UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERGÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

OPTIMIZACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE UNA LÍNEA DE MANUFACTURA MEDIANTE UN MODELO MATEMÁTICO

POR
NANCY OLIVIA ZAMARRIPA OCAMPO

COMO REQUISITO PARCIAL AL GRADO DE MAESTRÍA EN LOGÍSTICA Y CADENA DE SUMINISTRO CON ORIENTACIÓN EN DISEÑO Y ANÁLISIS

SEPTIEMBRE 2013

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERGÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

TESIS

OPTIMIZACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE UNA LÍNEA DE MANUFACTURA MEDIANTE UN MODELO MATEMÁTICO

POR
NANCY OLIVIA ZAMARRIPA OCAMPO

COMO REQUISITO PARCIAL AL GRADO DE MAESTRÍA EN LOGÍSTICA Y CADENA DE SUMINISTRO CON ORIENTACIÓN EN DISEÑO Y ANÁLISIS

SEPTIEMBRE 2013

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis «Optimización de la producción de una línea de manufactura mediante un modelo matemático», realizada por el alumno Nancy Olivia Zamarripa Ocampo, matrícula 932551 sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Logística y Cadena de Suministro con Orientación en Diseño y Análisis.

El Comité de Proyecto Tesis:

Asesor
Dr. Miguel Mata Pérez

Jania Astrid Saucedo

Revisor
Dra. Jania Astrid Saucedo Martínez

Revisor
Dra. Edith Lucero Ozuna Espinosa

Vo.Bo.
Dr. Moisés Hinojosa Rivera
Subdirector de Estudios de Posgrado

Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, N.L., septiembre del 2013.

DEDICATORIA

Agradezco a mi familia por apoyarme en esta aventura de aprendizaje por la maestría.

Especialmente a mi mami que siempre ha creído en mi.

A Iván por toda su ayuda y sabiduría brindada.

ÍNDICE

AGRADECIEMIENTOS

Al Dr. Miguel Mata, por todo el tiempo, dedicación y paciencia que tuvo con nosotros durante el desarrollo/elaboración de los modelos matemáticos y por ser nuestro guía en el desarrollo y culminación del proyecto de titulación.

A los profesores Dra. Jania A. Saucedo Martínez y Dra. Edith Lucero Ozuna Espinosa, que son parte del comité de tesis por brindarme su apoyo y tiempo con la realización de este proyecto.

RESUMEN

Nancy Olivia Zamarripa Ocampo.

Candidato para el grado de Maestro en Logística y

Cadena de Suministro con especialidad en Diseño y Análisis.

Universidad Autónoma de Nuevo León.

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

Título del estudio:

OPTIMIZACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE UNA LÍNEA DE MANUFACTURA MEDIANTE UN MODELO MATEMÁTICO

Número de páginas: 49.

Objetivos y método de estudio: En el presente trabajo, se presentan los clásicos problemas que se tienen en los diferentes ambientes de manufactura, la programación y secuenciación de las diferentes tareas a realizar en el piso de producción, las restricciones propias del proceso de manufactura así como los cuellos de botella.

Uno de los problemas principales que se tiene en la línea de producción en estudio es la programación de los requerimientos semanales en las dos líneas de ensamble y sus

respectivos probadores funcionales, para lo cual se ha desarrollado un modelo matemático con el cual se obtendrá un plan maestro para la programación de la producción así como el respectivo secuenciamiento de las familias a correr en el ensamble y en los probadores funcionales. Para resolver esta problemática se ha utilizado la herramienta de la programación lineal, la cual ha sido extensivamente aplicada a la solución de problemas de programación y secuenciación de las líneas de producción para la correcta asignación de los recursos para cada tarea a realizar tomando en cuenta las restricciones del proceso de manufactura.

En este trabajo se presenta un modelo de optimización que puede ser usado en el ambiente real de producción el cual denominaremos «plan maestro» con el cual se tendrá la visión general de la factibilidad del cumplimiento de la demanda semanal, la cantidad de horas de tiempo extra para su autorización, los recursos adicionales a solicitar o bien la administración de los recursos que no serán empleados. La solución del modelo matemático es obtenida por medio del uso del *software* de modelación matemáticas GAMS. Con los resultados obtenidos se realiza un análisis del cumplimiento de los requerimientos así como de los recursos de la línea.

Contribuciones: En un ambiente de manufactura, hacer para almacenar el tiempo de entrega de los productos al centro de distribución es de vital importancia para mantener los niveles de los inventarios de seguridad y los métricos de servicio dentro de las metas establecidas, con el apoyo del modelo matemático el planeador se dará cuenta en que porcentaje las metas de producción desde un punto de vista matemático se cumplirán, tendrá la visión de los requerimientos del tiempo extra, la administración de los recursos de la línea, el soporte de los diferentes equipos interdisciplinarios de la unidad de negocio en caso de ver problemas con los métricos de servicio.

El modelo matemático considera todas las restricciones que se tienen en el piso de producción tales como: los cambios de modelo del producto, la realización de una tarea a la vez, los tiempos de ensamble, las prioridades de planeación para casos de extraordinaria urgencia, entre otros, lo cual es de suma importancia para la planeación del programa de producción. Con el apoyo del modelo matemático se tiene una reducción del tiempo empleado en la elaboración del plan de producción por parte del planeador de la línea de producción así como la estandarización del proceso, la generación del plan maestro a seguir tanto en la línea de ensamble como en los probadores.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

En esta investigación, se abordará una problemática relacionada al desaprovechamiento de los recursos asociados a procesos productivos de una unidad de negocio que tiene una demanda variable.

Se desarrolla una aplicación de la programación lineal, en específico, un modelo matemático para la programación y secuenciación de tareas para la optimización del plan de producción tomando como cuello de botella los probadores del proceso de producción en estudio.

La cadena de suministro, se puede concebir desde tres grandes etapas, la etapa estratégica, la táctica y la operativa, y en cualquiera de esas etapas se aplican modelos matemáticos.

Esta investigación estará acotada de manera estratégica, teniendo influencia únicamente en la etapa operativa, se trabajará en el diseño e implementación de un modelo matemático lineal que optimice la distribución y secuenciación de la demanda semanal.

Este modelo deberá integrar las capacidades y restricciones del proceso, permitiendo maximizar el aprovechamiento de los recursos asociados a la unidad de negocio y sus procesos productivos, teniendo como objetivo proporcionar el plan de programación así como la secuenciación de los requerimientos de la demanda de una manera óptima.

Se analizarán las restricciones de un proceso de negocio en conjunto con las capacidades de sus recursos; una vez hecho esto, se describirán estas condiciones en expresiones matemáticas formuladas en un modelo matemático de programación lineal.

La aplicación y utilización de la programación lineal es una herramienta con fundamento y argumento sólido para la toma de decisiones relevantes en los procesos de negocio.

Es una realidad contundente que la gran mayoría de estos modelos son complejos, ya que muchos son problemas de optimización combinatoria y tienen componentes estocásticos, pero esa complejidad se ve recompensada en su utilidad.

1.1 Descripción general de la empresa

A continuación, se presenta una breve reseña de Rockwell Automation.

En 1909 se unen Lynde Bradley y Harry Bradley quienes forman la compañía Allen Bradley; el logo octagonal (figura 1) se convierte en marca registrada de la compañía. Años más tarde, Milwaukee, Wisconsin, lugar de nacimiento de la marca Allen-Bradley se convierte en el corporativo de Rockwell International.

Rockwell International se convierte en copropietario junto con Rockwell Collins (negocio de aviación y comunicaciones) y cambia su nombre a Rockwell Automation (figura 2).

Figura 1. Logotipo de Allen Bradley

Figura 2. Logotipo de Rockwell Automation

Rockwell es una compañía global orientada a la colaboración con sus clientes brindando soluciones de información, control y automatización industrial, diseñadas para proporcionar al cliente una ventaja competitiva que le permita alcanzar el éxito planteado en sus estrategias de negocio.

El corporativo de Rockwell Automation se ubica actualmente en Milwaukee, Wisconsin, USA. Sus ventas son alrededor de $4.4 US billones, el recurso humano es de aproximadamente 25000 empleados a nivel mundial, tiene más de 600 locaciones de venta y soporte en más de 80 países, cuenta con una red global de centros de investigación y más de 3500 distribuidores autorizados alrededor del mundo.

Figura 3. Presencia mundial

Dentro de la variedad de los productos que Rockwell Automation ofrece se encuentran desde componentes industriales autónomos hasta sistemas integrados en gran escala con impacto en la operación de toda una empresa.

El objetivo de sus productos y servicios es suministrar la automatización, el control de la energía de conversión más avanzada, que le ayudarán a lanzar más rápidamente al mercado sus productos y servicios, a reducir costos, a utilizar mejor la energía y los activos de la planta, y a minimizar los riesgos en su ambiente de fabricación.

Lo que mejor hace Rockwell Automation es ayudar a los fabricantes a alcanzar el éxito con soluciones de control e información de automatización industrial diseñada para proporcionar a los clientes una ventaja competitiva. Desde componentes industriales autónomos hasta sistemas integrados a nivel de toda la empresa, estas soluciones han dado la talla en una amplia gama de industrias y en algunos de los más exigentes entornos de fabricación [1].

Usuarios finales y constructores de máquinas (fabricantes de equipos originales) por igual confían en la completa cartera de productos, *software* y servicios para proporcionar valor y ayudarles a cumplir con sus objetivos:

- Tiempos más cortos de lanzamiento al mercado: gracias a la velocidad, a la capacidad de respuesta al cliente y a la flexibilidad de la fabricación automatizada

- Menor costo total de propiedad: mediante sistemas de información y de control de automatización abiertos, escalables, modulares y de alto rendimiento energético

- Mejor gestión y optimización de activos: mediante diagnósticos, monitoreo basado en condiciones, análisis de fallos y gestión de almacenamiento

- Administración más amplia del riesgo empresarial de fabricación: gracias al análisis de variabilidad de procesos, al cumplimiento normativo y a las soluciones de seguridad

Rockwell Automation está comprometida a poner en primer lugar las necesidades de los clientes en todo el mundo. Las capacidades globales se extienden a 80 países y abarcan una red de 5,600 socios locales de distribución, integración de sistemas y referencias de productos. Dicho de manera sencilla, contamos con la solución correcta, en el momento y en el lugar en que nos necesiten nuestros clientes.

Puede proporcionar soluciones que permiten gozar de una ventaja competitiva durante muchos años. Con el respaldo de una sólida base financiera, Rockwell Automation continúa adquiriendo experiencia e invirtiendo en un agresivo programa de investigación y desarrollo que fomenta la innovación.

1.2 Planteamiento del problema

La planta de manufactura cuenta con una variedad de líneas de producción en las cuales cada una tiene sus propias restricciones y procesos de manufactura diferentes que las hacen que cada una se administre acorde a sus características. En el presente trabajo la línea de producción que ha sido seleccionada tiene como característica que es la número uno en embarques semanales de aquí su relevancia e importancia que representa como negocio.

La línea de producción fue transferida a México a principios del año 2009, después de la terminación de las corridas de los primeros productos, liberación por parte de calidad y los primeros embarques, la línea ha corrido de manera consistente e ininterrumpida, cumpliendo con las expectativas de los clientes se han incorporado nuevos productos los cuales han incrementado las ventas, la satisfacción de los clientes y con ello se ha visto un incremento en la mezcla de los diferentes productos que se manejan. Por lo anterior, en dicha línea de producción ha sido identificado el principal cuello de botella y se necesita un plan de acción para su correcta administración.

La línea de ensamble está conformada por diversas familias de productos los cuales tienen diferentes tiempos de ensamble, de carga y descarga en los probadores, así como los tiempos de prueba. El cuello de botella en la línea de fabricación son los probadores ya que dependiendo de la familia a la que pertenece el producto, es el tiempo de prueba que requiere para la aprobación de su funcionamiento.

Se tiene una variedad de productos con una serie de factores o restricciones que hacen que una familia determinada de productos utilice un probador en específico ya que no se cuentan con probadores universales y se necesita determinar cuántas piezas de cada tipo hay que fabricar para minimizar el tiempo de inactividad de los probadores, minimizar el tiempo de flujo (tiempo de ensamble).

Se necesita definir metódicamente y en base a los tiempos de prueba de cada familia la mejor secuenciación de los modelos a fabricar en el plan de producción, para no tener paros en la línea de empaque, la mayor eficiencia de cada probador, mantener un flujo continuo en las líneas de ensamble en base a los requerimientos, así como los diferentes métricos de servicio.

En la figura 4 se muestran los requerimientos de tiempo de ensamble de la demanda de cuatro semanas de las diferentes familias que se manufacturan en la unidad de negocio en estudio.

La capacidad graficada considera el tiempo laboral regular de las dos líneas de ensamble, para poder satisfacer los requerimientos es necesario solicitar la aprobación de tiempo extra con el cual el plan de producción se cumple. El planeador de producción de esta unidad de negocios genera un plan producción diario y por turno, es decir elabora doce planes de producción lo anterior le consume tiempo adicional al establecido en su jornada laboral regular, si el plan de producción no ha sido entregado a tiempo al almacén para el correspondiente suministro de la materia prima de las órdenes de producción se corre el riesgo de manera potencial de sufrir paros de línea, el surtimiento urgente de las órdenes de producción ha demostrado errores en la selección de los números de parte de la materia prima, enfocar los recursos del personal del almacén para evitar el paro de esta unidad de negocios a consecuencia el atraso de otras líneas de la planta, entre otros sucesos.

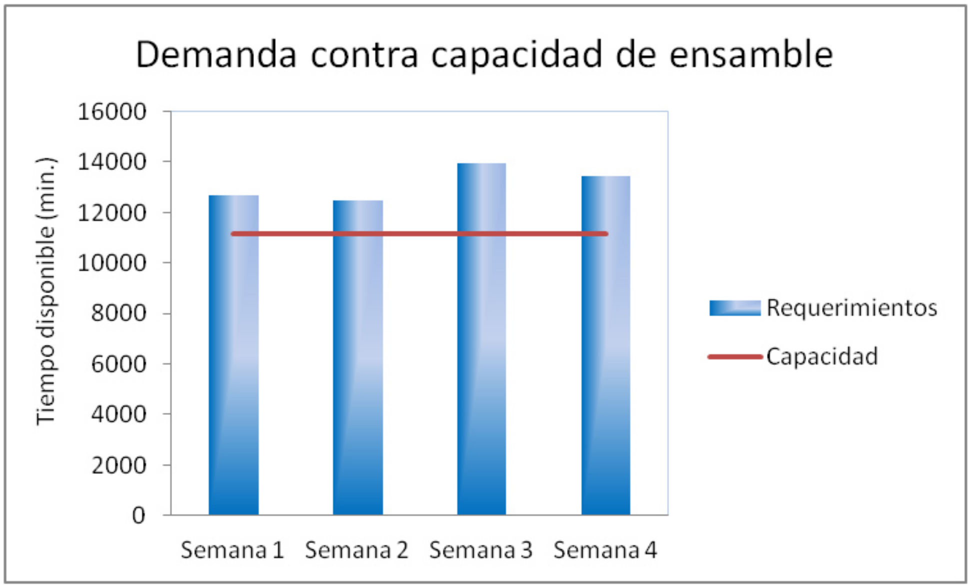


Figura 4. Gráfica de los requerimientos contra la capacidad de ensamble.

Una vez que los productos han sido ensamblados pasan a una prueba de funcionalidad, la cual se lleva a cabo en el probador respectivo, una vez aprobada la prueba se pasa al área de empaque. El área de los probadores es el cuello de botella de todo el proceso, por lo cual los productos después del ensamble son acumulados en estantes en espera de ser probados, si la mezcla del plan de producción no es la correcta se corre el riesgo de tener probadores sin material en proceso, probadores con exceso de carga lo cual genera la acumulación del material en el estante de espera y posteriormente el paro de la línea de ensamble hasta tener espacio disponible para colocar las unidades a probar, en caso contrario se pueden correr modelos rápidos en el proceso de prueba y lentos en el ensamble lo que generará tener probadores en espera de piezas con lo cual el personal operativo de la línea se sentirá presionado y con ello se generan errores de manufactura y rechazos de calidad.

La figura 5, muestra el tiempo requerido para probar las unidades de la demanda semanal contra el tiempo disponible de los probadores. Como se puede observar la capacidad de los probadores no se excede, el problema es tener la mezcla correcta en el ensamble para posteriormente los probadores sean administrados de manera eficiente con la reducción de los tiempos muertos, mantener el flujo continuo de las unidades desde el ensamble hasta el empaque.

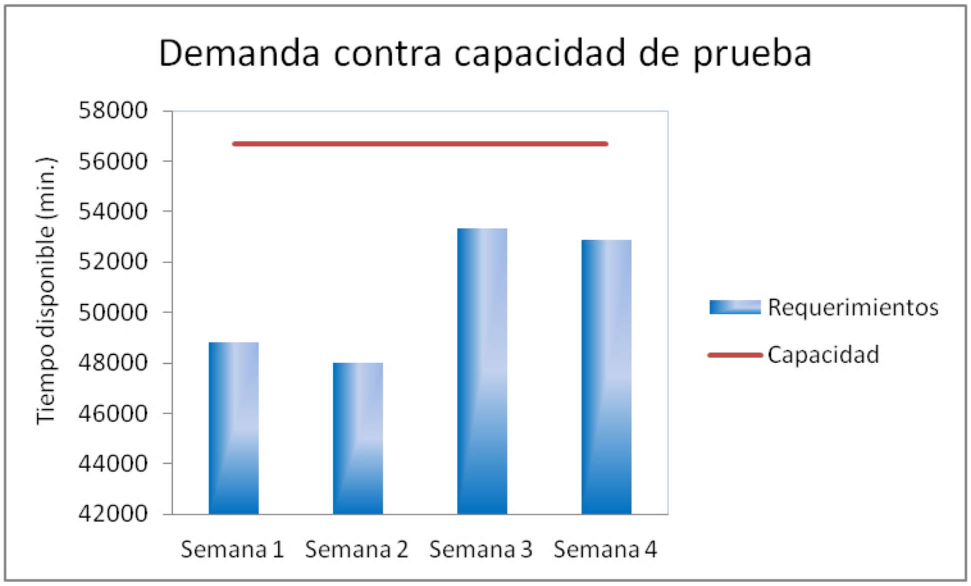


Figura 5. Gráfica de los requerimientos contra la capacidad de ensamble.

Los requerimientos varían de semana en semana por lo cual la mezcla correcta de los productos a ensamblar es de vital importancia en esta unidad de negocio, por lo anterior se ha desarrollado el presente trabajo.

Los modelos de optimización para mezcla de productos y secuenciación de tareas sirven para controlar la capacidad y destacar el exceso o falta de trabajo. La secuenciación especifica el orden en que deben realizarse los trabajos en los centros de trabajo y la mezcla de los productos proporcionarán el plan maestro a seguir en piso.

Los métodos de secuenciación deben cumplir con ciertas reglas de prioridad, las cuales proporcionan lineamientos para establecer la secuencia en que deben realizarse los trabajos.

1.3 Objetivo general

Proponer un modelo matemático para la realización del plan de producción de la línea de producción seleccionada para este trabajo, que permita a corto y largo plazo identificar los problemas de incumplimiento de la demanda, así como los potenciales problemas de servicio a los que se pueden incurrir por la mezcla que requiere el mercado. Establecer una estrategia diaria y semanal que permita la mejor secuenciación de los productos para incrementar el volumen de ventas de la planta. Determinar los problemas operacionales en los cuales se puede incurrir con el plan de producción obtenido del modelo. Establecer un programa de producción general que permita la optimización de los recursos involucrados en la manufactura de los productos.

1.4 Hipótesis

Por medio de la elaboración de un modelo matemático podemos establecer el mejor plan de producción a ejecutar en la línea de producción optimizando el uso de los probadores.

1.5 Metodología

En la figura 6 se presenta el diagrama de flujo con los pasos para el desarrollo del presente trabajo, desde la selección de la línea de producción hasta la publicación en la compañía del modelo matemático, el alcance de este trabajo incluye la validación cuantitativa del modelo matemático, los siguientes pasos serán las validaciones en el piso de producción.

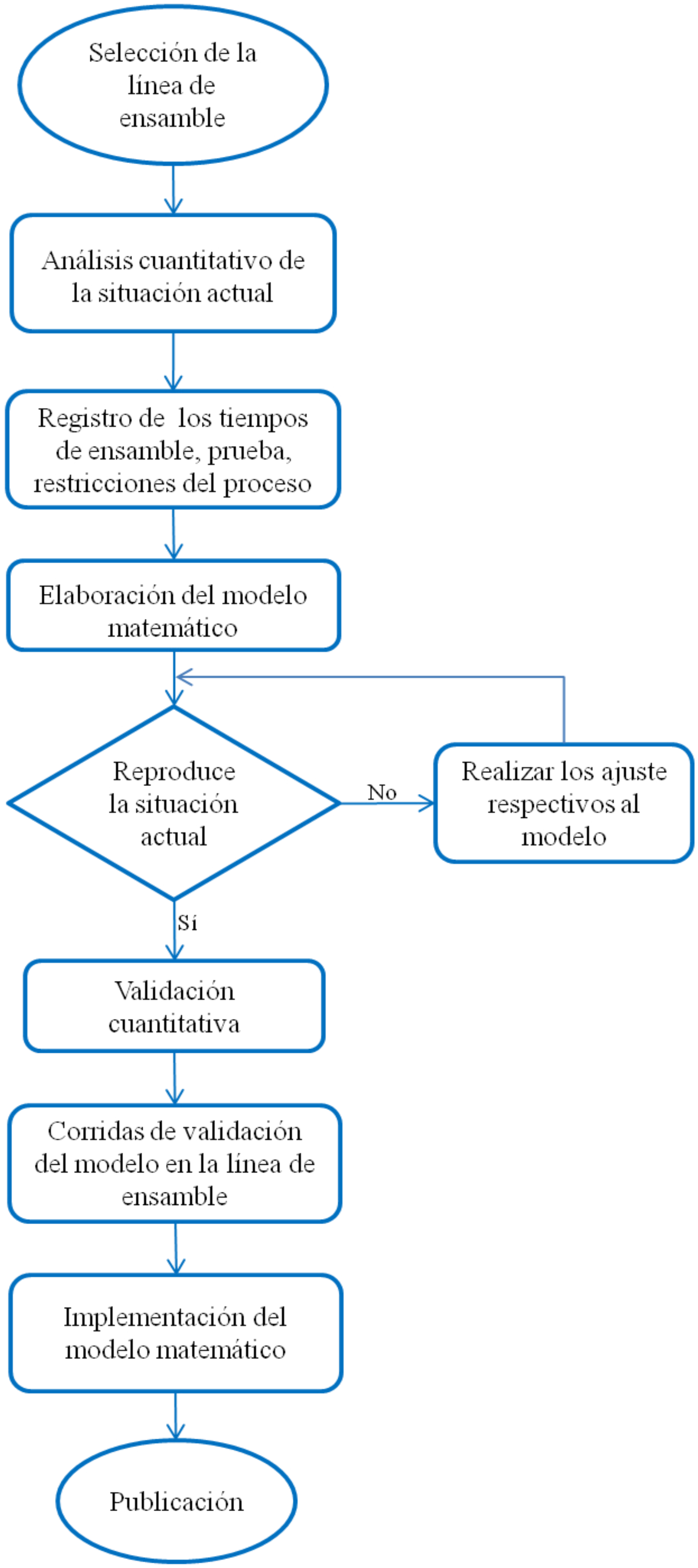


Figura 6. Diagrama de flujo del proceso metodológico

1.6 Justificación

En un ambiente productivo enfocado a los resultados económicos se requiere que los planes de producción sean acordes a los requerimientos del mercado sin sacrificar la utilización del equipo, los recursos humanos, la materia prima, las instalaciones y todos los elementos involucrados.

Para satisfacer la demanda semanal es necesario hacer ajustes a los planes de producción a diario debido a paros de línea por la mezcla que se está corriendo en la línea de ensamble, para ello se tiene que ajustar el plan con cambios de modelo y cantidades, lo cual representa paros de línea, mermas en la productividad, reducción de la meta diaria de producción, pérdidas económicas y la utilización de tiempo extra para cumplir con el plan de producción, por mencionar sólo las más representativas.

La programación lineal ofrece herramientas y la posibilidad de resolver este tipo de problemas por medio de la elaboración de un modelo matemático que defina la mezcla de los productos, cantidad de lote y secuencia para satisfacer la demanda reduciendo los tiempos muertos.

La programación lineal es un conjunto de técnicas racionales de análisis y de resolución de problemas que tiene por objeto ayudar a los responsables en las decisiones sobre asuntos en los que interviene un gran número de variables.

En la literatura existen diversas aplicaciones de la secuenciación y programación de máquinas y trabajos que son de utilidad en la realización de este trabajo.

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES

2.1 Introducción

En este capítulo se presenta el problema de la programación de una línea de producción la cual tiene un número de tareas *n* a llevarse a cabo en *m* líneas de producción para posteriormente ser procesadas en los respectivos probadores, involucra la participación de los diferentes departamentos de soporte principalmente la del planeador de la producción.

A través del paso de los años se han desarrollado diversas teorías y modelos para resolver el problema de la programación y secuenciación que han sido perfeccionadas para su aplicación en los diferentes sistemas de manufactura.

2.2 Breve reseña histórica de la programación lineal

El nombre de programación lineal no procede de la creación de programas de ordenador, sino de un término militar, programar, que significa «realizar planes o propuestas de tiempo para el entrenamiento, la logística o el despliegue de las unidades de combate».

Aunque parece ser que la programación lineal fue utilizada por G. Monge en 1776, se considera a L. V. Kantoróvich uno de sus creadores. La presentó en su libro Métodos matemáticos para la organización y la producción (1939) y la desarrolló en su trabajo Sobre la transferencia de masas (1942). Kantoróvich recibió el premio Nobel de economía en 1975 por sus aportaciones al problema de la asignación óptima de recursos humanos.

La investigación de operaciones en general y la programación lineal en particular recibieron un gran impulso gracias a los ordenadores. Uno de momentos más importantes fue la aparición del método del simplex. Este método, desarrollado por G. B. Dantzig en 1947, consiste en la utilización de un algoritmo para optimizar el valor de la función objetivo teniendo en cuenta las restricciones planteadas. Partiendo de uno de los vértices de la región factible, por ejemplo el vértice A, y aplicando la propiedad: si la función objetivo no toma su valor máximo en el vértice A, entonces existe una arista que parte del vértice A y a lo largo de la cual la función objetivo aumenta se llega a otro vértice. El procedimiento es iterativo, pues mejora los resultados de la función objetivo en cada etapa hasta alcanzar la solución buscada. Ésta se encuentra en un vértice del que no parta ninguna arista a lo largo de la cual la función objetivo aumente [2].

Aunque surgió como aplicación a cuestiones de carácter logístico y militar, es la industria y la economía donde, posteriormente ha encontrado sus aplicaciones más importantes; la programación lineal permite resolver problemas de mezclas, nutrición de animales, distribución de factorías, afectación de personal a distintos puestos de trabajo, almacenaje, planes de producción, escalonamiento de la fabricación, problemas de circulación, planes de optimización de semáforos, estudios de comunicaciones internas, etc.

2.3 Principios de programación y secuenciamiento

La programación lineal se ha convertido a lo largo del tiempo en una herramienta estándar de los negocios. En la industria manufacturera, por ejemplo, se utiliza para determinar los programas de producción, niveles de inventario y procedimientos de mantenimiento; planear la calidad, requisitos de recursos y procesos; y más [3].

En la industria de servicios se emplea ampliamente para el análisis de líneas de espera y programación de operaciones. Muchas veces, cuando falla una técnica matemática, se recurre a la simulación para la validación de los escenarios y los resultados.

En este proyecto, se aborda el tema del desarrollo de un modelo matemático de programación lineal, que integra los diferentes factores de un sistema de manufactura en sus ecuaciones, interpretadas en un lenguaje matemático mediante variables, constantes, restricciones y capacidades.

A continuación se presentan las ideas de Kenneth R. Baker y Dan Trietsch acerca de la programación y secuenciamiento [4].

La teoría de la programación esta primordialmente enfocada a los modelos matemáticos que relacionan los procesos de la programación. El desarrollo de modelos de programación ha sido útil para liderar técnicas de solución que han aportado conocimientos prácticos y han sido una continua interface entre la teoría y la práctica.

La perspectiva teórica es mayormente un acercamiento cuantitativo, éste intenta capturar la forma de la problemática en términos matemáticos, particularmente, este acercamiento cuantitativo comienza con una descripción de recursos y tareas con una traducción de metas específicas interpretadas en una función objetivo.

La función objetivo debe de integrar los costos que dependen en las decisiones de la programación, sin embargo, en la práctica estos costos son difíciles de medir e identificar plenamente.

La función de planeación determina el costo de la operación más alto, así como el que se puede identificar con mayor facilidad, mientras que los costos relacionados con la programación son más difíciles de identificar y comúnmente tienden a ser fijos.

Existen 3 tipos de objetivos determinantes en la toma de decisión que usualmente permanecen en los procesos de programación: cambio, tiempo perdido y flujo de salida.

Cambio: mide el tiempo requerido para terminar una tarea. Tiempo perdido: mide el cumplimiento de una tarea determinada de acuerdo a un tiempo. Flujo de salida: mide la cantidad de trabajo realizado en un periodo de tiempo específico.

Para los 2 primeros objetivos, se necesita realizar un análisis complejo, ya que se puede cuantificar el cambio y el tiempo perdido para una tarea dada, los problemas de programación requieren medidas de desempeño que aplican a un conjunto de tareas en la programación.

Flujo de salida, en contraste, es una medida dada que es aplicable a todo el proceso.

Se categorizan los modelos de programación, por la configuración de los recursos y la naturaleza de las tareas, habrá modelos que involucren una máquina y habrá otros que involucren múltiples maquinas.

Los modelos que contienen una máquina, comúnmente son de etapas simples, en cambio, los modelos que contienen varias máquinas, son modelos que contienen trabajos de múltiples etapas.

En cualquiera de los dos casos, las maquinarias están configuradas en cantidades unitarias o en paralelo.

En un modelo, cuando la cantidad de trabajos no cambia a través del tiempo en la programación, se les llama *modelos estáticos*, en contraste con los sistemas en los que nuevos trabajos se generan a lo largo del tiempo, en este segundo escenario reciben el nombre de *modelos dinámicos* [4].

Tradicionalmente, el estudio y las aplicaciones de los modelos estáticos han sido más extensos, sin embargo, los modelos dinámicos aparentan ser más importantes para aplicaciones parciales. Los sistemas estáticos, a menudo capturan la esencia de los sistemas dinámicos, el análisis de los sistemas estáticos descubre con frecuencia valiosos conocimientos y conocidos principios heurísticos que suelen ser útiles en sistemas dinámicos; cuando se puede asumir que las condiciones del sistema son conocidas con certeza, será llamado *modelo determinístico.*

Existen dos tipos de preocupaciones de factibilidad en los problemas de programación; primero, existen limitantes en la capacidad de las máquinas, segundo, existen restricciones tecnológicas en el orden en la que algunos de los trabajos van a ser procesados.

Una solución a un problema de programación puede ser cualquier resolución posible de estos dos tipos de preocupaciones en los problemas de programación, dicha solución en los problemas de programación responden a 2 diferentes preguntas:

- ¿Qué recurso debe de ser asignado para realizar que tarea?
- ¿Cuándo debería de ser procesado a cada tarea?

En otras palabras un problema de programación permite tomar decisiones de asignación y secuenciamiento.

Desde los principios de la literatura de programación, se ha confiado en los modelos matemáticos para estos dos tipos de problemas de toma de decisión; en desarrollos más recientes se le ha nombrado como programación de seguridad (*safe scheduling*) a los modelos que reconocen también los niveles de servicio.

Los problemas de programación de seguridad, involucran decisiones de aceptación o rechazo de un trabajo, así cuando hacemos compromisos con los clientes, existe la confianza de que este compromiso será cumplido dentro del plazo establecido.

Un acercamiento alternativo de la programación de seguridad, minimiza los costos de programación, incluyendo los costos por retrasos y los costos por tiempo de seguridad; en lugar de especificar un nivel de servicio incierto, este acercamiento determina económicamente el nivel de servicio como parte de la solución.

La necesidad de contabilizar el tiempo de seguridad también tiene importantes implicaciones en las decisiones de secuenciamiento.

En general, entre más alta sea la variación, implica la necesidad de mayor tiempo de seguridad; se puede decir que programaciones muy ajustadas podrán tener grandes variaciones, sin embargo, programar con holgura de seguridad incrementa los costos.

Tradicionalmente, los problemas de programación han sido visualizados como problemas de materia de optimización de recursos, problemas tales como asignación y secuenciamiento.

En algunas ocasiones, la programación es puramente materia de asignación (elegir la mezcla adecuada con recursos limitados), en estos casos, los modelos de programación matemática son usualmente adecuados para llegar a la solución óptima. En algunas otras ocasiones, la programación es puramente secuenciamiento, en estos casos, los problemas son únicos y especiales para la teoría de la programación.

La teoría de la programación incluye una variedad de metodologías, incluso, el campo de la programación se ha convertido un punto focal para nuevos desarrollos de tecnología y aplicaciones, procesos combinatorios de evaluación, técnicas de simulación y acercamientos a soluciones heurísticas.

La selección de la metodología apropiada radica en la naturaleza del modelo y la estructura de la función objetivo, en algunos casos, hace sentido el considerar soluciones alternativas, es por esto que es importante estudiar tanto la metodología, como los modelos.

Una perspectiva de la relación de un problema de programación y sus técnicas de solución proviene del desarrollo en la rama de la ciencia de las computadoras conocida como teoría de la complejidad (*complexity theory*). La noción de complejidad refiere al esfuerzo de cómputo requerido por una solución algorítmica. El esfuerzo de cómputo se describe por orden de magnitud de notación.

Por ejemplo, supongamos que usamos un algoritmo particular para resolver un problema de tamaño de *n* (técnicamente, *n* detona la cantidad de información necesitada para especificar el problema).

El número de cómputos requeridos por el algoritmo está limitado desde un valor específico hasta el valor de *n*. Si el orden de la magnitud de esta función es polinominal, cuando *n* sea más grande, entonces podremos decir que el algoritmo es polinominal, en algunas instancias, si la función tiene magnitud de orden n^2, $O(n^2)$, entonces el algoritmo es poli nominal, por otra parte, si la función es $O(2^n)$, entonces el algoritmo es NO poli nominal.

La clase de problemas llamados NP, incluyen los bien conocidos problemas de dificultad combinatoria; estos problemas son equivalentes en el sentido de que si uno de ellos puede ser resuelto por un algoritmo poli nominal, entonces los otros también lo son.

Problemas de optimización con tanta dificultad o incluso mayor, son conocidos como problemas NP difíciles (*NP-hard problems*) [5]. El uso de este concepto que aplica para algunos problemas de programación NP difíciles, sabremos de antemano que quizá, no podremos encontrar la solución óptima con las técnicas disponibles. En estos casos se sugiere utilizar soluciones heurísticas que tienen un requerimiento computacional más modesto, aunque no garanticen la solución óptima.

Existen algunas instancias para los problemas NP difíciles, que pueden ser utilizadas en aquellos casos en los que la ejecución es más rápida al ser desarrollada en algún programa computacional que en el piso de producción utilizando una secuencia razonable, aun cuando la confiabilidad de los principios heurísticos sea mayor en la práctica, en algunos de los problemas es recomendable utilizar técnicas de simulación que, conceptualmente, es similar al uso de principios heurísticos.

CAPÍTULO 3

PROCEDIMIENTO

3.1 Introducción

Los modelos matemáticos son herramientas de apoyo para la toma de decisiones, por lo cual se propone un modelo matemático para la programación de la demanda semanal para dos líneas de ensamble y sus respectivos probadores, combinando las restricciones del proceso de manufactura, de prueba, la información de admisión de los productos en las líneas de ensamble, en los probadores así como los datos de la demanda.

Los principales elementos requeridos por el modelo matemático incluyen los cuellos de botella, las restricciones del proceso de manufactura, los tiempos de ensamble de las diferentes familias, los tiempos de prueba, la admisión de las familias en las dos líneas de producción así como en los diferentes probadores.

3.2 Descripción del modelo matemático

Se tiene un ambiente de manufactura del tipo hacer para almacenar (*make to stock*), los diferentes productos tienen un flujo estándar repetitivo, es decir tiene un flujo continuo de manufactura con flujo de una pieza a la vez en cada estación y probador.

El modelo matemático a desarrollar se refiere a la elaboración de un plan maestro que proporcione la mezcla a fabricar diariamente de las diferentes familias en un flujo continuo para lo cual se necesitan desarrollar dos modelos, uno que proporcione la mezcla de los productos y otro la secuenciación del plan de producción. El alcance de este trabajo hace referencia a la programación de la producción modelo 1 (mezcla de los productos), el modelo 2 se expone en el trabajo de titulación «Optimización de la secuenciación de un sistema determinístico con alta mezcla mediante la aplicación de un modelo matemático» por el Ing. Eduardo David Cantú Ruiz [6].

El modelo matemático de este trabajo ha sido desarrollado para determinar en base a la demanda semanal la programación diaria de la mezcla de las diferentes familias de productos, la cual nos va a permitir tener una visión general del tiempo regular a utilizar, los tiempos extra a requerir, así como la programación de los probadores para partir de un estándar para revisar si el plan de producción satisface la demanda o bien si es necesario tomar otra serie de decisiones.

El modelo 2 ha sido creado y desarrollado para determinar la secuenciación de la demanda diaria de las líneas de ensamble y los probadores.

3.3 Aplicación del modelo matemático

En esta sección se presenta en detalle el modelo que describe el problema de programación de la mezcla de los productos en un área de manufactura que consiste de dos líneas de ensambles, siete probadores y un área de empaque.

La figura 7 muestra la configuración del área de ensamble de la unidad de negocios en estudio. Se muestra el flujo del ensamble a través de las dos líneas para posteriormente realizar la prueba funcional de cada una de las piezas en los correspondientes probadores una vez concluida satisfactoriamente la prueba se envían las piezas al área de empaque para ser procesadas y enviadas al área de embarques para su respectiva consolidación y embarque.

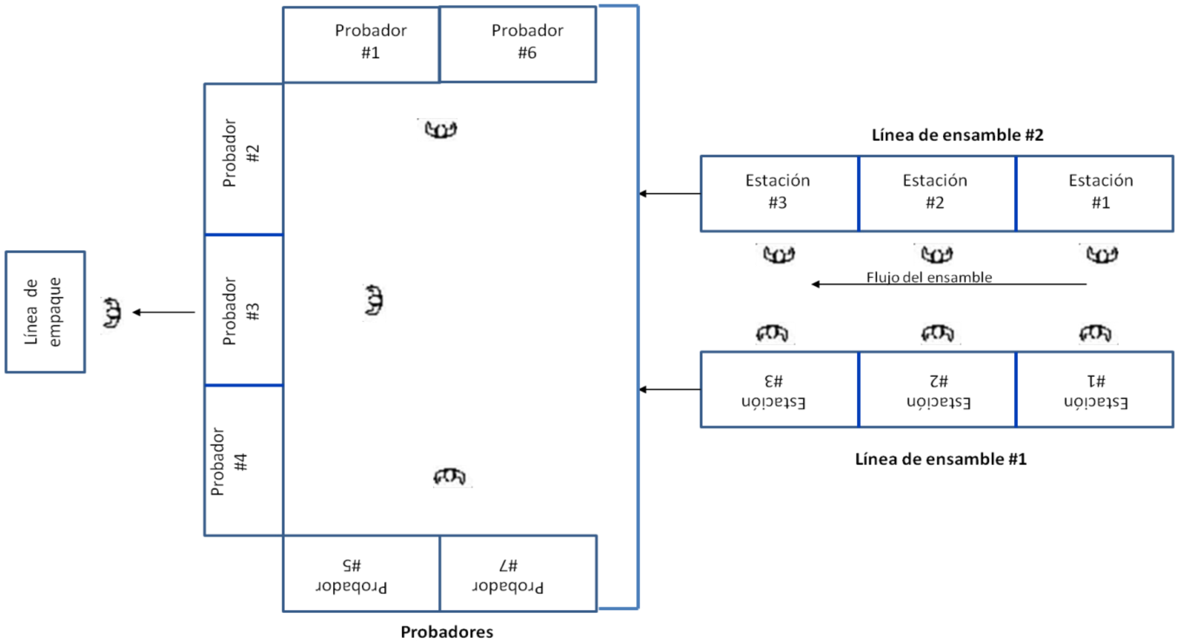


Figura 7. Configuración del área de trabajo

El área de manufactura cuenta con dos líneas de producción para la fabricación de los diversos productos de esta unidad de negocio, la admisión de las familias en su respectiva línea de ensamble se muestra en la tabla 1.

Producto/ Línea	Línea de ensamble #1	Línea de ensamble #2
Famlia A	1	1
Famlia B	1	1
Famlia C	1	1
Famlia D	1	0
Famlia E	1	1
Famlia F	1	0
Famlia G	1	0
Famlia H	1	1
Famlia I	1	0
Famlia J	1	0
Famlia K	1	0

Tabla 1. Matriz binaria de admisión de las familias en su respectiva línea de ensamble: 1 si la línea admite el ensamble de dicha familia, 0 en caso contrario.

Una vez que la pieza ha sido ensamblada se procede a pasar por una prueba de funcionalidad en al menos uno de los siete probadores. En la tabla 2 se muestra la relación de admisión de las diferentes familias en los probadores.

Matriz de admisión	Probador #1	Probador #2	Probador #3	Probador #4	Probador #5	Probador #6	Probador #7
Famlia A	1	1	1	1	1	0	0
Famlia B	1	1	1	1	1	0	0
Famlia C	1	1	0	0	0	1	1
Famlia D	1	1	0	1	0	0	0
Famlia E	1	1	0	0	0	1	1
Famlia F	1	1	0	0	0	0	0
Famlia G	1	1	0	1	0	0	0
Famlia H	1	1	1	1	1	1	1
Famlia I	0	0	1	0	0	0	0
Famlia J	0	0	1	1	0	0	0
Famlia K	0	0	1	1	0	0	0

Tabla 2. Matriz de admisión de las familias en su respectivo probador: 1 si se ensambla al menos un producto de la familia indicada, 0 en caso contrario.

Una vez finalizada la prueba de funcionalidad de manera satisfactoria la pieza es transferida al área de empaque para la colocación de los accesorios correspondientes así como su empaque. Para la realización de los modelos de programación y secuenciación solo se tomaron en cuenta las restricciones que hay en las líneas de ensamble y de prueba.

El modelo matemático cuenta respectivamente con la siguiente información: conjuntos, parámetros, variables y ecuaciones, se asume la realización de un trabajo a la vez en cada línea de ensamble e igualmente un probador admite una pieza a la vez.

3.3.1 Conjuntos

A continuación se presentan los conjuntos del modelo matemático. Los elementos de cada conjunto se denotarán con la misma letra del conjunto pero en minúscula.

I: Líneas de ensamble.

J : Probadores.

F : Familias de los productos a ensamblar. Los elementos de F se denotan con f (11 en total).

F_i: Familias que se ensamblan en la línea i ($F_i \subseteq F$).

F_j: Familias que se prueban en el probador j ($F_j \subseteq F$).

D: Día de la semana.

3.3.2 Parámetros

A continuación se presentan los parámetros utilizados.

w_f: Inventario en proceso a dejar al final de la semana.

w_{0f}: Inventario postergado de la semana anterior.

e_f: Tiempo del subproceso más lento en ensamble para una familia en particular.

t_f: Tiempo del probador para una familia en particular.

h_f: Tiempo de preparación para iniciar el ensamble de una familia en particular.

k_f: Tiempo de preparación para iniciar el probado de una familia.

M_f: Penalización por retraso para una familia.

N_f: Máximo de unidades a probar de una familia en particular.

a_d: Ponderación de preferencia para seleccionar los días de la semana.

C: Penalización por uso de horas extra.

3.3.3 Variables

A continuación se presentan las variables del modelo.

x_{fid}: Cantidad de producto de una familia f a ensamblar el día d.

w_{fd}: Inventario de la cantidad de piezas a probar en el día d+1.

y_{fdi}: Variable binaria, 1 si la familia f se ensambla en la línea i en el día d, 0 en caso contrario.

u_{fjd}: Cantidad de piezas a probar de la familia f en la línea i el día d.

v_{fdj}: Variable binaria, 1 si la familia f se prueba en el probador j en el día d, 0 en caso contrario.

r_{fd}: Tiempo de retraso de las piezas de la familia f en el día d.

s_{fd}: Variable de diseño de holgura de producción.

$\tilde{x}_{fid}$: Cantidad de piezas a ensamblar de una familia f en la línea i el día d en tiempo extra.

p_{di}: Tiempo muerto de la línea i de ensamble en el día d.

q_{dj}: Tiempo muerto del probador j en el día d.

$\tilde{p}_{di}$: Tiempo muerto de la línea de ensamble i el día d en tiempo extra.

$\tilde{q}_{j}$: Tiempo muerto del probador j en tiempo extra.

g_{d}: Variable binaria, 1 si se ocupa tiempo extra en el día d, 0 en caso contrario.

g_{1}: Variable binaria, 1 si se ocupa el primer turno de tiempo extra del domingo, 0 si no.

g_{2}: Variable binaria, 1 si se ocupa el segundo turno de tiempo extra del domingo, 0 si no.

g_{3}: Variable binaria, 1 si se ocupa el tercer turno de tiempo extra del domingo, 0 si no.

$\tilde{y}_{fdi}$: Variable binaria, 1 si se ocupa el tiempo extra para el día d en la línea i, 0 si no.

z: Valor de la función objetivo.

3.3.5 Ecuaciones

A continuación se presentan las ecuaciones del modelo.

$$\text{máx } z = \sum_{d}\sum_{i} a_d p_{di} + \sum_{d}\sum_{j} a_d q_{dj} + \sum_{d}\sum_{i} \tilde{p}_{di} + \sum_{j} \tilde{q}_{xj} - \sum_{d} c g_d - c(g_1 + g_2 + g_3) - \sum_{f}\sum_{d} M_f\, r_{fd} \qquad (1)$$

sujeto a:

$$\sum_{f\in F_i} e_f\, x_{fdi} + \sum_{f\in F_i} h_f\, y_{fdi} + p_{di} = 930. \qquad \forall\, d, i \qquad (2)$$

$$\sum_{f\in F_i} e_f\, \tilde{x}_{fdi} + \sum_{f\in F_i} h_f\, \tilde{y}_{fdi} + \tilde{p}_{di} = 420 g_d. \qquad \forall\, d, i \qquad (3)$$

$$\sum_{f\in F_j} t_f\, u_{fdj} + \sum_{f\in F_j} k_f\, v_{fdj} + q_{dj} = 1350. \qquad \forall\, d, j \qquad (4)$$

$$\sum_{f\in F_j} t_f\, \tilde{u}_{fj} + \sum_{f\in F_j} k_f\, \tilde{v}_{fj} + \tilde{q}_j = 480 g_1 + 450 g_2 + 420 g_3. \qquad \forall\, j \text{ (con } d = 7) \qquad (5)$$

$$\sum_{j} u_{fdj} + w_{fd} = \sum_{i} x_{fdi} + \sum_{i} \tilde{x}_{f(d-1)i} + w_{f(d-1)}. \qquad \forall\, f, \bar{d} \qquad (6)$$

$$\sum_{j} u_{fdj} \geq w_{f(d-1)}. \qquad \forall\, f, d \qquad (7)$$

$$\sum_{j} u_{fdj} + s_{fd} = b_{fd} + s_{f(d-1)}. \qquad \forall\, f, d \qquad (8)$$

$$S_{fd} \leq r_{fd} \qquad \forall\, f, d \qquad (9)$$

$$x_{fdi} \leq M_f\, y_{fdi} \qquad \forall\, f, d, i \qquad (10)$$

$$u_{fdj} \leq N_f\, v_{fdj} \qquad \forall\, f, d, j \qquad (11)$$

$$\tilde{x}_{fdi} \leq M_f \tilde{y}_{fdi} \qquad \forall\, f, d, i \qquad (12)$$

Además se consideran las siguientes restricciones lógicas de las variables.

$$y_{fid},\ v_{fdj},\ g_d, g_{1,}\ g_{2,}\ g_{3,}\ \tilde{y}_{fid} \ \in \{0,1\} \qquad \forall\, f, i, d, j \qquad (13)$$

$$x_{fid},\ u_{fdj},\ w_{fd}, r_{fd}, \tilde{x}_{fdi} \ \in \mathbb{Z}^{+} \qquad \forall\, f, i, d, j \qquad (14)$$

$$p_{di}, q_{dj}, \tilde{p}_{di},\ \tilde{q}_j \ \in \mathbb{R}^{+} \qquad \forall\, f, d, i, j \qquad (15)$$

$$z, S_{fd} \ \in \mathbb{R} \qquad \forall\, f, d, i, j \qquad (16)$$

La restricción (1) define la función objetivo: Maximizar el tiempo libre ponderado tanto en las líneas de ensamble como en los probadores tomando en cuenta los horarios normales así como el tiempo extra considerando una penalización por uso del tiempo extra y los retrasos.

La restricción (2) asegura que la fabricación de las piezas se llevará a cabo solamente en el tiempo disponible regular por día de ensamble de las diferentes familias de productos en la respectiva línea de producción, considerando el tiempo de preparación de la línea de ensamble así como el tiempo más lento del subproceso de cada familia de productos tomando en cuenta el tiempo muerto del ensamble.

La restricción (3) asegura que la fabricación de las piezas se llevará a cabo solamente en el tiempo extra disponible por día de las familias de productos que así lo requieran considerando la admisión de la línea de producción, considerando el tiempo de preparación de la línea de ensamble así como el tiempo más lento del subproceso de cada familia de productos al igual que el tiempo muerto del ensamble.

La restricción (4) indica el tiempo disponible por día de los probadores para restringir la cantidad de piezas a probar de acuerdo a la admisión de las familias en los respectivos probadores. Toma en cuenta una ponderación de preferencia para la selección de los días de la semana con la finalidad de cumplir con los requerimientos del cliente durante los primeros días de la semana para, en lo posible, emplear el tiempo disponible en adelantar los requerimientos de la siguiente semana. Se consideran los tiempos de carga y descarga de los diferentes modelos a probar, también se calcula el tiempo muerto de los probadores.

La restricción (5) determina la cantidad de piezas a probar en el tiempo extra (el tiempo extra de los probadores se considera como el domingo primer turno, segundo turno y/o tercer turno) de acuerdo a la admisión de las familias en los respectivos probadores. Considera una ponderación de preferencia para la selección del turno a trabajar durante el tiempo extra. Se consideran los tiempos de carga y descarga de los diferentes modelos a probar, también se calcula el tiempo muerto de los probadores.

La restricción (6) representa el equilibrio de la cantidad de piezas a probar de una familia en un día más la cantidad de piezas presentes en el inventario los cuales se consideran que son iguales a la cantidad de piezas a probar durante el días más las piezas resultantes del ensamble en el tiempo extra de un día anterior más el inventario pendiente a probar del día.

La restricción (7) representa el material en proceso.

La restricción (8) define la demanda de un período específico de acuerdo a los requerimientos de las diferentes familias.

La restricción (9) expresa la penalización del retraso de las piezas en un día *d*.

La restricción (10) representa la penalización por atraso para una familia considerando la cantidad de piezas a ensamblar en un día *d*.

Por su parte la restricción (11) restringe a la cantidad máxima de piezas a probar de la familia *f* durante el tiempo normal de la jornada de producción.

La restricción (12) representa la penalización por retraso de una familia *f* durante el tiempo extra de los probadores.

Para finalizar, las restricciones (13) a (16) son las conocidas como restricciones lógicas.

3.4 Implementación del modelo en un lenguaje de optimización

La validación del modelo se realizó utilizando la demanda histórica de una semana de la unidad de negocio en estudio, cada una de las diferentes familias cuenta con requerimientos, todas las restricciones del proceso de manufactura fueron compiladas e incluidas en el programa de modelaje utilizado. En la tabla 3 se muestran los datos históricos de los requerimientos de una semana laboral.

Familia	Demanda semanal
f01	226
f02	929
f03	695
f04	115
f05	680
f06	159
f07	210
f08	174
f09	77
f10	8
f11	85

Tabla 3. Demanda semanal histórica de las diferentes familias.

La función objetivo, así como las ecuaciones fueron codificadas en el sistema de modelaje GAMS en una plataforma de Windows7, para las personas no familiarizadas con dicho sistema de modelaje se recomienda la lectura del Sistema General de Modelaje Algebraico (GAMS) localizado en el anexo. La figura 8 muestra un ejemplo del ambiente GAMS.

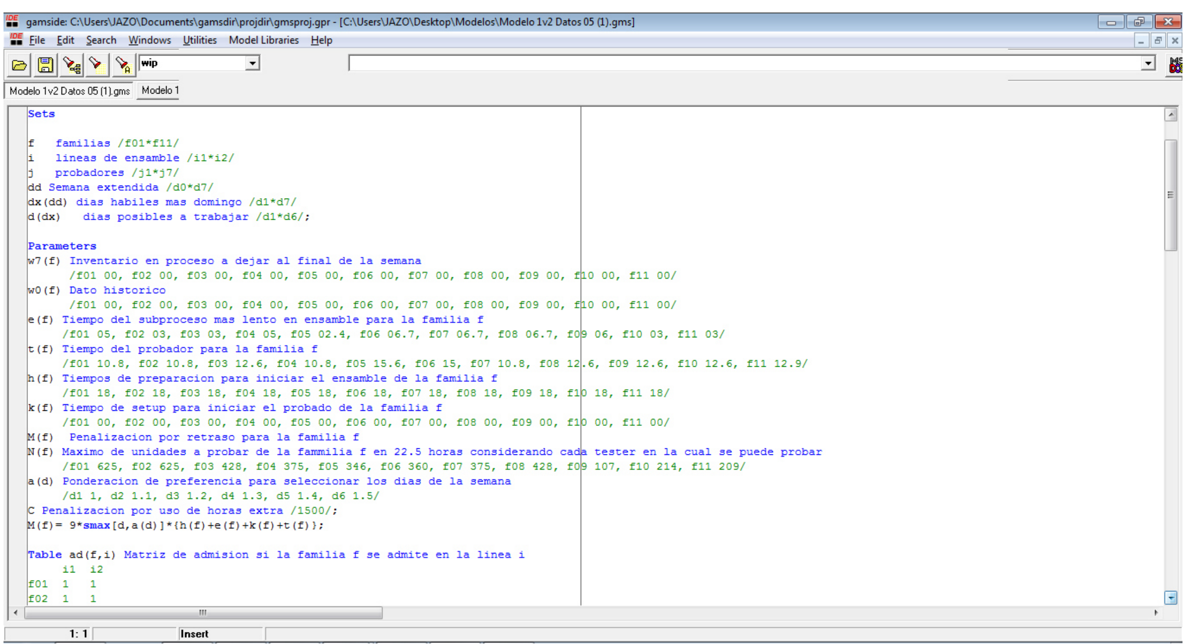


Figura 8. Procesando los datos

El modelo original y sus restricciones fueron evaluados en repetidas ocasiones hasta que los resultados obtenidos lograron reproducir la realidad de la línea de producción. Como es usual en el proceso del modelado matemático, al inicio los resultados obtenidos no eran válidos ya que arrojaban datos ilógicos para lo cual se realizaron las modificaciones correspondientes añadiendo las restricciones necesarias hasta encontrar el modelo que representa la situación real de la unidad de negocio en estudio.

La función objetivo y las restricciones reproducen de manera satisfactoria y aceptable las condiciones actuales y reales de la línea de producción de manera cuantitativa siendo para este trabajo el alcance, los futuros pasos a seguir serán hacer corridas controladas utilizando los resultados del modelo como plan maestro del programa de producción para posteriormente hacer la implementación en piso y su correspondiente documentación en base a las respectivas políticas internas de la empresa.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

4.1 Introducción

Considerando dos línea de producción en las cuales se tienen *n* tareas a realizar para satisfacer la demanda semanal y las restricciones del cuello de botella (los probadores) la función objetivo proporciona la programación maestra óptima del ensamble y de la respectiva prueba funcional de los diferentes productos por día.

El modelo matemático se realizó en base a la configuración del área de trabajo actual, las restricciones propias del proceso de ensamble y de prueba; cada trabajo se realiza uno a la vez, cada familia de productos tiene sus respectivos tiempos de ensamble y prueba. El modelo arroja una asignación de los lotes a fabricar y probar por día en base en la demanda semanal.

Los resultados del modelo matemático para la programación de la mezcla de la producción proporcionarán una visión general de los recursos a necesitar para cumplir la demanda, y serán un apoyo para la toma de decisiones.

4.2 Interpretación de los resultados

Una vez que el modelo matemático ha sido codificado en el respectivo sistema de modelaje se obtiene una serie de datos los cuales es necesario recopilar para su revisión, análisis e interpretación.

La figura 9 muestra un ejemplo del ambiente GAMS de los resultados obtenidos del modelo matemático.

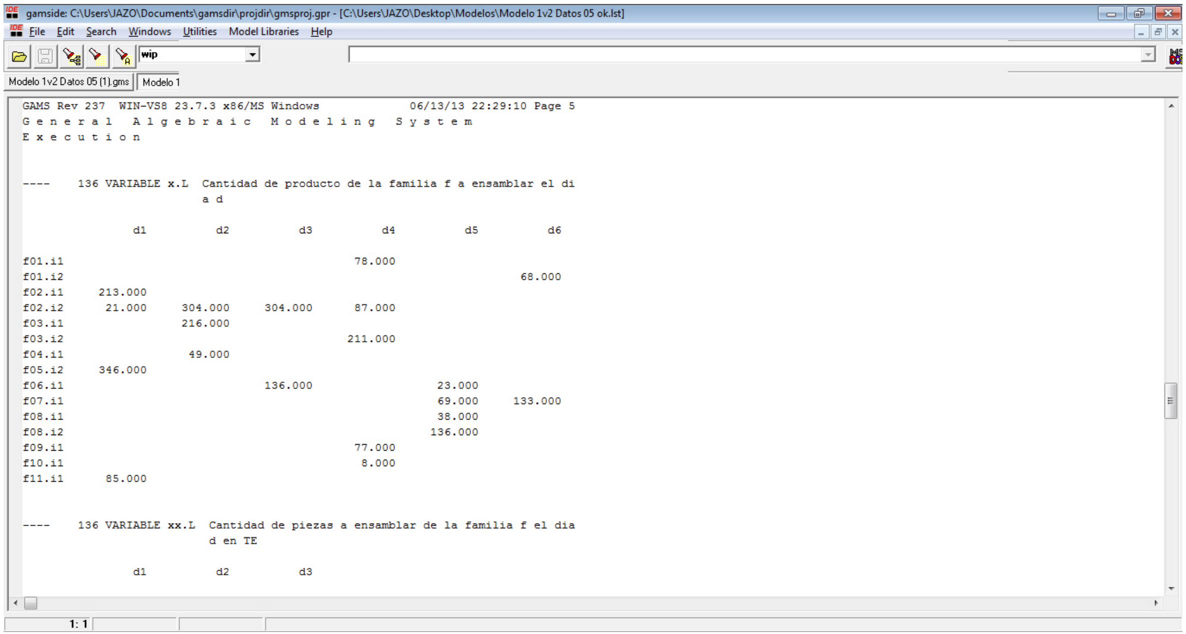


Figura 9. Los resultados de las diferentes familias a fabricar por día.

La mezcla de los productos a ensamblar en el tiempo laboral regular está definida de la siguiente manera por lote de producción a fabricar, por familia, por línea de ensamble y por día, esta información se presenta en la en la tabla 4.

	d1		d2		d3		d4		d5		d6	
Familia/Línea	i1	i2	i1	i2	i1	i2	i1	i2	i1	i2	i1	i2
f01							78					68
f02	213	21		304		304		87				
f03			216					211				
f04			49									
f05		346										
f06					136				23			
f07									69		133	
f08									38	136		
f09							77					
f10							8					
f11	85											
Total	298	367	265	304	136	304	163	298	130	136	133	68
Gran total	**665**		**569**		**440**		**461**		**266**		**201**	

Tabla 4. Cantidad de producto de la familia *f* a ensamblar el día *d* en tiempo regular.

Revisemos el día denominada como $d_{1:}$ la tabla 4 muestra para este día la cantidad de 665 piezas a ensamblar las cuales son distribuidas en la línea i_1 y i_2 con 298 y 367 piezas respectivamente. El ensamble de la línea i_1 comienza con 213 piezas de la familia f02 para posteriormente fabricar 85 piezas de la familia f11. El plan de producción de la línea i_2 corresponde a la fabricación de 21 piezas de la familia f02 posteriormente 346 piezas de la familia f05 para finalizar el día. La línea i_1 fabricará 298 piezas y la línea i_2 un total de 367 piezas durante el día d_1, siendo el gran total 665 piezas.

El modelo matemático proporciona la distribución óptima de la mezcla de las diferentes familias, como podemos observar en la tabla 3 la demanda semanal a satisfacer es de 3358 unidades distribuidas en 11 diferentes familias, los resultados de la tabla 4 suman 2602 unidades lo cual no satisface la demanda semanal, con esta información se requiere la autorización de tiempo extra para el ensamble de las 756 unidades remanentes.

El modelo matemático proporciona la distribución de las unidades a ensamblar en tiempo extra, tal información se presenta en la tabla 5. Se requiere la aprobación de al menos 03 días de tiempo extra para ensamblar 756 unidades.

	d1		d2		d3	
Familia/Línea	i1	i2	i1	i2	i1	i2
f01	80					
f02						
f03			134	134		
f04					66	
f05		167				167
f06						
f07					8	
f08						
f09						
f10						
f11						
Total	80	167	134	134	74	167
Gran total	**247**		**268**		**241**	

Tabla 5. Cantidad de piezas a ensamblar de la familia f el día d en tiempo extra.

Como podemos observar en el día d_1 se programará tiempo extra para el ensamble de 247 piezas distribuidas de la siguiente manera: en la línea i_1 se fabricarán 80 piezas de la familia f01 y en la línea $i2$ un total de 167 piezas de la familia f05, ambos requerimientos suman 247 piezas a ensamblar en tiempo extra.

Los resultados anteriores muestran el plan maestro o bien la programación de la mezcla de las diferentes familias para satisfacer la demanda semanal de la unidad de negocios en estudio. El proceso posterior al ensamble es la prueba funcional de las unidades ensambladas para lo cual como cuello de botella se requiere una adecuada administración de los recursos ya que el tiempo perdido en un cuello de botella no es posible recuperarlo.

El modelo matemático proporciona la distribución de las unidades de las diferentes familias a través de los 7 probadores y proporciona dicha información de manera diaria. La tabla 6 muestra el plan diario para los diferentes probadores.

Si tomamos el día d_1 como ejemplo, observamos la siguiente distribución de las familias a probar en durante el turno, los probadores j_1, j_2, j_6 y j_7 se dedicarán a probar exclusivamente durante la jornada laboral un total de 344 piezas de la familia f05 distribuidas 86 piezas en cada probador. Por otra parte el probador j_3 realizará la prueba de funcionalidad de 85 piezas de la familia f11, al probador j_4 se le asignarán 124 piezas de la familia f02 finalizando el plan de prueba con el probador j_5 con 120 piezas de la familia f05.

La demanda semanal de 3358 unidades se satisface durante la jornada de trabajo regular, se aprecia que durante los primeros 4 días de la semana los 7 probadores tienen unidades en proceso, a partir del día 5 la carga disminuye teniendo probadores sin unidades a probar.

Este comportamiento, deja el espacio de tiempo libre preferentemente en los últimos días de la semana, fue predefinido en el modelo matemático, ya que es un comportamiento deseable en el proceso real.

Familia/ Probador	d1 j1	d1 j2	d1 j3	d1 j4	d1 j5	d1 j6	d1 j7	d2 j1	d2 j2	d2 j3	d2 j4	d2 j5	d2 j6	d2 j7
f01										80				
f02				124	110					44	75	124		
f03								106	4				106	
f04											49			
f05	86	86				86	86		83					86
f06														
f07														
f08														
f09														
f10														
f11			85											
Total	86	86	85	124	110	86	86	106	87	124	124	124	106	86
Gran total	663							757						

Familia/ Probador	d3 j1	d3 j2	d3 j3	d3 j4	d3 j5	d3 j6	d3 j7	d4 j1	d4 j2	d4 j3	d4 j4	d4 j5	d4 j6	d4 j7
f01												78		
f02			124	117	124						50	37		
f03	55					106	106	106	106					
f04											66			
f05													85	82
f06	43	89												4
f07											8			
f08														
f09										77				
f10										8				
f11														
Total	98	89	124	117	124	106	106	106	106	85	124	115	85	86
Gran total	764							707						

Familia/ Probador	d5 j1	d5 j2	d5 j3	d5 j4	d5 j5	d5 j6	d5 j7	d6 j1	d6 j2	d6 j3	d6 j4	d6 j5	d6 j6	d6 j7
f01										68				
f02														
f03														
f04														
f05														
f06						23								
f07	69							124	9					
f08		106				68								
f09														
f10														
f11														
Total	69	106	0	0	0	91	0	124	9	68	0	0	0	0
Gran total	266							201						

Tabla 6. Cantidad de piezas a probar de la familia *f* el día *d* en tiempo regular.

Después de la elaboración del modelo matemático, las ecuaciones fueron codificadas en el sistema de modelaje de optimización, los datos se analizaron, interpretaron y se validó la reproducción de la situación actual de la unidad de negocio, las primeras pruebas no reproducían fielmente al sistema y ciertos ajustes fueron necesarios hasta que los resultados reflejaran las condiciones reales. La validación de una corrida en piso tomando los resultados del modelo como el plan maestro está fuera del alcance de esta tesis, sin embargo serán los siguientes pasos a realizar en el proyecto.

4.3 Análisis de los resultados

Los resultados proporcionados por el modelo matemático definen el plan maestro para las líneas de ensamble y los probadores, en ambos casos se definen los lotes por familia así como su respectiva distribución durante los días a laborar. El plan maestro incluye el plan de producción a ejecutar durante la jornada laboral regular de ensamble al igual que los requerimientos de tiempo extra, de ser necesarios, para satisfacer la demanda en cuestión. El tiempo extra de los probadores está limitado al domingo y solo se tienen tres turnos en los cuales se puede distribuir la carga de trabajo.

El planeador de la línea de producción en estudio dedica 1.5 horas para hacer el plan de producción de un turno. Durante un día se cuenta con tres turnos lo cual representa una inversión de 4.5 horas diarias para la elaboración de los respectivos planes de producción, adicional a las actividades que tiene asignadas el tiempo invertido para la elaboración de los planes de producción, lo cual le provoca al planeador de la producción quedarse horas adicionales a su jornada regular.

La captura de la demanda en el programa de optimización representa aproximadamente 10 minutos, si las restricciones del proceso no han sido modificadas en el piso de producción no es necesario la inversión de tiempo en este punto, una vez capturada la información de la demanda el programa de optimización el tiempo estimado para la obtención de los resultados es aproximadamente de 20 minutos, con la ventaja que es factible hacer cambios en la demanda semanal para cubrir casos extraordinarios y el tiempo a emplear serán de aproximadamente 30 minutos. Los resultados del modelo nos sugieren un ahorro de 21 horas por semana para la elaboración del plan de producción.

La demanda histórica utilizada en el presente trabajo muestra que es necesario solicitar tres turnos extra para el cumplimiento de la demanda semanal. En el caso real fueron requeridos cinco días de tiempo extra. Ejecutando el plan maestro proporcionado por el modelo matemático se tiene un ahorro de 14 horas de tiempo extra por cada asociado que fue requerido para el tiempo extra.

Es necesario seguir con la ejecución de corridas controladas en piso para ver la reacción del cambio y estandarización del plan de producción para poder hacer el estimado de los beneficios a obtener en los métricos de servicio, así como la respuesta ante situaciones extraordinarias de asignación de prioridades y urgencias.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

5.1 Introducción

En este trabajo se presentó un modelo matemático que representa un proceso de manufactura de una planta industrial. Se representaron en ecuaciones las diferentes restricciones presentes en las líneas de ensambles y de los probadores. Se trabajó con datos reales de la demanda a satisfacer. Se consideraron los problemas y situaciones que se presentan al programar y ejecutar el plan de producción.

La implicación práctica del presente trabajo es la programación de la mezcla de los diferentes productos que se ensamblan para obtener la programación diaria partiendo de la demanda semanal.

5.2 Contribución

El modelo matemático proporciona un plan maestro para las líneas de ensamble así como para los probadores lo cual cumplirá la función de una herramienta de apoyo para la toma de decisiones para determinar el programa de producción, la solicitud del tiempo extra y la administración de los recursos.

Hay que tomar en consideración que el modelo matemático desarrollado proporcionará un plan maestro a seguir y su cumplimiento estará determinado por la administración correcta de todos los recursos que rodean la manufactura de los productos así como la ejecución. Un no cumplimiento al 100% del plan maestro tiene más de una implicación que ya en el piso de producción será necesario analizar para determinar las causas raíz y acciones a seguir.

Los resultados mostraron una similitud con la manera en que el planeador de producción realiza el plan de producción, facilitando la elaboración, reducción del tiempo para la elaboración del plan para tener un mayor tiempo en el análisis de los datos para la toma de decisiones, la administración de los recursos para los casos en que los requerimientos exceden la capacidad y viceversa.

El modelo matemático muestra diversas ventajas contra la planeación manual de la producción, tales como estandarización, rapidez, disponibilidad de hacer combinaciones hasta obtener la combinación óptima, entre otros.

Se validó la efectividad del modelo matemático al resolver satisfactoriamente la programación de la mezcla de las líneas de líneas de ensamble y los probadores de manera cuantitativa.

El siguiente paso sería realizar la validación del modelo en el piso de producción tomando como plan maestro la solución del modelo matemático.

5.3 Calidad de datos

El modelo matemático fue diseñado tomando en cuenta las restricciones a las cuales se enfrentan los departamentos operativos de la línea, si dichas restricciones cambian es necesario que sean reflejadas apropiadamente en la ecuaciones del modelo de lo contrario los resultados no serán acordes a la realidad.

Hay eventos que son impredecibles por los cuales es necesario revisar de manera frecuente la veracidad de los diferentes elementos en el modelo.

ANEXO A.1

GAMS

El Sistema General de Modelaje Algebraico (GAMS, por sus siglas en inglés) está diseñado específicamente para modelar problemas de optimización tanto lineales, no lineales o entero-mixtos [7].

El sistema es especialmente útil para problemas que sean grandes y complejos. GAMS está disponible en versiones para computadores personales, estaciones de trabajo, bases de datos y súper computadores.

GAMS le permite al usuario concentrarse en el problema a modelar haciendo que el planteamiento del problema sea simple. El sistema se toma el trabajo en los detalles que consumen más tiempo de maquinas especificas e implementación de *software*.

GAMS es especialmente útil para problemas únicos que sean grandes y complejos que pueden necesitar muchas revisiones antes de establecer el modelo final. El sistema modela problemas en una manera compacta y natural. El usuario puede cambiar la formulación del problema con facilidad, cambiar de un tipo de solucionador a otro y hasta convertir el problema de lineal a no lineal sin problemas.

Características Importantes

- Tecnología de modelaje robusta y dimensionable.
- Hecho a la medida para aplicaciones complejas, de modelaje a gran escala.
- Aumento de productividad a través de un ambiente de desarrollo eficiente.
- Una ancha red académica y comercial.
- Más de 30 años de experiencia en la industria y academia.

Vista General del Sistema y Características

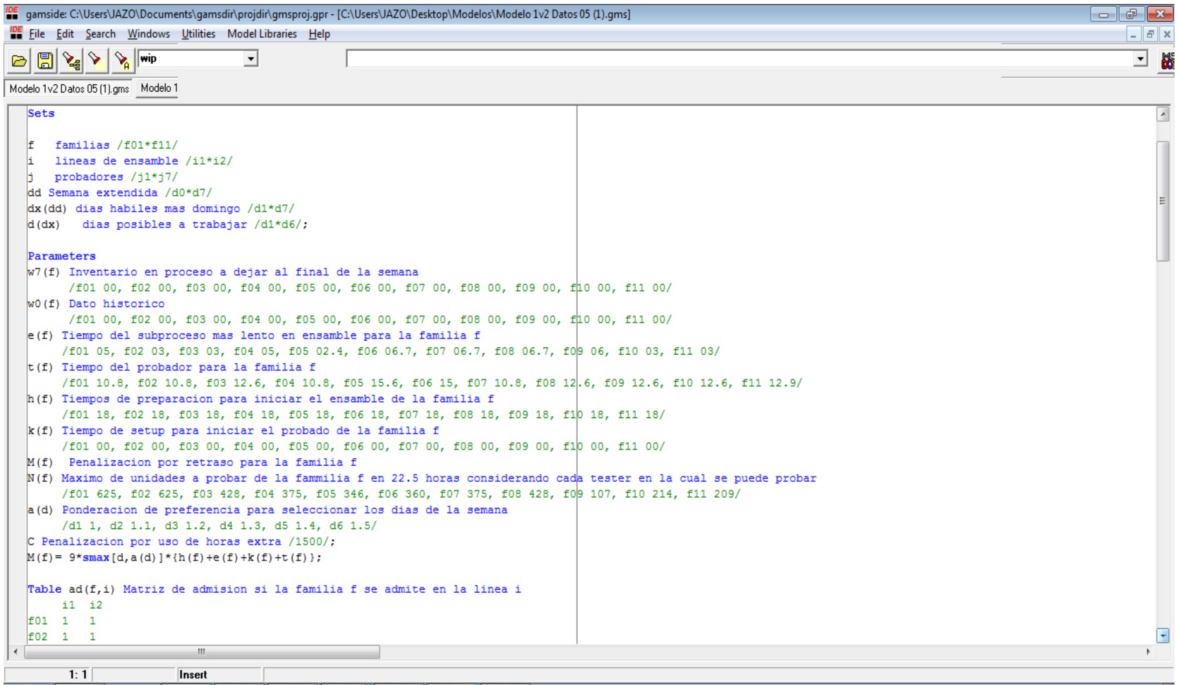
El modelado y optimización de GAMS se basa en una arquitectura abierta, que permita comunicación libre de irregularidades con constitución integrados (por ejemplo, solucionadores de optimización) y sistemas externos.

Las aplicaciones de GAMS son portátiles a través de diferentes plataformas (incluyendo Windows de 32/64bit, Linux, Mac OS X, AIX, HP-UX, Solaris).

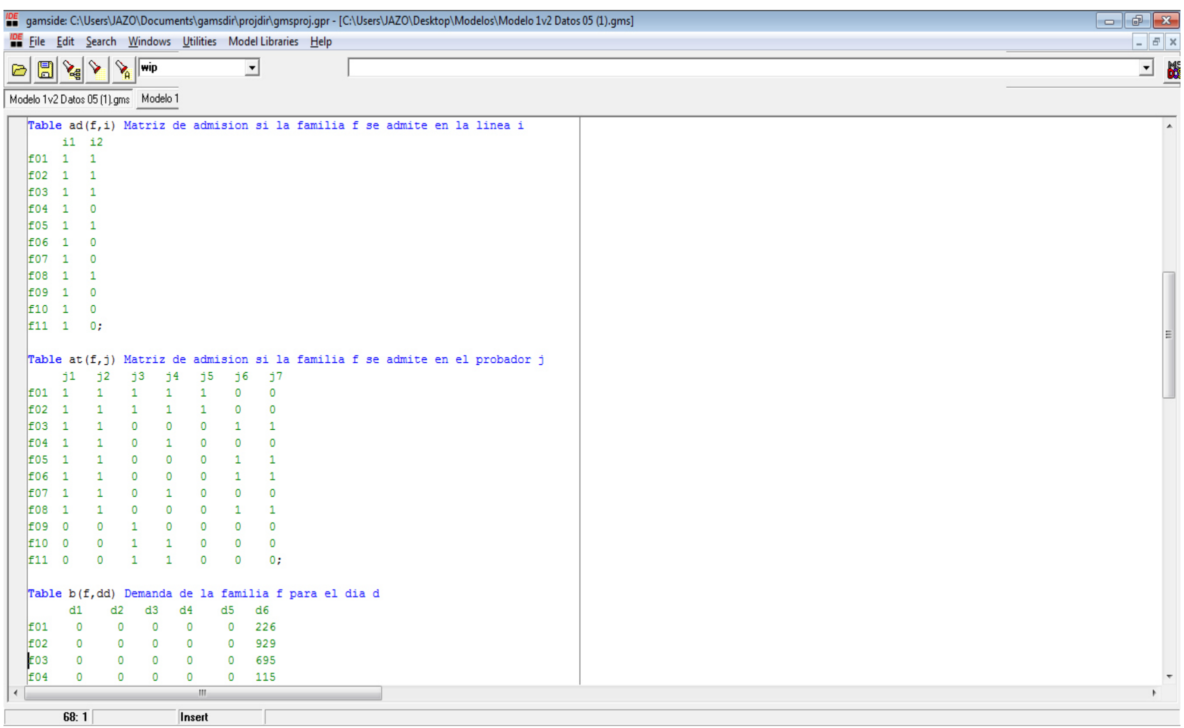
GAMS provee un portafolio único en su género de solucionadores con la última tecnología en optimizadores y también con solucionadores especiales para procesos estocásticos y optimización global.

ANEXO A.2

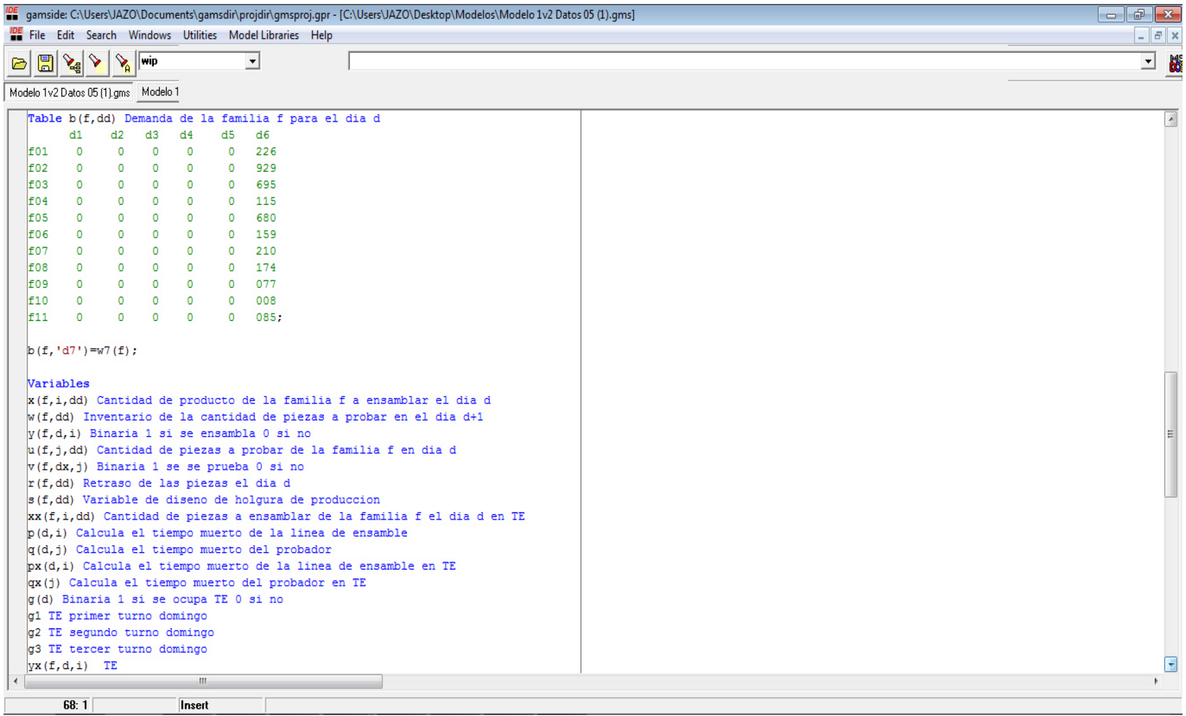
PROCESAMIENTO DE LOS DATOS EN GAMS

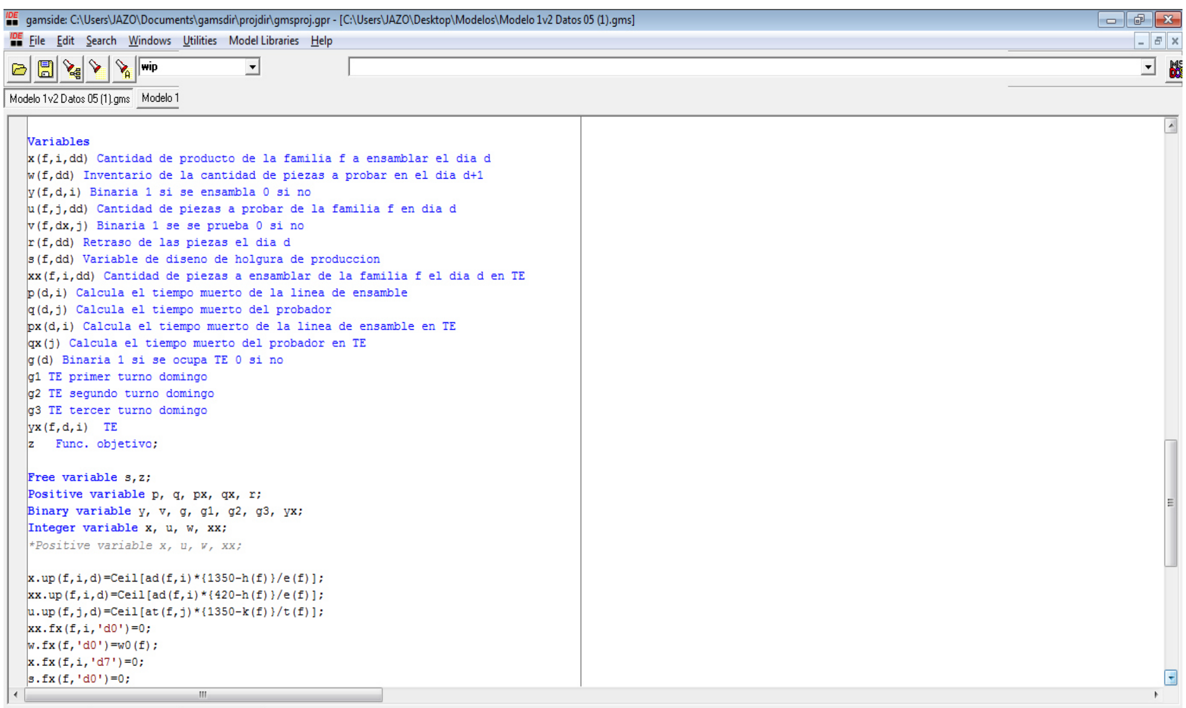


```
Sets

f   familias /f01*f11/
i   lineas de ensamble /i1*i2/
j   probadores /j1*j7/
dd Semana extendida /d0*d7/
dx(dd) dias habiles mas domingo /d1*d7/
d(dx)   dias posibles a trabajar /d1*d6/;

Parameters
w7(f) Inventario en proceso a dejar al final de la semana
      /f01 00, f02 00, f03 00, f04 00, f05 00, f06 00, f07 00, f08 00, f09 00, f10 00, f11 00/
w0(f) Dato historico
      /f01 00, f02 00, f03 00, f04 00, f05 00, f06 00, f07 00, f08 00, f09 00, f10 00, f11 00/
e(f) Tiempo del subproceso mas lento en ensamble para la familia f
     /f01 05, f02 03, f03 03, f04 05, f05 02.4, f06 06.7, f07 06.7, f08 06.7, f09 06, f10 03, f11 03/
t(f) Tiempo del probador para la familia f
     /f01 10.8, f02 10.8, f03 12.6, f04 10.8, f05 15.6, f06 15, f07 10.8, f08 12.6, f09 12.6, f10 12.6, f11 12.9/
h(f) Tiempos de preparacion para iniciar el ensamble de la familia f
     /f01 18, f02 18, f03 18, f04 18, f05 18, f06 18, f07 18, f08 18, f09 18, f10 18, f11 18/
k(f) Tiempo de setup para iniciar el probado de la familia f
     /f01 00, f02 00, f03 00, f04 00, f05 00, f06 00, f07 00, f08 00, f09 00, f10 00, f11 00/
M(f)  Penalizacion por retraso para la familia f
N(f) Maximo de unidades a probar de la fammilia f en 22.5 horas considerando cada tester en la cual se puede probar
     /f01 625, f02 625, f03 428, f04 375, f05 346, f06 360, f07 375, f08 428, f09 107, f10 214, f11 209/
a(d) Ponderacion de preferencia para seleccionar los dias de la semana
     /d1 1, d2 1.1, d3 1.2, d4 1.3, d5 1.4, d6 1.5/
C Penalizacion por uso de horas extra /1500/;
M(f)= 9*smax[d,a(d)]*{h(f)+e(f)+k(f)+t(f)};

Table ad(f,i) Matriz de admision si la familia f se admite en la linea i
     i1  i2
f01  1   1
f02  1   1
```



```
Table ad(f,i) Matriz de admision si la familia f se admite en la linea i
     i1  i2
f01  1   1
f02  1   1
f03  1   1
f04  1   0
f05  1   1
f06  1   0
f07  1   0
f08  1   1
f09  1   0
f10  1   0
f11  1   0;

Table at(f,j) Matriz de admision si la familia f se admite en el probador j
     j1   j2   j3   j4   j5   j6   j7
f01  1    1    1    1    1    0    0
f02  1    1    1    1    1    0    0
f03  1    1    0    0    0    1    1
f04  1    1    0    1    0    0    0
f05  1    1    0    0    0    1    1
f06  1    1    0    0    0    1    1
f07  1    1    0    1    0    0    0
f08  1    1    0    0    0    1    1
f09  0    0    1    0    0    0    0
f10  0    0    1    1    0    0    0
f11  0    0    1    1    0    0    0;

Table b(f,dd) Demanda de la familia f para el dia d
      d1     d2    d3    d4     d5    d6
f01    0      0     0     0      0    226
f02    0      0     0     0      0    929
f03    0      0     0     0      0    695
f04    0      0     0     0      0    115
```


gamside: C:\Users\JAZO\Documents\gamsdir\projdir\gmsproj.gpr - [C:\Users\JAZO\Desktop\Modelos\Modelo 1v2 Datos 05 (1).gms]
File Edit Search Windows Utilities Model Libraries Help
wip
Modelo 1v2 Datos 05 (1).gms
Modelo 1
Table b(f,dd) Demanda de la familia f para el dia d
d1 d2 d3 d4 d5 d6
f01 0 0 0 0 0 226
f02 0 0 0 0 0 929
f03 0 0 0 0 0 695
f04 0 0 0 0 0 115
f05 0 0 0 0 0 680
f06 0 0 0 0 0 159
f07 0 0 0 0 0 210
f08 0 0 0 0 0 174
f09 0 0 0 0 0 077
f10 0 0 0 0 0 008
f11 0 0 0 0 0 085;
b(f,'d7')=w7(f);
Variables
x(f,i,dd) Cantidad de producto de la familia f a ensamblar el dia d
w(f,dd) Inventario de la cantidad de piezas a probar en el dia d+1
y(f,d,i) Binaria 1 si se ensambla 0 si no
u(f,j,dd) Cantidad de piezas a probar de la familia f en dia d
v(f,dx,j) Binaria 1 se se prueba 0 si no
r(f,dd) Retraso de las piezas el dia d
s(f,dd) Variable de diseno de holgura de produccion
xx(f,i,dd) Cantidad de piezas a ensamblar de la familia f el dia d en TE
p(d,i) Calcula el tiempo muerto de la linea de ensamble
q(d,j) Calcula el tiempo muerto del probador
px(d,i) Calcula el tiempo muerto de la linea de ensamble en TE
qx(j) Calcula el tiempo muerto del probador en TE
g(d) Binaria 1 si se ocupa TE 0 si no
g1 TE primer turno domingo
g2 TE segundo turno domingo
g3 TE tercer turno domingo
yx(f,d,i) TE
68: 1
Insert


gamside: C:\Users\JAZO\Documents\gamsdir\projdir\gmsproj.gpr - [C:\Users\JAZO\Desktop\Modelos\Modelo 1v2 Datos 05 (1).gms]
File Edit Search Windows Utilities Model Libraries Help
wip
Modelo 1v2 Datos 05 (1).gms
Modelo 1
Variables
x(f,i,dd) Cantidad de producto de la familia f a ensamblar el dia d
w(f,dd) Inventario de la cantidad de piezas a probar en el dia d+1
y(f,d,i) Binaria 1 si se ensambla 0 si no
u(f,j,dd) Cantidad de piezas a probar de la familia f en dia d
v(f,dx,j) Binaria 1 se se prueba 0 si no
r(f,dd) Retraso de las piezas el dia d
s(f,dd) Variable de diseno de holgura de produccion
xx(f,i,dd) Cantidad de piezas a ensamblar de la familia f el dia d en TE
p(d,i) Calcula el tiempo muerto de la linea de ensamble
q(d,j) Calcula el tiempo muerto del probador
px(d,i) Calcula el tiempo muerto de la linea de ensamble en TE
qx(j) Calcula el tiempo muerto del probador en TE
g(d) Binaria 1 si se ocupa TE 0 si no
g1 TE primer turno domingo
g2 TE segundo turno domingo
g3 TE tercer turno domingo
yx(f,d,i) TE
z Func. objetivo;
Free variable s,z;
Positive variable p, q, px, qx, r;
Binary variable y, v, g, g1, g2, g3, yx;
Integer variable x, u, w, xx;
*Positive variable x, u, w, xx;
x.up(f,i,d)=Ceil[ad(f,i)*{1350-h(f)}/e(f)];
xx.up(f,i,d)=Ceil[ad(f,i)*{420-h(f)}/e(f)];
u.up(f,j,d)=Ceil[at(f,j)*{1350-k(f)}/t(f)];
xx.fx(f,i,'d0')=0;
w.fx(f,'d0')=w0(f);
x.fx(f,i,'d7')=0;
s.fx(f,'d0')=0;

gamside: C:\Users\JAZO\Documents\gamsdir\projdir\gmsproj.gpr - [C:\Users\JAZO\Desktop\Modelos\Modelo 1v2 Datos 05 (1).gms]

File Edit Search Windows Utilities Model Libraries Help

Modelo 1v2 Datos 05 (1).gms | Modelo 1

```
Free variable s,z;
Positive variable p, q, px, qx, r;
Binary variable y, v, g, g1, g2, g3, yx;
Integer variable x, u, w, xx;
*Positive variable x, u, w, xx;

x.up(f,i,d)=Ceil[ad(f,i)*{1350-h(f)}/e(f)];
xx.up(f,i,d)=Ceil[ad(f,i)*{420-h(f)}/e(f)];
u.up(f,j,d)=Ceil[at(f,j)*{1350-k(f)}/t(f)];
xx.fx(f,i,'d0')=0;
w.fx(f,'d0')=w0(f);
x.fx(f,i,'d7')=0;
s.fx(f,'d0')=0;

Equations
Obj, Assy(d,i), Assyx(d,i), Test(d,j), Testx(j), Bal(f,dd), Wip(f,d), Demand(f,dd), Fine(f,dd)
MaxAssy(f,d,i), MaxTest(f,dx,j), MaxAssyx(f,d,i);

Obj.. z=e=Sum[(d,i), a(d)*p(d,i)]+ sum[(d,j),a(d)*q(d,j)]+sum[(d,i),px(d,i)]+ sum[j,qx(j)]
-sum[d, c*g(d)]-c*{g1+g2+g3}-sum[(f,dd),M(f)*r(f,dd)];
Assy(d,i).. Sum[f$ad(f,i), e(f)*x(f,i,d)]+ sum[f$ad(f,i), h(f)*y(f,d,i)] + p(d,i)=e=930;
Assyx(d,i).. Sum[f$ad(f,i), e(f)*xx(f,i,d)]+ sum[f$ad(f,i), h(f)*yx(f,d,i)] + px(d,i)=e=420*g(d);
Test(d,j).. Sum[f$at(f,j), t(f)*u(f,j,d)]+ sum[f$at(f,j), k(f)*v(f,d,j)] + q(d,j)=e=1350;
Testx(j).. Sum[f$at(f,j), t(f)*u(f,j,'d7')]+ sum[f$at(f,j), k(f)*v(f,'d7',j)] + qx(j)=e=480*g1+450*g2+420*g3;
Bal(f,dd)${ord(dd)>=2}.. Sum[j, u(f,j,dd)]+ w(f,dd)=e= sum[i, x(f,i,dd)]+ sum[i, xx(f,i,dd-1)]+w(f,dd-1);
Wip(f,d).. Sum[j, u(f,j,d)]=g= w(f,d-1);
Demand(f,dd)${ord(dd)>=2}.. Sum [j, u(f,j,dd)]+ s(f,dd) =e= b(f,dd) + s(f, dd-1);
Fine(f,dd).. s(f,dd) =l= r(f,dd);
MaxAssy(f,d,i).. x(f,i,d)=l= M(f)*y(f,d,i);
MaxTest(f,dx,j).. u(f,j,dx)=l=N(f)*v(f,dx,j);
MaxAssyx(f,d,i).. xx(f,i,d)=l= M(f)*yx(f,d,i);

Options LimCol=0, LimRow=0;
Options OptCR=0, ResLim=3600;
```

68: 1 | Insert

gamside: C:\Users\JAZO\Documents\gamsdir\projdir\gmsproj.gpr - [C:\Users\JAZO\Desktop\Modelos\Modelo 1v2 Datos 05 (1).gms]

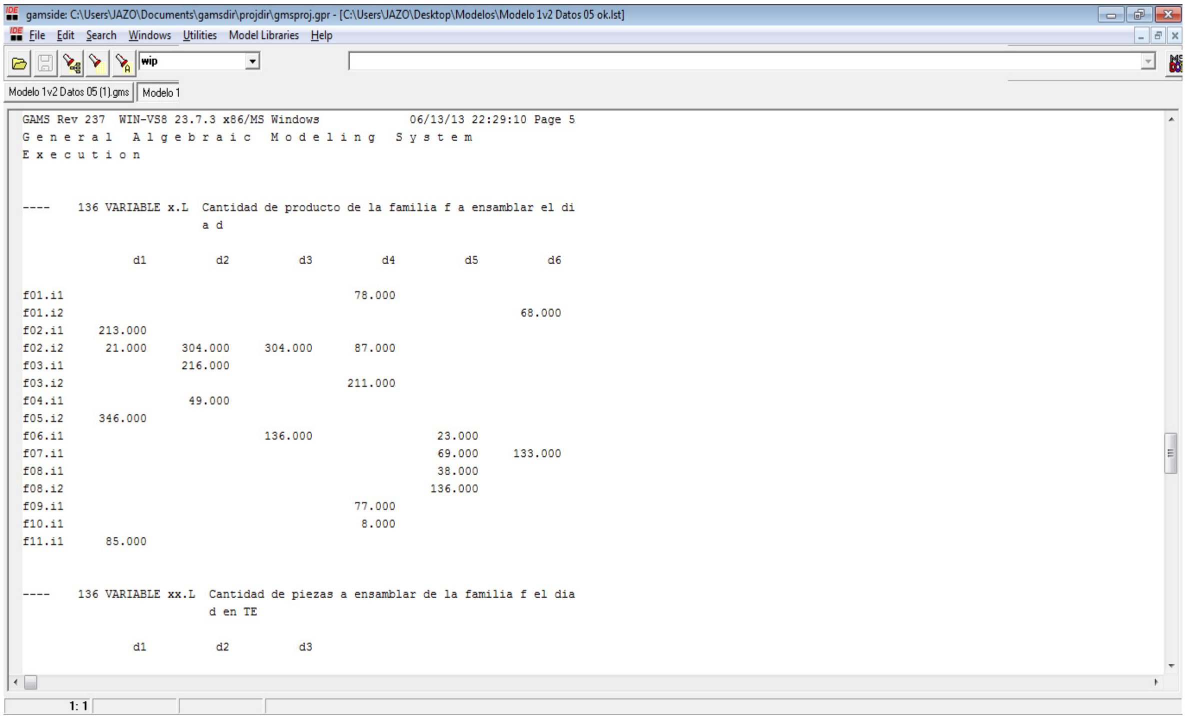
File Edit Search Windows Utilities Model Libraries Help

Modelo 1v2 Datos 05 (1).gms | Modelo 1

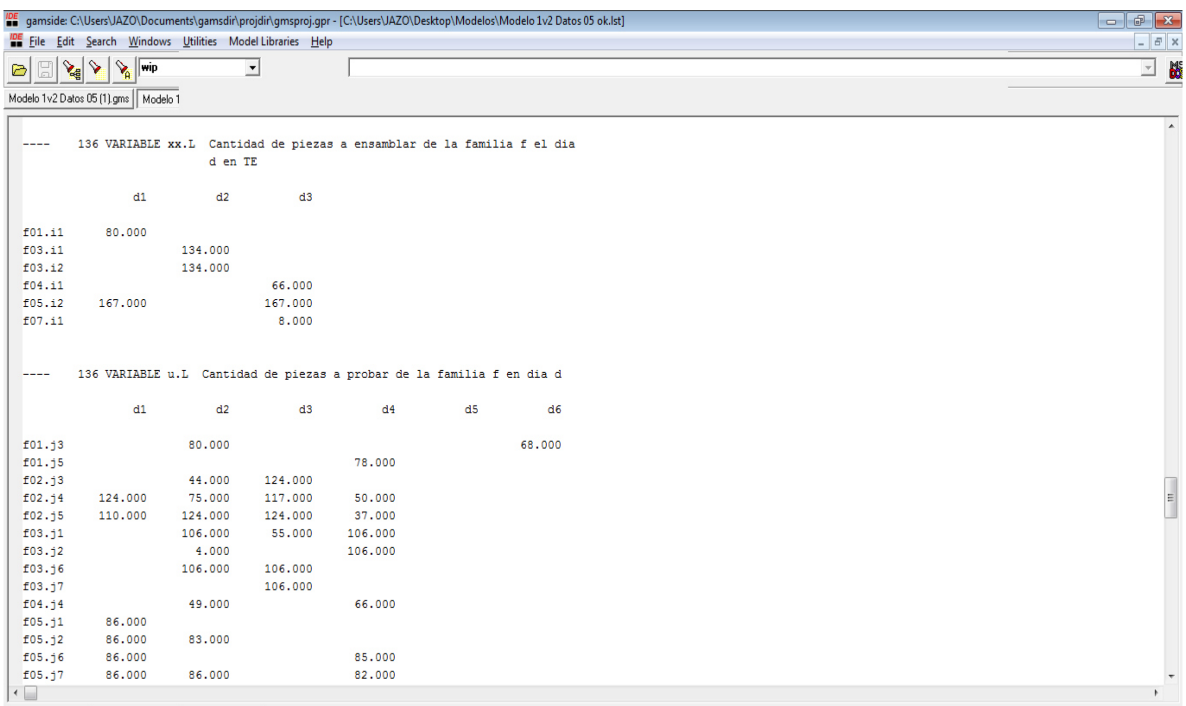
```
Equations
Obj, Assy(d,i), Assyx(d,i), Test(d,j), Testx(j), Bal(f,dd), Wip(f,d), Demand(f,dd), Fine(f,dd)
MaxAssy(f,d,i), MaxTest(f,dx,j), MaxAssyx(f,d,i);

Obj.. z=e=Sum[(d,i), a(d)*p(d,i)]+ sum[(d,j),a(d)*q(d,j)]+sum[(d,i),px(d,i)]+ sum[j,qx(j)]
-sum[d, c*g(d)]-c*{g1+g2+g3}-sum[(f,dd),M(f)*r(f,dd)];
Assy(d,i).. Sum[f$ad(f,i), e(f)*x(f,i,d)]+ sum[f$ad(f,i), h(f)*y(f,d,i)] + p(d,i)=e=930;
Assyx(d,i).. Sum[f$ad(f,i), e(f)*xx(f,i,d)]+ sum[f$ad(f,i), h(f)*yx(f,d,i)] + px(d,i)=e=420*g(d);
Test(d,j).. Sum[f$at(f,j), t(f)*u(f,j,d)]+ sum[f$at(f,j), k(f)*v(f,d,j)] + q(d,j)=e=1350;
Testx(j).. Sum[f$at(f,j), t(f)*u(f,j,'d7')]+ sum[f$at(f,j), k(f)*v(f,'d7',j)] + qx(j)=e=480*g1+450*g2+420*g3;
Bal(f,dd)${ord(dd)>=2}.. Sum[j, u(f,j,dd)]+ w(f,dd)=e= sum[i, x(f,i,dd)]+ sum[i, xx(f,i,dd-1)]+w(f,dd-1);
Wip(f,d).. Sum[j, u(f,j,d)]=g= w(f,d-1);
Demand(f,dd)${ord(dd)>=2}.. Sum [j, u(f,j,dd)]+ s(f,dd) =e= b(f,dd) + s(f, dd-1);
Fine(f,dd).. s(f,dd) =l= r(f,dd);
MaxAssy(f,d,i).. x(f,i,d)=l= M(f)*y(f,d,i);
MaxTest(f,dx,j).. u(f,j,dx)=l=N(f)*v(f,dx,j);
MaxAssyx(f,d,i).. xx(f,i,d)=l= M(f)*yx(f,d,i);

Options LimCol=0, LimRow=0;
Options OptCR=0, ResLim=3600;
Model Mezcla /all/;
solve Mezcla using mip maximizing z;
Display x.l,xx.l,u.l,r.l,s.l;
```

68: 1 | Insert

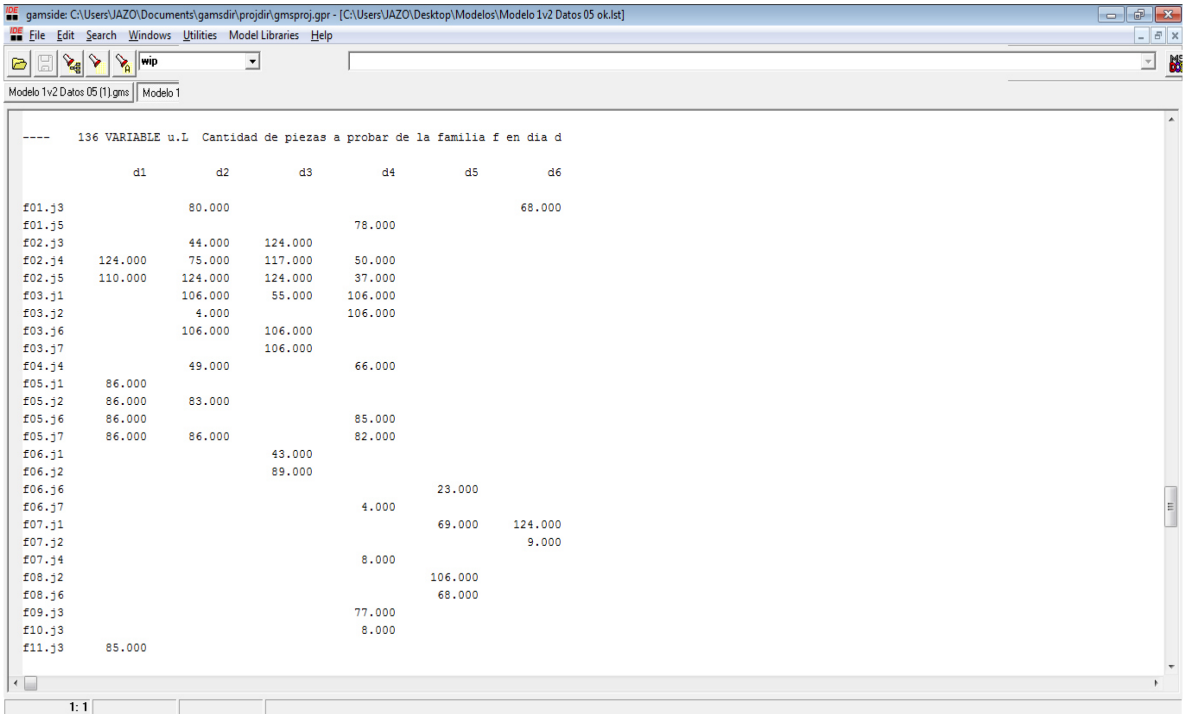
A continuación se muestran las pantallas con los resultados del modelo.




```
GAMS Rev 237  WIN-VS8 23.7.3 x86/MS Windows            06/13/13 22:29:10 Page 5
G e n e r a l   A l g e b r a i c   M o d e l i n g   S y s t e m
E x e c u t i o n


----    136 VARIABLE x.L  Cantidad de producto de la familia f a ensamblar el di
                          a d

               d1          d2          d3          d4          d5          d6

f01.i1                                         78.000
f01.i2                                                                 68.000
f02.i1    213.000
f02.i2     21.000     304.000     304.000      87.000
f03.i1                216.000
f03.i2                                        211.000
f04.i1                 49.000
f05.i2    346.000
f06.i1                            136.000                  23.000
f07.i1                                                     69.000     133.000
f08.i1                                                     38.000
f08.i2                                                    136.000
f09.i1                                         77.000
f10.i1                                          8.000
f11.i1     85.000


----    136 VARIABLE xx.L  Cantidad de piezas a ensamblar de la familia f el dia
                           d en TE

               d1          d2          d3
```

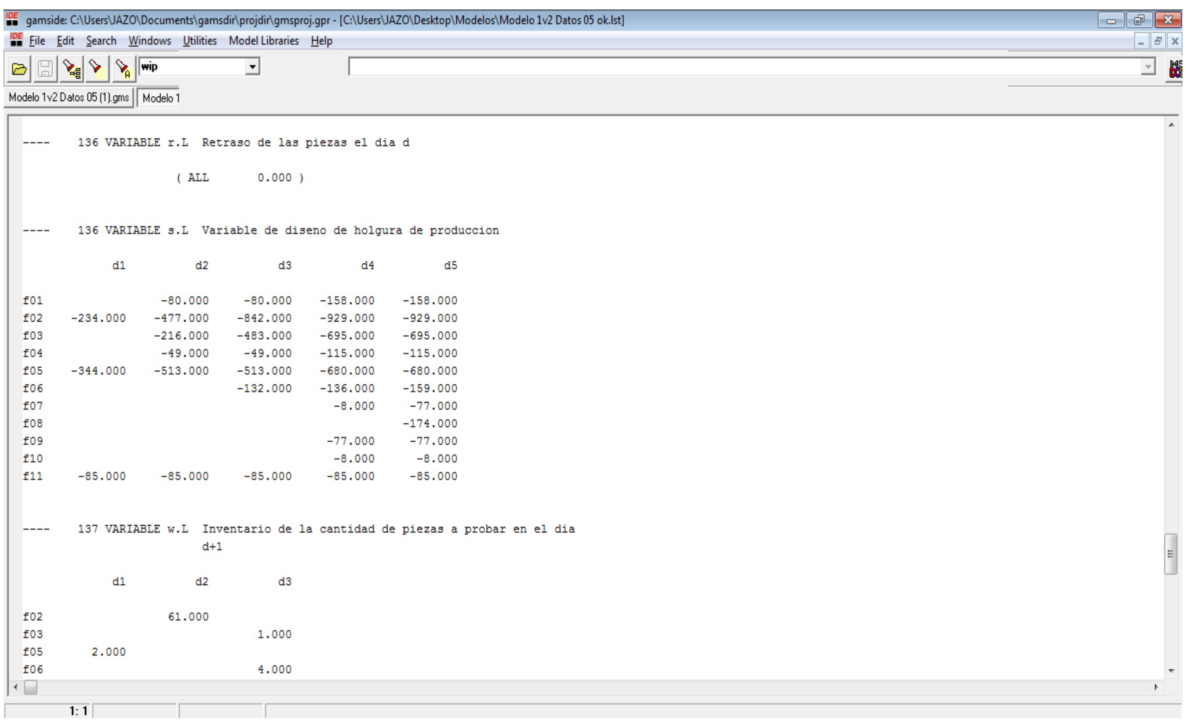



```
----    136 VARIABLE xx.L  Cantidad de piezas a ensamblar de la familia f el dia
                           d en TE

               d1          d2          d3

f01.i1     80.000
f03.i1                134.000
f03.i2                134.000
f04.i1                             66.000
f05.i2    167.000                 167.000
f07.i1                              8.000


----    136 VARIABLE u.L  Cantidad de piezas a probar de la familia f en dia d

               d1          d2          d3          d4          d5          d6

f01.j3                 80.000                                          68.000
f01.j5                                         78.000
f02.j3                 44.000     124.000
f02.j4    124.000      75.000     117.000      50.000
f02.j5    110.000     124.000     124.000      37.000
f03.j1                106.000      55.000     106.000
f03.j2                  4.000                 106.000
f03.j6                106.000     106.000
f03.j7                            106.000
f04.j4                 49.000                  66.000
f05.j1     86.000
f05.j2     86.000      83.000
f05.j6     86.000                              85.000
f05.j7     86.000      86.000                  82.000
```



---- 136 VARIABLE u.L Cantidad de piezas a probar de la familia f en dia d

	d1	d2	d3	d4	d5	d6
f01.j3		80.000				68.000
f01.j5				78.000		
f02.j3		44.000	124.000			
f02.j4	124.000	75.000	117.000	50.000		
f02.j5	110.000	124.000	124.000	37.000		
f03.j1		106.000	55.000	106.000		
f03.j2		4.000		106.000		
f03.j6		106.000	106.000			
f03.j7			106.000			
f04.j4		49.000		66.000		
f05.j1	86.000					
f05.j2	86.000	83.000				
f05.j6	86.000			85.000		
f05.j7	86.000	86.000		82.000		
f06.j1			43.000			
f06.j2			89.000			
f06.j6					23.000	
f06.j7				4.000		
f07.j1					69.000	124.000
f07.j2						9.000
f07.j4				8.000		
f08.j2					106.000	
f08.j6					68.000	
f09.j3				77.000		
f10.j3				8.000		
f11.j3	85.000					



---- 136 VARIABLE r.L Retraso de las piezas el dia d

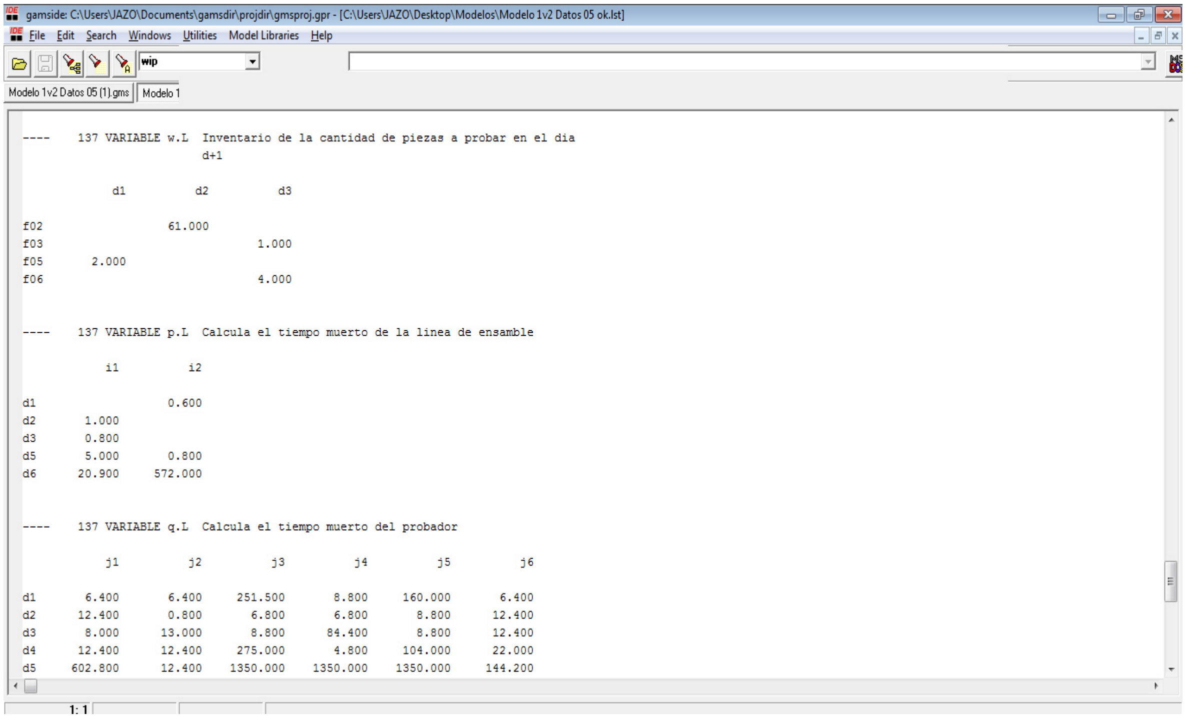
(ALL 0.000)

---- 136 VARIABLE s.L Variable de diseno de holgura de produccion

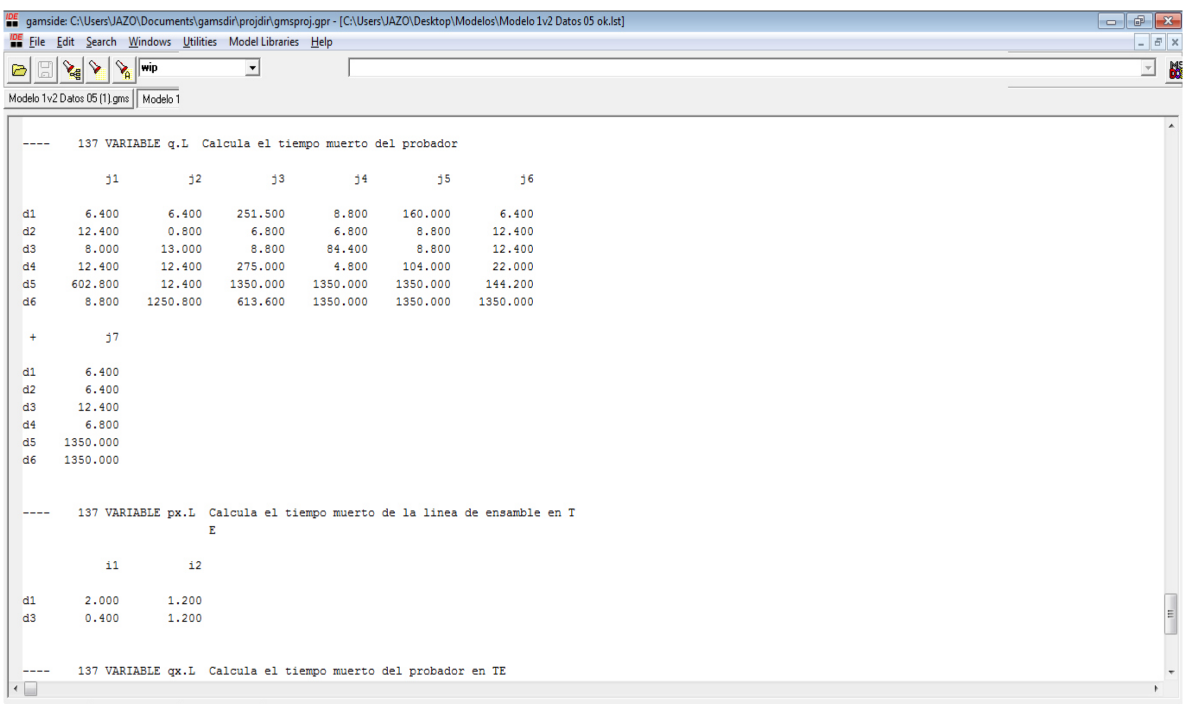
	d1	d2	d3	d4	d5
f01		-80.000	-80.000	-158.000	-158.000
f02	-234.000	-477.000	-842.000	-929.000	-929.000
f03		-216.000	-483.000	-695.000	-695.000
f04		-49.000	-49.000	-115.000	-115.000
f05	-344.000	-513.000	-513.000	-680.000	-680.000
f06			-132.000	-136.000	-159.000
f07				-8.000	-77.000
f08					-174.000
f09				-77.000	-77.000
f10				-8.000	-8.000
f11	-85.000	-85.000	-85.000	-85.000	-85.000

---- 137 VARIABLE w.L Inventario de la cantidad de piezas a probar en el dia d+1

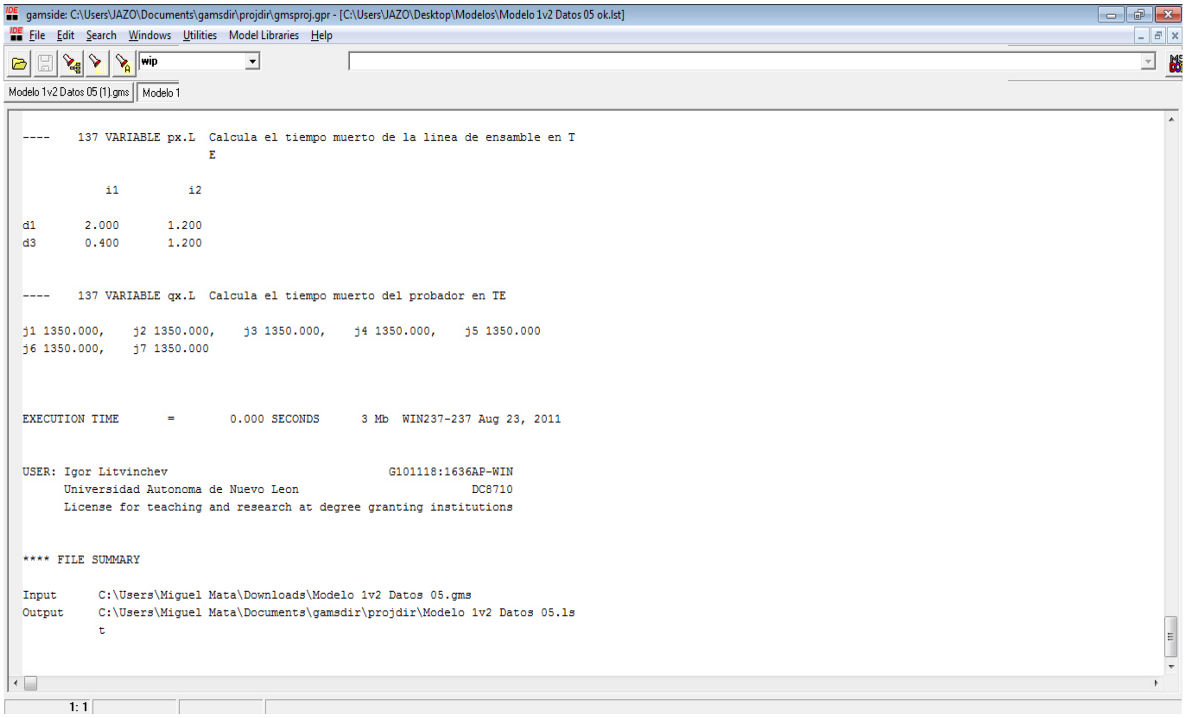
	d1	d2	d3
f02		61.000	
f03			1.000
f05	2.000		
f06			4.000



```
----    137 VARIABLE w.L  Inventario de la cantidad de piezas a probar en el dia
                          d+1

             d1          d2          d3

f02                  61.000
f03                               1.000
f05       2.000
f06                               4.000


----    137 VARIABLE p.L  Calcula el tiempo muerto de la linea de ensamble

             i1          i2

d1                    0.600
d2        1.000
d3        0.800
d5        5.000       0.800
d6       20.900     572.000


----    137 VARIABLE q.L  Calcula el tiempo muerto del probador

             j1          j2          j3          j4          j5          j6

d1        6.400       6.400     251.500       8.800     160.000       6.400
d2       12.400       0.800       6.800       6.800       8.800      12.400
d3        8.000      13.000       8.800      84.400       8.800      12.400
d4       12.400      12.400     275.000       4.800     104.000      22.000
d5      602.800      12.400    1350.000    1350.000    1350.000     144.200
```



```
----    137 VARIABLE q.L  Calcula el tiempo muerto del probador

             j1          j2          j3          j4          j5          j6

d1        6.400       6.400     251.500       8.800     160.000       6.400
d2       12.400       0.800       6.800       6.800       8.800      12.400
d3        8.000      13.000       8.800      84.400       8.800      12.400
d4       12.400      12.400     275.000       4.800     104.000      22.000
d5      602.800      12.400    1350.000    1350.000    1350.000     144.200
d6        8.800    1250.800     613.600    1350.000    1350.000    1350.000

 +           j7

d1        6.400
d2        6.400
d3       12.400
d4        6.800
d5     1350.000
d6     1350.000


----    137 VARIABLE px.L  Calcula el tiempo muerto de la linea de ensamble en T
                           E

             i1          i2

d1        2.000       1.200
d3        0.400       1.200


----    137 VARIABLE qx.L  Calcula el tiempo muerto del probador en TE
```




```
----    137 VARIABLE px.L  Calcula el tiempo muerto de la linea de ensamble en T
                           E

            i1          i2

d1       2.000       1.200
d3       0.400       1.200


----    137 VARIABLE qx.L  Calcula el tiempo muerto del probador en TE

j1 1350.000,    j2 1350.000,    j3 1350.000,    j4 1350.000,    j5 1350.000
j6 1350.000,    j7 1350.000



EXECUTION TIME       =        0.000 SECONDS      3 Mb  WIN237-237 Aug 23, 2011


USER: Igor Litvinchev                               G101118:1636AP-WIN
      Universidad Autonoma de Nuevo Leon                         DC8710
      License for teaching and research at degree granting institutions


**** FILE SUMMARY

Input      C:\Users\Miguel Mata\Downloads\Modelo 1v2 Datos 05.gms
Output     C:\Users\Miguel Mata\Documents\gamsdir\projdir\Modelo 1v2 Datos 05.ls
           t
```

BIBLIOGRAFÍA

[1] Rockwell Automation Mexico. Rockwell Automation. «Productos». Dirección: http://mx.rockwellautomation.com/ Consultada el 20 de junio del 2013.

[2] Ministerio de Educación, Cultura y Deporte. *Antonio Caro Merchante*. «Programación lineal». Dirección: http://recursostic.educacion.es/descartes/web/materiales_didacticos/Programacion_lineal/index.htm. 2001. Consultada el 20 de junio del 2013.

[3] Richard B. Chase, F. Robert Jacobs, Nicholas J. Aquilano. *Administración de operaciones. Producción y cadena de suministros.* Edición 12. Mc Graw Hill. México. 2009.

[4] Kenneth R. Baker and Dan Trietsch. *Principles of Scheduling and Scheduling.* A John Wiley & Sons, Inc. Publication. USA. 2009.

[5] Garey and D.S. Johnson. Computers and Intractability: A guide to the Theory of NP-Completeness. Freeman. San Francisco. 1979.

[6] Eduardo D. Cantú R. Optimización de la secuenciación de un sistema determinístico con alta mezcla mediante la aplicación de un modelo matemático. Tesis de maestría, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad Autónoma de Nuevo León. 2013.

[7] Software shop. Software shop. «Información general de GAMS». Dirección: http://www.software-shop.com/in.php?mod=ver_producto&prdID=226. 2013. Consultada el 20 de junio del 2013.

Corina Schmelkes y Nora Elizondo Schmelkes. *Manual para la presentación de anteproyectos e informes de investigación.* Tesis. Tercera edición. Oxford University Press México, S.A. de C.V. México. 2010.

Roger Z. Ríos y J. F. Bard. «Secuenciando óptimamente líneas de flujo en sistemas de manufactura». Ciencia UANL, 4(1): 48-54, 2001.

Mireya L. Valenzuela Luna y Roger Z. Ríos Mercado. «Comparando métodos heurísticos para secuenciar tareas en líneas de flujo». Ingenierías, UANL. Vol. VII, No. 25 Octubre-Diciembre. 2004.

Mercedes E. Narciso Farias, Miquel Angel Piera i Eroles y Antoni Guash Petit. «Optimización de sistemas logísticos mediante simulación: una metodología basada en redes de petri coloreadas». XXV Jornadas de Automática. Ciudad Real, del 8 al 10 de Septiembre de 2004.

Alexander Alberto Correa Espinal, Ph.D, Elkin Rodríguez Velásquez, MSc, María Isabel Londoño Restrepo, Ing. «Secuenciación de operaciones para configuraciones de planta tipo flexible Jop Shop: Estado del arte». Revista Avances en Sistemas e Informática, Vol. 5 No. 3. Medellín. Diciembre 2008.

R. Ramezanian, M.B. Aryanezhad & M. Heydari. «A Mathematical Programming Model for Flow Shop Scheduling Problems for Considering Just in Time Production». Inernational Journal of Industrial Engineering & Production Reseach. Volume 21, Number 2. September 2010.

Milos Seda. «Mathematical Models of Flow Shop and Job Shop Scheduling Problems» World Academy of Science. Engineering and Technology 31 2007.

Bruce A. McCarld, Alex Meeraus, Paul van der Eijk, Michael Bussieck, Steven Dirkse, Pete Steacy, Franz Nelissen. *McCarl Expanded GAMS User Guide Version 23.8* July 5, 2012.

FICHA AUTOBIOGRÁFICA

Nancy Olivia Zamarripa Ocampo.

Candidato para el grado de Maestro en Logística

y Cadena de Suministro con especialidad en Diseño y Análisis.

Universidad Autónoma de Nuevo León.

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

Tesis:

MODELACIÓN DE UN PROBLEMA DE PROGRAMACIÓN

DE LA PRODUCCIÓN PARA UNA LÍNEA DE MANUFACTURA

Nací en la ciudad de Monterrey, Nuevo León. Soy graduada de la carrera de Ingeniero Mecánico Administrador de la Universidad Autónoma de Nuevo León. Ingresé en el 2009 al Posgrado de Logística y Cadena de Suministro de la Universidad Autónoma de Nuevo León en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica donde recibí el apoyo para la realización de este trabajo de investigación.