

Diseño de un Modelo Matemático para la Secuenciación de Producción de una Línea de Secado de Pasta Alimenticia

Margareth Camacho, Mgter.¹, Kathia P. Perea, Mgter.², Kleber F. Barcia, Ph.D.³, Víctor Vega Chica, Mgter.⁴

¹Universidad de Guayaquil, UG, Ecuador, margareth.camachoa@ug.edu.ec

²Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Ecuador, kperea@espol.edu.ec

³Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Ecuador, kbarcia@espol.edu.ec

⁴Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Ecuador, vvega@espol.edu.ec

Abstract – Every day and with more frequency, the term industry 4.0 is heard, referring to the world is experiencing the fourth industrial revolution. Focusing on the concept of industry 4.0 speaks of a new way of understanding production systems and interconnecting them seeking automation, a priori, one might think that this change of automated machines to replace mechanical or manual tasks began more than 30 years ago. The meaning of this new revolution goes beyond automation; it is a digital integration or transformation. Industry 4.0 implements intelligent assistants who make optimal plan decisions while complying with restrictions and capacities. Real-time and virtual control tools provide information in seconds and improve the efficiency, responsiveness, and self-management of processes by integrating them collaboratively in favor of the human. Under this reality, the purpose of this article is addressed, developed in a crucial Ecuadorian company in the food sector, where a great opportunity has been identified to improve the current way in which the weekly production schedule of the pasta drying line is carried out. Automation and optimal planning are proposed as alternative solutions through the design and application of a mixed-integer linear programming mathematical model. Currently, the company carries out the planning of its weekly production manually, which causes inefficiency in the timely satisfaction of demand and cost overruns due to reprocessing and overstock of unrequested SKUs. Through the development of this tool, it is sought to optimize the correct use of the company's resources, minimizing the operating costs of production, considering the production capacity, the optimal sequence of tasks, and their restrictions to carry out the modeling.

Keywords - Optimization, mathematical modeling, production planning, sequencing, job shop scheduling problem.

Resumen – Cada día y con más frecuencia se escucha sobre el término industria 4.0 que hace referencia a que el mundo está viviendo la cuarta revolución industrial. Al enfocar el concepto de industria 4.0 se habla de una forma nueva de entender los sistemas de producción e interconectarlos buscando la automatización, a priori, se podría pensar que este cambio de máquinas automatizadas para sustituir las labores mecánicas o manuales empezó hace más de 30 años, pero el sentido de esta nueva revolución va más allá de la automatización, es una integración o un transformación digital, la

implantación de asistentes inteligentes que toman decisiones óptimas para planificar cumpliendo restricciones y capacidades, herramientas de control en tiempo real y virtual que proporcionan información en segundos y permiten mejorar la eficiencia, capacidad de respuesta y autogestión de los procesos integrándolos colaborativamente a favor del humano. Bajo esta realidad es que se aborda el propósito del presente artículo, desarrollado en una importante empresa ecuatoriana del sector alimenticio, donde se ha identificado una gran oportunidad en la mejora de la forma actual en que se realiza la programación semanal de producción de su línea de secado de pastas y se propone como alternativa de solución la automatización y óptima planificación mediante el diseño y aplicación de un modelo matemático de programación lineal entera mixta. Actualmente la empresa realiza la planificación de su producción semanal de manera manual, lo que origina inefficiencia en la satisfacción oportuna de la demanda, así como sobrecostos por reprocesos y sobre stock de SKUs no solicitados. Mediante el desarrollo de esta herramienta se busca optimizar el uso correcto de los recursos de la empresa, minimizando los costos operativos de la producción, considerando la capacidad de producción, la secuencia óptima de tareas y sus restricciones para realizar la modelización.

Palabras claves - Optimización, modelización matemática, planificación de la producción, secuenciación, problema de programación de tareas.

I. INTRODUCCIÓN

La industria ecuatoriana enfrenta día a día numerosos desafíos. El mercado ecuatoriano es un ambiente altamente competitivo y es primordial para sobrevivir y que las empresas adopten diferentes prácticas para mejorar sus procesos productivos [1], [2].

Los gobiernos de turno no han sido el mejor aliado del sector empresarial ecuatoriano, los recortes que tiene año a año el presupuesto sumado a fuentes de ingreso que por lo general son de carácter impositivo, la política de restricción a las importaciones, las constantes confrontaciones con el sector empresarial, esta y muchas otras razones complican las actividades de negocios de las empresas ecuatorianas.

Una de esas complicaciones se refiere a los costos de producción. Según los empresarios, los costos de producción

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.245>

ISBN: 978-628-95207-0-5 ISSN: 2414-6390

del mercado ecuatoriano son altos, debido a muchos factores, entre los que se puede citar:

- El encarecimiento del dólar.
- Los bajos precios del barril de petróleo.
- El encarecimiento de los costos energéticos.
- El encarecimiento de la mano de obra debido a reformas laborales.
- El encarecimiento de la materia prima y los bienes de capital por el aumento de las tasas arancelarias.
- El incremento en los costos logísticos.

Todos estos factores contribuyen a la contracción económica del país, se encarecen los costos de producción y por tanto incrementan el costo de los bienes producidos, lo cual se refleja tanto en el mercado local como en el internacional, lo que impide la generación de competitividad de las empresas ecuatorianas en el mediano y largo plazo [3].

Es por tanto muy importante que las empresas optimicen el uso de los recursos que con mucho esfuerzo se han adquirido a través de los años, de allí que la planificación de la producción es un procedimiento necesario que produce muchos beneficios a las empresas.

A. *Objetivo General*

Diseñar un modelo matemático para la planificación de la producción de bienes perecederos que indique las cantidades óptimas a producir y envasar semanalmente.

B. *Descripción del Proceso de Producción de la Empresa Envasadora*

La empresa de donde se toman los datos para este artículo tiene cerca de 50 años dedicada a la elaboración de alimentos y bebidas de consumo masivo, integra 6 plantas de producción con más de 10 categorías de productos que han forjado una alta reputación y valor de marca que los hace estar año a año dentro del Top of Mind de los hogares ecuatorianos, (Ranking de las marcas nacionales más recordadas en la mente del consumidor). Adicionalmente, en la categoría de fabricación y comercialización de pastas alimenticias, la empresa es una de las principales competidoras dentro del segmento y posee más del 10% de participación de mercado.

Las Pastas Alimenticias (fideos) son productos obtenidos mediante un proceso continuo de secado, en el cual se debe cuidar características tecnológicas de temperatura y humedad, fundamentales y específicas para cada uno de los diferentes formatos (figuras y tamaños).

El proceso inicia en la mezcla de materias primas (sémola de trigo durum, vitaminas y agua) que son amasadas hasta lograr la hidratación y formación de una masa homogénea que será extruida para pasar por medio de moldes que le darán la forma característica a cada una de las variedades de fideos, esta etapa es gobernada por la aplicación general de la tecnología de vacío que evita el estrés térmico y produce una pasta con un mejor rendimiento en la cocción. La etapa siguiente es el secado, que es la etapa más delicada e importante del proceso productivo, pues se requiere mantener de forma controlada las

variables de los diagramas de secado, es decir, constantes las condiciones termo-higrométricas del secadero para lograr transferir la humedad en exceso de una zona a la otra, lo que mantiene un proceso uniforme y permite evaporar el agua de la pasta alimenticia hasta obtener un producto seco.

Los procesos de producción de las diferentes líneas de pastas con las que cuenta la empresa son muy similares, pues siguen una secuencia de operaciones ligadas estrictamente para dar como resultado un producto terminado dentro de especificaciones y listo para su entrega al mercado. La diferencia entre las líneas está más relacionada con su capacidad de secado, los tipos de formas y figuras (formatos) que se fabrican, los tipos de envasado necesarios y el requerimiento de mano de obra asociado. Esto se resume en las Figs. 1, 2 y 3 donde se diagraman los tres procesos de las líneas de producción.

El proceso de planificación de la producción inicia con la entrega del presupuesto mensual de ventas del área comercial al planificador de producción, quien, en base a las prioridades, los inventarios existentes, stocks de seguridad, cantidades requeridas a producir, lotes mínimos y capacidad de producción, divide el presupuesto en programas de producción semanal, indicando la cantidad específica de unidades por cada SKU que se deben producir durante cada una de las semanas del mes.

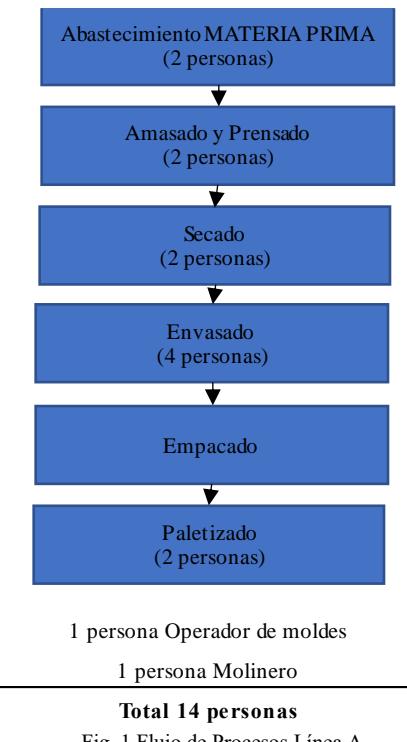
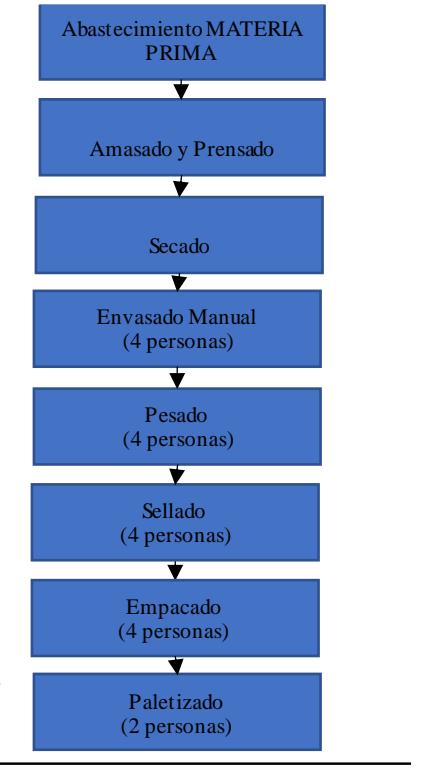
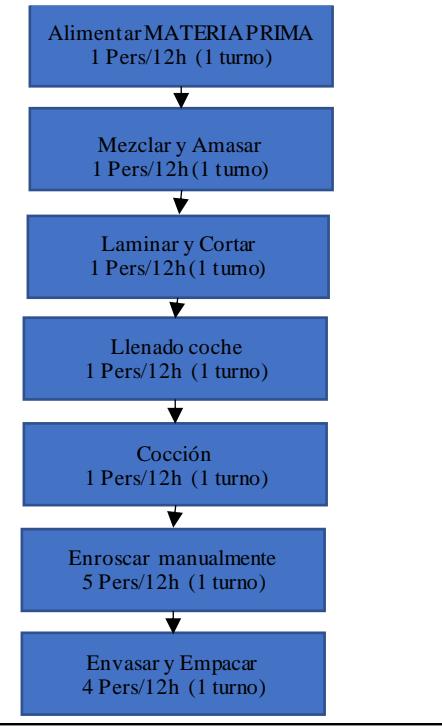


Fig. 1 Flujo de Procesos Línea A



Total 18 personas

Fig. 2 Flujo de Procesos Línea B



Total 14 personas

Fig. 3 Flujo de Procesos Línea C

Junto con el presupuesto mensual de ventas, se recibe un pronóstico de los próximos 3 meses con lo que el planificador de la producción realizará el cálculo o planificación de los materiales (MRP) que es la demanda bruta de cada uno de los componentes de los SKU de producto terminado. Este cálculo es enviado mediante un sistema ERP (solicitudes de pedido) al área de Compras para garantizar el abastecimiento oportuno de todas las materias primas, materiales de empaque e insumos necesarios. Considerando ciertos niveles de variación pues el programa podría cambiar de acuerdo con el avance de la demanda durante el mes, lo que obliga al planificador a tener flexibilidad y poder de reacción.

Con el horizonte semanal planificado y la visibilidad de las prioridades requeridas por el área comercial, el planificador se reúne semanalmente con el jefe/supervisor de producción para la revisión y aprobación de los planes.

La programación de producción inicia cuando el gerente de producción junto con el jefe/supervisor de producción, en función del plan semanal revisado con el planificador, establecen el programa de producción por día y turno para la semana solicitada. Esta programación se realiza de forma manual y se genera una plantilla en Excel que será comunicada a la línea de producción con las horas necesarias para cada línea de producción, ver Tabla I.

TABLA I
PROGRAMA DE PRODUCCIÓN SEMANAL LÍNEA DE PASTAS

PASTA LARGA		
Formato	Horas de prod.	OBSERVACIONES
F08 - CABELLO	5	
F39 - LASAÑA	36	
Espacio	10 horas	
F6 - SPAGUETTHI	56,5	
	97,5	

PASTA CORTA		
Formato	Horas de prod.	OBSERVACIONES
F108 - MACARRÓN	17,5	
F134 - TORNILLO	27	
F153 - CONCHITA	11	
F188 - CODITO	11,5	
F26 - LASITO	21	
F348 - LAZO	15,5	
	103,5	

El programa de producción contempla los tiempos de preparación de línea, las etapas de limpieza, calibración, mantenimiento, secado, envasado, empacado y cuarentena para liberación del producto final.

El programa de secado indica el orden de arranque de cada una de las líneas de secado, la cantidad de horas por cada marca y tipo de formato que se deben fabricar, la formulación que debe utilizar y la asignación de mano de obra requerida.

El programa de envasado indica la cantidad de pacas (pc) por cada SKU que se deben envasar en cada una de las

presentaciones y la cantidad de mano de obra que será asignada dependiendo de la programación.

El jefe/supervisor de producción es quien alinea a los equipos operativos y facilitadores de materiales para la solicitud a bodega de todos los insumos.

Con la programación respectiva, los digitadores de producción son los responsables de introducir en el sistema SAP (ERP) las órdenes de producción para cada SKU, lo que genera una reserva de materiales a la bodega general.

Para llevar un control de la producción, los supervisores y facilitadores de dicha área recopilan la información de los “Registros de Producción y Empaque” que llenan los operarios de secado y envasado en cada turno y que detallan del producto que se ha envasado, el lote de fabricación y su cantidad, las mermas del proceso, los consumos de materiales, las paradas programadas y no programadas, el personal asignado a la operación por turno, entre otros datos. Esta información diaria es tomada por los digitadores del área, que son los encargados de ingresar en las órdenes de producción todos los consumos asociados, los datos de trazabilidad y las cantidades finales producidas.

II. METODOLOGÍA

Se formula un modelo de programación lineal entera mixta para el problema de programación de trabajos por cada formato de producción (Job Shop Scheduling Problem) que se va aplicar para el presente artículo.

El modelo matemático es un problema MIP que ha sido resuelto mediante la aplicación de la heurística JSSP con el Software Wolfram Mathematica. Busca optimizar la planificación semanal de producción partiendo de una demanda ya establecida por el área de planeación de la demanda, cuyo horizonte es una semana [4].

A. Consideraciones Generales del Modelo

La empresa cuenta con 6 plantas para la elaboración de sus diferentes categorías de alimentos y bebidas, la planta en estudio es la de elaboración de pastas alimenticias (fideos), que es el segundo producto en importancia para la compañía en volumen de ventas y rentabilidad [5].

En esta planta se cuenta con 7 líneas de secado (máquinas) para la producción de más de 30 formatos diferentes y más de 200 SKUs de producto terminado, en la Tabla II se resume la capacidad instalada de la planta objeto de estudio.

El tiempo de operación es al menos 22 días al mes con un promedio de ocupación de 68% y en el último año ha mantenido un incremento de más del 10%.

Dentro de las líneas de secado, se cuenta con una gran variedad de tipos y formatos de fideo, es importante resaltar que esto involucra diferentes estándares de producción (kg/hr) por cada formato, pues de acuerdo a sus características, forma y tamaño, ellos tendrán condiciones de procesamiento distintas, lo que se relaciona con velocidades de secado mayores o menores dependiendo del tipo para lograr una extracción homogénea del agua y su estabilidad total como producto seco;

en otras palabras, sobre una capacidad nominal de la línea de secado. Cada formato tendrá una eficiencia específica, lo que afectará en los costos de producción y en la capacidad para producir ciertos SKUs de producto terminado.

TABLA II
CAPACIDAD INSTALADA DE LA PLANTA

Líneas de Producción	Nro. de Máquinas	Capacidad Instalada Ton/mes	Demanda Ton/mes	Utilización %
Pasta Italiana Formatos Largos	2	1000	600	60%
Pasta Italiana Formatos Cortos	1	550	400	75%
Pasta Italiana Formatos Roscados	1	300	150	70%
Pasta China Precocida	1	300	200	75%
Pasta China Instantánea	1	600	300	60%

Para este estudio se toman los datos de la línea de pastas que genera el 60% de los SKUs, es decir, es la que produce la mayor cantidad de ítems, por lo que para programar su producción es necesario tomar en cuenta los distintos estándares de capacidad y eficiencia por cada formato, la demanda que se tiene que satisfacer, las horas disponibles en la semana de producción, además de otras variables y restricciones, que mermen las horas efectivas disponibles durante la semana [6], [7].

Es critico citar la diferencia entre los tipos de formatos, esto obliga a considerar siempre una secuencia para garantizar que se pueda mantener las características termo-higrométricas que comparten ciertos formatos y lograr la estabilidad durante del producto terminado durante la etapa del secado. La falta de consideración de esta secuencia daría como resultado un producto no conforme (trizado, quemado, húmedo, etc.). Adicional y aunque la demanda no lo requiera, siempre se deberá realizar el lote mínimo requerido por cada uno de ellos [8].

En la Tabla III se resumen los formatos de la línea y sus características principales.

Explicadas las características del proceso de secado, se observa la necesidad de unir en diferentes grupos la secuencia en que se deben programar los diversos formatos. La Tabla IV recoge los subgrupos en que se clasifican los formatos y su secuencia [9].

Los costos de producción dentro de la empresa son calculados mediante 4 tasas definidas de la siguiente manera: 1

1) *Materia prima*: Este costo integra todos lo relacionado al abastecimiento de los materiales, su precio, transporte, gastos de nacionalización y demás relacionados con los materiales hasta que están disponibles en la planta. Adicionalmente, cada producto (SKU) tiene asignada su tasa de materiales que van a variar tras los consumos respectivos y reales que realice el área de producción en cada orden de fabricación.

TABLA III
FORMATOS DE LÍNEA

Formato	Capacidad Instalada de Línea	Eficie ncia	Capacidad de Secado	Lote Mínimo	
UM	Kg/hr	%	Kg/hr	hr	kg
Lazo Pequeño	1000	33%	330	4	1320
Lazo Mediano	1000	45%	450	4	1800
Precortada	1000	95%	950	4	3800
Macarrón	1000	85%	850	8	6800
Codo	1000	80%	800	8	6400
Tornillo	1000	85%	900	8	7200
Pluma	1000	90%	850	4	3400
Conchita	1000	80%	800	8	6400
Plumita	1000	85%	850	8	6800
Codito	1000	85%	850	8	6800
Dedal	1000	85%	850	4	3400
Risoni	1000	85%	850	4	3400
Deportivo	1000	85%	850	4	3400
Flautita	1000	85%	850	6	5100

TABLA IV
SECUENCIACIÓN EN FORMATOS

FORMATO	SECUENCIA
Lazo Pequeño	1
Lazo Mediano	1
Precortada	2
Macarrón	3
Tornillo	3
Codo	3
Pluma	3
Dedal	3
Plumita	4
Codito	4
Conchita	4
Risoni	4
Deportivo	4
Flautita	4

2) *Material de empaque*: Esta tasa tiene contabilizados al igual que la tasa anterior todos los valores relacionados con la logística de abastecimiento de los empaques primarios y secundarios, en cada producto son asignados considerando el consumo estándar más una variación permitida por merma de este.

3) *Mano de Obra Directa*: Es otra tasa que es asignada por el cálculo global de todos los colaboradores que trabajan directamente en la operación de fabricación, incluidos todos sus beneficios y recursos. Esto genera un costo estándar por hora, el cual se asigna a cada producto de acuerdo al tiempo y la necesidad de mano de obra, que varía dependiendo de cada tipo de proceso.

4) *Gastos Indirectos de fabricación*: En esta tasa están los gastos administrativos indirectos, gastos en servicios, depreciaciones, etc. que son necesarios para sostener la operación.

B. Declaración de los Índices y Parámetros del Modelo

Los productos serán procesados en una secuencia lógica ya determinada por la naturaleza del proceso productivo, los tiempos de inicio y finalización de cada proceso estarán secuenciados de manera que siempre se respetara el orden de secado óptimo, todos los productos son procesados en 1 sola máquina.

Se tiene definido que existe un tamaño de lote mínimo y que cada vez que la demanda sea inferior al lote mínimo, se producirá al menos dicho valor.

Se consideran los tiempos de proceso y preparación calculados para cada tamaño de lote específico por cada formato de producto. A continuación, los índices del modelo matemático:

Índices:

- f Formatos de Fideos
- p Máquinas de Secado
- j Producto Terminado (fideo envasado por presentación).
- q Máquina de Envasado.
- s Secuencia.
- d Día.

Parámetros:

- $ProdS(p, i)$ Producción de la Máquina p con el formato f .
- $ProdE(q, j)$ Producción de la Máquina q con el ítem j .
- $RE(f, j)$ Razón envasado con respecto al formato f y producto terminado j .
- $PlanDemanda(j)$ Demanda con respecto al producto terminado j .
- $CSecuenciacion(s, d)$ Costo de la secuencia s en el día d .
- $Secuenciacion(f, s)$ Matriz de asignación del formato f en la secuencia s .
- $HProd(f)$ Producción del formato f por hora.

C. Declaración de las Variables de Decisión

A continuación, se detallan las variables de decisión que se utilizan dentro del modelo matemático:

- $X(s, f, p, d)$ Decisión de Producir el formato f en la máquina p en el día d de acuerdo a la secuencia s .
- $Y(j, q, d)$ Cantidad a envasar de producto terminado j en la Máquina q en el día d .
- $O(s, d)$ Elección de secuencia a elegir en el día d .
- $SI(f, d)$ Stock del formato f en el día d .
- $S2(f, d)$ Almacenamiento del formato f en el día d .

- $S3(j, d)$ Stock del producto terminado j en el día d .
- $Diff(j)$ Diferencia entre el producto terminado j y Plan Demanda (j).

D. Definición de la Función Objetivo

La función Objetivo busca maximizar la producción de la programación semanal cumpliendo siempre la demanda y penaliza el no seguir la secuencia estructurada.

$$\text{Max } z = \sum_{s=1, f=1, p=1, d=1}^{F, P, D} ProdS(p, f) * X(s, f, p, d) - \sum_{s=1, d=1}^{S, D} C\text{Secuenciacion}(s, d) * O(s, d) \quad (1)$$

E. Descripción de las Restricciones

Las restricciones del modelo aplicado a este proceso de producción se describen a continuación [10], [11]:

- Restricción de secado

Esta restricción implica que puede secar cualquier formato siempre y cuando se cumpla que el formato f pertenece a la secuenciación s ; es decir no puede ejecutar un formato f que no pertenezca a la secuencia s .

$$X(s, f, p, d) \leq \text{Secuenciacion}(f, s) \quad \forall s \quad \forall f \quad \forall p \quad \forall d \quad (2)$$

- Restricción para asignar días la secuencia

La variable binaria busca asignar a cada secuencia tener por lo menos un día asignado.

$$\sum_{d=1}^D O(s, d) \geq 1 \quad \forall s \quad (3)$$

- Restricción para asignar secuencias a cada día

La variable binaria busca asignar a cada día tener por lo menos una secuencia.

$$\sum_{s=1}^S O(s, d) \geq 1 \quad \forall d \quad (4)$$

- Restricción de asignación de secado

Esta restricción implica que puede asignar el secado del formato f en la máquina p en el día d siempre y cuando se cumpla la secuencia s asignada para el día d .

$$X(s, f, p, d) \leq O(s, d) \quad \forall s \quad \forall f \quad \forall p \quad \forall d \quad (5)$$

- Restricción de horas para cada día

La Asignación s para el formato f en la máquina p multiplicado por la hora de producción f , no puede superar a la hora asignada de 24 horas para cada día.

$$\sum_{s=1, f=1, p=1}^{S, F, P} H\text{Prod}(f) * X(s, f, p, d) \leq 24 \quad \forall d \quad (6)$$

- Restricción de stock

Esta restricción detalla el stock con respecto a lo producido del formato f en el día d .

$$\sum_{p=1}^P ProdS(p, f) * X(s, f, p, d) = S1(f, d) \quad \forall f \quad \forall d \quad \forall s \quad (7)$$

- Restricción de no superar la cantidad de stock

Esta restricción indica que luego del proceso de secado el formato f para envasar no puede superar a la cantidad que se tienen en stock de este.

$$\sum_{j=1, q=1}^{J, Q} RE(f, j) * ProdE(q, j) * Y(j, q, d) \leq S2(f, d) \quad \forall f \quad \forall d \quad (8)$$

- Restricción de flujo

Esta restricción indica el flujo del formato con respecto al almacenamiento que se tiene como pasta a granel para la producción del producto terminado j , en el tiempo d es igual a cero, esto se debe que se considera que no se tiene stock inicial.

$$S2(f, d) = 0 \quad \forall f \quad \forall d = 1 \quad (9)$$

- Restricción de flujo de almacenamiento

Esta restricción indica el flujo del formato con respecto al almacenamiento que se tiene como pasta a granel para la producción del producto terminado j , la misma que será igual al almacenamiento anterior más el nuevo ingreso de pasta a granel menos lo que se utilizó para envasar el producto j .

$$S2(f, d) = S2(f, d - 1) + S1(f, d) - \sum_{j=1}^J RE(f, j) * S3(j, d) \quad \forall f \quad \forall d > 1 \quad (10)$$

- Restricción de stock vs producción

Esta restricción detalla el stock con respecto a lo producido del ítem j en el día d .

$$\sum_{q=1}^Q ProdE(q, j) * Y(j, q, d) = S3(j, d) \quad \forall j \quad \forall d \quad (11)$$

- Restricción del Plan de Producción

La restricción indica que la producción en el producto terminado debe cumplir el plan de producción.

$$\sum_{d=1}^d S3(j, d) = PlanProduccion(j) \quad \forall j \quad (12)$$

- Restricción de Demanda.

La restricción indica que la producción del producto terminado j debe cumplir la demanda semanal j .

$$\sum_{d=1}^d S3(j, d) = DemandaS(j) \quad \forall j \quad (13)$$

- Restricción para evaluar el Cumplimiento

La restricción indica que se va a realizar una diferencia entre el producto terminado j y el plan de demanda (j) del programa semanal para evaluar el cumplimiento.

$$Diff(j) = \sum_{d=1}^d S3(j, d) - PlanProduccion(j) \quad \forall j \quad (14)$$

- Restricción de Variables Lógicas

$$X(f, p, d), Y(j, q, d), B(j, d) \in \{0,1\} \quad (15)$$

- Restricción de variables reales

$$S1(f, d), S2(f, d), S3(j, d) \in \mathbb{N} \quad (16)$$

F. Armado del Modelo Matemático

$$\begin{aligned} \text{Maximizar } z = & \sum_{s=1; f=1, p=1, d=1}^{F, P, D} ProdS(p, f) * \\ & X(s, f, p, d) - \sum_{s=1, d=1}^{S, D} CSecuenciacion(s, d) * O(s, d) \end{aligned}$$

Sujeto a las siguientes restricciones:

$$X(s, f, p, d) \leq Secuenciacion(f, s) \quad \forall s \quad \forall f \quad \forall p \quad \forall d$$

$$\sum_{d=1}^D O(s, d) \geq 1 \quad \forall s$$

$$\sum_{s=1}^S O(s, d) \geq 1 \quad \forall d$$

$$X(s, f, p, d) \leq O(s, d) \quad \forall s \quad \forall f \quad \forall p \quad \forall d$$

$$\sum_{s=1; f=1; p=1}^{S, F, P} HPprod(f) * X(s, f, p, d) \leq 24 \quad \forall d$$

$$\sum_{p=1}^P ProdS(p, f) * X(s, f, p, d) = S1(f, d) \quad \forall f \quad \forall d \quad \forall s$$

$$\begin{aligned} \sum_{j=1, q=1}^{J, Q} RE(f, j) * ProdE(q, j) * Y(j, q, d) \leq \\ S2(f, d) \quad \forall f \quad \forall d \end{aligned}$$

$$S2(f, d) = 0 \quad \forall f \quad \forall d = 1$$

$$\begin{aligned} S2(f, d) = & S2(f, d - 1) + S1(f, d) - \sum_{j=1}^J RE(f, j) * \\ & S3(j, d) \quad \forall f \quad \forall d > 1 \end{aligned}$$

$$\sum_{q=1}^Q ProdE(q, j) * Y(j, q, d) = S3(j, d) \quad \forall j \quad \forall d$$

$$\sum_{d=1}^d S3(j, d) = PlanProduccion(j) \quad \forall j$$

$$\sum_{d=1}^d S3(j, d) = DemandaS(j) \quad \forall j$$

$$Diff(j) = \sum_{d=1}^d S3(j, d) - PlanProduccion(j) \quad \forall j$$

$$X(f, p, d), Y(j, q, d), B(j, d) \in \{0,1\}$$

$$S1(f, d), S2(f, d), S3(j, d) \in \mathbb{N}$$

G. Desarrollo y Funcionamiento del Modelo Matemático

El modelo matemático es un problema MIP que ha sido resuelto mediante la aplicación de la heurística JSSP con el Software Wolfram Mathematica que busca optimizar la planificación semanal de producción partiendo de una demanda

ya establecida por el área de planeación de la demanda, cuyo horizonte es una semana [12], [13].

III. RESULTADOS

El modelo entrega una planificación de producción que satisface las siguientes restricciones: 1) respetar la secuencia de secado establecida y de la cual depende que el producto cumpla con especificación y minimice los tiempos de cambios de formato, 2) cumple la producción de al menos el lote mínimo, siempre que la demanda sea inferior a este último, 3) considera que se tiene limitación de horas disponibles en la semana de producción, entre cada cambio de formato habrá un tiempo de preparación de la máquina para limpieza de molde y arranque de línea. Además, una vez que inicia un formato debe terminar por completo su plan antes de pasar al siguiente.

La demanda semanal se ingresa en kg de producto por SKU y formato requerido, una vez ingresado estos datos el software exporta a ficheros los resultados que esquematizan la planificación semanal y diaria de producción que contiene el número de horas necesarias a producir por cada formato demandado, los kg necesarios y los cambios de formato que se deben ejecutar por día.

Con esta información se logra obtener el nuevo esquema del programa de producción semanal para la línea de producción y las horas de producción por formato necesarias para cubrir la demanda, ver apéndice A.

Para validar la efectividad del modelo se realizó simulaciones en Wolfram Mathematica, introduciendo la demanda solicitada de diferentes semanas de un año y obteniendo la cantidad sugerida a producir. Estos resultados fueron usados para realizar un comparativo entre la eficiencia o el porcentaje de cumplimiento de la producción bajo el método actual versus el plan de producción sugerido por el modelo matemático.

El modelo exporta a una hoja de cálculo la programación sugerida y con esta información se logra hacer la evaluación de los diferentes escenarios. Ver apéndices B, C, D y E con algunas de las simulaciones realizadas en el Modelo.

La Tabla V permite validar la aplicación del modelo matemático a la planificación semanal de producción, para todas las semanas simuladas. Se buscaron los escenarios donde hubo mayor variación del cumplimiento de la planificación (por exceso/defecto) y para esas semanas se simularon los mismos escenarios de demanda en el modelo, obteniendo así una cantidad sugerida de Kg de producción por cada formato de fideo. La comparación del porcentaje de cumplimiento de la planificación de producción con la aplicación del modelo y con la demanda, cumple el 100% de las veces con una eficiencia del 103%, con un rango de cumplimiento del 94% - 110% de la demanda solicitada. Además, cumple con producir el mínimo lote para los formatos donde la demanda solicitada es menor a este y obtiene como máximo un 125% de producción para estos casos. Comparando las mismas semanas, la producción falló en la cantidad de entrega el 100% de las veces con rangos de cumplimiento de 0 - 180%.

TABLA V
COMPARATIVO DE EFECTIVIDAD DE RESULTADOS

Semana	Demanda (Kg)	% de Cumplimiento de Planificación		% de Eficacia	
		Sugerida	Real	Sugerida	Real
2	53320	102%	53%	100%	40%
3	50000	103%	1525%	100%	33%
6	87150	104%	158%	100%	63%
9	91910	102%	2895%	83%	33%
10	42420	110%	131%	83%	0%
12	58564	102%	83%	100%	33%
13	77652	106%	808%	88%	44%
16	44036	104%	574%	100%	40%
17	33848	105%	1772%	100%	14%
20	92119	104%	955%	100%	57%
21	73395	103%	111%	100%	20%
25	48500	102%	112%	100%	20%
27	53500	102%	214%	100%	20%
29	52000	102%	92%	100%	60%
33	42420	104%	81%	100%	33%
34	48950	104%	852%	100%	38%
		103%	729%	98%	37%

IV. CONCLUSIONES

Los procesos de planificación y programación de producción manual o empírica incrementan el nivel de ineficiencias de los procesos, pues deben realizarse incorporando variables y restricciones fijas de acuerdo al tipo de proceso y solo variando en función de lo demandado, en este sentido la modelización matemática se hace necesaria para evitar el error humano durante el análisis previo y la programación, pues estas decisiones afectan a los resultados de abastecimiento oportuno y a las ganancias económicas de la compañía.

La ineficiencia sobre el cumplimiento de los programas de producción genera impactos económicos como demanda insatisfecha y afecta el nivel de servicio a los clientes. Además, la producción en exceso acarrea sobre costos que involucran la disponibilidad de materiales, costos adicionales de almacenar, inventariar y riesgo de obsolescencia y quiebre de las políticas de frescura de las empresas.

El Job Shop Scheduling Problem es un problema clásico que trata de modelar de forma genérica aquellas situaciones en las que hay que planificar la ejecución de una serie de operaciones sobre un conjunto finito de recursos. Este algoritmo sirvió como base para la aplicación y diseño de la propuesta de optimización del proceso de planificación semanal de producción que entregó un modelo eficiente cumpliendo los objetivos necesarios de satisfacer la demanda deseada.

En resumen, el enfoque de la optimización está en la reducción de la demanda insatisfecha, la cual en promedio representa \$331 918,26 bajo el modelo actual. La eficiencia obtenida con la aplicación del modelo matemático eleva de 80%

a un mínimo de 94% el cumplimiento de la programación de producción. Se recupera el 70% de la demanda insatisfecha, lo que significa aumentar las ventas de la compañía de aproximadamente \$240 000,00 por mes, lo que representa una utilidad de \$100 000,00 por mes.

Al comparar la eficacia entre ambos métodos, se puede concluir que con la aplicación del método de modelización matemática se puede cumplir oportunamente (en cantidad y tiempo) el 98% de las veces lo programado, mientras que, con el método actual, la eficacia alcanza menos del 40%.

V. RECOMENDACIONES

Con los resultados obtenidos, se recomienda a la empresa utilizar este modelo matemático en el resto de sus líneas de producción, que tienen problemas similares de programación y manejan menor número de SKUs y procesos, con esto se conseguirá mejorar los indicadores de cumplimiento oportuno de la demanda, reducir sus índices de reprocesos y de utilización de recursos innecesarios. Se recomienda a la empresa implementar esta herramienta para la evaluación de la asignación de mano de obra necesaria para cubrir la demanda.

Además, se recomienda realizar la actualización periódica de las capacidades de procesos y sus eficiencias, de manera que se tengan datos reales para evitar errores, no solo en la programación de producción, sino en el consumo innecesario de materiales para un SKU que no ha sido demandado.

Dentro del presente artículo se hacen las simulaciones con diferentes demandas y eficiencias, sin embargo, se recomienda otros análisis de sensibilidad donde se incluyan diferentes valores para las variables que contiene el modelo, de tal manera que se demuestre su robustez.

REFERENCIAS

- [1] Klaus-Dieter Thoben, Stefan Wiesner, & Thorsten Wuest. "Industrie 4.0" and Smart Manufacturing – A Review of Research Issues and Application Examples. *IJAT* (international journal of automation technology), IJAT 11, 4–16. <https://doi.org/10.20965/ijat.2017.p0004>, 2017.
- [2] Amaluisa Peñaranda, (2019). Bajo nivel de crecimiento de la industria textil ecuatoriana: ¿Elevada concentración industrial o problemas productivos estructurales?. *Bolentín de Coyuntura*, 0(21), 13-16.
- [3] Enríquez Arévalo, Eduardo. "La derecha latinoamericana bajo el postneoliberalismo". *Revista Andina de Estudios Políticos* 7(2):15-40, 2017.
- [4] Iturralde Ricardo, Varas Alfredo. "Optimización del plan semanal de producción de productos perecederos utilizando modelos matemáticos", *ESPOL*, 2015.
- [5] Zamarripa Ocampo. Optimización de la producción de una línea de manufactura mediante un modelo matemático", Universidad Autónoma de Nuevo León 2013.
- [6] Yossiri Adulyasak, Jean-François Cordeau, Raf Jans. "The production routing problem: A review of formulations and solution algorithms", *Computers & Operations Research*, Volume 55, 2015, Pages 141-152, ISSN0305-0548, <https://doi.org/10.1016/j.cor.2014.01.011>.
- [7] Michael L. Pinedo. "Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems". Springer, 2016.
- [8] Tejada Muñoz Guillermo. "Enrutamiento y secuenciación óptimos en un Flexible Job Shop multiobjetivo mediante algoritmos genéticos". *Industrial Data*, vol. 19, núm. 2, julio-diciembre, 2016, pp. 124-133.

- [9] Escobar, John W, Gonzales Marcelo, Quevedo Diego. “Modelo matemático para la programación de la producción en compañías fabricantes de alambres y cables para la construcción”, Revista Espacios, Vol. 41 (24) 2020.
- [10] K. F. Barcia, W. A. Córdova, and V. H. González. “Modelo matemático para la optimización del plan maestro de producción para lácteos,” in Proceedings of the LACCEI international Multiconference for Engineering, Education and Technology, vol. 2018–July.
- [11] Stephen Chapman. “Planificación y Control de la Producción”. Pearson Education, Inc., publicada como Prentice-Hall Inc., Copyright 2006.
- [12] Laviós, J. J. Análisis de la Relajación Lagrangiana como Método de Programación de Talleres Flexibles en un entorno Multiagente. Tesis 196 Doctoral. Universidad de Burgos, Departamento de Ingeniería Civil, España. 2013.
- [13] Robert, Krastek, Saibel, Ramos, & Ángel, Duarte. (2012). Formulación de un modelo matemático para optimizar el tiempo de producción en una planta extrusoras de tubos. Universidad, Ciencia y Tecnología, 16(62), 33-41. Recuperado en 25 de mayo de 2022, de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-48212012000100004&lng=es&tlng=es.

APÉNDICE A
PROGRAMA DE PRODUCCIÓN SEMANAL

PROGRAMA DE PRODUCCIÓN SEMANAL

LÍNEA DE PASTA: **PC1000**

SEMANA: **Semana 20**

AÑO **2020**

	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	00:00	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	
DIA 1	LUNES	STARTUP																							
DIA 2	MARTES	LAZO MEDIANO	CAMBIO																						
DIA 3	MIERCOLES	MACARRON	CAMBIO																						
DIA 4	JUEVES																								
DIA 5	VIERNES	TORNILLO	CAMBIO																						
DIA 6	SÁBADO	CAMBIO																							

APÉNDICE B
SIMULACIÓN DE ESCENARIO SEMANA 2

SEMANA : 2020 - S2

FORMATO	PROGRAMA DE PRODUCCIÓN SEMANAL (Kg/día)						KG/ PRODUCTO			EFICIENCIA	
	1	2	3	4	5	6	DEMANDA	SUGERIDA	REAL	SUGERIDA	REAL
LAZO PEQUEÑO	0	0	0	0	0	0					
PRECORTADA	0	0	0	0	0	0					
PRECORTADA SOPAS	0	0	0	0	0	0					
LAZO MEDIANO	0	0	0	0	0	0					
MACARRON	14400	0	0	0	0	0	14000	14400	12670	103%	91%
TORNILLO	15200	7200	0	0	0	0	22000	22400	17650	102%	80%
CODO	0	0	0	0	0	0					
PLUMA	0	0	3600	0	0	3600	3600	0	100%	0%	
DEDAL	3400	0	0	0	0	0	3600	3400	0	94%	0%
PLUMITA	0	0	0	0	0	0					
CODITO	0	0	11000	0	0	0	10120	11000	9715,2	109%	96%
CONCHITA	0	0	0	0	0	0					
RISONI	0	0	0	0	0	0					
DEPORTIVO	0	0	0	0	0	0					
FLAUTITA	0	0	0	0	0	0					
							53320	54800	40035,2	102%	53%

APÉNDICE C
SIMULACIÓN DE ESCENARIO SEMANA 6

SEMANA : 2020 - S6

FORMATO	PROGRAMA DE PRODUCCIÓN SEMANAL (Kg/día)						KG/ PRODUCTO			EFICIENCIA	
	1	2	3	4	5	6	DEMANDA	SUGERIDA	REAL	SUGERIDA	REAL
LAZO PEQUEÑO	7590	7590	1980	0	0	0	17000	17160	19970	101%	117%
PRECORTADA	0	0	0	0	0	0					
PRECORTADA SOPAS	0	0	0	0	0	0					
LAZO MEDIANO	0	0	14450	3400	0	0	17820	17850	18332,4	100%	103%
MACARRÓN	0	0	0	0	0	0					
TORNILLO	0	0	0	8800	9600	0	17750	18400	18690	104%	105%
CODO	0	0	0	0	0	0			550		550%
PLUMA	0	0	0	3600	0	0	3120	3600	3224	115%	103%
DEDAL	0	0	0	3400	0	0	3200	3400	3216	106%	101%
PLUMITA	0	0	0	0	0	0					
CODITO	0	0	0	0	850	19550	19760	20400	21650,8	103%	110%
CONCHITA	0	0	0	0	8500	0	8500	8500	6410	100%	75%
RISONI	0	0	0	0	0	0					
DEPORTIVO	0	0	0	0	0	0					
FLAUTITA	0	0	0	0	0	0					
							87150	89310	92043,2	104%	158%

APÉNDICE D
SIMULACIÓN DE ESCENARIO SEMANA 10

SEMANA : 2020 - S10

FORMATO	PROGRAMA DE PRODUCCIÓN SEMANAL (Kg/día)						KG/ PRODUCTO			EFICIENCIA	
	1	2	3	4	5	6	DEMANDA	SUGERIDA	REAL	SUGERIDA	REAL
LAZO PEQUEÑO	5280	0	0	0	0	0	5000	5280	9120	106%	182%
PRECORTADA	3150	4950	0	0	0	0	7750	8100		105%	0%
PRECORTADA SOPAS	0	0	0	0	0	0					
LAZO MEDIANO	0	6800	0	0	0	0	5000	6800	7020	136%	140%
MACARRÓN	0	0	0	0	0	0					
TORNILLO	0	3600	7200	0	0	0	10170	10800	34280	106%	337%
CODO	0	0	6800	0	0	0	6750	6800	0	101%	0%
PLUMA	0	0	0	0	0	0					
DEDAL	0	0	0	0	0	0					
PLUMITA	0	0	0	0	0	0					
CODITO	0	0	0	0	0	0					
CONCHITA	0	0	5950	2550	0	0	7750	8500	9970	110%	129%
RISONI	0	0	0	0	0	0					
DEPORTIVO	0	0	0	0	0	0					
FLAUTITA	0	0	0	0	0	0					
							42420	46280	60390	110%	131%

APÉNDICE E
SIMULACIÓN DE ESCENARIO SEMANA 33

SEMANA : 2020 - S33

FORMATO	PROGRAMA DE PRODUCCION SEMANAL (Kg/día)						KG/ PRODUCTO			EFICIENCIA	
	1	2	3	4	5	6	DEMANDA	SUGERIDA	REAL	SUGERIDA	REAL
LAZO PEQUEÑO	5280	0	0	0	0	0	5000	5280	3310	106%	66%
PRECORTADA	3150	4950	0	0	0	0	7750	8100	6950	105%	90%
PRECORTADA SOPAS	0	0	0	0	0	0					
LAZO MEDIANO	0	5100	0	0	0	0	5000	5100	7620	102%	152%
MACARRON	0	0	0	0	0	0					
TORNILO	0	4800	5600	0	0	0	10170	10400	10032	102%	99%
CODO	0	0	6800	0	0	0	6750	6800	5460	101%	81%
PLUMA	0	0	0	0	0	0					
DEDAL	0	0	0	0	0	0					
PLUMITA	0	0	0	0	0	0					
CODITO	0	0	0	0	0	0					
CONCHITA	0	0	6800	1700	0	0	7750	8500	0	110%	0%
RISONI	0	0	0	0	0	0					
DEPORTIVO	0	0	0	0	0	0					
FLAUTITA	0	0	0	0	0	0					
							42420	44130	33372	104%	81%