

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN - CHILE
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**Programación de la producción en una agroindustria
exportadora de arándanos.**

por
Nancy Constanza Anziani Godoy

Profesor Guía:
Eduardo Salazar Hornig

Concepción, Abril de 2017

Tesis presentada a la

**DIRECCIÓN DE POSTGRADO
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**



Para optar al grado de

MAGÍSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

“Dedico esta tesis a mi padre Dalton Anziani por su apoyo y su gran esfuerzo en brindarme esta especialización que tanto anhelé. A mi madre Nancy Godoy por su apoyo incondicional en cada momento que lo necesité y a mi hermano Dalton Fernando Anziani que siempre ha sido mi cable a tierra, quien me aconseja ante cualquier dificultad que se me presenta.

Agradezco la ayuda de mi familia en especial a Carolina Anziani, Maribel Anziani y Juan Vargas “tío gato” en mi gran problema de la redacción. A mis compañeros de magíster que se convirtieron en amigos y me convencieron de no rendirme, en el momento en que sólo quería renunciar al magíster. A mis amigas, en especial a Katherine Alcayaga por apoyarme en el transcurso de la tesis y aguantar largas explicaciones de mi tesis.

También agradezco enormemente al Dr. Eduardo Salazar por ser mi profesor guía de tesis, su apoyo y comprensión en este gran desafío.

Espero seguir creciendo profesionalmente y vuelvo a agradecer a cada uno, ya que todos aportan para ser el profesional en que me he ido convirtiendo”.

Por último, quiero citar esta frase que tiene mucho sentido para mí;
“No hay secretos para el éxito, este se alcanza preparándose, trabajando arduamente y aprendiendo del fracaso”- Colin Powell

RESUMEN

Magíster en Ingeniería Industrial, Dirección de Postgrado – Universidad de Concepción

PROGRAMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN EN UNA AGROINDUSTRIA EXPORTADORA DE ARÁNDANOS.

Nancy Constanza Anziani Godoy
Abril 2017

PROFESOR GUIA: Eduardo Salazar Hornig
PROGRAMA: Magíster en Ingeniería Industrial

Las industrias manufactureras requieren programar su producción para satisfacer a tiempo las necesidades de clientes, es por este motivo que una adecuada decisión adquiere una gran relevancia, debido a que es necesario planificar y encontrar una solución con los recursos disponibles. En la presente investigación se realiza un estudio para un caso particular en una agroindustria exportadora de arándanos compuesta con máquinas paralelas. El objetivo de este estudio es minimizar el atraso del despacho de sus productos, usando la tardanza como criterio, se propone un método de parcialización usando las reglas de despacho Earliest Due Date (EDD), Slack y Algoritmo Genético (AG).

Palabras Claves: Máquinas paralelas, Programación de la producción, Algoritmo Genético, Reglas de despacho y Agroindustria.

ABSTRACT

Magíster en Ingeniería Industrial, Dirección de Postgrado – Universidad de Concepción

SCHEDULING OF THE PRODUCTION IN AGROINDUSTRIAL EXPORTER OF BLUEBERRIES.

Nancy Constanza Anziani Godoy
Abril 2017

THESIS SUPERVISOR: Eduardo Salazar Hornig
PROGRAM: Master in Industrial Engineering

Manufacturing industries require a program of their production to meet the timing of customer needs, it is for this reason that a suitable company get a great relevance, because it is necessary to plan and find a solution with available resources. In the present investigation a study is carried out for a particular case in a blueberry exporting industry composed of parallel machines. The objective of this study is to minimize the delay of the dispatch of its products, using the delay as criterion, a bias method is proposed that uses the rules of the earliest due date of dispatch (EDD), Slack and Genetic Algorithm (AG).

Keywords: Parallel machines, Production scheduling, Genetic Algorithm, Dispatch rules and Agroindustry.

Tabla de Contenido

Resumen	III
---------------	-----

Abstract	IV
----------------	----

Lista de Figuras

Figura 3.1: Layout Planta Agroindustrial	14
--	----

Figura 3.2: Diagrama de Actividades	14
---	----

Figura 3.3: Diagrama de Flujo Planta Agroindustrial	16
---	----

Figura 3.4: Diagrama de Procesos	17
--	----

Figura 3.5: Máquinas Sorter y sofsorter	21
---	----

Figura 3.6: Máquinas Dosificadora compuesta de 12 vasos	21
---	----

Figura 4.1: Operador de cruzamiento PMX	23
---	----

Figura 4.2: Operador de Mutación Swap	24
---	----

Figura 4.3: Tiempos de procesos de trabajos en orden (a) completa y (b) flexibilizada	25
---	----

Figura 5.1: Tardanzas en las órdenes completas y flexibilizadas usando el algoritmo genético	29
--	----

Figura 5.2: índice de variación porcentual de los distintos métodos en las órdenes de producción	30
--	----

Figura 5.3: El porcentaje de participación en las mejores soluciones	31
--	----

Figura A.1.1: Ejemplo de base de datos de la temporada 2015-2016 proceso de embalaje	39
--	----

Figura A.1.2: Peso del pallet y rendimiento de la máquina de Kg/Hrs, para envasados Marítimos	39
---	----

Figura A.1.3: Peso del pallet y rendimiento de la máquina de Kg/Hrs, para envasados Aéreos	40
--	----

Figura A.1.4: Kilos procesados 2015-2016	41
--	----

Figura A.1.5: Pallets procesados 2015-2016	41
--	----

Figura A.2.1: Ejemplo de evaluación de parámetros con Software SPS_GA_Parallelshop (2016)	42
---	----

Figura A.2.2: ejemplos de datos de salida en archivo .txt	43
---	----

Figura A.4.1: Carta Gantt correspondiente a la orden 3 completa, resultado de la mejor solución de las 10 réplicas	52
--	----

Figura A.4.2: Carta Gantt correspondiente a la orden 3 Flexibilizada, resultado de la mejor solución de las 10 réplicas	53
---	----

Figura A.4.3: Carta Gantt de la orden 3 completa correspondiente a la semana del 21 al 27 de diciembre del 2015, con decisiones tomadas por los ejecutivos de la	
--	--

empresa exportadora de arándanos, con fecha de entrega 28 diciembre 2015 para todos los trabajos54

Lista de Tablas

Tabla 3.1: Envasados por tipo de embarque y destino19

Tabla 4.1: Parámetros utilizados para el caso de estudio25

Tabla 5.1: Número de trabajos de las órdenes completas, flexibilizadas y valor de tardanzas en minutos para las órdenes completa y flexibilizada con reglas de despacho Earliest due date (EDD-C y EDD-F), Slack (Slack-C y Slack-F) y algoritmo genético (AG-C y AG-F)26

Tabla 5.2: Índice de variaciones porcentuales obtenidas en las 3 órdenes de producción correspondiente a las reglas de despacho EDD, Slack y el algoritmo genético 29

Tabla A.2.1: correspondiente promedio en el estudio preliminar con para las orden de producción 5 completa44

Tabla A.2.2: Correspondiente promedio en el estudio preliminar con para las orden de producción 5 Flexibilizada45

Tabla A.2.3: Correspondiente al estudio preliminar con para las órdenes de producción completas46

Tabla A.2.4: Correspondiente al estudio preliminar con para las órdenes de producción flexibilizadas47

Tabla A.2.5: Correspondiente al índice de variación porcentual de la órdenes de producción en el estudio preliminar.....48

Tabla A.3.1: Correspondiente a la orden de producción 3 completa49

Tabla A.3.2: Correspondiente a la orden de producción 3 flexibilizada 50

Capítulo 1: Introducción 1

1.1 Hipótesis 2

1.2 Objetivos 2

1.3 Metodología 2

Capítulo 2: Marco teórico 4

2.1 Programación de la producción 4

2.2 Máquinas paralelas..... 4

2.3 Medidas de desempeño 7

2.4 Heurísticas 7

2.4.1 Reglas de despacho 8

2.5 Metaheurísticas..... 9

2.5.1 Algoritmos genéticos (AG) 10

2.5.2 Algoritmos genéticos aplicados a la programación de la producción...	10
Capítulo 3: Caso de Estudio	12
3.1 Antecedentes	12
3.2 Alcance y limitaciones del estudio	12
3.3 Situación actual de exportación en la empresa	13
3.4 Layout de la planta Agroindustrial	13
3.5 Actividades de la empresa	13
3.5.1 Pre-cosecha y Cosecha; Recepción.....	13
3.5.2 Almacenaje y Bodega.....	15
3.5.3 Sala de Procesos.....	15
3.6 Diagrama de flujo de la planta y del proceso	16
3.7 Características de una orden de producción.....	17
3.8 Situaciones en terreno y recepción, bodega y sala de procesos.	18
3.9 Problema empresa	19
3.10 Programación de producción.....	20
Capítulo 4: Aplicación de algoritmos genéticos al problema de programación....	22
4.1 Parámetros del algoritmo	22
4.2 Cruzamiento (Crossover)	23
4.3 Mutación	23
4.4 Caracterización de las órdenes de producción	24
Capítulo 5: Resultados del caso de estudio	26
Capítulo 6: Discusión.....	31
Capítulo 7: Conclusiones	33
Bibliografía.....	34
Anexos	38
Anexo 1 Antecedentes de las líneas de producción	39
Anexo 2 Evaluación de Parámetros	42
Anexo 3 Matriz de Tiempos de Setup.....	49
Anexo 4 Carta Gantt.....	52

Capítulo 1: Introducción

Chile es el segundo país productor de arándanos frescos en el hemisferio sur, destaca la ventaja climática y geográfica de sus terrenos, en la temporada de arándanos 2015-2016 se exportaron 91.038 Toneladas, esto significó una disminución de un 1.2% respecto a la temporada anterior. Las exportaciones a Norteamérica, representaron un 69%, Europa un 22% y Asia un 9%.

Por otra parte, Asia es un mercado potencial, debido a que en los últimos años se ha registrado un crecimiento de la exportación de este producto; aunque queda mucho por hacer para ingresar al mercado asiático. En el caso de China tuvo una baja de un 21%, sin embargo la demanda aumentó en Corea y Taiwan en un 12% y 21% (Chileanblueberries, 2017; Consulting, 2015).

Cabe destacar que el mercado Chino es exigente y requiere fruta de primera calidad, de lo contrario no existe posibilidad de entrar en éste. La trazabilidad es fundamental a lo largo de la cadena productiva, es necesario informar y controlar los distintos escenarios que se presentan desde el campo hasta la distribución del producto exportado. Por último, es imprescindible viajar a inspeccionar el estado en que llega el producto exportado al mercado de destino (Chileanblueberries, 2017; Portal Frutícola, 2015).

Desde la cosecha es necesaria una planificación del trabajo agrícola de temporada debido a la escasez de personal y la no existencia de maquinaria adecuada para cosechar la fruta destinada para la exportación, para ello se fomenta la búsqueda de mejoras que permitan procesar una mayor cantidad de materia prima (Consulting, 2015). En el mercado de los arándanos es ideal que una variedad tenga una mayor vida postcosecha. Por esta razón, hay que concentrarse en las buenas prácticas de pre y post cosecha. Se debe evitar embarques marítimos y aéreos con fruta de calidad que no cumple con los requisitos exigidos por los clientes en destino, así como la acumulación de producto terminado en las cámaras, suponiendo que el precio del mercado mejorará (Portal Frutícola, 2015).

Esta investigación se centra en la sala de proceso de una planta agroindustrial, considerando un problema de un taller de máquinas paralelas idénticas, asignación de los trabajos que están sujetos a restricciones en las fechas de entrega, con todos los trabajos disponibles desde el tiempo cero, existiendo tiempos de preparación dependientes de la secuencia. La toma de decisiones a corto plazo es clave. Es importante cumplir con las fechas de entrega, asignar los trabajos de forma oportuna y evitar descoordinaciones. Las

operaciones por realizar deben tener un control detallado, se debe considerar que existe flexibilidad de los pedidos y que tienen diferentes requerimientos (Salazar & Medina, 2013).

Por lo tanto, la importancia de esta investigación es brindar un aporte en las organizaciones que trabajan con esta modalidad, ya que una mala decisión en las empresas de productos frescos, genera cuellos de botella que tienen un alto impacto en la pérdida de eficiencia y aumento en los costos. El presente estudio tiene como objetivo proponer mejoras en una empresa agroindustrial, sobre la toma de decisiones respecto al despacho de sus productos de forma oportuna en el corto plazo.

1.1 Hipótesis

El uso de los métodos sistemáticos para programar la producción en el proceso de envasado de una empresa agroindustrial que exporta arándanos, permitirá mejorar la toma de decisiones respecto del despacho de sus productos.

1.2 Objetivos

A continuación, se detalla el objetivo general y los objetivos específicos de la investigación:

Objetivo General

- Diseñar un método para minimizar los atrasos en el despacho de productos envasados de una empresa agroindustrial que exporta arándanos.

Objetivos Específicos

- Caracterizar el sistema productivo de una empresa agroindustrial de envase de arándanos y sus respectivas órdenes de producción.
- Desarrollar un método de programación enfocado en el envasado de arándanos utilizando reglas de despacho y el algoritmo genético.
- Evaluar el desempeño a un conjunto de casos en la empresa.

1.3 Metodología

Se describen los puntos que fueron abordados para producir la siguiente investigación:

- Revisión bibliográfica.
- Observar y analizar el proceso productivo.
- Diagnóstico de la situación actual.

- Definición de reglas de despacho, algoritmo genético y medidas de desempeño a utilizar.
- Evaluar y comparar los métodos sobre casos de programación del envasado de la empresa.



Capítulo 2: Marco teórico

2.1 Programación de la producción

La programación justo a tiempo es considerada en las industrias manufactureras, define que los trabajos deben ser completados en un instante específico de tiempo. La tardanza de los trabajos trae consigo consecuencias negativas, como pérdidas de clientes, pérdida de reputación, descontento de los clientes. Por otra parte, la prontitud en los trabajos también tienen consecuencias como el costo por inventario y deterioro de los productos (Alvarez-Valdez et al., 2015; Li et al., 2015). El estudio tradicional de los problemas de máquinas paralelas está enfocado en asignación de trabajos para optimizar el tiempo de finalización de los trabajos. Se define como (n) trabajos que deben ser programados en (m) máquinas paralelas idénticas, que tienen una fecha de entrega común, due date (d) . Para trabajos i se define su proceso igual a p_i (Fang & Lin., 2013). Salazar & Medina (2013) consideran el problema de máquinas paralelas como máquinas dispuestas en paralelo con múltiple capacidad, en que los trabajos pueden ser asignados a cualquier máquina.

La programación de producción asigna recursos productivos (máquinas, trabajadores, herramientas, etc.) a las actividades de producción en el corto plazo, los resultados se pueden evaluar con medidas de desempeño como Makespan (M) , tardanza (T) o tiempo de flujo (F) , entre otras (Salazar, 2010).

Las investigaciones tradicionales enfocadas en la programación de la producción, asumen que las máquinas siempre se encuentran disponibles, ésta es una herramienta que sirve para programar trabajos en el corto plazo, por lo tanto los trabajos se pueden programar y procesar en los intervalos de tiempos disponibles (He et al., 2016).

2.2 Máquinas paralelas

En programación de máquinas paralelas de m máquinas se pueden procesar todos los trabajos a la misma velocidad. Esta programación puede considerar la asignación de los trabajos en distintas máquinas o la secuencia de trabajos en una máquina (Cheng et al., 2013; Bilgesu & Koc, 2012).

Si consideramos los problemas de máquinas paralelas, existen diversas propuestas para resolverlos. Chen et al. (2012), usaron Algoritmo Genético (GGA) para realizar una asignación de las operaciones en una fábrica de armas y un Algoritmo Genético (GA)

para desarrollar la programación que considera la asignación de flujos de trabajo flexibles. Este es un problema multi-objetivo, que busca minimizar tardanza, makespan y tiempo total de inactividad de las máquinas. En la misma línea de investigación, considerando el tiempo de flujo, Alimoradi et al. (2015) mostraron un modelo robusto, presentando un algoritmo branch and bound, obteniendo resultados óptimos para programar 45 trabajos para sistemas con 3 a 5 máquinas.

Cheng et al. (2013) presentaron un nuevo método para la optimización, con un algoritmo de colonias de hormigas (ACO) en máquinas paralelas con procesos por lotes y tamaño de trabajos arbitrario, seleccionando un criterio de metrópolis, cuya medida de desempeño es minimizar el tiempo de finalización de los trabajos (makespan), obteniendo un algoritmo eficaz para la solución de problemas a gran escala, de igual forma Jia et al. (2015) proponen un algoritmo Max- Min Ant System (MMAS) para minimizar el tiempo de finalización de los trabajos (makespan) en máquinas paralelas de procesamiento batch con tamaño de trabajos distintos y familias de trabajos incompatibles, estos resultados fueron comparados computacionalmente con otros algoritmos como algoritmo genético, multi-fit, obteniendo una solución óptima en un tiempo aceptable.

Lee & Pinedo (1997) proponen una metodología para los problemas de máquinas paralelas con secuencias dependientes de tiempos de setup, considerando el proceso de trabajos en máquinas paralelas idénticas. La heurística presentada tiene como objetivo minimizar la suma ponderada de la tardanza. La metodología cuenta con tres fases; La primera fase es de pre-proceso, se calcula el makespan y analiza estadísticamente las instancias. En la segunda fase se utiliza una secuencia modificada de las reglas de despacho analizadas estadísticamente y en la última fase se usa la metaheurística de simulated annealing con la solución semilla que fue obtenida en la segunda fase.

Si consideramos los problemas de máquinas paralelas idénticas con secuencia dependiente, con el objetivo de minimizar la tardanza y prontitud encontramos a Biskup et al. (2008) quienes desarrollaron un algoritmo con una programación lineal entera mixta, el resultado experimental fue realizado por lingo para 200 instancias de 5 máquinas, su resultado demuestra que el algoritmo MDD (modified due date) es relativamente eficaz en comparación con otras heurísticas. Anderson et al. (2013) usaron una programación entera mixta que busca la mejor solución en problemas de prontitud y tardanza, utilizando el programa computacional CPLEX.

Vallada & Ruiz (2011) en un problema de programación de máquinas paralelas con tiempos dependientes de la preparación, proponen un algoritmo genético en el que se incluye una búsqueda local y un operador de cruzamiento (crossover). El algoritmo mostró ser importante para instancias más grandes.

En la programación de máquinas paralelas no relacionadas Lin & Ying (2014) proponen un algoritmo híbrido artificial de colonia de abejas con secuencias dependientes de los tiempos de preparación (setup), cuyo objetivo es disminuir el makespan, para 20 trabajos en 3 máquinas, que son comparados con otros algoritmos obteniendo resultados eficientes.

Gedik et al. (2015) tratan el problema de máquinas paralelas con secuencias dependientes de tiempos de preparación. Modelaron 3 métodos que fueron evaluados utilizando CPLEX, incorporaron una programación entera, programación de restricciones y un algoritmo de descomposición de Benders, cuyo objetivo fue maximizar el beneficio total, demostrando que los modelos de Benders obtienen 86 de 90 soluciones óptimas para las distintas instancias generadas.

He et al. (2016) en la programación de 2 máquinas paralelas con disponibilidades dependientes de las máquinas, con el objetivo de minimizar el makespan utilizaron un modelo de programación entera mixta con nueve algoritmos heurísticos y dos reglas de despacho clásicas por ejemplo, Longest Processing Time (LPT), de asignación Job Completion Time First (JCT) and Machine Completion Time First (MCT), estas fueron integradas con el propósito de obtener la mejor alternativa generando distintas instancias, el algoritmo (LJM-LMM) creado a partir de (JCT y MCT) fue mejor que los otros ocho algoritmos estos modelos se validó con el ratio de error y se logró un mejor resultado que en una heurística clásica LPT. Por otra parte, este modelo se puede extender a problemas que tienen periodos de mantención o están sujetos a cambios.

Con el objetivo de minimizar la tardanza total Shim & Kim (2007) desarrollaron un estudio utilizando el algoritmo branch and bound (BAB), aplicado a las máquinas paralelas, por este medio se obtuvieron resultados computacionales para 30 trabajos en 5 máquinas, los resultados fueron óptimos en un tiempo razonable. Sin embargo Kayvanfar et al. (2014) usando programación entera mixta presentaron un modelo usando un *algoritmo genético* al que le incorporaron *búsqueda local*, minimizando la prontitud y tardanza (P/T) en un problema de máquinas paralelas que trabajan bajo la modalidad Just

in time (JIT), con tiempos de procesos controlables, los tiempos de setup fueron dependientes de la secuencia del sistema, proponiendo un modelo de programación entera mixta para problemas pequeños fue resuelto con lingo. Además, las dos metaheurística y un híbrido propuesto podrían ser eficiente en problemas más complicados.

Fang & Lin (2013) propusieron dos heurísticas y desarrollaron un algoritmo de enjambre de partículas, Particle Swarm Optimization (PSO), la función objetivo fue minimizar la suma ponderada de la tardanza y penalizaciones de consumo de energía de las máquinas paralelas, en donde incluyó el costo adaptando una normalización en una medida en común. El experimento fue desarrollado en CPLEX obteniendo resultados para el algoritmo PSO de buena calidad en corto plazo. Lin et al. (2011) consideraron las fechas de liberación, utilizando una propuesta de una metaheurística greedy, con el fin de minimizar la tardanza total, obteniendo una metaheurística que supera la metaheurística greedy convencional.

2.3 Medidas de desempeño

Existen investigaciones que consideran la tardanza (T) como indicador (kayvanfar et al., 2014; Min & Cheng, 2006). Con el objetivo de minimizar la prontitud y tardanza ponderada (E/T) desarrollaron su investigación con el objetivo de minimizar la tardanza total equivalente a la sumatoria de las tardanzas (Biskupt et al., 2008). Salazar & Medina (2013) Consideraron como medida de desempeño el makespan que es el tiempo de completación de los trabajos desde el instante de tiempo 0 hasta completar el último trabajo. En este caso de estudio se tomó en consideración la tardanza total (T), tomando en cuenta que es el tiempo extra que se demoró en terminar la orden de producción respecto de la fecha de entrega de la orden, si esta finaliza antes de la fecha de entrega la tardanza es 0.

2.4 Heurísticas

Las heurísticas más comunes para resolver problemas de máquinas paralelas son basadas en prioridades, conocidas como reglas de despachos. Para procesar una secuencia de trabajos alguna de ellas son la reglas Earliest Due Date (EDD) y Shortest Processing Time (SPT). Además se reconocen nuevas heurísticas flexibles, como la regla Apparent Tardiness Cost (ATC) es eficiente para problemas de programación de máquinas paralelas clásicas con objetivo de disminuir la tardanza (Lamothe et al., 2012).

Lee & Pinedo (1997) para máquinas paralelas construyen una versión modificada de Apparent Tardiness Cost with Setups (ATCS), ya que esta metodología fue creada para el taller de una máquina.

Parthanadee & Buddhakulsomsiri (2010) trabajaron con las reglas de despacho tradicionales, en ella mencionan que la regla de despacho First Come First Served (FCFS), considera el primer trabajo que llega es el primero en procesar, Shortest Processing Time (SPT), que considera el tiempo de proceso más corto, a diferencia Longest Processing Time (LPT) que utiliza como secuencia el proceso más largo y Earliest Due Date (EDD) usado para disminuir el número de trabajos tardíos. También se encuentran reglas de despachos modificadas, mínimo Slack 1, selecciona el Slack de menor valor que considera la fecha de entrega (Due Date) y proceso, mínimo Slack 2 similar al anterior pero considerando el tiempo de llegada y el proceso, ambos Slack son variantes de EDD, Modified Due Date (MDD) selecciona el trabajo con el mínimo valor de los máximos entre la fecha de entrega (Due Date) y el tiempo que finaliza el trabajo $[Max(d, t + p_i)]$.

2.4.1 Reglas de despacho

Es un sistema que especifica prioridades de selección de trabajos entre una serie de trabajos a asignar, las más conocidas son longest processing time (LPT), shortest processing time (SPT) y earliest due date (EDD), estas dos últimas reglas de despacho son reglas básicas usadas para programar trabajos en máquinas paralelas (Parthanadee & Buddhakulsomsiri, 2010; Lamothe et al., 2012).

En un caso de estudio Parthanadee & Buddhakulsomsiri (2010) desarrollaron un modelo de simulación que imita el sistema real en la industria de fruta enlatada, cuya finalidad es comparar 9 reglas de despacho con dos tipos de medidas de desempeño: el tiempo de flujo y tiempo tardío total que excede la fecha de entrega (tardanza). Lamothe et al. (2012) usaron una redefinición de las reglas de despacho y una propuesta de órdenes con una metaheurística de simulated annealing para disminuir la tardanza total; aplicada en un caso de la industria farmacéutica con 2 máquinas paralelas con tiempos de preparación y restricciones de entrega.

2.5 Metaheurísticas

Dentro de las metaheurísticas utilizadas en la programación de producción tenemos a *simulated annealing* (Lamothe et al., 2012), *tabu search* (Liu & Kozan, 2016), *scatter search* (Alvarez-Valdes et al., 2015). Una vez que hay una solución factible inicial, se trabaja en la construcción del nuevo algoritmo, construyendo una nueva solución factible a través de subconjuntos de la población (Liu & Kozan, 2016). La metaheurística *algoritmo colonia de hormigas (ACO)* está inspirado en las hormigas reales cuando están en búsqueda de comida y la selección de la ruta a través de feromonas. Por ejemplo; en un espacio existen hormigas artificiales que buscan en el espacio de soluciones, cada iteración la hormiga de búsqueda deja un camino de feromonas, a la siguiente iteración el camino se modifica quedando un nuevo camino, la feromona en un camino transmite mensajes a otras hormigas que pueden seguir la ruta, en cada fase la feromona se evapora a una velocidad fija si transita una hormiga por esa ruta esta aumenta (Cheng et al., 2013).

Li et al. (2015) para la programación de una máquina con procesos por lotes con distintos tamaños de trabajos, compararon 2 algoritmos basados en una heurística MARB (Minimum Attribute Ratio of Batch), un algoritmo genético híbrido basado en un ratio de atributo mínimo del lote (GAMARB) y un algoritmo genético híbrido basado en un ratio de atributo mínimo del lote modificado (M-GABASH) mostrando que fueron eficientes para largos procesos de tiempo, al considerar las restricciones de tamaño de trabajos se obtuvieron mejores resultados con tamaños de trabajos pequeños.

(Balin, 2011; Vallada & Ruiz, 2011) indican que los algoritmos genéticos son una estrategia de optimización, basado en la evolución de Darwin. La entrada de un algoritmo genético es un conjunto de soluciones llamada población inicial de cromosomas que serán evaluados, se codifica una solución del problema obteniendo una secuencia llamada “padre” y el valor de la aptitud (fitness) que es relacionada con el valor de la función objetivo. Luego se elige el mecanismo que se usará para la descendencia, cada iteración es llamada “generación” o “hijos”, la secuencia es a través de un procedimiento de cruzamiento, mutación o selección natural. Se pueden lograr soluciones factibles denominadas hijos con mejor aptitud (fitness). En el cruzamiento se ocupan 2 cromosomas para crear la nueva generación. Para la mutación se realiza una reorganización de la estructura del cromosoma de forma aleatoria. Joo & Kim (2015) indican que el cromosoma tiene gran influencia en los resultado obtenidos.

2.5.1 Algoritmos genéticos (AG)

Matfeld & Bierwirth (2004), mencionan que el algoritmo genético es una técnica de búsqueda, compuesta de selección natural y genética, tiene un conjunto de posibles soluciones factibles llamada *población*, la cual va evolucionando de generación en generación. Bilgesu & Koc (2012) realizaron una representación de cada *individuo de la población* (cromosoma), indicaron que tienen dos *códigos del cromosoma* (gen), el primero es la orden de producción, seguido de la máquina.

El mecanismo de reproducción según Balin (2011) para los operadores de *cruzamiento* (crossover), combina dos cromosomas de generación en generación preservando sus características y *mutación* (Swap) reorganiza la estructura de los genes en el cromosoma aleatoriamente, generando una nueva combinación de genes a la siguiente generación. La aptitud (fitness) representa la calidad de la solución obtenida. Los individuos con mejor fitness tienen una probabilidad de ser escogidos con mayor frecuencia.

2.5.2 Algoritmos genéticos aplicados a la programación de la producción

El algoritmo genético es un método de búsqueda de solución factible de forma aleatoria para la solución de problemas de programación de producción, la solución contiene un cromosoma con genes que determinan la calidad de estos resultados establecida por el fitness (medida de desempeño) del cromosoma (Min & Cheng, 2006).

Mattfeld & Bierwirth (2004) demuestran que el algoritmo genético tiene la oportunidad de incorporar prioridades basadas en las reglas de despacho, obteniendo una técnica de optimización eficiente. Por otra parte, Salazar & Medina (2013) proponen una optimización en el proceso evolutivo de un algoritmo genético y lo comparan con otras heurísticas.

Existen autores que han desarrollado algoritmos genéticos con metaheurísticas híbridas, para la programación de trabajos, la minimización de la prontitud y tardanza (Alvarez-Valdes et al., 2015; Wang & Cheng., 2015).

Min & Cheng (2006) para problemas de programación de la producción propusieron como objetivo encontrar un óptimo de fecha de entrega común, número de trabajos y órdenes a procesar en cada máquina, usando el algoritmo genético, disminuyeron la tardanza y prontitud, obteniendo resultados computacionales efectivos y robustos, en especial al utilizar una algoritmo híbrido con simulated annealing.

Por último en las máquinas paralelas no relacionadas Joo & kim (2015) desarrollaron un algoritmo genético híbrido con reglas de despacho para máquinas con tiempos dependientes del setup y disponibilidad de producción, con el objetivo de minimizar el tiempo de finalización de los trabajos (makespan).



Capítulo 3: Caso de Estudio

3.1 Antecedentes

La empresa creada en 1990 bajo el nombre de Agrícola Santa Catalina Ltda. ubicada en la ciudad de Chillán (Centro-Sur de Chile), dedicada a la producción de arándanos, siendo pionera en el desarrollo de este mercado en Chile.

En el año 1995 diversifican sus productos con plantaciones de espárragos y kiwis. En el año 2004 debido al aumento de la producción de arándanos se creó una planta de embalaje, ubicada en el fundo Los Abedules (en las cercanías de Chillán). El 2011 Agrícola Santa Catalina Ltda. Cambia su nombre a CarSol Fruit S.A. con el objetivo de comercializar a distintos mercados globales y la gestión de los diferentes fundos de la empresa, Dadinco en San Nicolás, Los Abedules en Coihueco, Pilmaiquén en Chillán, El Oratorio en San Carlos y La Corderina en Rancagua, Región de O'Higgins.

Actualmente CarSol Fruit S. A. cuenta con 400 hectáreas de arándanos de diferentes variedades, plantadas en distintos fundos de la compañía ubicados en la Sexta Región (La Corderina) y la Octava Región (predio Abedules, Pilmaiquén y Dadinco).

En la empresa las variedades de arándanos tradicionales más importantes son Legacy, Brigitta, Duke y O'Neal. Además se encuentra Northland, Rebel, Camelia, Denisse, Bluecrop, Cuenta con variedades nuevas de alto potencial productivo como Emerald, Star, Snow Chaser, Primadonna, para la producción temprana y Ochlockonee, Powderblue, Brightwell para producción tardía.

Todos los fundos y cultivos pertenecientes a CarSol Fruit S.A. cuentan con certificaciones como Global GAP 4.0, BRC, SEDEX, F2F y Tesco Nurture. Las certificaciones son evaluadas anualmente, la empresa se encuentra constantemente en revisión, control y aseguramiento de los procesos de producción y embalaje de la fruta.

3.2 Alcance y limitaciones del estudio

El estudio se desarrolla en la planta CarSol Fruit S.A. empresa dedicada a la exportación de arándanos en fresco, ubicada camino a Coihueco KM 18, Chillán. Las fuentes de información corresponden a datos proporcionados por la empresa, además de la información recabada durante visitas a la empresa.

3.3 Situación actual de exportación en la empresa

El estudio que se describe está de acuerdo con la información entregada por la empresa correspondiente a la temporada 2015-2016 y a través de reuniones con los encargados de las respectivas áreas. Para ello se realiza una recopilación de los procesos que se ven involucrados, las actividades obtenidas a través de la información recabada por la empresa con la finalidad de comprender el proceso de una forma general a una particular.

3.4 Layout de la planta Agroindustrial

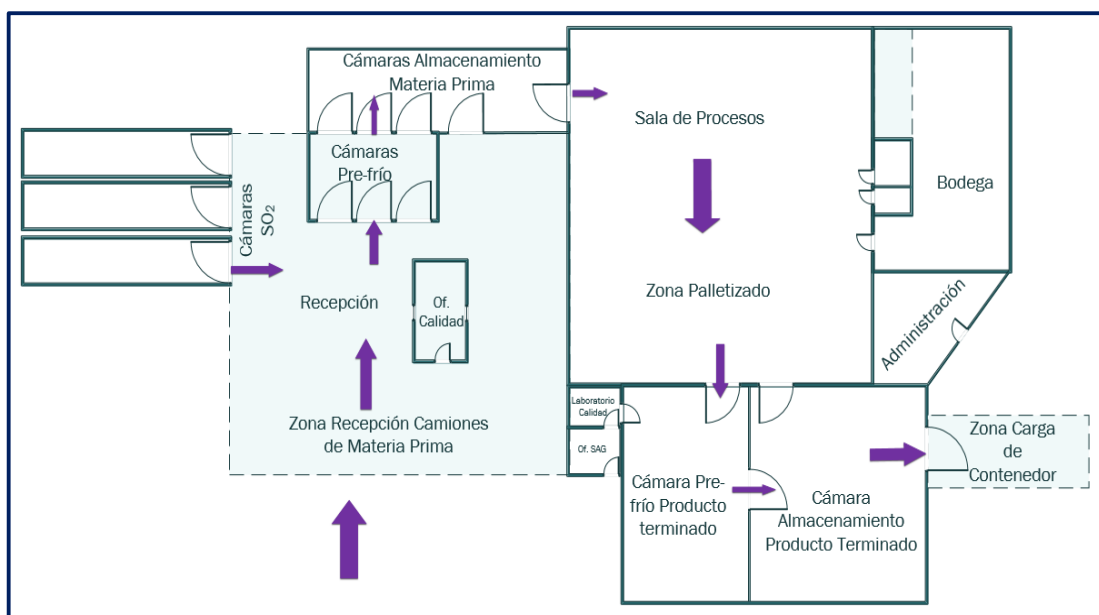
La planta cuenta con una zona de recepción de camiones de materia prima, cámaras de fumigación SO₂, cámaras de pre-frío y almacenamiento para materia prima y producto terminado, salas de procesos, bodega de materiales, sala de palletizado y termina en la zona de carga donde el contenedor es liberado (ver Figura 3.1).

3.5 Actividades de la empresa

El proceso de cosecha y de elaboración de productos consta de 3 etapas principales, la primera denominada Pre-cosecha, Cosecha y Recepción, la segunda Cámara de Almacenaje, Bodega y por último el proceso a la Sala de Procesos. A continuación se describen las actividades involucradas en la empresa (ver figura 3.2).

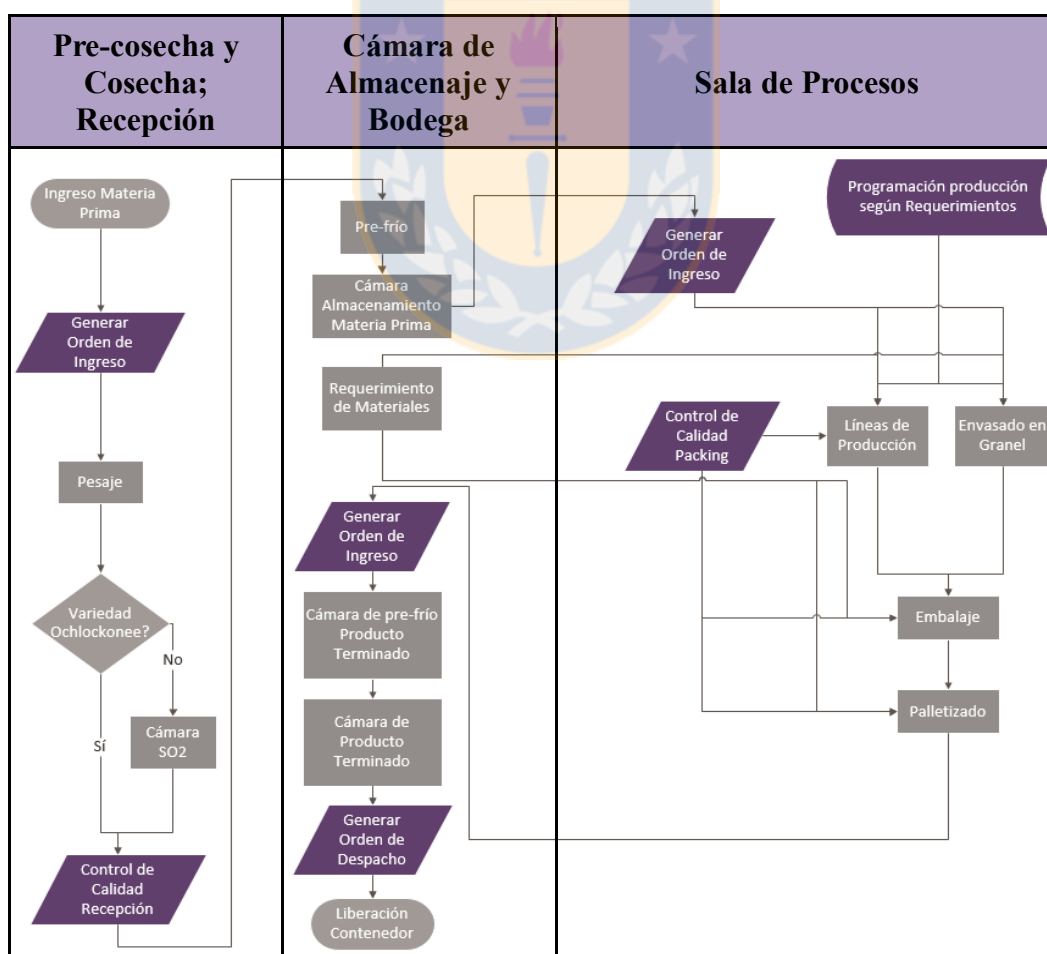
3.5.1 Pre-cosecha y Cosecha; Recepción

Pre-cosecha y Cosecha: De acuerdo a la planificación de cosecha se realiza un monitoreo de madurez e índice de cosecha, estimando la cantidad de fruta que ingresará a la planta. En terreno se disponen cuadrillas compuestas por un jefe, un centro de acopio móvil conformado por una anotadora con un capturador en que registra las bandejas cosechadas, un camión y una dotación de 80 cosecheros aprox. Las bandejas cosecheras de 3,8 kilos netos son almacenadas en pallets, las que son inspeccionadas por controles de calidad en terreno, cada envío es controlado. La carga preparada en el camión es de uno a dos pallet de 120 bandejas, dependiendo del nivel de producción, dicha carga ingresa como materia prima a la recepción de la planta.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.1: Layout Planta Agroindustrial.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.2: Diagrama de Actividades.

Recepción: Una vez que la fruta llega con la calidad establecida en terreno y de acuerdo con los parámetros de calidad y condición de la materia prima incluyendo la orden de despacho de materia prima, se pesan y disponen a las cámaras de fumigación SO₂, únicamente la variedad Ochlockonee (variedad tardía con cosecha de febrero a marzo) no pasa por este proceso, luego calidad de recepción controla el calibre, sólidos solubles y temperatura, el pallet queda con un distintivo denominado tarja con los parámetros evaluados y con los antecedentes de ingreso.

3.5.2 Almacenaje y Bodega

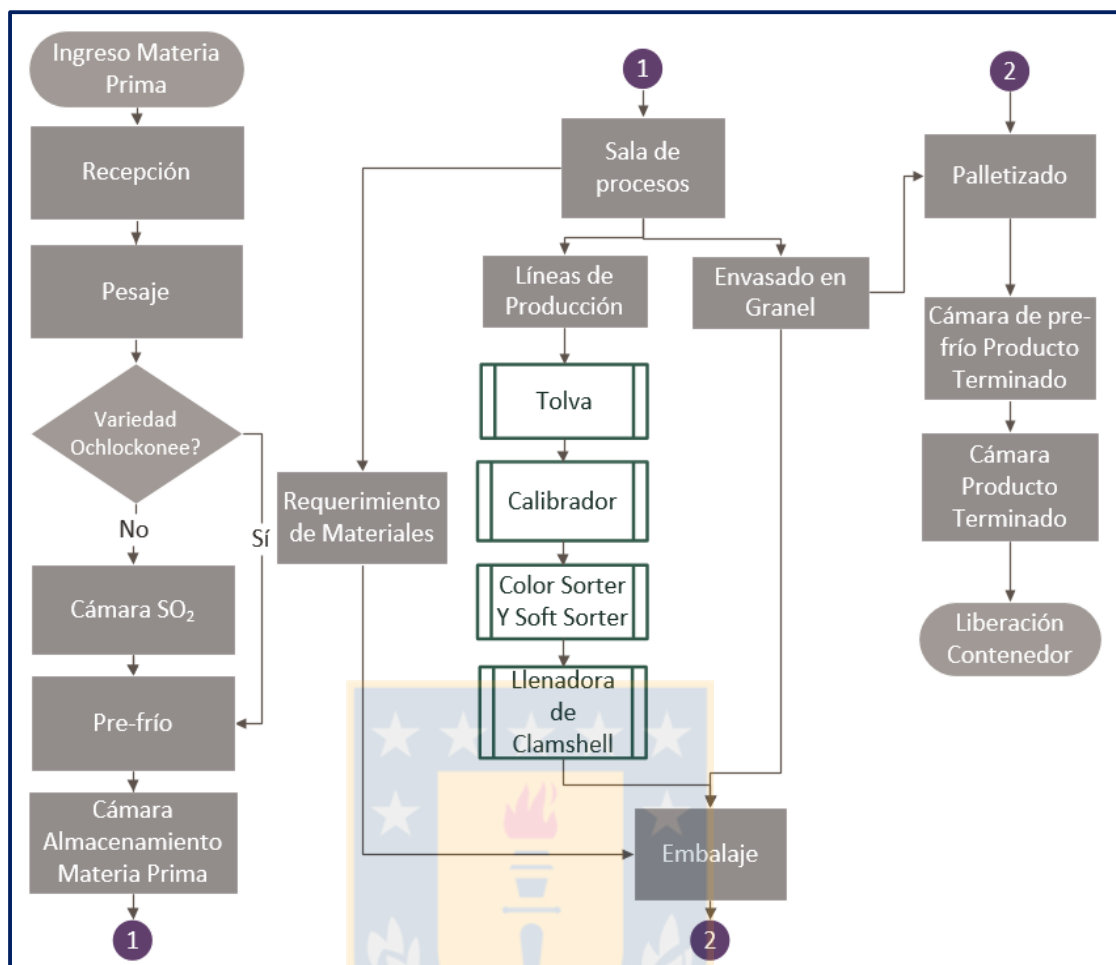
Almacenamiento Recepción: Primera área de la cámara pre-frío con tres túneles capacidad de 8 pallet por túnel hasta llegar a 6 °C, para la segunda área de la cámara de almacenamiento de materia prima la capacidad es mayor y la temperatura de mantención con la que ingresa la materia prima es de 6°C una vez que alcanza 1°C se envía a sala de proceso.

Almacenamiento Producto terminado: El producto terminado pasa a pre-frío hasta alcanzar 0°C y se almacena para su despacho en cámara de producto terminado para su posterior despacho con destino en un contenedor, según la semana de embarque. Si el producto terminado lleva almacenado más de 10 días se realiza una inspección, si no cumple los requisitos es rechazado.

Bodega: Es un sitio físico en donde es necesario tener información del plan comercial o tipo de embalaje que se necesitará en la sala de procesos, debido a que debe existir material para la producción.

3.5.3 Sala de Procesos

Líneas de producción: Con la programación de la cosecha y la planificación comercial, se trata de llegar a cumplir lo especificado de acuerdo a la disponibilidad de materia prima en cámara. Existe el envasado granel (ver Figura 3.3), que es directo y no pasa por las líneas de producción y 5 líneas de producción compuestas de máquinas paralelas automáticas que tienen sub-procesos (Tolva, Calibrador, Sorter, Soft-Sorter, Llenadora de Clamshell), en donde el producto es embalado, se realiza una verificación del sellado de las bolsas y se palletiza, según sea el despacho (aéreo o marítimo).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.3: Diagrama de Flujo Planta Agroindustrial.

3.6 Diagrama de flujo de la planta y del proceso

La planta agroindustrial cuenta con distintos procesos, desde la recepción de la materia prima, pesaje y fumigación (con excepción de la variedad Ochlockonee), luego pasa a las cámaras de pre-frío, cámaras de materia prima. Una vez que es requerida en la sala de proceso, la materia puede ser utilizada por dos procesos, la línea de producción compuesta de 5 líneas en una secuencia de máquinas paralelas automáticas o granel. Si es envasado a granel, no pasa por las líneas de producción y es envasado directamente de forma manual, desde las bandejas de materia prima a las cajas de producto terminado. Seguido cualquiera de los dos procesos anteriormente mencionados, llega a la zona de palletizado. En el mismo tiempo que se opera en la sala de producción, ingresan materiales desde la bodega. El producto que sale de la sala de palletizado, pasa a las cámaras de pre-frío y de producto terminado, que son liberadas cuando se despache el contenedor. En el diagrama de procesos se pueden apreciar las actividades involucradas desde el ingreso de la materia

prima hasta su despacho (ver Figura 3.3). Las actividades para la producción son mencionadas en el diagrama de procesos (ver Figura 3.4).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.4: Diagrama de Procesos.

3.7 Características de una orden de producción

Las órdenes de producción tienen distintas especificaciones con las que se debe cumplir, algunas de ellas son nombradas a continuación:

- Número asociado a la orden de producción.
- Clasificación según las características de producción cliente, tipo de embarque, destino, cantidad de producto y tipo de envasados.

- Fecha de inicio y termino para cumplir con el cliente. Ya que el plan comercial se basa en una programación semanal y se ajusta a especificaciones de los clientes.
- Materia prima directa y mano de obra directa para la fabricación del pedido.
- Materiales para generar el pedido.
- Costos de producción, relacionado a los gastos para generar el producto.
- Cálculo del costo unitario para cada pedido solicitado.

3.8 Situaciones en terreno y recepción, bodega y sala de procesos.

Situación terreno y recepción: La materia prima que ingresará a la planta agroindustrial, está estimada por la planificación de cosecha, un factor a considerar es el escaso recurso de personal en cosecha y el personal debe estar capacitado sobre los procedimientos de cosecha, debido a que es un fruto perecible, frágil para manipular, las bandejas de materia prima no deben estar mucho tiempo en terreno, el factor temperatura influye en el deterioro de la calidad. Por las condiciones de huerto también puede existir un producto de mala calidad desde cosecha, por lo que es necesario que el transporte a recepción sea frecuente y a velocidad moderada.

Del transporte se puede mencionar que existen camiones con refrigeración y sin refrigeración, los camiones sin refrigeración son de cuarteles de huertos cercanos a la zona de acopio para posterior carga en el camión refrigerado, a excepción del huerto en que se encuentra la planta de producción.

Cuando la temporada es alta se genera el primer cuello de botella en la recepción de materia prima, por las colas que se generan en la llegada de materia prima y el tiempo de espera para ingresar a la cámaras de fumigación y pre-frio.

Situación bodega: El segundo cuello de botella es una mala coordinación de los requerimientos de materiales para el tipo de embalaje en el tiempo adecuado. Este proceso es clave, ya que esto genera un aumento de los costos al disminuir la eficiencia y cumplimientos con los clientes.

Situación sala de proceso: Es importante evaluar estratégicamente la situación, para ello se necesita un amplio conocimiento de la información e ir adaptando el plan de producción del proceso de envasado. Los procesos deben ser conocidos, ya que una demora en ello produce la segunda parte del primer cuello de botella, relacionado a la acumulación de materia prima en cámara. Se debe considerar que el envasado granel no

pasa por las líneas de producción. En la Tabla 3.1 se muestran los tipos de envasados dependiendo del tipo de embarque y del destino.

Es importante que la planificación de producción sea eficiente, con el fin de no acumular pallets en la cámara de producto terminado, con producto que no tiene mayor prioridad, lo que genera el tercer cuello de botella, por acumulación de producto terminado.

Tabla 3.1: Envasados por tipo de embarque y destino.

Destino Marítimo	Envasado	Destino Aéreo	Envasado
Europa	12X125grs	Europa	12X125grs
Europa	12X125grs Punnet	Europa	12X125grs Punnet
Usa	1 Pinta (125 grs)	Europa	20X225 grs
Usa	11 Oz	Europa	20X225 grs Punnet
Usa	12X18 Oz	Europa	24X150 grs Punnet
Usa	12X24 Oz	Europa	24X200 grs
Usa	12X6 Oz	Europa	30X225 grs Punnet
Usa	8X18 Oz		

Fuente: Elaboración propia.

3.9 Problema empresa

Como se mencionó anteriormente en la sección 3.8, el sistema de producción para la planta agroindustrial tiene tres cuellos de botella, estos son presentes en la recepción, sala de procesos y la cámara de producto terminado.

Esta investigación es aborda en la sala de procesos, compuesta por un conjunto de máquinas dispuestas en serie, contempla 5 líneas de producción que se constituyen desde el ingreso de la materia prima hasta su envasado. Por lo tanto, la sala de procesos se puede considerar como un taller de 5 máquinas paralelas idénticas, con tiempos de preparación dependientes de la secuencia, ya que el mismo trabajo puede ser procesado en cualquier máquina, en la misma cantidad de tiempo.

Los problemas que presentan las líneas de producción son: La coordinación de las órdenes de producción, las asignaciones de los trabajos a las líneas de producción y requerimientos de materiales que se necesitan en las líneas de procesos.

Para resolver esta problemática se aplican reglas de despacho y algoritmos genéticos para ello es necesario describir sus procesos productivos, el sistema es caracterizado como un problema de máquinas paralelas idénticas con setup, sujeta a un plan comercial rige las órdenes de producción que son programadas semana a semana. Los tiempos en producir una orden de producción varían respecto al cliente, estos son considerados tiempos de preparación dependiente de la secuencia (setup), las metodologías serán comparadas para las órdenes completas y las órdenes flexibilizadas al minimizar la tardanza, medida de desempeño que indica el tiempo tardío en que se terminó la orden para despachar a producto terminado.

3.10 Programación de producción

Al considerar los antecedentes recabados en la temporada 2015-2016, podemos realizar un diagnóstico de la situación. El sistema se puede describir como un centro de trabajo (CT) con 5 líneas de producción con máquinas paralelas idénticas, con turno de producción de 7,5 hrs equivalente a 450 minutos, se pueden procesar distintas órdenes de producción (OP) que tienen distintos trabajos a asignar. Se analizaron 13 órdenes de producción semanales, estas pueden contener una serie de trabajos para ser asignados, todas son liberadas en el tiempo 0 y pueden ser programadas en cualquiera de las 5 líneas. Se considera que siempre existe disponibilidad de materia prima en cámara. Las prioridades estarán establecidas según la fecha de entrega de la orden de producción due date (d). Los tiempos de procesos de los trabajos en las máquina de las líneas de envasado se denotaron por p_i y los setup, que considera el tiempo de ajuste S_{ij} para las máquinas sorter, sofsorter (ver Figura 3.5) y llenadora de clamshell (ver Figura 3.6), que depende de las habilidades del operador y los requerimientos de envasado de los pedidos de los clientes.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.5: Máquinas Sorter y sofsorter.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.6: Máquinas Dosificadora compuesta de 12 vasos.

Con respecto a los setup iniciales, se utilizaron de acuerdo a la información entregada por los encargados del área de la sala de procesos, quienes indicaron que hay tiempos que pasar de un cliente a otro no involucra cambios en la máquina, pero si ingreso y retiro de materiales de envasado y en otros es necesario realizar ajustes a las máquinas por ejemplo cuando existe cambio de embalaje. El tiempo inicial para todos los envasados es de 20 minutos, debido a los procedimientos operacionales estandarizados de sanitización (POES). Para los setup fue necesario considerar una matriz de los tiempos de preparación para cada orden de producción como es descrito a continuación:

1. Si los trabajos a asignar mantienen el mismo cliente y tipo de envasado el tiempo es 0.
2. Si los trabajos a asignar mantienen el mismo tipo de envasado y cambia de cliente, no se realizan ajustes a la máquina, pero si se debe considerar el tiempo del cambio de envases y llevar materiales para envasar que es de 8 minutos.
3. Si el pedido es de distinto tipo de envasado y cliente, se realizan ajustes a la máquina y el tiempo de preparación será igual a 20 minutos.

Capítulo 4: Aplicación de algoritmos genéticos al problema de programación

En la programación de la producción en un taller de m máquinas paralelas idénticas, los trabajos a asignar pueden ser procesados a la misma velocidad en cualquier máquina, este proceso consta de 2 pasos; primero seleccionar los trabajos que se requieren procesar y la segunda es sobre el orden de trabajos a asignar en las máquinas (Belgesu & Koc, 2012). La representación de la secuencia de asignación de los trabajos a las máquinas se define como cromosoma y tiene importancia en la efectividad del algoritmo genético (Joo & Kim, 2015; Li et al., 2015).

El algoritmo genético es un método de búsqueda de soluciones, el principio es el siguiente, primero se selecciona una población inicial aleatoria, luego por selección natural se van creando las siguientes generaciones de cromosomas, seleccionando 2 cromosomas (secuencias padres), con el operador de cruzamiento a utilizar como por ejemplo PPX, PMX entre otros, obtienen una secuencia hijo. La aptitud de los resultados varía dependiendo de la probabilidad de cruzamiento y a la probabilidad de existencia de mutación (Schaller, 2014; Chen et al., 2012; Mattfeld & Bierwirth, 2004), Chen et al. (2012) para resolver un problema multi-objetivo con el fin de disminuir la tardanza total, makespan y tiempo de flujo en la máquina, utilizaron un algoritmo genético y un grupo de algoritmos genéticos, para programar trabajos en máquinas paralelas y procesos de reingreso. Primero se seleccionó el módulo de selección de la máquina (MSM) que fue usado para el grupo de algoritmos genéticos (GGA), por selección natural se representó el cromosoma indicando que para 3 máquinas se pueden procesar N números de trabajos, luego se pueden aplicar criterios de programación como (LPT). A continuación, las operaciones de la secuencia deben ser asignados a cada máquina (OSM) que utilizo el Algoritmo Genético (GA), por selección natural se presenta el tipo de codificación en la selección del cromosoma, la experimentación obtuvo resultados de alta calidad mostrando que a medida que los pedidos aumentan también mejora la búsqueda de la máquina y secuencia a asignar.

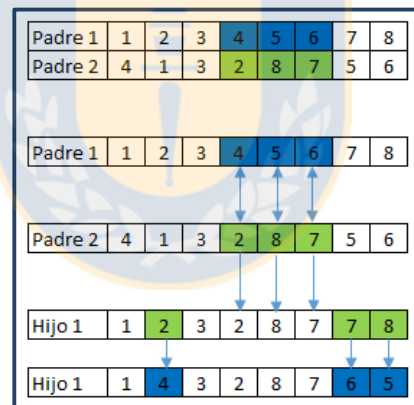
4.1 Parámetros del algoritmo

En los estudios relacionados al algoritmo genético Salazar & Medina (2013), definieron los parámetros en distintos rangos con tamaño de población de 50, 80, 100 y 200, los parámetros de cruzamiento y mutación están sujetos a una probabilidad. La probabilidad de cruzamiento fue de (0.5, 0.6, 0.8 y 0.9) y de mutación de (0.05, 0.1, 0.2, 0.5). Chen et

al. (2012), realizaron experimentos con dos tamaños de población 50 y 100, cinco operadores de cruzamiento (0.95, 0.9, 0.85, 0.8, 0.75), tres rangos de probabilidad de mutación (0.005, 0.01, 0.05) y un número de generaciones de 5000. Por otra parte Joo & Kim, (2015) utilizaron la probabilidad de cruzamiento de 0,8 y de mutación 0,2.

4.2 Cruzamiento (Crossover)

El operador de cruzamiento *Partially Mapped Crossover* (PMX) consiste en intercambiar la información de dos padres de una población, con el fin de generar un nuevo individuo (Min & Cheng, 2006). Como se muestra en el siguiente ejemplo a modo de ilustración (ver Figura 4.1), los cromosomas Padre 1 y 2 corresponden a la secuencia del número de trabajos en ser asignados, se selecciona una subcadena aleatoria de los padres, la zona destacada posee parte de código genético, que es denominada *sección de mapeo*, del padre 2 al hijo 1 se mantiene la sección de mapeo y el resto de la subcadena se relacionan con el padre 1, la interacción de las secciones de mapeo permiten generar un nuevo individuo denominado *descendiente o hijo*.

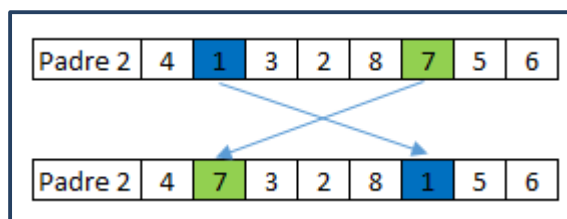


Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.1: Operador de cruzamiento PMX.

4.3 Mutación

El operador de mutación de intercambio (Swap) modifica levemente una solución factible (padre) (Balin, 2011). La mutación se produce de forma aleatoria con 2 genes del cromosoma que son intercambiados como se ilustra a continuación, de esta forma se produce un nuevo cromosoma aleatoriamente (ver Figura 4.2).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.2: Operador de Mutación Swap.

Los experimentos fueron llevados a cabo con el software SPS_GA_ParallelShop utilizando un procesador Intel® core™i3-40300 cpu @1.90 GHZ memoria Ram de 4.00 GB, cuyo objetivo es minimizar la tardanza (Ver Anexo 2, Figura A.2.1).

4.4 Caracterización de las órdenes de producción

Las órdenes de producción están regidas por un plan comercial, en esta investigación son 13 órdenes de producción (órdenes completas originales). Esta Información corresponde a las órdenes semanales que se procesaron durante la temporada 2015-2016. Cabe destacar que en ella se encuentran los números de trabajos en ser asignados, estos varían dependiendo del pedido como el cliente, destino y tipo de envase.

Las órdenes de producción se parcializaron para generar mayor flexibilidad. Los criterios utilizados fueron en relación al tiempo que requieren los trabajos en ser procesados. Estos se parcializaron desde 2 a 5 trabajos, también influyó la disponibilidad de parcializar los casos especiales, dependiendo del tipo de orden de producción, esto debido a la posibilidad de ser ingresado a cualquiera de las 5 líneas de producción. Por ejemplo en la orden de producción 3 principalmente, se parcializaron los trabajos que requieren una mayor cantidad de tiempo en ser procesados, como se muestra en la (Figura 4.3a) el trabajo 2 se parcializó en 3 trabajos a asignar como se muestra en la (Figura 4.3b), el trabajo 4 en la (Figura 4.3a) se parcializó en 4 trabajos para ser asignados como se muestra en la (Figura 4.3b), en el trabajo 5 en la (Figura 4.3a) se parcializó en 5 trabajos a asignar como se muestra en la (Figura 4.3b), el trabajo 6 en la (Figura 4.3a) se parcializó en 2 trabajos a asignar como se muestra en la (Figura 4.3b) y así sucesivamente en los trabajos con mayor tiempo para ser procesados como el trabajo 9 y 12. El caso del trabajo 13 (Figura 4.3a) fue un caso especial, se parcializó en 2 trabajos como se muestra en la (Figura 4.3b), debido a que tenía un tamaño intermedio al ser parcializado, aumentaría la flexibilidad en la asignación de los trabajos de la orden 3.

(a)

T1	77
T2	1182
T3	387
T4	2119
T5	2585
T6	676
T7	145
T8	221
T9	1076
T10	123
T11	126
T12	1925
T13	517
T14	199

(b)

T1	77	T7	145
T2.1	394	T8	221
T2.2	394	T9.1	269
T2.3	394	T9.2	269
T3	387	T9.3	269
T4.1	530	T9.4	269
T4.2	530	T10	123
T4.3	530	T11	126
T4.4	530	T12.1	385
T5.1	517	T12.2	385
T5.2	517	T12.3	385
T5.3	517	T12.4	385
T5.4	517	T12.5	385
T5.5	517	T13.1	260
T6.1	338	T13.2	257
T6.2	338	T14	199

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.3: Tiempos de procesos de trabajos en orden (a) completa y (b) flexibilizada.

Los métodos a comparar en el caso de estudio fueron las 2 reglas de despacho EDD y Slack con el algoritmo genético.

La selección de los parámetros a utilizar con el algoritmo genético en las órdenes completas y flexibilizadas (ver Tabla 4.1) se decidió en base a referencias de la literatura (Joo & Kim, 2015; Salazar & Medina, 2013; Chen et al., 2012) y a estudios preliminares que fueron seleccionados de forma de ensayo de prueba y error (método heurístico para probar una alternativa y verificar si esta funciona) con base de las referencias anteriormente mencionadas. La orden de producción 5 fue sometida a distintas probabilidades de mutación tanto en las órdenes completas como flexibilizadas (ver Anexo 2; Tabla A2.3-A2.4), luego siguió el estudio preliminar pero para las 13 órdenes de producción sometida a distintas probabilidades de cruzamiento (Ver Anexo 2; Tabla A2.5-2.6). Los niveles que se presentan a continuación fueron evaluados y seleccionados por los resultados recopilados en los estudios preliminares para el caso de estudio:

Tabla 4.1: Parámetros utilizados para el caso de estudio.

Parámetro (Factor)	Niveles Evaluados
Tamaño de población	300
Número de generaciones	8000
Probabilidad de Cruzamiento	0.8
Probabilidad de Mutación	0.05

Fuente: Elaboración propia.

Capítulo 5: Resultados del caso de estudio

Reglas de despacho y AG aplicadas al problema

Se presentan las 13 órdenes de producción completas que fueron parcializadas para generar mayor flexibilidad al momento de asignar los números de trabajos de las respectivas órdenes de producción (ver Tabla 5.1). Para la obtención de los resultados con las reglas de despacho se utilizó el software SPS_Optimizer (Salazar, 2010), diseñado para programar órdenes de trabajo. En él se registran las máquinas, tiempo de procesos y fecha de entrega. Cabe destacar que cada orden de producción tiene asociada una matriz de setup y que los trabajos son liberados desde el tiempo 0. Las reglas de despacho utilizadas fueron Earliest Due Date (EDD) y Slack (Holgura). Para el algoritmo genético se utilizó el software SPS_GA_Parallelshop (2016), con los parámetros descritos anteriormente en la tabla .

Tabla 5.1: Número de trabajos de las órdenes completas, flexibilizadas y valor de tardanzas en minutos para las órdenes completa y flexibilizada con reglas de despacho Earliest due date (EDD-C y EDD-F), Slack (Slack-C y Slack-F) y algoritmo genético (AG-C y AG-F).

Orden de producción	OR		EDD		Slack		AG	
	C	F	C	F	C	F	C	F
1	7	13	959	754	1910	842	959	1043
2	15	27	1868	1492	3163	1542	1824	2212
3	14	32	2263	373	2635	373	1722	1245
4	12	34	2654	568	2337	523	1975	2289
5	14	42	848	145	638	118	371	1494
6	14	25	1579	1266	1350	718	1241	1481
7	9	15	4040	2356	4658	2343	3311	2208
8	7	15	1183	553	1183	452	1183	452
9	7	14	1857	356	1857	356	1856	356
10	6	13	1437	382	1437	382	1437	382
11	8	14	1225	140	868	140	868	140
12	4	10	586	0	586	0	146	0
13	5	8	448	325	381	255	381	215

Fuente: Elaboración propia.

De los resultados obtenidos (ver tabla 5.1), podemos observar que las soluciones de las órdenes de producción fueron mejores al ser parcializadas, situación que se reflejó en las 13 órdenes de producción, en que se utilizaron las reglas de despacho (EDD y Slack). Cabe destacar que en las órdenes de producción que fueron flexibilizadas, la tardanza

disminuyo considerablemente, esto se debió por orden establecido al usar la heurística EDD y Slack, donde no se produjeron mayores cambios por requerimientos de stock o ajuste a las máquinas por cambio de embalaje. En el caso del algoritmo genético (AG) sólo fue observada una mejora en las órdenes de producción pequeñas (1,7-13) con números de trabajos a asignar entre (7-15), en las órdenes de producción más grandes (2 a 6) que fueron parcializadas, con números de trabajos a asignar entre (25-42), la solución no fue efectiva al ser flexibilizada.

En la orden de producción 1 completa, la menor tardanza fue con la regla de despacho EDD-C y AG-C con una tardanza de 959 minutos en ambos casos, respectivamente. En la orden de producción 2 fue el algoritmo genético, con una tardanza de 1824 minutos, Las órdenes de producción (3,4, 5, 6, 7, 9 y 12) fue obtenida con el algoritmo genético (AG-C) y las tardanzas fueron de 1722, 1975, 371, 1241, 3311, 1856 y 146 minutos. Las mejores soluciones con los tres métodos fue para las órdenes de producción (8,10) con tardanzas de 1183 y 1437 minutos. En las órdenes de producción 11 y 13 las menores tardanzas fueron con la regla de despacho Slack-C y AG-C con valores de 868 y 381 minutos.

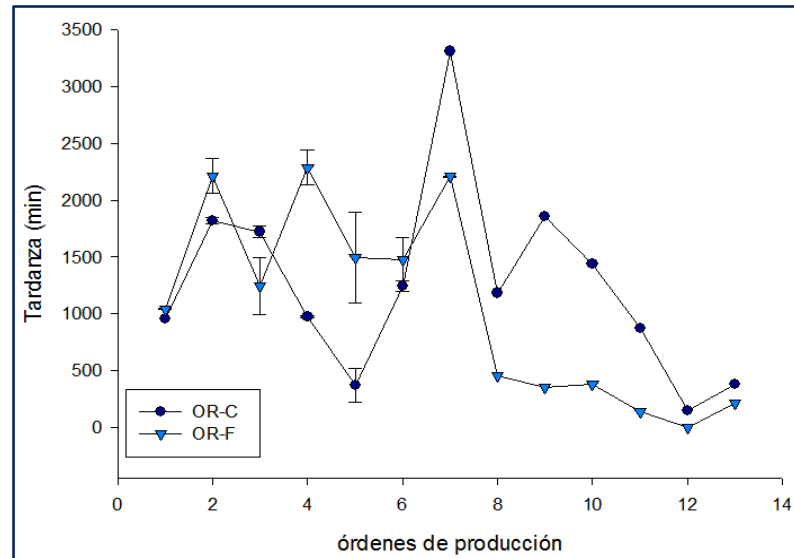
En las órdenes de producción 1 y 2 flexibilizadas la mejor solución se logró con la regla de despacho EDD-F con tardanza de 754 y 1492 minutos. En la orden de producción 3 se obtuvo con las reglas de despacho EDD-F y Slack-F con una tardanza 373 minutos para ambas reglas de despacho. En las órdenes de producción (4, 5 y 6) se obtuvo con la regla de despacho Slack-F con tardanzas 523, 118, 718. En las órdenes de producción 7 y 13 la menor tardanza se obtuvo con el algoritmo genético (AG-F) con tardanza de 2208 y 215 minutos. En la orden de producción 8 la menor tardanza fue con la regla de despacho Slack-F y AG-F con tardanza de 452, para ambos métodos. En las órdenes de producción (9, 10, 11 y 12) la tardanza fue de 356, 382, 140, 0 en los tres métodos aplicados.

En la (Figura 5.1) se observan las órdenes de producción completas con respecto a las órdenes de producción flexibilizadas utilizando el Algoritmo Genético (AG), se aprecia que la orden 1 al ser flexibilizada la tardanza aumenta levemente, de las órdenes grandes (2 a la 6), se aprecia que solo en la orden 3 se obtuvo una pequeña mejora, en las órdenes pequeñas al flexibilizarlas se mejoró la solución.

La orden 1 con 7 números de trabajos tuvo una mejor solución de 959 minutos con DS de 0, al ser flexibilizada en 13 números de trabajos a asignar se obtuvo una mejor solución

de 1043 con DS de 2.07, la solución empeoró en un 9%, en las órdenes grandes (2 a la 6), se obtuvo una mayor variabilidad de los resultados, la orden 2 con 15 números de trabajos tuvo una mejor solución de 1824 minutos con DS de 27.91, al ser flexibilizada en 27 números de trabajos a asignar se obtuvo una mejor solución de 2212 con DS de 153.37, indicando que no fue conveniente flexibilizar la orden, ya que la solución empeoró en un 21%, la orden 3 con 14 números de trabajos tuvo una mejor solución de 1722 minutos con DS de 49.90, al ser flexibilizada en 32 números de trabajos a asignar se obtuvo una mejor solución de 1245 con DS de 253.85 mejorando la solución en un 28%, en la orden 4 con 12 números de trabajos tuvo una mejor solución de 1975 minutos con DS de 6.20 al ser flexibilizada en 34 números de trabajos a asignar se obtuvo una mejor solución de 2289 con DS de 152.35 empeorando la solución en un 16%, en la orden 5 con 14 números de trabajos tuvo una mejor solución de 371 minutos con DS de 146.63 al ser flexibilizada en 42 números de trabajos a asignar se obtuvo una mejor solución de 1494 con DS de 400.96 siendo la orden con peor solución al ser flexibilizada en un 303%, la orden 6 con 14 números de trabajos tuvo una mejor solución de 1241 minutos con DS de 47.31 al ser flexibilizada en 25 números de trabajos a asignar se obtuvo una mejor solución de 1481 con DS de 194.64, la solución empeoró en un 19%, las órdenes consideradas pequeñas (7 a la 13) al ser flexibilizadas se logró disminuir la tardanza, los números de trabajo a asignar para las órdenes completas variaron entre (5-14) y para la orden flexibilizada de (8-14), en la orden 7 la mejor solución de la orden completa fue de 3311 minutos con DS 0, al ser flexibilizada la mejor solución fue de 2208 con una DS de 4.32 mejorando la solución de 33%, de la orden 8 a la 13 las DS fueron 0, para las órdenes completas como flexibilizadas, cabe mencionar que las mejoras de solución fueron 62%, 81%, 73%, 84%, 100% y 44%, respectivamente.

Al visualizar los resultados que se obtuvieron al aplicar el Algoritmo Genético (AG) (ver Figura 5.1), indicó que la situación en las órdenes grandes al ser flexibilizadas, la solución no mejora a excepción de la orden 3, que mejoró en un 28% a diferencia de las órdenes pequeñas, se comprueba que al flexibilizar las órdenes se produjo una mejor solución



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5.1: Tardanzas en las órdenes completas y flexibilizadas usando el algoritmo genético.

A continuación se calculó el índice de variación porcentual (ver tabla 5.2) usando la siguiente fórmula:

$$\text{Índice de Variación \%} = [(OR-C)-(OR-F) / (OR-C)] * 100$$

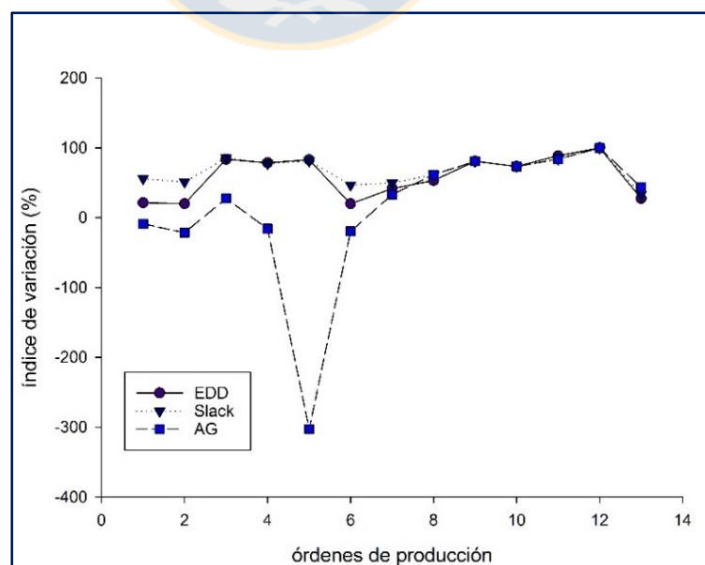
Tabla 5.2: Índice de variaciones porcentuales obtenidas en las 3 órdenes de producción correspondiente a las reglas de despacho EDD, Slack y el algoritmo genético.

Orden de producción	Índice de Variación Porcentual		
	EDD	Slack	AG
1	21,38	55,92	-8,76
2	20,13	51,25	-21,27
3	83,52	85,84	27,70
4	78,60	77,62	-15,90
5	82,90	81,50	-302,70
6	19,82	46,81	-19,34
7	41,68	49,70	33,31
8	53,25	61,79	61,79
9	80,83	80,83	80,82
10	73,42	73,42	73,42
11	88,57	83,87	83,87
12	100,00	100,00	100,00
13	27,46	33,07	43,57

Fuente: Elaboración propia.

Mediante el índice de variación porcentual (ver tabla 5.2) se muestran las ventajas de utilizar los 3 métodos, en las 13 órdenes de producción. Para la regla de despacho EDD en las órdenes de producción 4, 5 se obtuvo un mejor desempeño respecto a los otros dos métodos, con una variación porcentual positiva de 78,60% y 82,90%, en la regla de despacho Slack tuvo un mayor desempeño en las órdenes de producción 1,2,3,6 y 7, con un 55,92%, 51,25%, 85,84 %, 46,81% y 49,70%, con el algoritmo genético se obtuvo un mejor desempeño en la orden 13 con un valor de 43,57%. En la orden de producción 9 la regla de despacho EDD y Slack tuvieron el mismo desempeño de 80,83%, en las órdenes de producción 8 y 11 se obtuvo el mismo desempeño en el la regla de despacho Slack y algoritmo genético con variación positiva de un 61,79% y 88,87%, en las órdenes de despacho 10 y 12 se obtuvo el mismo desempeño para todos los métodos con valor de variación porcentual de 73,42% y 100%.

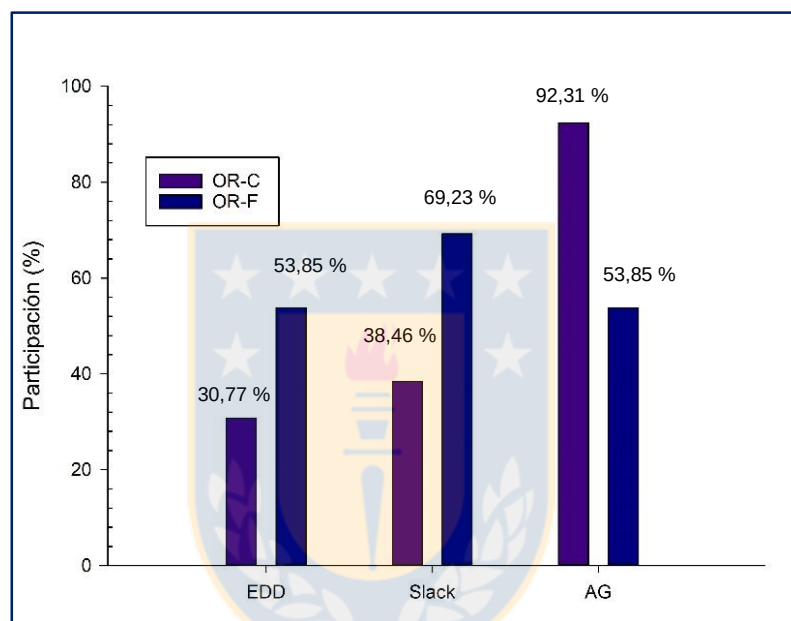
En la Figura 5.2, se aprecia que el algoritmo genético mostró una variación porcentual positiva para las órdenes pequeñas, pero no reveló mejor solución para las órdenes de producción grandes, siendo las reglas de despacho EDD y Slack las que destacaron. Slack muestra mejor solución desde las órdenes 1 a la 7, luego tiene similares resultados a la regla de despacho EDD y algoritmo genético. El algoritmo genético en la orden de producción 13 obtuvo mejor porcentaje de variación porcentual respecto a los otro dos métodos.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5.2: índice de variación porcentual de los distintos métodos en las órdenes de producción.

Posteriormente, se elaboró un porcentaje de participación de las mejores soluciones que se obtuvieron con las 13 órdenes completas y flexibilizadas en base a las veces que se obtuvieron resultados favorables con respecto a los 3 métodos que se evaluaron, el algoritmo genético destacó con un 92,31%. utilizando la regla de despacho EDD con un valor de 30,77% y Slack con valor de 38,46% y En las órdenes flexibilizadas, se observó que la reglas de despacho EDD y algoritmo genético mostró el mismo porcentaje de participación en la solución con valor de 53.85%, a diferencia de la regla de despacho Slack que obtuvo mejor de desempeño en la solución con un 69,23% (ver Figura 5.3).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5.3: El porcentaje de participación en las mejores soluciones.

Capítulo 6: Discusión

En esta investigación se abordó un caso de estudio en la programación de la producción en una empresa agroindustrial dedicada a la exportación de arándanos. La programación de producción tradicional asume que las máquinas están siempre disponibles (He et al., 2016), situación que en el escenario real no se produce debido a que los procesos son dinámicos y existe probabilidad de estar sujeto a fenómenos inciertos como fallas de máquina, tiempos de procesos alargados, retrasos en las entregas de materiales (Alimoradi et al., 2016). Hay que tener en consideración los tiempos de procesos para completar las órdenes en las máquinas paralelas. Los trabajos tardíos ocasionan pérdidas de clientes y los trabajos que son terminados antes ocasionan costos por mantenimiento

de ese producto (Li et al., 2015). El sistema se pudo caracterizar como un problema de máquinas paralelas idénticas, se estableció un método para minimizar la tardanza en el despacho de sus productos, para ello se determinaron las órdenes de producción de acuerdo a los flujos de trabajo, tipo de clientes, tipo de envasados, tipo de embarque y tiempos de procesos con el fin que de diseñar un método de parcialización de las órdenes de producción, lo que generó una mayor flexibilidad de sus productos. Esto ocasionó la disminución de la tardanza, visiblemente reflejado en las 13 órdenes de producción en que se utilizaron las reglas de despacho Earliest Due Date (EDD), Slack. Al utilizar el algoritmo genético en las órdenes de producción grandes que fueron flexibilizadas, en vez de disminuir la tardanza esta aumentó, sólo destacó la orden de producción 3 que mejoró en un 28%. En las órdenes pequeñas el comportamiento tuvo la misma tendencia que en la regla de despacho EDD y Slack (hasta 15 números de trabajo a asignar), disminuyendo la tardanza sin desviación estándar, incluso se logró mejorar la orden de producción 12 en un 100%.

Por medio del índice de variación porcentual, usado para medir el performance de la solución (Joo & Kim, 2015), se obtuvo mejor resultado por la regla de despacho Slack. Por otra parte, se reflejó que el algoritmo genético en las órdenes de producción grandes, la solución empeoró entre un 8,76% a un 302,70%, esto pudo ser por las diferencias de las matrices correspondiente a las órdenes de producción, además del tamaño de la población y cantidad de trabajos a asignar. Por ejemplo Salazar & Medina, (2013) al utilizar algoritmos de mejora, obtuvieron mejores resultados pero su tiempo en seleccionar un resultado óptimo aumentó 4 veces.

Del porcentaje de participación en la mejor solución en las órdenes completas, se destacó la utilización del algoritmo genético con un 84,62%, lo que concuerda con los descrito por Min & Cheng (2006) quienes indicaron que el algoritmo genético tiene una buena performance. A diferencia de las reglas de despacho EDD y Slack que tuvieron porcentaje de 38,46%. En las órdenes de producción flexibilizadas destacó el uso de la regla de despacho slack con un 69.23%. seguido por el algoritmo genético y la regla de despacho EDD con un porcentaje de 53.85%. El algoritmo genético en las órdenes de producción grandes, tuvo menor efectividad en los resultados que tuvo participación, comparado con los obtenidos con la regla de despacho slack.

Capítulo 7: Conclusiones

Se logró desarrollar un estudio que permitió caracterizar la línea de procesos de una planta agroindustrial, utilizando métodos para minimizar los atrasos en las órdenes de producción correspondientes a despachos aéreos y marítimos con distintos tipos de envasados, mediante las reglas de despacho EDD, Slack y Algoritmo Genético.

En la mayoría de los métodos utilizados (EDD, Slack y Algoritmo Genético) es recomendable parcializar las órdenes de producción completas. Sin embargo el algoritmo genético representó ser un método ineficiente en flexibilizar las órdenes de producción grandes con número de trabajos a asignar entre (25 y 42), debido a que es más difícil encontrar la solución, por la mayor cantidad de posibles números de trabajos por asignar. Sólo la orden 3 mejoró en un 28%, por lo que en las órdenes grandes parcializadas se recomienda utilizar la regla de despacho Slack, ya que tuvo mayor índice de variación porcentual positiva, en la órdenes con menor número de trabajos a asignar se recomienda el algoritmo genético, ya que este tuvo mejor desempeño en la solución con % de variación positivo, para un tamaño de población de 300, este debe ser seleccionado de acuerdo a la necesidad de tomar decisiones en el corto plazo, debido a que un mayor tamaño de población requerirá mayor tiempo en la búsqueda de una solución, de otra manera también puede ser de 200, con número de generación en 8000 y una probabilidad de mutación pequeña de 0.05. Por lo tanto, independiente del método utilizado parcializar las órdenes de producción, permitió ser un método que minimiza la tardanza.

En las 13 órdenes de producción completas el algoritmo genético destacó en la calidad de los resultados con una participación de un 92,31%. Por otra parte, en las órdenes flexibilizadas fue con regla de despacho slack con un 69.23%.

Esto indica que para futuros estudios es necesario implementar mejoras al algoritmo genético utilizado, para poder obtener resultados más robustos con órdenes de producción que consideren mayor número de trabajos a asignar.

Bibliografía

- Alimoradi, S., Hematian, M., & Moslehi, G. (2016). Robust scheduling of parallel machines considering total flow time. *Computers & Industrial Engineering*, 93, 152–161.
- Alvarez-Valdes, R., Tamarit, J. M., & Villa, F. (2015). Minimizing weighted earliness–tardiness on parallel machines using hybrid metaheuristics. *Computers & Operations Research*, 54, 1–11.
- Anderson, B. E., Blocher, J. D., Bretthauer, K. M., & Venkataramanan, M. A. (2013). An efficient network-based formulation for sequence dependent setup scheduling on parallel identical machines. *Mathematical and Computer Modelling*, 57(3-4), 483–493.
- Balin, S. (2011). Non-identical parallel machine scheduling using genetic algorithm. *Expert Systems with Applications*, 38(6), 6814–6821.
- Bilgesu A. & Koc E. (2012). A Guide for Genetic Algorithm Based on Parallel Machine Scheduling and Flexible Job-Shop Scheduling. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 62, 817–823.
- Biskup, D., Herrmann, J., & Gupta, J. N. D. (2008). Scheduling identical parallel machines to minimize total tardiness. *International Journal of Production Economics*, 115(1), 134–142.
- Chen, J. C., Wu, C.-C., Chen, C.-W., & Chen, K.-H. (2012). Flexible job shop scheduling with parallel machines using Genetic Algorithm and Grouping Genetic Algorithm. *Expert Systems with Applications*, 39(11), 10016–10021.
- Cheng, B., Wang, Q., Yang, S., & Hu, X. (2013). An improved ant colony optimization for scheduling identical parallel batching machines with arbitrary job sizes. *Applied Soft Computing*, 13(2), 765–772.
- Chileanblueberries. (2017, febrero 14). Arándanos de Chile | CBBC. Recuperado a partir de <http://www.comitedearandanos.cl/arandanos-de-chile/>
- Consulting, B. (2015, noviembre 27). Los arándanos de Chile tienen potencial de expansión en todos los mercados | Blueberries. Recuperado a partir de

<http://www.blueberrieschile.cl/los-arandanos-de-chile-tienen-potencial-de-expansion-en-todos-los-mercados/>

- Fang, K.-T., & Lin, B. M. T. (2013). Parallel-machine scheduling to minimize tardiness penalty and power cost. *Computers & Industrial Engineering*, 64(1), 224–234.
- Gedik, R., Rainwater, C., Nachtmann, H., & Pohl, E. A. (2016). Analysis of a parallel machine scheduling problem with sequence dependent setup times and job availability intervals. *European Journal of Operational Research*, 251(2), 640–650.
- Hamzadayi, A., & Yildiz, G. (2016). Hybrid strategy based complete rescheduling approaches for dynamic m identical parallel machines scheduling problem with a common server. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 63, 104–132.
- He, J., Li, Q., & Xu, D. (2016). Scheduling two parallel machines with machine-dependent availabilities. *Computers & Operations Research*, 72, 31–42.
- Jia, Z., Wang, C., & Leung, J. Y.-T. (2016). An ACO algorithm for makespan minimization in parallel batch machines with non-identical job sizes and incompatible job families. *Applied Soft Computing*, 38, 395–404.
- Joo, C. M., & Kim, B. S. (2015). Hybrid genetic algorithms with dispatching rules for unrelated parallel machine scheduling with setup time and production availability. *Computers & Industrial Engineering*, 85, 102–109.
- 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.
- Lamothe, J., Marmier, F., Dupuy, M., Gaborit, P., & Dupont, L. (2012). Scheduling rules to minimize total tardiness in a parallel machine problem with setup and calendar constraints. *Computers & Operations Research*, 39(6), 1236–1244.
- Lee, Y. H., & Pinedo, M. (1997). Scheduling jobs on parallel machines with sequence-dependent setup times. *European Journal of Operational Research*, 100(3), 464–474.
- Li, Z., Chen, H., Xu, R., & Li, X. (2015). Earliness–tardiness minimization on scheduling a batch processing machine with non-identical job sizes. *Computers & Industrial Engineering*, 87, 590–599.

- Lin, S.-W., & Ying, K.-C. (2014). ABC-based manufacturing scheduling for unrelated parallel machines with machine-dependent and job sequence-dependent setup times. *Computers & Operations Research*, 51, 172–181.
- Lin, S.-W., Lee, Z.-J., Ying, K.-C., & Lu, C.-C. (2011). Minimization of maximum lateness on parallel machines with sequence-dependent setup times and job release dates. *Computers & Operations Research*, 38(5), 809–815.
- Liu, S. Q., & Kozan, E. (2016). Parallel-identical-machine job-shop scheduling with different stage-dependent buffering requirements. *Computers & Operations Research*, 74, 31–41.
- Mattfeld, D. C., & Bierwirth, C. (2004). An efficient genetic algorithm for job shop scheduling with tardiness objectives. *European Journal of Operational Research*, 155(3), 616–630.
- Min, L., & Cheng, W. (2006). Genetic algorithms for the optimal common due date assignment and the optimal scheduling policy in parallel machine earliness/tardiness scheduling problems. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 22(4), 279–287.
- Parthanadee, P., & Buddhakulsomsiri, J. (2010). Simulation modeling and analysis for production scheduling using real-time dispatching rules: A case study in canned fruit industry. *Computers and Electronics in Agriculture*, 70(1), 245–255.
- Portal Frutícola. (2015, junio 15). Portal Frutícola » Oportunidades y tendencias en el mercado del arándano. Recuperado a partir de <http://www.portalfruticola.com/noticias/2015/07/15/oportunidades-y-tendencias-en-el-mercado-del-arandano/?pais=chile>
- Salazar-Hornig, E., & Medina, S. J. C. (2013). Minimización del makespan en máquinas paralelas idénticas con tiempos de preparación dependientes de la secuencia utilizando un algoritmo genético. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 14(1), 43–51.
- Salazar, E. (2010). Programación de sistemas de producción con SPS_Optimizer. *Revista ICHIO*, 1(2), 33–46.
- Schaller, J. E. (2014). Minimizing total tardiness for scheduling identical parallel machines with family setups. *Computers & Industrial Engineering*, 72, 274–281.

- Shim, S.-O., & Kim, Y.-D. (2007). Scheduling on parallel identical machines to minimize total tardiness. *European Journal of Operational Research*, 177(1), 135–146.
- Vallada, E., & Ruiz, R. (2011). A genetic algorithm for the unrelated parallel machine scheduling problem with sequence dependent setup times. *European Journal of Operational Research*, 211(3), 612–622.
- Wang, X., & Cheng, T. C. E. (2015). A heuristic for scheduling jobs on two identical parallel machines with a machine availability constraint. *International Journal of Production Economics*, 161, 74–82.





Anexo 1: Antecedentes de las líneas de producción

Como se mencionó anteriormente la planta cuenta con 5 líneas, se busca obtener una solución a la empresa con la finalidad de optimizar el uso de las máquinas y la forma en que se aborda el problema, es disminuyendo la tardanza. Para cumplir con el objetivo primero necesitamos la base de datos de producción diaria, que contiene la cantidad de kilos reales producidos por línea (Figura A.1.1) y los rendimientos de las máquinas para cada tipo de envasado marítimo (Figura A.1.2) y aéreo (Figura A.1.3). De esta manera se obtiene el tiempo de operación para cada tipo de envasado y la cantidad de pallets producida diariamente por cada línea en funcionamiento.

OP	Trabajo	Fecha de proces	Fecha de entrega	Modo	Destino	Cliente	Envasado	Línea	kilos	Tiempo (min)
OP1	6	23-11-2015	28-11-2015	Marítimo	USA	DOLE	12 X 6 OZ	1 ABE	3917	253
OP1	6	24-11-2015	28-11-2015	Marítimo	USA	DOLE	12 X 6 OZ	1 ABE	3916	253
OP1	1	25-11-2015	28-11-2015	Aéreo	EUROPA	TESCO (DPS)	24 X 150 GRS PUNNET	1 ABE	3240	171
OP1	6	25-11-2015	28-11-2015	Marítimo	USA	DOLE	12 X 6 OZ	1 ABE	49	3
OP1	7	25-11-2015	28-11-2015	Marítimo	USA	DOLE	8 X 18 OZ	2 ABE	2938	189
OP1	6	25-11-2015	28-11-2015	Marítimo	USA	DOLE	12 X 6 OZ	2 ABE	1518	98
OP1	3	26-11-2015	28-11-2015	Marítimo	EUROPA	NATURES BERRIES	12 X 125 GRS	1 ABE	1390	94
OP1	4	26-11-2015	28-11-2015	Marítimo	EUROPA	NATURES BERRIES	12 X 125 GRS PUNNET	1 ABE	2589	230
OP1	3	26-11-2015	28-11-2015	Marítimo	EUROPA	NATURES BERRIES	12 X 125 GRS	2 ABE	1490	101
OP1	4	26-11-2015	28-11-2015	Marítimo	EUROPA	NATURES BERRIES	12 X 125 GRS PUNNET	2 ABE	546	49
OP1	1	26-11-2015	28-11-2015	Aéreo	EUROPA	TESCO (DPS)	24 X 150 GRS PUNNET	2 ABE	648	34
OP1	6	26-11-2015	28-11-2015	Marítimo	USA	DOLE	12 X 6 OZ	1 ABE	35	2
OP1	6	26-11-2015	28-11-2015	Marítimo	USA	DOLE	12 X 6 OZ	2 ABE	2315	150
OP1	2	27-11-2015	28-11-2015	Marítimo	EUROPA	CARSOL EUROPE	12 X 125 GRS	1 ABE	1125	76
OP1	5	27-11-2015	28-11-2015	Marítimo	EUROPA	SUREXPORT	12 X 125 GRS	2 ABE	720	49
OP1	7	27-11-2015	28-11-2015	Marítimo	USA	DOLE	8 X 18 OZ	1 ABE	5488	353
OP1	7	27-11-2015	28-11-2015	Marítimo	USA	DOLE	8 X 18 OZ	2 ABE	1856	119
OP1	2	28-11-2015	28-11-2015	Marítimo	EUROPA	CARSOL EUROPE	12 X 125 GRS	1 ABE	1431	97
OP1	4	28-11-2015	28-11-2015	Marítimo	EUROPA	NATURES BERRIES	12 X 125 GRS PUNNET	1 ABE	1425	127
OP1	1	28-11-2015	28-11-2015	Aéreo	EUROPA	TESCO (DPS)	24 X 150 GRS PUNNET	1 ABE	637	34
OP1	2	28-11-2015	28-11-2015	Marítimo	EUROPA	CARSOL EUROPE	12 X 125 GRS	2 ABE	258	17
OP1	1	28-11-2015	28-11-2015	Aéreo	EUROPA	TESCO (DPS)	24 X 150 GRS PUNNET	2 ABE	3251	172
OP1	7	28-11-2015	28-11-2015	Marítimo	USA	DOLE	8 X 18 OZ	1 ABE	3394	218
OP1	7	28-11-2015	28-11-2015	Marítimo	USA	DOLE	8 X 18 OZ	2 ABE	1011	65

Fuente: Elaboración propia.

Figura A.1.1: Ejemplo de base de datos de la temporada 2015-2016 proceso de embalaje.

Envasado Pallet Marítimo	Peso Pallet	Kg / Hrs
1 Pinta	674	1954
11oz	764	1244
12 X 125 grs	563	885
12 X 125 grs punnet	540	675
12 X 18 oz	754	572
12 X 24 oz	734	1092
12 X 6 oz	636	929
8x 18 oz Dole	734	933
8x 18 oz Naturipe	832	933

Fuente: Elaboración propia.

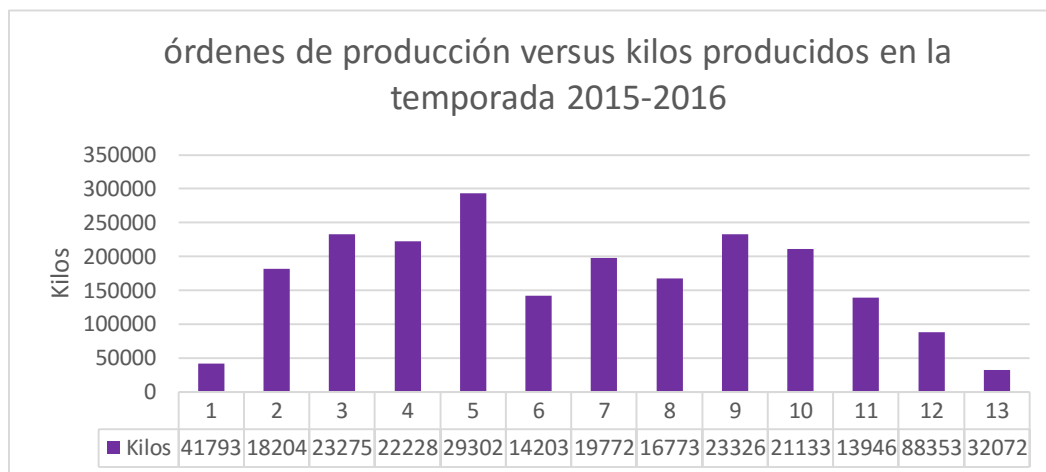
Figura A.1.2: Peso del pallet y rendimiento de la máquina de Kg/Hrs, para envasados Marítimos.

Envasado	Peso Pallet Aéreo	Peso Pallet	kg / Hrs
12 X 125 grs		360	885
12 X 125 grs punnet		285	675
20 X 225 grs		248	673
20 X 225 grs punnet		405	513
24 X 150 grs punnet		324	1134
24 X 200 grs		480	1116
30 X 225 grs punnet		608	513

Fuente: Elaboración propia.

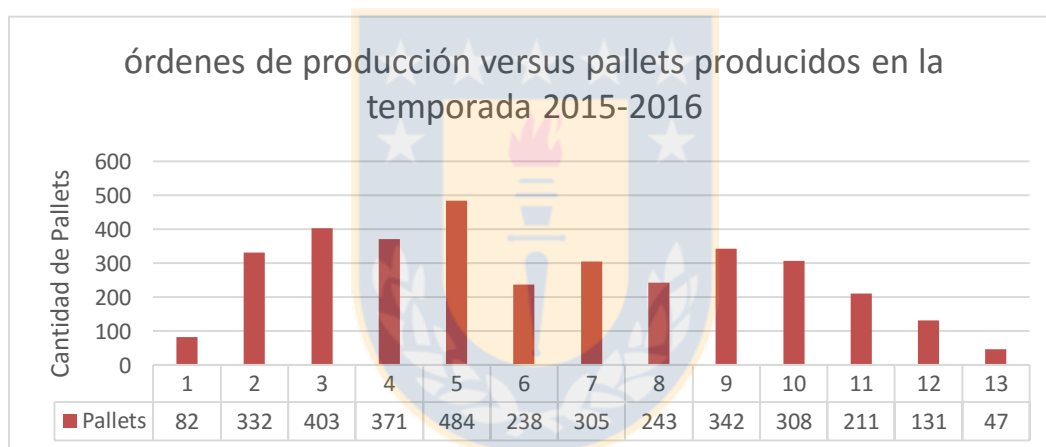
Figura A.1.3: Peso del pallet y rendimiento de la máquina de Kg/Hrs, para envasados Aéreos.

Para el análisis de la información recabada, consideramos 13 órdenes de producción, en la primera orden de producción el producto demandado es menor debido a la madurez de la fruta, en la orden 1 sólo trabajan 2 líneas, al aumentar la demanda y maduración de los frutos, la cantidad a producir es mayor y existe un mayor número de clientes, en las órdenes de producción 2, 3, 4, 5 y 6 son órdenes grandes en que trabajan las 5 líneas y se encuentran en el período peak de la temporada, de la orden de producción 7 a la 13 son más pequeñas, pero mayor cantidad de producto demandado en que trabajan las 5 líneas, en la orden 13 trabajan 4 líneas. Lo que indica el término de la temporada. Con las órdenes de producción se puede apreciar que la cantidad de producto demandado, tiene la forma de la campana de gauss y el comportamiento es de acuerdo a la maduración del fruto. los datos utilizados de la temporada 2015-2016 son los kilos (Figura A.1.4) procesados por las 5 máquinas paralelas idénticas, correspondientes a los siguientes pallets que se muestran a continuación en la (Figura A.1.5).



Fuente: Elaboración propia.

Figura A.1.4: Kilos procesados 2015-2016.



Fuente: Elaboración propia.

Figura A.1.5: Pallets procesados 2015-2016.

Anexo 2 Evaluación de Parámetros

Las órdenes de producción se encuentran en un archivo .txt, en que incluye números de trabajos, número de máquinas, tiempo de proceso y fecha de entrega, cabe señalar que cada orden tiene asociada una matriz de setup según la orden de producción. Los datos son ingresados al software y una vez que termina las 10 réplicas, el software genera un archivo de salida.txt con los resultados obtenidos por cada réplica (Figura A.2.1).

```
Sistema de Programacion ParallelShop SPS_GA_Parallelshop (setup) / Tardiness
Prof. Eduardo Salazar H. (esalazar@udec.cl)
DII-Universidad de Concepcion / Chile (2016)

Ingrese Archivo...: OR1F.txt

Ingrese parametros GA

Tamano Poblacion      : 200
Numero de Generaciones : 8000
Probabilidad de Cruzamiento: 0.5
Probabilidad de Mutacion : 0.05
Operador de Cruzamiento : 1
Replicas              : 10

[Replica...1]
BestSolution... 0 2779.000000
BestSolution... 0 2616.000000
BestSolution... 0 2268.000000
BestSolution... 0 2082.000000
BestSolution... 0 1945.000000
BestSolution... 0 1859.000000
BestSolution... 4 1841.000000
```

Fuente: Elaboración propia.

Figura A.2.1: Ejemplo de evaluación de parámetros con Software SPS_GA_Parallelshop (2016).

En la figura A.2.2 se encuentra un ejemplo del archivo de salida al evaluar un problema del caso de estudio, durante el proceso de la orden 8 con algoritmo genético, cuyo objetivo es disminuir la tardanza de un total de 10 réplicas, cabe destacar que entre mayor la población, probabilidad de cruzamiento el tiempo de la réplica es mayor.

```

OR8P300Pc0.8Pm0.05.txt: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda

Sistema de Programacion SPS_GA_ParallelMachines (setup)
Prof. Eduardo Salazar H. (esalazar@udec.cl)
DII-Universidad de Concepcion / Chile (2016)

Archivo: OR8.txt → Nombre de la orden de producción

[Parametros] - Algoritmo GA

Tamaño Población      = 300
Número de Generaciones = 8000
Probabilidad de Cruzamiento = 0.800000
Probabilidad de Mutación = 0.050000
Operador de Cruzamiento = 1
Operador de Mutación    = 1
Semilla                = 5

[Generacion,Objetivo,Replica 1]
0 1229.000000
0 1183.000000

CPU [s] : 165.168000
Generacion: 0
Objetivo : 1183.000000 → Sol. Objetivo: Mínima tardanza

2
1 3
4
5 7 → Secuencias de las máquinas 1 a 5
6

1054
58 1146
1029
61 453
2214
58 1054 1146 1029 61 2214 453
0 604 0 579 0 0 0 → Tardanza por Trabajos en la orden de producción
  
```

Fuente: Elaboración propia.

Figura A.2.2: Ejemplos de datos de salida en archivo .txt.

Tabla A.2.1: correspondiente promedio en el estudio preliminar con para las orden de producción 5 completa.

Orden de producción 5-C	P=100 Pc=0.5			P=100 Pc=0.8			P=200 Pc=0.5			P=200 Pc=0.8		
	Pm=0.05	Pm=0.1	Pm=0.2	Pm=0.05	Pm=0.1	Pm=0.2	Pm=0.05	Pm=0.1	Pm=0.2	Pm=0.05	Pm=0.1	Pm=0.2
Peor solución	865	898	863	894	891	931	848	834	823	751	834	783
Mejor solución	475	492	486	618	492	624	492	549	486	486	492	475
Promedio mejor solución	728	753	731	719	733	759	738	725	711	644	640	643
Generación Promedio	5065	3932	3625	4325	5434	5130	4040	4378	5428	2544	5827	6784
Generación ms	3969	5232	219	24	2654	2904	5177	5196	7718	3385	7509	4713
Desv. estándar promedio	101,76	106,08	105,78	70,3	89,28	80,92	90,6	100,4	112,2	61,5	70.8	87,16

Orden de producción 5-C	P=300 Pc=0.5			P=300 Pc=0.8		
	Pm=0.05	Pm=0.1	Pm=0.2	Pm=0.05	Pm=0.1	Pm=0.2
Peor solución	733	754	686	618	618	744
Mejor solución	486	489	486	371	371	371
Promedio mejor solución	576	621	600	497	518	569
Generación promedio	4247	6626	5609	4487	4671	6106
Generación ms	4150	4706	8584	834/1841	5128	6820
Desv. estándar promedio	88	87,83	67,77	67.38	89,25	109,68

Fuente: Elaboración propia.

* P= Tamaño de población; Pc= probabilidad de Cruzamiento; Pm= probabilidad de mutación

Tabla A.2.2: Correspondiente promedio en el estudio preliminar con para las orden de producción 5 Flexibilizada.

Orden de producción 5-F	P=100 Pc=0.5			P=100 Pc=0.8			P=200 Pc=0.5			P=200 Pc=0.8		
	Pm=0.05	Pm=0.1	Pm=0.2	Pm=0.05	Pm=0.1	Pm=0.2	Pm=0.05	Pm=0.1	Pm=0.2	Pm=0.05	Pm=0.1	Pm=0.2
Peor solución	3063	3282	3174	3143	3080	2963	2991	2879	2991	2669	3018	2928
Mejor solución	2012	2193	2454	2528	2305	2150	1419	2033	1419	1685	2068	1700
Promedio mejor solución	2655	2737	2757	2787	2669	2631	2392	2518	2392	2325	2582	2363
Generación promedio	4641	4505	5056	4656	3475	5189	4176	4587	4176	4679	5627	6014
Generación ms	3447	5923	9306	8388	3870	4196	9560	9626	9560	6278	2886	9511
Desv. estándar promedio	301,8	217,9	199,28	150,88	223,6	197,64	264,9	207,44	264,9	228,32	225,1	257,59

Orden de producción 5-F	P=300 Pc=0.5			P=300 Pc=0.8		
	Pm=0.05	Pm=0.1	Pm=0.2	Pm=0.05	Pm=0.1	Pm=0.2
Peor solución	2473	2604	2695	2634	2650	2279
Mejor solución	0	1772	2119	1958	1867	2018
Promedio mejor solución	1970	2324	2341	2312	2427	2199
Generación promedio	6407	5138	3450	6126	4354	5146
Generación ms	7132	1192	4372	2569	220	8989
Desv. estándar promedio	471,7	253,46	182,75	208,12	202	76

Fuente: Elaboración propia.

* P= Tamaño de población; Pc= probabilidad de Cruzamiento; Pm= probabilidad de mutación

Tabla A.2.3: Correspondiente al estudio preliminar con para las órdenes de producción completas

Orden de producción	P=100 Pc=0.5			P=100 Pc=0.8			P=200 Pc=0.5			P=200 Pc=0.8		
	NG=	NG=	NG=	NG=	NG=	NG=	NG=	NG	NG=	NG=	NG=	NG=
	5000	6000	8000	5000	6000	8000	5000	6000	8000	5000	6000	8000
1	959	959	959	959	959	959	959	959	959	959	959	959
2	1800	1812	1824	1800	1812	1800	1812	1824	1824	1824	1812	1812
3	1823	1807	1833	1849	1825	1825	1854	1765	1859	1815	1821	1811
4	1987	1975	1975	1975	1975	1975	1975	1975	1975	1975	1975	1975
5	489	486	511	489	492	618	596	618	475	596	475	492
6	1293	1277	1241	1294	1257	1243	1236	1257	1333	1277	1243	1259
7	3311	3311	3311	3311	3311	3311	3311	3311	3311	3311	3311	3311
8	1183	1183	1183	1183	1183	1183	1183	1183	1183	1183	1183	1183
9	1856	1856	1856	1856	1856	1856	1856	1856	1856	1856	1856	1856
10	1437	1437	1437	1437	1437	1437	1437	1437	1437	1437	1437	1437
11	868	868	868	868	868	868	868	868	868	868	868	868
12	146	146	146	146	146	146	146	146	146	146	146	146
13	381	381	381	381	381	381	381	381	381	381	381	381

*P= Tamaño de población; Pc= Probabilidad de cruzamiento; NG=Número de generación. Fuente: Elaboración propia.

Tabla A.2.4: Correspondiente al estudio preliminar con para las órdenes de producción flexibilizadas.

Orden de producción	P=100 Pc=0.5			P=100 Pc=0.8			P=200 Pc=0.5			P=200 Pc=0.8		
	NG=	NG=	NG=	NG=	NG=	NG=	NG=	NG=	NG=	NG=	NG=	NG=
	5000	6000	8000	5000	6000	8000	5000	6000	8000	5000	6000	8000
1	1044	1044	1044	1048	1043	1043	1043	1043	1043	1044	1043	1043
2	2521	2494	2421	2161	2316	2223	2296	1947	2280	2215	2289	2202
3	1469	1867	1822	875	1638	1322	1732	1613	1326	1368	1368	1368
4	2459	2486	2787	2549	2751	2865	2494	2040	1767	2537	2333	2537
5	2229	2403	2496	2601	2230	2459	2268	2095	2252	2379	2043	1997
6	1837	1705	1683	1657	1617	1490	927	1638	1725	1521	1330	1663
7	2220	2211	2212	2211	2215	2208	2212	2208	2208	2212	2220	2208
8	452	452	452	452	452	452	452	452	452	452	452	452
9	356	356	356	356	356	356	356	356	356	356	356	356
10	382	382	382	382	382	382	382	382	382	382	382	382
11	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	215	215	215	215	215	215	215	215	215	215	215	215

*P= Tamaño de población; Pc= Probabilidad de cruzamiento; NG=Número de generación. Fuente: Elaboración propia.

Tabla A.2.5: Correspondiente al índice de variación porcentual de la órdenes de producción en el estudio preliminar.

Orden de producción	P=100 Pc=0.5			P=100 Pc=0.8			P=200 Pc=0.5			P=200 Pc=0.8		
	5000	6000	8000	5000	6000	8000	5000	6000	8000	5000	6000	8000
1	-9	-9	-9	-9	-9	-9	-9	-9	-9	-9	-9	-9
2	-40	-38	-33	-20	-28	-24	-27	-7	-25	-21	-26	-22
3	19	-3	1	53	10	28	7	9	29	25	25	24
4	-24	-26	-41	-29	-39	-45	-26	-3	11	-28	-18	-28
5	-356	-394	-388	-432	-353	-298	-281	-239	-374	-299	-330	-306
6	-42	-34	-36	-28	-29	-20	25	-30	-29	-19	-7	-32
7	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33
8	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62
9	81	81	81	81	81	81	81	81	81	81	81	81
10	73	73	73	73	73	73	73	73	73	73	73	73
11	84	84	84	84	84	84	84	84	84	84	84	84
12	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
13	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44

*P= Tamaño de población; Pc= Probabilidad de cruzamiento; NG=Número de generación. Fuente: Elaboración propia.

Anexo 3 Matriz de Tiempos de Setup

Tabla A.3.1: Correspondiente a la orden de producción 3 completa.

T	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Si	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
1	0	20	8	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
2	20	0	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
3	8	20	0	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
4	20	20	20	0	8	8	8	20	20	20	20	8	8	20
5	20	20	20	8	0	8	8	20	20	20	20	8	8	20
6	20	20	20	8	8	0	8	20	20	20	20	8	8	20
7	20	20	20	8	8	8	0	20	20	20	20	8	8	20
8	20	20	20	20	20	20	20	0	20	20	20	20	20	20
9	20	20	20	20	20	20	20	20	0	20	20	20	20	20
10	20	20	20	20	20	20	20	20	20	0	20	20	20	20
11	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	0	20	20	8
12	20	20	20	8	8	8	8	20	20	20	20	0	8	20
13	20	20	20	8	8	8	8	20	20	20	20	8	0	20
14	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	8	20	20	0

Fuente: Elaboración propia.

Tabla A.3.2: Correspondiente a la orden de producción 3 flexibilizada.

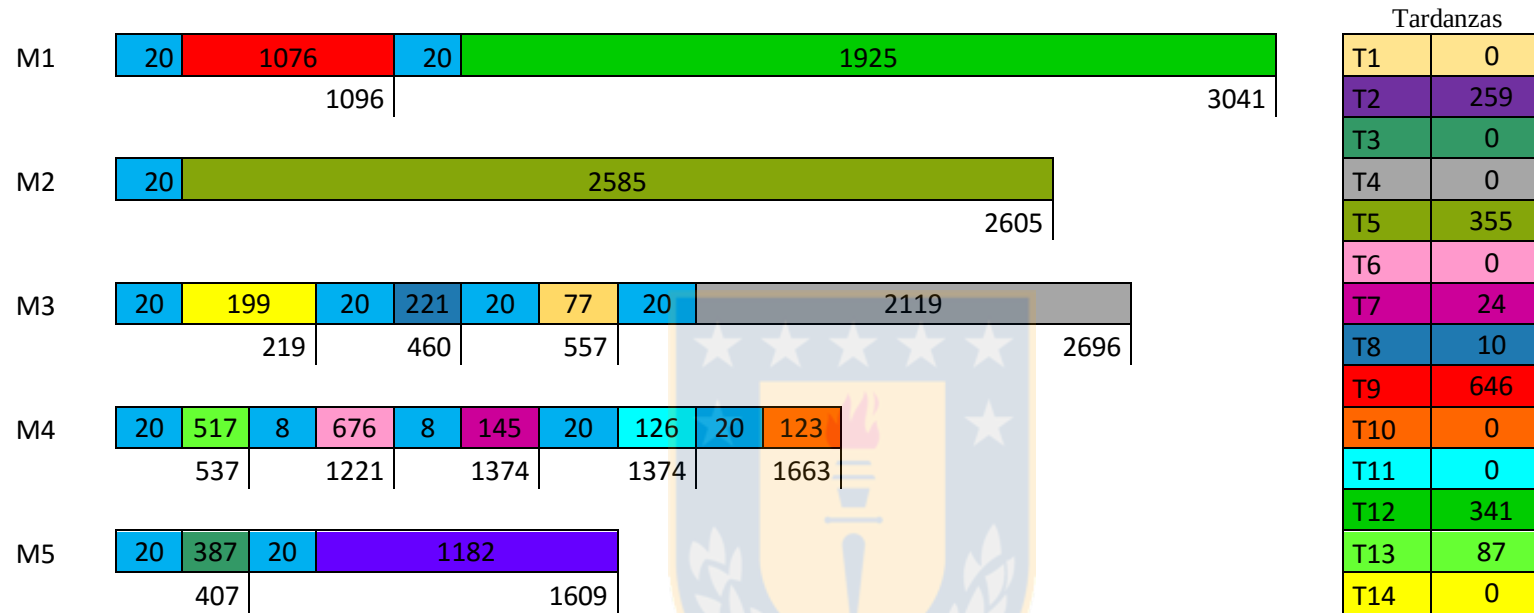
T	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
S _i	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
1	0	20	20	20	8	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
2	20	0	0	0	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
3	20	0	0	0	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
4	20	0	0	0	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
5	8	20	20	20	0	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
6	20	20	20	20	20	0	0	0	0	8	8	8	8	8	8	8	8	20	20	20	20	20	20	20	8	8	8	8	8	8	8	8
7	20	20	20	20	20	0	0	0	0	8	8	8	8	8	8	8	8	20	20	20	20	20	20	20	8	8	8	8	8	8	8	8
8	20	20	20	20	20	0	0	0	0	8	8	8	8	8	8	8	8	20	20	20	20	20	20	20	8	8	8	8	8	8	8	8
9	20	20	20	20	20	0	0	0	0	8	8	8	8	8	8	8	8	20	20	20	20	20	20	20	8	8	8	8	8	8	8	8
10	20	20	20	20	20	8	8	8	8	0	0	0	0	0	8	8	8	20	20	20	20	20	20	20	8	8	8	8	8	8	8	8
11	20	20	20	20	20	8	8	8	8	0	0	0	0	0	8	8	8	20	20	20	20	20	20	20	8	8	8	8	8	8	8	8
12	20	20	20	20	20	8	8	8	8	0	0	0	0	0	8	8	8	20	20	20	20	20	20	20	8	8	8	8	8	8	8	8
13	20	20	20	20	20	8	8	8	8	0	0	0	0	0	8	8	8	20	20	20	20	20	20	20	8	8	8	8	8	8	8	8
14	20	20	20	20	20	8	8	8	8	0	0	0	0	0	8	8	8	20	20	20	20	20	20	20	8	8	8	8	8	8	8	8
15	20	20	20	20	20	8	8	8	8	8	8	8	8	8	0	0	8	20	20	20	20	20	20	20	8	8	8	8	8	8	8	8
16	20	20	20	20	20	8	8	8	8	8	8	8	8	8	0	0	8	20	20	20	20	20	20	20	8	8	8	8	8	8	8	8
17	20	20	20	20	20	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	0	20	20	20	20	20	20	20	8	8	8	8	8	8	8	8
18	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	0	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
19	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	0	0	0	0	0	20	20	20	20	20	20	20	20	20
20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	0	0	0	0	0	20	20	20	20	20	20	20	20	20
21	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	0	0	0	0	0	20	20	20	20	20	20	20	20	20
22	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	0	0	0	0	0	20	20	20	20	20	20	20	20	20
23	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	0	20	20	20	20	20	20	20	20	20
24	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	0	20	20	20	20	20	20	20	8
25	20	20	20	20	20	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	20	20	20	20	20	20	20	0	0	0	0	0	8	8	20
26	20	20	20	20	20	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	20	20	20	20	20	20	20	0	0	0	0	0	8	8	20

27	20	20	20	20	20	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	20	20	20	20	20	20	20	0	0	0	0	0	8	8	20
28	20	20	20	20	20	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	20	20	20	20	20	20	20	0	0	0	0	0	8	8	20
29	20	20	20	20	20	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	20	20	20	20	20	20	20	0	0	0	0	0	8	8	20
30	20	20	20	20	20	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	20	20	20	20	20	20	20	8	8	8	8	8	0	0	20
31	20	20	20	20	20	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	20	20	20	20	20	20	20	8	8	8	8	8	0	0	20
32	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	8	20	20	20	20	20	20	0

Fuente: Elaboración propia.



Anexo 4 Carta Gantt



Resultados Obtenidos en la réplica 5 :

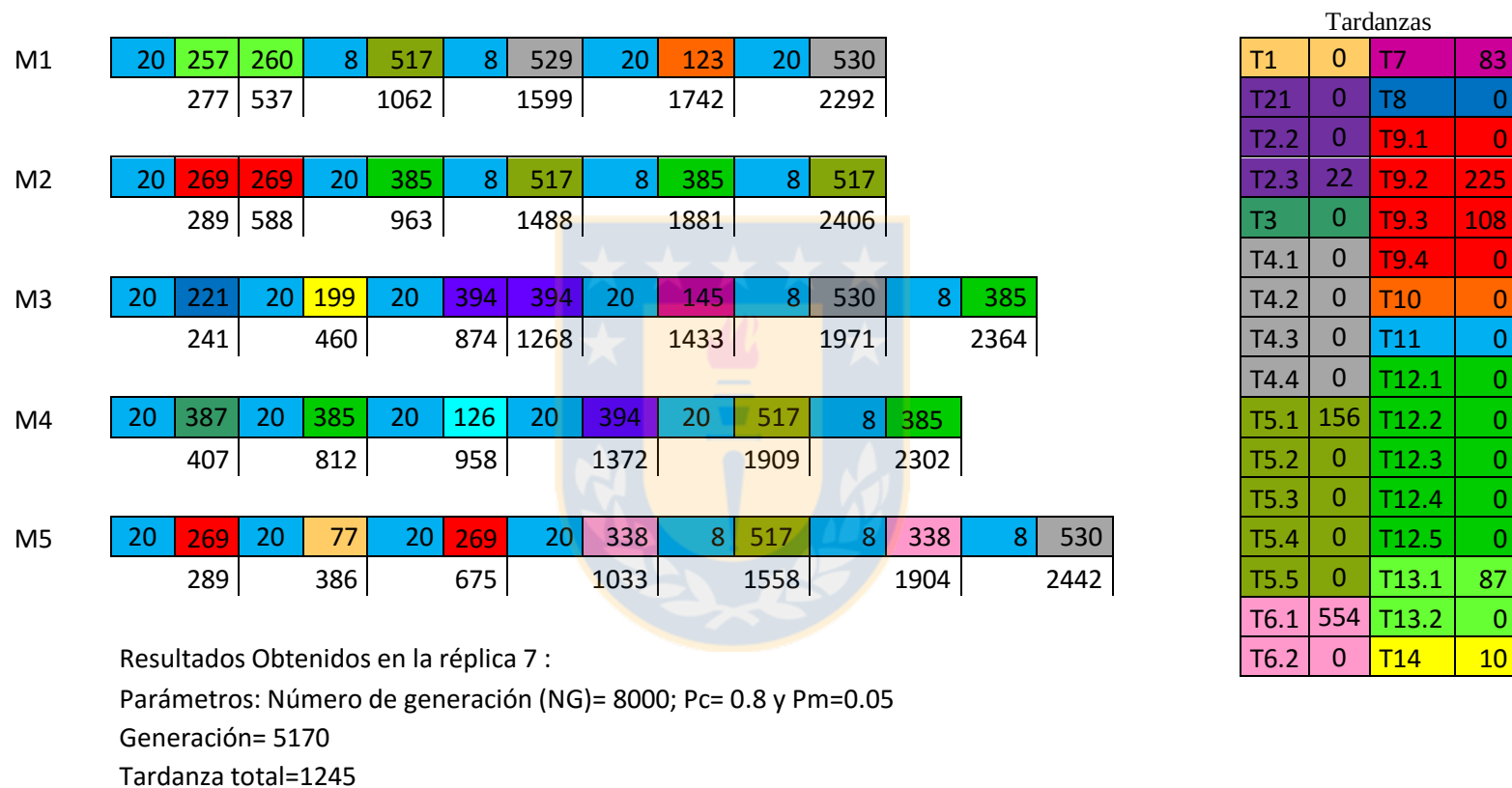
Parámetros: Número de generación (NG)= 8000; $P_c = 0.8$ y $P_m = 0.05$

Generación= 7456

Tardanza total =1722

Fuente: Elaboración propia.

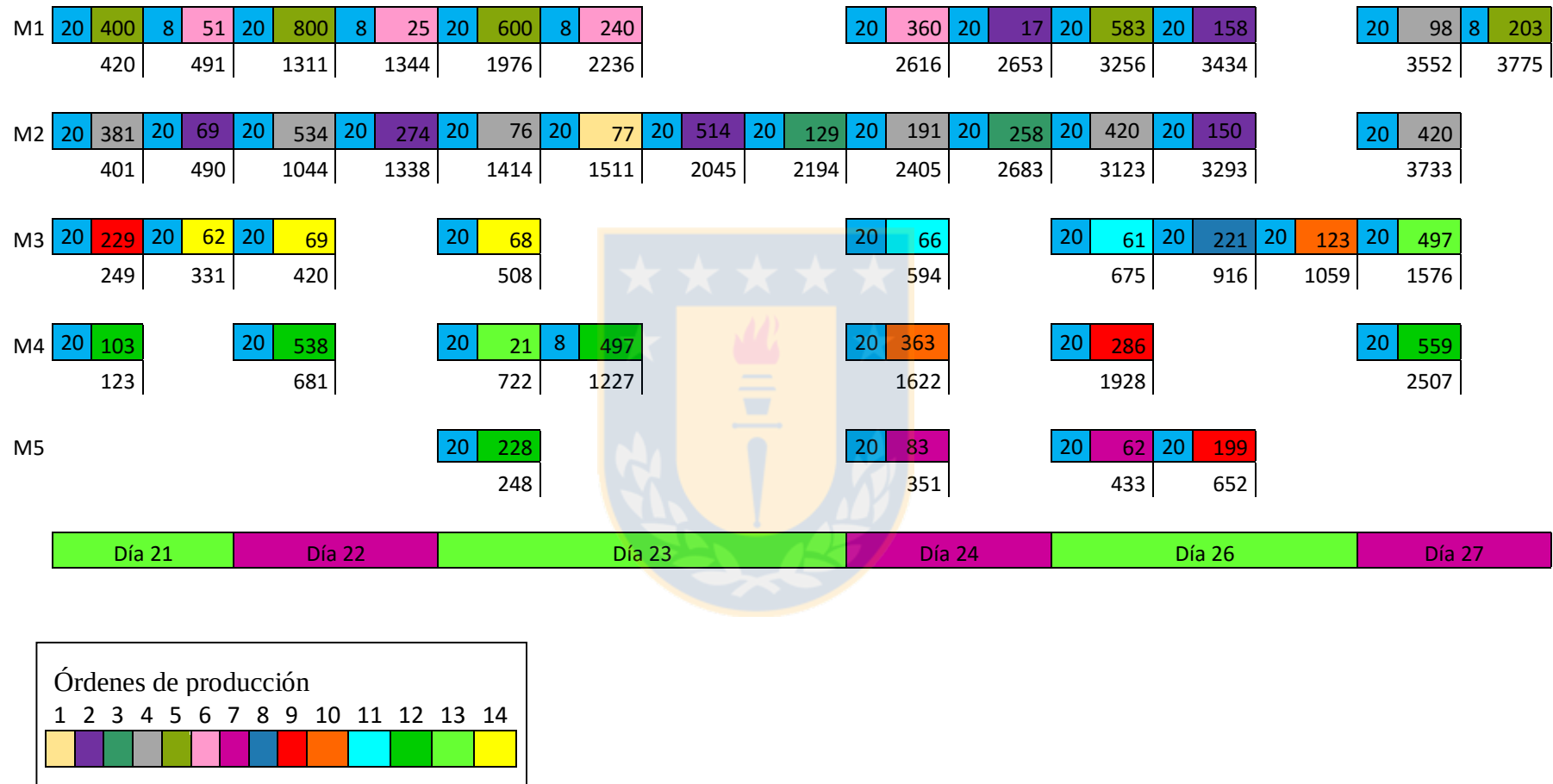
Figura A.4.1: Carta Gantt correspondiente a la orden 3 completa, resultado de la mejor solución de las 10 réplicas.



Fuente: Elaboración propia.

Figura A.4.2: Carta Gantt correspondiente a la orden 3 Flexibilizada, resultado de la mejor solución de las 10 réplicas.

Carta Gantt



Fuente: Elaboración propia.

Figura A.4.3: Carta Gantt de la orden 3 completa correspondiente a la semana del 21 al 27 de diciembre del 2015, con decisiones tomadas por los ejecutivos de la empresa exportadora de arándanos, con fecha de entrega 28 diciembre 2015 para todos los trabajos.