

[191004] Sistema de Soporte de Decisiones para la programación de producción de la empresa Café Ruta 45

Ángela María Jiménez Cubides^{a,c}, Litzi Sofía Martínez Samboni^{a,c}, Oscar David Melo Cupitra^{a,c}, Angie Natalia Pineda Martínez^{a,c}

José Fernando Jiménez Gordillo^{b,c}

^aEstudiante de Ingeniería Industrial

^bProfesor, Director del Trabajo de Grado, Departamento de Ingeniería Industrial

^cPontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia

Abstract

The coffee roaster *Café Ruta 45* is located in Pitalito, Colombia. This company is focused to threshing, roasting, grinding and packing coffee from the region of Huila. Currently, the demand of *Café Ruta 45* is being dynamic and highly volatile. For this reason, the company has few or lack of control over the production schedule and employees are forced to increase their working hours until late shifts. Certainly, the employee health and customer service can be compromised negatively. This research presents a decision support system for *Café Ruta 45*, used to schedule the production order, responding the demand in a flow-shop production environment, respecting the working hours and delivering the product to the customer in the shortest possible time. The decision support system provides the weekly production scheduling minimizing the weighted total tardiness, using an approach predictive-reactive scheduling. While the predictive component schedules the production order at the beginning of the week through a Tabu Search metaheuristic, the reactive component re-organize the schedule based on the dispatching rule called the Apparent Tardiness Cost (ATC) for the orders that arrive unexpectedly and disrupt the initial schedule. The decision support system was validated through a simulation, where the production scheduling is visually shown. A decision support system is proposed to production scheduling of *Café Ruta 45* minimizing the impact on employees and maximizing customer satisfaction.

Keywords: Predictive-Reactive scheduling, Flow Shop, dispatching rule, weighted total tardiness

1. Justificación y planteamiento del problema

El departamento del Huila se considera como el nuevo eje cafetero en Colombia. Al sur de este departamento, se encuentra el municipio de Pitalito. Desde la década de los 80s, Pitalito empezó a posicionarse como uno de los municipios cafeteros más importantes de la región, tecnificando procesos con la ayuda del Comité Nacional de Cafeteros. Montoya, A. (2019) afirma que el “Valle de Laboyos”, como se denomina el municipio, cuenta con una ubicación estratégica para cultivar café, debido a sus condiciones de temperatura entre 18 y 21 °C y la altura de 1800 metros sobre el nivel del mar a la que se encuentra. La alcaldía de Pitalito expone que la ciudad es conocida como la estrella vial del sur del Huila, porque permite la comunicación entre departamentos aledaños como Putumayo, Caquetá, Cauca y Nariño. Además, el Diario del Huila redacta que, desde el 2005, Pitalito participa en el concurso “Taza de la Excelencia”, donde se evalúan los mejores cafés del país.

A lo largo de los años, los caficultores del municipio empezaron a cambiar la forma de comercializar su café al venderlo procesado y tostado. Desde ese momento, la región tiene un apogeo en el que nacen trilladoras y tostadoras, entre ellas Café Ruta 45. Esta empresa se constituyó en el año 2016 a manos de dos mujeres con pasión y amor por el café. Hoy por hoy, los clientes de Café Ruta 45 reconocen a la empresa con altos estándares de calidad, que brinda rápida respuesta a sus requerimientos. Los registros históricos de producción arrojan que en Café Ruta 45 se procesan en promedio 420 libras de café semanales. En la *Figura 1* se observa el comportamiento volátil de las órdenes de pedido en Café Ruta 45, ya que son trabajos que llegan

inesperadamente y modifican la secuencia de procesamiento inicial. Los trabajos tienen un tiempo de procesamiento (o *lead time* por su término en inglés) promedio de dos días, entendiendo este tiempo como el intervalo de tiempo transcurrido entre la recepción del trabajo por parte de la compañía y la entrega del producto final al cliente. La política de entrega para las órdenes de pedido es de dos días hábiles, cuando se incumple el tiempo de entrega acordado con el cliente, este recibe un descuento del 5% del valor de la factura como compensación por la tardanza.

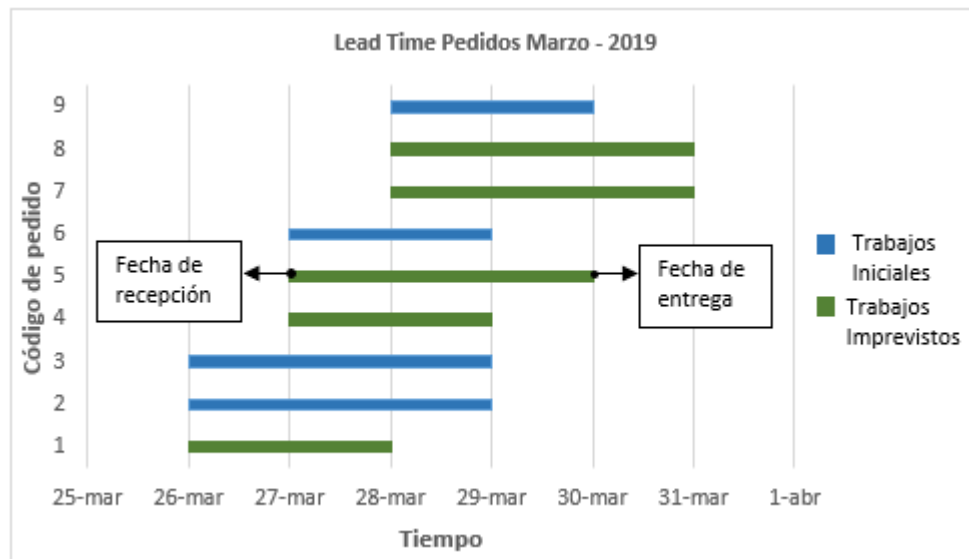


Figura 1. Lead time de pedidos Café Ruta 45

En la *Figura 1* se puede observar el comportamiento de 9 trabajos los cuales ingresaron en las fechas 26, 27, 28 de marzo, del total de trabajos el 44% fueron iniciales, y el resto inesperados, los cuales obligaron a hacer un cambio en la secuencia de producción ya planeada. Ninguna de éstas órdenes de pedido se entregó tarde, sin embargo, esto se logró debido a que se aumentaron las jornadas laborales para cumplir con el tiempo de entrega del cliente. La propuesta de valor de Café Ruta 45 evidenciada en el modelo Canvas es “satisfacer las necesidades de sus clientes brindando rápida respuesta en el procesamiento del café”. En otros términos, la empresa busca entregar lo antes posible sus pedidos y cumplir totalmente con los requerimientos de demanda dinámica de sus clientes. Actualmente, las decisiones en la producción de Café Ruta 45 se toman empíricamente; y los propietarios y colaboradores deciden procesar un pedido teniendo como base su juicio personal, experiencia y una clasificación de clientes de valor definida por la compañía. Los órdenes de pedido se procesan bajo la regla de despacho *First In First Out*, es decir, se elaboran en el orden de llegada. En el momento en el que una nueva orden de pedido es considerada de alta prioridad según la clasificación del cliente, ésta nueva orden ingresa al proceso inmediatamente, afectando la operación y la secuencia inicial. Evidentemente, esta forma de ejecución no es un método adecuado debido a que en los meses donde se cosecha café, la cantidad de órdenes imprevistas aumenta y la producción supera la capacidad instalada de la empresa. Por esta razón, la jornada laboral debe extenderse un 50% para cumplir con los tiempos propuestos de entrega.

Ahora bien, en la etapa de diagnóstico realizada en el mes de diciembre de 2018, se llevó a cabo un Grupo focal con los expertos en la operación de Café Ruta 45 (*Ver Sección 4.1.3*). Este grupo focal se centró en conocer la situación actual de la empresa e identificar las oportunidades de mejora a nivel operativo y de planeación. Los resultados de este diagnóstico encontraron que la inexistencia de programación de producción es la dificultad más significativa de la compañía. La falta de programación de producción genera extensas jornadas laborales para la empresa y retrasos en la entrega de las órdenes de pedido. Según el Artículo 3 del Convenio 30 de la reglamentación de las horas laborales de la OIT expuestas por Kanawaty, G. (2011), las jornadas de trabajo en Colombia no deben exceder ocho horas diarias ni cuarenta y ocho horas semanales. De hecho, las consecuencias de exceder este tiempo son: desgaste y cansancio en los trabajadores, disminución de la productividad, afecciones anímicas y exposición alta a riesgos ergonómicos a los colaboradores (Liétor,

2018). Por esta razón, es muy importante resolver este problema en la empresa, cumpliendo los horarios laborales estipulados por la legislación y al mismo tiempo cumplir con las órdenes de pedido a tiempo.

En la literatura académica existen varias formas de resolver este problema, una de ellas es la programación de producción. Nguyen et al (2017) definen que este método es necesario para tomar decisiones acerca de cuándo procesar un trabajo, qué máquina utilizar, o para asignar prioridades, teniendo como objetivo utilizar los recursos disponibles de manera más efectiva. Una de las formas de programar la programación de la producción es mediante un método predictivo-reactivo, en el cual la programación inicial sigue una secuencia a lo largo de la jornada de trabajo, en el momento en que llegan pedidos inesperados se realiza una reprogramación de la producción, es decir, se reorganiza la secuencia de los pedidos. Según Burbano et al (2015) los clientes actuales esperan mejor calidad en sus productos. Por esta razón, las compañías deben empezar a desarrollar sistemas de manufactura que se enfoquen en el cumplimiento de dichas especificaciones del cliente. La programación de producción representa un papel importante en el momento de la asignación de recursos a las tareas a realizar, estas deben adecuarse a las necesidades de producción dinámicas que impone el mercado actual.

Por las razones expuestas previamente, es de gran importancia que Café Ruta 45 implemente un sistema de programación de la producción que se adapte a las necesidades de sus clientes, respete las jornadas laborales y que garantice un funcionamiento óptimo en la planta de procesamiento. Con este sistema, se espera definir las políticas de pedido de la demanda dinámica, un soporte para la asignación de personal y una política para la rápida respuesta frente a la recepción de pedidos urgentes. De esta manera, este trabajo de grado se desarrolla bajo la siguiente pregunta de investigación: *¿Cómo podría Café Ruta 45 responder a las necesidades de demanda cambiante de sus clientes a partir de la programación predictiva-reactiva de la producción?*

2. Antecedentes

2.1. Programación de producción

La programación de producción se define como el proceso de establecer secuencias de procesamiento que optimicen el uso de los recursos disponibles. Para realizar la programación de producción existen dos enfoques: enfoque predictivo y enfoque reactivo. En el enfoque predictivo, la programación se hace con los datos ya conocidos, se especifica para cada recurso necesario en la producción la hora de inicio y la hora de finalización de cada trabajo asignado. En el enfoque reactivo, la programación se actualiza respondiendo a interrupciones o eventos no contemplados en el proceso, tales como llegadas de nuevos trabajos, fallas y reparaciones de las máquinas (Pérez et al., 2015). Por otro lado, Marmolejo et al (2018) definen que existe una combinación de los enfoques mencionados llamada programación híbrida, en la cual como primera medida se realiza la programación predictiva antes de empezar el horizonte de planeación, y una vez avanza el tiempo, la programación cambia a reactiva según los cambios en la demanda. Debido a que los pedidos en Café Ruta 45 llegan inesperadamente existe la necesidad de que la programación de producción tenga la capacidad de reaccionar ante estos eventos, por lo tanto, este trabajo de grado se concentra en la programación con enfoque predictivo-reactivo o híbrido.

2.2. Ambientes de producción

La programación de producción se debe hacer según el tipo de ambiente de producción, entre ellos existen: *Single Machine*, *Parallel Machine*, *Job Shop*, *Flow Shop* y *Open Shop*, entre otros. Según Castrillón et al (2013) el ambiente *Flow Shop* describe un proceso de producción con m máquinas en línea esperando a realizar n trabajos que arriban en diferentes momentos con un tiempo determinístico y conocido. Además, todos los trabajos siguen la misma dirección por todas las máquinas y las máquinas realizan un trabajo a la vez. Un ejemplo de un ambiente *Flow Shop* se evidencia en la empresa Saint Gobain, una multinacional dedicada a la producción en línea de vidrio flotado, donde su maquinaria está ubicada en serie y todos los trabajos deben pasar exactamente en un orden específico por las máquinas. Por otra parte, el ambiente de producción *Job Shop* también tiene m máquinas y n trabajos, sin embargo, la secuencia de producción de todos los trabajos en las máquinas no es la misma. Los talleres que elaboran ropa son un ejemplo de los ambientes de producción *Job Shop*. Para hacer las diferentes prendas de vestir, cada una pasa en una secuencia diferente por las máquinas de coser.

2.3. Enfoques de programación de producción

Generalmente, las herramientas para modelar los enfoques reactivos de producción están basadas en sistemas holónicos y multiagentes. Estos métodos son usados para este tipo de modelamiento ya que hacen una asignación a cada objeto dentro del sistema y se puede ver el comportamiento colectivo entre los diferentes elementos del mismo. Los sistemas holónicos son un conjunto de actividades y recursos direccionados por entidades que interactúan entre sí. Dichas entidades se denominan holones, y según Marmolejo et al (2018) son una estructura configurada que relaciona máquinas, recursos, restricciones y parámetros que son capaces de actuar de forma autónoma, cooperativa, organizada y reconfigurable. Un ejemplo de este sistema se presenta en una compañía de embutidos, donde se implementó un método para la programación de producción con sistemas holónicos. Como resultado se observa una adaptabilidad del modelo respondiendo a perturbaciones del entorno (Burbano et al., 2015) .

Ahora bien, los sistemas multi-agentes se basan en la interacción entre entidades (máquinas o recursos) que se encuentran conectados a un entorno e intercambian información entre sí para tomar decisiones de forma lógica ya definida dentro de un sistema. Fonseca et al (2019) exponen que el agente percibe el estado actual lo evalúa y selecciona una acción teniendo en cuenta parámetros y secuencias de decisiones ya predefinidas para cambiarlo, generando una mejora en el objetivo. Una aplicación de este método se expone por Bareji et al (2016), quienes implementan un sistema multiagente en la empresa *Yaran Bahar Golstan (YGB)*, dedicada a producir puertas y ventanas. Al aplicar un algoritmo de programación multiagente obtuvieron una mejora en términos de tiempo, ya que este sistema les permitió tomar acciones inmediatas para reprogramar tareas en caso de fallas. Por otra parte, los sistemas multi-agentes y la simulación basada en agentes difieren en cuanto a la autonomía o dominio del sistema. Esta diferencia es expuesta por Niazi & Hussain (2011), quienes aclaran la diferencia entre un sistema multiagente, el cual analiza el comportamiento de varios agentes que toman decisiones lógicas siguiendo una secuencia ya programada dentro de un sistema y la simulación basada en agentes, la cual interpreta los patrones resultantes de las interacciones dentro del sistemas y genera características que inicialmente no son propias de los agentes.

Por lo regular, los sistemas de producción se controlan mediante sistemas centralizados donde las decisiones se toman en una sola entidad. Sin embargo, debido a la complejidad que puede presentarse en un proceso, últimamente estos sistemas de control han evolucionado a sistemas distribuidos, que toman decisiones en diferentes entidades. Este nuevo sistema se denomina sistema de control distribuido y descentralizado. De esta manera, la arquitectura de sistema de control puede ser jerárquica o heterárquica. Un sistema jerárquico es aquel en el que se toman decisiones en niveles superiores haciendo que entidades en niveles inferiores adopten dichas decisiones. En contraste, un sistema heterárquico es aquel en el que las entidades descentralizadas adoptan dos posiciones: maestros que se encargan de tomar decisiones y simultáneamente son esclavos que adoptan las decisiones que otras entidades toman; esta interacción permite retroalimentación entre ellas. Por otra parte, un sistema de control semiheterárquico es aquel que se ubica en un punto intermedio y que integra relaciones jerárquicas y heterárquicas (Trentesaux., 2009).

2.4. Programación Predictiva

Yu, Semeraro & Matta (2018) proponen algoritmo genético y búsqueda local para resolver el problema de programación de producción predictiva de *Hybrid Flow Shop* con el objetivo de minimizar la tardanza total, por medio de una decodificación propuesta del algoritmo. Además, con esta nueva metodología se contribuye al mejoramiento de la programación debido a que realizaron comparaciones entre el modelo propuesto y otras variaciones del algoritmo genético, confirmando que esa decodificación propia tiene un mejor desempeño. Del mismo modo, Kadri & Boctor (2018) proponen una metodología para realizar la programación predictiva de las actividades de un proyecto, que presentan como característica principal relaciones de precedencia inmediata. Por medio de un algoritmo genético se tuvo como resultado de la programación la hora de inicio de cada actividad, minimizando la duración total del proyecto. Además, demostraron que ese algoritmo es capaz de resolver el problema de manera eficiente mediante pruebas experimentales.

Fernández et al (2018), plantea una meta - heurística búsqueda Tabú con límite de tiempo de una hora, para la programación de la producción en un ambiente Job Shop con el objetivo de minimizar el makespan. En el desarrollo del proyecto, ejecutaron un conjunto de instancias en el algoritmo búsqueda Tabú y en un modelo

matemático ejecutado en GUROBI. Este último no pudo determinar la mejor solución, por el contrario la búsqueda Tabú obtuvo mejor respuesta en calidad, función objetivo y tiempo computacional, así mismo identificaron una reducción en los tiempos de inactividad en las máquinas. Por otra parte, Xu et al (2019) proponen un algoritmo de búsqueda Tabú para la programación de producción con máquinas paralelas, con el objetivo de minimizar el máximo tiempo total de finalización por cada máquina. Ejecutaron varias instancias con 24 trabajos con algoritmos SPT, RSPT, ILS y Tabú, los resultados de estas pruebas arrojaron que el algoritmo Tabú fue quien obtuvo la mejor función objetivo en comparación con los demás, para instancias con número de trabajos medianos y con bajos tiempos computacionales.

2.5. Programación Reactiva

Guo Li et al (2018) proponen una heurística reactiva que les permiten programar los pedidos que ingresan irregularmente en un ambiente *Flow Shop* de m máquinas y n trabajos. La heurística programa los trabajos a medida que son ingresados, de forma que la función objetivo ponderada sea la mejor posible. Los autores compararon el tiempo computacional y la eficiencia de las heurísticas con otras heurísticas simples, y los resultados permitieron afirmar que la solución más eficiente y con menor tiempo computacional fue la heurística reactiva diseñada.

2.6. Programación Predictiva-Reactiva

La programación predictiva-reactiva o híbrida es aquella que tiene en cuenta los eventos inesperados en la producción y reprograma la secuencia inicial definida predictivamente. Uhlmann et al (2018) proponen un modelo de reparación para la reprogramación de producción basada en evaluación de riesgos de una compañía dedicada a la fabricación de elementos de audio para automotores con características *Flow Shop*. Este modelo funciona de la siguiente manera: se realiza una programación predictiva con base en los acuerdos de entrega con el cliente, en caso de que no exista riesgo de entrega del pedido, el calendario de producción se mantiene. Por el contrario, si existe alguna perturbación con posibles riesgos de retraso, el modelo sugiere una estrategia de reprogramación autónoma según la capacidad de la fábrica. Por otra parte, Valislar et al (2017) abordan el problema de programación y reprogramación en un quirófano que clasifica a sus pacientes como electivos o urgentes. El modelo se construye a partir de programación lineal mixta con el objetivo de minimizar la tardanza y el tiempo de inactividad en la sala de operaciones, teniendo en cuenta recursos importantes en el departamento de cirugía. El modelo en principio establece un cronograma para todos los días del período de planificación, luego los pacientes catalogados como electivos o programados se “fijan” y se realiza la reprogramación debido a la llegada de pacientes urgentes.

2.7. Programación con aproximación predictiva y reactiva

Otros autores que han abordado el problema de programación de producción se muestran en la *Tabla 1* de revisión literaria. Lee et al (2017) buscan minimizar el makespan en la programación de producción de un ambiente *Flow Shop*. Por otra parte, López et al (2015) exponen la implementación de un algoritmo basado en holones que contempla la definición de recursos, interfaces y flujos de información. La heurística tiene como objetivo reaccionar a las necesidades de producción dinámicas. Por su parte, Schaller & Valente (2019) proponen un algoritmo de búsqueda local y *permutation scheduling* con el objetivo de minimizar tardanza en un ambiente *Flow Shop*. Finalmente, Joglekar, G (2017) implementa una programación dinámica respaldada por simulaciones que permiten modelar variables de decisión y restricciones.

Tabla 1. Revisión literaria

Autores	Objetivo	Tipo de programación	Ambiente de proceso	Metodología de solución
Lee et al (2017)	Minimizar makespan	Predictiva-Reactiva	Flow Shop	Algoritmo greedy
López et al (2015)	Minimizar makespan	Predictiva	Hybrid Flow Shop	Algoritmo genético
Schaller et al (2019)	Minimizar tardiness	Predictiva	Hybrid Flow Shop	Búsqueda local
Joglekar, G (2017)	Minimizar tardiness	Predictiva-Reactiva	Hybrid Flow Shop	Simulación

3. Objetivos

Objetivo general

Construir un sistema de soporte de decisiones para Café Ruta 45, que, por medio de un modelo de decisión híbrido y semiheterárquico, realice la programación de producción y cumpla con la demanda dinámica de la empresa.

Objetivos específicos

1. Diagnosticar la situación operativa y logística actual de la empresa mediante la realización de un estudio de tiempos y movimientos
2. Construir un modelo de programación de producción predictivo-reactivo para la empresa Café Ruta 45
3. Evaluar el comportamiento del modelo frente a perturbaciones representadas a través de una simulación basada en agentes para la verificación del modelo reactivo base del sistema de soporte de decisiones
4. Validar el sistema de soporte de decisiones con datos propios de la empresa, para comprobar la ejecución del modelo frente a los eventos inesperados reales en la operación de Café Ruta 45.

4. Metodología

A continuación se muestra la metodología que describe los pasos generales que se siguieron para llegar al Sistema de soporte de decisiones que programa la producción de Café Ruta 45. Este apartado divide los cuatro objetivos específicos en fases, las cuales contienen el objetivo, las herramientas usadas y los resultados encontrados.

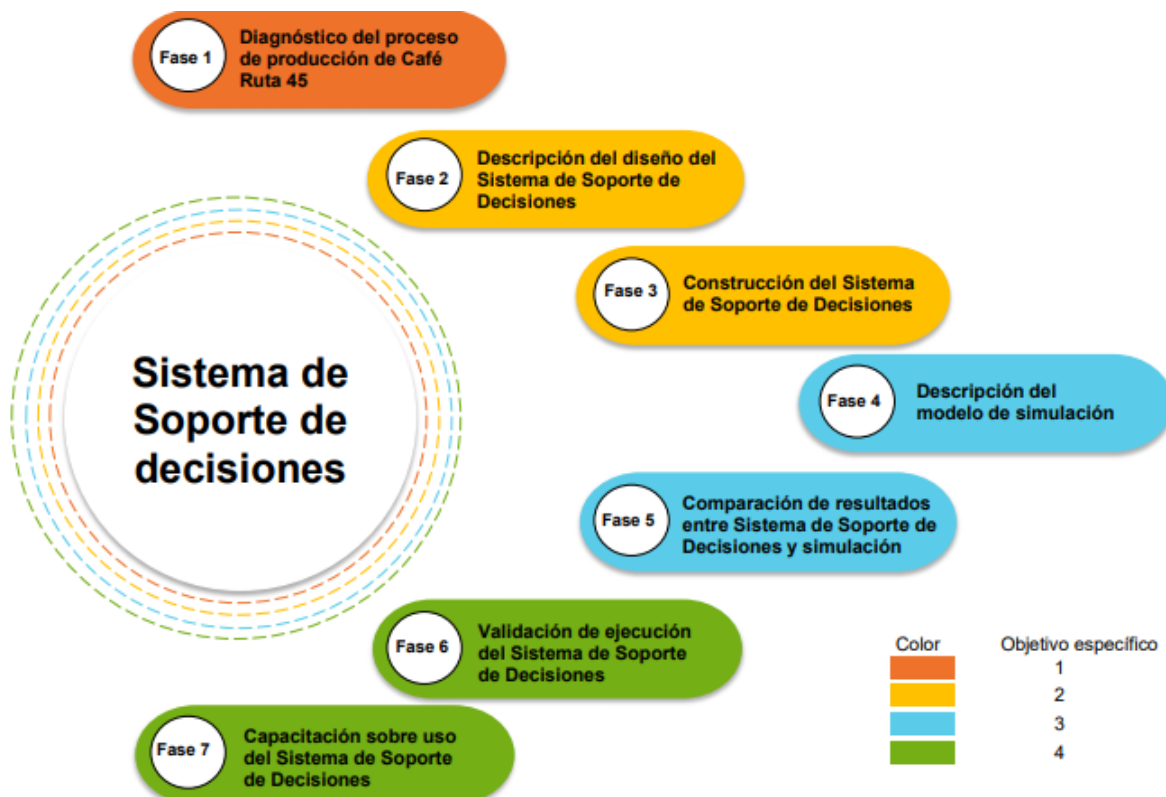


Figura 2. Metodología desarrollada para la elaboración del Sistema de Soporte de decisiones

4.1. Fase 1: Diagnóstico del proceso de producción de Café Ruta 45

Café Ruta 45 es una micro empresa torrefactora de café, la cual ofrece el servicio de trillado, tostado, molido y empaçado a los agricultores del gremio cafetero de la región. Los clientes son los encargados de establecer las especificaciones esperadas y de entregar los granos de café a la empresa, para que allí se procesen. Café Ruta 45 cuenta con una línea de producción que ofrece café molido o granel, en presentaciones de empaque de 125 gr, 250 gr, 500 gr y 2500 gr. La primera fase para el desarrollo del Sistema de Soporte de decisiones consistió en: realizar un análisis del proceso logístico y de producción, identificar la estrategia de la empresa por medio del modelo Canvas, realizar un grupo focal para establecer la mayor problemática y determinar los tiempos de proceso.

4.1.1. Proceso logístico y de producción

En este análisis se identificaron las estaciones de trabajo que integran el proceso de producción, las cuales son: Trillado, Tostión, Molienda, Enfriamiento y Empaque. En primer lugar, la estación de trillado se encarga de separar el cisco o cáscara del grano y clasificarlo de acuerdo con su tamaño. En esta etapa del proceso el 20% del peso del café se convierte en desperdicios. En la estación de tosti3n se reciben estos granos y son procesados de acuerdo con el grado de tosti3n indicado por el cliente, este grado puede ser tosti3n: media, media-media, media-alta o alta. En esta estación el peso del café disminuye en un 17%. Luego, en la estación de molienda se transforma el grano tostado en café molido. El tipo de molido depende del cliente, este puede variar entre 1: Super fino hasta 10: Grueso. En la estación de enfriamiento, la temperatura del café molido se debe llevar a temperatura ambiente, el café se deja enfriar un tiempo determinado, ya que, si se empaça caliente, puede sufrir alteraciones en su calidad. Finalmente, en la estación de empaque se embolsa el producto terminado y estas bolsas ya selladas se embalan en bolsas transparentes de plástico. El cliente decide el tipo, tamaño y color de empaque de su producto. Cuando el pedido está completo es llevado a la zona de producto terminado. Café Ruta 45 trabaja en un ambiente de producción Flow Shop porque en cada estación de trabajo solo hay una máquina y todos los trabajos siguen el mismo orden de proceso.



Figura 3. Diagrama del proceso de producción de Café Ruta 45

Para tener un mejor entendimiento del proceso productivo de café ruta 45, este diagnóstico incluyó la realización de diagrama de bloques (*Anexo 1. Sección 1*), diagrama de operaciones (*Anexo 1. Sección 2*) y diagrama de recorrido (*Anexo 1. Sección 3*), incluyendo tiempos de proceso, transporte y movimiento de material dentro de la planta de producción.

4.1.2. Modelo Canvas

Se elaboró el modelo Canvas de la empresa (*Figura 4*), utilizando información obtenida de una entrevista aplicada a cada uno de los colaboradores. El objetivo de realizar el análisis Canvas fue identificar estratégicamente la propuesta de valor, la cual expone que el propósito principal de Café Ruta 45 es: “satisfacer las necesidades de sus clientes brindando rápida respuesta en el procesamiento del café”, es decir, esta empresa le apuesta a entregar lo antes posible sus pedidos y cumplir totalmente con los requerimientos de sus clientes. Lo cual justifica la propuesta de diseño de este trabajo de grado.


Socios clave	Actividades clave	Propuesta de valor	Relación con los clientes	Segmento de clientes
Proveedores de empaque y rótulos: - Isaflex - Packvision - Zipol - Litosur	Recepción de los granos de café, documentación de orden de pedido, trillado, tostado, molienda y empaque	Somos una empresa que busca satisfacer totalmente al cliente brindando rápida respuesta en el procesamiento del café, teniendo en cuenta todas las normas sanitarias exigidas	Contacto directo y contacto telefónico	Cafeteros y comerciantes de café
	Recursos clave Maquinaria, recurso humano, empaque, experiencia		Canales Canal directo en la planta, los clientes recogen el café en la planta	
Estructura de costos		Fuente de ingresos		
Servicios públicos, arriendo, pago de nómina, empaque, rótulos, mantenimiento de equipos, arreglos locativos, insumos		Dinero en efectivo y consignaciones bancarias		

Figura 4. Modelo Canvas de Café Ruta 45

4.1.3. Grupo focal

El grupo focal mencionado en la justificación de este proyecto se realizó mediante la preparación de una serie de preguntas que fueron realizadas a los encargados y colaboradores de la compañía para obtener respuestas basadas en la experiencia y el conocimiento empírico de los participantes (Ver Anexo 1. Sección 4). Por medio de ésta práctica se pudieron determinar cuáles son las problemáticas más importantes percibidas por los colaboradores en la empresa y realizar una priorización según la opinión de cada uno de ellos. Una vez se obtuvo la lista de dificultades, los colaboradores de la compañía, en consenso, se encargaron de asignar una calificación a cada una, entre A, B y C.

Ficha técnica de grupo focal			
Fecha:	9/12/2018		
Interlocutores:	Ángela Jiménez Oscar Melo	Angie Pineda Litzi martinez	
Participantes:	Gerente general Gerente de producción	Gerente administrativo Colaborador 1	Colaborador 2
Cuestionario de preguntas			
1	¿Cuál es la diferenciación de café ruta 45 con respecto a la competencia?		
2	¿Que hace la empresa para mantener dicha diferenciación?		
3	¿ Que inconvenientes locativos perciben en la empresa?		
4	¿Por qué medio café ruta 45 da a conocer sus servicios?		
5	¿ Como se llevan los registros de ingreso, salida, producción de los pedidos en la planta ?		
6	¿ Como se realiza el plan de trabajo para el cumplimiento de los pedidos?		
7	¿ Que política se utiliza para la gestión de los desechos?		
8	¿ Que problemática es la que mayor influye en el normal desarrollo de la actividad?		
9	Califiquen entre A, B y C las oportunidades de mejora encontradas		

Figura 5. Ficha técnica grupo focal

La calificación A es para las problemáticas que afectan directamente la propuesta de valor de la compañía, aquellas que no permiten que las órdenes de pedido sean entregadas al cliente en los tiempos establecidos y, por esta razón, exigen solución a corto plazo. Por el contrario, se clasifican como B las dificultades que

afectan parcialmente el tiempo de entrega de los pedidos y que requieren solución a mediano plazo. Por último, los problemas que se califican con C, son aquellos que no afectan significativamente la propuesta de valor de la empresa, por lo tanto, se pueden corregir a largo plazo. La *Tabla 2* expone la calificación de las oportunidades de mejora.

Tabla 2. Priorización de oportunidades de mejora

Oportunidades de mejora			
1. No existe programación de producción	A	6. Política inadecuada para la gestión de desechos	B
2. No hay herramienta que programe la producción	A	7. No hay cultura de pausas activas	B
3. Jornadas laborales mayores a los permitidos	A	8. No existen estrategias de mercadeo y publicidad	B
4. Problemas ergonómicos por luz, ruido postura	B	9. Insumos organizados inadecuadamente	C
5. Poco espacio para almacenar los productos	B	10. El ingreso de órdenes no se registra eficientemente	C

Con base en la calificación obtenida con la aplicación del Grupo focal, se construyó un Pareto cualitativo (*Ver Anexo 1. Sección 5*). Se garantizó que las oportunidades de mejora clasificadas como A obtuvieran un porcentaje de importancia aproximado al 80%. Este fundamento dicta que un pequeño número de causales (30%) representa el máximo valor de problemáticas críticas para la empresa (75%).

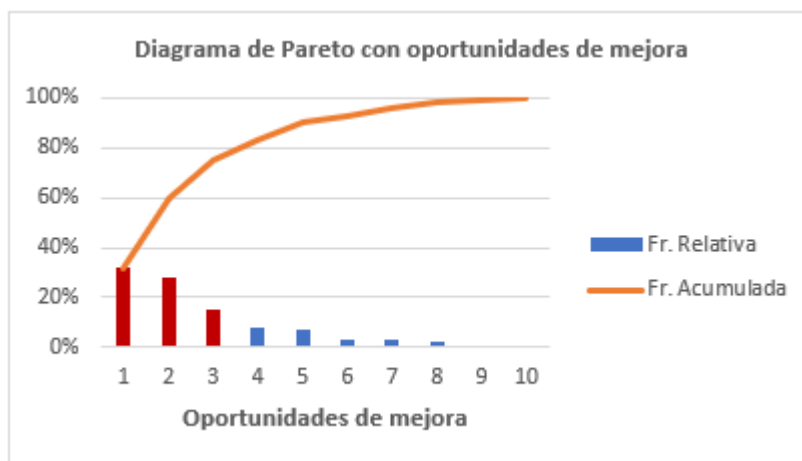


Figura 6. Diagrama de Pareto con oportunidades de mejora

Según el gráfico de Pareto, se observa que la inadecuada programación de producción, la falta de una herramienta que realice esta programación y las jornadas laborales extralegales, son el principal problema en Café Ruta 45.

Adicionalmente, dentro de los resultados obtenidos del grupo focal se encuentran las prioridades determinadas por los expertos de Café Ruta 45 para los clientes. Donde la prioridad 1 corresponde a aquellos trabajos que fueron llevados por un cliente que se considera importante para la empresa y que su entrega es urgente, menor a dos días. La prioridad 2 determina aquellas órdenes de pedido donde su entrega tiene una urgencia moderada, entre tres y cuatro días. Finalmente, aquellos trabajos que tengan que entregarse en más de cinco días son prioridad 3. Así mismo, para la construcción de la función objetivo la cual es tardanza total ponderada, los expertos establecieron tres ponderaciones: 20 para los trabajos de prioridad 1, 10 para la prioridad 2 y 5 para las órdenes de pedido de prioridad 3. Es importante mencionar que cuando llega un trabajo, es la misma compañía la que determina su prioridad, con base en los criterios mencionados anteriormente.

4.1.4. Tiempos de proceso

El tiempo de proceso en las estaciones de trillado, tosti6n y molienda dependen del peso del caf6 a procesar. Por lo tanto, se registraron el peso y los tiempos de proceso de 80 6rdenes de pedido en cada una de 6stas

estaciones (Ver Anexo 1. Sección 6), que fueron observadas desde que se generó la orden de producción, hasta que se obtuvo el producto terminado. Con los datos obtenidos, se establecieron funciones matemáticas mediante una regresión lineal, que describen el comportamiento del tiempo de proceso, el cual es directamente proporcional al peso del café. En la Figura 6 se muestran las regresiones lineales para cada estación de trabajo. Para la estación de enfriamiento la empresa estableció un tiempo estándar, donde todos los trabajos independientemente del peso o la cantidad de café, se deben dejar enfriar durante 4 horas.

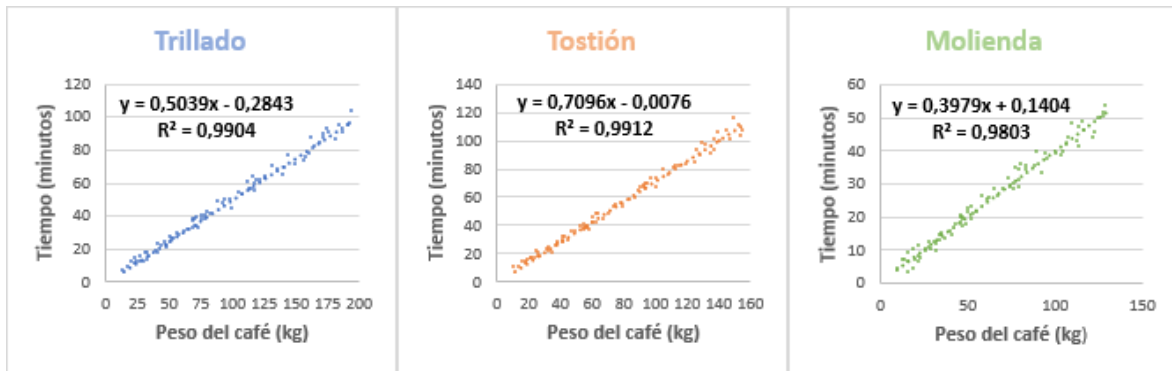


Figura 7. Regresiones lineales de los tiempos de proceso

Ahora bien, el tiempo de proceso en la estación de empaque depende del peso del café a empacar, de la capacidad del empaque y de la cantidad de colaboradores en la estación. Con base en las 80 órdenes de pedido mencionadas anteriormente, se registró el tiempo promedio que tarda un colaborador en empacar una bolsa de cada tipo de empaque (Tabla 3). Adicionalmente, la compañía tiene una política: si el peso del café a empacar es menor o igual a 40 kg, solo una persona se encarga de empacar, si el peso está entre 40 kg y 100 kg se requiere de dos personas y si la orden de pedido es mayor a 100 kg se necesitan 4 personas. El tiempo total de empaque es calculado multiplicando el tiempo unitario por la cantidad de bolsas necesarias y dividiendo este valor entre la cantidad de colaboradores.

Tabla 3. Tiempo unitario de empaque

Tipo de empaque	Tiempo (min)
Bolsa de 125 gr	1,23
Bolsa de 250 gr	1,1
Bolsa de 500 gr	0,7
Bolsa de 2500 gr	1,4
A granel	3,2

Finalmente, debido a los cortos recorridos necesarios para los transportes, con respecto a los tiempos de procesamiento, estos no se tienen en cuenta en la programación de producción.

4.2. Fase 2: Descripción del diseño del Sistema de Soporte de decisiones

El Sistema de Soporte de Decisiones (SSD) pretende programar la producción semanal de la empresa Café Ruta 45 minimizando la tardanza total ponderada. En la empresa existen dos tipos de órdenes de pedido o trabajos. **Trabajos predictivos:** aquellos que se conocen previamente y que se sabe que van a llegar al principio de cada semana y **Trabajos reactivos:** las órdenes de pedido que llegan inesperadamente en cualquier momento. El Sistema permite ingresar la información de los pedidos predictivos por medio de una interfaz, con éstos trabajos se realiza una programación inicial (*programación predictiva*) mediante una Búsqueda Tabú, la cual encuentra la mejor secuencia de procesamiento. Ahora bien, cada que llega una orden de pedido reactiva, se ingresa su información también por la interfaz, y el Sistema de Soporte de Decisiones reprograma la secuencia inicial con los trabajos que no se han empezado a procesar y la nueva orden. Esta reprogramación (*programación reactiva*) se realiza a través de la regla de despacho *Apparent Tardiness Cost*

(ATC). Finalmente, los resultados del Sistema se validan con una simulación en el Software NetLogo, que permite interpretar visualmente la programación realizada por el modelo.

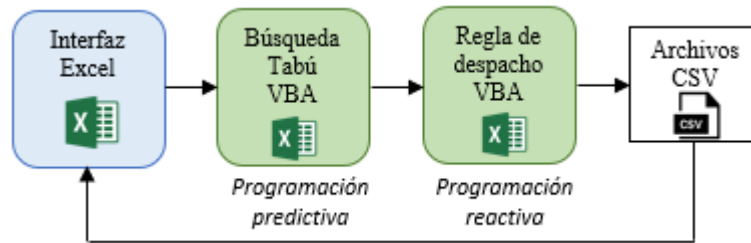


Figura 8. Flujo de información del SSD

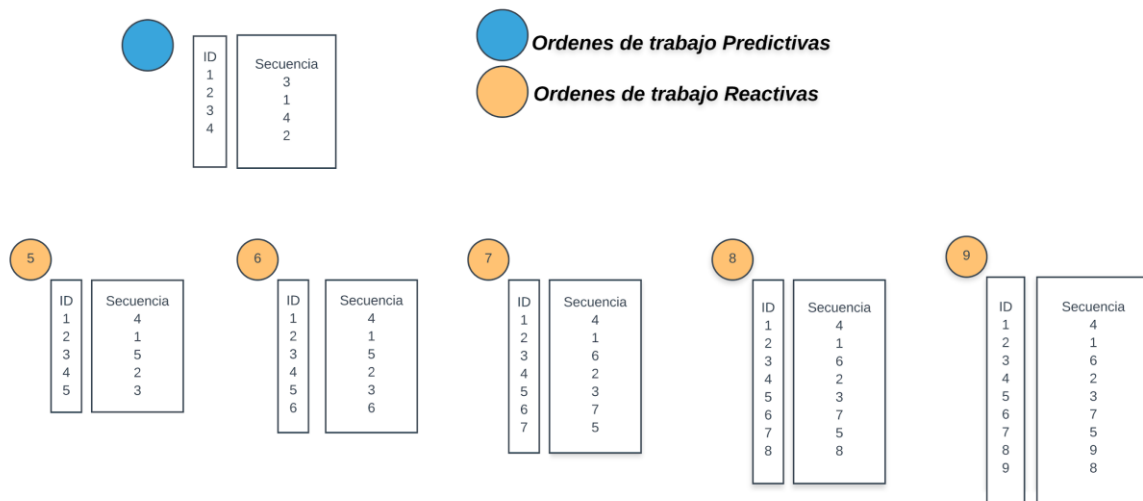


Figura 9. Diagrama de arquitectura

El Sistema de Soporte de Decisiones considera las siguientes restricciones y supuestos propios de la operación de la compañía, para la programación tanto predictiva como reactiva de los trabajos:

- No sobrepasar la jornada laboral de Café Ruta 45. Lunes a viernes de 8:00 am a 5:00 pm y sábados de 8:00 am a 12:00 m.
- No se tienen en cuenta las horas de almuerzo, ya que los colaboradores rotan para que, en todo el día la planta de producción esté funcionando.
- El horizonte de programación es de una semana (Lunes a Sábado).
- En la estación de enfriamiento se pueden procesar varias órdenes de pedido al tiempo.
- Una vez se comienza la elaboración de un trabajo, no se puede interrumpir.
- Se consideran los desperdicios en cada estación de trabajo.
- Se consideran despreciables los tiempos de desplazamiento o transporte del café.
- No existe tiempo de alistamiento de las máquinas.
- Respetar políticas establecidas por Café Ruta 45 asociadas al proceso de producción.
- Todos los trabajos tienen una prioridad definida por el usuario del Sistema de Soporte de Decisiones, la cual puede ser prioridad 1, 2 o 3.
- En términos de Función Objetivo, los trabajos con prioridad 1 tienen un peso de 20, con prioridad 2 un peso de 10 y por último, aquellos que tienen prioridad 3 su peso es 5.
- Los clientes pueden escoger hasta dos tipos/presentación de empaque, si escogen dos, se empaqueta la mitad del café en el tipo 1 y la otra mitad en el tipo 2.

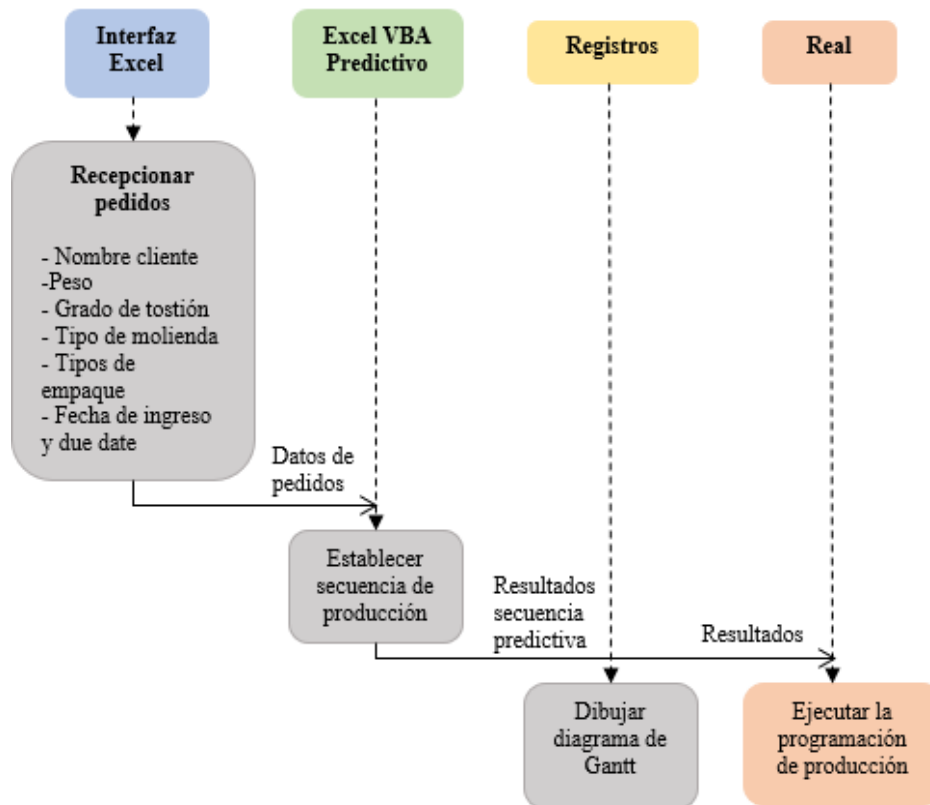


Figura 10a. Gráfico UML en condiciones normales

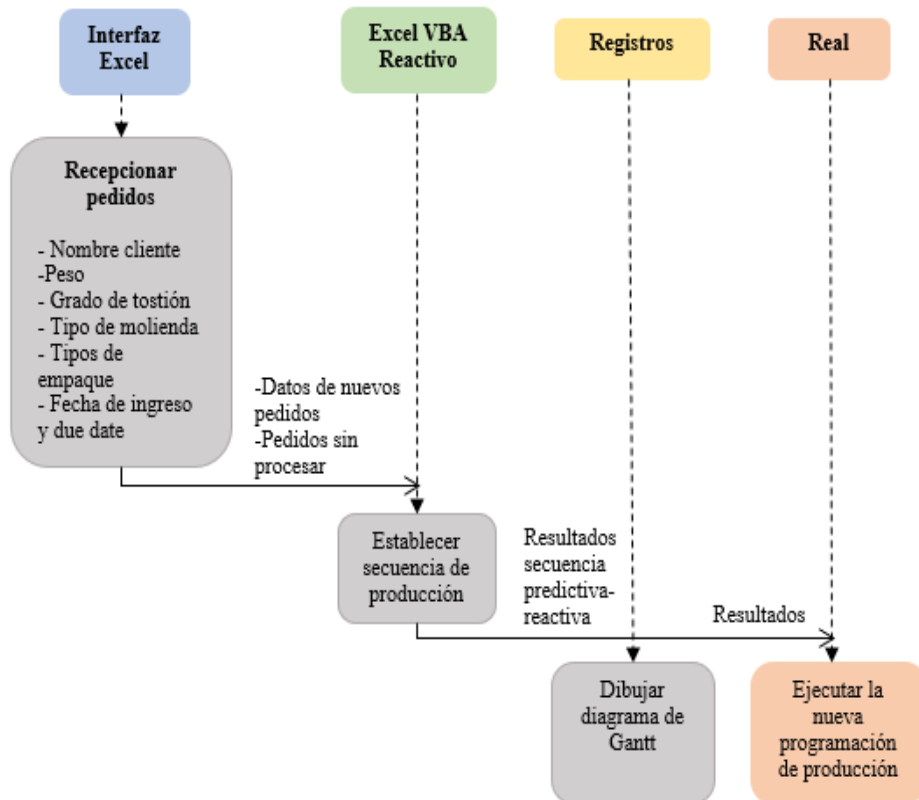


Figura 10b. Gráfico UML en condiciones perturbadas

4.3. Fase 3: Construcción del Sistema de Soporte de decisiones

4.3.1. Interfaz

La información de las órdenes de pedido entra al Sistema de Soporte de Decisiones por medio de una interfaz interactiva, donde el usuario ingresa manualmente las características de los trabajos tales como fecha y hora de entrada, peso de los granos de café, grado de tuestión, tipo de molienda, tipo(s) de empaque, fecha y hora de entrega, nombre del cliente y la prioridad. Además, esta interfaz tiene botones, los cuales permiten ingresar la información y ejecutar la programación inicial y la programación reactiva. Cuando se ingresa una orden de pedido, el Sistema calcula los tiempos de proceso en cada estación de trabajo, utilizando las expresiones matemáticas definidas en la fase de diagnóstico. Estos tiempos de proceso y las características de los trabajos son los datos de entrada del modelo de programación predictivo-reactivo.



Figura 11. Interfaz de ingreso de información de órdenes de pedido

4.3.2. Programación predictiva

Semanalmente la jornada laboral de Café Ruta 45 inicia a las 8 de la mañana el día lunes. En ese momento se identifica la información correspondiente a las órdenes de pedido no procesadas la semana anterior o trabajos predictivos. Con la información de entrada, el Sistema de Soporte de Decisiones realiza la programación predictiva con estos trabajos. La programación inicial se obtiene mediante la ejecución de la metaheurística de Búsqueda Tabú, la cual encuentra la secuencia de programación que minimiza la tardanza total ponderada. Además, se realizó un modelo matemático para comparar resultados, determinar el grado de optimalidad de la metaheurística y establecer sus parámetros.

4.3.2.1. Modelo matemático

Se construyó un modelo de programación lineal que determina la secuencia óptima en la que se deben procesar los trabajos predictivos, para minimizar la tardanza total ponderada. Es importante resaltar que el modelo respeta las restricciones y condiciones de la operación de Café Ruta 45 mencionadas en la sección 4.2. A continuación se expresa el modelo de programación lineal en notación matemática:

Tabla 4. Notación matemática del modelo de programación lineal

Conjuntos	
M	Máquinas o estaciones de trabajo
J	Trabajos a procesar
Parámetros	
P_{jm}	Tiempo de proceso del trabajo j en la máquina m
D_j	Fecha de entrega/ due date del trabajo j
W_j	Peso del trabajo j
G	Número muy grande
MIN	Minutos de un día = 1440
JORN	Minutos de la jornada laboral = 540
NOC	Minutos entre las 5 pm y las 8 am del otro día = 900
Variables de decisión	
T_j	Tardanza del trabajo j
X_{kj}	1: Si el trabajo k es procesado antes del trabajo j 0: En caso contrario
C_{jm}	Tiempo de terminación del trabajo j en la máquina m
I_{jm}	Tiempo de inicio del trabajo j en la máquina m
DIA_{jm}	Día de la semana en el que se procesa el trabajo j en la máquina m
Función objetivo	
$\text{Min } \sum_j W_j * T_j$	
Restricciones	
$C_{jm} - P_{jm} \geq C_{km} - (1 - X_{kj}) * G$	$\forall j, k \in J \quad \forall m \in M; j \neq k, m \neq 4$ (1)
$X_{kj} + X_{jk} = 1$	$\forall j, k \in J; j \neq k$ (2)
$C_{jm} \geq C_{j,m-1} + P_{jm}$	$\forall j \in J \quad \forall m \in M; m \neq 1$ (3)
$C_{j1} \geq P_{j1}$	$\forall j \in J$ (4)
$T_j = C_{j5} - D_j$	$\forall j \in J$ (5)
$I_{jm} = C_{jm} - P_{jm}$	$\forall j \in J \quad \forall m \in M$ (6)
$DIA_{jm} \geq \frac{C_{jm}}{MIN}$	$\forall j \in J \quad \forall m \in M$ (7)
$DIA_{jm} \leq \left(\frac{C_{jm}}{MIN} \right) + 1$	$\forall j \in J \quad \forall m \in M$ (8)
$C_{jm} \leq JORN * DIA_{jm} + NOC + NOC * (DIA_{jm} - 2)$	$\forall j \in J \quad \forall m \in M; m \neq 4$ (9)
$I_{jm} \geq MIN * (DIA_{jm} - 1)$	$\forall j \in J \quad \forall m \in M$ (10)
$T_j, C_{jm}, I_{jm}, DIA_{jm} \geq 0$	$\forall j \in J \quad \forall m \in M$ (11)
$X_{kj} \in \{0,1\}$	$\forall j, k \in J$ (12)
$DIA_{jm} \in \mathbb{Z}$	$\forall j \in J \quad \forall m \in M$ (13)

La restricción (1) garantiza que el tiempo de inicio de cada trabajo en una máquina sea mayor que el tiempo de terminación del trabajo anterior en esa máquina. Excepto en la máquina 4, pues se pueden enfriar varios trabajos a la vez. La restricción (2) asegura que si el trabajo k precede al trabajo j, el trabajo j no puede preceder a k. La restricción (3) indica que el tiempo de terminación de un trabajo en una máquina es mayor al tiempo de terminación del trabajo en la máquina anterior, más el tiempo de proceso de ese trabajo en esa máquina. La restricción (4) asegura que el tiempo de terminación de los trabajos en la máquina 1 sea mayor a su tiempo de procesamiento. La restricción (5) calcula la tardanza de cada trabajo. La restricción (6) calcula el tiempo de inicio de cada trabajo en cada máquina. Las restricciones (7) y (8) calculan el día de la semana en el que se procesa cada trabajo en cada máquina. Las restricciones (9) y (10) garantizan que los tiempos de terminación y de inicio de todos los trabajos en cada máquina no estén por fuera de la jornada laboral. La restricción (11) asegura que todas variables tomen valores positivos o cero. La restricción (12) expresa que es una variable binaria y la restricción (13) asegura que la variable es entera.

4.3.2.2. Metaheurística Búsqueda Tabú

Los trabajos predictivos se programan mediante la metaheurística Búsqueda Tabú desarrollada en *Visual Basic for Applications*. Esta metaheurística parte de una secuencia de procesamiento inicial, es decir, los pedidos ordenados según su hora de llegada, y realiza cambios en esa secuencia que mejoran la función objetivo, en este caso, la tardanza total ponderada. El cálculo de la función objetivo tiene en cuenta las restricciones de jornada laboral de la empresa. Al finalizar, la metaheurística muestra la mejor secuencia de procesamiento encontrada.

Pseudocódigo metaheurística Búsqueda Tabú	
<pre> So // Secuencia inicial Saux // Secuencia donde se realizan los cambios bestS // Mejor secuencia encontrada FOaux // Guarda temporalmente una función objetivo bestFO // Mejor función objetivo encontrada MatrizTabu //Guarda por x iteraciones los cambios hechos Nciclos // Número de iteraciones o cambios a realizar Saux ← So bestS ← Saux bestFO ← // Función objetivo con la secuencia inicial Do While i <= Nciclos // Llamar la función BúsquedaLocal (*) // Hacer el cambio de la pos-x y pos-y en Saux // Guardar en MatrizTabu que se hizo ese cambio FOaux ← // Función objetivo al cambiar pos-x con pos-y If FOaux < bestFO Then bestS ← Saux bestFO ← FOaux End if i = i + 1 End While Return bestS, bestFO </pre>	<pre> (*) Función BúsquedaLocal FOactual FOminima ← // Número muy grande For j = 1 To bestS - 1 For k = j + 1 To bestS // Cambiar la posición j con la posición k en Saux FOactual ← // Función Objetivo al hacer ese cambio If FOactual < FOminima And MatrizTabu permite el cambio Then pos-x ← j pos-y ← k FOminima ← FOactual End if // Cambiar la posición j con la posición k en Saux Next k Next j Return pos-x, pos-y </pre>

Figura 12. Pseudocódigo Metaheurística Tabú

La Búsqueda Tabú parte de una secuencia inicial que es guardada en un vector auxiliar. Cada que se va a realizar un cambio, la metaheurística llama una función nombrada búsqueda local, la cual se encarga de evaluar todos los posibles cambios y escoger la pos-x y la pos-y que, al cambiar generan una disminución en la función objetivo, con respecto a la secuencia actual. Luego, se realiza el cambio en el vector auxiliar de los trabajos en la pos-x y pos-y retornadas por la función búsqueda local. Finalmente, evalúa si la función objetivo correspondiente al cambiar la pos-x y pos-y es menor que la mejor función objetivo encontrada hasta el momento. Si eso pasa, la metaheurística acepta el cambio y se actualiza el vector que guarda la secuencia final y la variable correspondiente a la función objetivo.

Los parámetros de entrada de la metaheurística son: la secuencia inicial, el número de iteraciones que guarda la matriz tabú los cambios realizados (memoria) y el número de ciclos o cambios a realizar. Para establecer el valor adecuado de estos parámetros, se ejecutaron cinco instancias con distintos trabajos y con diferentes valores de los parámetros, y se comparó la tardanza total ponderada con la función objetivo óptima obtenida del modelo matemático. En la *Tabla 5* se observan los mejores valores encontrados para los parámetros de la metaheurística, con los cuales la Búsqueda Tabú encuentra la secuencia que iguala, en términos de función objetivo al modelo matemático. En el *Anexo 2. Sección 1* se encuentra la comparación con todos los valores contemplados para los parámetros.

Tabla 5. Parámetros escogidos para ejecución de metaheurística

Instancia	Secuencia inicial	# iteraciones o cambios	Memoria	FO Metaheurística	FO Modelo Matemático	Δ FO
1	Orden de llegada	10000	30	19411,57	19411,57	0%
2	Orden de llegada	10000	30	34971,49	34971,49	0%
3	Orden de llegada	10000	30	22580,90	22580,90	0%
4	Orden de llegada	10000	30	14199,00	14199,00	0%
5	Orden de llegada	10000	30	14073,75	14073,75	0%

Los tiempos de ejecución del modelo matemático son muy grandes en comparación con los de la metaheurística (*Ver Anexo 2. Sección 1*). Debido a esto, y a que la metaheurística encuentra secuencias iniciales que minimizan la tardanza total ponderada, el mejor método encontrado para realizar la programación predictiva del Sistema de Soporte de Decisiones es la Búsqueda Tabú

4.3.3. Programación Reactiva

Ahora bien, la programación predictiva programada por la metaheurística se mantiene hasta el momento que llega una nueva orden de pedido inesperada. Cuando ocurre esta situación, el Sistema de Soporte de Decisiones hace una reprogramación con los trabajos que aún no se empiezan a procesar y con la nueva orden. Se consideraron tres métodos reactivos diferentes para realizar esta reprogramación: una regla de despacho propuesta por la literatura y dos reglas de interacción entre los trabajos creadas por los autores de este trabajo. A continuación se muestra el pseudocódigo de los tres métodos reactivos:

Pseudocódigo métodos de programación reactiva		
Regla de despacho ATC	Método de negociación 1	Método de negociación 2
<p>Paso 0. Actualizar el conjunto J con los trabajos que no se han programado.</p> <p>Paso 1. Calcular el índice de prioridad para los trabajos j que no se han programado con la siguiente ecuación:</p> $I_j = \frac{W_j}{P_j} \exp\left(-\frac{\max(d_j - p_j, 0)}{\bar{p}}\right)$ <p>Donde W_j es el peso, P_j es el tiempo de proceso, d_j es el due date y \bar{p} el promedio de los tiempos de proceso de los trabajos que no se han programado.</p> <p>Paso 2. Agregar a la secuencia de programación el trabajo con más alto índice de prioridad.</p> <p>Paso 3. Repetir el Paso 0 al Paso 2 hasta que todos los trabajos estén programados.</p>	<p>Paso 0. Dar un costo inicial igual para todos los trabajos j y establecer un porcentaje propio así:</p> $\%j = \min\left(\frac{d_j}{p_j}, \frac{p_j}{d_j}\right)$ <p>Donde d_j es el due date y p_j el tiempo de proceso.</p> <p>Paso 1. Comparar el trabajo j con el trabajo k, si el porcentaje del trabajo j es mayor que el de k, entonces el trabajo j gana el %j del costo de k. Si por el contrario, el porcentaje de k es mayor que el de j, es k quien gana el %k del costo de j.</p> <p>Paso 2. Comparar todos los trabajos entre ellos mismos y actualizar el costo como en el Paso 1.</p> <p>Paso 3. La programación final se obtiene ordenando los trabajos de mayor a menor costo final.</p>	<p>Paso 0. Tener una secuencia inicial de todos los trabajos en el orden de llegada y dar un número aleatorio entero entre 1 y 3 a cada trabajo.</p> <p>Paso 1. Comparar todos los trabajos entre ellos mismos y ordenarlos así con $j < k$:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Si el aleatorio del trabajo j es 1 y el aleatorio del trabajo k es 2, se cambian de posición. - Si el aleatorio del trabajo j es 3 y el aleatorio del trabajo k es 1, se cambian de posición. - Si el aleatorio del trabajo j es 2 y el aleatorio del trabajo k es 3, se cambian de posición. - Si no ocurre ninguna de las situaciones anteriores, no se realiza ningún cambio en la secuencia. <p>Paso 2. La programación final se obtiene al comparar todos los trabajos y realizar los cambios correspondientes.</p>

Figura 13. Pseudocódigo métodos reactivos de programación

La regla de despacho se escogió de entre algunas sugeridas por la literatura para la programación de producción: *Earliest Due Date*, *Shortest Process Time*, *Longest Process Time*, *First In First Out*, *Last In First Out*, *Weight Shortest Process Time*, *Modified Due Date* y *Apparent Tardiness Cost*. Para escoger la mejor regla de despacho se ejecutaron treinta instancias con diferentes trabajos; cada instancia contemplaba trabajos predictivos, los cuales se programaron con la metaheurística, y trabajos reactivos que hacían reprogramar la secuencia inicial con las diferentes reglas de despacho consideradas. Posteriormente, se realizó análisis estadístico comparando las funciones objetivo de cada instancia con cada regla de despacho y se determinó que la regla *Apparent Tardiness Cost* (ATC) genera mejor rendimiento que las demás.

Para seleccionar el método definitivo a usar por el Sistema de Soporte de Decisiones para reprogramar la producción de los trabajos, se realizó análisis estadístico comparando las funciones objetivo de las mismas treinta instancias mencionadas anteriormente, usando los tres métodos diferentes de programación reactiva. Se obtuvo como resultado que la regla de despacho *Apparent Tardiness Cost* (ATC) es la que debe realizar la programación reactiva, ya que genera mejores secuencias que los otros dos procedimientos, en términos de tardanza total ponderada. En el *Anexo 2. Sección 2* se encuentran las características de los trabajos de las treinta instancias ejecutadas para determinar el método de programación reactiva.

Se ejecutaron las treinta instancias con el método reactivo *Apparent Tardiness Cost* y se ejecutaron también utilizando solamente la metaheurística para la reprogramación al llegar trabajos imprevistos. Los resultados de la función objetivo y los tiempos de ejecución de la comparación entre ambos métodos se encuentran en el *Anexo 2. Sección 3*. Ahora bien, los resultados muestran que reprogramar la producción con los trabajos imprevistos por medio de la metaheurística genera secuencias con mejores funciones objetivo que las del Sistema de Soporte de Decisiones. Sin embargo, por las características de operación de Café Ruta 45, la empresa necesita una herramienta reactiva que actúe rápidamente frente a la llegada dinámica de la demanda y, el método de programación reactivo por medio de la regla de prioridad ATC es aquel que cumple con dicho requerimiento, debido a los bajos tiempos de ejecución. Por último, este trabajo de grado asegura encontrar una herramienta que programe la producción de Café Ruta 45 por medio de un modelo predictivo-reactivo. Por estas razones, finalmente el Sistema de Soporte de Decisiones se ejecuta con un método predictivo (Metaheurística Búsqueda Tabú) y un método reactivo (Regla de prioridad ATC).

4.3.3.1. Diseño de experimentos para métodos reactivos

Se elaboraron dos diseños de experimentos de bloques, con el fin de seleccionar la regla de despacho y el método de programación adecuado para el componente reactivo. El análisis estadístico de este trabajo de grado se llevó a cabo mediante la elaboración de diseños de bloques y comparación de medias. El diseño de bloques comprende un análisis de varianzas para los tratamientos, los bloques y error aleatorio. La hipótesis nula considerada corresponde a la igualdad de medias de los tratamientos, por lo tanto, las medias de todos los tratamientos serán iguales a la media global. La hipótesis alternativa corresponde a la diferencia de medias de al menos uno de los tratamientos. Si la hipótesis nula del análisis de varianzas es rechazada con una significancia de 5%, se realiza una comparación de medias por el método LSD (diferencia mínima significativa). Para este método se consideran las mismas hipótesis nombradas con anterioridad, aplicadas entre cada par de tratamientos. La evaluación de las hipótesis se realiza mediante la diferencia mínima significativa expresada por $t_{\alpha/2, N-k} \sqrt{2CME/n}$. Donde, N corresponde al número total de datos, k es el número de tratamientos a evaluar, CME es el cuadrado medio del error y n es el número de réplicas de los tratamientos. Si el estadístico de prueba igual a la diferencia absoluta entre cada par de tratamientos es mayor a la diferencia mínima significativa, se rechaza la hipótesis nula de igualdad de medias.

Para el primer diseño de experimento realizado, las reglas de despacho consideradas dentro de la comparación fueron FIFO, LIFO SPT, LPT, EDD, WSPT, ATC y MDD. El experimento considera la hipótesis nula de medias iguales de las tardanzas ponderadas totales y una hipótesis alternativa donde al menos una de las medias difiere de las otras. Los datos considerados fueron las funciones objetivo obtenidas de programar en treinta instancias los trabajos reactivos con cada una de las reglas de despacho. Con el análisis de varianzas del diseño de bloques, se rechaza la hipótesis de igualdad de medias por medio de dos criterios de rechazo. De la Anova se obtiene un valor-p de $4,3477 \times 10^{-11}$ el cual es menor que la significancia considerada igual a 0,05.

Por lo anterior, la hipótesis nula de que la tardanza total ponderada media poblacional de las reglas de prioridad son iguales es rechazada por el primer criterio. El segundo criterio de rechazo indica que con un estadístico de prueba de 8,4750 mayor al estadístico crítico 2,0549 al menos una de las medias de las reglas de despacho es diferente a la media global. Consecuentemente, se realiza una comparación de medias por medio del método LSD donde se identifica que, la regla de despacho que en general proporciona la menor tardanza ponderada total en las 30 instancias evaluadas es ATC con una diferencia mínima significativa resultante de 29156,6263 minutos. El *Anexo 2. Sección 4* muestra el desarrollo del sistema de experimentos realizado.

El segundo análisis estadístico, se desarrolló para la selección del método para resolver la reprogramación de los trabajos reactivos. Se realizó un diseño de bloques de 3 factores, 1 nivel y 30 réplicas correspondientes a las tardanzas ponderadas de 30 instancias. Los tres factores corresponden a dos métodos de negociación y la regla de despacho ATC seleccionada anteriormente (*Ver Figura 13*). Mediante el diseño de bloques se encuentra que no se rechaza mediante dos criterios la hipótesis alternativa donde se proponen medias diferentes entre los tres factores. **El primer criterio de rechazo, indica que con una significancia del 5% mayor al valor-p de 0,0138 dado por el análisis de varianza, se rechazan medias de tardanza ponderada total iguales entre los tratamientos.** Adicionalmente, el segundo criterio rechaza la hipótesis nula con un estadístico de prueba igual a 4,2838 mayor al estadístico crítico de 2,9958. Consecuentemente se realizó un análisis de diferencia de medias por LSD, donde se hizo la comparación entre los métodos de programación reactiva. La diferencia mínima significativa resultante fue de 22880,0124 minutos para la aplicación del método LSD. La comparación de medias muestra que ATC es el método que ofrece en general, una tardanza ponderada menor que la regla de negociación 1 y 2. Por lo tanto, se selecciona ATC para la programación de producción de los trabajos reactivos en el Sistema de Soporte de Decisiones. El *Anexo 2. Sección 5* muestra el desarrollo del sistema de experimentos realizado.

4.3.4. Programación Predictiva-Reactiva

Ahora bien, se realizó un análisis estadístico para comprobar que la programación predictiva-reactiva o híbrida es el mejor método para programar la producción de Café Ruta 45. Este diseño de experimentos busca evaluar la diferencia de medias entre las tardanzas totales ponderadas correspondientes a 1) Programar los trabajos predictivos de las treinta instancias con la metaheurística seleccionada y secuenciar los trabajos inesperados en el orden de llegada, es decir, sin ningún método y 2) Programación híbrida, donde los trabajos predictivos se programan con Búsqueda Tabú y la reprogramación con las órdenes reactivas se realiza con la regla ATC. El experimento consiste en un diseño de bloques de dos factores, un nivel y 30 réplicas correspondientes a las instancias. Los dos factores contemplados son los tipos de programación 1) y 2) y las réplicas de cada uno de los niveles son las funciones objetivo encontradas al ejecutar las instancias. El objetivo es encontrar qué tipo de programación favorece la minimización de la tardanza ponderada de los trabajos producidos semanalmente por Café Ruta 45.

La comparación de los dos tratamientos considera una hipótesis nula que indica la igualdad de medias entre los tipos de programación y una hipótesis alternativa que señala que al menos una de las medias es diferente la media global. El resultado del diseño de bloques indica que la hipótesis nula se rechaza. El rechazo de la hipótesis se determinó por medio de dos criterios de rechazo. El primer criterio rechaza la hipótesis nula con un estadístico de prueba igual a 5,8218 mayor al estadístico crítico de 4,1829. El segundo criterio, señala que con una significancia del 5% mayor a la probabilidad de 0,0224 dada por el análisis de varianza, se rechazan medias iguales entre los tratamientos. Consecuentemente se realizó un análisis de diferencia de medias por el método LSD, donde se hizo la comparación entre cada par de tratamientos. La diferencia mínima significativa resultante fue de 24860,6242 minutos para la aplicación del método LSD. Por lo tanto, se tiene como resultado que la programación que combina predictiva y reactiva, es el método que en general proporciona la menor media de tardanza ponderada total para la ejecución del Sistema de Soporte de decisiones. El *Anexo 2. Sección 6* muestra el desarrollo del diseño de experimentos realizado.

4.4. Fase 4: Descripción del modelo de simulación

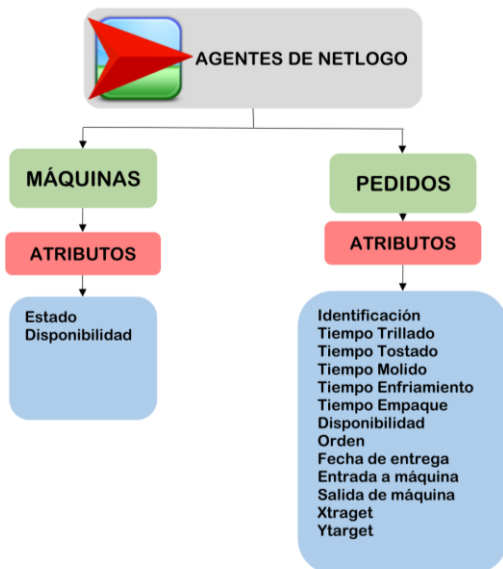


Figura 14. Agentes de Netlogo

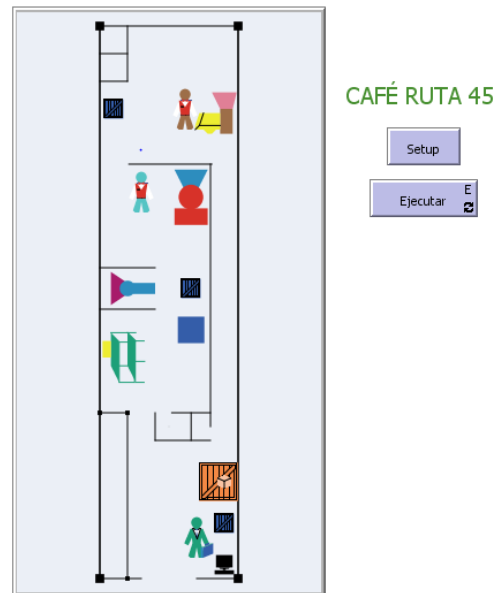


Figura 15. Interfaz de simulación

El funcionamiento del soporte de decisiones es evaluado a través de una simulación en Netlogo. La simulación tiene como fin representar gráficamente los resultados obtenidos con el Sistema de Soporte de Decisiones en la compañía, teniendo en cuenta que éste no toma en consideración los tiempos de transporte, ni permite visualizar las filas que se pueden hacer en las máquinas. Por esta razón, es necesario realizar una simulación basada en agentes, en la cual se pueda observar la interacción entre trabajos y máquinas y que además muestre el comportamiento de los resultados del SSD en un entorno real simulado.

Para esto, el primer paso es crear el plano arquitectónico a escala de la empresa, basado en el diagrama de recorrido, este plano contiene los siguientes agentes: máquinas y pedidos. El segundo paso es obtener la información de cuántos pedidos hay en el sistema y las especificaciones de cada uno, esta información es proporcionada por el sistema de soporte de decisiones a través de un archivo .CSV. El último paso es crear los botones para poner en marcha la simulación. En la Figura 14 se describen atributos de los agentes de Netlogo. El modelo de simulación recibe del Sistema de Soporte de Decisiones la secuencia de programación y los tiempos de proceso de cada trabajo en cada máquina. Con esta información, la simulación ejecuta en tiempo real el procesamiento de las órdenes de pedido y se observa su recorrido.

4.5. Fase 5: Comparación de resultados entre Sistema de Soporte de Decisiones y Simulación

4.5.1. Descripción de instancias

La comparación entre los resultados del Sistema de Soporte de Decisiones y la simulación se realizó mediante la ejecución de cinco instancias, cuyas características se muestran a continuación:

Tabla 6. Características de las instancias

Instancia	# Trabajos predictivos	# Trabajos reactivos
1	5	13
2	8	12
3	7	13
4	8	11
5	6	15

4.5.2. Comparación de resultados

El objetivo de simular los resultados obtenidos del Sistema es evaluar cómo sería el comportamiento del mismo en la ejecución real en la planta de producción. Se ejecutaron cinco instancias diferentes en el Sistema de Soporte de Decisiones y se validaron los resultados con la simulación. El *Anexo 3. Sección 1* contiene todos los resultados y los tiempos de ejecución tanto del SSD en Excel y de la simulación en NetLogo. A continuación, se muestra el tiempo de terminación máximo (Cmax) y tardanza total ponderada encontrada en la comparación:

Tabla 7. Comparación entre SSD y simulación

Instancia	Cmax SSD (min)	Cmax simulación (min)	Δ Cmax	FO SSD	FO simulación	Δ FO
1	4838,65	4910,26	1,48%	58808,00	62576,18	6,41%
2	7471,90	7486,96	0,20%	140016,60	141568,45	1,11%
3	4599,80	4725,15	2,73%	7375,82	7613,55	3,22%
4	7208,00	7209,00	0,01%	31859,50	29753,94	6,61%
5	6141,88	6316,2	2,84%	1876,56	1955,15	4,19%

Al validar los resultados del sistema de soporte de decisiones, se observa que los resultados no son los mismos, pues el SSD considera los tiempos exactos, donde al terminar un trabajo en una máquina, se inicia inmediatamente el siguiente. Sin embargo, en la realidad mostrada en la simulación, estos tiempos difieren debido a varias razones: los tiempos de transporte que, aunque se consideraron despreciables en el modelo, en la simulación tienen un leve impacto en los tiempos de inicio y terminación de cada trabajo en las máquinas. Además, el modelo de simulación aprovecha todos los tiempos en los que una máquina se encuentra desocupada; por esta razón, cuando el SSD decide no empezar a procesar un trabajo porque se acerca el final de la jornada laboral, la simulación sí lo aprovecha y continúa con el resto del proceso al día siguiente.

En términos generales, y con las cinco instancias simuladas a través de NetLogo, se observa que el Sistema de Soporte de Decisiones tendría un buen desempeño en la operación real de Café Ruta 45, ya que la terminación máxima de la simulación difiere en promedio 1,45% con respecto al Cmax obtenido con el SSD. Esto quiere decir, que los tiempos de inicio y terminación de todos los trabajos en todas las máquinas es similar tanto teóricamente en el Sistema de Soporte de Decisiones, como realmente en la planta de producción.

4.6. Fase 6: Validación de ejecución

Se validó el Sistema de Soporte de Decisiones con datos reales de operación de una semana en Café Ruta 45.

4.6.1 Caso de estudio Café Ruta 45

Para validar el funcionamiento del Sistema de Soporte de Decisiones, se ejecutó el modelo predictivo-reactivo con datos reales de una semana de operación del mes de noviembre en la empresa. Los trabajos predictivos se muestran en la *Tabla 8* sombreados con color azul y los trabajos inesperados con color verde. Una vez se

ingresa la información de los trabajos, el Sistema de Soporte de Decisiones calcula los tiempos de proceso en cada máquina.

Tabla 8. Órdenes de pedido Café Ruta 45 Semana del 25 al 30 de noviembre

ID Job	Fecha de entrada	Due date	kg	Prioridad
1	25/11/2019 8:00	25/11/2019 16:10	25	2
2	25/11/2019 8:00	26/11/2019 14:05	24	3
3	25/11/2019 8:00	27/11/2019 10:11	44	3
4	25/11/2019 8:00	27/11/2019 13:11	47	1
5	25/11/2019 8:00	26/11/2019 8:44	25	2
6	25/11/2019 8:03	27/11/2019 12:11	42	3
7	25/11/2019 8:05	27/11/2019 8:30	84	2
8	25/11/2019 8:12	27/11/2019 8:00	214	3
9	26/11/2019 8:53	28/11/2019 16:45	167	1
10	26/11/2019 8:59	27/11/2019 16:30	147	3
11	26/11/2019 9:02	27/11/2019 14:52	34	3
12	27/11/2019 14:14	29/11/2019 11:40	162	2
13	27/11/2019 14:14	29/11/2019 15:30	90	2
14	27/11/2019 14:16	28/11/2019 8:30	135	1
15	28/11/2019 10:10	30/11/2019 12:00	115	2
16	28/11/2019 10:10	30/11/2019 9:00	70	3
17	28/11/2019 10:21	30/11/2019 11:20	195	3
18	28/11/2019 10:25	30/11/2019 12:00	38	3
19	29/11/2019 13:37	30/11/2019 10:10	75	2
20	29/11/2019 13:42	29/11/2019 17:30	29	3

- Programación inicial

Tabla 9. Programación predictiva del caso de estudio

Secuencia	Cmax	Tardanza (min)
1	25/11/2019 12:52	0
5	25/11/2019 15:09	0
3	26/11/2019 10:00	0
4	26/11/2019 10:11	0
2	26/11/2019 10:48	0

- Programación reactiva

Cada que llegan los trabajos reactivos, el SSD reprograma la secuencia de producción, a continuación se muestran los resultados de la programación cuando llega el último trabajo reactivo.

Tabla 10. Programación final del caso de estudio

Secuencia	Terminación	Tardanza (min)	Secuencia	Terminación	Tardanza (min)
1	25/11/2019 12:52	0,0	10	27/11/2019 13:25	0,0
5	25/11/2019 15:09	0,0	12	28/11/2019 16:48	0,0
2	25/11/2019 15:46	0,0	14	29/11/2019 9:24	1494,2
4	25/11/2019 15:57	0,0	13	29/11/2019 9:34	0,0
7	26/11/2019 9:59	0,0	15	29/11/2019 13:16	0,0
8	26/11/2019 11:12	0,0	16	29/11/2019 14:04	0,0
3	26/11/2019 13:12	0,0	17	29/11/2019 16:30	0,0
6	26/11/2019 15:18	0,0	18	30/11/2019 8:59	0,0
9	27/11/2019 9:58	0,0	19	30/11/2019 10:45	35,3
11	27/11/2019 11:32	0,0	20	30/11/2019 12:08	1338,3

La Figura 16 muestra el Diagrama de Gantt obtenido del SSD para la programación del primer día de trabajo:

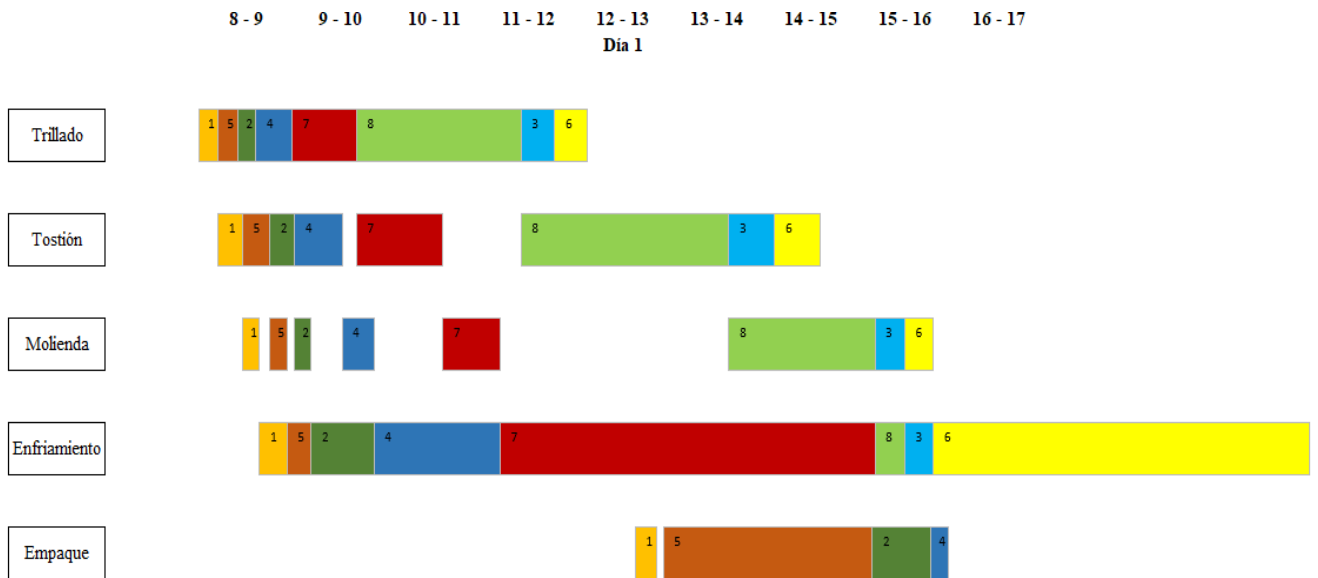


Figura 16. Diagrama de Gantt del primer día

4.7. Fase 7: Capacitación sobre uso del Sistema de Soporte de Decisiones

El uso correcto del Sistema de Soporte de Decisiones se garantiza capacitando a los colaboradores de Café Ruta 45. El objetivo es que la herramienta pueda ser utilizada adecuadamente y brinde la programación para que se puedan tomar decisiones relacionadas con la producción de las órdenes de pedido. Por esta razón se elaboró un instructivo que explica detalladamente el buen uso del sistema. El documento cuenta con tres módulos: generalidades del Sistema de Soporte de decisiones, ingreso y gestión de la información, programación de la producción y visualización del diagrama de Gantt.

La capacitación brindada a los colaboradores de Café Ruta 45 se hizo de manera virtual por medio de una video llamada. Esta actividad incluyó: introducción sobre el trabajo de grado, envió de instructivo de uso y del Sistema de Soporte de Decisiones y finalmente la validación del Sistema con datos reales de la demanda en una semana. A continuación, se explica con mayor detalle los módulos que componen el instructivo proporcionado a Café Ruta 45.

Módulo 1: Generalidades del Sistema de Soporte de decisiones

En el primer módulo se expone el objetivo del Sistema de Soporte de Decisiones, se establecen los requisitos necesarios para ejecutarlo y la descripción de la interfaz. Dentro del objetivo del Sistema se considera el cumplimiento de las políticas de producción de Café Ruta 45, el cumplimiento de las jornadas laborales legales, cumplimiento de la demanda y la atención al cliente. Los requisitos señalados dentro de este módulo deben ser cumplidos para que los colaboradores de la empresa puedan hacer uso del Sistema de Soporte de Decisiones. Además, el usuario podrá entender cómo iniciar el Sistema, conocer la interfaz y reconocer sus componentes. Esta última instrucción es una de las más relevantes, ya que el reconocimiento adecuado de la interfaz garantiza que el ingreso de los datos de cada una de las órdenes de pedido se lleve a cabo acertadamente sin afectar la programación y consecuentemente la toma de decisiones.

Módulo 2: Ingreso y gestión de la información

El módulo dos trata sobre el ingreso y la gestión de la información de las órdenes de pedido. El segundo componente del instructivo de uso, explica la función de los botones y digitalización de los datos en cada casilla de la interfaz de ingreso de pedidos. Previamente, en el módulo 1 se reconoce la interfaz. En este punto se indica la manera correcta de ingresar los datos, teniendo en cuenta el ID del pedido, la fecha y hora de entrada de la orden de pedido, due date, prioridad, tipo de tostión, molienda y empaque.

Módulo 3: Visualización de datos de programación

El módulo tres explica cómo ejecutar el Sistema para visualizar la programación de la producción proporcionada. Adicionalmente, el módulo indica el modo de entender el cronograma generado por el Sistema de Soporte de Decisiones. El cronograma es mostrado por la herramienta, por medio de un diagrama de Gantt y una matriz de seguimiento la cual muestra la programación de producción de cada uno de los trabajos, la hora de inicio y finalización en cada una de las estaciones de trabajo.

El *Anexo 5. Sección 1* muestra el instructivo de uso enviado a los colaboradores de Café Ruta 45.

5. Conclusiones y recomendaciones

El diagnóstico del área de producción de Café Ruta 45 comienza con establecer las regresiones lineales de los tiempos de proceso. Luego, se reconocen las oportunidades de mejora permitiendo identificar la conclusión más importante de esta fase: la mayor problemática de la empresa es la falta de programación de la producción, ya que la empresa cuenta con una demanda dinámica y requiere una herramienta para reaccionar rápidamente frente a este comportamiento. Por esta razón, el trabajo de grado presenta una herramienta para la programación de producción de Café Ruta 45 y para la toma de decisiones asociadas al área de producción. El Sistema de Soporte de decisiones busca proporcionar un cronograma de la producción de la empresa. El objetivo es obtener una secuencia de programación de la órdenes de pedido que minimice la tardanza total ponderada. Para esto, el sistema hace una programación predictiva-reactiva.

Las políticas de la empresa asociadas al proceso productivo y las jornadas laborales legales, funcionan como las restricciones establecidas para la elaboración del Sistema de Soporte de Decisiones. La metaheurística Búsqueda Tabú que programa los trabajos predictivos, encuentra la secuencia óptima de producción al compararla con los resultados del modelo matemático, con los parámetros de entrada adecuados determinados ejecutando cinco instancias de operación. Por otra parte, se consideraron tres métodos para la programación reactiva de producción, entre ellos la regla de despacho ATC, una regla de negociación y una regla de interacción aleatoria. Para el caso de Café Ruta 45, es mejor utilizar un método de programación reactiva determinístico, dado que un método reactivo estocástico puede generar un conjunto de secuencias peores, en términos de función objetivo. Esto quedó evidenciado en el diseño de bloques realizado, pues tanto la regla de despacho ATC como la regla de negociación tuvieron mejor desempeño que la regla aleatoria.

Para la elección del método reactivo se elaboraron dos diseños de experimentos. En el primero, se compararon las medias de tardanza ponderada de 8 reglas de despacho teniendo en cuenta 30 instancias de demanda. Mediante un análisis de varianza y la aplicación del método LSD, se logra concluir que entre las reglas de

despacho evaluadas ATC era la que en general, proporcionaba la menor tardanza ponderada total. En el segundo diseño de experimentos, se comparan las medias de tardanza ponderada total de dos reglas de negociación y ATC. El resultado de la aplicación de un diseño de bloques y el método de diferencia mínima significativa, fue que la regla de despacho ATC tenía la menor media de tardanza ponderada total. Usando el mismo análisis estadístico aplicado a la comparación de medias entre la programación Predictiva y la Predictiva-Reactiva, se establece que el segundo método es el indicado para la programación de producción proporcionada por el SSD. Esto es porque, la tardanza ponderada total de la programación Predictiva-Reactiva es en promedio 31,32% menor que la programación Predictiva.

La simulación muestra visualmente la programación obtenida al ejecutar el Sistema de Soporte de Decisiones. Al efectuar cuatro instancias, se encontró que al llevar a una realidad simulada el proceso de producción de Café Ruta 45, los tiempos de inicio y terminación de los trabajos en las máquinas no son exactamente iguales al obtenido en el modelo. El Cmax entre simulación y SSD varía en promedio un 1,45% y la tardanza total ponderada un 4,31%. Esta leve diferencia se debe principalmente a que la simulación sí tiene en cuenta los cortos tiempos de transporte entre estaciones de trabajo y, además, aprovecha los tiempos en los que una máquina está desocupada. Aun así, dado que esta variación es menor al 5%, se puede concluir que el Sistema de Soporte de Decisiones tiene un buen desempeño frente a la operación real.

Finalmente, el caso de estudio evalúa los trabajos que llegaron a Café Ruta 45 en una semana determinada, los resultados de la ejecución real en la producción de la empresa se compararon con los resultados obtenidos a través del SSD, para contrastar y evidenciar el comportamiento si se hubiese usado esta herramienta. Los indicadores que se tuvieron en cuenta fueron la tardanza promedio, el Cmax y el lead time. Los resultados de esta comparación arrojaron que la tardanza promedio aumenta un 523,5% en el SSD con respecto a la ejecución real, el Cmax aumenta 1,4% y el Lead time aumenta 0,31%. Sin embargo, en esta semana la empresa trabajó 10 horas extras para entregar los pedidos a tiempo, lo que representa un 21% de tiempo adicional para los colaboradores. Esta es la razón principal por la que los indicadores de la ejecución real son mejores que los del Sistema de Soporte de decisiones. Ahora bien, al implementar este sistema las horas extras se eliminan y los trabajos tardíos pasan de 2 a 3. Por esta razón, se considera que implementar el SSD en Café Ruta 45 mejora las condiciones laborales de los colaboradores manteniendo un número de trabajos tardíos similar al actual, y cumpliendo a tiempo con aproximadamente un 90% de los trabajos semanales.

6. Glosario

- **Due date:** Fecha de entrega de un trabajo
- **Grupo focal:** Técnica de recolección de datos mediante una entrevista grupal semi-estructurada, la cual gira alrededor de una temática propuesta por el investigador (Bonilla & Escobar, 2017).
- **Instancia:** Muestra de datos que representa la operación real de Café Ruta 45.
- **Modelo Canvas:** Herramienta para generar modelos de negocio, que permite trabajar sobre la base de cómo una organización crea y captura valor (Vásquez et al., 2016).
- **Regla de despacho:** Método para secuenciar trabajos. Por ejemplo, la regla *Shortest Process Time* secuencia los trabajos, ordenándolos de menor a mayor tiempo de proceso.
- **Regla de interacción o negociación:** Método para secuenciar trabajos, con base en la interacción de los mismos.
- **Tardanza:** Tiempo que transcurre desde el due date de un trabajo hasta que se entrega al cliente. Se el trabajo se entrega antes, la tardanza es cero.
- **Tardanza total ponderada:** Suma de la tardanza de cada trabajo multiplicada por el peso.
- **Tiempo de terminación máximo (Cmax):** Tiempo en el que el último trabajo de una secuencia es terminado.
- **Trabajo:** Orden de pedido llevada por un cliente a Café Ruta 45, para que allí sea procesada

7. Anexos

Anexo 1.

- Sección 1. Diagrama de Bloques
- Sección 2. Diagrama de Operaciones
- Sección 3. Diagrama de Recorrido
- Sección 4. Ficha técnica Grupo focal

Sección 5. Resultados Pareto Grupo Focal

Sección 6. Datos de tiempo de proceso

Anexo 2.

[Sección 1. Resultados y tiempos de ejecución de comparación entre metaheurística y modelo matemático](#)

Sección 2. Características de treinta instancias ejecutadas para método reactivo

[Sección 3. Resultados y tiempos de ejecución de comparación entre ATC y reprogramación con metaheurística](#)

Sección 4. Diseño de experimentos para regla de despacho

Sección 5. Diseño de experimentos para método reactivo

Sección 6. Diseño de experimentos para tipo de programación

Anexo 3.

[Sección 1. Resultados y tiempos de ejecución de comparación entre SSD y simulación](#)

Anexo 4.

Sección 1. Diagrama de Gantt de la programación del caso de estudio

Anexo 5.

Sección 1. Instructivo de uso del Sistema de Soporte de Decisiones

8. Referencias

Barenji, A., Barenji, R., Roudi, D. & Hashemipour, M. (2017). A dynamic multi-agent-based scheduling approach for SMEs. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 89(9-12), 3123-3137.

Bonilla-Jimenez, F. I., & Escobar, J. (2017). Grupos focales: una guía conceptual y metodológica.

Burbano, D., López, J. & Rojas, O. (2015). Definición de un método para la programación de la producción desde el paradigma de los sistemas holónicos de manufactura. *Ingeniería y Competitividad*, 17(2), 29-40.

Castrillón, O., Giraldo, J., & Sarache, W. (2013). Generador de modelos de simulación: aplicaciones en scheduling. *Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones*, 20(2), 231-241.

Fernández, M., Rincón, E., Ponsich, A., Mora, R. (2018). A heuristic algorithm based on Tabu Search for the solution of Flexible Job Shop Scheduling Problems with Lot Streaming.

Fonseca, Y., Martínez, Y., Cabrera, A. & Rodríguez, E. (2019). Optimization of heavily constrained hybrid-flexible flowshop problems using a multi-agent reinforcement learning approach. *Investigación Operacional*, 40(1), 100-112.

Joglekar, G. (2017). Using Simulation for Scheduling and Rescheduling of Batch Processes. *Processes*, 5(4), 66.

Kadri, R. & Boctor, F. (2018). An efficient genetic algorithm to solve the resource-constrained project-scheduling problem with transfer times: The single mode case. *European Journal of Operational Research*, 265(2), 454-462.

Kanawaty, G. (2011). *Introducción al estudio del trabajo*. OIT.

Lee, K., Zheng, F., & Pinedo, M. (2019). Online scheduling of ordered flow shops. *European Journal of Operational Research*, 272(1), 50-60.

Li, G., Li, N., Sambandam, N., Sethi, S., & Zhang, F. (2018). Flow shop scheduling with jobs arriving at different times. *International Journal of Production Economics*, 206, 250-260.

Liétor, L. M. (2018). La jornada de trabajo y su incidencia en la conciliación de la vida personal, familiar y laboral de los trabajadores= The workday and its impact on the reconciliation of the private, family and professional life of the workers. *FEMERIS: Revista Multidisciplinar de Estudios de Género*, 3(2), 37-54.

- López, J., Giraldo, J., & Arango, J. (2015). Reducción del Tiempo de Terminación en la Programación de la Producción de una Línea de Flujo Híbrida Flexible (HFS). *Información tecnológica*, 26(3), 157-172.
- Marmolejo, S., López, O., Ramos, L. & Ortiz, M. (2018). Ontología unificada para un sistema holónico de manufactura. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 15(2), 217-230.
- Montoya, A. (2019). Huila, eje del nuevo mapa cafetero colombiano | Federación Nacional de cafeteros. Obtenido de: <https://bit.ly/2OOFLEr>
- Nguyen, S., Mei, Y., & Zhang, M. (2017). Genetic programming for production scheduling: a survey with a unified framework. *Complex & Intelligent Systems*, 3(1), 41-66.
- Niazi, Muaz & Hussain, Amir. (2011). Agent-based computing from multi-agent systems to agent-based Models: a visual survey. *Scientometrics*. 89. 479-499. 10.1007/s11192-011-0468-9.
- Organización Internacional del Trabajo. *C030 - Convenio sobre las horas de trabajo (comercio y oficinas)*. Ginebra, 28 de Junio 1930.
- Peng, K., Pan, Q., Gao, L., Li, X., Das, S. & Zhang, B. (2019). A multi-start variable neighbourhood descent algorithm for hybrid flowshop rescheduling. *Swarm and Evolutionary Computation*.
- Pérez, R., Jöns, S., & Hernández, A. (2015). Solución de un problema de secuenciamiento en configuración jobshop flexible utilizando un Algoritmo de Estimación de Distribuciones. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 12(1), 49-57.
- Pitalito, A. (2017). Nuestro municipio. Obtenido de: <http://www.pitalitohuila.gov.co/municipio/nuestro-municipio>
- Ramos, Servio. *Informe de contabilidad Café Ruta 45*. Software World Office, 2019.
- Saint Gobain. *Documentos internos de Saint Gobain*. 2019
- Sánchez, Lucía. Huila protagonista en Taza de la Excelencia Colombia 2017. *Diario del Huila*. 2017.
- Schaller, J., & Valente, J. (2019). Heuristics for scheduling jobs in a permutation flow shop to minimize total earliness and tardiness with unforced idle time allowed. *Expert Systems with Applications*, 119, 376-386.
- Trentesaux, D. (2009). Distributed control of production systems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 22(7), 971-978.
- Uhlmann, I., Santos, P., de Souza, C., & Frazzon, E. (2018). Production Rescheduling for Contract Manufacturing Industry based on Delivery Risks. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 1059-1064.
- ValiSiar, M., Gholami, S. & Ramezani, R. (2017). Multi-period and multi-resource operating room scheduling and rescheduling using a rolling horizon approach: A case study. *Journal of Industrial and Systems Engineering*, 10, 97-115.
- Vázquez, J. M. S., Elorza, M. L. V., & Pinzón, P. A. (2016). Balanced scorecard para emprendedores: desde el modelo canvas al cuadro de mando integral. *Revista de la Facultad de Ciencias Económicas: Investigación y reflexión*, 24(1), 37-47.
- Vieira, G. E., Herrmann, J. W., & Lin, E. (2003). Rescheduling manufacturing systems: a framework of strategies, policies, and methods. *Journal of scheduling*, 6(1), 39-62.
- Xu, J., Liu, S., Zhao, C., Wu, J., Lin, W., Yu, P., (2019). An iterated local search and tabu search for two - parallel machine scheduling problem to minimize the maximum total completion time.
- Yu, C., Semeraro, Q., & Matta, A. (2018). A genetic algorithm for the hybrid flow shop scheduling with unrelated machines and machine eligibility. *Computers & Operations Research*, 100, 211-229.