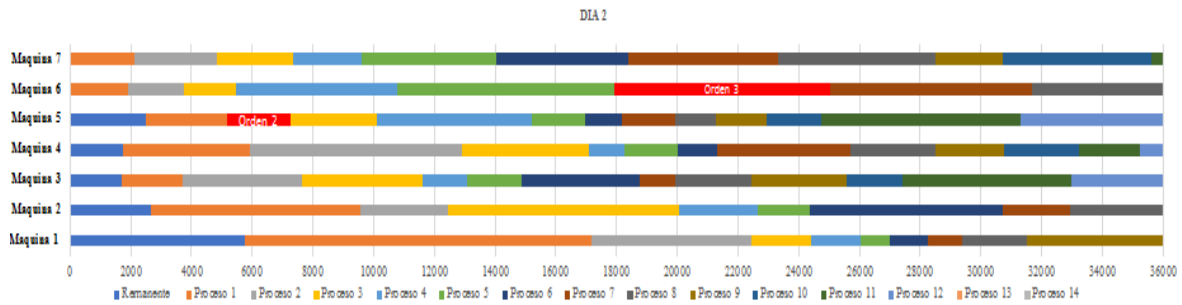
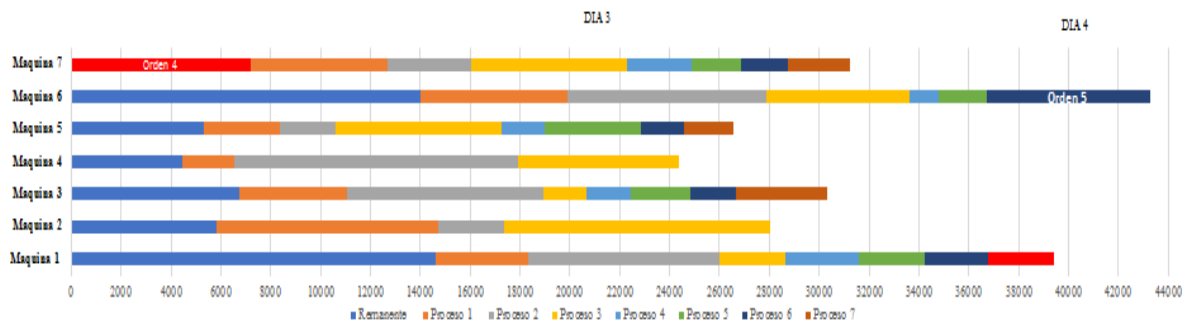


Diagrama 15 Heurística simple que secuencia aleatoriamente las operaciones en las máquinas Día 3 (Delgado, Guerrero 2018)



Este Gantt representa los resultados generados por la heurística que tiene como objetivos secuenciar operaciones en máquinas de manera aleatoria, se puede evidenciar que hay una orden tardía, con un promedio de tardanza de 1,587 Segundos y un *makespan* de 115,234 Segundos.

Diagrama 18 los indicadores de desempeño más relevantes en cada aplicativo (Delgado, Guerrero 2018)

Orden	Tardanza promedio	Tiempo ocioso	Makespan
FO Tardanza promedio	0 Seg	2,678 Seg	106,342 Seg
FO Makespan	567 Seg	498 Seg	96,070 Seg
Heurística	1,587 Seg	2,369 Seg	115,234 Seg

La evidencia mostrada en la tabla comparativa nos demuestra la eficiencia que tiene la implementación de un aplicativo que minimiza la tardanza promedio en las órdenes, puesto que logra llevarla a 0 segundos, lo que representa frente a la heurística simple una efectividad del 100% en este caso, también se puede comprobar que la minimización del *makespan* es un 64% más efectiva y tiene mejor indicadores que la heurística.

Por ende, a pesar de no tener el tiempo ocioso más bajo (11% peor) o el mejor *makespan* (10% mejor), es el aplicativo que mejor rendimiento evidencia para nuestro objetivo principal de reducir el tiempo de tardanza promedio.

Tabla 4 Parametrización de la Búsqueda Tabú (Delgado, Guerrero 2018).

Muestra	logitud lista tabu	max iteraciones	tiempo	FO (días)
1	10	10	90,69	0,2
2	10	20	107,2	0,2
3	10	30	122,5	0,2
4	10	40	134,1	0,2
5	10	50	145,2	0,2

Muestra	logitud lista tabu	max iteraciones	tiempo	FO (días)
1	15	10	100,8	1
2	15	20	110,2	1
3	15	30	125,9	1
4	15	40	136,7	1
5	15	50	147,6	1

Muestra	logitud lista tabu	max iteraciones	tiempo	FO (días)
1	20	10	94,65	0,6
2	20	20	102,5	0,6
3	20	30	123,1	0,6
4	20	40	132	0,6
5	20	50	143,8	0,6

Muestra	logitud lista tabu	max iteraciones	tiempo	FO (días)
1	25	10	100,3	2,5
2	25	20	113,5	2,5
3	25	30	126,7	2,5
4	25	40	138,5	2,5
5	25	50	156,6	2,5

- Se hicieron 4 instancias de problemas, se probó el tabú con distintos valores de lista tabú y número de iteraciones.
- Se concluye que con 10 iteraciones sin mejorar y lista tabú de tamaño 5 es suficiente para que el algoritmo opere con una solución eficiente.

Tabla 5. Resultados eficiencia del tabú frente a heurística con reglas de despacho (Delgado, Guerrero 2018).

Tamaño orden	Instancia	EDD(horas)	ATC(horas)	TABU(horas)	EDD VS TABU	ATC VS TABU
3	1	3,33	3,16	2,28	46%	39%
	2	3,87	3,56	2,56	51%	39%
	3	4,67	4,23	3,67	27%	15%
5	1	7,3	6,98	6,23	17%	12%
	2	8,2	7,78	7,12	15%	9%
	3	6,89	6,56	5,92	16%	11%
10	1	11,45	10,78	10,2	12%	6%
	2	12,78	12,54	11,89	7%	5%
	3	15,34	14,29	13,87	11%	3%

Se considera un escenario con 4 máquinas (simulando el estado inicial de la empresa) dedicadas exclusivamente a la producción de chaquetas, anexos los Excel con cada instancia, las horas representadas muestran la tardanza, se evidencia que con un proceso estandarizado se reduce de 2,1 días en pedidos promedio de 5 órdenes a 1 día con promedio de 6,5 horas de tardanza. Ver anexos en formato Excel para macros (.xlsm) con cada instancia.

Se corren 9 instancias con órdenes distintas del libro de históricos de la empresa, para comparar el criterio de aspiración con cada regla de despacho, se tomó EDD como la regla actual de la empresa, el ATC como una regla dinámica y se comparó con el Tabú para obtener los resultados.

Se evidencia que:

- El Tabú vs EDD mejoró en promedio en las 9 instancias en un 23% con un mínimo de 7% y un máximo de 51%.
- El Tabú vs ATC mejoró en promedio en las 9 instancias en un 15% con un mínimo de 3% y un máximo de 39%.

## 7. Conclusiones y recomendaciones

Con respecto al enfoque jerárquico, se puede concluir que la secuenciación para resolver el problema del *Flexible Open Shop - Job Shop* tuvo el impacto esperado, lo cual es realmente significativo, más si se observa que en la literatura existente no se había planteado hasta el momento un enfoque jerárquico abordado desde una Búsqueda Tabú ya que se considera un problema NP-Hard, es decir, que las iteraciones que puede llegar a realizar para optimizar la asignación de órdenes y secuenciación pueden volverse interminables intentando encontrar el punto más óptimo. Otro elemento relevante es la efectividad del modelo al descomponer el problema en una matriz del número de operaciones para comparar los arcos entre vecinos que, debido, a su tamaño, son más fáciles de resolver con métodos menos exigentes en cuanto a tiempo y requerimientos computacionales, lo cual sugiere mayor facilidad para implementación práctica.

Se encontró que la empresa pasa de un estado inicial al programar las operaciones de cada orden manualmente a las máquinas y definir el módulo de trabajo a un módulo definido con un aplicativo que genera la mejor asignación posible secuenciada y detallada que imprime el algoritmo metaheurístico de Búsqueda Tabú, lo cual representa un ahorro en tiempo de programación de las máquinas de promedio de 30 min al día para la jefa de producción. (2-3 minutos de solución esperada en aplicativo vs 35 a 45 minutos asignando manualmente)

- En conclusión, se pudo experimentar un cambio positivo en la forma en que se asignan las operaciones en el área de confección de la empresa Inversiones Sun Shine S.A.S, lo cual demuestra que la evidencia en la literatura acerca del rendimiento de la metaheurística de Búsqueda Tabú son de confianza y se pueden seguir implementando para resolver el tipo de problema combinado *Flexible Job Shop-Open Shop*.
- Los resultados obtenidos fueron más que satisfactorios para hechos prácticos puesto que cumple con el objetivo de reducir la tardanza promedio en las instancias simuladas que consideraban uno de los casos históricos más severos que se tuvo cuando aún no tenían implementado un módulo de producción.
- Se recomienda estandarizar los procesos de los demás productos de la compañía con el fin de lograr implementar un aplicativo similar para mejorar indicadores de desempeño.
- La interfaz tuvo un buen apogeo, puesto que su practicidad de uso y fácil entendimiento lo hace intuitivo y confiable al revisar registros
- Es importante que se estén actualizando los parámetros en caso de que la empresa decida ampliar su módulo de producción o implementar nuevas tecnologías que mejores los tiempos de producción.
- Se recomienda en una próxima investigación plantear un modelo matemático de programación lineal para evaluar la funcionalidad de los métodos y ver qué tan lejos están del óptimo global problema y otras metaheurísticas como PSO Y algoritmos genéticos.

## 8. Glosario

**Algoritmo:** Un algoritmo es un conjunto ordenado y finito de operaciones que permiten solucionar un problema. Para la teoría de la complejidad computacional, la capacidad de un algoritmo para resolver un

**BPR:** *Business Process Re-Engineering*, también conocido como el enfoque de reingeniería de procesos de negocios, el cual está basado en la mezcla de un gran número de ideas que han estado actuales en la gestión y programación de las operaciones durante mucho tiempo, por ejemplo: diagrama de proceso, concepto de *Just In Time*. (Solé, 2012).

**Búsqueda Tabú:** consiste en que mientras los otros metaheurísticos guardan información sobre la mejor solución encontrada, la Búsqueda Tabú mantiene información almacenada sobre las últimas soluciones visitadas con el fin de usarla para guiar la búsqueda y evitar que el algoritmo se mueva a soluciones visitadas recientemente, por lo que se dice que la Búsqueda Tabú tiene memoria (Aarts y Lenstra, 2003). En este sentido se dice que hay cierto aprendizaje y que la búsqueda es inteligente (Martí, 2003).

**Flexible Job Shop:** Surge como una generalización del problema del *Job Shop* y permite optimizar el uso de los recursos

(máquinas) con mayor flexibilidad, ya que cada máquina puede realizar más de una operación. (Durán, Rosa & Daza, 2011)

**Job Shop:** Dado un sistema con un conjunto de  $m$  máquinas, y un conjunto de  $n$  trabajos independientes. Considerando que cada trabajo está compuesto por una secuencia de operaciones cada una de las cuales debe ser procesada en una máquina. (Durán, Rosa & Daza, 2011).

**Lean Manufacturing:** es la persecución de una mejora del sistema de fabricación mediante la eliminación del desperdicio, entendido como todas aquellas acciones que no aporta valor al producto y por las cuales el cliente no está dispuesto a pagar. (Rajadell, Sánchez, 2010).

**Makespan:** Dado que el *makespan* ( $C_{max}$ ) es el máximo tiempo de terminación de todos los trabajos, la función objetivo ( $\text{Min } C_{Max}$ ) debe estar relacionada con los tiempos de terminación de todos los trabajos en la última etapa del proceso. (Tupia & Mauricio, 2004)

**Metaheurística:** se trata de combinar inteligentemente diversas técnicas para explorar el espacio de solución (Yepes, 2015).

**Open Shop:** En estos ambientes de trabajo, cada uno de los  $N$  trabajos debe pasar por cada una de las  $M$  máquinas sin importar el orden con la característica de ser arbitrario, donde las tareas a realizar no siguen una secuencia definida, cada una adopta una línea diferente e independiente de las demás.

**Pespunte:** Labor de costura que consiste en volver la aguja hacia atrás después de cada punto para meter la hebra en el mismo sitio por donde se pasó antes, de modo que las puntadas queden unidades. *Gran Diccionario de la Lengua Española*. (2016) problema la determina el número de operaciones aritméticas necesarias para su ejecución. (Vélez, Mario César, & Montoya, José Alejandro, 2007)

**Productividad:** es una medida de eficiencia que se relaciona con la producción. Conceptualmente, puede definirse como la interrelación entre los ingresos, el proceso de conversión y los egresos.  $\text{Productividad} = \text{egresos} / \text{ingresos}$ . (Tejada, 2007)

**Sistema LPDS:** hace referencia a un modelo de gestión de proyectos (*Lean Project Delivery System*) o sistema de entrega de proyectos *Lean*, que se entiende como el sistema operativo para la gestión del trabajo del proyecto. (Porras, Sánchez, Galvis, 2014).

**TQM:** según la norma ISO 8402:1994 es la forma de gestión de una organización, centrado en la calidad, basado en la participación de todos sus miembros y que pretende un éxito a largo plazo mediante la satisfacción del cliente y beneficios para todos los miembros de la organización y para la sociedad (Gómez Vilar Tejero, 2003).

**Tardanza:** Retraso o empleo de más tiempo del necesario o del normal en hacer una cosa. Demora, dilación, lentitud, detención. Referido a personas o a cosas (proyectos, acciones, planes, etc.).

## Referencias

1. González, M.C. (2017). *Sector textil y de confecciones en cuidados intensivos*. Recuperado de <http://www.portafolio.co/negocios/la-crisis-del-sector-textil-y-de-confecciones-en-colombia-508710>
2. Minicomercio, I.T. (2017). *Mirada al sector textil*. Recuperado de [http://www.tlc.gov.co/publicaciones/12780/mirada\\_al\\_sector\\_textil](http://www.tlc.gov.co/publicaciones/12780/mirada_al_sector_textil)
3. Moreno, J.P. (2016). *Sector textil en Colombia: un análisis de las importaciones y exportaciones entre los años 2008 a 2014*. Recuperado de <http://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/10654/15243/3/MorenoVelasquezJuanPablo.2016.pdf.pdf>
4. Pulido, Daza, Bejarano, D. C.Y. (2011). *Propuesta de mejoramiento del sistema productivo de la empresa ingenio y moda S.A.S.* Recuperado de [file:///C:/Users/A/Downloads/INFORME%20INGENIO%20Y%20MODA%20S.A.S.%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/A/Downloads/INFORME%20INGENIO%20Y%20MODA%20S.A.S.%20(1).pdf)
5. Maldonado, D. I. B., & Cadavid, L. R. (2014). Cómo una microempresa logró un desarrollo de productos ágil y generador de valor empleando Lean. *Estudios Gerenciales*, 30(130), 40-47.
6. Arrieta, J. G., MUÑOZ, J. D., ECHEVERRI, A., & GUTIERREZ, S. (2011). Aplicación *Lean Manufacturing* en la Industria Colombiana. Revisión de Literatura en Tesis y Proyectos de Grado. *Revista Virtual Pro. [En línea]*. Edición, 132.
7. Arrieta Posada, J. G., Botero Herrera, V. E., Martínez, R., & Jimena, M. (2010). Benchmarking sobre *Manufactura Esbelta (Lean Manufacturing)* en el sector de la confección en la ciudad de Medellín, Colombia. *Journal of Economics, Finance and Administrative Science*, 15(28), 141-170.
8. Tejada, A. S. (2011). *Mejoras de Lean Manufacturing en los sistemas productivos* *Ciencia y Sociedad* Recuperado de <http://www.redalyc.org/html/870/87019757005/>
9. Organización Internacional de Normalización. (2013). Recuperado de: <https://www.iso.org/standard/59586.html>
10. Rajadell, M.(ED). (2010). *Lean Manufacturing. La evidencia de una necesidad*. España: EdicionesDíaz Santos
11. Groover, M.P. (ED). (1997). *Fundamentos de Manufactura Moderna. Materiales, procesos, sistemas*. México, Prentice - hall hispanoamericana. S.A.
12. Porras, H. Sánchez, O.G. Galvis, J.A. (2014). *Filosofía Lean Construction para la gestión de proyectos de construcción* Recuperado de <http://www.unilibre.edu.co/revistaavances/avances-11/art4.pdf>
13. Solé, J. (2012). *BPR (Business process re-engineering)* Recuperado de <http://javiersole.com/?p=946>

14. Gómez, F. Vilar, J.F. Tejero, M. (ED). (2003). *Seis sigmas*. Madrid, Editorial fundación confemetal.
15. Rafael, F. (2015). *Qué significa monofásica, bifásica y trifásica?* Recuperado de <https://www.todoexpertos.com/preguntas/5wts1b5irs3ivx9j/que-es-trifasica-bifasica-y-monofasica-caracteristicas-ejemplos>.
16. Tejada, B.D. (ED). (2007). *Administración de servicios de alimentación*. Medellín, Editorial Universidad de Antioquia.
17. López-Vargas, Juan Camilo, & Arango-Marín, Jaime Antero. (2015). Algoritmo genético para reducir el *makespan* en un flow shop híbrido flexible con máquinas paralelas no relacionadas y tiempos de alistamiento dependientes de la secuencia. *Entramado*, 11(1), 250-262.
18. Mercado, R. Z. R., & Bard, J. F. (2000). Heurísticas para secuenciamiento de tareas en líneas de flujo. *Ciencia UANL*, 3(4), 420-427.
19. Geo, T. (2015). *Características de un Proceso Productivo Flow Shop (Producción en Masa)*. Recuperado de <https://www.gestiondeoperaciones.net/procesos/caracteristicas-de-un-proceso-productivo-flow-shop-produccion-en-masa/>.
20. Yepes, V. (2015). *¿qué son las Metaheurísticas?*. Recuperado de <http://optimizacionheuristica.blogs.upv.es/2015/02/22/que-son-las-Metaheuristicas/>
21. FUNDES- red de soluciones empresariales, Recuperado de: <http://www.siame.gov.co/siame/documentos/Guias>
22. SUPERINTENDENCIA DE SOCIEDADES Delegatura de Asuntos Económicos y Contables, DESEMPEÑO DEL SECTOR TEXTIL CONFECCIÓN 2008-2012 INFORME, <https://www.supersociedades.gov.co/Documents/Informe-Sector-Textil-Oct152013.pdf>
23. Jiménez, A. P. (2012). *Solución del problema de programación job shop flexible empleando el algoritmo genético de Chu-Beasley*. Recuperado de <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/3000/6585J61s.pdf;sequence=1>
24. Wang, L., Zhou, G., Xu, Y., & Liu, M. (2012). An enhanced Pareto-based artificial bee colony algorithm for the multi-objective flexible job-shop scheduling. *International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 60(9-12), 1111-1123.
25. Zhang, L., Gao, L., & Li, X. (2013). A hybrid intelligent algorithm and rescheduling technique for job shop scheduling problems with disruptions. *International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 65(5-8), 1141-1156.
26. Arango, Jaime A, Giraldo, Jaime A, & Castrillón, Omar D. (2013). Programación de Máquinas Paralelas no Relacionadas con Tiempos de Montaje dependientes de la Secuencia y Entrada Dinámica usando Algoritmos Genéticos. *Información tecnológica*, 24(3), 73-84.
27. Salazar Hornig, Eduardo, & Figueroa Morales, Belén. (2012). Tardiness minimization for the *Flexible Open Shop - Job Shop* with setup using constructive heuristics and a genetic algorithm. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 20(1), 89-98.
28. López, Juan C, Giraldo, Jaime A, & Arango, Jaime A. (2015). Reducción del Tiempo de Terminación en la Programación de la Producción de una Línea de Flujo Híbrida Flexible (HFS). *Información tecnológica*, 26(3), 157-172.
29. Holland, J. H. (1992). *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. MIT press.
30. Layme Castillo, J. L. (2017). *Aplicación de Lean Manufacturing para incrementar la Productividad en el Área de Almacén de la Red Salud SJL*, Lima, 2017.
31. Vélez, Mario César, & Montoya, José Alejandro. (2007). METAHEURÍSTICOS: UNA ALTERNATIVA PARA LA SOLUCIÓN DE PROBLEMAS COMBINATORIOS EN ADMINISTRACIÓN DE OPERACIONES. *Revista EIA*, (8), 99-115. Retrieved May 08, 2018
32. Dowsland, K. A., & Díaz, B. A. (2003). Diseño de heurística y fundamentos del recocido simulado. *Inteligencia Artificial. Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial*, 7(19), 0.
33. Medina Durán, Rosa, Pradenas Rojas, Lorena, & Parada Daza, Víctor. (2011). Un algoritmo genético para el problema de Job Shop Flexible. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 19(1), 53-61
34. Vélez, Mario César, & Montoya, José Alejandro. (2007). METAHEURÍSTICOS: UNA ALTERNATIVA PARA LA SOLUCIÓN DE PROBLEMAS COMBINATORIOS EN ADMINISTRACIÓN DE OPERACIONES. *Revista EIA*, (8), 99-115. Retrieved January 09, 2019,
35. Agudelo, R. A. B., Mejía, G., & Villalobos, J. P. C. (2007). Programación de producción en sistemas de Manufactura tipo taller con el algoritmo combinado cuello de botella móvil y búsqueda Tabú . *Ingeniería y universidad*, 11(2), 203-224.
36. Bonrostro, J. A. P., & Yusta, S. C. (2003). Estudio comparativo de diferentes estrategias Metaheurísticas para la resolución del labor scheduling problem. *Estudios de economía aplicada*, 21(3), 537-557.
37. Ramos, A. (1993). *Investigación operativa y optimización*. Universidad Pontificia Comillas.
38. Sarmiento Lepsqueur, A. (2014). Estudio del problema de ruteo de vehículos con balance de carga: Aplicación de la metaheurística Búsqueda Tabú (Master's thesis, Universidad de La Sabana).
39. Navarrete, A. M. N., & Villalobos, J. P. C. (2009). Evaluation Of Utility Functions For Minimization Of Total Weighted Tardiness In Machine Scheduling Using Grasp. *Ingeniería*, 14(2), 51-58.
40. Mayorga, H. S. A., & Pinzón, N. B. C. (2008). Diagnóstico de la madurez de los procesos en empresas medianas colombianas. *Ingeniería y Universidad*, 12(2), 245-267.
41. Gómez Niño, O. (2011). Los costos y procesos de producción, opción estratégica de productividad y competitividad en la industria de confecciones infantiles de Bucaramanga. *Revista EAN*, (70), 167-180.
42. Tupia, M., & Mauricio, D. (2004). UN algoritmo voraz para resolver el problema de la programación de tareas dependientes en máquinas diferentes. *RISI*, 1(1), 9-18.