



Trabajo de grado en modalidad de aplicación

## Minimización del número de pedidos tardíos en un proceso flow shop flexible para una empresa del sector lácteo

Lina María Barrera Prieto<sup>a,c</sup> , Laura Camila Giraldo Rico<sup>a,c</sup> , Daniel Mauricio Guerrero

Heredia<sup>a,c</sup> , María Camila Rodríguez Arango<sup>a,c</sup>

Ana Lorena Martín Aldana<sup>b,c</sup> , Carlos Eduardo Montoya Casas<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

A properly executed production scheduling brings great advantages to a company, that's why this work aims to develop it/the same for a lactose company and its main production line *liquid 1* (fermented, jellies and juices). This work seeks to design a tool that allows to establish the most efficient order in the scheduling of *liquid 1*, which is characterized by being a flexible Flow Shop with sequence dependent setup times, in order to minimize the number of late jobs. To achieve this objective, a software was created, which allows to find a proper production order. Relied on the method of Lot Streaming, where an equation was created in order to find the proper amount of sub lots each of 3000kg to achieve the desired production programming.

For the development of the software it was selected the method based on genetic algorithm heuristic, composed by five stages that were developed according to methodologies found in the literature review. In the Initialization, a random initial population was created in order to obtain a higher diversity. The selection was carried out with the Ranking selection method, where a number is assigned to each chromosome, according to their fitness. Crossover was performed using the Two-point (*see 1*) methodology, where two random points are chosen to divide the first parent, with this jobs took from the first parent the child starts, right away to complete the missing jobs that are set by the order of the second parent. The mutation was developed through the Shift methodology, which randomly selects two positions, placing the second position in the first position, meanwhile the other jobs move from its base position. Finally, the criteria for iterations without improvement was used for completion, where if the software reaches a certain number of iterations without any evidence of improvement, the tool automatically stops its execution, this number was determined with the research of Dorronsoro Diaz & Alba Torres (2006). In each of the aforementioned stages, there is a repair process, which evaluates the infeasible chromosomes and turns them into workable solutions. For this, it examines whether the chromosome shows repeated jobs, removes the duplicate jobs and evaluates those found on the chromosome to avoid assigning the same position that remains empty when the repeated cleaning has been conducted.

The methodology used for the designing process was the DMAIC, which is standardized by ISO 13053 (2011). This procedure is based on a cycle of continuous improvement, divided into five stages: Define, Measure, Analyze, Improve and Control. A graphic of this methodology is shown below:

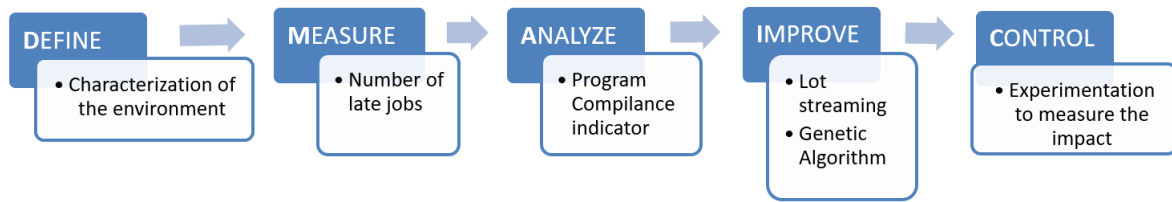


Figura 1: Methodology DMAIC

The implementation and analysis of the application had several instances, began with 5 production orders given by the company, with these, the traditional company's method of scheduling was recreated and compared with the results obtained by the software. To ensure adequate assessment of all the solutions obtained by the genetic algorithm, the performance of 54 internal production runs with a confidence level of 95% was chosen and these are used to select the best and worst-case scenario. With the foregoing, the comparison of the application against two dispatch rules was made, a static SPT (shortest processing time) and a dynamic CR (critical ratio), the results showed that the software always had a greater impact in terms of the reduction of late jobs and makespan.

At the same time, to increase the difficulty and ensure the performance of the software, 25 additional instances were made and evaluated with the same parameters mentioned before. The comparison of the results showed, that these were a positive trend in terms of what has been achieved by the software, since once more indicators such as number of late jobs and makespan improved with the program.

## 1. Justificación y planteamiento del problema

Para la industria, el refinamiento de los procesos y el mejoramiento continuo de la gestión han sido objetivos imprescindibles en la evolución del desarrollo de nuevos productos a través de un sistema productivo eficiente. Con el objetivo de mejorar los procesos, el desarrollo académico se ha apoyado en diferentes disciplinas que se enfocan en la resolución de situaciones o procesos que están sujetos a mejoras, dentro de esas disciplinas se encuentra el estudio sobre los Sistemas de Producción.

El desarrollo de este proyecto se basa en el diseño de una herramienta que permita realizar la programación de la producción (*scheduling*) para la línea líquida 1, compuesta de fermentados, jugos y gelatina, de una empresa del sector lácteo en Colombia; esta línea fue escogida por tener una producción flexible en su capacidad de fabricación para una gran cantidad de referencias, adicionalmente la herramienta desarrollada cuenta con la posibilidad de migrar a otras líneas de producción.

Después de analizar la configuración de las máquinas y las operaciones que deben ser llevadas a cabo en cada una de las referencias de esta línea de producción, se concluyó que esta puede ser catalogada como un sistema productivo de tipo *flow shop* en la cual todos los productos siguen una misma ruta y que a su vez, es flexible pues cuenta con más de una máquina para cada operación. Por otra parte, los tiempos de alistamiento de las máquinas presentan dependencia en cuanto al orden del procesamiento de las órdenes de producción, lo que nos corrobora que el sistema es "*Sequence Dependent*". Por lo anterior, se puede afirmar que el sistema a analizar es un sistema *flow shop* flexible y dependiente.

*Flow shop scheduling* es una de las configuraciones más comunes en la programación de la producción, dándole gran importancia a la ingeniería, representando la cuarta parte de los sistemas de fabricación, líneas de montaje e instalaciones de información. (Pan, Tasgetiren, Suganthan, & Chua, 2011). El proceso de producción *flow shop*, se caracteriza por dar solución a problemas de programación de la producción de  $n$  trabajos con  $m$  máquinas, donde los trabajos siguen una misma ruta de operaciones, tal como se indicó anteriormente. El objetivo principal de este proceso es encontrar la permutación adecuada ya sea que, minimice el tiempo total, cumpla con las fechas de entrega o minimice el flujo promedio de tiempo, entre otras. (Sayadi, Ramezani, & Ghaffari-Nasab, 2010). Una de las ramas de este entorno productivo es *flow shop* flexible que se da cuando la programación de la producción posee  $n$  trabajos con  $w$  estaciones, y cada una de estas posee  $m$  máquinas en paralelo e idénticas las cuales pueden ejecutar una misma operación del proceso (Azizoglu, Cakmak & Kondakci, 2001).

A su vez, se identificó que esta empresa no utiliza una metodología establecida para definir y evaluar el impacto de los lotes en los que deben ser procesadas las órdenes de producción, pues, para la realización diaria de estas órdenes se toma la demanda semanal por producto y se divide por los días establecidos para la producción de cada familia de productos, donde la familia de fermentados se realiza, en su mayoría, los días lunes, miércoles y viernes y la familia de jugos y gelatinas martes, jueves y sábados, evidenciando con lo anterior una falta de base teórica dentro de este proceso. La importancia de abordar esta problemática, conocida en la literatura como “*Lot Streaming*”, está fundamentada en el estudio realizado por Truscott (1986), donde se refleja que una correcta definición de los tamaños de lote puede conllevar a la reducción de tiempos de producción obteniendo un mejor desempeño en cuanto a cumplimientos de fechas de entrega, disminución de tiempos ociosos en las máquinas, reducción del inventario en proceso y reducción de los requisitos de almacenamiento y espacio.

De acuerdo a la literatura, al realizar *Lot Streaming* y *Scheduling*, se mejora el rendimiento global del sistema de producción acelerando el progreso de las órdenes de producción (Kalir, & Sarin, 2000). A su vez, se reduce sustancialmente el tiempo de finalización del trabajo, el inventario de producto en proceso y sus costos asociados, los requisitos de almacenamiento, el espacio provisional y los requisitos de capacidad del sistema de manejo con relación a los materiales para el programa correspondiente (Marimuthu, Ponnambalam, & Jawahar 2009).

La implementación de una herramienta que facilite la programación de la producción representa para la empresa una oportunidad de reducir costos y aumentar el cumplimiento al cliente. Actualmente, esta programación se desarrolla de manera manual en todas las líneas de producción, donde el operario encargado realiza su labor según un pronóstico establecido y bajo criterios como niveles de grasa y color del producto, decide el orden de producción a seguir, generando una falta de comunicación entre áreas y operaciones lo que perjudica la sincronización de producción, haciendo que se incurra en costos de almacenamiento innecesarios y a su vez, al retrasar la producción de productos demandados, se incurre en el mal uso y disminución de la productividad de las máquinas de la empresa.

Actualmente, la compañía cuenta con tres indicadores de desempeño, el primero conocido como Eficiencia General de los Equipos (OEE), que es el porcentaje de eficiencia de las máquinas por medio de la multiplicación de los factores de disponibilidad (tiempo disponible y tiempo productivo), rendimiento (capacidad productiva y producción real) y calidad (producción real y piezas buenas), proporcionando a la empresa una perspectiva de las pérdidas que ocurren en el proceso productivo. El segundo conocido como nivel de servicio, evidencia el cumplimiento de los pedidos establecidos por los clientes en cuanto a la cantidad y referencias de producto que demandan. Por último, se encuentra el tercer indicador por cumplimiento del programa, donde se establece el número de faltantes semanales por producto.

Los resultados proporcionados por el aplicativo se comparan principalmente con el tercer indicador del cumplimiento en el programa, donde se debe tener en cuenta que sus principales causas de incumplimiento sólo tienen en cuenta la falta de disponibilidad de ciertos insumos que afectan la producción de la línea, éstos son mostrados en tabla número 1, por lo que al iniciarse el aplicativo el operario deberá verificar la disponibilidad de estos insumos. Los demás factores son externos al alcance del objetivo de este proyecto, por lo que no se toman en cuenta.

**Tabla 1**

*Peso de las causas para la Falta de Disponibilidad*

<b>Falta de disponibilidad</b>	<b>Porcentaje</b>
Cubetas	19,8%
Producto en proceso	12%
Leche	8,7%
Almacenamiento en CDN	3,1%
Material Empaque	1,8%
Estibas	1,5%
Personal	0,4%
Materia prima	0,1%

*Nota:* Construcción de autores con información suministrada por la empresa.

La disponibilidad de los anteriores insumos es de vital importancia al momento de realizar el aplicativo, pues éstos deben ser tomados como parámetros para la iniciación y ejecución de la herramienta. Debido a esto, uno de los objetivos del proyecto es poder proporcionar un tamaño adecuado de lotes que permita generar mayor control en cuanto a la existencia de los recursos mencionados. Adicional a la mejora del indicador previamente nombrado se busca desarrollar un índice de medición que permita relacionar el número de trabajos tardíos con el número de trabajos totales.

Teniendo en cuenta lo anterior, la pregunta de investigación bajo la cual se desarrolló nuestro trabajo de grado fue: ¿Es posible realizar una minimización del número de pedidos tardíos en un proceso *flow shop* flexible para una empresa del sector lácteo? Tomando el número de pedidos tardíos como los trabajos programados que terminan siendo tardíos para una semana.

## 2. Antecedentes

A lo largo del tiempo, se han propuesto varios enfoques de optimización eficientes para la solución de problemas relacionados con procesos de producción *flow shop* con diferentes tipos de objetivos, tales como: *Ant Colony Optimization* (ACO) (Dorigo, 1992) el cual hace parte de los métodos de inteligencia de enjambres y busca hallar la mejor solución basada en el comportamiento de las hormigas al momento de buscar alimento, el objetivo principal de este tipo de problemas es minimizar el *makespan*, fechas de vencimiento, tiempos de flujo totales, tardanza, costos y tiempo promedio de flujo total.

Así mismo, Naderi, Zandieh y Shirazi implementaron un *Electromagnetism algorithm* (EMA), el cual parte del mecanismo de atracción-repulsión de la teoría de electromagnetismo con el fin de minimizar la tardanza total (Naderi, Zandieh, & Shirazi, 2009). De igual forma se encuentra el algoritmo genético que se inspira en la evolución biológica y su base genético-molecular, Yoon y Ventura lo implementan para minimizar la desviación absoluta media ponderada de los tiempos de finalización del trabajo de las fechas de vencimiento (Yoon & Ventura, 2002). Adicionalmente Tseng y Liao implementaron un algoritmo de optimización de enjambre de partículas discretas, que se inspira en el comportamiento social de individuos dentro de enjambres en la naturaleza; estos autores tienen el objetivo de reducir al mínimo el anticipo total ponderado y la tardanza (Tseng and Liao, 2008).

Igualmente se encuentra el algoritmo del umbral aceptable que es un método de búsqueda local, Marimuthu, Ponnambalam, y Jawahar abordan el problema de la toma de decisiones de secuenciación y programación para  $n$  trabajos *flow shop* de  $m$  máquinas bajo el entorno de tamaño del lote (Marimuthu, Ponnambalam, and Jawahar 2009). Además, autores como Pan, Han, y Tasgetiren, implementan algoritmos de colonia de abejas artificial (ABC), algoritmo ABC mejorado y algoritmo ABC discreto que se basan en el comportamiento de alimentación inteligente del enjambre de abejas, para tratar problemas de minimización del total de sanciones por anticipo y tardanza ponderada, minimización del *makespan* y minimización del tiempo de flujo (Pan et al. 2011) (Han et al. 2012) (Tasgetiren et al. 2011). (Chakaravarthya, Marimuthu, Ponnambalam & Kanagaraj 2014).

Por otro lado, se encuentra como ejemplo el estudio realizado por Keshanchi y Navimipour (2016), en este hacen uso de los algoritmos meméticos que se han utilizado como criterios de búsqueda global de evolución con heurística de búsqueda local para optimizar los problemas, en los cuales a través de estudios sobre los algoritmos meméticos se ha evidenciado el éxito en una amplia variedad de problemas del mundo real. El método utiliza un algoritmo genético para asignar la prioridad a cada subtarea enfocado en la heurística del que termine primero con el fin de buscar una solución para la asignación de tareas, escenario en el cual los resultados experimentales revelaron que la propuesta superó los tres algoritmos de planificación de tareas existentes en términos de *makespan* con una rápida convergencia a la solución óptima. Por esta misma línea para poder observar la eficacia sobre un sistema de producción de derivados lácteos como el queso, se halló un artículo en el cual se mencionan los buenos resultados obtenidos al aproximarse mediante el algoritmo genético, por el cual se demostró la aplicabilidad del enfoque propuesto, evidenciando que los resultados obtenidos fueron muy favorables (Kir y Yazgan, 2016).

A su vez se ha encontrado que al tener procesos continuos de producción, como es el caso de *flow shop*, se obtienen beneficios económicos y se logra la optimización de tiempos enfrentándolo con pruebas, que mediante experimentos computacionales muestran el excelente desempeño de la heurística propuesta en comparación con los mejores algoritmos hasta ahora propuestos para el problema, tanto en términos de calidad de las soluciones como en los requerimientos en diferentes escenarios, de hecho, a pesar de ser una heurística constructiva relativa, mejores cotas superiores se han encontrado en más de 27 % de los casos de Taillard donde se hace un benchmarking para *flow shop* (Fernandez-Viagas, Leisten, Framinan, 2016).

Como se ha mencionado anteriormente, el objetivo principal de este proceso es encontrar la permutación adecuada minimizando el tiempo total  $C_{max}$ , el número de trabajos tardíos o el flujo promedio de tiempo, entre otras. A continuación, se mencionarán las ventajas de minimizar el número de trabajos tardíos, objetivo principal del presente trabajo. Esta medida de rendimiento está directamente relacionada con las fechas de entrega y el porcentaje de pedidos que son entregados a tiempo, es una medida usualmente usada para calificar el rendimiento de los gerentes en entornos industriales (Seo, Klein & Jang, 2005). Autores como Croce, Gupta y Tadei (2000) propusieron el algoritmo

*Branch-and-bound* para minimizar el número de trabajos tardíos en un problema de programación *flow shop*, donde todos los trabajos se caracterizaban por tener la misma fecha de entrega. Este algoritmo consiste en suponer la creación de un árbol, donde cada una de las ramas es una posible solución, éste se encarga de detectar y “podar” las ramas que ya no están brindando soluciones óptimas, evitando con esto, el desperdicio de recursos. A su vez, Aldowaisan y Allahverdi (2012), propusieron heurísticas como SA-GI para desarrollar nuevas como NOTA y NOTM para un problema de programación *flow shop* sin espera, con el objetivo principal de minimizar el número de trabajos tardíos.

Por otro lado, una de las generalizaciones del problema de *flow shop* es *flow shop* flexible, para éste, se propone un estudio por parte de los autores Meral Azizoglu, Ergin Cakmak y Suna Kondakci (2001), en el cual se utiliza, una vez más, el Algoritmo de *Branch-and-Bound* (B&B) pero en este caso se disminuye el tiempo de flujo total. En el estudio se definieron dos esquemas de delimitación de ramas inferiores y superiores los cuales se integraron en el algoritmo dando como resultado una solución óptima.

El desarrollo de estrategias de solución a problemas de programación basados en un sistema de producción *flow shop* flexible, considera diferentes suposiciones evaluadas por el estudio de Wang, Chen, Chen, Cheng, Chang (2013), sobre el cual basaron su artículo donde desarrollaron un aporte importante al identificar, que cuando se tienen en cuenta metodologías bajo tiempos de preparación independientes para el alistamiento, se puede evidenciar un gran efecto reflejado en la reducción del *makespan*, adicionalmente la flexibilidad en la asignación de pedidos va a aumentar, lo cual va a repercutir en el resultado de tener un mejor desempeño de la programación.

Al profundizar en las herramientas utilizadas para tener una aproximación del problema, se evidenció que para poder abordar inicialmente un *flow shop* que trajera consigo los mejores resultados era importante modelarlo de tal forma que desarrollara particiones sobre los lotes de producción a través del *lot streaming*, modelo que según Pan, Tasgetiren, Suganthan, & Chua (2011) es una de las técnicas más eficientes para la disminución de tiempos en esta era de competición global, reduciendo directamente los tiempos de espera de las máquinas. Estos autores afirman que este problema se ha clasificado de dos formas, la primera conocida como *single-job* donde el objetivo es encontrar los tamaños de sub-lotes óptimos, la segunda llamada *multi-job* la cual busca obtener la mejor locación de sub-lotes, hora de entrega y una mejor secuencia. Adicionalmente, en su revisión de *lot streaming*, Cheng, Mukherjee & Sarin (2014), destacan la capacidad de este método para acelerar el flujo de un producto a través de un sistema de producción mediante el fraccionamiento de un lote de producción en sub lotes y el procesamiento de estos de forma simultánea a través de las máquinas, teniendo como resultado la disminución del trabajo en proceso y el tiempo de ciclo. Los problemas de programación de *lot streaming flow shop* han recibido un incremento en atención e importancia por parte de varios investigadores.

En los últimos años, *lot streaming* ha sido utilizado en problemas presentados en la programación de la producción. Existe un estudio realizado por Sang, Gao & Li (2014) en el cual se enfocaron en un sistema de producción *flow shop* donde el principal objetivo era minimizar la tardanza, para esto propusieron un Algoritmo de búsqueda local iterada (ILS), en el que se utilizó la heurística de *Nawaz-Enscore-Ham* (NEH) con ciertas adaptaciones para generar una solución inicial, también un procedimiento de búsqueda de inserción local, lo que permitió que se generaran resultados favorables al compararlos con sistemas que buscaban cumplir su mismo objetivo. Al lograr satisfacer la necesidad planteada se pueden reducir las consecuencias como tener trabajos tardíos representadas en ventas perdidas, costos de acumulación del trabajo y clientes insatisfechos, entre otros. (Kayvanfar, Aalaei, Komanki & Zandieh, 2014).

Kalir, & Sarin (2000) plantearon los beneficios de realizar *lot streaming* para un sólo lote, donde se asume que los tamaños por sublote son idénticos, las máquinas están disponibles permitiendo un procesamiento continuo, el proceso de un sublote no puede ser detenido, los tiempos de procesamiento de la unidad son conocidos de antemano y las máquinas no pueden procesar más de un sublote. Para este caso, los autores consideraron tres tipos de medidas: *makespan*, *mean flow time* (MFT) y *work in process* (WIP), donde se planteó una ecuación para hallar cada una de éstas medidas dependiendo del tamaño del lote y la cantidad de máquinas en el proceso y, por otro lado, una ecuación para hallar su respectivo *ratio* (Proporción). Se encontró, para el caso del *makespan* y el MFT, una reducción del 5,80% cuando el tamaño de lote es pequeño y el número de máquinas es relativamente grande. En el caso de tener un

tamaño de lote grande la proporción del MFT disminuye un 50% comparado con la del *makespan*. Finalmente, la implementación de sublotes no tuvo mayor impacto en los resultados del WIP, pues éste al tener un sub lote pequeño que es procesado en una máquina con un tiempo de proceso relativamente largo, tendrá una diferencia de tiempos insignificante entre el primer sub lote y último.

Se tomó como herramienta principal la literatura previamente mencionada para dar solución al problema de programación de la producción para la línea líquida 1 de la empresa de lácteos colombiana, la cual se caracteriza por ser un sistema productivo *flow shop* flexible y dependiente, con el objetivo principal de minimizar el número de trabajos tardíos.

### 3. Objetivos

*Diseñar una herramienta que permita llevar a cabo la programación de la producción de la Línea líquida 1 compuesta de fermentados, jugos y gelatina, de una empresa colombiana de lácteos, con el objetivo de minimizar el número de trabajos tardíos.*

- Caracterizar el entorno de manufactura del sistema de producción de la línea líquida 1.
- Establecer e implementar una metodología para calcular el tamaño de los sublotes para cada referencia contenida en la línea líquida 1.
- Definir e implementar una metodología mediante el diseño y desarrollo de un aplicativo para la programación de las órdenes de producción para la línea líquida 1 que minimice el número de pedidos tardíos.
- Comparar los indicadores de desempeño con los que actualmente cuenta la empresa, con los desarrollados por la herramienta propuesta, dando prioridad al indicador que evalúa el número de trabajos tardíos, y evaluando el impacto de indicadores secundarios.

### 4. Metodología

En un principio se evidenciaron las falencias existentes en la empresa colombiana de producción de lácteos, en cuanto a la planificación de la producción de la línea líquida 1, generando un incremento en el número de trabajos tardíos. Gracias a esto se realizó una búsqueda de información en la literatura para lograr abordar el problema y definir los objetivos necesarios.

La metodología implementada se basó en la norma ISO 13053 (2011) donde se abordó la temática al **definir** el proceso que se lleva a cabo en la planta de producción (objetivo específico 1) corroborado por el juicio experto de los colaboradores responsables del proceso, quienes permitieron a través de la caracterización, la **medición** de la cantidad de trabajos tardíos y el **análisis** mediante el indicador del cumplimiento del programa con datos actuales encontrados en el sistema para detectar las deficiencias que presenta la línea. La caracterización del entorno se llevó a cabo por medio de visitas a la empresa y la información brindada por ésta. A continuación, se muestra el diagrama de flujo del proceso de producción en la línea líquida 1, donde las entradas de insumos y la salida de residuos se evidencian en color gris, mientras que las operaciones se encuentran en color azul. Las convenciones mostradas en la parte inferior izquierda del diagrama muestran que habrá una entrada de insumos si la flecha se encuentra entrando hacia a la operación, por otro lado, habrá salida de residuos si la flecha sale de la operación y finalmente, la recirculación se hará en el sentido mostrado por las flechas intermitentes.

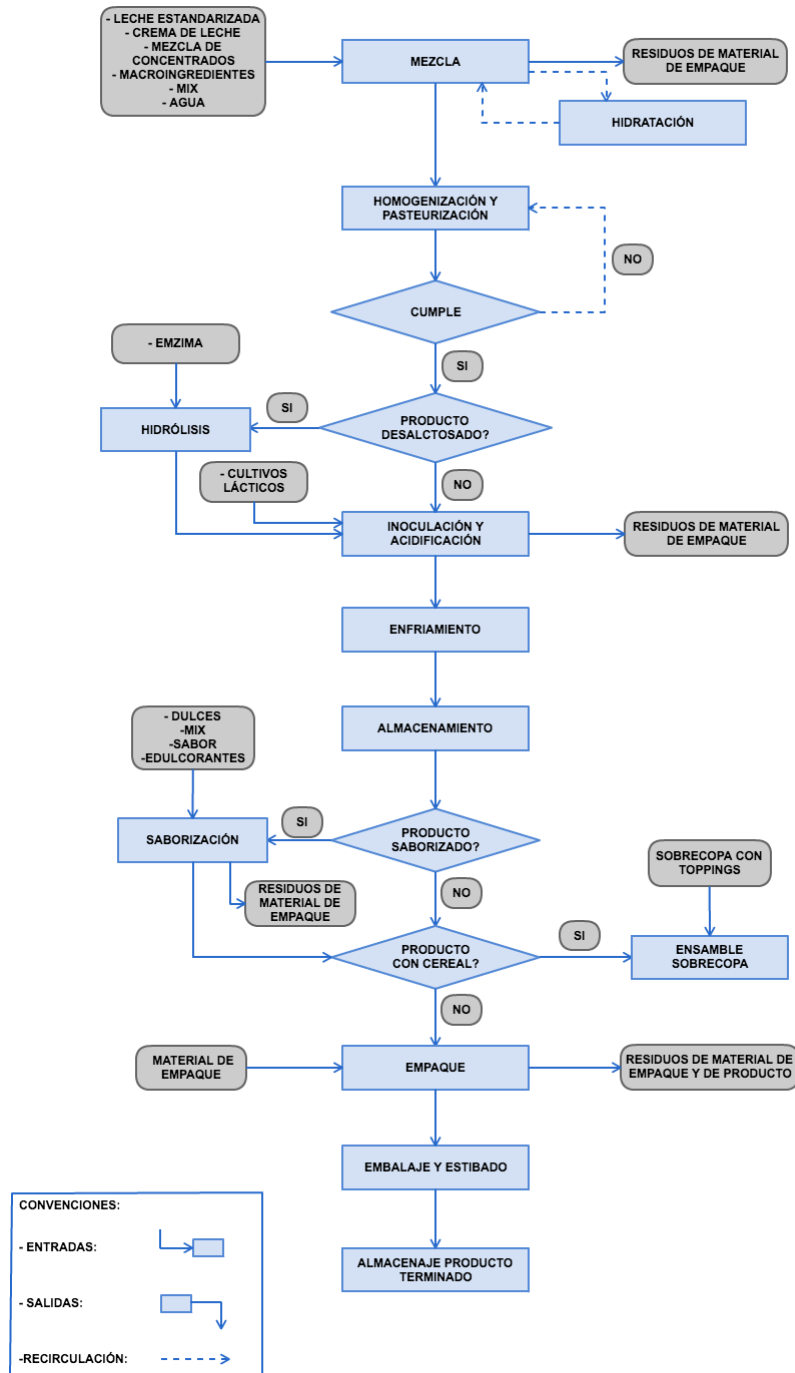


Figura 2: Diagrama de flujo de la línea de producción líquida 1

El proceso empieza en los tanques mezcladores, para la producción de fermentados se agrega leche y para la producción de jugos y gelatinas se agrega agua, el líquido es enviado a los conos donde se adicionan diferentes ingredientes (crema de leche, mezcla de concentrados, macro ingredientes, mix y agua) y luego es recirculado a los tanques mezcladores. Esta mezcla es enviada al homogeneizador donde se realiza la correcta combinación de los insumos previamente mencionados. Al contar con una mezcla homogénea se lleva al pasteurizador donde se realiza el tratamiento térmico, cuando esta mezcla se encuentra en las condiciones buscadas se procede a la hidrólisis para los



productos deslactosados donde se le agrega las enzimas necesarias, de lo contrario, pasa directamente al proceso de acidificación, es acá donde se le agregan los cultivos lácticos y se desechan los residuos de material de empaque. Después, la mezcla se lleva a un proceso de enfriamiento, al acabarse, se puede decir que la base del producto está lista y es enviada a los tanques de almacenamiento donde se mantiene hasta iniciar el proceso de saborización, allí se agrega dulce, mix, sabor, edulcorantes y en caso de ser un producto que contiene una sobrecopa con cereal, se lleva a su proceso de ensamble. Finalmente, el producto se empaqueta y queda listo para ser embalado, estibado y almacenado en una bodega de producto terminado.

Luego de tener claridad en cuanto al entorno a trabajar se llevó a cabo la implementación de estrategias de **mejora** (objetivo específico 2) donde se buscó establecer una metodología que permitiera la creación de sublotos para las referencias contenidas en la línea líquida 1, pues, se evidenció que la selección del tamaño de lote a producir no tenía ninguna metodología establecida y era modificada manualmente por la persona encargada en el área de pronósticos. Se conocen de antemano las cantidades establecidas a producir, donde un bache hace referencia a un tanque mezclador, por lo que es permitido producir medio tanque, un tanque, tanque y medio y así sucesivamente hasta llegar a tres tanques.

**Tabla 2**  
*Cantidades permitidas a producir*

<b>Bache</b>	<b>Kg</b>
0.5	3,000
1	6,000
1.5	9,000
2	12,000
2.5	15,000
3	18,000

*Nota:* Creación de los autores

A continuación se presenta un diagrama de flujo para la toma de decisión del tamaño de lote que se realiza actualmente en la empresa. En este punto, es de vital importancia recordar que la producción diaria depende de la familia del producto, ya sea gelatinas y jugos o fermentados, y que a cada referencia de producto se realiza con una base específica la cual es la materia prima principal para la iniciación de la producción en la planta.

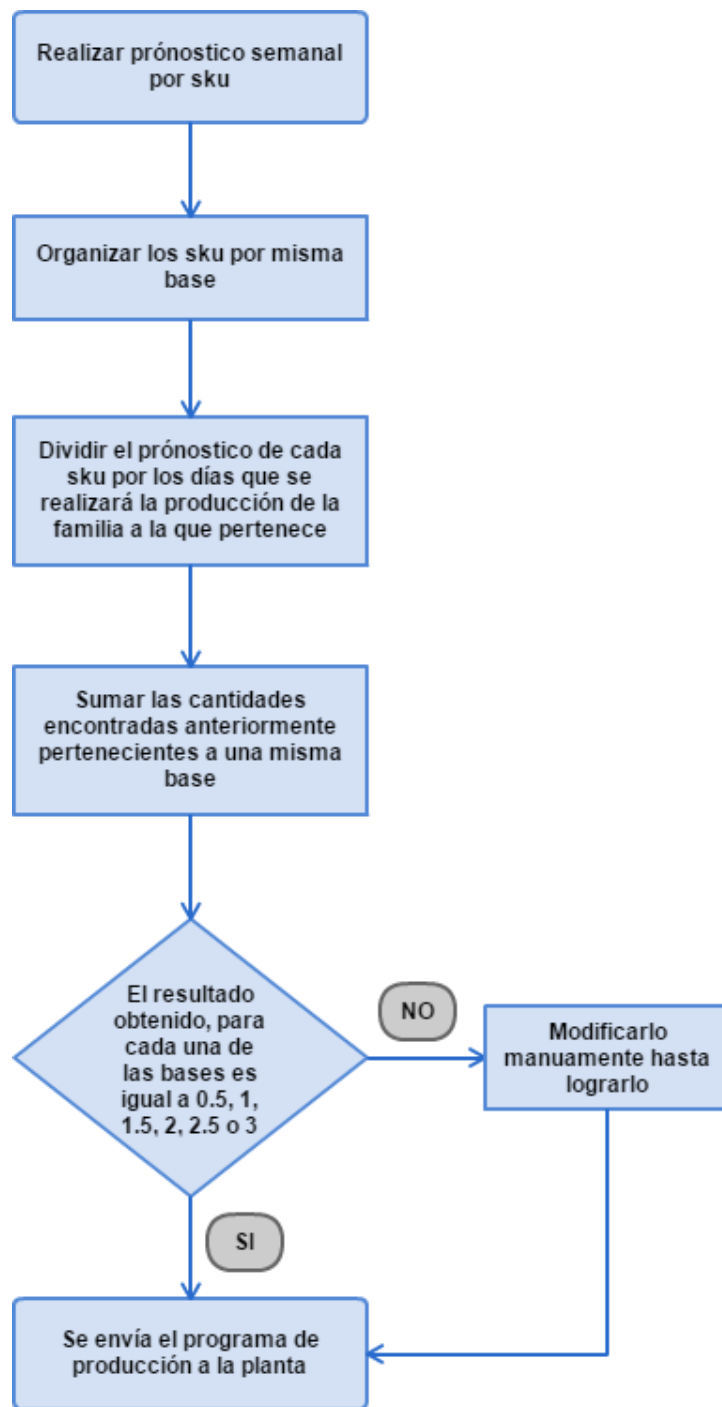


Figura 3: Diagrama de la toma de decisión del tamaño de lote en la empresa láctea

Para dar solución a la problemática anterior se desarrolló una ecuación para la obtención del número de lotes adecuados, ésta surge de las condiciones presentadas en la empresa y parámetros necesarios para la correcta ejecución del aplicativo.

Con lo anterior, se pueden establecer sublotes de 3,000 kg ya que es la cantidad mínima permitida a producir en la empresa y a su vez, es la cantidad con la que aumenta la escala. Gracias a lo anterior, se enfocó en hallar la ecuación adecuada para encontrar el número de sublotes de este tamaño. Se sabe que se realiza semanalmente un pronóstico para cada una de las referencias (SKU) y que cada una de éstas, a pesar de tener diferentes sabores, consta de una misma base. Por lo que al realizar la sumatoria del pronóstico de las referencias pertenecientes a una misma base y

dividir las por el tamaño mínimo permitido se obtiene la cantidad de sublotos que deberán ser producidos por una base.

$$\text{Número de Sub - Lotes} = \frac{\sum \text{Pronóstico Semanal del SKU } k}{3,000} \quad \forall k \in K$$

$$K = \{\text{SKUs pertenecientes a una misma base}\}$$

Al tener establecido el número de sublotos, el aplicativo se encargará de seleccionar cuántos de éstos deberán ser producidos cada día. Kalir & Sarin (2000) evaluaron los beneficios de hacer *lot streaming* en un sistema de producción *flow shop*, entre estos, la mejora de la respuesta frente a la demanda del mercado, es un aspecto de vital importancia para la empresa láctea, pues al tratarse de productos perecederos ésta debe reaccionar eficazmente al cambio. Según estos autores, al realizar *lot streaming* para múltiples lotes con sublotos del mismo tamaño, como en este caso de estudio, el *makespan* se redujo en un 64.3% y el WIP en un 22.8%. Se considera que el *makespan* puede usarse como una medida complementaria para la disminución del número de trabajos tardíos, debido a que tienen cierta relación.

Para el diseño y desarrollo del aplicativo para la programación de la producción de la línea líquida 1 (objetivo específico 3), se escogió como meta heurística el algoritmo genético ya que se encontró en la literatura que diferentes autores implementaron este algoritmo para dar solución a problemas similares relacionados con la programación de la producción en un sistema *flow shop*. En la tabla 3, Jiménez, Muñoz & Toro (2013) hacen un recuento de cómo se han abordado problemas de *flow shop* desde que este fue abordado por primera vez por Johnson a mediados de los años 50, hasta el año 2009.

**Tabla 3**  
*Estudios realizados*

Año	Autor	Problema	Metodología
1953	S.M. Johnson	Programación óptima de la producción con dos y tres máquinas y tiempos de ajuste	Heurística
1995	Colin R. Reeves	Flow-Shop Permutacional	Algoritmo Genético Clásico
1997	Chandras ckharan Rajendran, Hans Ziegler	Flow-Shop Permutacional	Heurística
1998	Christos Koulamas	Flow-Shop	Heurística de Programación de Flow-Shop
1998	M.C. Portmann, A. Vignier, D. Dardilhac	Flow-Shop Híbrido	Algoritmo Branch and Bound
1998	Eugeniusz Nowickiy, Czeslaw Smutnicki	Flow-Shop con Máquinas Paralelas	Algoritmo Búsqueda Tabú
2000	T. Sawik	Flow-Shop Flexible con capacidad finita	Programación Entera Mixta
2001	Meral Azizoglu, Ergin Cakmak, Suna Kindakei	Flow-Shop Flexible	Algoritmo Branch and Bound
2002	JiyinLiu, Colin R Reeves	Flow-Shop Permutacional	Heurística Constructiva
2002	Vincent T kindt, Nicolas Monmarché, Fabrice Tercinet	Flow-Shop	Colonia de Hormigas

Año	Autor	Problema	Metodología
2003	Edward F. Stafford Jr., Fan T. Tseng	Flow-Shop regular, Flow-Shop sin espera (NIQ), Flow-Shop con tiempos de preparación (SDST), Flow-Shop SDST/NIQ	Modelos de Programación Lineal Entera Mixta (MILP)
2003	Xi Sun, Kazuko Morizawa, Hiroyuki Nagasawa	Flow-Shop Montaje-Tipo	Heurísticas de Gran Alcance
2004	Andreas Fink	Permutación de trabajos procesados secuencialmente en una serie de máquinas	Metaheurísticas
2004	Bagas Wardono, Yahya Fathi	Flow Shop Flexible con capacidad de buffers limitada entre las etapas	Algoritmo Búsqueda Tabú
2004	S. Bertel, J. C. Billaut	Flow-Shop Multiprocesador de tres etapas	Programación Lineal Entera, un Algoritmo Goloso y un Algoritmo Genético
2004	Chandras ckharan Rajendran, Hans Ziegler	Flow-Shop de Per,mutación	Algoritmo Colonia de Hormigas
2004	Mary E. Kurz, Ronald G. Askin	Flow-Shop Flexible	Programación Entera
2005	Can Akkan, Selcuk Karabatt	Flow-Shop de n trabajos en dos	Algoritmo Branch and Bound
2005	Rubén Ruiz, Concepción Maroto	Flow-Shop Permutacional	Evaluación comparativa de 18 heurísticas
2005	T.K. Varadharajan, Chandras ckharan Rajendran	Flow-Shop	Algoritmo de Recocido Simulado
2005	José Elias, Claudio Arroyo, Vinícius Amaral Armentano	Flow-Shop con múltiples criterios de desempeño	Algoritmo Genético
2005	Rubén Ruiz, Concepción Maroto, Javier Akaraz	Flow-Shop con secuencia dependiente	Algoritmos Genéticos Avanzados
2006	Rubén Ruiz, Concepción Maroto	Flow-Shop Híbrido	Algoritmo Genético
2007	M.Fatih Tasgetiren, Yun-Chia Liang, Mehmet Sevkli	Flow-Shop Permutacional	Algoritmo de Optimización Cúmulo de Partículas
2009	M. Zandich, E. Mozaffari, M. Gholami	líneas de Flujo Flexibles Híbridas	Algoritmo Genético

*Nota:* Tomada de Jiménez, Muñoz & Toro (2013)

Un algoritmo genético es un método de búsqueda basado en la teoría de la evolución biológica de Darwin, donde se busca una población inicial y en ésta, se escogen los individuos más capacitados para reproducirlos, mutarlos y finalmente obtener una nueva generación mejorada (Arraz de la Peña & Parra, 2007). A continuación, se describen brevemente los elementos de un algoritmo genético y cómo éstos fueron desarrollados para la elaboración del aplicativo. En primer lugar, se encuentra la fase de inicialización, en esta se creó una población inicial la cual se conformó por conjuntos de cromosomas padres que representan posibles soluciones al problema, estos cromosomas padres se crearon con los pedidos de una orden de producción semanal de la empresa donde fueron ordenados de manera aleatoria, obteniendo así la población inicial. Arraz de la Peña & Parra (2007) aconsejan crear esta población

de forma aleatoria para obtener alta diversidad, para el caso del aplicativo, se tomó una orden de producción brindada por la empresa y a partir de ésta se generaron los cromosomas aleatoriamente. Hay que tener en cuenta que en caso dado de que se presenten cromosomas infactibles debido a que se repitan trabajos, se da un proceso de reparación en el que se elimina el trabajo duplicado y se evalúan los actuales para asignar otro que no esté repetido. Esta reparación se da en cada una de las etapas con el fin de que los cromosomas sean soluciones viables.

En la segunda etapa, la selección, se evaluó para cada uno de estos cromosomas padres la función objetivo y los mejores resultados fueron seleccionados para pasar a la siguiente etapa, este método de selección se conoce como Caso de selección por *ranking*, donde a cada cromosoma se le asigna un número según su *fitness* que se evalúa a partir de cuan mejor o peor es el resultado de su función objetivo. Arraz de la Peña & Parra (2007) evaluaron los beneficios de hacer la selección con el caso de selección por ruleta y el caso de selección por *ranking* y encontraron que, con éste último, se lograba obtener mayor variedad genética, razón por la cual fue escogido en esta etapa del algoritmo.

Se prosigue a la etapa de cruzamiento o *crossover*, para este caso, autores como Murata, Ishibuchi & Tanaka (1996), mostraron cuatro maneras de formar un cromosoma hijo, estos se crean con el objetivo de desarrollar una nueva generación de cromosomas mejorada, cuyos métodos se presentan a continuación.

1. *One-point crossover*: Se divide un padre en un punto aleatorio, se toman esos trabajos como el inicio del hijo y los trabajos faltantes se toman en el orden del segundo padre.
2. *Two-point crossover Ver I*: Se escogen dos puntos aleatorios para dividir al primer padre, se inicia el hijo con estos trabajos y se completan los trabajos faltantes en el orden del segundo padre.
3. *Two-point crossover Ver II*: Es una nueva versión del *two-point crossover*, en ésta se escogen los trabajos que no fueron seleccionados en las divisiones del primer padre y una vez más, los trabajos faltantes se ubican en el orden del segundo padre para la creación del hijo.
4. *Position based crossover*: Para este cruce cada posición se marca independientemente con la probabilidad de 0,5.

Luego, para la etapa de mutación, estos mismos autores Murata, Ishibuchi & Tanaka (1996) mostraron otras cuatro formas de realizarla, este método se utiliza para poder garantizar evaluar todas las opciones posibles que pueda llegar a considerar la aleatoriedad de los cambios dentro de los cromosomas y llegar a una mejor solución.

1. *Adjacent two-job*: Se escogen dos trabajos adyacentes e intercalan de posición.
2. *Arbitrary two-job change*: Se escogen dos trabajos arbitrariamente y se intercalan.
3. *Arbitrary three-job change*: Se escogen tres trabajos arbitrariamente y se intercalan.
4. *Shift*: Se seleccionan dos posiciones aleatoriamente, la segunda posición es puesta en la primera posición, haciendo que los demás trabajos se muevan un puesto.

Con lo anterior, los autores evaluaron los mejores resultados en cada una de las etapas, se evidenció que *two-point Ver I* y *Shift* fueron los mejores en su respectiva etapa, por lo que fueron seleccionados para el desarrollo del presente aplicativo. Para una mayor comprensión de éstas, las figuras 4 y 5 muestran su metodología.

(a) Two-Point Ver I

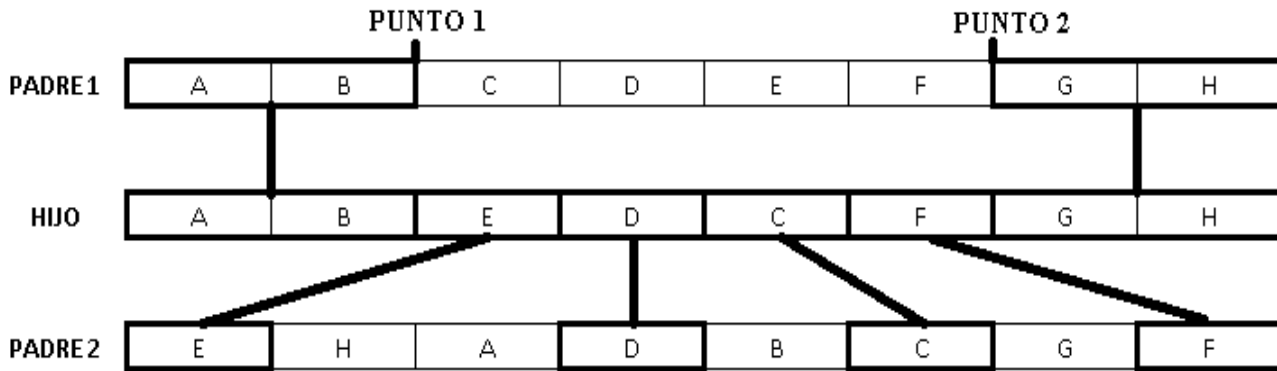


Figura 4: Método de *crossover two-point Ver I* (Murata, Ishibuchi & Tanaka, 1996)

(b) Shift

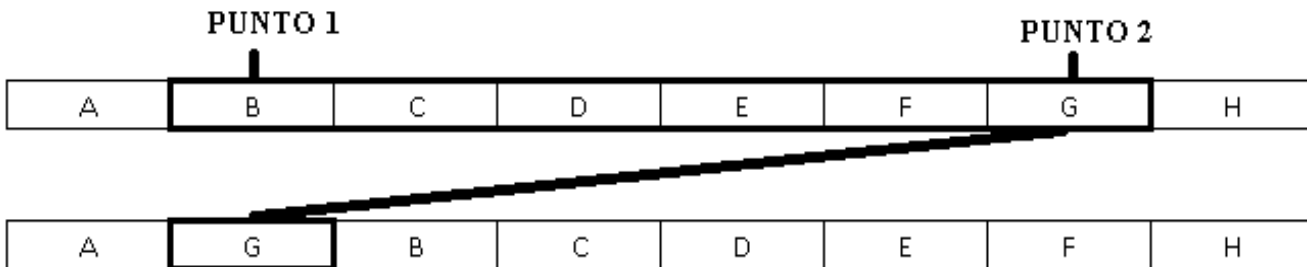


Figura 5: Método de mutación *Shift* (Murata, Ishibuchi & Tanaka, 1996)

Para la etapa de terminación, se establece un criterio de parada que determina cuándo se considera que el programa ha encontrado la mejor solución posible soportado mediante la evaluación de un rango de iteraciones donde no se evidencia una mejora. (Melián, B., Moreno, J. A., & Moreno, J. M. 2003). Para el caso del aplicativo esa condición se conoce como el Criterio Por Iteraciones Sin Mejora, donde al llegar a un total de dos mil quinientas iteraciones, sin ninguna tendencia de mejora, la condición de la población detiene el algoritmo y se asume que es el mejor resultado encontrado. Dorrnsoro Díaz & Alba Torres (2006) determinaron que para algoritmos genéticos existen diferentes problemas, uno de ellos y con el que se relacionó este proyecto fue con el de las tareas mínima de espera (MTTP) y cruzándolo con una política de actualización de individuos de barrido lineal (LS), en donde se encontró que la media de generaciones a crear para encontrar una solución buena es de 6, y en sus experimentos computacionales su criterio de parada fue de 2,500 iteraciones, como Dorrnsoro Díaz y Alba Torres se basaron en su ejercicio para poder asumir que este número de iteraciones era el indicado. Para este modelo específico de minimización del número de trabajos tardíos se evaluaron diferentes intervalos de iteraciones con el fin de encontrar el valor adecuado que arrojaré los mejores resultados.

La tabla 4 muestra ocho posibilidades del número de iteraciones adecuado para usar como indicador de terminación del programa, estas posibilidades fueron evaluadas de igual forma en la literatura referenciada previamente lo cual reafirma la decisión evaluado para veinticinco instancias con su respectivo resultado por posibilidad. El cumplimiento al programa revela en qué porcentaje se cumplió la producción pronosticada de la semana y la desviación porcentual evidencia qué tan alejados están los resultados de su cota inferior.

**Tabla 4**  
*Intervalos de iteraciones sin mejoras*

Numeros de Iteraciones sin mejora	Cumplimiento al programa	Desviación porcentual Makespan	Desviación porcentual Tardanza Promedio
3,000	93%	16.07%	1%
2,500	100%	13.80%	0%
2,000	91%	15.95%	1%
1,500	91%	15.51%	1%
1,000	91%	15.80%	1%
500	90%	16.00%	1%
200	100%	14.50%	0%
100	100%	14.06%	0%

Con lo anterior, se puede afirmar que 2,500 iteraciones es la mejor opción, pues, tiene un cumplimiento del programa del 100% y por otro lado, la desviación porcentual en cuanto al makespan y tardanza promedio es inferior, comparadas con las demás opciones, siendo de 13.8% y 0% respectivamente.

Finalmente, el esquema de **control** se desarrolló al evaluar los datos históricos de entrada que fueron corridos a través de la herramienta generada y se realizó una comparación de los datos de salida obtenidos por la metodología antigua de la empresa frente a los nuevos resultados propuestos por el aplicativo, estos resultados se evidencian en el literal “Resultados” del presente trabajo. Para este apartado es importante saber que la metodología realizada por la empresa se caracteriza por organizar las órdenes de producción manualmente, siguiendo restricciones de nivel de grasa y color del producto, a su vez, la empresa tiene establecidos ciertos días de la semana para la producción de cada familia (lunes, miércoles y viernes se realizan productos fermentados y los días restantes se producen gelatinas y jugos), por lo que estas restricciones fueron tenidas en cuenta al momento de organizar las órdenes con la metodología de la empresa y evaluar los resultados de ésta frente a los proporcionados por el aplicativo. A continuación, se presenta el diagrama de flujo que muestra la metodología de programación de la producción de la empresa láctea colombiana por parte de los operarios, una vez llega el programa semanal discriminado por días, brindado por el encargado de realizar el pronóstico.

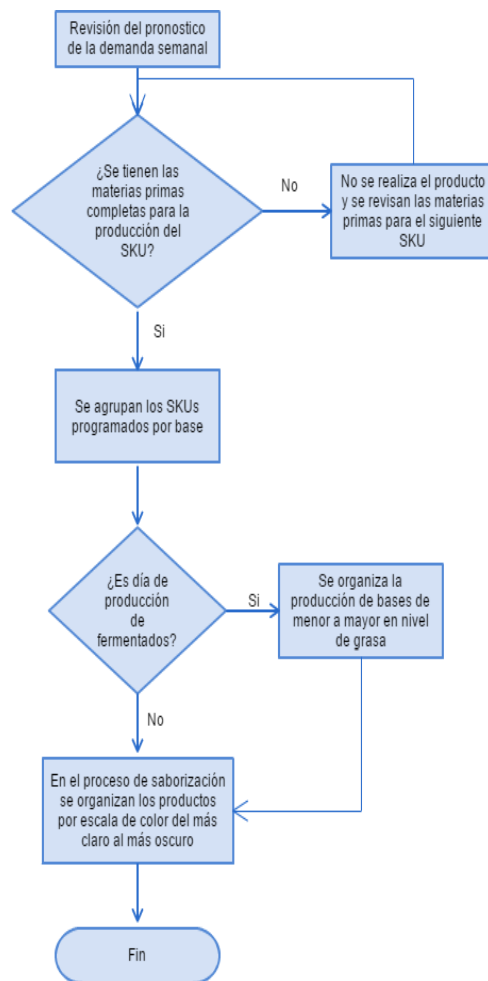


Figura 6: Diagrama de Flujo del método de programación de la producción de la empresa láctea colombiana.

Adicionalmente para comparar los resultados del aplicativo, se hizo uso de las reglas de despacho pues estas son útiles cuando se intenta encontrar una programación razonablemente buena; estas reglas se dividen en estáticas que no dependen del tiempo y dinámicas que son dependientes del tiempo (Pinedo, M. L. 2008). Para el presente trabajo se realizó la programación de una regla de despacho estática SPT (*shortest processing time*) que especifica que el trabajo que requiere el procesamiento más corto es el siguiente trabajo a procesar; este se eligió debido a su eficacia para minimizar la proporción de trabajos tardíos (Rajendran, C., & Holthaus, O. 1999). Por otro lado, para realizar una comparación más completa, se realizó la programación de una regla de despacho dinámica CR (*critical ratio*) que plantea la relación entre el tiempo restante hasta la fecha en que debe entregarse un trabajo, entre el tiempo restante total de la planta para realizar el trabajo; si el resultado es una proporción inferior a 1,0 implica que el trabajo está retrasado, una proporción mayor que 1,0 implica que el trabajo está adelantado. y el trabajo con el CR más bajo es el siguiente programado. (Krajewski, L. J., & Ritzman, L. P. 2000).



## 5. Componente de Diseño en ingeniería. Extensión máxima 1500 palabras.

### 5.1. Declaración de Diseño:

Teniendo en cuenta la demanda que evalúa la empresa sobre los productos que se desarrollan en la línea líquida 1, definir los requerimientos de diseño, restricciones y estándares que harán parte del aplicativo propuesto, basado en las características propias del modelo, tales como: tipos de configuración, restricciones, parámetros, entre otros.

### 5.2. Proceso de Diseño:

Se inició desarrollando la ecuación para establecer los números de sublotos de 3,000 kilogramos y de esta forma dividir la producción en cantidades que mejoren la programación. Como paso siguiente, se realizó la codificación de la herramienta basada en la heurística seleccionada, algoritmo genético, la cual se desarrolló en diferentes etapas: inicialización (etapa 1), selección (etapa 2), cruce (etapa 3), mutación (etapa 4) y terminación (etapa 5). La solución más factible es la orden de producción sugerida a la empresa. A continuación, se presenta el pseudocódigo de la heurística para cada una de sus etapas.

**Algoritmo:** Minimización del número de trabajos tardíos en un proceso *flow shop* flexible para una empresa del sector lácteo mediante Algoritmo Genético

#### **Selección: Población Inicial**

Selección de generación de *Padres* de manera aleatoria.  
Reparación mientras se llena el *Cromosoma Padre*

#### **Cruce**

```
for i = 1 to NumPadres
  Cruce de Padres: Método Two Point (Ver. 1)
  Reparación
next i
```

#### **Mutación**

```
for i = 1 to NumPadres
  Mutación de Hijos: Método Shift
  Reparación
next i
```

#### **Criterio Parada**

```
do while i = 1 to Iteraciones sin mejora
  Detener el proceso
loop
```

El detalle del pseudo algoritmo se encuentra en el Anexo 3.

### 5.3. Requerimientos de desempeño:

- El aplicativo debe ser reconocido y utilizado fácilmente por el usuario.
- El aplicativo debe mostrar de manera sencilla el resultado del ordenamiento en el que serán procesados los productos de la línea líquida 1.
- El aplicativo debe cumplir con un tiempo para ejecutar el modelo.
- Flexibilidad en la parametrización, va a servir en diferentes cambios fechas de disponibilidad (Usuario pueda ingresar parámetros, flexibilidad en referencias de productos)

#### 5.4. Pruebas de rendimiento

Las pruebas de rendimiento se realizan para determinar lo rápido que realiza una tarea un sistema en condiciones particulares de trabajo. (TecHelp, 2015). Teniendo en cuenta lo anterior, para probar el rendimiento del aplicativo desarrollado para la reducción del número de trabajos tardíos de una empresa láctea colombiana, se midió el tiempo computacional que gastó el aplicativo en programar diferentes números de órdenes. Las pruebas se realizaron en un equipo con las siguientes especificaciones técnicas.

**Tabla 5**  
*Especificaciones técnicas de equipo de prueba*

<b>Procesador</b>	Intel Core i7
<b>Memoria Instalada (RAM)</b>	8 GB
<b>Tipo de sistema</b>	Sistema operativo Windows 10 x64 bits
<b>Versión del Programa</b>	Excel 2016

Nota: Creación de los autores

El resultado se muestra en la siguiente tabla.

**Tabla 6**

*Tiempo computacional*

<b>Número de Órdenes programadas</b>	<b>Tiempo computacional (segundos)</b>
81	7.21
181	16.11
281	25.01
381	33.92
581	51.72

Nota: Creación de los autores

Los tiempos anteriores se comparan con el tiempo que gasta un operario de la empresa láctea en decidir el orden de programación, teniendo en cuenta las restricciones y las decisiones que se toman de forma empírica y dependiendo de la situación, se estima un tiempo de 30 minutos decidiendo la programación de la producción de un día de la semana que contiene 81 pedidos, lo que se traduce en 180 minutos semanales para 6 días de trabajo. Los resultados anteriores muestran que el rendimiento de la herramienta propuesta es superior a la forma empleada en la empresa láctea, teniendo una mejora promedio de 99.93%.

Con el fin de evidenciar gráficamente la manera en que se debe usar la interfaz por parte del usuario se ha desarrollado un manual del usuario el cual hace explícito el proceso que se debe llevar a cabo para manejar el aplicativo de manera eficiente y así poder disminuir el margen de error en el uso (ver Anexo 2) y a su vez, se

realizó un video guía para el adecuado uso del aplicativo (Anexo 4). Adicionalmente, la interfaz lleva consigo alertas de falla y error que reportan al usuario el mal uso de la herramienta.

Posteriormente al ejecutar el programa de manera adecuada el resultado en la hoja de cálculo llamada *Estructura de Pedidos* (fig. 7)

ESTRUCTURA										NUMERO DE PEDIDOS	PEDIDOS TARD.	CMAX	Tardanza
ID PEDIDO	ID SKU	CODIGO	REFERENCIA	Base	KG	UMD	SUB-LOTE	FECHA DE VENCIMIENTO	DIA DE PRODUCCION	65	-	-	-
1	7	4363	REGENERIS CREMOSO PITAYA FIBRA PLUS 100 GR	FIBRA	1,500	15,000	0.5	6/3/2017	1				
2	8	4867	REGENERIS CREMOSO FRESA FIBRA PLUS 100 GR	FIBRA	1,500	15,000	0.5	6/3/2017	1				
3	9	4365	YOGURT CREMOSO FRESA 100 GR SIN PRECIO	CREMOSO	2,000	20,000	0.7	6/3/2017	1				
4	10	4391	YOGURT CREMOSO MELOCOTON 100 GR SIN PRECIO	CREMOSO	2,000	20,000	0.7	6/3/2017	1				
5	11	4262	YGT. CREMA FRESA 100 GR	CREMOSO	7,000	70,000	2.3	6/3/2017	1				
6	12	4263	YGT. CREMA MELOCOTON 100 GR	CREMOSO	4,000	40,000	1.3	6/3/2017	1				
7	15	11376	ALPINA ALDE BOTELLA 200 GR	ALDE	3,000	45,000	3.0	6/8/2017	1				
8	22	4903	YGT. REGENERIS FRESA 150 GR	REGENERIS	7,000	46,867	2.3	6/8/2017	1				
9	24	4910	YGT. REGENERIS MELOCOTON 150 GR	REGENERIS	6,000	40,000	2.0	6/8/2017	1				
10	29	4370	REGENERIS TROZOS PITAYA FIBRA PLUS 150 GR	REGENERIS	4,000	26,867	1.3	6/8/2017	1				
11	30	4177	FINESSE FRESA 150 GR	FINESSE	3,000	20,000	1.0	6/18/2017	1				
12	31	4178	FINESSE MELO 150 GR	FINESSE	4,000	26,867	1.3	6/18/2017	1				
13	35	4170	ALIMENTO LACTEO FINESSE FRUTOS ROJOS 180 GR	FINESSE	2,000	11,111	0.7	6/18/2017	1				
14	36	4172	YOG. FINESSE MORA 180GR	FINESSE	2,000	11,111	0.7	6/18/2017	1				
15	37	4174	ALIMENTO LACTEO FINESSE FRESA 180 GR	FINESSE	3,000	16,867	1.0	6/18/2017	1				
16	38	4175	ALIM.LACT FINE MELOCOTON 180G	FINESSE	3,000	16,867	1.0	6/18/2017	1				
17	39	4176	ALIM.LACT FINE NATURAL 180G	FINESSE	1,000	5,556	0.3	6/18/2017	1				
18	50	4908	YGT. REGENERIS MELOCOTON 200 GR	REGENERIS	1,000	5,000	0.3	6/8/2017	1				
19	15	11376	ALPINA ALDE BOTELLA 200 GR	ALDE	18,000	90,000	6.0	6/8/2017	1				
20	60	8180	BOGGY CEREZA 120 GR (\$700)	GELATINA	6,000	50,000	2.0	7/23/2017	1				
21	61	8771	GELATINA BOGGY FRESA 120 GR SP	GELATINA	6,000	50,000	2.0	7/24/2017	2				
22	63	8170	GELATINA BOGGY CEREZA PREMIO 120 GR	GELATINA	6,000	50,000	2.0	7/24/2017	2				

BASE	BACHES SUB-LOTES
REGENERIS CREMOSO	1
BOUYURT	2
FIBRA	0.5
CREMOSO	7
FINESSE CREMOSO	0
ALDE	7.5
YOGO	0
DESCONTINUADO	0
REGENERIS	8.33333
FINESSE	8.16667
INACTIVO	0
GELATINA	13
SOKA	3

Figura 7: Interfaz del aplicativo

### 5.5. Restricciones:

El aplicativo debe basarse en el modelo diseñado, teniendo en cuenta los siguientes requerimientos y restricciones:

- El modelo debe tener en cuenta la demanda de productos que presenta el consumidor final sobre la empresa frente a los diferentes SKUs que se producen sobre la línea líquida 1. Esta restricción se verifica teniendo en cuenta que la demanda es un dato de entrada para el aplicativo, donde los operarios registran la demanda semanal de cada SKU.
- El modelo debe tener en cuenta la disponibilidad de cubetas, leche, material de empaque, estibas, personal y materia prima. Esta restricción se verifica teniendo en cuenta que la disponibilidad de la materia prima es un dato de entrada para el aplicativo, donde los operarios registran la disponibilidad para poder iniciar la operación asegurando de antemano que se cuenta con estos recursos.
- El modelo debe minimizar el número de trabajos tardíos. Esta restricción se verifica teniendo en cuenta que el aplicativo proporciona la mejor solución encontrada la cual garantiza el menor número de trabajos tardíos al evaluar la cantidad de estos trabajos generados en la empresa láctea.

### 5.6. Cumplimiento del estándar:

La norma técnica ISO 13053, hace referencia al proceso Seis Sigma. Este estándar se recomienda para empresas que usan procesos de fabricación y cuenta con cinco fases, las cuales son: Definición, Medición, Análisis, Mejora y Control (ISO 13053, 2011), éstas, fueron mostradas en la metodología del presente trabajo.

A su vez, la norma técnica ISO 9126 se caracteriza por evaluar la calidad de productos relacionados con software. Este estándar establece que cualquier componente de la calidad del software puede ser descrito en términos de seis características básicas, las cuales son: funcionalidad, confiabilidad, usabilidad, eficiencia, mantenibilidad y portabilidad (Figuroa, 2000). A continuación, se evaluarán dichas características:

**Tabla 7**  
Análisis de Software

Características	Subcaracterísticas	Pregunta
<b>Funcionalidad</b>	Idoneidad	¿El software desempeña las tareas? El aplicativo proporciona la programación de la producción para la línea líquida 1, minimizando el número de trabajos tardíos.
	Exactitud	¿Tienen consistencia los resultados de la herramienta? Los resultados están ligados con la demanda de la empresa y de esta forma genera un orden deseado y lógico.
	Seguridad	¿El aplicativo tiene la capacidad de otorgar exclusividad de uso a la empresa de lácteos? El aplicativo otorga exclusividad de uso a la empresa láctea ya que los datos de inicio son brindados por el mismo operario, el cual conoce de antemano la información necesaria.
<b>Confiabilidad</b>	Madurez	¿Se deben verificar las fallas del sistema? El aplicativo tiene un sistema de alertas el cual ayuda a minimizar las fallas que se puedan presentar.
	Tolerancia a fallos	¿La aplicación es capaz de manejar errores? Desde el ingreso de datos se evita que el usuario registre información errónea, de ser este el caso se activan las alertas que no dejan seguir el funcionamiento del aplicativo hasta que la información no sea verificada.
<b>Usabilidad</b>	Aprendizaje	¿Es fácil aprender a utilizar el sistema? Se entregará un manual de usuario para facilitar el aprendizaje y correcto uso del aplicativo
	Comprensión	¿Qué tan fácil es comprender el funcionamiento del sistema? El código del aplicativo está explicado de forma detallada, lo que permite la comprensión del funcionamiento del mismo. De igual forma el manual de usuario garantiza la comprensión del uso de la herramienta.
	Operatividad	¿El usuario puede utilizar el sistema sin mucho esfuerzo? El aplicativo es claro en cuanto a los datos de entrada que requiere y los pasos a seguir son muy simples.
<b>Eficiencia</b>	Comportamiento de recursos	¿Determina si el sistema utiliza recursos de manera eficiente? Para la inicialización del aplicativo se verifica la disponibilidad de la materia prima, sin el cual no se puede programar ningún trabajo.
<b>Mantenibilidad</b>	Facilidad de análisis	¿El sistema mantiene su funcionamiento a pesar de realizar cambios? El aplicativo está diseñado para realizar cambios según los datos de entrada que el operario diligencie y es posible que se realicen cambios en el código base.
	Facilidad de pruebas	¿La herramienta puede ser probada fácilmente? El código del aplicativo permite depurar para verificar la correcta codificación y funcionamiento de la misma.
<b>Portabilidad</b>	Adaptabilidad	¿El aplicativo se puede trasladar a otros ambientes? El aplicativo puede ser adaptado a otras líneas de la empresa, solo se debe cambiar la información de entrada y las matrices de información de tiempos de productos y bases.

	Co:Existencia	¿El sistema puede funcionar con otros sistemas? El aplicativo es un complemento a las herramientas ya existentes en la empresa láctea que manejan los tiempos y las operaciones del programa (DARUMA y Control Logic).
--	---------------	---

Nota: Construcción de los autores con base en la norma técnica ISO 9126

## 6. Resultados (Cumplimiento de objetivos, implementación del Diseño). Extensión máxima 3500 palabras.

El diseño de una herramienta que permita llevar a cabo la programación de la producción, se inició estableciendo una metodología encargada de calcular el tamaño de sublote, con el fin de disminuir los tiempos de producción reduciendo directamente los tiempos de espera de las máquinas. Para este objetivo, se implementó una ecuación que proporciona la cantidad de sublotos de 3,000kg que deben ser producidos para cada una de las referencias en una orden de producción. Para este apartado, se compararon los resultados de hacer una corrida de producción sin establecer un tamaño de sublote, como se realiza actualmente en la empresa, y otro, con el tamaño de lote establecido previamente por el aplicativo. Se debe aclarar que para ambos escenarios se asumió cero fallas en el sistema de producción. Con lo anterior, se evidenció que la metodología de la empresa, al tener días establecidos para la producción de ciertos SKUs, hace que una referencia de una misma base se produzca en varios días de la semana, incurriendo en mayores tiempos de limpieza, mientras que el aplicativo junta todos los sublotos de una misma base y los produce secuencialmente. A continuación, en la figura 8 se presenta un ejemplo gráfico sin establecer un tamaño de sublote para una base y en la figura 9 se muestra el mismo ejemplo con un tamaño de lote establecido.

Para este ejemplo, en la figura 8 se evidencia mediante el color azul el tiempo que lleva producir el proceso, sin establecer un tamaño de lote, se tiene un tiempo total de producción de la base de 1,401 minutos, mientras que, al tener un tamaño de lote establecido este tiempo disminuye en un 18% para un total de 1,145 minutos. Corroborando los beneficios de hacer *lot streaming* en cuanto a la disminución de tiempos.

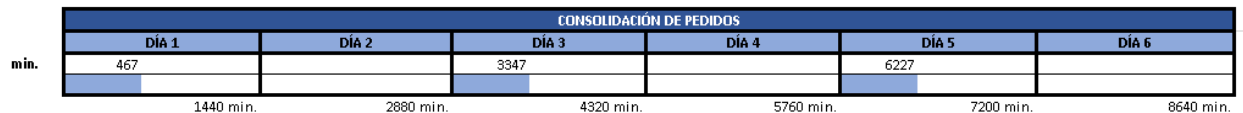


Figura 8: Diagrama de Gantt sin establecer un tamaño de lote

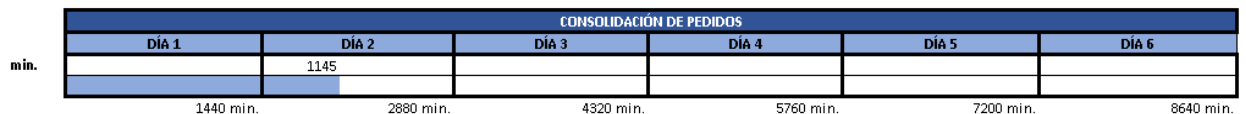


Figura 9: Diagrama de Gantt con un tamaño de lote establecido

Por otro lado, como fue presentado anteriormente, la función objetivo está enfocada al indicador de desempeño de trabajos tardíos, sin embargo, al ver que los resultados se presentan de manera tan favorable se recurrió a utilizar el  $C_{max}$  como indicador de desempate, ya que cuenta con la ventaja de tener valores que oscilan en un rango más amplio que permite ver de manera clara el impacto real que se está generando al comparar los resultados. En un principio se desarrolló la comparación frente a cinco órdenes de producción reales de cinco semanas que la empresa láctea proporcionó evaluando los indicadores de desempeño, posteriormente para recrear un escenario más ácido que demuestre la eficiencia en los resultados obtenidos por la heurística se generaron órdenes de producción con una mayor cantidad de SKUs, el método se explicará posteriormente al detalle. A continuación, se presentan los resultados obtenidos de manera determinística.

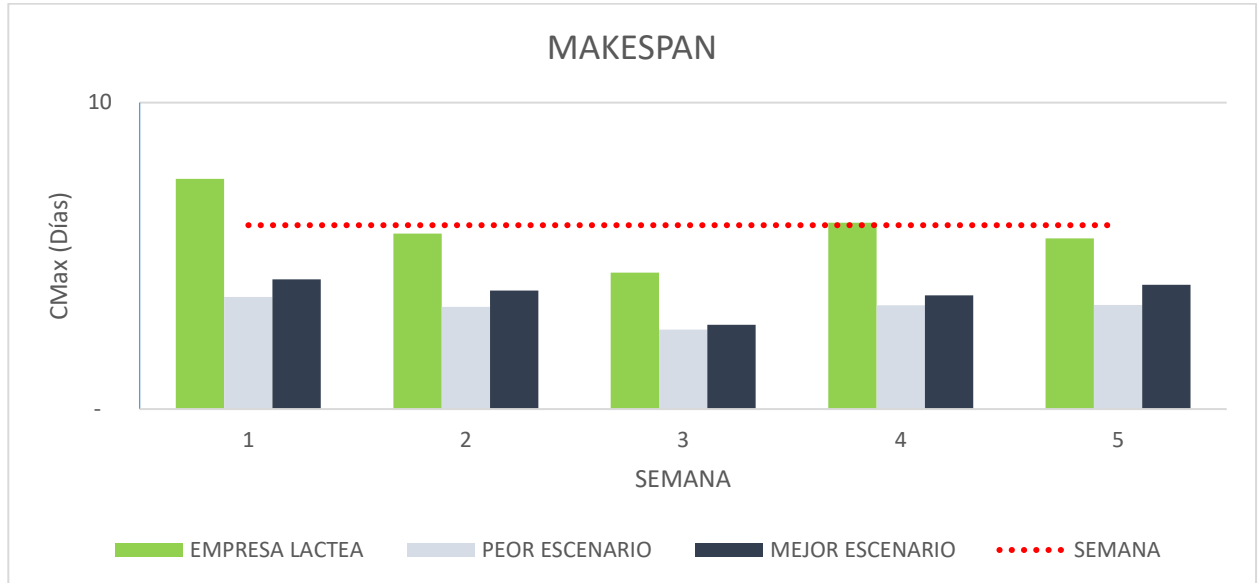
**Tabla 8**

*Resultados comparativos para cinco órdenes de producción*

SEMANA	PEDIDOS TARDIOS			CMAX		
	EMPRESA	MEJOR ESCENARIO	PEOR ESCENARIO	EMPRESA	MEJOR ESCENARIO	PEOR ESCENARIO
1	10,00	-	-	7,51	4,23	3,66
2	-	-	-	5,72	3,86	3,33
3	-	-	-	4,46	2,75	2,59
4	1,00	-	-	6,08	3,71	3,39
5	-	-	-	5,57	4,05	3,40

*Nota:* Construcción de los autores. Tiempo en días.

Al abordar las cinco órdenes de producción proporcionadas por la empresa láctea se inició recreando la forma tradicional en que ésta organiza los productos para ser producidos, se debe tener en cuenta que, a lo largo del documento se asumió que los equipos no tendrían fallas y que todas las materias primas estarían disponibles. Por otro lado, se presenta el mejor y el peor escenario obtenido por el aplicativo, ya que se conoce que el algoritmo genético se basa en resultados aleatorios, para poder asumir un 95% de confianza donde el número de corridas para garantizar una muestra representativa es de 53 corridas para cada una de las semanas, y de éstas se seleccionó la mejor y la peor para obtener confiabilidad en los resultados. Con lo anterior, se encontraron 10 pedidos tardíos para la primera semana y 1 pedido tardío para la cuarta semana con la metodología establecida por la empresa láctea. Al evaluar estas mismas órdenes de producción con el aplicativo, no se presentaron pedidos tardíos en ninguno de los dos escenarios. Se debe aclarar, que una semana de producción para la empresa consta de 6 días, que equivalen a 8,640 minutos, por lo que los pedidos tardíos serán tomados en cuenta después de sobrepasar este tiempo.



*Figura 10:* Resultados comparativos Makespan

La figura anterior, muestra los resultados presentados en la tabla 8 relacionados con el makespan, donde se evidencia que ambos escenarios proporcionados por el aplicativo mejoran la situación actual de la empresa. Se debe tener en cuenta que todo lo anterior se logró gracias a la caracterización del entorno de manufactura del sistema de producción de la línea líquida 1 realizada por los autores, cumpliendo de esta forma el objetivo número 1 del presente trabajo. Se prosiguió hallando los límites superiores e inferiores para el gráfico de control con un 95 % de confianza para el número de pedidos tardíos y el CMax. Adicional a esto, se realizó la programación de una regla de despacho

estática SPT (*shortest processing time*) y una regla de despacho dinámica CR (*critical ratio*) para una comparación más amplia de los resultados obtenidos por el aplicativo.

**Tabla 9**

*Intervalos de confianza de trabajos tardíos*

SEMANA	TOTAL PEDIDOS	EMPRESA LACTEA	PEOR ESCENARIO	MEJOR ESCENARIO	SPT	CR	PROMEDIO	LI (95%)	LS (95%)
1	81.00	10.00	-	-	6.00	3.00	-	(0.15)	0.24
2	70.00	-	-	-	-	-	-	(0.21)	0.01
3	59.00	-	-	-	-	-	-	(0.07)	0.13
4	75.00	1.00	-	-	-	-	-	(0.11)	0.14
5	65.00	-	-	-	-	-	-	(0.09)	0.02

*Nota:* Construcción de los autores. Unidades/pedidos

En la tabla anterior se evidencia que ambas reglas de despacho presentan pedidos tardíos en la primera semana, mientras que en las demás, el tiempo de producción se encuentra dentro de lo establecido. Adicionalmente, se realizó una comparación del *Cmax* obtenido con las reglas de despacho y el promedio de los dos escenarios, estos resultados se muestran en la tabla 10.

**Tabla 10**

*Intervalos de confianza de CMax*

SEMANA	T. SEMANA	EMPRESA LACTEA	PEOR ESCENARIO	MEJOR ESCENARIO	SPT	CR	LI CMAX	PROMEDIO	LS CMAX
1	6,00	7,51	4,23	3,66	7,10	6,02	2,95	3,95	5,08
2	6,00	5,72	3,86	3,33	4,50	4,31	2,64	3,60	4,03
3	6,00	4,46	2,75	2,59	4,18	4,46	1,95	2,67	3,38
4	6,00	6,08	3,71	3,39	5,15	4,64	3,09	3,55	4,50
5	6,00	5,57	4,05	3,40	4,83	4,04	3,35	3,73	3,96

*Nota:* Construcción de los autores. Tiempo en días.

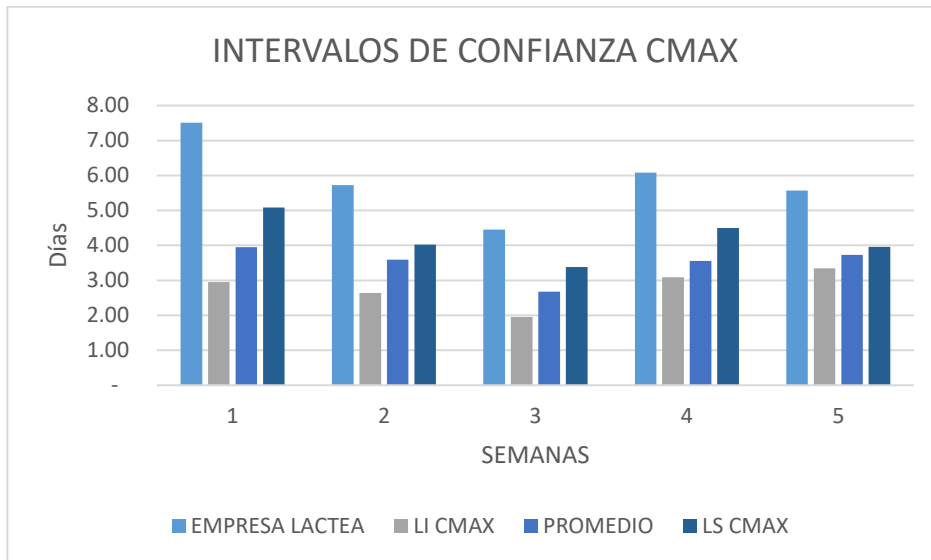


Figura 11: Gráfico de control  $C_{max}$

Por otro lado, la gráfica anterior compara los resultados presentados con la metodología de la empresa y el promedio de los escenarios del aplicativo, a su vez, se evidencian los límites que establecen el rango donde los resultados del aplicativo podrían oscilar. Se puede confirmar que con la metodología establecida por la empresa se requiere de mayor tiempo para finalizar todas las tareas. A continuación, la figura número 12 muestra la variación del promedio de los escenarios del aplicativo frente a sus límites.

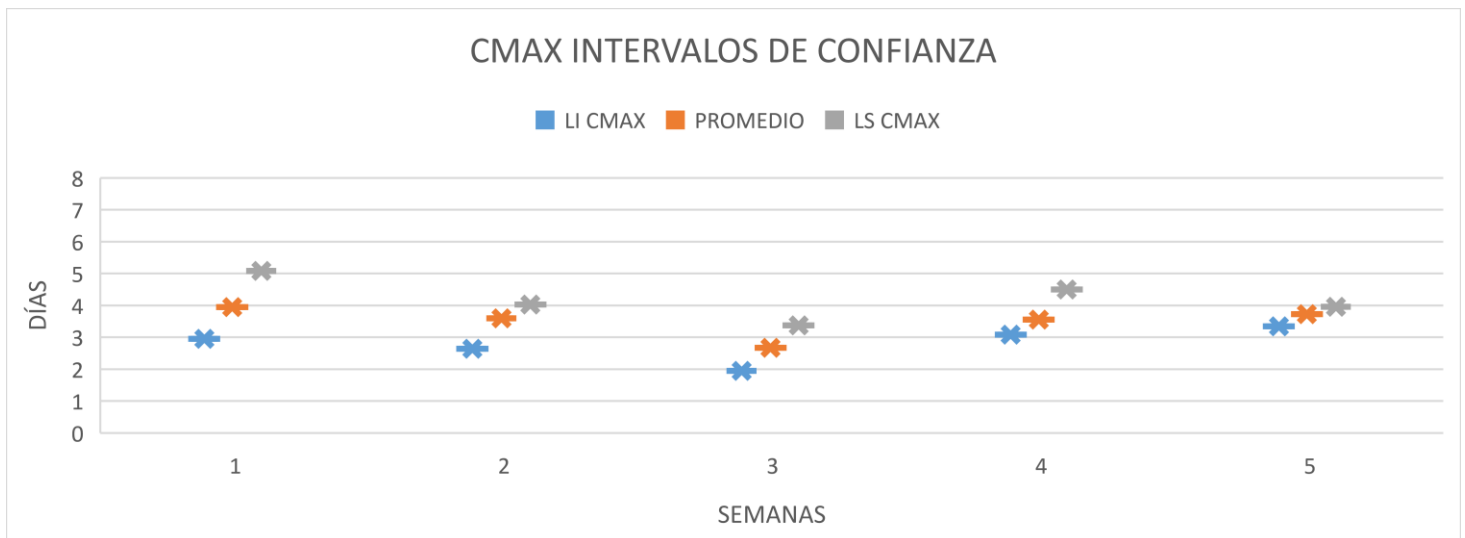


Figura 12: Gráfico de control  $c_{max}$

Se evidencia que el promedio de los escenarios proporcionados por el aplicativo presenta un  $C_{max}$  favorable, mostrando una vez más las ventajas de implementar esta herramienta basada en el algoritmo genético, ya que, a pesar de obtener resultados deseados con las reglas de despacho, se probó que el aplicativo puede llegar a mejores soluciones. La tabla 11 evidencia que todos los casos presentan una variación porcentual a favor del aplicativo.



**Tabla 11***Variación porcentual reglas de despacho y empresa versus aplicativo*

SEMANA	APLICATIVO vs. EMPRESA	APLICATIVO vs. SPT	APLICATIVO vs. CR
1	105%	94%	64%
2	72%	35%	30%
3	72%	61%	72%
4	79%	52%	37%
5	64%	42%	19%

*Nota: Construcción de los autores.*

Por otro lado, para asegurar el rendimiento del aplicativo, se evaluaron veinticinco instancias modificadas por los autores para obtener un criterio de comparación más ácido, cada una de estas instancias consta de la cantidad de pedidos demandados en dos semanas, pero hipotéticamente realizados en una semana.

A continuación, se presenta la tabla donde se evidencia el total de pedidos tardíos para la metodología de la empresa, los escenarios del aplicativo (para esta instancia también se desarrollaron 53 corridas donde se seleccionó la mejor y la peor) y las reglas de despacho.

**Tabla 12***Resultados comparativos de Pedidos Tardíos*

INSTAN CIA	TOTAL PEDIDOS	EMPRESA LACTEA	PEOR ESCEN.	MEJOR ESCEN.	SPT	CR	PROM	LI	LS
1-1	162	103.00	53.00	2.00	63.00	90.00	32.38	21.01	43.74
1-2	151	92.00	5.00	-	59.00	5.00	1.38	(0.06)	2.81
1-3	140	81.00	1.00	-	51.00	3.00	0.13	(0.12)	0.37
1-4	156	97.00	7.00	1.00	59.00	7.00	2.75	1.02	4.48
1-5	146	87.00	3.00	2.00	56.00	5.00	2.13	1.88	2.37
2-1	151	77.00	3.00	1.00	43.00	9.00	2.50	1.86	3.14
2-2	140	63.00	1.00	-	32.00	3.00	0.88	0.63	1.12
2-3	129	52.00	-	-	23.00	8.00	0.13	(0.12)	0.37
2-4	145	67.00	-	-	30.00	3.00	-	-	-
2-5	135	58.00	3.00	1.00	30.00	7.00	0.88	0.63	1.12
3-1	140	66.00	1.00	-	99.00	9.00	0.75	0.43	1.07
3-2	129	54.00	1.00	-	28.00	6.00	0.13	(0.12)	0.37
3-3	118	32.00	-	-	19.00	5.00	-	-	-
3-4	134	59.00	-	-	26.00	8.00	-	-	-
3-5	124	49.00	-	-	26.00	7.00	-	-	-
4-1	156	81.00	5.00	1.00	50.00	9.00	4.50	3.52	5.48
4-2	145	65.00	7.00	3.00	39.00	12.00	6.00	4.72	7.28
4-3	134	54.00	-	-	31.00	5.00	-	-	-
4-4	150	69.00	5.00	2.00	39.00	9.00	4.25	3.29	5.21

INSTAN CIA	TOTAL PEDIDOS	EMPRESA LACTEA	PEOR ESCEN.	MEJOR ESCEN.	SPT	CR	PROM	LI	LS
4-5	140	60.00	6.00	1.00	38.00	15.00	4.75	3.15	6.35
5-1	65	-	-	-	-	4.00	-	-	-
5-2	135	63.00	5.00	1.00	33.00	10.00	1.50	0.52	2.48
5-3	124	52.00	-	-	24.00	7.00	-	-	-
5-4	140	67.00	8.00	1.00	31.00	12.00	7.13	5.41	8.84
5-5	130	58.00	-	-	40.00	7.00	-	-	-

*Nota:* Construcción de los autores. Unidades/pedidos

A su vez, la tabla 13 presenta los resultados comparativos para el CMax de las mismas metodologías nombradas anteriormente.

**Tabla 13**

*Resultados comparativos de Cmax*

INSTANCIAS	T. SEMANA	EMPRESA	PEOR ESCEN.	MEJOR ESCEN.	SPT	CR	LI	PROM	LS	
1-1		6,00	15,02	8,43	7,11	13,58	8,58	7,55	7,89	8,24
1-2		6,00	13,09	6,57	5,51	10,99	6,56	5,66	5,94	6,22
1-3		6,00	11,97	6,00	5,05	10,66	6,24	5,19	5,39	5,60
1-4		6,00	13,27	6,49	6,33	11,64	7,23	6,32	6,36	6,40
1-5		6,00	13,08	6,18	6,11	11,31	6,49	6,11	6,12	6,14
2-1		6,00	13,09	6,22	6,03	10,99	7,60	6,11	6,17	6,24
2-2		6,00	11,16	6,02	5,47	8,39	6,35	5,82	5,95	6,09
2-3		6,00	10,04	5,30	4,92	8,07	7,00	5,21	5,35	5,48
2-4		6,00	11,34	6,19	5,53	9,04	7,49	5,72	5,95	6,18
2-5		6,00	11,16	6,08	6,01	10,75	10,68	5,98	6,00	6,02
3-1		6,00	11,97	6,04	5,10	10,75	8,45	5,54	5,82	6,10
3-2		6,00	10,04	6,06	4,99	8,07	6,30	4,94	5,20	5,46
3-3		6,00	8,91	4,99	4,52	7,74	6,51	4,46	4,58	4,69
3-4		6,00	10,21	5,52	4,77	8,72	7,21	4,79	5,01	5,22
3-5		6,00	10,03	5,27	4,53	8,39	8,18	4,87	5,06	5,24
4-1		6,00	13,27	6,27	6,02	10,25	7,83	6,18	6,24	6,30
4-2		6,00	11,34	6,36	6,22	9,04	6,44	6,28	6,32	6,37
4-3		6,00	10,21	5,35	4,83	8,72	7,29	5,02	5,12	5,22
4-4		6,00	11,52	6,29	6,05	9,69	6,50	6,15	6,23	6,31
4-5		6,00	11,33	6,28	6,00	9,37	8,78	6,12	6,21	6,30
5-1		6,00	5,57	3,62	3,48	6,21	6,19	3,48	3,52	3,55
5-2		6,00	11,16	6,22	6,01	10,80	10,37	5,98	6,04	6,09
5-3		6,00	10,03	5,01	4,66	8,39	6,96	4,88	4,97	5,05
5-4		6,00	11,33	6,40	6,02	9,37	9,23	6,26	6,35	6,45
5-5		6,00	11,15	5,82	5,08	10,38	9,62	4,99	5,18	5,36

*Nota:* Construcción de los autores. Tiempo en días

Se evidencia que con la metodología implementada por la empresa, 24 de 25 ordenes presentan pedidos tardíos, mientras que el peor escenario del aplicativo tiene 16 pedidos tardíos y el mejor escenario tiene 11. A continuación se muestran los resultados de la tabla 12 gráficamente para su mayor comprensión.

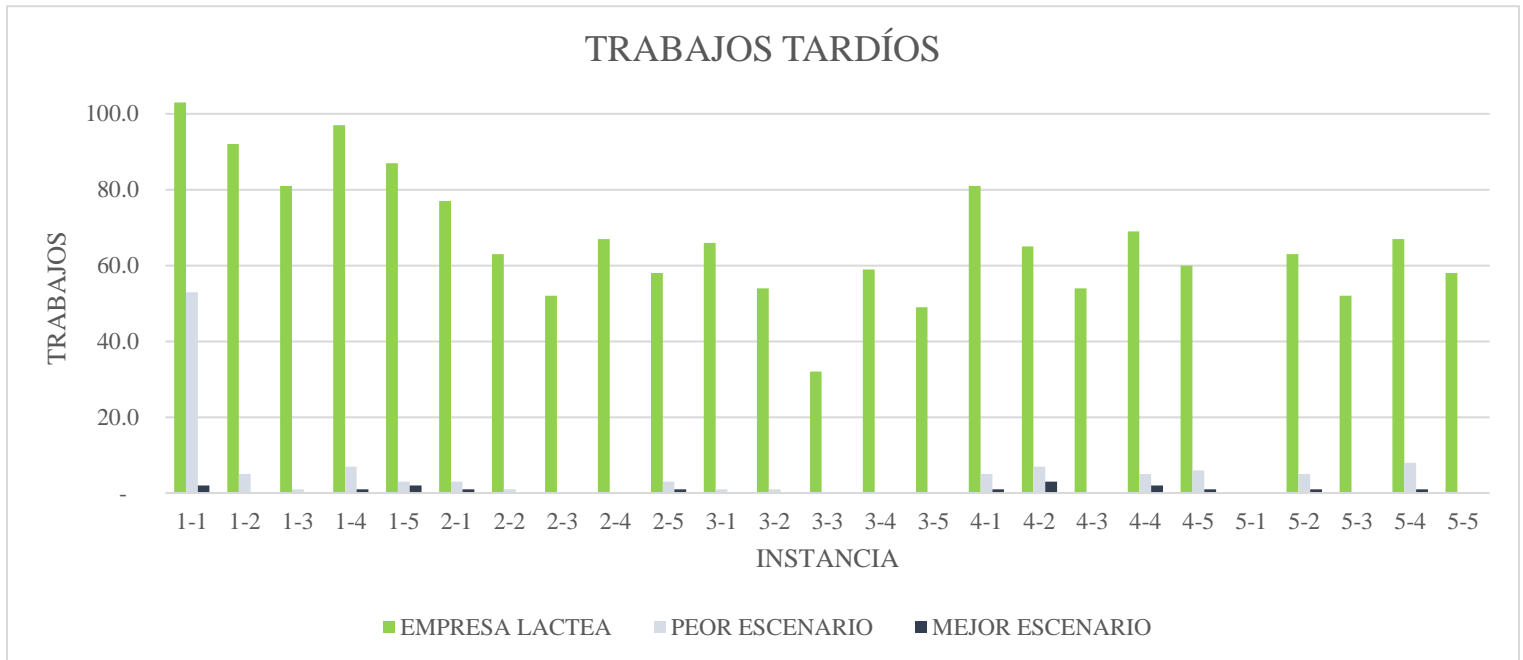


Figura 13: Resultados número de trabajos tardíos

La figura 13 evidencia la cantidad de pedidos tardíos que presenta la empresa al implementar su metodología, pues en comparación a los datos proporcionados en los escenarios del aplicativo, se evidencia una gran diferencia en cuanto a los niveles de trabajos tardíos, pues éstos últimos mantienen sus datos próximos al valor cero.

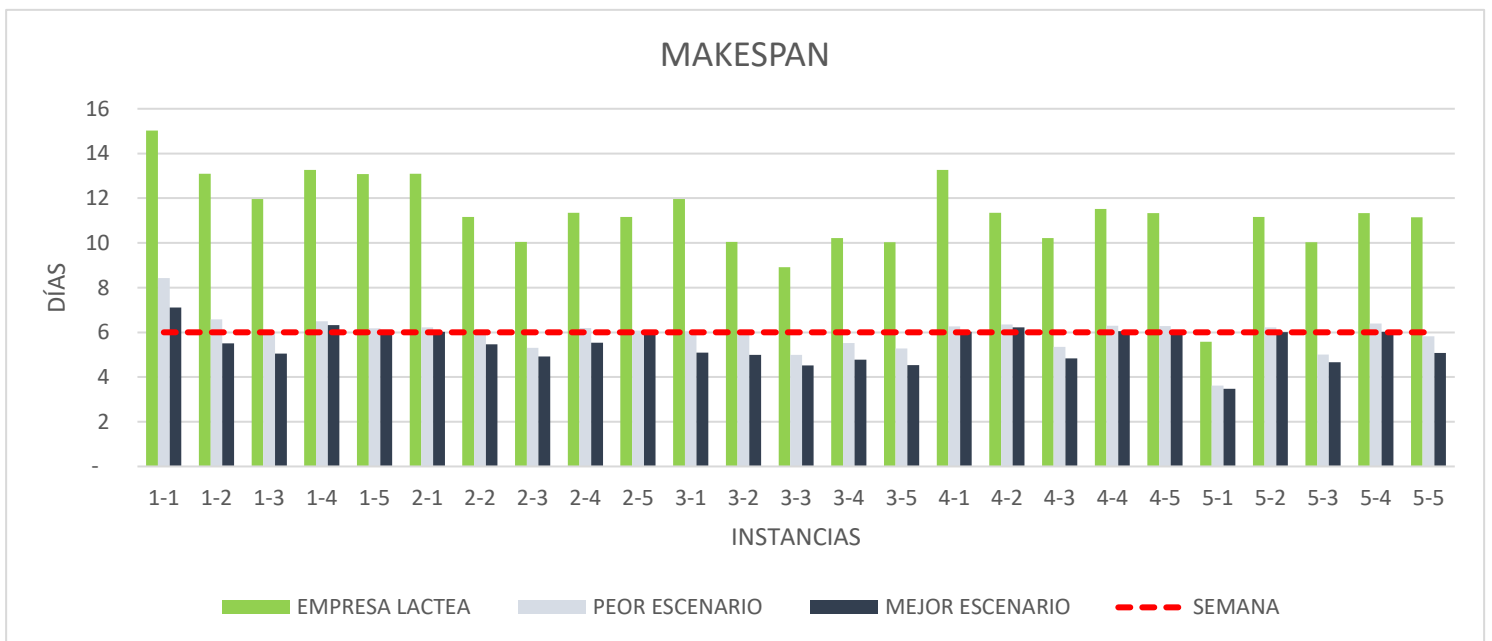


Figura 14: Resultados Makespan

A su vez, la figura 14 evidencia como el tiempo total requerido para terminar todas las tareas con la metodología de la empresa es superior al tiempo establecido de producción semanal de la empresa y a los datos proporcionados por el aplicativo para ambos escenarios. En cuanto a la tardanza promedio, mostrada en la figura 18 se

evidencia que para todas las semanas la empresa láctea [presenta la tardanza promedio del número de pedidos tardíos](#), mientras que el mejor escenario del aplicativo sólo presenta tardanza promedio en 10 de las 25 semanas.

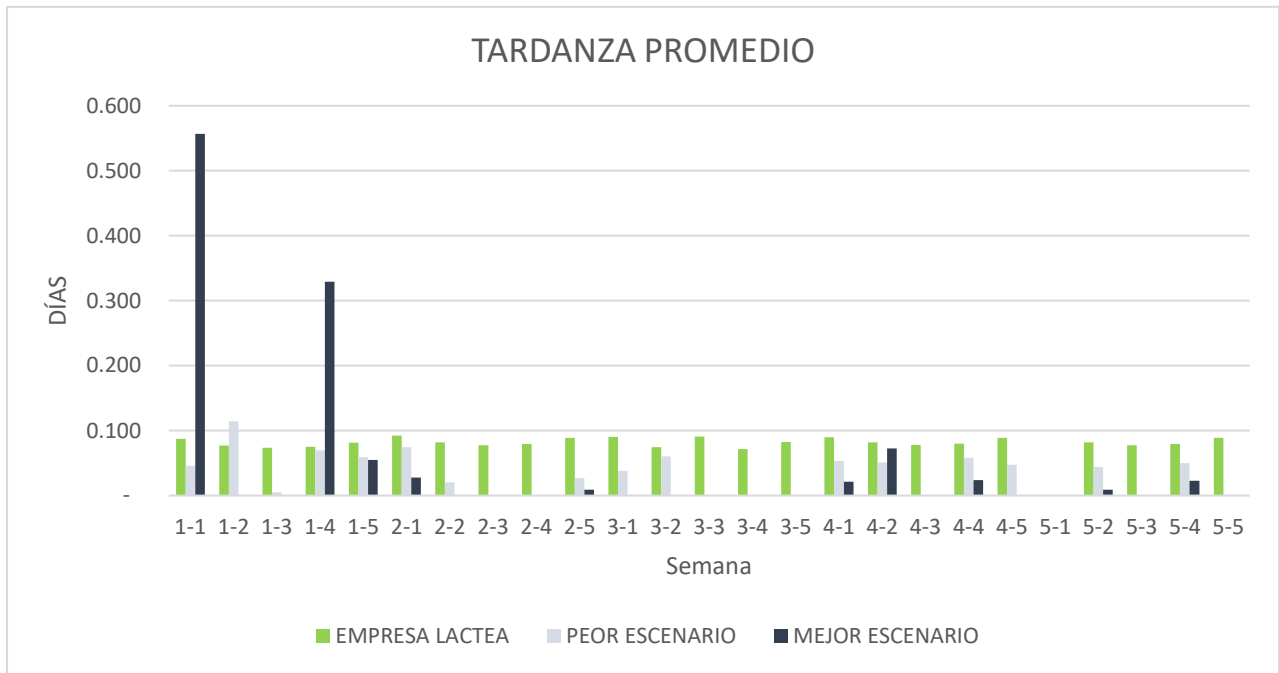


Figura 15: Resultados tardanza promedio

A su vez, se realizaron gráficos de control para estimar la variación de los datos. En las figuras 16, 17 y 18 se muestran los datos gráficamente, estos gráficos tienen como objetivo tener control sobre los procesos de producción y a su vez, pretenden establecer valores máximos y mínimos en los que el aplicativo podrá oscilar.

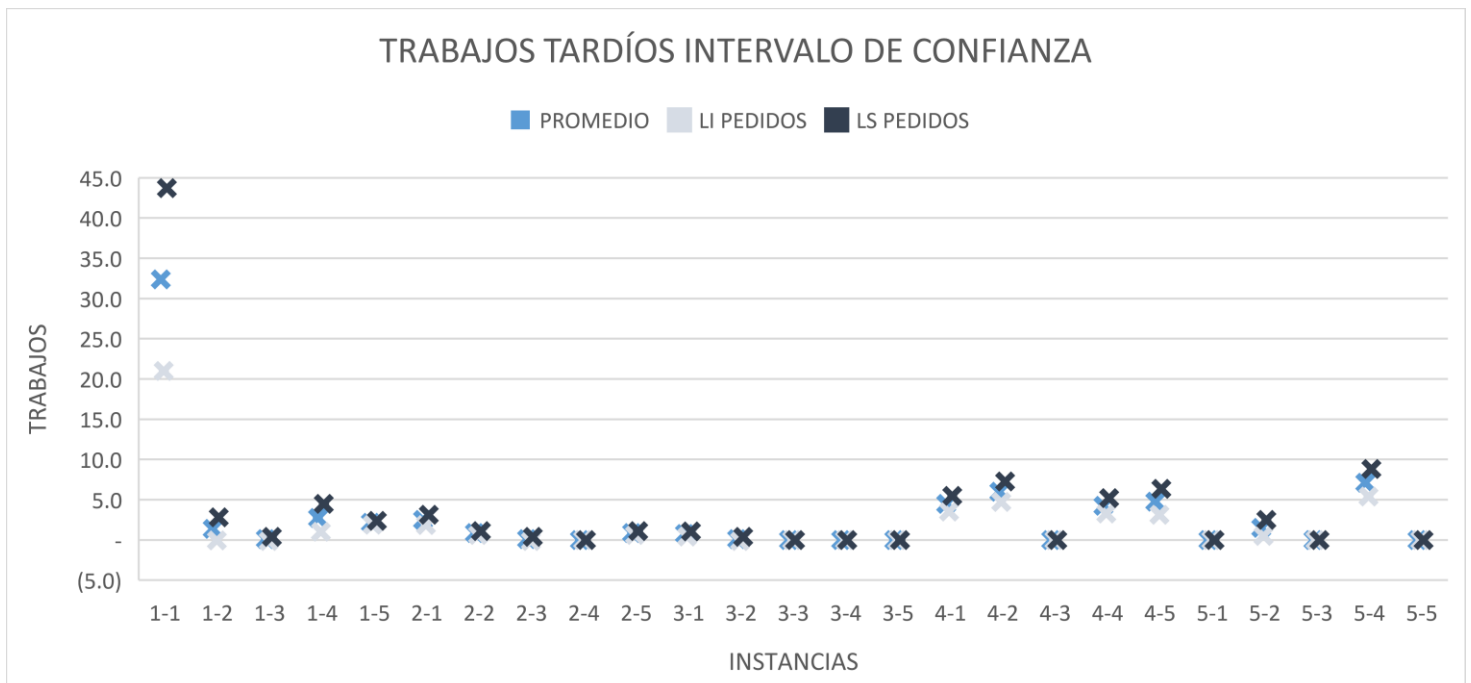


Figura 16: Gráfico de control trabajos tardíos

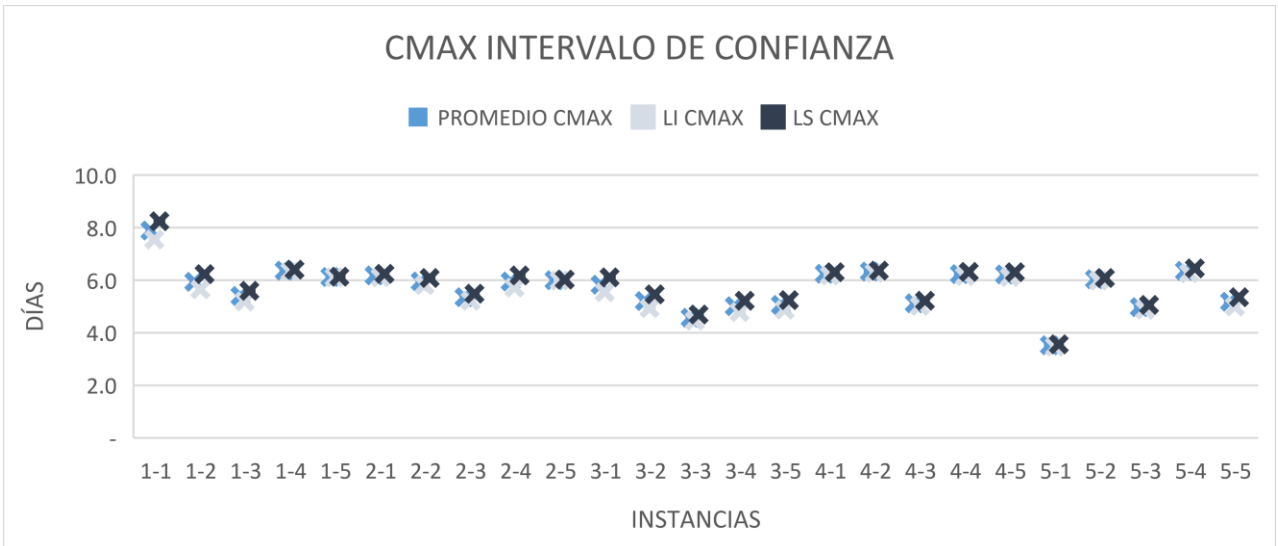


Figura 17: Gráfico de control cmax

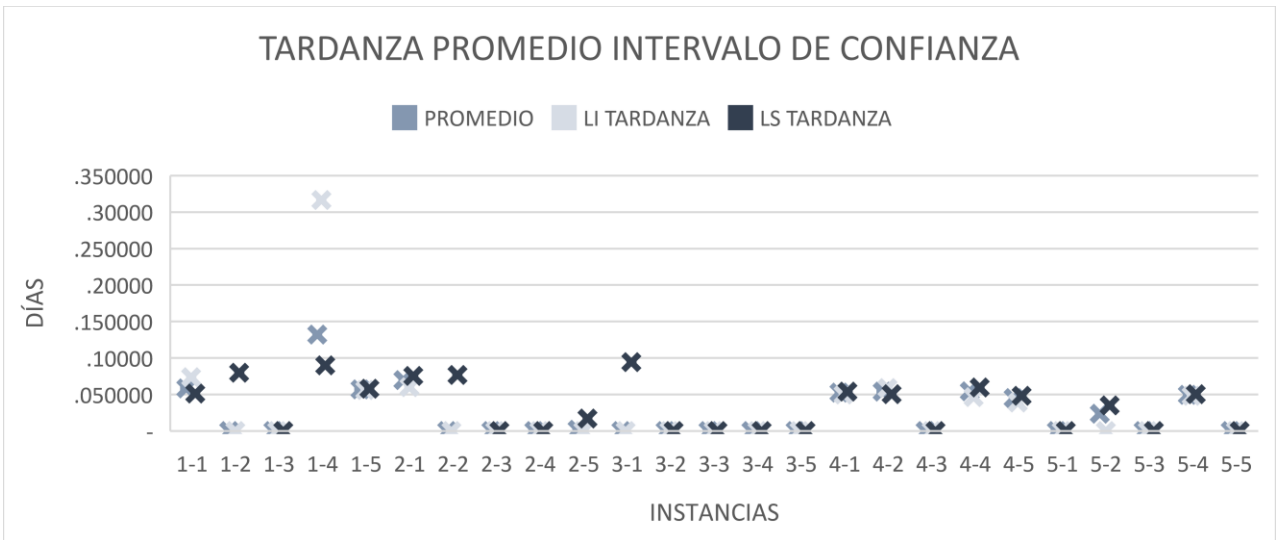


Figura 18: Gráfico de control tardanza promedio

Por otro lado, la figura 19 muestra los resultados comparativos del aplicativo frente a las reglas de despacho, tanto dinámicas como estáticas, evidenciando una notable reducción en la tardanza promedio. Confirmando, al igual que los datos presentados previamente, que el desarrollo de un algoritmo genético es necesario para asegurar los resultados deseados.

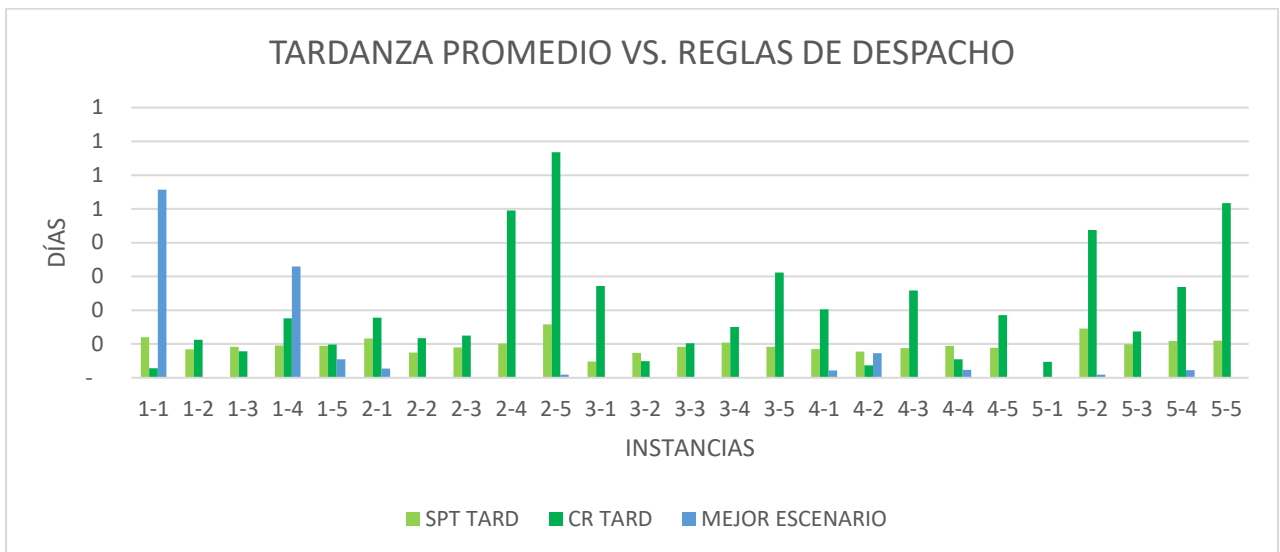


Figura 19: Gráfico comparativo tardanza promedio

### Medición del Impacto

Al generar resultados positivos, el proyecto impactará en diferentes áreas de la empresa láctea colombiana. Para el presente trabajo se tendrán en cuenta las mejoras porcentuales de los indicadores trabajados a través del documento: número de trabajos tardíos,  $C_{max}$  y tardanza promedio. A su vez, se debe reconocer el impacto positivo de realizar *Lot streaming*, donde se puede evidenciar su impacto mediante la evaluación de las reglas de despacho, ya que al tener como fundamento criterios de ordenamiento según el tiempo de proceso, éstas implícitamente agrupan los trabajos por base reflejando los resultados que se obtendrían mediante el lote, teniendo esto en cuenta, para comparar los resultados y tener conclusiones contundentes sobre la diferencia entre evaluar solamente el *Lot streaming* frente al Algoritmo Genético (el cual está teniendo en cuenta un loteo y además un criterio de búsqueda para un gran número de iteraciones con el fin de encontrar una solución adecuada) basta simplemente con evidenciar la diferencia entre los resultados proporcionados por el aplicativo frente a los de las reglas de despacho. Por otro lado, al tener una medición de indicadores favorables, implica que se presenta una mejor utilización del recurso tiempo y reafirma los buenos resultados obtenidos por el aplicativo. Se evidencian mejoras considerables en los tiempos de producción que demuestran que no existe un desfase referente a los tiempos posibles determinados por la empresa láctea (turnos de producción), aun así, en las instancias en donde los pedidos son de tamaño considerablemente mayor.

Con el fin de evidenciar las mejoras presentadas anteriormente, se compararon los resultados con la cota inferior de cada uno de los indicadores para las cinco y veinticinco instancias. A continuación se presentan los resultados para las cinco instancias evaluadas inicialmente. Para el número de pedidos tardíos, se tomó como cota inferior la cantidad de pedidos presentados para cada una de las semanas, se halló la desviación porcentual promedio de cada una de las metodologías con la siguiente ecuación.

$$\text{Desviación porcentual promedio} = \frac{\sum \frac{\text{Total de pedidos} - \text{Número de pedidos tardíos por metodología}}{\text{Total de pedidos}}}{5 \text{ semanas}}$$

A continuación, se presentan los resultados por cada metodología.

**Tabla 14***Desviación porcentual promedio de trabajos tardíos.*

DESVIACIÓN PORCENTUAL PROMEDIO DE TRABAJOS TARDÍOS					
PEOR ESCENARIO	MEJOR ESCENARIO	PROMEDIO	SPT	CR	EMPRESA LÁCTEA
0,00%	0,00%	0,00%	1,48%	0,74%	2,74%

*Nota: Construcción de los autores.*

En la tabla número 15, se muestra el cumplimiento al programa que se halló con la siguiente ecuación:

$$\text{Cumplimiento al programa} = \frac{\text{Número de pedidos procesados}}{\text{Número de pedidos totales}}$$

**Tabla 15***Cumplimiento al programa*

CUMPLIMIENTO AL PROGRAMA					
TRABAJOS TARDÍOS					
PEOR ESCENARIO GA	MEJOR ESCENARIO GA	PROMEDIO GA	SPT	CR	EMPRESA LÁCTEA
100,00%	100,00%	100,00%	98,52%	99,26%	97,26%

*Nota: Construcción de los autores.*

Se evidencia cómo la herramienta en ambos escenarios, tiene un cumplimiento del programa del 100%, mientras que en las metodologías restantes se presenta cierto porcentaje de faltantes, en el caso de la empresa láctea los resultados se encuentran 3 puntos porcentuales por debajo de los resultados del aplicativo. A continuación se muestra gráficamente los resultados presentados anteriormente.

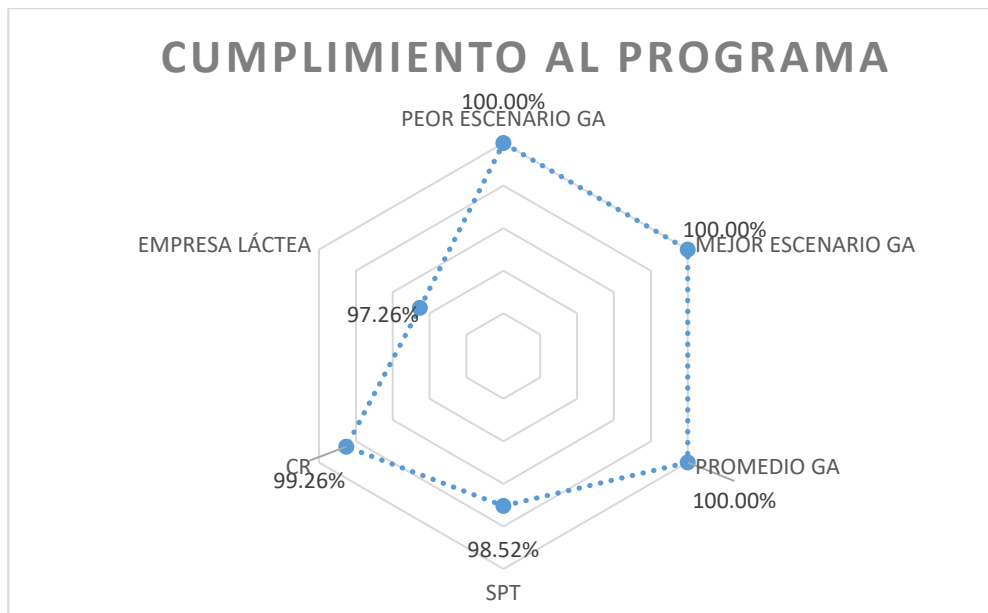


Figura 20: Gráfico del cumplimiento al programa

Con el objetivo de mostrar mayor cantidad de resultados, se halló la cantidad de óptimos para el número de pedidos tardíos, para esto, se tomaron las semanas en las que hubo cero trabajos tardíos y se dividió por 5, número de semanas analizadas, los resultados son mostrados en la tabla 16.

**Tabla 16**  
Cantidad de óptimos

CANTIDAD DE ÓPTIMOS					
TRABAJOS TARDÍOS					
PEOR ESCENARIO	MEJOR ESCENARIO	PROMEDIO	SPT	CR	EMPRESA LÁCTEA
100,00%	100,00%	100,00%	80,00%	80,00%	60,00%

Nota: Construcción de los autores.

Se evidencia que para los escenarios del aplicativo se obtuvo en las 5 semanas cero trabajos tardíos, teniendo un porcentaje de óptimos del 100%, mientras que, para las reglas de despacho SPT y CR se obtuvo 4 de 5 semanas con cero trabajos tardíos para un porcentaje de óptimos del 80%. Finalmente, la empresa láctea contó con 3 semanas de 5 con cero faltantes teniendo un porcentaje de óptimos del 60%, 40 puntos porcentuales por debajo de los resultados presentados por el aplicativo.

Para el segundo indicador, el *makespan*, los autores Kurz & Askin (2003) implementaron la siguiente ecuación para hallar la cota inferior.

$$\begin{aligned}
 & \text{Cota inferior} \\
 & = \max_{t=1 \dots g} \left\{ \min_{i \in S^t} \sum_{t=1}^{t-1} \left( p_i^t + \min_{j=0 \dots n} s_{ji}^t \right) + \frac{\sum_{i \in S^t} \left( p_i^t + \min_{j=0 \dots n} s_{ji}^t \right)}{m^t} + \min_{i \in S^t} \sum_{t=t+1}^g \left( p_i^t + \min_{j=0 \dots n} s_{ji}^t \right) + \frac{1}{m^t} \sum_{k=1}^{m^t-1} \left[ \min_{i \in S^t[k]} \sum_{t=1}^{t-1} \left( p_i^t + \min_{j=0 \dots n} s_{ji}^t \right) - \min_{i \in S^t} \sum_{t=1}^{t-1} \left( p_i^t + \min_{j=0 \dots n} s_{ji}^t \right) \right] \right\}
 \end{aligned}$$

Con base en lo anterior, a continuación se muestra la cota inferior para cada una de las semanas.

**Tabla 17**  
Cota inferior makespan

SEMANA	COTA INFERIOR
1	4,980
2	2,660
3	2,273
4	3,046
5	3,820

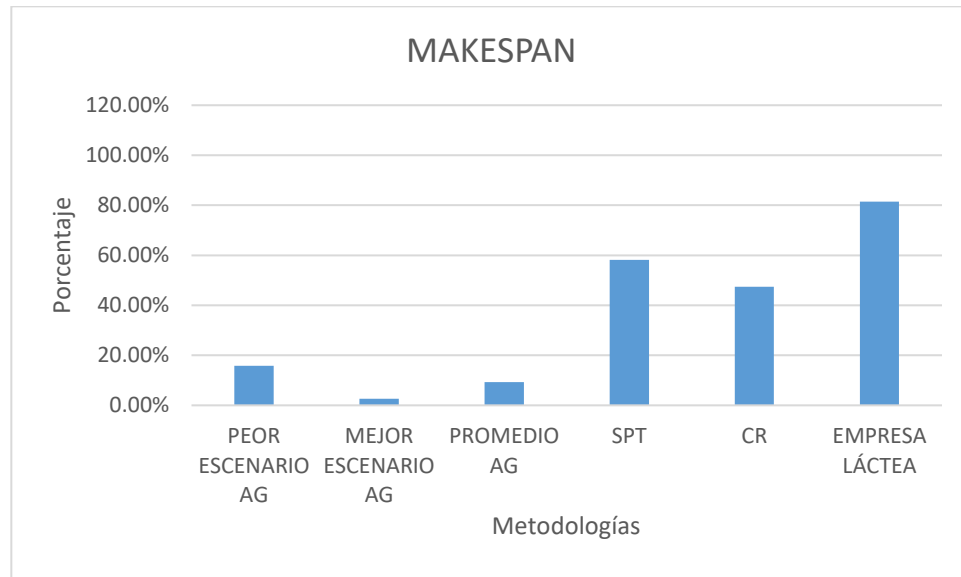
Nota: Construcción de los autores. Tiempo en días

En la tabla 18 se presentan los resultados por cada metodología según la cota inferior establecida.



**Tabla 18***Desviación porcentual promedio del makespan*

DESVIACIÓN PORCENTUAL PROMEDIO DEL MAKESPAN					
PEOR ESCENARIO AG	MEJOR ESCENARIO AG	PROMEDIO AG	SPT	CR	EMPRESA LÁCTEA
15,83%	2,66%	9,24%	58,15%	47,39%	81,51%

*Nota: Construcción de los autores.**Figura 21: Gráfico desviación porcentual promedio makespan*

En la figura anterior, se muestra gráficamente qué tan distante se encuentran los resultados promedios de cada una de las metodologías según su cota inferior, se evidencia que el mejor escenario del aplicativo dista de 3 puntos porcentuales de su cota inferior, mientras que la empresa láctea se aleja de 81 puntos.

Finalmente para el tercer indicador tardanza promedio, se eligió como cota inferior el valor de cero, pues es el valor deseado en las cinco semanas. Los resultados son mostrados a continuación.

**Tabla 19***Desviación porcentual promedio de la tardanza promedio*

DESVIACIÓN PORCENTUAL PROMEDIO DE LA TARDANZA PROMEDIO					
PEOR ESCENARIO	MEJOR ESCENARIO	PROMEDIO	SPT	CR	EMPRESA LÁCTEA
0,00%	0,00%	0,00%	0,37%	0,01%	0,78%

*Nota: Construcción de los autores.*

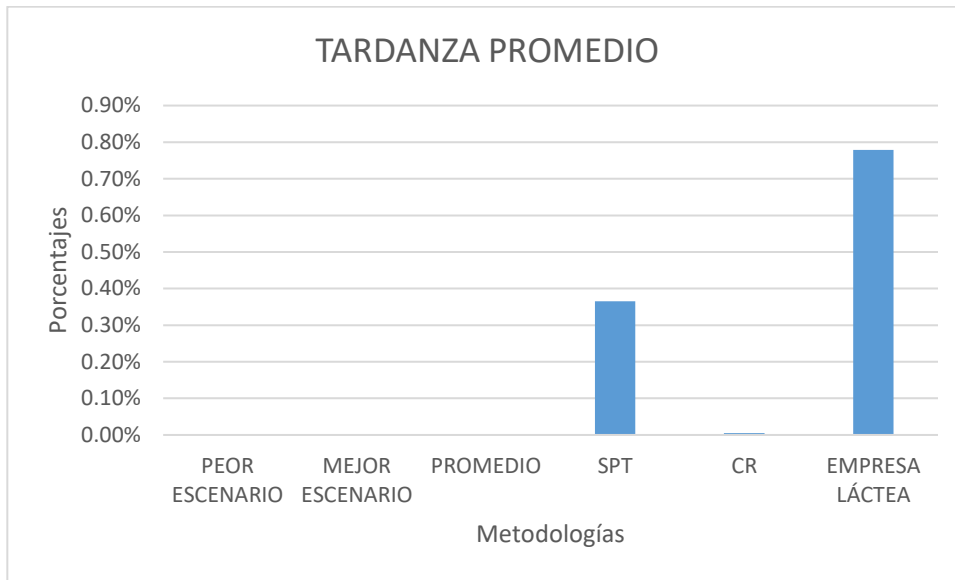


Figura 22: Gráfico desviación porcentual promedio de la tardanza promedio

Como se muestra en la tabla 19 y la figura anterior, las reglas de despacho SPT y CR presentaron cierta tardanza promedio la cual se aleja en un 0,37% y 0,01%, respectivamente, de la cota inferior. A su vez, la empresa láctea se aleja en un 0,78% mientras que el aplicativo no cuenta con tardanza promedio.

Finalmente, se presenta la desviación porcentual para los indicadores: número de pedidos tardíos, *makespan* y tardanza promedio de las veinticinco instancias, se debe tener en cuenta que para hallar la cota inferior del indicador *makespan* se usó la misma ecuación presentada en la tabla 17 usada para las cinco instancias. Esta desviación porcentual hace referencia sobre qué tan lejano se encuentran los resultados en cada metodología para cada uno de los indicadores de su cota inferior, es decir, de su valor deseado. A su vez, se muestra el indicador del cumplimiento al programa y la cantidad de óptimos basados en el indicador de número de pedidos tardíos para una mayor comprensión de los resultados obtenidos anteriormente.

**Tabla 20**

*Desviación porcentual promedio trabajos tardíos para veinticinco instancias*

DESVIACIÓN PORCENTUAL PROMEDIO TRABAJOS TARDÍOS					
PEOR ESCENARIO	MEJOR ESCENARIO	PROMEDIO	SPT	CR	EMPRESA LÁCTEA
2,99%	0,43%	1,89%	27,34%	7,40%	45,45%

*Nota:* Construcción de los autores

**Tabla 21**

*Desviación porcentual promedio makespan para veinticinco instancias*

MAKESPAN					
PEOR ESCENARIO AG	MEJOR ESCENARIO AG	PROMEDIO AG	SPT	CR	EMPRESA LÁCTEA
55,26%	42,24%	48,71%	149,09%	90,66%	182,84%

*Nota:* Construcción de los autores

**Tabla 22***Desviación porcentual promedio de la tardanza promedio para veinticinco instancias*

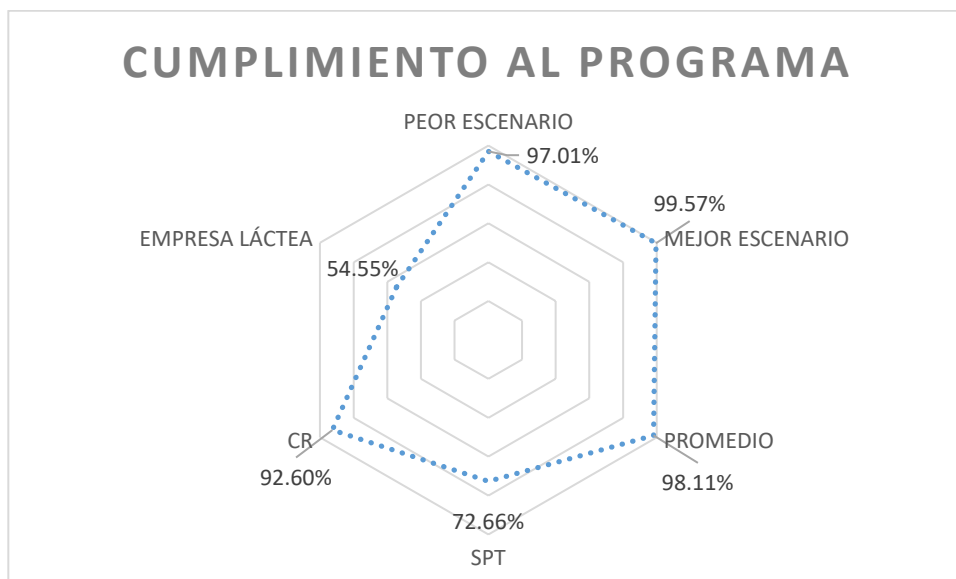
DESVIACIÓN PORCENTUAL TARDANZA PROMEDIO					
PEOR ESCENARIO	MEJOR ESCENARIO	PROMEDIO	SPT	CR	EMPRESA LÁCTEA
1,31%	0,75%	0,40%	1,56%	3,41%	1,31%

*Nota: Construcción de los autores***Tabla 23***Cumplimiento al programa para veinticinco instancias*

CUMPLIMIENTO AL PROGRAMA					
TRABAJOS TARDÍOS					
PEOR ESCENARIO	MEJOR ESCENARIO	PROMEDIO	SPT	CR	EMPRESA LÁCTEA
97,01%	99,57%	98,11%	72,66%	92,60%	54,55%

*Nota: Construcción de los autores*

Se evidencia en gran parte de los indicadores una mayor desviación porcentual por parte de la empresa láctea. Refiriéndose al indicador de número de pedidos tardíos, la desviación porcentual para el peor escenario del aplicativo dista de la cota inferior en aproximadamente 3 puntos porcentuales, tenido así un cumplimiento al programa del 97,07%, por otro lado, el mejor escenario del aplicativo dista de 0,43% de la cota inferior con un cumplimiento del programa del 99,57%, mientras que la empresa láctea se aleja de la cota en un 45,45% y sólo tiene un cumplimiento al programa de 54,55%. Lo anterior evidencia que el mejor escenario del aplicativo mejora el cumplimiento del programa de la empresa en 45 puntos porcentuales. A vez, es importante resaltar que las reglas de despacho presentan un buen nivel del cumplimiento al programa pero estos resultados no mejoran los obtenidos por el aplicativo.

*Figura 23: Gráfico del cumplimiento al programa para veinticinco instancias*

A su vez, en la tabla 24 se evidencia la cantidad de óptimos que se obtuvo en cada una de las metodologías, mostrando en ella un alto porcentaje para los escenarios del aplicativo comparados con los resultados de las demás metodologías.

**Tabla 24**  
*Porcentaje de la cantidad de óptimos*

CANTIDAD DE ÓPTIMOS					
TRABAJOS TARDÍOS					
PEOR ESCENARIO	MEJOR ESCENARIO	PROMEDIO	SPT	CR	EMPRESA LÁCTEA
36,00%	56,00%	32,00%	4,00%	0,00%	4,00%

*Nota:* Construcción de los autores

Con las mejoras presentadas anteriormente, el impacto en el área operacional se podrá evidenciar en una estructura definida para el proceso de producción, esto permitirá una mayor alineación en la línea logrando una mejor utilización de las máquinas. También se logrará el cumplimiento de los tiempos establecidos para las ordenes de producción y se obtendrán las cantidades de inventario deseadas y planeadas, logrando con lo anterior el despacho a tiempo de los productos demandados por el cliente final de la empresa. Por otro lado, el fácil uso del aplicativo respaldado por el manual de usuario y el video guía generará una mayor comprensión de la programación por parte de los colaboradores, disminuyendo el tiempo de ingreso de las ordenes al sistema.

Adicional a los resultados presentados anteriormente, se quiso comparar el funcionamiento del aplicativo con instancias públicas, en este caso se eligió el artículo de Ruiz y Stutzle (2006), que trabaja un ambiente *Flow shop* con tiempos de alistamiento dependientes de la secuencia con objetivos de *makespan* y tardanza ponderada a través de dos nuevos algoritmos IG (*Iterated Greedy*).

Para el caso de 20 pedidos y 5 máquinas, con 10 instancias que se presentan en el artículo, se realiza la comparación del indicador *Cmax* obtenido con el algoritmo genético en el presente trabajo, teniendo como referencia el *Cmax* resultante del IG de Ruiz y Stutzle. En la tabla 25 se presenta los resultados.

**Tabla 25**  
*Desviación porcentual de Cmax para diez instancias de 20 pedidos y 5 máquinas*

INSTANCIA	PEDIDOS	MÁQUINAS	CMAX AG.	COTA SUPERIOR (RUIZ-STUZLE)	DIFERENCIA	DESVIACIÓN PORCENTUAL
1	20	5	1006	1330	324	24%
2	20	5	1127	1401	274	20%
3	20	5	957	1161	204	18%
4	20	5	1059	1370	311	23%
5	20	5	983	1303	320	25%
6	20	5	1054	1269	215	17%
7	20	5	1070	1294	224	17%
8	20	5	971	1282	311	24%
9	20	5	1010	1313	303	23%
10	20	5	1024	1178	154	13%

*Nota:* Construcción de los autores

Se puede evidenciar que los valores del  $C_{max}$  resultante del algoritmo genético se encuentran por debajo de la cota superior del  $C_{max}$  evaluada con el algoritmo IG por Ruiz y Ztuzle. De esta forma la desviación porcentual promedio de las 10 instancias es de 20,34%, donde la más alta fue en la instancia número 5 con un 25% y la más baja fue en la instancia número 10 con 13%, porcentajes que evidencian qué tan alejados se encuentran los resultados del algoritmo genético frente a los proporcionado por Ruiz y Ztuzle, evidenciando con lo anterior valores cercanos, pero mejores resultados con el aplicativo desarrollado en el presente trabajo.

## 7. Conclusiones y recomendaciones

Los Algoritmos genéticos tienen varias ventajas las cuales ayudaron al desarrollo de este proyecto, una de ellas es la capacidad de trabajar en paralelo con diferentes soluciones, ya que esto permite que al encontrar un posible resultado no se conforme con este, si no que hace una búsqueda con diferentes métodos para lograr hallar uno mejor. Adicional, es de gran utilidad la adaptabilidad que se puede tener con estos algoritmos, ya que permiten modificarse según las características que presente el entorno del problema. Otra ventaja que se puede observar es la capacidad de trabajar con diferentes objetivos a resolver, pues en este caso analizamos diferentes indicadores los cuales presentaron mejoría después de correr el aplicativo.

El presente proyecto tiene como fin realizar un cambio en la programación de producción de una línea de productos en una empresa de lácteos colombiana, la cual tiene un entorno *flow shop* con diferentes restricciones. Para esto se desarrolló un aplicativo el cual generó resultados positivos en ciertos indicadores medidos, este se basó en un algoritmo genético adaptado al problema a solucionar y guiándose por diferentes parámetros encontrados después de realizar una caracterización al entorno de manufactura.

Como se explicó previamente la justificación para escoger la Línea Láctea 1 de la empresa fue porque ésta tiene una gran cantidad de SKUs en su línea de producción y cuenta con la flexibilidad de poder adaptarse a los procesos productivos que llevan a cabo en otras líneas de producción a nivel nacional, de esta manera el aplicativo cuenta también con la capacidad de adaptar su esquema para ser aplicado en una línea de producción diferente, además considerando que el entorno sobre el cual se evalúa el aplicativo es determinístico se recomienda un programa de mejoramiento continuo al reprogramar el código para considerar un entorno real que tenga en cuenta las fallas de las máquinas, insuficiencia en los insumos o falta de la totalidad de colaboradores en la línea, entre otros.

En este aplicativo se implementó una metodología de *lot streaming* en la que se desarrolló una ecuación que permite encontrar el número de lotes que proporcionará mejoras en el proceso. Esta metodología generó una mejora del 18% en cuanto a los tiempos de producción, es por esto que se recomienda a la empresa implementar esta técnica para poder aprovechar los beneficios que esta trae consigo, ya que actualmente este *lot streaming* se da de manera empírica.

El aporte más significativo que se busca generar en la empresa es la disminución de trabajos tardíos ya que se quiere tener el producto necesario en bodega para poder cumplir a las necesidades del mercado. Para esto se analizaron dos posibles situaciones, la primera con 5 instancias y la segunda con 25 instancias. Para la primera situación, se encontró un cumplimiento del programa del 100% para los dos escenarios del aplicativo, mientras que para las reglas de despacho SPT y CR hubo un cumplimiento del 98,52% y 99,26% respectivamente. Para la empresa láctea el cumplimiento fue del 97%, evidenciando mejores resultados con el aplicativo desarrollado en el presente trabajo.

Teniendo en cuenta cada uno de los indicadores se establecieron cotas inferiores para evaluar la desviación porcentual según los valores deseados, evaluando el numero de pedidos tardíos la desviación porcentual para los escenarios de la empresa fue de 0%, mientras que en el caso del indicador del *makespan* fue del 2,66% para el mejor escenario y 15,83% para el peor escenario, finalmente al hallar la tardanza promedio, el aplicativo tuvo una desviación porcentual del 0 % para todos los escenarios.

En la segunda situación 25 instancias, el cumplimiento al programa para el mejor escenario del aplicativo fue del 99,57%, para el peor escenario fue del 97,01%, en el caso de la regla de despacho SPT fue del 72,66%, para CR fue del 92,60% y finalmente, la empresa láctea tuvo un 54,55%. Logrando con el aplicativo un panorama beneficioso para la empresa al implementar la herramienta diseñada. A su vez, se hallaron las cotas inferiores para todos los indicadores en esta situación, en el caso del *makespan* la desviación porcentual para el aplicativo fue del 42,24% y para el peor 55,26%. En cuanto a la tardanza promedio, la empresa presentó una desviación porcentual del 1,31% igual que el peor escenario del aplicativo, mientras que el mejor escenario tuvo una desviación del 0,75%,

Además de esto la implementación del aplicativo permitirá evidenciar otras ventajas tales como: disminución del tiempo muerto de las máquinas y menor tiempo de producción a lo largo de la semana. Es por eso que se recomienda implementarlo con prontitud, para esto se desarrolló un manual del usuario el cual será de gran ayuda para entender y tener una fácil adaptación a esta nueva herramienta. Anexo 2.

La transición de un proceso que se lleva a cabo de forma empírica a un sistema ya estandarizado como lo es un aplicativo puede llegar a tomar tiempo, pero si se concientiza a los responsables del proceso que las ventajas y mejoras son significativas, este puede llegar a generar impacto en diferentes líneas de producción de ser necesario.

Como parte de recomendaciones y trabajo futuro, se aconseja hacer la herramienta integral, agregando parámetros de entrada para controlar las causas que retrasan la producción como la falta de disponibilidad de cubetas, producto en proceso, leche, almacenamiento en CDM, material de empaque, estibas, personal y materia prima, pues en este caso, se asumió un escenario determinístico. El aplicativo tiene como ventaja la flexibilidad y facilidad de uso, que permitirá a los usuarios realizar cambios en la medida que lo consideren conveniente. La codificación de la herramienta presenta una descripción en cada uno de los pasos para una mayor comprensión lo cual facilitará la implementación de este aplicativo en otras líneas de producción de la empresa.

## 8. Glosario

**Algoritmo genético:** Método adaptativo utilizado para resolver problemas complejos de búsqueda y optimización. (Gamboa & Gómez, 2012)

**Cromosoma:** Cada una de las órdenes de trabajo que componen la orden de producción. (Gamboa & Gómez, 2012)

**Cruce:** Operador que permite realizar una exploración de toda la información almacenada hasta el momento en la población y combinarla para crear mejores individuos. (Gamboa & Gómez, 2012)

**Mutación:** Operador que intenta realizar un cambio pequeño en el individuo que genere a su vez una pequeña modificación en su información. (Gamboa & Gómez, 2012)

**Flow shop:** Problema de secuenciación de tareas en sistemas de producción lineal que consiste en programar la secuencia de procesamiento de N tareas en M máquinas de tal forma que se optimice alguna medida de efectividad. (Jimenez, 2012)

**Lot streaming:** Fraccionamiento de un lote de producción en sublotes y el procesamiento de estos de forma simultánea a través de las máquinas. (Mukherjee, N. J., & Sarin, S. C. 2014)

**Makespan:** Tiempo total requerido para terminar todas las tareas ( $C_{max}$ ). (Jimenez, 2012)

**Pedido anticipado:** Pedido terminado cuyo tiempo de finalización es antes de los estimado.

**Pedido tardío:** Pedido terminado cuyo tiempo de finalización es posterior al estimado.

**Programación de la producción:** Desarrollo de una secuencia / programa de trabajos que optimiza un objetivo particular. (Malik & Qiu, 2009)

**Sequence dependent:** El cambio de referencia entre un producto y otro tiene diferentes tiempos.

**WIP:** Inventario en proceso.

## 9. Tabla de Anexos o Apéndices

No. Anexo	Nombre	Desarrollo	Tipo de Archivo	Enlace corto ( <a href="https://goo.gl/">https://goo.gl/</a> )	Relevancia para el documento (1-5)
1	Aplicativo	Propio	Excel	<a href="https://goo.gl/AUFLD7">goo.gl/AUFLD7</a>	5
2	Manual del Usuario	Propio	PDF	<a href="https://goo.gl/XOCnUd">https://goo.gl/XOCnUd</a>	3
3	Codificación de la heurística	Propio	PDF	<a href="https://goo.gl/X1YCmC">https://goo.gl/X1YCmC</a>	1
4	Video guía	Propio	.mp4	<a href="https://goo.gl/TN9jum">https://goo.gl/TN9jum</a>	3
5	Resultados desviaciones porcentuales	Propio	Excel	<a href="https://goo.gl/jTcTRG">goo.gl/jTcTRG</a>	4
6	Resultados frente a instancias públicas	Propio	Excel	<a href="https://goo.gl/AbP8tQ">https://goo.gl/AbP8tQ</a>	3

## Referencias

- Aldowaisan, T.A. & Allahverdi, A. Int J Adv Manuf Technol (2012). No-wait flowshop scheduling problem to minimize the number of tardy jobs. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.61: 311. doi:10.1007/s00170-011-3659-x
- Arranz de la Peña, Jorge, & Parra Truyol, A. (2007). Algoritmos genéticos. Recuperado El, 20, 06-07.
- Azizoğlu, M., Çakmak, E., & Kondakci, S. (2001). A flexible flowshop problem with total flow time minimization. European Journal of Operational Research, 132(3), 528-538. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217\(00\)00142-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217(00)00142-9)
- Chakaravarthy, G. V., Marimuthu, S., Ponnambalam, S. G., & Kanagaraj, G. (2014). Improved sheep flock heredity algorithm and artificial bee colony algorithm for scheduling m-machine flow shops lot streaming with equal size sub-lot problems. International Journal of Production Research, 52(5), 1509-1527. doi:10.1080/00207543.2013.848304
- Della Croce, F., Gupta, J. N. D., & Tadei, R. (2000). Minimizing tardy jobs in a flowshop with common due date. European Journal of Operational Research, 120(2), 375-381. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217\(99\)00164-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00164-2)
- Dorigo, M. (1992). Optimization, learning and natural algorithms. Ph.D.Thesis, Politecnico Di Milano, Italy,
- Dorransoro, B. (2006). Diseño e implementación de algoritmos genéticos celulares para problemas complejos.



Fernandez-Viagas, V., Leisten, R., & Framinan, J. M. (2016). A computational evaluation of constructive and improvement heuristics for the blocking flow shop to minimise total flowtime. *Expert Systems with Applications*, 61, 290-301. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2016.05.040>

Figuroa, M. A. (2000), *Calidad en la industria del software. la norma ISO-9126*.

Gamboa, J., & Gómez, J. (2012). *Formulación de un algoritmo genético para el problema de programación de órdenes de trabajo de una empresa de artes gráficas (Unpublished Konrad Lorenz.)*

Han, Y., Pan, Q., Li, J., & Sang, H. (2012). An improved artificial bee colony algorithm for the blocking flowshop scheduling problem. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 60(9-12), 1149-1159. doi:10.1007/s00170-011-3680-0

ISO. (2011). *ISO 13053-1:2011. quantitative methods in process improvement -- six sigma -- part 1: DMAIC methodology*. Retrieved from [http://www.iso.org/iso/catalogue\\_detail?csnumber=52901](http://www.iso.org/iso/catalogue_detail?csnumber=52901)

Jiménez, A. P. (2012). *Solución del problema de programación de flow-shop flexible empleando el algoritmo genético de chu-beasley*

Jiménez, A. P., Muñoz, C. A., & Toro, E. M. (2013). *Solución del problema de flow shop flexible aplicando el algoritmo genético de chu- beasley. (spanish). Entre Ciencia e Ingeniería*, 7(13), 34-40.

Kalir, A. A., & Sarin, S. C. (2000). Evaluation of the potential benefits of lot streaming in flow-shop systems. *International Journal of Production Economics*, 66(2), 131-142. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0925-5273\(99\)00115-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0925-5273(99)00115-2)

Kayvanfar, V., Komaki, G. M., Aalaei, A., & Zandieh, M. (2014). Minimizing total tardiness and earliness on unrelated parallel machines with controllable processing times. *Computers & Operations Research*, 41, 31-43. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.cor.2013.08.003>

Keshanchi, B., & Navimipour, N. J. (2016). Priority-based task scheduling in the cloud systems using a memetic algorithm. *Journal of Circuits, Systems and Computers*, 25(10) doi:10.1142/S021812661650119X

Kır, S., & Yazgan, H. R. (2016). A sequence dependent single machine scheduling problem with fuzzy axiomatic design for the penalty costs. *Computers & Industrial Engineering*, 92, 95-104.  
doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2015.12.012>

Krajewski, L. J., & Ritzman, L. P. (2000). *Administración de operaciones: Estrategia y análisis* (5th ed.) Pearson Educación.

Li, Z., Chen, Q., Mao, N., Wang, X., & Liu, J. (2013). Scheduling rules for two-stage flexible flow shop scheduling problem subject to tail group constraint. *International Journal of Production Economics*, 146(2), 667-678.  
doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.08.020>

M. M. Malik, M. Qiu, & J. Taplin. (2009). An integrated approach to the lot sizing and cutting stock problems. 2009 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, 1111-1115.  
doi:10.1109/IEEM.2009.5372960

Marimuthu, S., Ponnambalam, S. G., & Jawahar, N. (2009). Threshold accepting and ant-colony optimization algorithms for scheduling m-machine flow shops with lot streaming. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(2), 1026-1041.  
doi:<http://dx.doi.org.ezproxy.javeriana.edu.co:2048/10.1016/j.jmatprotec.2008.03.013>

Melián, B., Moreno, J. A., & Moreno, J. M. (2003). Metaheuristics: A global view. *Inteligencia Artificial, Revista Iberoamericana De Inteligencia Artificial*, 19, 7 - 28.

Mukherjee, N. J., & Sarin, S. C. (2014). Lot streaming in the presence of learning. *International Journal of Planning and Scheduling*, 2(1), 40-52. doi:10.1504/IJPS.2014.066697

- Murata, T., Ishibuchi, H., & Tanaka, H. (1996). Genetic algorithms for flowshop scheduling problems  
doi:[http://dx.doi.org/10.1016/0360-8352\(96\)00053-8](http://dx.doi.org/10.1016/0360-8352(96)00053-8)
- Naderi, B., Zandieh, M., & Shirazi, M. A. H. A. (2009). Modeling and scheduling a case of flexible flow shops: Total weighted tardiness minimization. *Computers & Industrial Engineering*, 57(4), 1258-1267.  
doi:<http://dx.doi.org.ezproxy.javeriana.edu.co:2048/10.1016/j.cie.2009.06.005>
- Pan, Q., Fatih Tasgetiren, M., Suganthan, P. N., & Chua, T. J. (2011). A discrete artificial bee colony algorithm for the lot-streaming flow shop scheduling problem. *Information Sciences*, 181(12), 2455-2468.  
doi:<http://dx.doi.org.ezproxy.javeriana.edu.co:2048/10.1016/j.ins.2009.12.025>
- Pinedo, M. L. (2008). General purpose procedures for deterministic scheduling. *Scheduling: Theory, algorithms, and systems* (3rd ed., pp. 372) Springer. doi:10.1007/978-0-387-78935-4
- Rajendran, C., & Holthaus, O. (1999). A comparative study of dispatching rules in dynamic flowshops and jobshops. *European Journal of Operational Research*, 116(1), 156-170. doi:[http://doi.org/10.1016/S0377-2217\(98\)00023-X](http://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00023-X)
- Ruiz, R., & Stützle, T. (2008). An iterated greedy heuristic for the sequence dependent setup times flowshop problem with makespan and weighted tardiness objectives. *European Journal of Operational Research*, 187(3), 1143-1159. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.07.029>
- Sang, H., Gao, L., & Li, X. (2014). An iterated local search algorithm for the lot-streaming flow shop scheduling problem. *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, 31(6) doi:10.1142/S0217595914500456
- Sayadi, M., Ramezani, R., & Ghaffari-Nasab, N. (2010). A discrete firefly meta-heuristic with local search for makespan minimization in permutation flow shop scheduling problems Retrieved from Growing Science.
- Seo, D. K., Klein, C. M., & Jang, W. (2005). Single machine stochastic scheduling to minimize the expected number of tardy jobs using mathematical programming models. *Computers & Industrial Engineering*, 48(2), 153-161.  
doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2005.01.002>

Tasgetiren, M. F., Pan, Q., Suganthan, P. N., & Chen, A. H. (2011). A discrete artificial bee colony algorithm for the total flowtime minimization in permutation flow shops. *Information Sciences*, 181(16), 3459-3475.  
doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.ins.2011.04.018>

TecHelp. (2015). Quality assurance técnico. Retrieved from [http://www.techelp.cl/servicios/consultoria-en-ti/quality-assurance-tecnico/newsbcm\\_689597/34/](http://www.techelp.cl/servicios/consultoria-en-ti/quality-assurance-tecnico/newsbcm_689597/34/)

Truscott, W. (1986). Production scheduling with capacity constrained transportation activities, *Journal of Operational Management* 6 .

Tseng, C., & Liao, C. (2008). A discrete particle swarm optimization for lot-streaming flowshop scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 191(2), 360-373. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2007.08.030>

Yoon, S., & Ventura, J. A. (2002). An application of genetic algorithms to lot-streaming flow shop scheduling. *IIE Transactions*, 34(9), 779.

ANEXO 2

CARTA DE AUTORIZACIÓN DE LOS AUTORES  
(Licencia de uso)

Bogotá, D.C., 23 abril 2017

Señores

Biblioteca Alfonso Borrero Cabal S.J.  
Pontificia Universidad Javeriana  
Cuidad

Los suscritos:

<u>Lina María Barrera Prieto</u>	, con C.C. No	<u>1020785284</u>
<u>Laura Camila Giraldo Rico</u>	, con C.C. No	<u>1018474823</u>
<u>Daniel Mauricio Guerrero Heredia</u>	, con C.C. No	<u>1015446622</u>
<u>María Camila Rodríguez Arango</u>	, con C.C. No	<u>1032453259</u>

En nuestra calidad de autores exclusivos de la obra titulada:

Minimización del número de pedidos tardíos en un proceso flow shop flexible para una empresa del sector lácteo

(por favor señale con una "x" las opciones que apliquen)

Tesis doctoral  Trabajo de grado  Premio o distinción: Si  No

cual:  
presentado y aprobado en el año 2017, por medio del presente escrito autorizo (autorizamos) a la Pontificia Universidad Javeriana para que, en desarrollo de la presente licencia de uso parcial, pueda ejercer sobre nuestra obra las atribuciones que se indican a continuación, teniendo en cuenta que en cualquier caso, la finalidad perseguida será facilitar, difundir y promover el aprendizaje, la enseñanza y la investigación.

En consecuencia, las atribuciones de usos temporales y parciales que por virtud de la presente licencia se autorizan a la Pontificia Universidad Javeriana, a los usuarios de la Biblioteca Alfonso Borrero Cabal S.J., así como a los usuarios de las redes, bases de datos y demás sitios web con los que la Universidad tenga perfeccionado un convenio, son:

AUTORIZO (AUTORIZAMOS)	SI	NO
1. La conservación de los ejemplares necesarios en la sala de tesis y trabajos de grado de la Biblioteca.	x	
2. La consulta física (sólo en las instalaciones de la Biblioteca)	x	
3. La consulta electrónica - on line (a través del catálogo Biblos y el Repositorio Institucional)	x	
4. La reproducción por cualquier formato conocido o por conocer	x	
5. La comunicación pública por cualquier procedimiento o medio físico o electrónico, así como su puesta a disposición en Internet	x	
6. La inclusión en bases de datos y en sitios web sean éstos onerosos o gratuitos, existiendo con ellos previo convenio perfeccionado con la Pontificia Universidad Javeriana para efectos de satisfacer los fines previstos. En este evento, tales sitios y sus usuarios tendrán las mismas facultades que las aquí concedidas con las mismas limitaciones y condiciones	x	

De acuerdo con la naturaleza del uso concedido, la presente licencia parcial se otorga a título gratuito por el máximo tiempo legal colombiano, con el propósito de que en dicho lapso nuestra obra sea explotada en las condiciones aquí estipuladas y para los fines indicados, respetando siempre la titularidad de los derechos patrimoniales y morales correspondientes, de acuerdo con

los usos honrados, de manera proporcional y justificada a la finalidad perseguida, sin ánimo de lucro ni de comercialización.

De manera complementaria, garantizamos en nuestra calidad de estudiantes y por ende autores exclusivos, que la Tesis o Trabajo de Grado en cuestión, es producto de nuestra plena autoría, de nuestro esfuerzo personal intelectual, como consecuencia de nuestra creación original particular y, por tanto, somos los únicos titulares de la misma. Además, aseguramos que no contiene citas, ni transcripciones de otras obras protegidas, por fuera de los límites autorizados por la ley, según los usos honrados, y en proporción a los fines previstos; ni tampoco contempla declaraciones difamatorias contra terceros; respetando el derecho a la imagen, intimidad, buen nombre y demás derechos constitucionales. Adicionalmente, manifestamos que no se incluyeron expresiones contrarias al orden público ni a las buenas costumbres. En consecuencia, la responsabilidad directa en la elaboración, presentación, investigación y, en general, contenidos de la Tesis o Trabajo de Grado es de nuestra competencia exclusiva, eximiendo de toda responsabilidad a la Pontificia Universidad Javeriana por tales aspectos.

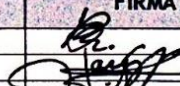
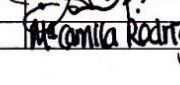
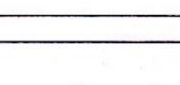

Sin perjuicio de los usos y atribuciones otorgadas en virtud de este documento, continuaremos conservando los correspondientes derechos patrimoniales sin modificación o restricción alguna, puesto que de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación de los derechos patrimoniales derivados del régimen del Derecho de Autor.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, "Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores", los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables. En consecuencia, la Pontificia Universidad Javeriana está en la obligación de RESPETARLOS Y HACERLOS RESPETAR, para lo cual tomará las medidas correspondientes para garantizar su observancia.

**NOTA: Información Confidencial:**

Esta Tesis o Trabajo de Grado contiene información privilegiada, estratégica, secreta, confidencial y demás similar, o hace parte de una investigación que se adelanta y cuyos resultados finales no se han publicado. Si  No

En caso afirmativo expresamente indicaré (indicaremos), en carta adjunta, tal situación con el fin de que se mantenga la restricción de acceso.

NOMBRE COMPLETO	No. del documento de identidad	FIRMA
Lina María Barrera Prieto	1020785284	
Laura Camila Giraldo Rico	1018474823	
Daniel Mauricio Guerrero Heredia	1015446622	
María Camila Rodríguez Arango	1032453259	

FACULTAD: Ingeniería

PROGRAMA ACADÉMICO: Ingeniería Industrial

**ANEXO 3**  
**BIBLIOTECA ALFONSO BORRERO CABAL, S.J.**  
**DESCRIPCIÓN DE LA TESIS O DEL TRABAJO DE GRADO**  
**FORMULARIO**

<b>TÍTULO COMPLETO DE LA TESIS DOCTORAL O TRABAJO DE GRADO</b>						
Minimización del número de pedidos tardíos en un proceso flow shop flexible para una empresa del sector lácteo						
<b>SUBTÍTULO, SI LO TIENE</b>						
<b>AUTOR O AUTORES</b>						
<b>Apellidos Completos</b>			<b>Nombres Completos</b>			
Barrera Prieto			Lina María			
Giraldo Rico			Laura Camila			
Guerrero Heredia			Daniel Mauricio			
Rodríguez Arango			María Camila			
<b>DIRECTOR (ES) TESIS O DEL TRABAJO DE GRADO</b>						
<b>Apellidos Completos</b>			<b>Nombres Completos</b>			
Martin Aldana			Ana Lorena			
Montoya Casas			Carlos Eduardo			
<b>FACULTAD</b>						
Ingeniería						
<b>PROGRAMA ACADÉMICO</b>						
<b>Tipo de programa ( seleccione con "x" )</b>						
Pregrado	Especialización	Maestría	Doctorado			
x						
<b>Nombre del programa académico</b>						
Ingeniería Industrial						
<b>Nombres y apellidos del director del programa académico</b>						
Oscar Barrera						
<b>TRABAJO PARA OPTAR AL TÍTULO DE:</b>						
Ingeniero Industrial						
<b>PREMIO O DISTINCIÓN (En caso de ser LAUREADAS o tener una mención especial):</b>						
<b>CIUDAD</b>		<b>AÑO DE PRESENTACION DE LA TESIS O DEL TRABAJO DE GRADO</b>			<b>NUMERO DE PAGINAS</b>	
Bogotá		2017			41	
<b>TIPO DE ILUSTRACIONES ( seleccione con "x" )</b>						
Dibujos	Pinturas	Tablas, gráficos y diagramas	Planos	Mapas	Fotografías	Partituras
		x				

**SOFTWARE REQUERIDO O ESPECIALIZADO PARA LA LECTURA DEL DOCUMENTO**

**Nota:** En caso de que el software (programa especializado requerido) no se encuentre licenciado por la Universidad a través de la Biblioteca (previa consulta al estudiante), el texto de la Tesis o Trabajo de Grado quedará solamente en formato PDF.



MATERIAL ACOMPAÑANTE					
TIPO	DURACIÓN (minutos)	CANTIDAD	FORMATO		
			CD	DVD	Otro ¿Cuál?
Vídeo	156	1	x		Mp4
Audio					
Multimedia					
Producción electrónica					
Otro Cuál?					
<b>DESCRIPTORES O PALABRAS CLAVE EN ESPAÑOL E INGLÉS</b>					
Son los términos que definen los temas que identifican el contenido. <i>(En caso de duda para designar estos descriptores, se recomienda consultar con la Sección de Desarrollo de Colecciones de la Biblioteca Alfonso Borrero Cabal S.J en el correo <a href="mailto:biblioteca@javeriana.edu.co">biblioteca@javeriana.edu.co</a>, donde se les orientará).</i>					
<b>ESPAÑOL</b>			<b>INGLES</b>		
<b>Algoritmo Genético</b>			<b>Genetic Algorithm</b>		
<b>Programación de la Producción</b>			<b>Production Schedule</b>		
<b>Número de trabajos tardíos</b>			<b>Number of late Jobs</b>		
<b>Loteo</b>			<b>Lot Streaming</b>		
<b>Tienda de flujo</b>			<b>Flow Shop</b>		
<b>RESUMEN DEL CONTENIDO EN ESPAÑOL E INGLÉS</b> (Máximo 250 palabras - 1530 caracteres)					
<b>Resumen</b>					
<p>La programación de la producción realizada de manera adecuada puede traer grandes ventajas a una compañía, es por eso que este proyecto se desarrolla en una empresa de lácteos en su línea de producción líquida 1 que corresponde a fermentados, gelatinas y jugos, esta posee características de un sistema <i>Flow Shop</i> flexible y con secuencia dependiente. Por esto, se busca diseñar una herramienta que minimice el número de trabajos tardíos. Para lograrlo, se creó un aplicativo que permite encontrar un orden adecuado de producción. Se apoyó en el método de <i>Lot Streaming</i>, donde se desarrolló una fórmula para encontrar la cantidad de sub lotes adecuada para lograr una programación mejorada.</p> <p>Se elaboró un aplicativo con una heurística de algoritmo genético, donde sus cinco etapas se desarrollaron según metodologías encontradas en la revisión de literatura (inicialización aleatoria, selección por <i>ranking</i>, <i>two-point ver I crossover</i>, mutación <i>shift</i>, finalización mediante el criterio por iteraciones sin mejora). En cada una de estas etapas se lleva a cabo un proceso de reparación para evaluar los cromosomas infactibles y convertirlos en soluciones viables. La implementación y análisis del aplicativo tuvo varias instancias proporcionadas por la empresa que se compararon con los resultados obtenidos por el aplicativo. Con lo anterior, se prosigió a la comparación del aplicativo frente a dos reglas de despacho, una estática SPT (<i>shortest processing time</i>) y una dinámica CR (<i>critical ratio</i>), los resultados demostraron que el aplicativo siempre tuvo mayor impacto en cuanto a la reducción de pedidos tardíos y el <i>makespan</i>.</p>					
<b>Abstract</b>					
<p>A properly executed production scheduling brings great advantages to a company, that's why this work aims to develop the same for a lactose company and its main production line <i>liquid 1</i> (fermented, jellies and juices), which is characterized by being a flexible Flow Shop with sequence dependent setup times, in order to minimize the number of late jobs. To achieve this objective, a software was created, which allows to find a proper production order. Relied on the method of Lot Streaming, where an equation was created in order to find the proper amount of sublots to achieve the desired production programming.</p> <p>A software base on a genetic algorithm heuristic was developed, this algorithm was composed by five stages that were developed according to methodologies found in the literature review. (random initialization, ranking selection method, Two-point (<i>ver I</i>)crossover, Shift mutation, criteria for iterations without improvement finalization). In each of the aforementioned stages, there is a repair process, which evaluates the infactibles chromosomes and turns them into workable solutions. The implementation and analysis of the application had several instances given by the Company that compared with the results obtained by the software. With the foregoing, the comparison of the application against two dispatch rules was made, a static SPT (shortest processing time) and a dynamic CR (critical ratio), the results showed that the software always had a greater impact in terms of the reduction of late jobs and makespan.</p>					