

# **Aplicaciones de la Investigación de Operaciones a la Mejora de Procesos**

Luis A. Moncayo–Martínez • David F. Muñoz  
Editores

ISBN: 978-607-8242-20-7



# Índice general

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1 Modelo de programación lineal entera para resolver la asignación de salones en la Universidad Autónoma de Querétaro</b>                                 | <b>5</b>  |
| M.R. Benítez Escárcega*, L. Ramirez Granados, L.E. Urbán Rivero  |           |
| <b>2 Evaluación de la saturación de la red de movilidad vial propuesta para el Nuevo Aeropuerto Internacional de México</b>                                  | <b>11</b> |
| Arturo Pulido Tomás*, Esther Segura Pérez  |           |
| <b>3 Planeación de visitas turísticas personalizadas</b>   | <b>19</b> |
| Victoria Rebillas Loredo*, Cristina Maya Padrón, Fernando Elizalde Ramirez   |           |
| <b>4 Mejora en la gestión del almacenamiento de componentes para el armado de prototipos mediante la aplicación de modelos de programación lineal entera</b> | <b>25</b> |
| Miriam Echegaray Tapia, Gaston Vertiz Camaron, Jenaro Nosedal Sánchez*, Ana María De León Almaraz  |           |
| <b>5 Asignación de volúmenes de compra entre proveedores de empaque a través de la aplicación de una metodología híbrida de simulación y optimización</b>    | <b>33</b> |
| Marlenne Cruz Romero*, José Concepción López Rivera, Jenaro Nosedal Sánchez, Ana María De León Almaraz   |           |
| <b>6 Modelo de programación entera mixta de una red de logística inversa con demanda estocástica</b>   | <b>41</b> |
| Araceli López y Lòpez, Nayeli Onofre Rìos, Rogelio González Velàzquez, María Beatriz. Bernabé Loranca*, Gerardo Martínez Guzmán, Martin Estrada Analco       |           |
| <b>7 Diseño de una Política de Inventario para una Planta de Producción de Paneles Solares</b>   | <b>49</b> |
| Rodrigo Barreto V*, Ann Wellens  |           |
| <b>8 Optimización de tiempos de entrega de materiales de construcción utilizando simulación discreta</b>   | <b>59</b> |
| Jorge J. Corona*, Erick Ortiz, Rodolfo E. Pérez, Erick Montiel   |           |
| <b>9 Gestión del Inventario de una Planta de Producción de Remolques con Demanda Intermitente</b>  | <b>65</b> |
| Pamela A. Rosales*, Ann G. Wllens, Esther Segura   |           |
| <b>10 A Location-inventory Optimization Model Design For A Lignocellulosic Biomass Biofuel Supply Chain</b>  | <b>73</b> |
| Marcela María Morales Chávez*, William Sarache, Rodolfo E. Pérez, Yasel Costa  |           |

|   |            |
|---|------------|
| <b>11 Modelo matemático para la programación de horarios de cursos de una institución de educación del nivel superior en México</b>                   | <b>79</b>  |
| Nancy M. Arratia Martínez*, Cristina Maya Padrón, Paulina A. Ávila Torres   |            |
| <b>12 Planificación a largo plazo de las operaciones de corte en la fabricación de muebles</b>  | <b>85</b>  |
| Marta Cabo  |            |
| <b>13 Valor del Tiempo de Carga en Carretera</b>  | <b>93</b>  |
| Héctor G. Muñoz Esquivel*, Ricardo Aceves García  |            |
| <b>14 Aplicación de Value Stream Map (VSM) con simulación: un caso de estudio</b>   | <b>97</b>  |
| Mariana Vargas Sánchez*, Lourdes Loza Hernández, José Luis López Cervantes, Marlenne Cruz Romero  |            |
| <b>15 Implementación de la metodología DMAIC en una empresa metalmecánica</b>   | <b>107</b> |
| Jesús Guillén,*, Ann Wellens  |            |
| <b>16 Optimización del Inventario en un Sistema de Bicicletas Compartidas</b>   | <b>115</b> |
| Esteban Castillo, Edgar Possani*  |            |
| <b>17 Optimization model for a sustainable sugarcane irrigation system at Altas Montañas Area, Veracruz, Mexico</b>                                   | <b>123</b> |
| Ana Laura Piña-Martínez, Miguel Ángel Sólis-Jiménez, Jaime Mora-Vargas, Roberto Castañeda Maya  |            |
| <b>18 Estudio Comparativo de Herramientas Open Source en la Implementación de Matrices Varianza-Covarianza para la Diversificación de Portafolios</b> | <b>133</b> |
| Carlos Rodríguez Contreras, Katya Rodríguez Vázquez   |            |

# 1 Modelo de programación lineal entera para resolver la asignación de salones en la Universidad Autónoma de Querétaro

M.R. Benítez Escárcega\*<sup>1</sup>, L. Ramirez Granados<sup>1</sup>, L.E. Urbán Rivero<sup>2</sup>

1 – Universidad Autónoma de Querétaro

2 – Centro de Investigación en Matemáticas

\*e-mail: mbenitez08@alumnos.uaq.mx

En la Facultad de Ingeniería (FI) de la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ) se asignan por semestre un conjunto de cursos de licenciatura a un número determinado de salones de clases. Esta actividad se realiza con base a la experiencia, por lo tanto es susceptible a errores y toma mucho tiempo. Se diseñó un modelo de programación entera cuya función objetivo es minimizar la relación entre el tamaño del grupo y el cupo del salón. Se utilizaron datos de los horarios reales e infraestructura de la FI-UAQ para realizar la asignación del semestre enero-junio del 2019, con visto bueno de las autoridades universitarias.

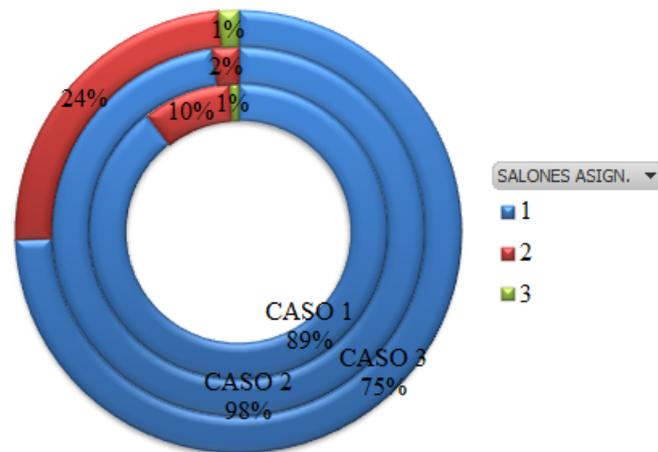
*Palabras clave:* Programación Entera; Problema de Asignación; Modelo Matemático.

## 1.1. Introducción

El problema de asignación acomoda *recursos limitados* en *actividades* de la mejor manera posible (*óptima*). Se puede ajustar a problemas como la distribución de plantas de producción, la elección de activos para invertir, la definición de patrones de envío, la planeación agrícola, el diseño en la terapia de radiación, y otros [2]. En este artículo se aborda un problema de asignación de salones, que por definición determina una relación factible entre un conjunto de cursos (o eventos) y un conjunto de salones (o espacios) respetando un número de restricciones definidas de acuerdo a la instancia analizada. [1] demostraron que encontrar una solución factible para el problema de asignación de salones con cursos que tienen más de una sesión a la semana y que incluye la restricción de asignar el mismo salón para todas las sesiones (*multi-día*), es NP-completo.

## 1.2. Descripción del problema

En la Facultad de Ingeniería (FI) de la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ) el problema de asignación de salones toma mucho tiempo (aproximadamente 80 horas) al ser resuelto manualmente, incluso gran parte de las vacaciones administrativas, este inconveniente se presenta dos veces al año, al inicio de cada semestre, en enero y agosto. El proceso de asignación de salones en la FI-UAQ se divide en dos fases. En la primera fase los coordinadores de cada programa generan una propuesta de horarios de acuerdo a los cursos y disponibilidad de los profesores. En la segunda fase se asigna un salón por curso de manera central, para toda la facultad, debido a que los diferentes programas pueden compartir salones.



**Figura 1.1:** Porcentaje de asignación homogénea para la asignación realizada manualmente de tres de los principales campus de la FI-UAQ durante el periodo enero-junio del 2018.

Se requiere incluir una etapa de optimización en el proceso de asignación de salones para realizarla en menos tiempo, con menor esfuerzo y con una mayor cantidad de días de anticipación. Se buscará que los salones asignados queden lo más holgado posible (maximizar espacios libres) para comodidad de alumnos y profesores. Los horarios propuestos se imprimirán en un formato separado por comas (.csv) para el fácil manejo del usuario (área administrativa) y se imprimirá un gráfico de asignación por día de la semana.

Se pretende comprobar que se disminuye un 90% el tiempo que toma realizar la asignación de salones en la FI-UAQ al utilizar programación entera diseñando un modelo que cumpla lo siguiente:

1. Asignar un salón para cada periodo que compone la sesión de un curso.
2. Asignar a lo más un curso  $c$  por salón  $s$  en el periodo  $p$  del día  $d$ .
3. Si un curso tiene más de una sesión por semana, asignar el mismo salón para todas las sesiones (asignación homogénea).
4. El número de estudiantes inscritos en el curso  $c$  debe ser menor o igual a la capacidad del salón  $s$ .

La asignación homogénea, mencionada en el punto 3, es una característica que facilita que alumnos y profesores recuerden en qué salón se imparten sus cursos. Al realizar la asignación de salones manualmente es muy complicado obtener una asignación homogénea para el 100% de los cursos como se muestra en la figura 1.1.

### 1.2.1. Modelo matemático

El problema de asignación de salones busca relacionar el salón  $s$  con el curso  $c$  en un periodo  $p$  del día  $d$ . En este trabajo se propuso una asignación de salones utilizando programación lineal entera y formulándolo como un problema de asignación de 3-dimensiones [3]. Dado un conjunto de  $n_1$

cursos,  $n_2$  salones y  $n_3$  días y un costo  $c_{ijk}$  cuando se asigna el curso  $c_i$  al salón  $s_j$  en el día  $d_k$  con  $1 \leq i \leq n_1, 1 \leq j \leq n_2, 1 \leq k \leq n_3$ , la formulación binaria del programa lineal entero es:

$$\min \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} \sum_{k=1}^{n_3} c_{ijk} \cdot x_{ijk} \quad (1.1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_{ijk} = 1, \forall k \quad (1.2)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n x_{ijk} = 1, \forall j \quad (1.3)$$

$$\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n x_{ijk} = 1, \forall i \quad (1.4)$$

donde la variable de decisión  $x_{ijk} \in \{0, 1\}$ ,  $\forall i, j, k$  es igual a 1 cuando al curso  $c$  se asigna al salón  $s$  en el día  $d$ , y 0 en otro caso.

En el problema de asignación de salones se busca minimizar el costo  $c_{ijk}$  y el problema tiene solución si existe al menos una combinación para la que todos los cursos se asignan a un salón cumpliendo con las restricciones[2]. Para el problema de asignación de salones de la FI-UAQ el costo se definió como la relación entre el tamaño del curso y el cupo del salón, de esta manera mientras más grande sea el cupo del salón  $s$  en relación al tamaño del curso  $c$  más deseable será el resultado.

Las siguientes definiciones se consideraron para formular el modelo de la FI-UAQ:

- Los cursos tienen duraciones variables entre 1 hr a 5 hrs y pueden ser programados de las 7:00-22:00 de lunes a viernes, y de 7:00-17:00 los sábados. Se definieron periodos de 30 minutos con el subíndice  $p$  para identificar los horarios de los cursos.
- Los cursos pueden tener una o más sesiones a la semana, por lo que denotaremos una sesión del curso  $c$  en el día  $d$  como  $S(c, d)$ .
- Nos referiremos al conjunto de periodos  $p$  contiguos que conforman una sesión  $S(c, d)$  como  $D(S(c, d))$  con una duración de  $(p_{f_c} - p_{i_c} + 1)$  periodos.
- Los cursos tienen una clave única para identificarlos pero en ocasiones más de un grupo del mismo curso se abre por semestre debido a la demanda, por lo tanto los cursos se identificaron por la relación: curso ( $c$ ), periodo ( $p$ ), día ( $d$ ).
- El tamaño de un curso  $c$  es el máximo número de alumnos que pueden estar inscritos y se denota como  $|c|$ .
- El tamaño del salón  $s$  es el máximo número de alumnos que pueden estar en el salón y se denota como  $|s|$ .

Como variables de decisión se definieron:

$$x_{c,s}^{p,d} = \begin{cases} 1 & \text{Si al curso } c \text{ se le asigna el salón } s \\ & \text{en el periodo } p \text{ del día } d \\ 0 & \text{En otro caso.} \end{cases} \quad (1.5)$$

$$y_{c,s}^d = \begin{cases} 1 & \text{Si al curso } c \text{ se le asigna el salón } s \\ & \text{en el día } d \\ 0 & \text{En otro caso.} \end{cases} \quad (1.6)$$

El modelo mono-objetivo para el problema de asignación de salones de la UAQ es el siguiente:

$$\min f_1 = \sum_{c=1}^C \sum_{s=1}^S \sum_{d=1}^6 \frac{|c|}{|s|} \cdot y_{c,s}^d \quad (1.7)$$

Sujeto a:

$$\sum_{s=1}^S x_{cs}^{pd} = 1, \quad \forall c, d \in S(c, d), p \in D \quad (1.8)$$

$$\sum_{c=1}^C x_{cs}^{pd} \leq 1, \quad \forall s, d \in S(c, d), p \in D \quad (1.9)$$

$$\sum_{p \in D(S(c,d))} x_{cs}^{pd} = (p_{fc} - p_{ic} + 1) \cdot y_{cs}^d, \quad \forall c, s, d \in S(c, d) \quad (1.10)$$

$$\sum_{s=1}^S y_{cs}^d = 1, \quad \forall c, d \in S(c, d) \quad (1.11)$$

$$y_{cs}^d = y_{cs}^{d'}, \quad \forall c, s, (d, d') \in 1, \dots, 6 | d < d' \quad (1.12)$$

La restricción (1.8) obliga a que se asigne un único salón  $s$  para el curso  $c$  con sesiones en los días  $d$  y periodos  $p$ . Similarmente la restricción (1.9) asegura que se asigne a lo más un curso  $c$  por salón  $s$  en el día  $d$  y periodo  $p$ . La restricción (1.10) asigna un único salón  $s$  para toda la sesión  $S(c, d)$ . Las restricciones (1.11) y (1.12) permiten la asignación homogénea al asignar un único salón  $s$  para el curso  $c$  el día  $d$  y verificando que la variable auxiliar  $y_{cs}^d$  tenga el mismo valor para todas las sesiones de la semana del curso  $c$ .

### 1.3. Metodología de solución

Se utilizó el optimizador comercial Gurobi y Python como interfaz para la implementación del modelo debido al gran número de variables y restricciones con las que cuenta, y la complejidad del problema. El primer paso del solucionador para programación entera mixta es simplificar el modelo con un algoritmo de pre-solución (*presolve*) para posteriormente realizar una búsqueda con ramificación-y-acotamiento y/o utilizar una heurística. En ocasiones utiliza una heurística para encontrar soluciones factibles mientras encuentra la solución por el método de relajación. El método utilizado para solucionar el problema se conoce cuando se imprimen los resultados en la pantalla de salida, la cual además de indicar el método imprime otros detalles como las iteraciones realizadas, el objetivo calculado y el tiempo de reloj. Finalmente, utiliza el método *uncrushing* para transformar automáticamente la solución encontrada para el problema simplificado en una solución para el problema original.

## 1.4. Experimentación computacional

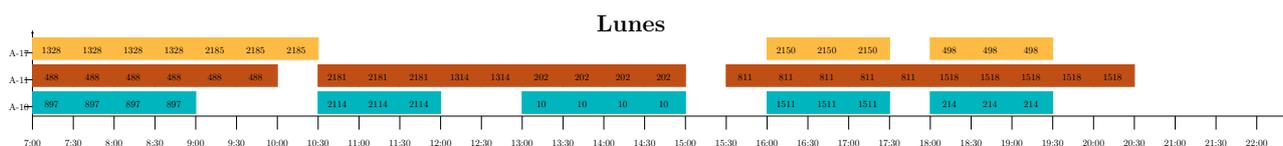
Se presenta un ejemplo en la Tabla 17.1 y Tabla 9.2 de los archivos de entrada que lee el programa para generar las variables de decisión y las restricciones, y con base a estas proponer una asignación factible, la cual se imprime en un formato en el que es posible visualizar la ocupación por salón, como se muestra en la Figura 1.2. En este ejemplo también se puede observar que el programa asigna los salones de acuerdo al tamaño del grupo y cupo del salón.

**Tabla 1.1:** Ejemplo de archivo de entrada: Cursos.

| NUM.ALUMNOS | CURSO | LUNES       | MARTES     | MIÉRCOLES   | JUEVES      | VIERNES     | SÁBADO      |
|-------------|-------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 10          | 2114  | 10:30-12:00 |            | 10:30-12:00 |             | 10:30-12:00 |             |
| 10          | 10    | 13:00-15:00 |            | 13:00-15:00 |             | 13:00-15:00 |             |
| 10          | 897   | 7:00-9:00   |            |             |             |             |             |
| 10          | 214   | 18:00-19:30 |            |             |             |             |             |
| 10          | 1511  | 16:00-17:30 |            |             | 16:00-17:30 |             |             |
| 20          | 2181  | 10:30-12:00 |            | 10:30-12:00 |             |             |             |
| 20          | 202   | 13:00-15:00 |            |             |             |             |             |
| 20          | 1314  | 12:00-13:00 |            | 12:00-13:00 |             | 12:00-13:00 |             |
| 20          | 811   | 15:30-18:00 |            |             | 15:30-18:00 |             | 15:30-18:00 |
| 20          | 1518  | 18:00-20:30 |            | 18:00-20:30 |             |             |             |
| 20          | 488   | 7:00-10:00  |            |             |             |             | 7:00-10:00  |
| 30          | 2185  | 9:00-10:30  | 9:00-10:30 |             | 9:00-10:30  |             |             |
| 30          | 1328  | 7:00-9:00   | 7:00-9:00  |             | 7:00-9:00   |             |             |
| 30          | 2150  | 16:00-17:30 |            |             |             |             |             |
| 30          | 498   | 18:00-19:30 |            |             |             | 18:00-19:30 |             |

**Tabla 1.2:** Ejemplo de archivo de entrada: Salones.

| SALÓN | CUPO |
|-------|------|
| A-10  | 10   |
| A-11  | 20   |
| A-17  | 30   |



**Figura 1.2:** Ejemplo de asignación de salones: Día lunes.

## 1.5. Conclusiones

El problema de asignación de salones de la FI-UAQ se resolvió 99% más rápido utilizando programación entera, ahorrando 79 horas-hombre y proporcionando una asignación factible una semana antes del inicio de clases. Además de la reducción de tiempo, el programa diseñado cumplió con las expectativas de proponer para los tres casos presentados una asignación 100% homogénea ocasionando que sea más sencillo, para alumnos y profesores, recordar el salón que les corresponde. Los formatos de salida en los que se visualizan las asignaciones por día resultaron muy útiles para identificar espacios libres en los salones y poder utilizarlos para actividades extracurriculares. El formato de los archivos de entrada resultó muy práctico porque es muy similar al utilizado anteriormente, evitando trabajos

## 1 Asignación de Salones

adicionales al generar un archivo nuevo para el proceso automatizado actualizado de asignación de salones. Durante la implementación fue necesario correr el programa en repetidas ocasiones debido a cambios de horario de último minuto, por lo que se propone como trabajo futuro incluir la característica de re-calcular la asignación de ciertos cursos sin modificar la asignación general. También se recomienda incluir una forma de indicar tipo de salones para abarcar aquellos cursos que requieren ser impartidos en centros de cómputo, laboratorios o salones con restiradores.

## Referencias

- [1] Michael W. Carter and Craig A. Tovey. When Is the Classroom Assignment Problem Hard? *Operations Research*, 40(1-supplement-1):S28–S39, 1992.
- [2] Frederick S Hillier and Gerald J Lieberman. *Introduction to Operations Research*. McGraw Hill, 9th edition, 2010.
- [3] Sergio Luis Pérez. *Personnel assignment problems through the multidimensional assignment problem*. PhD thesis, Universidad Autónoma Metropolitana, 2017.

## 2 Evaluación de la saturación de la red de movilidad vial propuesta para el Nuevo Aeropuerto Internacional de México

Arturo Pulido Tomás<sup>\*1</sup>, Esther Segura Pérez<sup>1</sup>

1 – Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.

\*e-mail: apt290196@gmail.com, esegurap@iingen.unam.mx

En este trabajo se analiza la saturación vial a la que estaría sujeta la red vial (primaria) en caso de la construcción de un nuevo aeropuerto en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), permitiendo decidir a priori la construcción o no de una nueva infraestructura o bien detectar las posibles modificaciones en rutas con vías alternas y así impactar de manera positiva en la movilidad de la red carretera de acuerdo con el proyecto de movilidad propuesto por la Secretaría de comunicaciones y Transportes (SCT). Las vías seleccionadas para el grafo de la zona del Nuevo Aeropuerto (NAIM) se evaluaron para su solución a través del algoritmo Dijkstra para encontrar la ruta más corta en todos los posibles destinos existentes para cada nodo propuesto en la red. Los flujos incluidos en la red fueron el número de viajes en un día entre semana, en auto particular, registrados en la Encuesta Origen – Destino (EOD) del INEGI y se obtuvo una matriz de porcentajes de saturación de arco que se resolvió a través de una metodología propuesta basada en análisis de capacidad de arcos.

*Palabras clave:* Optimización de redes, autos particulares, movilidad, Aeropuertos, saturación vial.

### 2.1. Introducción

En los últimos 10 años uno de los problemas más mencionados en materia de transporte es la saturación de tráfico aéreo del actual Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México. A pesar de la construcción de una segunda terminal en 2007 en el actual aeropuerto desde 2014 se anunció que el espacio aéreo estaba saturado[6] con 32 millones de pasajeros anuales. En el año 2014 se anuncia la construcción de un nuevo aeropuerto internacional para la Ciudad de México, el cual sería construido en la Zona Federal del Lago de Texcoco. El nuevo aeropuerto remediaría el problema de saturación del actual, y ampliaría la capacidad hasta 120 millones de pasajeros por año [5]. Sin embargo, construir un nuevo aeropuerto no sería la única solución necesaria: el Nuevo Aeropuerto Internacional de México (NAIM) estaría 15 km más alejado de la ciudad. Una de las premisas que se tenían con la construcción del nuevo aeropuerto era que se trataba de un proyecto integral, es decir, la construcción se enfocaría en apoyar otras áreas de oportunidad de desarrollo tales como viviendas, hoteles, nuevos espacios para negocios, mínimo impacto ambiental y beneficios a la movilidad. El último punto será de nuestro interés ya que es importante ahondar y evaluar el impacto en la movilidad que trae consigo la construcción de una nueva plataforma logística como lo es un nuevo aeropuerto.

Con más de 20 millones de habitantes y siendo una de las 10 zonas metropolitanas más grandes del mundo, la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) es una zona de alta demanda de movilidad. Desde 2010 la Ciudad de México ha tenido uno de los niveles más altos de congestión por tráfico

## 2 Evaluación de la saturación de la red de movilidad vial

en el mundo y en 2016 y 2017 ha sido la ciudad más congestionada de todo el mundo [3] con un nivel de congestión de 66 % en 2017 y picos de 96 % y 101 % en la mañana y en la noche, respectivamente y de acuerdo con información de [3] esta saturación se debe al número de viajes identificados en el estudio o Encuesta Origen – Destino (EOD) de la ZMVM.

La EOD es una encuesta realizada por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) de manera conjunta en las 16 alcaldías de la Ciudad de México, 59 municipios del Estado de México y uno de Hidalgo que, juntos, conforman a la ZMVM en su totalidad. El último estudio se realizó en 2017 y con sus resultados permite conocer la movilidad actual de los habitantes de la ZMVM y las características de sus viajes realizados.

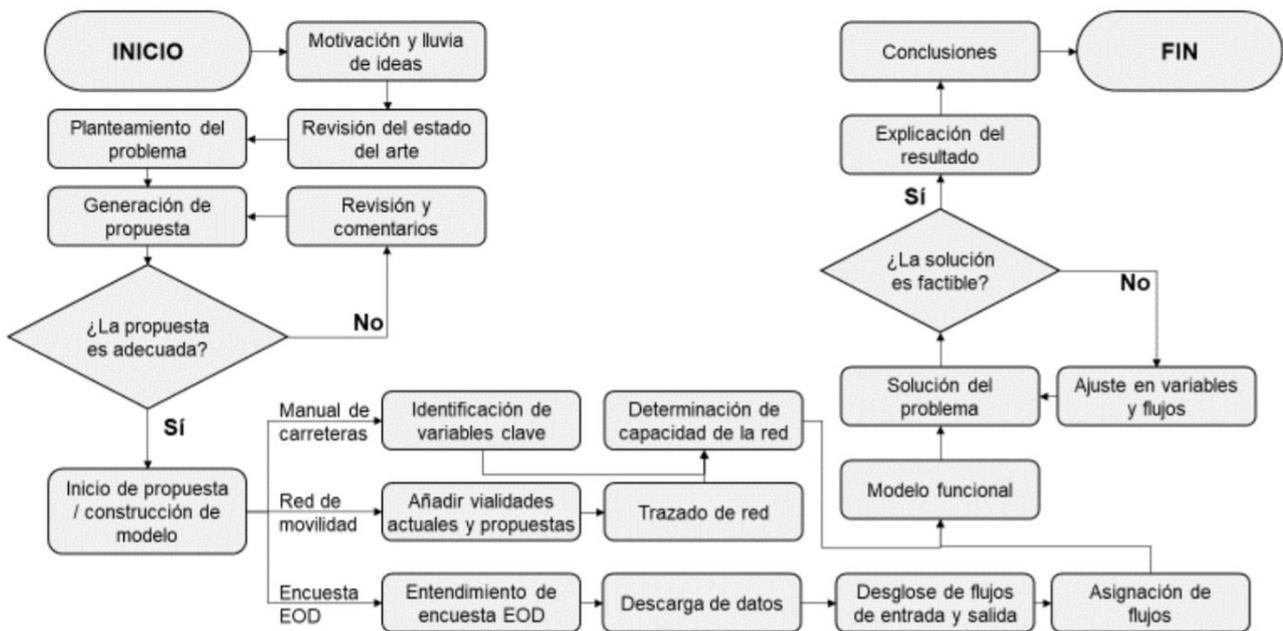
La EOD del INEGI indicó que en la ZMVM se realizaban alrededor de 34 millones de viajes diarios en todos los distintos medios de transporte. De estos viajes, cerca del 30 % se realizan en automóvil, utilizando auto privado y taxi de aplicación, sitio o de calle. Se estima que la tasa de ocupación promedio de un auto sea de 1.2 personas [1].

### 2.2. Descripción del problema

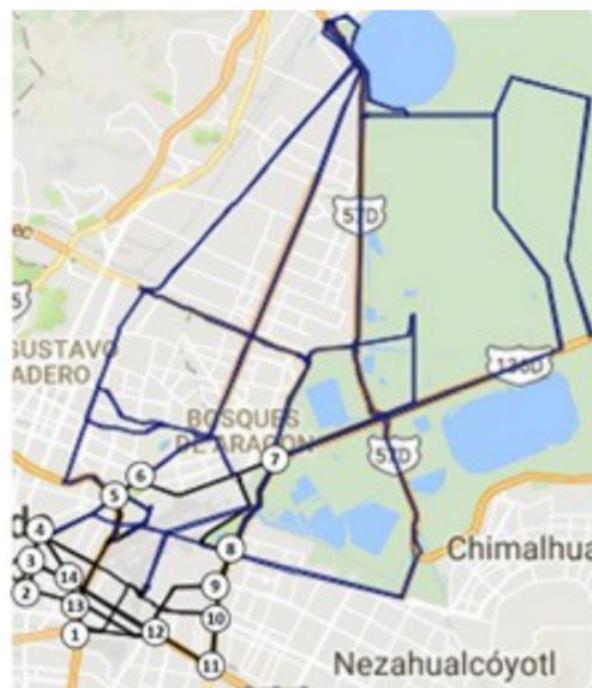
Debido a que el aeropuerto es un proyecto que llevaría más de 6 años de construcción y alrededor de 250 mil millones de pesos de inversión y con distintas fases operativas y además se sabe que las plataformas logísticas así como los aeropuertos son puntos generadores de congestiones de tráfico, afectando la movilidad vehicular, por lo que es importante que se le dedique el tiempo suficiente a la evaluación de propuestas para soluciones de movilidad dentro de la zona metropolitana, así como reservar espacios para ampliaciones en un futuro desconocido, buscando evitar llegar a una saturación de la red de movilidad vehicular. El estudio busca evaluar las propuestas existentes para movilidad vehicular y determinar si el proyecto es adecuado considerando la cantidad de viajes actuales entre zonas a través del trazo de una red de movilidad en el oriente de la ciudad. Se desea que las condiciones iniciales de saturación se vean aliviadas por las rutas propuestas mostradas en la figura 1.

### 2.3. Metodología de solución

Para la determinación del tamaño de la red de movilidad se identificó que la información de Grupo Aeroportuario de la Ciudad de México (GACM) y la SCT difundida al inicio del proyecto del aeropuerto tiene la mayoría de las obras a realizar en la zona actual del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM) y sus alrededores, esto indica un reaprovechamiento del área del viejo aeropuerto para nuevas conexiones, así como la mejora de 12 intersecciones al poniente y sur de dicho aeropuerto. Un factor que influye en la determinación del área de la red está afectado por el trazo de un radio de influencia desde un centro determinado por las dos zonas en las que se encuentran los aeropuertos (AICM y NAIM) dentro de la ZMVM. Para el radio del área de influencia se seleccionó una distancia en la que se cubrieran las zonas de la Encuesta Origen Destino que son afectadas (positiva o negativamente) por las nuevas obras propuestas por el GACM. Se traza una circunferencia dentro de la versión interactiva de la encuesta del INEGI y se encuentra que en un radio de 13 km se cubren las zonas aledañas. Una vez que se encontraron las fronteras de la red de movilidad en la zona del aeropuerto actual y del nuevo aeropuerto se tuvo que generar el grafo con los arcos y nodos. Dado que existe gran cantidad de calles que no son utilizadas como opciones para movimientos viales se determinó que los puntos más relevantes para incluir una vialidad a la red fueron los siguientes: vías con velocidad mayor o igual a 50km/h, vías que también se reconocen como ejes viales, vías de acceso



**Figura 2.1:** Arcos para la red propuesta Fuente: Elaboración propia con GoogleMaps



**Figura 2.2:** Nodo origen y destino, con su ruta más corta y número de viajes Fuente: elaboración propia

controlado, que conecten con las entradas de Terminal 1 o Terminal 2 del aeropuerto, que no sea una vialidad únicamente de una colonia y que conecten con o sean parte de la propuesta de movilidad del GACM a 2050.

2 Evaluación de la saturación de la red de movilidad vial

| De | A | Ruta                       | #viajes   |
|----|---|----------------------------|-----------|
|    | 1 | 1                          | 1,677,379 |
|    | 1 | 2 1,13,2                   | 56,334    |
|    | 1 | 3 1,13,14,3                | 14,082    |
|    | 1 | 4 1,13,14,4                | -         |
|    | 1 | 5 1,13,17,18,21,5          | -         |
|    | 1 | 6 1,13,17,18,21,5,22,6     | 5,458     |
|    | 1 | 7 1,12,16,9,8,7            | 5,314     |
|    | 1 | 8 1,12,16,9,8              | 3,041     |
|    | 1 | 9 1,12,16,9                | -         |
|    | 1 | 10 1,12,16,10              | 12,434    |
|    | 1 | 11 1,12,11                 | 214,835   |
|    | 1 | 12 1,12                    | 13,514    |
|    | 1 | 13 1,13                    | -         |
|    | 1 | 14 1,13,14                 | -         |
|    | 1 | 15 1,13,17,18,21,5,22,6,15 | -         |
|    | 1 | 16 1,12,16                 | 8,120     |

Figura 2.3: Flujos de viajes asignados a arcos de la red

| De/A | 1       | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7 | 8       | 9      | 10     | 11      | 12      | 13      | 14     |
|------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|---|---------|--------|--------|---------|---------|---------|--------|
| 1    | x       | x      | x      | x      | x      | x      | x | x       | x      | x      | x       | 151.05% | 168.11% | x      |
| 2    | x       |        | 27.31% | x      | x      | x      | x | x       | x      | x      | x       | x       | 45.29%  | x      |
| 3    | x       | 33.54% |        | 53.70% | x      | x      | x | x       | x      | x      | x       | x       | x       | 10.80% |
| 4    | x       | 63.12% |        |        | 35.96% | x      | x | x       | x      | x      | x       | x       | x       | 0.00%  |
| 5    | x       |        |        |        |        | x      | x | x       | x      | x      | x       | x       | x       |        |
| 6    | x       |        |        |        | 77.65% | x      | x | x       | x      | x      | x       | x       | x       |        |
| 7    | x       |        |        |        |        |        |   | 11.73%  | x      | x      | x       | x       | x       |        |
| 8    | x       |        |        |        |        | 31.05% |   |         | 95.17% | x      | x       | x       | x       |        |
| 9    | x       |        |        |        |        |        |   | 110.07% |        | 63.35% | x       | x       | x       |        |
| 10   | x       |        |        |        |        |        |   |         | 68.08% |        | 51.03%  | x       | x       |        |
| 11   | x       |        |        |        |        |        |   |         |        | 67.50% |         | 112.61% | x       |        |
| 12   | 148.58% |        |        |        |        |        |   |         |        |        | 110.07% |         | 36.01%  | x      |
| 13   | 174.33% | 48.32% |        |        |        |        |   |         |        |        |         | 31.34%  |         | 12.52% |
| 14   | x       |        | 9.19%  | 0.00%  | x      | x      | x | x       | x      | x      | x       |         | 9.09%   | x      |

Figura 2.4: Matriz con cocientes de saturación

Una vez que se dibujaron los arcos de la red se obtuvo el grafo de la figura 1. Se pueden observar arcos que representan las vías actuales que conectan con el AICM, así como las que serán construidas y las que requerirán de modificaciones según los proyectos de la SCT. Después, se tabularon las distintas distancias obtenidas en la red. Se creó una tabla en Excel con nodos origen y destino (en ejes verticales y horizontales respectivamente) en donde las longitudes de los arcos eran registradas, en km, dependiendo entre qué nodos estaba el arco. En casos sin arcos se añadió una distancia de  $1 \times 1099$  km, garantizando que la red nunca utilizará arcos inexistentes al calcular la ruta más corta.

Para tener una aproximación de las rutas “ideales” se utilizó el algoritmo Dijkstra [4] de la ruta más corta, deseando encontrar para cada punto de partida y sus distintas opciones de llegada la solución óptima. Para esto se utilizó el software TORA. El programa encuentra la solución por medio del algo-

ritmo de Dijkstra y se obtienen los resultados para cada punto origen y sus distintos puntos destino. Después, se determinan su máximo aforo vehicular para los movimientos de autos particulares, utilizando factores de saturación de vías del “Highway Capacity Manual”. El manual aporta el concepto de nivel de flujo de saturación base (o base saturation flow rate en inglés) que, por estándar, es de 1900 vehículos por hora por carril y que este valor puede crecer o decrecer basándose en mediciones locales en la vía [2].

El siguiente paso para el modelado de la red fue la determinación del número de viajes a utilizar en cada uno de los arcos y nodos. En este caso se utilizó únicamente la Encuesta Origen – Destino (EOD) en Hogares de la ZMVM para viajes entre semana. Dentro de la encuesta existe una matriz origen – destino que subdivide las alcaldías y municipios estudiados en zonas de menor tamaño. La encuesta tiene un tabulado con el total de viajes en la ZMVM que muestra el número de viajes que se realizan según el tipo de transporte utilizado en población de 6 o más años. Para el enfoque de este estudio se utilizaron únicamente los viajes en automóviles particulares y taxis como servicio de transporte público. Se hizo una aproximación porcentual de cuántos viajes totales se realizan en auto o taxi, para lograr esto se obtuvo la proporción del número de viajes en los medios de transporte mencionados anteriormente.

Con lo anterior, de los 34.6 millones de viajes reportados en la encuesta el 25.46% serán de nuestro interés para el modelo de la red. Adicionalmente se debe recordar que en la ZMVM el nivel de ocupación de lugares por auto es de 1.2 personas por auto, por lo que se dividió entre 1.2 para obtener el total de autos particulares que circularán a través de la red de movilidad propuesta. Resultando 8.5 millones de autos los de interés para el estudio. La asignación de nodos se realizó seleccionando el nodo más cercano en línea recta a cada zona de la ZMVM, cabe destacar que existen zonas que podían encontrarse próximas a diversos nodos. En estos casos, el criterio tomado adicionalmente en cuenta para la selección de nodos fue la búsqueda de rutas utilizando aplicaciones como Waze o Google Maps que, en teoría, trazan la ruta óptima para llegar a un destino. Los pasos seguidos después de la construcción del modelo para la obtención de la solución inicial de la red fueron los siguientes: crear una lista de cada origen con sus 49 posibilidades de destino, añadir a cada elemento de la lista los nodos por los que se debe realizar el viaje de ruta más corta, sumar de la EOD 2017 el flujo total de vehículos que tienen como origen el primer nodo y como destino el último nodo, sin importar la zona, para cada caso de la lista, Separar la ruta más corta de cada caso por arco, de modo que en cada renglón se tuviera el número de arcos de la ruta y los arcos específicos que se tomarían y crear una nueva matriz de origen y destino en la que se sumarán los viajes por cada arco, para lograr esto se tuvo que crear un condicional en Excel que sumara solo sí el cruce de origen y destino de cada celda coincide con los números de origen y destino en cada arco separado de cada ruta posible.

Como se muestra en la Tabla 1, existen diversos factores que afectan el flujo vehicular en las vías carreteras, algunos con mayores efectos que otros. Se incluyen sólo los factores más relevantes tomados del manual [2].

## 2.4. Experimentación computacional

En la figura 2 se observa cómo los viajes se distribuyen según su origen y destino en la red, el número de viajes se verá reflejado en cada uno de los arcos que tiene la ruta propuesta, por ejemplo: para viajar del nodo 1 al nodo 3 se recorren los arcos 1 a 13, 13 a 14 y 14 a 3, cada uno tendrá los 14,082 viajes que se realizan en un día. Una vez que se obtuvieron los viajes se construyó la matriz de flujos por arco. En la figura 3 se puede observar una sección de la matriz. Cuando a la matriz se

**Tabla 2.1**  
**Factores para cálculo de capacidad de vía utilizados**  
**Fuente:** (Transportation Research Board, 2000)

| Factor                   | Formula                                 | VARIABLES  | Comentarios   |
|--------------------------|---|--|---|
| Ancho de carril          | $1 + \frac{W}{-} 3.69$                  | $W$ ancho del carril   | $W \geq 2.4m$ si $\geq 4.8m$ analizarlo como dos carriles |
| Vehículos pesados        | $\frac{100}{100 + \%HV(E_T - 1)}$       | $\%HV$ es porcentaje de vehículos pesados                              | $E_T = 2.0$ autos por vehículos pesados                   |
| Obstrucción de autobuses | $\frac{N - \frac{14.4N_B}{3600}}{N}$    | $N$ = número de carriles del grupo. $N_B$ = número de paradas por hora | $0 \leq N_B \leq 250$                                     |
| Tipo de localidad        | 0.9 en zona urbana<br>0.1 en zona rural |  |   |

le agregan todas las sumas de flujos se compara contra la matriz de capacidades de vías, después se obtiene un cociente entre el número de viajes realizados sobre el arco entre la capacidad máxima del arco. El cociente obtenido se muestra porcentualmente para determinar la saturación de la vía, en la figura 4 se incluye una sección de la matriz con la solución inicial. Para llegar a una solución sin arcos saturados se deben modificar las rutas de algunos viajes, de modo que se busque utilizar vías alternas adyacentes a los arcos saturados. Primeramente, se tuvieron que identificar los nodos que generaron saturación, los cuales fueron 20 y, por sus flujos, se tuvieron dos tipos de saturación en los arcos identificados: saturación por gran cantidad de flujos sobre un mismo arco y saturación por un flujo mayor a la capacidad del arco.

En el primer caso de saturación, se podían revisar todos los flujos que saturaban los arcos y redistribuirlos por una nueva ruta. Se tuvo que recurrir a un proceso manual en el cual se utilizó el esquema completo del grafo de la red, así como los nodos saturados identificados. Una vez resueltos los primeros arcos problema se encontró que los arcos perimetrales de la red no sólo no podían ser redistribuidos, también todos cumplían con el caso de tener una saturación por un flujo mayor a la capacidad de los arcos. Para poder llegar a una solución en los nodos y arcos “perimetrales” se identificó que la opción viable para la solución consistía en la utilización de arcos “fantasma” que fueran propuestos como complementos a la red y que sirvieran para disminuir el nivel de saturación. La propuesta anterior se justifica mediante lo siguiente: la asignación de nodos para cada zona de la EOD, así como la adición de flujos a la red implican que no existe posibilidad en la que se realicen viajes por fuera de la red propuesta, por tanto, existen viajes que están conectando a dos zonas muy alejadas de la red por medio de nodos que no deberían utilizarse para un traslado entre ellas. Por ejemplo, si hay viajes que se realizan dentro del poniente de la ciudad, el problema nos plantea que se debe utilizar la red

y que se tengan nodos de entrada y salida. Sin embargo, existen zonas que se encuentran bastante alejadas de la red y que, por el tamaño de la ZMVM, no resulta óptimo realizar un viaje hasta la red para luego salir hacia nuestro destino. Esto indica entonces que existen una gran cantidad de viajes que están aumentando los flujos en la red y que deberían realizarse en una zona ajena a la red (una red fantasma). Así, para cada viaje que cumpla las condiciones de tener 2 zonas alejadas de la red, que tienen un recorrido de origen-destino a través de arcos saturados, se propone un arco “fantasma” que complementa a la red, de modo que por ahí se desvíen los viajes realizados, siempre y cuando se cumpla la condición de existencia de una vialidad alterna. Repitiendo el proceso en otras localidades al poniente y sur de la red de movilidad al NAIM se logra obtener la matriz de saturación sin cocientes superiores a 100 % y la red tiene una saturación de 27.32 %, por lo que se puede llegar así a la solución del problema.

## 2.5. Conclusiones

El trabajo anterior muestra que con el desvío de flujos por arcos fantasma de viajes no necesariamente dentro de la red, así como las nuevas vialidades propuestas para conectar la ciudad al NAIM ayudan a descongestionar la red de movilidad en la zona estudiada. Además, el estudio halló que la utilización de los arcos que corresponden a la zona del actual aeropuerto sí beneficia a los arcos adyacentes con nuevas opciones de movilidad para conectar la ZMVM. También se encontró una subutilización de arcos de la red actual y en las nuevas propuestas, esto se debe principalmente a que la metodología utilizada sólo resuelve con el algoritmo de la ruta más corta. El estudio puede extenderse con apoyo de otros tabulados de la Encuesta Origen – Destino 2017 como puede ser la distribución de viajes por hora del día. Esto permitiría contar con más escenarios que, además de mostrar si la red puede o no con la capacidad vial que tiene, se puede encontrar cómo varía la ubicación de los arcos saturados según la hora del día. Adicionalmente, el estudio puede utilizarse para el análisis de otras propuestas de redes para conectar ciudades con proyectos de infraestructura, e incluso para la identificación de saturaciones de arcos y la creación de propuestas que mejoren la eficiencia de movilidad vehicular. Otro punto de mejora encontrado en el modelo está relacionado con que no se contemplan alteraciones a la red al momento que se hace la simulación, es decir, no existe la posibilidad de tener flujos dinámicos que cambien de ruta al momento de tener perturbaciones en el sistema de la red. Los puntos anteriores requieren no sólo de un estudio con la utilización de algoritmos de flujo máximo y ruta más corta, se puede decir que este trabajo funciona como un punto de partida para futuras investigaciones o extensiones relacionadas con la simulación de los flujos en la red, es decir, se espera que con un mayor manejo de datos se pueda generar una simulación. Esto permitiría que se pudiera tener una mejor aproximación al comportamiento real de los flujos en la red, además de contar con una mayor cantidad de escenarios según distintos supuestos como: cierre de vías, cambio en el sentido de circulación de alguna calle, accidentes, entre otros. Se debe recalcar que el trabajo desarrollado con la información de SCT sólo se enfocó al estudio de autos particulares, pero no se debe descuidar los otros medios de transporte utilizados para moverse en la ciudad. Aun cuando en los documentos revisados sí se encontraron propuestas de movilidad con transporte público, es necesario realizar la evaluación de movilidad, con sus debidos supuestos, que genere un modelo que permita aprobar o no las opciones de movilidad a desarrollar.

## Referencias

- [1] ADHOC Consultores Asociados. Programas sobre la eficiencia energética en el sector transporte. *Communications of the ACM*, 2016.

## 2 Evaluación de la saturación de la red de movilidad vial

- [2] Transportation Research Board. Highway capacity manual. *Communications of the ACM*, 2000.
- [3] TomTom International BV. Mexico city retains crown of 'most traffic congested city' in world. *Communications of the ACM*, 2017.
- [4] R. L. Cormen T. H. Leiserson, C. E. Rivest and Stein C. *Introduction to Algorithms*. MIT Press., 2001.
- [5] Grupo Aeroportuario de la Ciudad de México. Nuevo aeropuerto internacional de la ciudad de México. *Grupo Aeroportuario*, 2014.
- [6] Forbes México. Sct declara como "saturado" espacio aéreo de aicm. *Forbes México*, 2014.

# 3 Planeación de visitas turísticas personalizadas

Victoria Rebillas Loredo<sup>\*1</sup>, Cristina Maya Padrón<sup>2</sup>, Fernando Elizalde Ramirez<sup>3</sup>

1 – Universidad de las Américas de Puebla, San Andrés Cholula, Puebla.

2 – Universidad Politécnica de García, García, Nuevo León.

3 – Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey, Monterrey, Nuevo León.

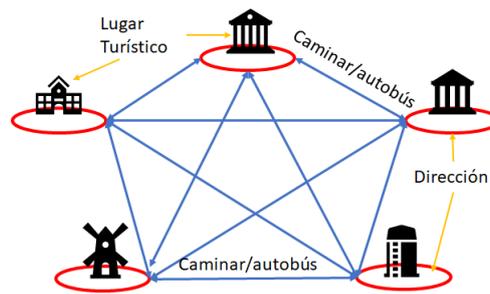
\*e-mail: victoria.rebillas@upc.edu

En este trabajo se propone un modelo que permite la generación de un plan turístico dentro de una ciudad para quien la visita. Suponga que se encuentra como turista en una ciudad, donde sólo tiene como referencia los sitios emblemáticos, pero no sabe cómo llegar a ellos y tiene un tiempo límite disponible para hacerlo. Dada la cercanía a los sitios que desea visitar y/o tiempo disponible, podría ser posible visitar otros lugares cercanos a los puntos de interés señalados, pero su desconocimiento de la ciudad le impedirían visitar dichos lugares. El plan de visita desarrollado, proporciona la secuencia de lugares a visitar y cómo llegar a ellos, además de incluir otros puntos posibles a visitar que se ajusten a su tiempo. Se desarrolló una formulación matemática para generar planes de visitas turísticas personalizadas. Esta formulación toma como base el problema de enrutamiento de vehículos (VRP), con la variante de incluir puntos no considerados.

*Palabras clave:* Planes turísticos; Problema de enrutamiento de vehículos; Modelación matemática.

## 3.1. Introducción

En este trabajo se presenta un modelo de programación lineal para el problema de generación de planes turísticos dentro de una ciudad. La generación de estas rutas considera restricciones temporales: de desplazamientos caminando, y de tiempo disponible. Optimizando el tiempo de duración total del recorrido. El tiempo total de recorrido se conforma de los tiempos de traslado y el tiempo aproximado que dura la visita del punto turístico al cual se arribó. Los traslados se hacen caminando o con el uso del transporte público. El modelo permite planear para varios días, ajustándose a la disponibilidad de tiempo del usuario, además si existe un sobrante de tiempo, el modelo realiza una búsqueda y asigna al plan de viaje lugares de interés a visitar, buscando dar un mayor y mejor uso del recurso temporal del usuario. Este problema se puede definir como: Existe un visitante que desea conocer ciertos sitios turísticos dentro de una ciudad, y tiene ciertas preferencias para su mayor satisfacción [4] [5]. De este último conjunto el podrá elegir: 1) El tiempo disponible para completar su recorrido, que puede ser distribuido en varios días. 2) Incluir al plan los lugares deseados a visitar. 3) La posibilidad de visitar otros lugares turísticos cercanos a los puntos de interés indicados. 4) El punto de inicio del plan puede ser distinto al destino final (esto puede aplicar por día). 5) El tiempo máximo y mínimo de duración del viaje, así como el tiempo de desplazamiento caminando durante el plan por día. 6) El número de días disponibles para completar el plan. Debido a las características del problema, este se puede plantear como un problema de ruteo de vehículos (VRP) [13], [10]. Teniendo el plan de recorrido como la ruta a seguir y cada día de traslado como un vehículo, con la diferencia que si se alcanza un lugar turístico no necesariamente se debe visitar, ya que se considera sólo como una dirección dentro de la cual está contenido el punto turístico (ver figura 3.1).



**Figura 3.1:** Representación de la red de turismo a utilizar

#### 3.1.1. Justificación

En la actualidad el sector turismo está creciendo, por tanto los ingresos en dicho sector han ido en incremento. Por dar una cifra, en México al cierre del tercer trimestre del 2018 el ingreso por divisas de turismo extranjero fue de 16,656 millones de dólares, 4.5% más respecto al año pasado [7], hablando del número de visitantes del 2017 al 2018 creció un 5.8%, y el total generado durante ese año fue de 22,509.7 millones de dólares, creciendo en un 5.5% con respecto al 2017. Esto se debe a la disminución de los costos de traslado e incluso de hospedaje, además de las redes sociales, las cuales de forma no directa generan una promoción. Debido a lo anterior, la falta de información en una ciudad con respecto a cómo trasladarse a sus sitios turísticos, el idioma, preferencias y optimización de recursos de viajeros, creemos que es necesaria una herramienta como la que presentamos.

#### 3.2. Trabajo relacionado

En la literatura podemos encontrar trabajos cuyo objetivo es generar rutas turísticas en donde, a diferencia de nuestro trabajo, se tiene una función objetivo de maximizar la satisfacción del usuario, definiendo una puntuación para cada sitio de interés a visitar [2, 14, 8]. Finalmente, la ruta obtenida está sujeta a la selección de aquellos sitios que obtuvieron una puntuación más alta. Para la realización de rutas turísticas existe una variedad de modelaciones del problema en donde las características modeladas así como las metodologías utilizadas pueden variar [1], [9]. Algunas metodologías, como la Planificación de Inteligencia Artificial, se han utilizado para representar el problema de generar viajes turísticos personalizados [4], y aunque son eficientes para encontrar rutas personalizadas para turistas, ya que utilizan algoritmos aproximados, las soluciones encontradas no son óptimas. Otras técnicas utilizadas no exactas son la utilización de algoritmos genéticos [11] y búsqueda local guiada [12], entre otros.

#### 3.3. Descripción del problema

Cuando un turista planea su viaje dentro de una ciudad, la primera decisión que se realiza es: ¿qué lugares turísticos hay para visitar?, seguido de, ¿tengo suficiente disponibilidad de tiempo para visitarlos?. A partir de esto surge en el pensar del turista el orden en que debería de visitarlos, he aquí la complejidad, ya que este orden depende de la optimización del recurso temporal existente. Para ello se considera dos puntos importantes, los lugares que desea visitar y los tiempos de traslados. Los cuales nos definen la ruta y el plan de viaje, debido a la necesidad de respetar un horario definido por el usuario, así como sus preferencias de tiempos caminando durante el plan. Con lo anterior, proponemos el uso de un modelo de programación lineal, el cual en base a la información proporcionada por el

turista genera de forma automática un plan para su recorrido turístico, considerando sus preferencias y agregando lugares a visitar ajenos a los establecidos si existe un excedente de tiempo para visitar los lugares previamente definidos. Se consideran dos medios de transporte, autobús y caminando, ya que son los más usuales en cualquier parte del mundo. Usando la red de transporte público con rutas definidas, el usuario debe ajustarse a éste y no al revés lo cual incrementa la complejidad del problema [6], además de una interacción directa de los diversos factores para sincronizarlos.

### 3.4. Modelo matemático

Con el fin de conocer soluciones óptimas y propiedades del problema de planeación de visitas turísticas personalizadas, desarrollamos la siguiente formulación matemática. Consideramos la forma general en un grafo ponderado y dirigido  $G = (V, A)$ , donde  $V$  es el conjunto de nodos y  $A$  es el conjunto de arcos. Definimos  $P$  como conjunto de puntos de interés en una determinada ciudad, en esta versión del problema, suponemos que los puntos iniciales y finales de una ruta son un punto de interés, por lo que tenemos que todos los vértices son  $V = P$ .  $M$  es conjunto de la línea de transporte (caminando, metro, autobús...),  $D$  el conjunto de días (rutas) disponibles del turista y  $R$  el conjunto de sitios que deben incluirse en el plan del viaje (especificados por el turista). A continuación definimos nuestros parámetros y variables de decisión.

Parámetros:

- $tv_i$  : tiempo destinado para visitar el sitio  $i \in P$ ,
- $tt_{ij}^m$  : tiempo de viaje entre nodos  $(i, j)$ , con la línea de transporte  $m \in M$ ,
- $s_d$  : punto para comenzar el viaje en el día  $d \in D$ ,
- $e_d$  : punto para finalizar el viaje en el día  $d \in D$ ,
- $f_d$  : 1 si la ruta es cerrada (inicio y fin son los mismos),  
0 si es abierta (inicio y fin son diferentes),
- $T_d$  : tiempo disponible del turista por día  $d \in D$ ,
- $TMw_d$  : tiempo máximo que el turista quiere caminar durante el día  $d \in D$ .

Variables de decisión: Como variables binarias definimos  $x_{ij}^{dm}$ , que es igual a 1 si en el día  $d$  el turista usa el arco  $(i, j)$  en la línea de transporte  $m$ .  $y_p^d$  que es igual a 1 si el punto de interés  $p$  se visita en el día  $d$ . Y las variables reales no negativas  $\ell_i$  que definen el tiempo total (viaje y visita) en el nodo  $i$ . Con la notación anterior, nuestro problema se puede formular como:

$$\text{mín} \sum_{d \in D} \sum_{m \in M} \sum_{(i,j) \in V} tt_{ij}^m x_{ij}^{dm} \quad (3.1)$$

$$\text{s.a.} \quad \sum_{(j,i) \in \delta^-(i)} x_{ji}^{dm} = y_i^d, \quad i \in V \setminus \{s, e\}, d \in D, \quad (3.2)$$

$$\sum_{(i,j) \in \delta^+(i)} x_{ij}^{dm} = y_i^d, \quad i \in V \setminus \{s, e\}, d \in D, \quad (3.3)$$

$$\sum_{p \in P} tv_p y_p^d + \sum_{m \in M} \sum_{(i,j) \in V} tt_{ij}^m x_{ij}^{dm} \leq T_d, \quad d \in D, \quad (3.4)$$

$$\sum_{m \in M} \sum_{j \in V} x_{sj}^{dm} + \sum_{m \in M} \sum_{j \in V} x_{je}^{dm} = 2, \quad d \in D, \quad (3.5)$$

$$\sum_{m \in M} \sum_{j \in V} x_{js}^{dm} = (1 - f_d), \quad d \in D, \quad (3.6)$$

$$\sum_{m \in M} \sum_{j \in V} x_{ej}^{dm} = (1 - f_d), \quad d \in D, \quad (3.7)$$

$$\sum_{d \in D} y_r^d = 1, \quad r \in R, \quad (3.8)$$

$$\sum_{d \in D} y_i^d \leq 1, \quad i \in V \setminus R, \quad (3.9)$$

$$\sum_{(i,j) \in V} tt_{ij}^1 x_{ij}^{d1} \leq TMW_d, \quad d \in D, \quad (3.10)$$

$$\ell_i - \ell_j (tt_{ij}^m + tv_i) \leq U_k + tt_{ij}^m (1 - x_{ij}^{dm}), i, j \in V \setminus \{e\} : i \neq j, d \in D, m \in M. \quad (3.11)$$

La función objetivo (3.1) busca minimizar el tiempo total de transporte diario para el turista. Las restricciones (3.2) y (3.3) indican que para cada nodo un arco entre y otro sale, si se visita el lugar turístico. (3.4) restringen el tiempo total (tiempo de transporte y visita) disponible para cada día. Con (3.5)-(3.7) relacionamos el arco que entra y el arco que sale para los puntos de inicio y final. Las restricciones (3.8) incluyen en el recorrido todos los puntos que el turista desea visitar, y (3.9) nos ayuda a no visitar un sitio si se visitó en días anteriores. Para considerar el tiempo máximo que el turista quiere caminar, tenemos (3.10). Finalmente, las restricciones (3.11) controlan el tiempo utilizando el tiempo acumulado con las variables  $\ell$ , y además son las restricciones de eliminación de subcircuitos que utiliza la formulación “TMZ”, por último se necesitan la naturaleza de las variables previamente definidas.

### 3.5. Resultados preliminares

Para visualizar los primeros resultados de este modelo, se obtuvieron algunos resultados preliminares. Se usaron los datos turísticos de la ciudad de Puebla, buscando probar con datos reales y dada la disponibilidad de la información. Consideramos los obtenidos de la data set: Atractivos turísticos abiertos al público en Puebla [3]. Tomamos  $|P| = 30$  atractivos turísticos con su tiempo de duración de visita. Dos tipos de medios de transporte  $M$  fueron utilizados, caminando y bus, debido a que el medio principal de transporte en Puebla es bus. Los tiempos de traslado fueron obtenidos de la plataforma MooVit, la cual es un esfuerzo colectivo para mapear ciudades. Para los tiempos de traslado en algunos

casos están divididos en dos: tiempo de traslado en alguna unidad de transporte y tiempo de traslado caminando, cuya suma es el tiempo total del recorrido. El modelo matemático se implementó usando OPL/Cplex optimizer en una PC con un procesador Intel(R) Core (TM) it-8550U CPU 1.80 GHz 1.99 GHz, con una memoria instalada RAM de 8 GB (7.88 GB utilizable), sistema operativo de 64 bits, procesador x64. En la tabla 17.1, tenemos las características de las tres instancias probadas. Se experimentó con recorridos donde el destino sea igual al origen del plan, y donde estos son diferentes.

|              | 1     | 2    | 3      |
|--------------|-------|------|--------|
| $ R $        | 4     | 4    | 7      |
| $ D $        | 2     | 2    | 3      |
| $f$          | 1     | 0    | 1      |
| $s$          | 5     | 5    | 5      |
| $e$          | 4     | 5    | 4      |
| Tiempo(seg.) | 42.67 | 1.83 | 925.53 |

**Tabla 3.1:** Parámetros instancias  $PUE(1 - 3)$  y tiempos de solución

Para las tres instancias hemos obtenido soluciones óptimas, en el último renglón de la tabla 17.1 tenemos los tiempos de solución. Las primeras dos instancias se resuelven sin problemas. La instancia  $PUE3$ , que debe incluir 7 puntos turísticos y donde el turista tiene 3 días para visitar la ciudad, es la que lleva más tiempo de resolver (925.53 seg.). Aún se requiere más experimentación para concluir algo respecto a este tiempo obtenido. Una de las principales razones de estos tiempos es que incrementando el número de días (índice  $d$ ) el número de variables se incrementa y el tiempo de solución también. Si bien hace falta realizar más experimentación, estos resultados ya mejoran a los obtenidos en [5] donde para instancias con  $|P| = 20$  no se podían obtener soluciones óptimas.

### 3.6. Conclusiones

Hemos presentado una formulación matemática para resolver el problema de generación de planes turísticos personalizados. Los resultados preliminares muestran que esta formulación es mejor que la propuesta en [5]. Como trabajo futuro, se completará la experimentación de este trabajo y se buscará reforzar la formulación. Buscando incluir más características, se podrían añadir costos de traslado y de visita, además de considerar el desplazamiento del usuario desde cualquier parada de bus, así como la inserción de otros medios de transporte. Una alternativa para ello sería un híbrido entre programación lineal y modelos de Planificación de Inteligencia Artificial.

### Referencias

- [1] Joan Borràs, Antonio Moreno, and Aida Valls. Intelligent tourism recommender systems: A survey. *Expert Systems with Applications*, 41(16):7370–7389, 2014.
- [2] Çağla Cergibozan and A. Serdar Tasan. Tourist route planning with a metaheuristic approach. In *Closing the Gap Between Practice and Research in Industrial Engineering*.
- [3] Secretaría de Cultura y Turismo. Atractivos turísticos abiertos al público en Puebla. <http://datos.puebla.gob.mx/dataset/attractivos-turisticos>, 2018.
- [4] Fernando Elizalde, Cristina Maya, and Victoria Rebillas. Generation of customized tourist routes using ai planning. *RINOE Journal-Business administration and business economics; Marketing; Accounting*, 2017.

- [5] Fernando Elizalde-Ramírez, Cristina Maya-Padrón, and Victoria Rebillas-Loredo. Design of personalized city tourist trips. *Journal-Urban-Rural and Regional Economy*, pages 10–15, 2018.
- [6] Fernando Elizalde-Ramírez, Romeo Sanchez Nigenda, Iris A Martínez-Salazar, and Yasmín Á Ríos-Solís. Travel plans in public transit networks using artificial intelligence planning models. *Applied Artificial Intelligence*, pages 1–22, 2019.
- [7] Expansión. El número de turistas en México crece 5.8 <https://expansion.mx/nacional/2019/01/18/el-numero-de-turistas-en-mexico-crece-5-8-en-2018>, 2018.
- [8] Ander Garcia, Olatz Arbelaitz, Maria Teresa Linaza, Pieter Vansteenwegen, and Wouter Souffriau. Personalized tourist route generation. In *International Conference on Web Engineering*, pages 486–497. Springer, 2010.
- [9] Damianos Gavalas, Charalampos Konstantopoulos, Konstantinos Mastakas, and Grammati Pantziou. Mobile recommender systems in tourism. *Journal of network and computer applications*, 39:319–333, 2014.
- [10] Gilbert Laporte. The vehicle routing problem: An overview of exact and approximate algorithms. *European journal of operational research*, 59(3):345–358, 1992.
- [11] Atsushi Maruyama, Naoki Shibata, Yoshihiro Murata, Keiichi Yasumoto, and Minoru Ito. A personal tourism navigation system to support traveling multiple destinations with time restrictions. In *18th International Conference on Advanced Information Networking and Applications, 2004. AINA 2004.*, volume 2, pages 18–21. IEEE, 2004.
- [12] Wouter Souffriau, Pieter Vansteenwegen, Joris Vertommen, Greet Vanden Berghe, and Dirk Van Oudheusden. A personalized tourist trip design algorithm for mobile tourist guides. *Applied Artificial Intelligence*, 22(10):964–985, 2008.
- [13] Paolo Toth and Daniele Vigo. *The vehicle routing problem*. SIAM, 2002.
- [14] Pieter Vansteenwegen, Wouter Souffriau, Greet Vanden Berghe, and Dirk Van Oudheusden. The city trip planner: An expert system for tourist. *Expert Systems with Applications*, 2011.

# 4 Mejora en la gestión del almacenamiento de componentes para el armado de prototipos mediante la aplicación de modelos de programación lineal entera

Miriam EcheGARAY Tapia<sup>1</sup>, Gaston Vertiz Camaron<sup>1</sup>, Jenaro Nosedal Sánchez\*<sup>2</sup>, Ana María De León Almaraz<sup>3</sup>

1 – Facultad de Ingeniería de la UAEMex, Toluca, Edo. Mex.

2 – Catedrático CONACYT-UAEMex.

3 – Asesor externo de la Facultad de Ingeniería de la UAEMex.

\*e-mail: jnosedal@conacyt.mx

El almacenamiento es reconocido como un proceso crítico para la gestión eficaz de la cadena de suministro. En el presente trabajo, se analiza la problemática existente y posibles mejoras en un almacén de materia prima que contempla componentes para el armado de prototipos. El almacén es gestionado por una empresa del ramo automotriz para el acopio de estos componentes, por lo que la configuración de cada orden de compra o proyecto es muy variable en composición y volumen. Con el propósito de evitar paros innecesarios en la producción programada y asegurar que los tiempos de entrega se cumplan, es vital que dichos componentes, para cada orden o proyecto, se tengan completos y disponibles de manera oportuna, más allá de que los mismos estén almacenados, pues éstos deben estar localizables y accesibles. De acuerdo a la operación actual, la empresa considera que requiere hacer el uso más eficiente del espacio disponible y mejorar las condiciones de acomodo para realizar de manera más rápida la recolección de los componentes que deben ingresar a la línea de producción. Para tal fin, se propone mediante programación lineal entera, el desarrollo y solución de dos modelos de optimización; el primer modelo busca incorporar la máxima cantidad de componentes en cinco tipos de charola, empleadas para acomodar los componentes dentro del almacén, de tal modo que se maximiza la densidad de almacenamiento. El segundo modelo busca minimizar el número de charolas por cada orden de compra, de tal modo que se minimiza el volumen que ocupa el total de componentes almacenados de cada proyecto u orden de compra. Con los resultados obtenidos, se resuelven y analizan varias instancias que representan la demanda de espacio para el almacén en un horizonte determinado de tiempo. De este modo, con ambos modelos es posible determinar de manera precisa y optimizada la capacidad de almacenamiento requerida en función del programa de producción planeado.

*Palabras clave:* Optimización; espacio; almacén; prototipos automotrices; charola de almacenamiento.

## 4.1. Introducción

Es sabido que una gestión de almacenamiento se refiere al proceso que permite reducir tiempos y costos en la operación; es decir, es un proceso logístico que incluye la recepción, acomodo y movimiento de cualquier material dentro del almacén hasta el punto de consumo, incluyendo el tratamiento e información de los datos generados. La cadena de suministro se considera como un conjunto coordinado de actividades relacionadas con la adquisición de materias primas, la producción de productos

intermedios y acabados, y la distribución de estos productos a clientes dentro y fuera de la cadena [5]. En la planificación de plantas, un elemento fundamental y difícil, es la determinación de la cantidad de espacio requerido [7]. El considerar la implementación de estrategias de asignación de almacenamiento efectivas y combinando con lotes eficientes, es primordial para mantener la capacidad de respuesta del almacén [1]. Para [3] la función del almacenamiento es garantizar que el canal de suministro cuente con el stock suficiente para satisfacer los requerimientos anticipados del cliente y actuar como amortiguador, protegiendo contra las incertidumbres en la oferta y la demanda. Del mismo modo, el almacenamiento es una función que está relacionada con la gestión física de los materiales, componentes, productos terminados y artículos de mantenimiento, reparación y operación, pues las actividades críticas se centran en almacenar de manera eficiente los materiales recibidos e inspeccionados, así como de emitir y aceptar devoluciones de materiales, mantener la precisión física del inventario y realizar inventarios físicos periódicos. Según [2] un almacén tiene dos funciones primarias: (1) almacenaje temporal y protección de bienes y (2) proveer servicios de valor añadido (por ejemplo, órdenes completas de clientes individuales, empaquetado de bienes, servicios postventa, reparaciones, pruebas, inspección y ensamble) . En el trabajo realizado por [6], se considera una revisión sistemática de la literatura relacionada con el problema de la asignación de ubicación del almacenamiento (SLAP, por sus siglas en inglés), y definen el SLAP, como un problema que incluye la asignación de productos en un espacio de almacenamiento y la optimización de los costos de manejo de materiales o la utilización del espacio de almacenamiento. Respecto a las técnicas empleadas para la solución del SLAP, en el referido trabajo, se reporta el uso intensivo de técnicas de programación matemática (casi un tercio de los trabajos publicados). Complementariamente, de acuerdo con lo reportado en [4], el dimensionamiento del espacio para almacenamiento, se identifica dentro de las áreas que han sido poco exploradas, o investigadas con menor intensidad y, por lo tanto, hasta el momento, es escasa la literatura que propone herramientas o métodos para el dimensionamiento de almacenes a partir del plan de requerimiento de materiales. Con base en lo anterior, en el presente trabajo se eligió hacer uso de programación lineal entera para analizar y proponer una solución a la problemática expuesta, de tal modo que se hace uso de métodos eficientes y eficaces, validados en la literatura. No obstante, que la aportación principal que se busca es proporcionar una solución al SLAP, asimismo, se propone abordar el problema de dimensionamiento del espacio requerido para un conjunto de órdenes programadas, por tanto, se busca también aportar y extender los trabajos disponibles al respecto.

## 4.2. Descripción del problema

Actualmente una empresa del ramo automotriz enfrenta problemas de paros en la producción de prototipos, debido a retrasos generados por demoras en la recolección de componentes; problema que se produce por no tener los componentes necesarios en la estación de uso para la fabricación de éstos, otra causa es por la mezcla de materia del órdenes, ya que se da el caso que dos o más órdenes ocupen algunos componentes en común, ocasionando que algún componente en particular pueda ser utilizado erróneamente para otra orden cuando había sido planeado para una orden distinta, una causa adicional es la disponibilidad del material, refiriéndose a su fácil e inmediata identificación, ubicación y conteo de piezas. Al existir paros de producción, se generan algunas consecuencias para la empresa, entre ellas retraso de entregas de prototipos con los clientes, merma en costos por baja utilización y productividad de las líneas productivas, riesgo potencial de fallas por cambios en la producción no planeados, entre otros. El almacén de prototipos en estudio está conformado por anaqueles que almacenan 5 tipos de charolas plásticas, éstas a su vez almacenan los componentes necesarios para la fabricación de los prototipos. Cabe mencionar que al tratarse de la producción de prototipos o muestras y no de producto de línea, la configuración de cada orden o proyecto es muy variable en

composición y volumen. Se entiende por prototipo o muestra al producto que está en fase desarrollo y que aún no forma parte de la producción en serie, los prototipos son identificados por órdenes o proyectos, cada orden tiene un número específico de componentes, el tamaño de la orden está definido por el cliente. Por ejemplo, un cliente emite una orden por 50 prototipos, el prototipo contiene un listado de materiales de 27 componentes. De este modo, la solución a la problemática que se analiza en el presente trabajo, corresponde a la optimización de la cantidad de espacio para almacenar un número finito de las distintas charolas que conforman una orden de trabajo completa o proyecto. Del mismo modo, más allá de que los componentes se tengan almacenados, el otro problema que se enfrenta es que no existe una adecuada gestión del almacén para que los componentes estén localizables y accesibles, así como consolidados o agrupados para su oportuno ingreso a la producción y que permita procesar cada orden a tiempo. De acuerdo con lo anterior, se requiere hacer el uso eficiente del espacio disponible y mejorar las condiciones de acomodo para realizar de manera más rápida la recolección de los componentes que deben ingresar a la línea de producción. En la Figura 4.1, se ilustra el anaquel tipo empleado para el acomodo de los componentes, así como dimensiones de las charolas de plástico que se utilizan para agrupar los componentes.

**Figura 4.1:** Anaqueles y charolas para el acomodo de los componentes

#### 4.2.1. Modelación matemática

Para llevar a cabo la optimización del espacio que ocupan estos prototipos en el almacén, se considera las dimensiones de los distintos componente. Luego, como primer paso para la modelación, se consideran los siguientes supuestos: **a.** Para el acomodo de componentes por proyecto en los anaqueles, el peso de estos no es una restricción. **b.** Ante la heterogeneidad geométrica de los componentes, todos se pueden representar mediante un prisma con las dimensiones máximas de cada uno de sus ejes ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ). **c.** Se pueden estibar en forma vertical tantos componentes como sea posible en cada charola sin que exista una restricción más allá de la altura máxima de la pila de componentes y la profundidad vertical de cada tipo de charola. **d.** Para facilitar la recolección (picking), no se considera el acomodo de distintos tipos de componentes dentro de la misma charola. **e.** La capacidad total de anaqueles para almacenar las charolas disponibles en el almacén es suficiente para cubrir la demanda, por lo que no se considera esta como una restricción para el modelado del problema.

Sin embargo, para atender el requisito de máximo aprovechamiento del espacio disponible en el almacén, el primer modelo que se propone tiene como objetivo determinar la asignación e incorporar la máxima cantidad de componentes en los cinco tipos de charola, de tal modo que se maximiza la densidad de almacenamiento para cada tipo de componente, en cada una de las charolas. Dicha información es una entrada "optimizada" que se utiliza para determinar las capacidades máximas en cada charola a partir de analizar previamente las distintas posiciones de un componente y por ende el acomodo óptimo dentro de éstas. El modelo para maximizar el número de componentes (que denominaremos Modelo I), por charola, se formaliza y formula mediante programación lineal entera con los siguientes elementos:

##### Variables de decisión

$X_{ijk}$ : Número de componentes acomodados en la dirección  $i$  (orientación respecto a la charola), en la charola tipo  $k$ , orientados en la dirección  $j$ .

$i, j, k$ :  $i$  dirección del componente dentro de la charola en  $x$ ,  $y$  y  $z$ ;  $j$  dirección de la charola sobre el anaquel en  $x$ ,  $y$  y  $z$ ,  $k$  charola tipo  $k$  ( $k= 1, 2, 3, 4$  y  $5$ ).

**Parámetros**

$a_i$ : Dimensión del componente en la dirección  $i$ .

$b_j$ : Dimensión de la charola en la dirección  $j$ .

**Función objetivo**

$$MaxZ = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^5 X_{ijk}$$

**Restricciones**

$$\sum_{j=1}^3 a_j X_{ijk} \leq b_i \quad \forall i = 1, 2, 3 \quad \forall j = 1, 2, 3 \quad \forall k = 1, 2, 3, 4, 5$$

$$X_{ijk} \geq 0 \text{ y entero } \forall i = 1, 2, 3 \quad \forall j = 1, 2, 3 \quad \forall k = 1, 2, 3, 4, 5$$

Cabe señalar que los subíndices  $ijk$  que aparecen en las variables de decisión, se refiere a lo siguiente:  $i$  es la dirección del componente dentro de la charola en eje  $x$ ,  $y$  y  $z$ ;  $j$  es la dirección de la charola sobre el anaquel en el eje  $x$ ,  $y$  y  $z$ ,  $k$  se refiere a la charola tipo  $k$  ( $k= 1, 2, 3, 4, 5$ ). Por ejemplo,  $X_{123}$ ; representa la dirección del componente dentro de la charola en el eje  $x$ , la dirección de la charola sobre el anaquel en el eje  $y$ ; para la charola tipo 3.

En el modelo, la función objetivo maximiza el número de componentes tipo  $i$ , en cada charola tipo  $k$ , tomando en cuenta la dirección del componente  $i$  en dirección  $j$  de la charola  $k$ . En tanto las restricciones, denotan las dimensiones del componente  $i$ , en la dirección  $ij$  para la charola  $k$ .  $a_i$ : Se refiere a la longitud del componente  $i$  en la dirección  $i$ .  $b_j$ : Es la longitud de la charola  $k$  en la dirección  $j$ . Por ejemplo, el término  $15.2X_{111}$  asociado en una restricción, indica la cantidad total de un tipo de componente que va acomodado en una charola tipo 1 y orientados en la dirección del eje  $x$ . Es decir; el 15.2 se refiere a la dimensión de un componente y la variable  $X_{111}$  se refiere la cantidad de componentes acomodados en la dirección del eje  $x$ , para la charola tipo 1 y orientados en la dirección el eje  $x$ .

Complementariamente, para hacer un uso optimizado del espacio del almacén, es necesario determinar la asignación del conjunto de charolas para hacer el acopio de cada orden o proyecto en específico. Para la asignación que ocupe el menor espacio posible en los anaqueles, fue necesario incluir un segundo modelo para minimizar el número de charolas por cada orden de compra, considerando que en el paso anterior se optimizó el uso de cada charola por tipo de componente. Por tanto en este segundo paso se minimiza el volumen que ocupa el total de componentes almacenados de cada proyecto. El modelo para minimizar el número de charolas (que denominaremos Modelo II), para cada proyecto, se formaliza y formula mediante programación lineal entera con los siguientes elementos:

**VARIABLES DE DECISIÓN**

$X_{ik}$  = Número máximo de componentes tipo  $i$  en la charola tipo  $k$ .

**Parámetros**

$A_i$ : Cantidad de charolas tipo  $i$  del proyecto  $j$ .

$V_{ik}$ : Volumen del componente  $i$ , en la charola tipo  $k$ .

$d_i$ : Demanda total de órdenes de compra  $i$ .

**Función objetivo**

$$MinZ = \sum_{i=1}^3 \sum_{k=1}^5 V_{ik} X_{ik}$$

**Restricciones**

$$\sum_{k=1}^5 A_i X_{ik} \leq d_i \quad \forall i \in \text{proyectos } j$$

$$X_{ik} \geq 0 \text{ y entero } \forall i \in \text{proyectos } j \quad \forall k = 1, 2, 3, 4, 5$$

La función objetivo minimiza el volumen por orden de componentes tipo  $i$  en las charolas tipo  $j$ , en tanto las restricciones denotan la cantidad máxima de componentes tipo  $i$  para el proyecto  $j$  en la charola tipo  $k$ .

### 4.3. Metodología de solución

La metodología que se aplica se resume en 2 pasos: Paso 1. Aplicación del Modelo I, determina el acomodo óptimo de cada de componente en cada tipo de charola. Este proceso se ejecuta tantas veces como tipos diferentes de componentes se tengan. Paso 2. Aplicación del Modelo II, se utilizan como entradas los valores optimizados obtenidos en el paso anterior, y se determina el número de mínimo de charolas para almacenar todos los componentes de un proyecto. Este proceso se replica tantas veces como proyectos se tengan en el horizonte de tiempo a analizar. Un paso adicional, es la correcta identificación visual en los anaqueles. Una vez que se conoce el número de charolas que un proyecto utiliza, éstas son almacenadas en un espacio en los anaqueles disponibles. Se utilizan etiquetas impresas que incluyen el número de identificación de la orden y la cantidad de prototipos a fabricar.

### 4.4. Experimentación computacional

Para la solución de los modelos presentados en la sección 2, se realizó la implementación y solución utilizando el Software LINDO versión 6.1 y se empleó una computadora con procesador AMD R2 a 64 bits y 1.8 Mhz de doble núcleo, los tiempos de resolución para ambos modelos son del orden de 5 segundos o menos. La solución del Modelo I y del Modelo II, se ilustran en las Tablas 4.1 y 2 respectivamente. A partir de la Tabla 4.1, se puede observar la asignación máxima de componentes del tipo 1 en cada charola (primer renglón de la tabla), se puede identificar que, si utilizamos una charola tipo 1 para ese componente en específico, la capacidad máxima es de 9 charolas; para para modelar se tomó en cuenta la dirección de los ejes  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , del componente número 1 y de la charola tipo 1, para maximizar el número de componentes tipo 1 en la charola tipo 1; para la charola tipo 2 se puede verificar que la capacidad máxima es de 8 charolas esto se determinó contemplando la dirección de  $x$ ,  $y$ ,  $z$  del componente número 1 y la charola tipo 2; para la charola tipo 3 la capacidad máxima es de 6 charolas; para la charola tipo 4 la capacidad máxima es de 14 charolas y para la charola tipo 5, la capacidad máxima es de 15 charolas, esto se realizó para las 85 componentes utilizados en cada uno de los proyectos, en la Tabla 1 se ejemplifican los primeros 3 componentes considerando los 5 tipos de charolas. Cada charola solo contempla un tipo de componente, para que el usuario final no vaya a mezclar componentes en el armado, ocasionando un error en el ensamblaje final.

A partir de la Tabla 4.2, es posible identificar la asignación para 3 proyectos. Para el caso del primer renglón, se interpreta que para el almacenamiento de los componentes del proyecto 1, que consiste en una orden de 100 muestras, donde se requieren 27 tipos de componentes diferentes, resultando necesario utilizar 196 charolas; de las cuales una charola es del tipo 2 y 195 charolas son del tipo 3; para el proyecto 2, el cual está formado por 36 muestras, se requieren 30 tipos de componentes diferentes, resultando final es de 79 charolas; de las cuales una charola es del tipo 2 y 178 charolas son del tipo 3 y para el proyecto 3, que está integrado por 80 muestras, se requieren 20 tipos de

**Tabla 4.1:** Solución óptima del modelo I para 3 tipos de componentes a través del modelo de maximización.

| No. Componente. | Dimensiones en cm |       |      | Charolas |     |     |     |     |
|-----------------|-------------------|-------|------|----------|-----|-----|-----|-----|
|                 | Ancho             | Largo | Alto | CH1      | CH2 | CH3 | CH4 | CH5 |
| 1               | 15.2              | 5.44  | 15.2 | 9        | 8   | 6   | 14  | 15  |
| 2               | 21                | 2     | 4.1  | 28       | 27  | 19  | 40  | 40  |
| 3               | 16                | 0.5   | 0.5  | 141      | 140 | 100 | 201 | 202 |

componentes diferentes, resultando final es de 108 charolas; de las cuales 2 charolas son tipo 2 y 106 charolas son del tipo 3. Para minimizar el número de charolas, por proyecto y minimizar el volumen asignado, se aplicó el Modelo II realizando 14 replicas que corresponden a cada proyecto.

**Tabla 4.2:** Solución óptima del modelo II para 3 proyectos a través del modelo de minimización.

| No. Proy. | Muestras | Compo. | ChT1 | ChT2 | ChT3 | ChT4 | ChT5 | Total Charolas |
|-----------|----------|--------|------|------|------|------|------|----------------|
| 1         | 100      | 27     | 0    | 1    | 195  | 0    | 0    | 196            |
| 2         | 36       | 30     | 0    | 1    | 78   | 0    | 0    | 79             |
| 3         | 80       | 20     | 0    | 2    | 106  | 0    | 0    | 108            |

## 4.5. Conclusiones

Con base en la solución óptima obtenida para cada proyecto, se puede determinar el espacio requerido total (real y optimizado) para un conjunto de órdenes que representan la demanda de producción, por tanto, se proporciona el dimensionamiento del almacenamiento para una ventana de tiempo específica. Entre otras ventajas, mediante la aplicación de los modelos desarrollados, se propone el almacenamiento diferenciado de los componentes necesarios para una orden, lo que permite mayor control y visibilidad a través del adecuado etiquetado, indicando claramente los materiales que corresponden a cada proyecto u orden. Con la implementación de la propuesta de almacenamiento de componentes obtenida mediante la modelación matemática se resuelven las problemáticas planteadas anteriormente. Se eliminan los paros de producción de prototipos causados por la ausencia de componentes, evitando así costos por baja utilización y productividad de líneas productivas. Se mantiene la satisfacción del cliente al entregar en tiempo las ordenes requeridas, y beneficio económico para la empresa (eliminación de penalización económica por el retraso de una orden con cliente). Se evita la mezcla de componentes de uso común entre dos o más ordenes, esto es debido a la correcta separación e identificación de los componentes. Se minimiza el tiempo operacional que se emplea en la búsqueda, selección y conteo del material que será utilizado en una orden. Se disminuye el tiempo empleado para verificación de las existencias (inventarios físicos rutinarios).

## Referencias

- [1] Behnam Bahrami, El-Houssaine Aghezzaf, and Veronique Limère. Enhancing the order picking process through a new storage assignment strategy in forward-reserve area. *International Journal of Production Research*, pages 1–22, 2019.
- [2] Sunderesh S Heragu. *Facilities design*. Crc Press, 2018.

- [3] Frederick S Hillier, Kut C So, and Ronald W Boling. Toward characterizing the optimal allocation of storage space in production line systems with variable processing times. *Management Science*, 39(1):126–133, 1993.
- [4] Z Hualpa, Andrés Mauricio, R Suarez, et al. Sizing of warehouse based on material requirements planning for a polyurethane coating factory. *Ingeniería*, 23(1):48–69, 2018.
- [5] A Ravi Ravindran and Donald P Warsing Jr. *Supply chain engineering: Models and applications*. CRC Press, 2016.
- [6] J Reyes, E Solano-Charris, and J Montoya-Torres. The storage location assignment problem: A literature review. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 10(2):199–224, 2019.
- [7] James A Tompkins, John A White, Yavuz A Bozer, and Jose Mario Azaña Tanchoco. *Facilities planning*. John Wiley & Sons, 2010.



## 5 Asignación de volúmenes de compra entre proveedores de empaque a través de la aplicación de una metodología híbrida de simulación y optimización

Marlenne Cruz Romero\*<sup>1</sup>, José Concepción López Rivera<sup>1</sup>, Jenaro Nosedal Sánchez<sup>2</sup>, Ana María De León Almaraz<sup>3</sup>

1 – Facultad de Ingeniería de la UAEMex, Toluca, Edo. Mex.

2 – Catedrático CONACYT-UAEMex.

3 – Asesor externo de la Facultad de Ingeniería de la UAEMex.

\*e-mail: mcruzr011@alumno.uaemex.mx

Debido a que en cualquier proceso productivo o de servicios es necesario que el abastecimiento de materia prima y/o componentes sea en el momento correcto, al costo correcto, en la cantidad correcta y con la calidad deseada, el proceso de selección de proveedores es considerado como una actividad crítica en la gestión de la cadena de suministro. En este trabajo se estudia una problemática actual relacionada con el suministro de volúmenes pequeños de empaque para prototipos de sistemas de gasolina fabricados por una empresa proveedora de la industria automotriz. El empaque representa un insumo estratégico para la empresa, ya que tiene un alto impacto para la preservación de la calidad del producto terminado durante su traslado para su aceptación final por parte del cliente. Con la finalidad de que los prototipos lleguen en óptimas condiciones al consumidor final, es indispensable llevar a cabo el proceso de selección de proveedores que cumplan con las especificaciones establecidas para la fabricación del empaque. Adicionalmente, la adquisición de los empaques es un proceso crítico para la empresa dada la escasez de proveedores que pueden cumplir y ofrecer el suministro en volúmenes pequeños a precios competitivos. El presente trabajo propone como solución el uso de programación matemática entera para determinar la asignación de los volúmenes de compra entre los proveedores de empaque disponibles, de acuerdo con la definición de los volúmenes mínimos de compra de los diferentes tipos de empaque y los precios que cada proveedor ofrece, así como los volúmenes de empaque que demanda cada orden. De acuerdo con la operación actual y con base en los datos históricos analizados, la demanda de prototipos de sistemas de gasolina que se observa es muy variable, en consecuencia, la demanda de empaques, directamente dependiente, también lo es. La metodología propuesta considera a la demanda como estocástica y con la finalidad de estimar los volúmenes de empaque requeridos al año, se simula a partir de la distribución empírica de las órdenes y sus volúmenes. Con la información de la demanda simulada, se solucionan diferentes instancias utilizando el modelo de programación lineal entera para asignación de volúmenes de compra de empaque para cada tipo de producto. Con los resultados obtenidos de diferentes escenarios de demanda de prototipos de sistemas de gasolina se establece la cantidad de compra a proveedores por tipo de empaque, garantizando que dicha asignación satisface los volúmenes de empaque requeridos minimizando el costo de la compra total.

*Palabras clave:* Optimización; espacio; almacén; prototipos automotrices; charola de almacenamiento.

*Palabras clave:* Selección de proveedores; Simulación; Modelo de asignación; Programación lineal entera.

## 5.1. Introducción

Las empresas dependen en gran medida de sus proveedores considerando que a nivel mundial se realiza el abastecimiento de materias primas y componentes a causa de será imposible producir a bajos costos y con calidad alta, sin disponer de un buen proveedor. Una decisión errónea a la hora de seleccionar a un proveedor afectará actividades importantes de la cadena de suministro, como son la gestión del inventario y la planeación de la producción.

La selección de proveedores es una actividad importante con impacto directo estratégico y operacional en las cadenas de suministro [1]. Este proceso de decisión, involucra al departamento de compras, básicamente es un proceso donde el comprador define un orden de preferencia entre proveedores potenciales basado en un conjunto de criterios de selección como son calidad, confiabilidad, capacidad técnica, tiempo de entrega, etc., [2]. En este proceso, el comprador se enfrenta a dos decisiones básicas e interrelacionadas, la primera, decidir con qué proveedores hacer negocios y la segunda ¿Cuánto pedir a cada proveedor? [3]. Para poder determinar lo anterior será necesario evaluar la capacidad de producción de los proveedores para conocer la cantidad que éstos pueden suministrar. De esta forma se compromete al proveedor a reservar una parte de su capacidad de producción con el comprador.

Por otra parte, los objetivos del comprador serán mantener la continuidad de las adquisiciones sin solicitar demandas irreales al proveedor. Dicha interdependencia entre comprador y proveedor demanda el establecimiento de relaciones ganar – ganar para incrementar su competitividad de manera conjunta [4].

La aplicación de programación lineal para abordar problemas relacionados con la asignación de compra a un conjunto de proveedores, ha sido explorada por el modelo propuesto por Ruiz, Ablanedo y Ayala (2012), a través del cual se optimiza la asignación de la demanda a un grupo de proveedores, considerando costos de compra, pérdidas esperadas debido a incumplimiento, costos por faltas en las entregas de suministros y costo de gestión del conjunto de proveedores [5].

El presente trabajo busca proponer una metodología híbrida que permita considerar la incertidumbre en la demanda para establecer intervalos de asignación para cada proveedor para cada tipo de empaque, respetando los volúmenes mínimos de compra y cubriendo la demanda de empaque al menor costo.

## 5.2. Descripción del problema

La problemática que se estudia en este trabajo se relaciona con el suministro de la demanda en volúmenes pequeños, de empaque de prototipos de sistemas de gasolina. Actualmente esta problemática se presenta en el departamento de nuevos proyectos de una empresa fabricante de productos para la industria automotriz. Dicho departamento produce dos prototipos de sistemas de gasolina A y B, y tiene la necesidad de contar con proveedores confiables capaces de suministrar empaques cuya función es la de embalar y proteger durante el transporte los prototipos de manera segura. Dado que se trata de una producción de prototipos, se ha observado que la demanda de éstos es muy variable y, por lo tanto, la demanda del empaque, directamente dependiente, también lo es. Otra limitante para la planeación de la adquisición de los empaques, es el volumen total, ya que, de acuerdo a las condiciones actuales de los proveedores, se considera un volumen pequeño y por ende no todos los proveedores técnicamente elegibles, lo son desde el punto de vista comercial.

De acuerdo con lo anterior, este departamento requiere una herramienta para la estimación de la demanda dependiente del empaque, y la selección de proveedores de empaques, incluyendo la asignación de volúmenes de compra entre éstos satisfaciendo los requerimientos y volúmenes de compra mínimos de los proveedores, así como minimizar el costo de compra total. En la Figura 14.1, se ilustran las características, capacidad y dimensiones del empaque empleado para albergar los prototipos de los

sistemas de gasolina A, mientras que en la Figura 5.2, se ilustra el empaque empleado para albergar los prototipos de los sistemas de gasolina.

| Empaque | Dimensiones | Capacidad |
|---------|-------------|-----------|
| 1       | 20x60x35    | 3         |
| 2       | 80x60x35    | 12        |

Características:  
 1. Doble corrugado de cartón  
 2. Resistencia 14 kg/cm<sup>2</sup>  
 3. Cajas regulares



**Figura 5.1:** Empaque para prototipo A, características, capacidad y dimensiones

| Empaque | Dimensiones | Capacidad |
|---------|-------------|-----------|
| 3       | 20x60x50    | 3         |
| 4       | 80x60x50    | 12        |

Características:  
 1. Doble corrugado de cartón  
 2. Resistencia 14 kg/cm<sup>2</sup>  
 3. Cajas regulares



**Figura 5.2:** Empaque para prototipo B, características, capacidad y dimensiones

### 5.2.1. Modelación matemática

En este trabajo, se propone un modelo de programación lineal entera para asignación de volúmenes de compra de empaque a proveedores. Los supuestos que se consideran en este modelo son los siguientes:

**Supuesto 1:** Se han identificado previamente a los 3 proveedores que cumplen con los requisitos de fabricación, características y dimensiones del empaque solicitado. **Supuesto 2:** La información disponible de la demanda de los prototipos A y B es considerada como información representativa de lo que será el comportamiento de demanda en 2019, con base en esta información se consideran 324 y 128 órdenes para los prototipos A y B para el siguiente año. **Supuesto 3:** Los empaques del tipo 1 y 2 solo se pueden utilizar para embalar prototipos A y sus capacidades son de 3 y 12 prototipos respectivamente. **Supuesto 4:** Los empaques del tipo 3 y 4 solo se pueden utilizar para embalar prototipos B y sus capacidades son de 3 y 12 prototipos respectivamente. La notación usada para el modelado se muestra en la Tabla 5.1.

**Tabla 5.1:** Notación del modelo

| Notación      |  |
|---------------|--|
| $j$           | Número de orden.   |
| $k$           | Tipo de empaque.   |
| $m$           | Proveedor.   |
| $DPROD_j$     | Demanda de prototipo en orden $j$ .                                    |
| $Cap_k$       | Capacidad de empaque tipo $k$ cuando se emplea para embalar prototipo. |
| $P_{km}$      | Precio de empaque $k$ comprado al proveedor $m$ .                      |
| $OrdMin_{km}$ | Orden mínima de venta de empaque $k$ establecida por proveedor $m$ .   |

#### VARIABLES DE DECISIÓN:

$X_{jkm}$  = Número de empaques tipo  $k$  vendidos por el proveedor  $m$  en la orden  $j$ .

$CT$  = Costo total compra.

$Y_{km}$  = 1 si los empaques tipo  $k$  se compran al proveedor  $m$ . 0 en otro caso.

$Z_{km}$  = Cantidad de empaques tipo  $k$  que se compran al proveedor  $m$ .

**Función Objetivo:** Minimizar el costo total de compra de empaque.

$$MinW = \sum_j^J \sum_k^K \sum_m^M P_{km} * X_{jkm}$$

**Restricciones:**

**Ecuación 1**

$$\sum_k^K \sum_m^M Cap_k * X_{jkm} \geq DPROD_j \forall j$$

El número de empaques tipo j, proporcionados por todos los proveedores m, empleados para embalar la cantidad de prototipos, en la orden j, multiplicados por su respectiva capacidad para contener los, deben ser suficientes para empacar la cantidad total de prototipos demandados en la orden j.

**Ecuación 2**

$$Z_{km} = \sum_j^J X_{jkm} \forall k, m$$

Variable auxiliar que ayuda a acumular la cantidad total de empaques tipo k comprados al proveedor m.

**Ecuación 3**

$$Z_{km} \geq OrdMin_{km} * Y_{km} \forall k, m$$

La suma del número de empaques tipo k, proporcionados por el proveedor m, que se emplean para embalar los prototipos, debe ser superior a la cantidad mínima establecida como requisito de compra por dicho proveedor para este tipo de empaque.

**Ecuación 4**

$$X_{jkm} \leq MY_{km} \forall j, k, m$$

Ecuación de control con M grande para anular las compras de k al proveedor m cuando éste no es seleccionado.

$$X_{jkm} \geq 0yentera$$

### 5.3. Metodología de solución

El método de solución propuesto comprende las actividades siguientes: 1. Simulación de diferentes escenarios de demanda de prototipos A y B a través de la distribución empírica. 2. Solución del modelo de programación lineal entera para asignación de volúmenes de compra de empaque a proveedores. 3. Consolidación y análisis de los resultados de cada escenario para determinar la variabilidad y estimar el volumen total de compra.

### 5.4. Experimentación computacional

Para la solución del modelo presentado en la sección 2.1, se realizó la implementación y solución utilizando el software GAMS 25.1 y se empleó una computadora con procesador AMD Ryzen 5 y 12 Gb en RAM, los tiempos de solución observados en general son menores a 1 segundo.

Considerando la naturaleza estocástica de la demanda, en este trabajo se analizan diferentes escenarios de demanda simulada de prototipos de sistemas de gasolina y se establecen volúmenes de

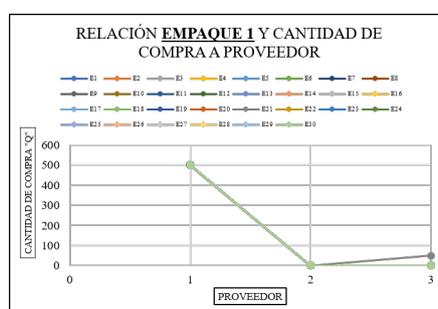
compra de empaque a proveedores para cada instancia, los valores correspondientes para la asignación de volúmenes de compra de empaque obtenidos a través del modelo y su variabilidad se ilustran mediante las figuras 5.3, 5.4, 5.6 y 5.8.

Se puede observar en la Figura 5.3, que, a pesar de haber simulado diferentes escenarios de demanda de prototipos A, no existe variabilidad en la cantidad de compra del empaque 1, lo anterior se debe a que el valor óptimo del volumen para este tipo de empaque no rebasa el volumen de compra mínima de los proveedores. En contraste con el empaque 2 dónde si existe variabilidad en la cantidad de compra dados los diferentes escenarios (Figura 5.4) para el cuál se puede determinar que el 98 % de las veces la cantidad de compra de empaque 2 deberá ser entre 657 y 729 unidades (Figura 5.5).

Avanzando en nuestro razonamiento en la Figura 5.6, se observa que dados los diferentes escenarios de demanda de prototipos B si existe variabilidad en la cantidad de compra del empaque 3, por lo tanto, el 98 % de las veces la cantidad de compra del empaque 3 estará entre 400 y 403 unidades (Figura 5.7), consideremos ahora las cantidades variables de compra del empaque 4 dados los diferentes escenarios mostrados en la Figura 5.9, se puede determinar que el 98 % de las veces la cantidad de compra del empaque 4 estará entre 930 y 1102 unidades.

Importante mencionar que el número total de cajas de cada tipo considera las unidades que efectivamente se requieren para cada orden, así como también las unidades adicionales que se adquieren para cumplir con las restricciones de compra mínima establecidas por cada proveedor para cada tipo de empaque.

Dicho lo anterior, la selección del proveedor 1 es la mejor opción para la compra de los 4 empaques dado que puede satisfacer las características del empaque y permite la minimización del costo de compra total.



**Figura 5.3:** Relación empaque 1 y cantidad de compra a cada proveedor

5 Asignación de volúmenes de compra

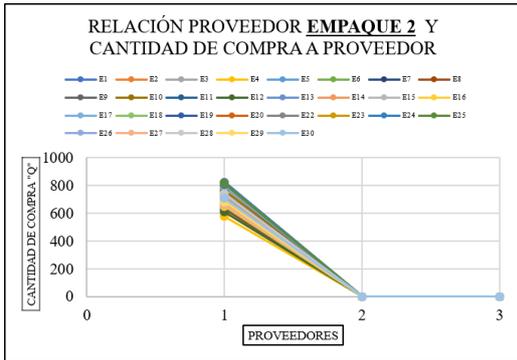


Figura 5.4: Relación proveedor empaque 2 y cantidad de compra a cada proveedor

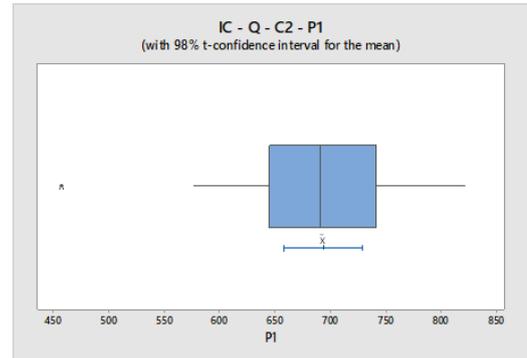


Figura 5.5: Intervalo de confianza para volumen de compra anual al proveedor 1 para el empaque 2 (657 - 729)

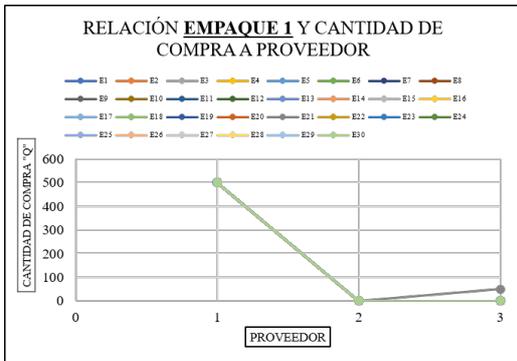


Figura 5.6: Relación proveedor empaque 3 y cantidad de compra a cada proveedor

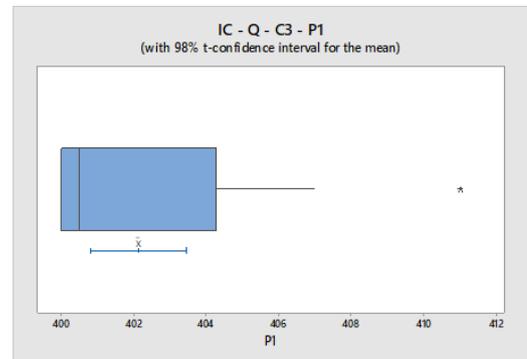


Figura 5.7: Intervalo de confianza para volumen de compra anual al proveedor 1 para el empaque 3 (400 - 403)

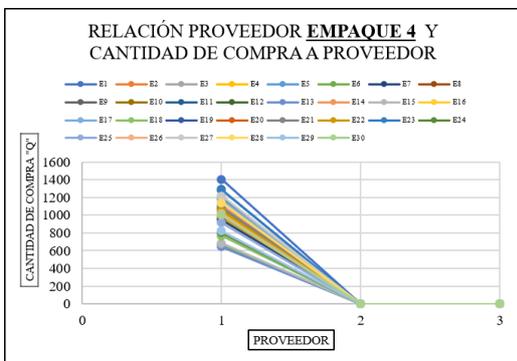


Figura 5.8: Relación proveedor empaque 4 y cantidad de compra a cada proveedor

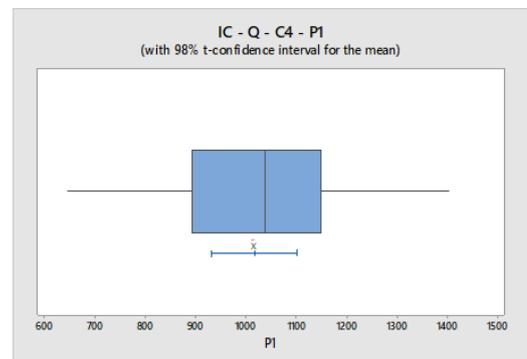


Figura 5.9: Intervalo de confianza para volumen de compra anual al proveedor 1 para el empaque 4 (930 - 1102)

## 5.5. Conclusiones

De acuerdo con los resultados mostrados, el modelo propuesto permite minimizar el costo de compra total del empaque a través de la selección del proveedor que puede cumplir con las características del empaque, precio y cantidades de compra. Entre otras ventajas, el uso de la metodología híbrida (simulación - optimización) permite, a través de los diferentes escenarios de demanda simulados, la estimación los intervalos de asignaciones de compra para los cuatro tipos de empaque considerando la variabilidad de la demanda, por lo que la solución propuesta no sólo impacta en la minimización del costo total de compra, sino que reduce el impacto que tiene la incertidumbre de las cantidades de compra en el proceso de selección de proveedores.

### Referencias

- [1] O. Pal, A. K. Gupta, and R. K. Garg, Supplier Selection Criteria and Methods in Supply Chains?: A Review, vol. 7, no. 10, pp. 2667-2673, 2013.
- [2] F. R. Lima-Junior and L. C. R. Carpinetti, A multicriteria approach based on fuzzy QFD for choosing criteria for supplier selection, *Comput. Ind. Eng.*, vol. 101, pp. 269-285, 2016.
- [3] A. Ravi Ravindran and D. P. Warsing, *Supply Chain Engineering*, vol. 1. 2017.
- [4] R. Krishnan, A hybrid approach to supplier selection for the maintenance of a competitive supply chain, vol. 34, pp. 1303-1311, 2008.
- [5] M. De, E. Graduada, and D. A. De Empresas, a proveedores considerando su flexibilidad y probabilidad de incumplimiento en la entrega 1, vol. 28, pp. 29-48.



# 6 Modelo de programación entera mixta de una red de logística inversa con demanda estocástica

Araceli López y Lòpez<sup>1</sup>, Nayeli Onofre Rios<sup>1</sup>, Rogelio González Velázquez<sup>2</sup>, María Beatriz. Bernabé Loranca\*<sup>2</sup>, Gerardo Martínez Guzmán<sup>2</sup>, Martín Estrada Analco<sup>2</sup>

1 – Universidad Autónoma de Tlaxcala.

2 – Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

\*e-mail: beatriz.bernabe@gmail.com

En Este trabajo se abordó un problema de red de logística inversa multiproducto con demanda estocástica, el cual consiste en decidir la apertura de centros de desensamble y centros de procesamiento para los productos y partes que el cliente devuelve, de tal manera que minimicen los costos de envío. Esto se realiza a través de un modelo matemático de optimización estocástico con cinco instalaciones y seis escalones. Para tal modelo se generó una instancia de prueba, la estructura del modelo es de programación entera mixta que fue implementado en código Lingo 14.0 para obtener una solución óptima por medio del método de Ramificación y Acotamiento..

*Palabras clave:* logística inversa; demanda estocástica; programación entera mixta.

## 6.1. Introducción

En la actualidad las empresas compiten entre sí por ser empresas responsables que cuidan el ambiente. Al ser responsables deben garantizarle al cliente que al venderles un producto, están obligadas a recogerlo cuando ya no les sirva, como lo hacen algunas empresas, por mencionar algunas Hewlett-Packard e International Business Machines Corp. (IBM) que recogen computadoras usadas, la empresa Coca-Cola recolecta sus envases de vidrio o desechables. En España y en toda Europa en el 2008 Cefisa y Ofsa crearon la primera empresa de Logística Inversa que recolecta medicamentos caducos. En 2010, Liverpool México, invertía 26 millones de pesos al año en la compra de ganchos, porque estos se desechaban, utilizando Logística Inversa hoy se retorna el gancho, se clasifican y se regresa al proveedor, de esta manera se reutilizan hasta cinco veces y el costo de inversión ha bajado a 12 millones de pesos al año [1].

En el presente artículo se presenta un problema de diseño de red de logística inversa con demanda estocástica con devoluciones multi-productos, para resolverlo se plantea como un modelo matemático de optimización lineal mixto entero, y para resolverlo se utilizó el método el software Lingo 14.

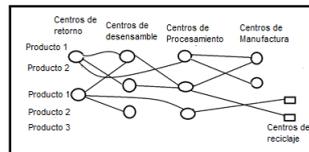
Como ejemplo de donde se utilizaría este modelo considere la siguiente situación; Se tiene tres clases de productos, el primero son vehículos desde un mes hasta un año sin uso, el segundo son vehículos desde más de un año hasta cinco años sin uso y el tercero son vehículos desde más de cinco años hasta diez años sin uso, son recopilados en centros de retorno. Estos productos son enviados de los centros de retorno a los de desensamble, los vehículos de la primera y segunda clasificación son desensamblados en seis partes que son: plástico, vidrio, acero, llantas, líquidos y pelusa (esponja), los vehículos de la tercera clasificación son enviados directamente de los centros de retorno a los de procesamiento, ya que no es necesario desensamblarse. De los centros de desensamble el acero y los líquidos son

enviados a los centros de procesamiento ya que son partes que pueden ser procesadas, mientras que el plástico, vidrio y las llantas son enviadas a los centros de reciclaje. La pelusa se debe eliminar. De los centros de procesamiento las partes son enviadas a los centros de manufactura y los productos a los centros de reciclaje. Las partes que llegaron a los centros de manufactura son ahora materia prima para crear nuevos vehículos, mientras que los productos y partes que llegaron a los centros de reciclaje son reutilizables, cada una de las partes y los productos tienen diferente proceso para ser reciclados de manera correcta dependiendo el material que estén compuestos [3].

En la sección 2 se hace una descripción del problema, en la sección 3 se plantea el modelo de programación entera mixta.

## 6.2. Descripción del problema

En el presente trabajo de investigación se resuelve el problema de diseño de una red multi-producto con demanda estocástica de Logística Inversa (LI) [2], que consiste en lo siguiente: suponga que los clientes devuelven productos a centros de retorno, porque han llegado al final de su vida útil o bien por no satisfacer sus necesidades, por ejemplo salieron defectuosos, no les gustó el color o textura del producto, etc., de los centros de retorno son enviados a los centros de desensamble donde son separados en partes, estas partes pueden ir a centros de procesamiento, luego a manufactura o a reciclaje. También puede suceder que los productos que llegaron a los centros de retorno no necesiten ser desensamblados entonces deben ir directamente a centros de procesamiento (Figura 1, [2]).



**Figura 6.1:** Esquema de red logística inversa multiproducto

Se supone que se conocen; los costos de envío de un centro a otro, las capacidades de los centros de desensamble y procesamiento, las demandas de los centros de manufactura y reciclaje son aleatorias esto hace que el problema sea estocástico. El problema se plantea como un problema de Optimización estocástico, donde se optimiza costos de envío, se analiza la decisión de apertura de algún centro y que cantidad enviar de una instalación a otra.

### 6.2.1. Modelo Matemático de diseño de red de logística inversa multi-producto con demanda estocástica.

A continuación se describen las condiciones y supuestos para la implantación del modelo de programación entero mixto y se puedan generar soluciones factibles. • La demanda de centros de manufactura y centros de reciclaje se consideran como variables aleatorias.

- El número de los centros de retorno, los centros de manufactura y los centros de reciclaje son conocidos y constantes.
- Se conoce el número de posibles centros potenciales de procesamiento y centros de desensamble y de sus capacidades máximas.
- Algunos de los productos que no necesitan ser desensamblados deberán enviar de los centros de retorno a los centros de procesamiento directamente, no a través de los centros de desensamble.
- Algunas partes deberán enviarse de los centros de desensamble a los centros de reciclaje directamente, no a través de los centros de procesamiento. La función objetivo modela minimizar los costos de

envío en toda la red logística inversa y número de centros de desensamble que se desean apertura es fijo

En esta sección se esboza el Modelo Matemático del problema planteado, el lector interesado en los detalles puede consultar [4, 5].

$$\begin{aligned}
 Minn \quad Z = & \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M cd_{jm}^{oc} Y_{jm} + \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M cp_{km}^{oc} Qm_{km} + \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P ck_{kp}^{oc} Qp_{kp} + \\
 & \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P cdv_{ijp} xdv_{ijp} + \\
 & \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M cdp_{jkm} xdp_{jkm} + \\
 & \sum_{j=1}^J \sum_{r=1}^R \sum_{m=1}^M cdr_{jrm} xdr_{jrm} + \\
 & \sum_{k=1}^K \sum_{f=1}^F \sum_{m=1}^M cdm_{kfm} xpm_{kfm} + \\
 & \sum_{k=1}^K \sum_{r=1}^R \sum_{p=1}^P cpro_{krp} xpro_{krp}.
 \end{aligned}$$

Sujeto a:

Restricciones de capacidad

$$\sum_{j=1}^J xdv_{ijp} = a_{ip} \quad \forall i, p \quad (2.2)$$

$$\sum_{k=1}^K xdp_{ikp} = a_{ip} \quad , \quad \forall i, p \quad (2.3)$$

Restricciones de equilibrio

$$\sum_{k=1}^K xdp_{jkm} = \sum_{p=1}^P \left( n_{mp} \left( \sum_{i=1}^I xdv_{ijp} \right) \right), \quad \forall j, m \quad (2.4)$$

$$\sum_{r=1}^R xdr_{jrm} = \sum_{p=1}^P \left( n_{mp} \left( \sum_{i=1}^I xdv_{ijp} \right) \right), \quad \forall j, m \quad (2.5)$$

Restricciones estocásticas

$$P \left( \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K xdp_{jkm} \leq \sum_{f=1}^F dma_{fm} \right) \geq 1 - \alpha, \quad \forall m \quad (2.6)$$

$$P \left( \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K xdp_{ikp} \leq \sum_{r=1}^R dre_{rp} \right) \geq 1 - \alpha, \quad \forall p \quad (2.7)$$

$$P \left( n_{mp} \left( \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J xdv_{ijp} \right) \leq \sum_{r=1}^R dre_{ci_{rm}} \right) \geq 1 - \alpha, \quad \forall f, m \quad (2.8)$$

Restricciones de apertura

$$\sum_{j=1}^J Y_{jm} \leq J, \forall m \quad (2.9)$$

Restricciones de no negatividad

$$xdvd_{ijp}, xdv_{ijp}, xdp_{jkm}, xpm_{kfm}, xpro_{krp} \geq 0 \quad (2.10)$$

Restricciones binarias

$$Y_{jm} \in \{0, 1\}, \forall j, m \quad (2.11)$$

$$Qm_{km} \in \{0, 1\}, \forall k, m \quad (2.12)$$

$$Qp_{kp} \in \{0, 1\}, \forall k, p \quad (2.13)$$

Las ecuaciones (2.1) modelan la cantidad de productos devueltos por los clientes a los centros de retorno. Las inecuaciones (2.2) y (2.3) modelan la capacidad de cada centro de desensamble, así mismo las (2.4) y (2.5) modelan el equilibrio de las partes producidas por el desensamble de los productos, y  $n_{mp}$  es un coeficiente de conversión, las inecuaciones(2.6), (2.7) y (2.8) modelan la demanda de las partes del centro de manufactura, la de los centros de reciclaje y demanda de las partes del centro de procesamiento. Las ecuaciones (2.9)limita el número de centros de desensamble y centros de procesamiento que se pueden abrir. En (2.10) impone la restricción de no negatividad de las variables de decisión. Las ecuaciones (2.11),(2.12) y (2.13) imponen la restricción de la integralidad de las variables de decisión  $Y_{jm}$ ,  $Qm_{km}$ ,  $Qp_{kp}$ . Con el fin de resolver este modelo estocástico, tenemos que transformarlo en un modelo determinista.

### 6.3. Metodología

Se consideró la siguiente cadena de suministro de logística inversa: 3 centros de retorno, 4 centros de desensamble, 4 centros de procesamiento, 2 de manufactura y 2 de reciclaje.

Además se consideraron conocidos los siguientes datos:

Cantidad de productos devueltos.

1. Capacidades de los centros de desensamble.
2. Capacidades de los centros de procesamiento.
3. Costos de apertura para los centros de desensamble.
4. Costos de apertura para los centros de procesamiento.
5. Demanda de los centros de manufactura de las partes A y B.

**Tabla 6.1:** Devoluciones

| Centro de retorno | Producto 1 | Producto 2 | Producto 3 |
|-------------------|------------|------------|------------|
| 1                 | 50         | 20         | 35         |
| 2                 | 40         | 25         | 20         |
| 3                 | 50         | 20         | 25         |

6. Demanda de los centros de reciclaje de la parte C y del producto 3.

7. Costos de envío de los tres productos y sus respectivas partes de una instalación a otra.

De la Tabla 1, se puede leer que el centro de retorno 1, recibe; 50 productos de tipo 1, 20 de tipo 2 y 35 de tipo 3, el producto 1 se desensambla en una parte A, dos C y una D, el producto 2 se desensamblan en una parte B y una E, el producto 3 se envía directamente de los centros de retorno a los centros de procesamiento, no es necesario desensamblarlo. A y B son partes reutilizables, la parte C y el producto 3 son reciclables, mientras las partes D y E son elementos inutilizables que se deben eliminar.

Las restricciones estocásticas (2.6), (2.7) y (2.8), fueron tratadas bajo el siguiente supuesto:

Si  $\sum_{j=1}^n X_j \leq k$  es una restricción en un problema de programación matemático y  $k \sim N(\mu, \sigma^2)$ , donde  $\mu$  es la media y  $\sigma$  la varianza entonces la  $P\left(\sum_{j=1}^n X_j \leq k\right) \geq 1 - \alpha$ .

Entonces realizando algunos cálculos se tiene

$$P\left(\sum_{j=1}^n X_j \leq k\right) \geq 1 - \alpha \approx \sigma Z_{1-\alpha} + \mu \quad (6.1)$$

donde  $Z$  es una variable que se distribuye como una función Normal con  $\mu = 0$ , y  $\sigma = 1$ . Ahora suponga que las demandas de los centros de manufactura son las siguientes:

**Tabla 6.2:** Demanda del centro de manufactura 1 durante 6 meses

| Mes     | Parte A | Parte B |
|---------|---------|---------|
| Enero   | 60      | 40      |
| Febrero | 65      | 30      |
| Marzo   | 55      | 25      |
| Abril   | 50      | 20      |
| Mayo    | 70      | 35      |
| Junio   | 60      | 40      |

Utilizando la ecuación (14) y tablas de la distribución normal estándar se tiene:

$$xpm_{111} + xpm_{211} + xpm_{311} + xpm_{411} \leq (1.65) \left(\sqrt{\frac{125}{3}}\right) + 60 \approx 70.6174 \quad (3.2)$$

$$xpm_{112} + xpm_{212} + xpm_{312} + xpm_{412} \leq (1.65) \left(\sqrt{\frac{1228}{27}}\right) + \frac{95}{3} \approx 42.7595 \quad (3.3)$$

$$xpm_{121} + xpm_{221} + xpm_{321} + xpm_{421} \leq (1.65) \left(\sqrt{\frac{875}{12}}\right) + \frac{155}{2} \approx 91.5456 \quad (3.4)$$

**Tabla 6.3:** Demanda del centro de manufactura 2 durante 6 meses

| Mes     | Parte A | Parte B |
|---------|---------|---------|
| Enero   | 70      | 50      |
| Febrero | 75      | 55      |
| Marzo   | 80      | 50      |
| Abril   | 65      | 30      |
| Mayo    | 85      | 40      |
| Junio   | 90      | 45      |

**Tabla 6.4:** Medias y varianzas poblacionales para las partes A y B.

| Parte | Centro de manufactura | $\mu$   | $\sigma^2$        |
|-------|-----------------------|---------|-------------------|
| A     | 1                     | 60      | $\frac{125}{3}$   |
| B     | 1                     | $95/3$  | $\frac{1228}{27}$ |
| A     | 2                     | $155/2$ | $\frac{875}{12}$  |
| B     | 2                     | 45      | $\frac{200}{3}$   |

$$xpm_{122} + xpm_{222} + xpm_{322} + xpm_{422} \leq (1.65) \left( \sqrt{\frac{200}{3}} \right) + 45 \approx 58.4301 \quad (3.5)$$

Donde la ecuación (6.1) modela el envío de la parte A de los cuatro centros de procesamiento al centro de manufactura 1, la demanda probabilística se convierte en determinista y se modela resuelve el modelo como uno de optimización lineal con demanda determinista

## 6.4. Experimentación computacional

Dos centros de manufactura, dos centros de reciclaje, cuatro centros de procesamiento, cuatro centros desensamblen y tres centros de retorno, el límite máximo de los centros de desensamble que se tiene que abrir debe ser tres y los centros de procesamiento que se tiene que abrir debe ser tres, para cada parte o producto. En la instancia se realizó una simulación con distintos niveles de confianza (0.94, 0.95, 0.96, 0.97, 0.98 y 0.99) para las distintas variables, es decir, se estableció un valor mínimo para la confianza dependiendo de la cantidad de productos recopilados en los centros de retorno y, por otro lado, se consideró que dicho nivel sea menor que 1.

El modelo se implementó en código Lingo 14.0 con lo cual se obtuvo un valor óptimo de 16558, en 1931 iteraciones, con 124 variables enteras y 76 restricciones. En la tabla 5 se muestran las cantidades enviadas desde los centros de desensamble a los centros de reciclaje para cada nivel de confianza para la parte C de la ejecución del código Lingo.

Tabla 5. Envíos de la parte C desde los centros de desensamble a los centros de reciclaje en el nivel de confianza.

Los resultados se interpretan como sigue: el centro de retorno 1 debe enviar 5 productos del tipo 1 al centro de desensamble 2, 20 productos del tipo 2 al centro de desensamble 3, 45 productos del tipo 1 al centro de desensamble 3 y 35 productos del tipo 3 al centro de procesamiento 2. El centro de desensamble 1 debe enviar 50 partes A al centro de procesamiento 1, 30 partes B al centro de procesamiento 3 y 100 partes C al centro de reciclaje 2. El centro de procesamiento 1 debe enviar 69

**Tabla 6.5:** Medias y varianzas poblacionales para las partes A y B.

| Envíos | N.C  | N.C  | N.C  | N.C  | N.C  | N.C  |
|--------|------|------|------|------|------|------|
|        | 0.94 | 0.95 | 0.96 | 0.97 | 0.98 | 0.99 |
| Xdr123 | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  |
| Xdr213 | 42   | 43   | 44   | 45   | 47   | 50   |
| Xdr223 | 48   | 47   | 46   | 45   | 43   | 40   |
| Xdr313 | 90   | 90   | 90   | 90   | 90   | 90   |

partes A al centro de manufactura 2, 13 productos del tipo 3 al centro de reciclaje 1 y 7 productos del tipo 3 al centro de reciclaje 2.

## 6.5. Conclusiones

En la instancia se realizó una simulación con distintos niveles de confianza (0.94, 0.95, 0.96, 0.97, 0.98 y 0.99) para las distintas variables, es decir, se estableció un valor mínimo para la confianza dependiendo de la cantidad de productos recopilados en los centros de retorno y, por otro lado, se consideró que dicho nivel sea menor que 1. Se determinó cuales de los centros se deben de abrir y se observa que al cambiar el nivel de confianza no hay variación en la apertura de los mismos, ya sean de desensamble o procesamiento. Se observó que las variables  $xdvd_{131}$ ,  $xdvd_{132}$ ,  $xdvd_{212}$ ,  $xdvd_{221}$ ,  $xdvd_{311}$ ,  $xdvd_{312}$ ,  $xdvd_{332}$ ,  $xdvp_{123}$ ,  $xdvp_{213}$ ,  $xdvp_{343}$ ,  $xdr_{123}$ ,  $xdr_{313}$ ,  $xpm_{312}$ ,  $xpm_{422}$ ,  $xpro_{223}$  y  $xpro_{423}$  que son constantes; es decir se infiere que estas variables son independientes del nivel de confianza. El modelo indica que la cantidad enviada del producto 3 desde el centro de retorno 3 al centro de procesamiento 4 al centro de reciclaje 2 es independiente al nivel de confianza. Esto significa que el único producto que no se desensambla pasa igual a los demás centros o bien no requiere de un costo extra por no pasar a los centros de desensamble. Queda como trabajo futuro una aplicación real del modelo matemático y como el problema de diseño de red logística inversa propuesto que es un problema combinatorio de alta complejidad, entonces buscar soluciones con ayuda de alguna metaheurística como Búsqueda Tabú, Recocido Simulado, GRASP, Algoritmos Genéticos o Sistema Hormiga entre otros.

### Referencias.

- [1] <http://t21.com.mx/logistica/2010/08/22/reduce-liverpool-mermas-60-gracias-logistica-inversa>.
- [2] López, A. Tesis Doctoral: Un modelo matemático bi-objetivo de diseño de red de logística inversa en el medio ambiente de re-manufactura. 2012. Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla. México, Puebla.
- [3] Rogers, Dale S. y Tibben-Lembke, Ronald S. Going Backwards: Reverse Logistics Trends and Practices. Reno: University of Nevada, 1999. p. 201. Estados Unidos.
- [4] Onofre N., Tesis de Licenciatura: Modelo Matemático de Logística Inversa multi-producto estocástico. Universidad Autónoma de Tlaxcala. Septiembre 2015.
- [5] Hosseinzadeh, Mostafa, y Roghanian, Emad. An Optimization Model for Reverse Logistics Network under Stochastic Environment Using Genetic Algorithm. International Journal of Business and Social Science, 3, pp.(249-264). June 2012, Arak Branch, Iran.



# 7 Diseño de una Política de Inventario para una Planta de Producción de Paneles Solares

Rodrigo Barreto V<sup>\*1</sup>, Ann Wellens<sup>2</sup>

1 – Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, UAEH-MÉXICO.

2 – Facultad de Ingeniería, UNAM-MÉXICO

\*e-mail: rodrigo\_barreto@uaeh.edu.mx, wann@unam.mx

La toma de decisiones de gestión de inventarios en empresas productivas es cada vez más importante, debido a la alta competencia y las necesidades del mercado, así como a la globalización y las innovaciones tecnológicas, por lo que es conveniente que las empresas tengan un sistema para predecir adecuadamente las necesidades materiales y generar políticas ideales de inventario a través de un modelo de predicción adecuado. El presente documento describe el uso de diferentes herramientas para generar un sistema de predicción de la demanda y al mismo tiempo generar políticas de seguridad en los inventarios de insumos y productos finales de una compañía que fabrica paneles solares, mediante la evaluación de diferentes sistemas de inventario para decidir cuál es el más conveniente para la empresa, considerando que el uso de una política adecuada evitará la escasez de materiales y excedentes, así como el impacto que cada uno de ellos tiene en la tasa de producción de la empresa.

*Palabras clave:* Pronósticos de demanda; política de inventario; productividad; simulación.

## 7.1. Introducción

La implementación de nuevas tecnologías como las células fotovoltaicas en proyectos residenciales en México sigue siendo escasa; sin embargo, se considera una fuente de energía limpia y amigable con el medio ambiente. Si bien los costos de inversión son considerables, la relación costo-beneficio es positiva después de un período determinado, amortizando la inversión mediante ahorros en el pago del servicio de energía proporcionado por la CFE (Comisión Federal de Electricidad). El principal problema para una empresa dedicada a la fabricación de sistemas fotovoltaicos es la demanda de dichos sistemas por parte de los clientes. Dado que la demanda es incierta, no es posible predecir de manera específica las existencias de seguridad en los inventarios de materias primas, productos en proceso y productos terminados. Esto puede traducirse en problemas de producción en diferentes departamentos y, en consecuencia, una baja productividad.

## 7.2. Revisión de Literatura

Los pronósticos de la demanda futura son esenciales para tomar decisiones puesto que forman la base de toda la planeación de la cadena de suministro. Ruiz-Torres [2], proponen un nuevo procedimiento basado en datos históricos de la demanda y el tiempo de entrega para calcular las existencias de seguridad, que no asume ninguna distribución de probabilidad y produce resultados más próximos al nivel de servicio meta y menores costos del inventario que los modelos tradicionales, lo que confirma que estos modelos sobreestiman el punto de reorden. En cuanto a la jerarquización de productos, Gutierrez-González (2013) [1], sugieren un análisis ABC para determinar los productos críticos de 15 productos

de la industria eléctrica diferentes, para posteriormente identificar el tipo de demanda y diseñar un modelo de inventarios para cada uno de ellos. La simulación es una de las metodologías disponibles que se ha utilizado con frecuencia para investigar el comportamiento de los sistemas productivos y de servicio. Autores como Pedgen (2007) [4], Longo (2011)[3] y Jeon (2016) [2], han presentado revisiones de aplicaciones de simulación, que incluyen problemas de planificación, gestión y diseño en sectores como defensa, espacio aéreo, industria y cadena de suministro, utilizando simulación de eventos discretos o basados en agentes.

### 7.3. Metodología

El esquema de producción óptimo de la empresa se encontró mediante el pronóstico de la demanda, la planificación del inventario, la simulación y la optimización de la planta. La figura 1 resume la metodología utilizada en la presente investigación.

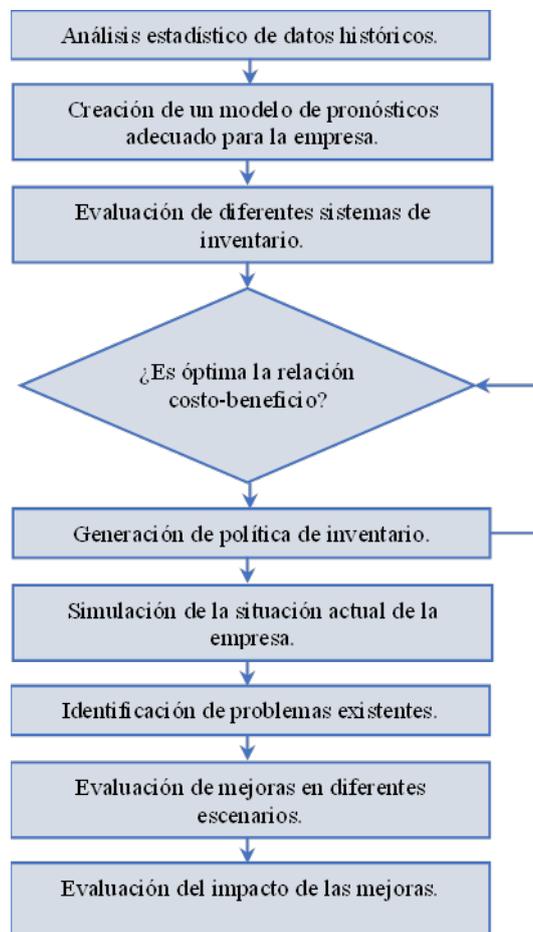


Figura 7.1: Metodología

#### 7.3.1. Análisis estadístico de datos históricos

Para identificar los productos críticos de la empresa, el primer paso fue el tratamiento de los datos históricos de las ventas mensuales de cada uno de los productos durante el último año, lo cual se

realizó mediante un análisis ABC propuesto por Wilfredo Pareto, para determinar aquellos productos que representan mayor demanda. Con base en los hallazgos se determinaron los productos críticos, los cuales requieren una especial atención en cuanto al control de sus existencias.

### **7.3.2. Modelos de pronósticos**

Con el objetivo de no perseguir la demanda y estabilizar la producción (eliminando fluctuaciones drásticas) se evaluaron diferentes sistemas de pronósticos, para determinar el sistema que mejor se adapte al comportamiento de la demanda de cada uno de los productos identificados en el análisis ABC, con la finalidad de disminuir los errores al realizar el pronóstico para el siguiente periodo. Una vez identificado el sistema de pronósticos más adecuado para cada uno de los productos, se realizó el pronóstico de los siguientes periodos, lo cual sirvió como base para diseñar la política de inventarios de cada producto. La siguiente etapa fue determinar la tendencia de la demanda de cada uno de los productos de manera individual y por grupo, con el fin de definir el método de pronóstico a usar. Por simulación en hoja de cálculo de Excel, se determinaron los requerimientos futuros usando los métodos: último dato, promedio móvil y suavización exponencial simple estableciendo comparaciones entre ellos para determinar el más apropiado, tomando como criterio de evaluación el que generó el menor error MAD (desviación media absoluta).

### **7.3.3. Generación de la política de inventario**

Otra parte importante de la presente investigación es la evaluación de diferentes sistemas de inventario para decidir cuál es el más conveniente para la empresa. El uso de una política de inventario adecuada evitará la escasez de materiales y los excedentes, así como el impacto que cada uno de ellos tiene en la tasa de producción de la empresa. La mayoría de las materias primas de los procesos son importadas; cuando faltan, la línea de producción se detiene, desperdiciando recursos (humanos, materiales y financieros, entre otros). Esta es la razón por la cual la compañía actualmente tiene costos de logística más altos debido al transporte de mercancías imprevistas, además de tener un nivel de servicio reducido debido a entregas tardías o pedidos perdidos.

### **7.3.4. Estudio de tiempos**

Para realizar la simulación del proceso de ensamblado de módulos fotovoltaicos se realizó un estudio de tiempos en cada una de las áreas de trabajo con el objetivo de realizar una simulación lo más cercana a la realidad. Para realizar dicho estudio de tiempos se calculó el número de observaciones necesarias de acuerdo con la variabilidad del proceso, para posteriormente realizar un muestreo aleatorio y medir el tiempo respectivamente. Una vez teniendo cada una de las mediciones con su valoración respectiva se procedió a graficar el comportamiento de los datos y verificar el tipo de función a la que se asemeja cada uno de los procesos. Para complementar el análisis estadístico se calculó la media y desviación estándar para cada una de las funciones (datos que sirvieron para la simulación). Con el tiempo estándar de cada uno de los pasos para realizar el ensamblado de módulos fotovoltaicos se realizó la simulación correspondiente y se pudieron observar los cuellos de botella y el comportamiento del proceso para posteriormente vincular la demanda y verificar los tiempos improductivos por falta de materias primas.

### 7.3.5. Optimización de la planta

Como la productividad actual de la empresa es baja, debido a los diferentes factores mencionados anteriormente, una vez que se tiene un modelo de pronóstico ideal y una política de seguridad adecuada, el siguiente paso es la optimización de los recursos de la compañía mediante la simulación con la ayuda del software SIMIO, que utiliza un enfoque orientado al proceso que se adapta perfectamente al tipo de operaciones realizadas por la industria manufacturera. La simulación se llevó a cabo en las siguientes dos etapas:

#### Situación actual

La situación actual de la empresa se simuló en SIMIO, considerando el mayor número posible de variables necesarias para que el modelo se asemejara a la realidad de la empresa e identificar posibles mejoras en términos de cuellos de botella, falta de insumos, tiempo de inactividad de los trabajadores, cruces en el proceso y movimientos innecesarios de personas, materiales y productos.

#### Análisis de las mejoras propuestas

En una segunda etapa, se llevaron a cabo diferentes escenarios de simulación, considerando las mejoras propuestas. En esta etapa, se midieron los niveles de eficiencia en cada departamento de la empresa para comparar las soluciones propuestas y cuantificar el impacto de los beneficios que las mejoras propuestas aportarán a la empresa.

## 7.4. Resultados

### 7.4.1. Análisis estadístico de datos históricos

En el análisis estadístico de los datos se observó que algunos productos tienen alta demanda y otros no, por lo cual se decidió realizar un análisis ABC para determinar los productos críticos de la empresa y el criterio que se utilizó fue el volumen de ventas anuales de cada producto.

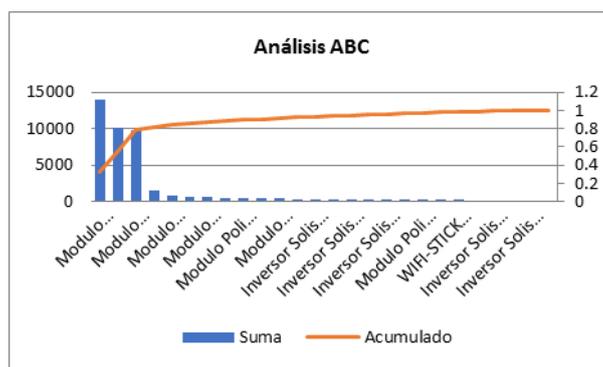


Figura 7.2: Análisis ABC Fuente: Elaboración propia

La figura 2 muestra los productos clave para la empresa, los cuales son los módulos policristalinos de 36, 18 y 32 volts, los cuales representan el 78 % de las ventas de la empresa, razón por la cual se ha decidido realizar un sistema de pronósticos y una política de inventario para cada uno de estos tres productos.

### 7.4.2. Modelos de pronósticos

Para realizar el pronóstico para el modelo de 36 volts, se analizaron los datos históricos de las ventas de julio 2017- agosto 2018, con la finalidad de evaluar los diferentes sistemas de pronósticos y determinar el sistema que mejor se adapta al comportamiento de la demanda para el módulo de 320 watts (Tabla 1).

La tabla 2 muestra que la menor desviación media absoluta se logra a través del sistema de pronósticos promedio móvil simple, por lo cual se decide utilizarlo para pronosticar la demanda posterior.

### 7.4.3. Política de inventario

De acuerdo con los datos proporcionados por la empresa, los costos asociados para un módulo son los siguientes:

- Costo de total de los materiales del panel 36 volts 320 watts \$3180
- Costo de preparación de la orden \$225
- Costo anual del inventario por unidad 20% del costo del producto

**Tabla 7.1:** Pronósticos para módulo policristalino 36v 320w

| Modulo policristalino 36V 320W |         |             |                 |                    |  |
|--------------------------------|---------|-------------|-----------------|--------------------|--|
| Periodo                        | Demanda | Último dato | Promedio simple | Promedio móvil n=3 | Suavizado exponencial ( $\alpha=0.1$ ) |
| Julio                          | 1325    |             |                 |                    |  |
| Agosto                         | 1282    | 1325        | 1325            |                    | 1320                                   |
| Septiembre                     | 825     | 1282        | 1303            |                    | 1316                                   |
| Octubre                        | 936     | 825         | 1144            | 1144               | 1266                                   |
| Noviembre                      | 1050    | 936         | 1092            | 1014               | 1233                                   |
| Diciembre                      | 832     | 1050        | 1083            | 937                | 1214                                   |
| Enero                          | 1310    | 832         | 1041            | 939                | 1175                                   |
| Febrero                        | 987     | 1310        | 1080            | 1064               | 1188                                   |
| Marzo                          | 1078    | 987         | 1068            | 1043               | 1167                                   |
| Abril                          | 787     | 1078        | 1069            | 1125               | 1158                                   |
| Mayo                           | 936     | 787         | 1041            | 950                | 1120                                   |
| Junio                          | 826     | 936         | 1031            | 933                | 1101                                   |
| Julio                          | 850     | 826         | 1014            | 849                | 1073                                   |
| Agosto                         | 887     | 850         | 1001            | 870                | 1050                                   |
| Pronóstico                     |         | 887         | 993             | 854                | 1033                                   |

En la tabla 1 se muestran los resultados del pronóstico del periodo n+1 utilizando diferentes métodos.

Dado que la demanda mensual pronosticada es de 854, la demanda anual asciende a 10,728 unidades; la empresa produce dichos módulos a una tasa constante de 1200 unidades al mes. De acuerdo con la naturaleza del producto no se admiten faltantes puesto que el cliente no está dispuesto a esperar por su producto cuando lo solicita, por lo tanto la cantidad económica a producir sin faltantes se calcula a continuación:

**Tabla 7.2:** Errores en los pronósticos del módulo policristalino 36V 320W

| Ultimo dato |                | Promedio simple |                | Promedio móvil simple |                | Suavizado exponencial<br>( $\alpha=0.1$ ) |                |
|-------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------------|----------------|---|----------------|
| Diferencia  | Valor absoluto | Diferencia      | Valor absoluto | Diferencia            | Valor absoluto | Diferencia                                | Valor absoluto |
| -43         | 43             | -43             | 43             |                       |                | 38  | 38             |
| -457        | 457            | -478            | 478            |                       |                | 491                                       | 491            |
| 111         | 111            | -208            | 208            | -208                  | 208            | 330                                       | 330            |
| 114         | 114            | -42             | 42             | 36                    | 36             | 183                                       | 183            |
| -218        | 218            | -251            | 251            | -105                  | 105            | 382                                       | 382            |
| 478         | 478            | 269             | 269            | 371                   | 371            | -135                                      | 135            |
| -323        | 323            | -93             | 93             | -77                   | 77             | 201                                       | 201            |
| 91          | 91             | 10              | 10             | 35                    | 35             | 89  | 89             |
| -291        | 291            | -282            | 282            | -338                  | 338            | 371                                       | 371            |
| 149         | 149            | -105            | 105            | -14                   | 14             | 184                                       | 184            |
| -110        | 110            | -205            | 205            | -107                  | 107            | 275                                       | 275            |
| 24          | 24             | -164            | 164            | 1                     | 1              | 223                                       | 223            |
| 37          | 37             | -114            | 114            | 17                    | 17             | 163                                       | 163            |
| $\Sigma$    | 2446           | $\Sigma$        | 2264           | $\Sigma$              | 960            | $\Sigma$                                  | 3063           |
| MAD         | 188.1538462    | MAD             | 174.1538462    | MAD                   | 120            | MAD                                       | 235.769        |

D=10,728 unidades/año

i=20 %

c=\$225

h=45

A=\$3180

Cálculos:

$$Q = \sqrt{\frac{2(225)(12924)}{636(1 - \frac{12924}{14400})}} = 298.6$$

$$k(299) = 3180(299) + \sqrt{2(225)(636(1 - \frac{12924}{14400}))} = \$950,991$$

Por lo tanto, la cantidad a producir es de 299 unidades del módulo de 36 volts en 43 periodos durante el año y los costos promedio anuales asociados a mantener dicho inventario son \$950,991.

#### 7.4.4. Estudio de tiempos

Para conocer el tiempo estándar en realizar cada una de las operaciones, se realizó un estudio de tiempos y movimientos de cada parte del proceso. Se realizaron 10 observaciones de la producción de módulos de 320 watts, para lo cual se dividieron y codificaron las actividades como se observa en la tabla 3.

**Tabla 7.3:** Elementos de trabajo

| Descripción             | Abreviatura |
|-------------------------|-------------|
| Selección de celdas     | A           |
| Transporte de celdas    | B           |
| Corte etil Vinil        | C           |
| Soldadura con cautin    | D           |
| Montaje                 | E           |
| Trasporte de modulo     | F           |
| Inspeccion de calidad   | G           |
| Transporte a laminadora | H           |
| Laminación              | I           |
| Transporte a enmarcado  | J           |
| Enmarcado               | K           |
| Transporte a calidad    | L           |
| Pruebas de calidad      | M           |
| Transporte a empaque    | N           |
| Empaque                 | O           |

Una vez teniendo los datos del estudio de tiempos se ordenaron por ciclo de trabajo y por elemento de trabajo, con el fin de obtener los tiempos de ciclo totales y se eliminaron tanto el tiempo de ciclo pesimista y el optimista, los demás datos se promediaron para obtener un tiempo de ciclo ideal. Con este resultado se obtuvo el tiempo de ciclo de trabajo estandarizado (el tiempo total que tarda en producirse un módulo).

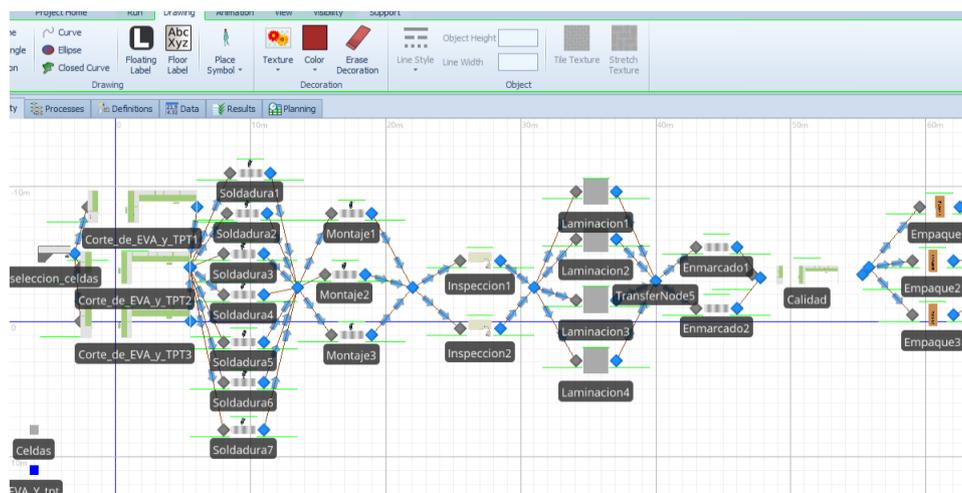
En la tabla 4 se clasificaron los tiempos por elementos, con el objetivo de conocer el tiempo estándar de operación en forma individual, lo cual servirá para realizar la simulación del proceso . Así mismo se calculó la media y la desviación estándar de cada elemento.

**Tabla 7.4:** Tiempo normal por elemento (Elaboración propia).

| Elemento |     | Tiempo observado en cada ciclo |      |      |      |      |      |      |      |      |      | Tiempo normal | Media  | Desviación estándar |
|----------|-----|--------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|---------------|--------|---------------------|
| A        | 2   | 1.9                            | 1.9  | 2.1  | 2.2  | 2    | 2.1  | 2    | 2.2  | 2.5  | 2.1  | 2.1           | 0.1806 |                     |
| B        | 0.5 | 0.5                            | 0.5  | 0.5  | 0.5  | 0.6  | 0.6  | 0.5  | 0.5  | 0.5  | 0.5  | 0.5           | 0.0445 |                     |
| C        | 7   | 7.6                            | 7.4  | 7.6  | 8.3  | 7    | 7.2  | 6.3  | 7.6  | 6.8  | 7.3  | 7.3           | 0.5481 |                     |
| D        | 15  | 16.4                           | 15.7 | 14.3 | 17.1 | 16.2 | 17.3 | 13.5 | 14   | 15.6 | 15.5 | 15.5          | 1.2938 |                     |
| E        | 6.8 | 7.6                            | 7.2  | 6    | 7.2  | 6.2  | 7    | 6.8  | 6.4  | 6    | 6.7  | 6.7           | 0.5585 |                     |
| F        | 1   | 0.9                            | 0.9  | 1    | 1    | 1.9  | 1    | 1.1  | 1.1  | 0.9  | 1    | 1.1           | 0.2975 |                     |
| G        | 3   | 3.1                            | 3.1  | 3.2  | 3.1  | 2.6  | 2.8  | 4.1  | 3.3  | 3.3  | 3.1  | 3.2           | 0.4016 |                     |
| H        | 0.5 | 0.6                            | 1    | 0.5  | 0.6  | 0.6  | 0.5  | 0.6  | 0.6  | 0.6  | 0.6  | 0.6           | 0.1455 |                     |
| I        | 12  | 13.9                           | 13.1 | 13   | 12.6 | 11.6 | 11.9 | 12.1 | 9.8  | 12.1 | 12.3 | 12.2          | 1.0941 |                     |
| J        | 0.5 | 0.5                            | 0.5  | 0.5  | 0.5  | 0.6  | 0.5  | 0.5  | 0.5  | 0.7  | 0.5  | 0.5           | 0.0681 |                     |
| K        | 3.5 | 3.5                            | 3.6  | 3.4  | 3.7  | 3.7  | 3.7  | 3.3  | 4.1  | 3.3  | 3.6  | 3.6           | 0.2427 |                     |
| L        | 0.5 | 0.5                            | 0.5  | 0.5  | 0.5  | 0.5  | 0.5  | 0.6  | 0.5  | 0.5  | 0.5  | 0.5           | 0.0315 |                     |
| M        | 10  | 11                             | 10.3 | 9    | 9.4  | 9.5  | 8.7  | 10.5 | 10.4 | 8.4  | 9.7  | 9.7           | 0.8548 |                     |
| N        | 0.5 | 0.5                            | 0.5  | 0.5  | 0.5  | 0.5  | 0.5  | 0.5  | 0.4  | 0.3  | 0.5  | 0.5           | 0.0683 |                     |
| O        | 5   | 5.3                            | 5.5  | 4.6  | 4.9  | 5    | 4.3  | 4.9  | 4.6  | 3.5  | 4.8  | 4.8           | 0.5636 |                     |

### 7.4.5. Simulación

Para realizar la validación de los resultados de los pronósticos, se realizó una simulación del proceso, contemplando los tiempos de producción en cada estación de trabajo de acuerdo con la distribución que sigue cada una de ellas. La simulación se realizó en SIMIO y cada estación de trabajo fue identificada como un servidor puesto que tiene una entrada, un tiempo de proceso y una salida. Al incluir todas las estaciones de trabajo, se conectaron por medio de rutas a las cuales se les asignó un tiempo de acuerdo al estudio de tiempos y movimientos. El proceso se simuló como se observa en la figura 3.



**Figura 7.3:** Simulación de la situación actual en SIMIO

#### 7.4.6. Análisis de resultados

Con el pronóstico de la demanda y la cantidad a producir de cada uno de los productos es posible pedir a cada uno de los proveedores los insumos necesarios con tiempo para no tener problemas de desabasto y no desperdiciar los recursos, además de facilitar la planeación y programación de la producción. Los resultados de producción en la simulación al realizar varias corridas, son muy cercanos a lo establecido en los pronósticos, por lo que se considera viable la política de inventario; sin embargo; a través de la simulación se identificó que existen centros de trabajo holgados puesto que su ocupación llega a ser únicamente del 42 %, como es el caso del centro de trabajo de empaque.

#### 7.4.7. Recomendaciones

Con la política de inventario se podrá realizar una correcta programación de la producción, por lo cual se recomienda realizar los pedidos correspondientes de los materiales con un mes de anticipación para evitar retrasos en las entregas de material por parte de los proveedores; cabe destacar que se debe revisar de manera periódica el comportamiento de modelo propuesto y de ser necesario replantear cada una de las políticas para la empresa, considerado que la variabilidad de la demanda puede aumentar o modificarse las tendencias de comportamiento de los clientes.

### 7.5. Conclusiones

En el presente trabajo se realizaron las propuestas de mejora en la gestión para una empresa del ramo fotovoltaico, mediante herramientas, metodologías y técnicas que impactan de manera favorable los costos y utilidades de la organización, considerando que el inventario es esencial en la creación y existencia de una empresa, ya que en ella se puede hacer un balance de los bienes con que cuenta esta. La carencia de un inventario en una empresa conllevaría a su quiebra, debido a que habría una mala organización; a consecuencia de las carencias o excesos de bienes se tomarían malas decisiones en el manejo de la empresa. Aunque los inventarios generan costos de manera considerable, son necesarios para cubrir la demanda requerida y tener un buen servicio al cliente; sin embargo, en el presente trabajo se propone producir los tres productos clave para la compañía bajo una política de inventario EPQ sin faltantes con el objetivo de lograr los mínimos costos anuales por mantener dicho inventario, sin sacrificar el nivel de servicio con el cliente, satisfaciendo las restricciones de acuerdo con la capacidad de la empresa. El análisis arrojó áreas de oportunidad en el aprovisionamiento, planeación de la demanda, almacenamiento, abastecimiento y control, dando solución a problemas como: falta de materia prima, escasez de productos, entregas incompletas, cancelación de ventas, almacenamientos innecesarios y daños en los materiales almacenados. Con la política de inventarios generada se espera satisfacer la demanda de los clientes al menos de los 3 productos identificados como clave para la empresa, se espera que aumente la productividad de la empresa y disminuyan los costos, contribuyendo de esta forma a aumentar la rentabilidad de la empresa.

### Referencias

- [1] Gutiérrez-González Eduardo, Panteleeva Olga Vladimirovna, Hurtado-Ortiz Moisés Fernando, and González-Navarrete Carlos. Aplicación de un modelo de inventario con revisión periódica para la fabricación de transformadores de distribución. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 14(4):537–551, 2013.

- [2] Su Min Jeon and Gitae Kim. A survey of simulation modeling techniques in production planning and control (ppc). *Production Planning & Control*, 27(5):360–377, 2016.
- [3] Francesco Longo. *Advances of modeling and simulation in supply chain and industry*, 2011.
- [4] C Dennis Pegden. Simio: a new simulation system based on intelligent objects. In *Proceedings of the 39th conference on Winter simulation: 40 years! The best is yet to come*, pages 2293–2300. IEEE Press, 2007.

# 8 Optimización de tiempos de entrega de materiales de construcción utilizando simulación discreta

Jorge J. Corona\*<sup>1</sup>, Erick Ortiz<sup>1</sup>, Rodolfo E. Pérez<sup>1</sup>, Erick Montiel<sup>1</sup>

1 – Dpto. de Ingeniería Industrial, Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Apizaco, Tlaxcala, México

\*e-mail: jorge14live@hotmail.com

Este artículo tiene como objetivo presentar el uso de la simulación discreta para optimizar los tiempos de entrega de una distribuidora de materiales de construcción. Fueron creados dos modelos de simulación discreta, uno para imitar el comportamiento actual de la distribuidora y un segundo modelo para analizar la factibilidad de la apertura de un centro de distribución con una ubicación céntrica con respecto de los puntos de entrega, intentando reducir el tiempo de demora de entrega de los materiales y maximizando las utilidades de la distribuidora. Para alcanzar este objetivo se hizo uso de un software de simulación en el desarrollo de los modelos, el cual permitió poder analizar y realizar una serie de supuestos sobre el funcionamiento de la logística de la distribuidora. Resultado de los experimentos se comprobó la factibilidad de la apertura del nuevo centro de distribución, obteniendo una reducción de la demora de los tiempos de entrega de seis días a solo dos días de atraso.

*Palabras clave:* Simulación Discreta; Transporte de Materiales; Tiempos de Entrega.

## 8.1. Introducción

El análisis de diversos escenarios, el establecimiento de planes de contingencia ante situaciones como retrasos de suministro o stocks, averías de máquinas, etc.; actualmente son perfectamente solubles con sistemas informáticos de alto nivel [1, 5]. Parte de estos sistemas informáticos son los programas de simulación, los cuales permiten simular y optimizar casi cualquier tipo de sistemas de manufactura, logística, servicios, call centers, manejo de materiales, etc. La simulación ha demostrado ser una herramienta eficiente para mejorar la toma de decisiones y optimizar la cadena de suministro, dos casos de éxito se muestran en [4].

En este trabajo se describe el uso de la simulación discreta para optimizar el tiempo de entrega de materiales de construcción de una distribuidora hacia cuatro comunidades pertenecientes al municipio de Panotla, Tlaxcala. La simulación contempló 8 etapas para su desarrollo, en el cual se crearon dos modelos de simulación discreta. Estos dos modelos permitieron realizar el análisis de escenarios en cuanto a la adquisición, renta o convenio de camiones de volteo, así como la posible construcción de un centro de distribución para reducir los tiempos de demora de la entrega de pedidos de los materiales de construcción.

## 8.2. Descripción del problema

Una distribuidora de materiales ubicada en la comunidad de San Tadeo Huiloapan perteneciente al municipio de Panotla (Tlax., México) se encarga de vender cuatro diferentes tipos de materiales de

construcción, estos son: arena, grava, piedra y tepezil. Los materiales deben ser provistos de minas de tres comunidades aledañas: piedra de La Caridad Cuaxonacayo, tepezil de Tezoyo-La Tasquilla, arena y grava desde San Simeón Xipetzingo. Las ventas son regidas por los pedidos de cuatro comunidades aledañas requieren el abastecimiento de dichos materiales. Estas comunidades son: San Mateo Huexoyucan, San Ambrosio Texantla, San Fráncico Temetzontla y Santa María Ixcotla.

Para cumplir con los pedidos la distribuidora cuenta con un solo camión de volteo modelo C-60 de la marca Chevrolet año 1968 de una capacidad de  $6m^3$ . Este camión se encarga del viaje hacia los puntos de entrega y a las minas. Con los procesos de carga, retorno, entrega y descarga de materiales para todas las diferentes rutas a los puntos de venta. Lo anterior implica hacer numerosos viajes y un exceso elevado en tiempo de demora en la entrega de pedidos. Por lo que se hace importante conocer una forma de optimizar los tiempos de entrega de los materiales, para cumplir con la demanda cada vez más creciente de materiales de construcción.

### 8.3. Metodología de solución

En esta sección se describen como parte de la metodología desarrollada el diseño del modelo conceptual, la recolección de datos, la construcción y la verificación del modelo de simulación del sistema actual de la distribuidora.

#### 8.3.1. Diseño del modelo conceptual

Para representar el proceso de transporte y distribución de los materiales de construcción empleamos el método SIPOC (Supplier o proveedor, Input o entrada, Process o proceso, Output o Salida, Customer o cliente), como se muestra en la Tabla 8.1.

**Tabla 8.1:** SIPOC de venta de materiales de construcción

| Proveedor  | Entrada                   | Procesos    | Salida                    | Cliente   |
|--|---------------------------|-------------|---------------------------|---|
| La Caridad Cuaxonacayo   | Pedido de piedra          | En carga    | Camión de piedra          | San Mateo Huexoyucan                                  |
| San Simeón Xipetzingo  | Pedido de arena y/o grava | En descarga | Camión de arena y/o grava | San Ambrosio Texantla                                 |
| Tezoyo, La Tasquilla   | Pedido de tepezil         | En traslado | Camión de tepezil         | San Francisco Santa María Ixcotla San Tadeo Huiloapan |
| <b>Recursos utilizados</b>   |                           |             |                           |   |
| <b>Camión de volteo modelo C-60, marca Chevrolet año 68 con capacidad de <math>6m^3</math></b> |                           |             |                           |   |

#### 8.3.2. Recolección de datos

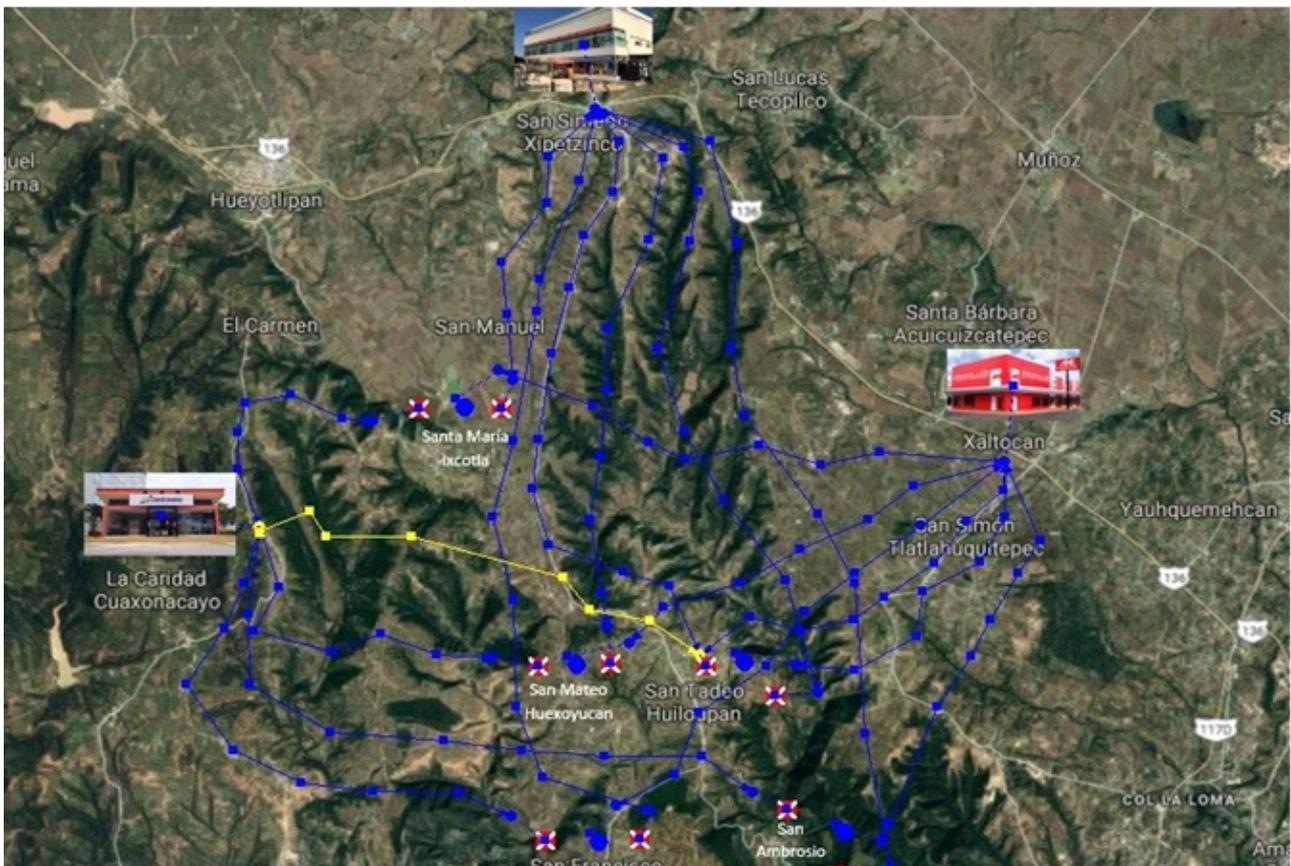
Para establecer el comportamiento preciso de cada proceso en la logística de la distribuidora se recurrió a la simulación discreta. Para diseñar el primer modelo se requirió obtener datos acerca de las diferentes etapas de cada proceso; para ello se tomaron tiempos y distancias del recorrido que hace el camión desde la distribuidora hasta los diferentes centros de distribución y minas de extracción de materiales. En este caso nos apoyamos de la herramienta de Google Maps. Otros datos recolectados fueron los tiempos de carga/descarga en la distribuidora y minas, el traslado del material hacia los diferentes puntos de venta, y los costos que implica cada proceso descrito anteriormente.

Para la construcción del segundo modelo se diseñó un sistema donde se construiría una distribuidora en la comunidad céntrica a los puntos de entrega de materiales, para ello fue necesario recabar las

distancias que existen de esta comunidad hacia las demás: San Mateo, San Francisco, Santa María y San Ambrosio. Haciendo nuevamente uso de la herramienta Google Maps.

### 8.3.3. Construcción del modelo

En la construcción del primer modelo que es la representación del estado actual de comportamiento de los procesos de: ventas, traslado, carga, retorno y descarga de la distribuidora, se hace uso de un software de simulación, para el cual fue necesario identificar y determinar los elementos que componen al sistema. Estos elementos son las entidades, estado del sistema, eventos actuales y futuros, localizaciones, recursos, atributos, variables, y el reloj de la simulación de acuerdo a [2, 3]. Para darle un ambiente más realista a la simulación se ingresó una imagen gráfica vía satélite del ambiente del sistema, haciendo uso de la herramienta de Google Maps. Una vez creado el ambiente gráfico e ingresados cada uno de los elementos del sistema, en este se pueden apreciar cada uno de los puntos de venta, así como la localización de los centros de distribución de arena y grava, las minas de extracción de piedra y tepezil, como se muestra en la Figura 8.1. También se muestran las diversas rutas por las que el camión hace su recorrido para recoger y entregar los diferentes pedidos que llegan a la distribuidora.



**Figura 8.1:** Ruta geográfica para la entrega de materiales a los clientes (primer modelo). Fuente: Google Maps.



### 8.4.2. Análisis de resultados

Los modelos corrieron por 384 horas que es representativo de dos meses de turnos diarios de ocho horas, los modelos corrieron continuamente ya que se quería representar el número de pedidos no entregados en este lapso de tiempo. En la actualidad los pedidos se atrasan en promedio 152.51 horas que son prácticamente seis días de atraso en la entrega de los pedidos de materiales, por lo que se determina que el camión no tiene la capacidad para entregar todos los pedidos. También se observó que la cantidad de pedidos que no se alcanzaron a entregar en los dos meses en cantidad actual en sistema son de 423 con tan solo 103 viajes entregados. En cuanto al camión actualmente es usado el 100 % de las veces, lo que provoca retrasos a causa de sus reparaciones por las fallas que afectan a este.

### Propuestas de Mejora

#### 1. Abrir un centro de distribución adicional

Con ayuda del segundo modelo se simuló la apertura de un centro de distribución de materiales céntrico, con ello se obtuvieron resultados favorables, aunque no del todo satisfactorios, porque el tiempo de espera de los pedidos para ser entregado se redujo de seis días a tan solo dos. Esto se muestra en la Tabla 8.2 en el escenario propuesto 1.

#### 2. Adicionar un camión de volteo

La segunda propuesta implementada en el segundo modelo, es la adquisición, renta o convenio de un camión de volteo. Esto para eficientar el sistema y reducir aún más los tiempos de demora en entrega de pedidos, reduciendo los tiempos de demora de entrega de seis días a horas. Los resultados de este experimento se muestran y comparan en la Tabla 8.2 en la columna de escenario propuesto 2.

**Tabla 8.2:** Comparación de los dos modelos propuestos vs el actual

| Pedidos                | Tiempo esperando promedio (hrs) |                      |                       | Cantidad de pedidos entregados |                       |                       | Cantidad de pedidos NO entregados |                       |                       |
|------------------------|---------------------------------|----------------------|-----------------------|--------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------|
|                        | Escenario Actual                | Escenario Propuesto1 | Escenario Propuesto 2 | Escenario Actual               | Escenario Propuesto 1 | Escenario Propuesto 2 | Escenario Actual                  | Escenario Propuesto 1 | Escenario Propuesto 2 |
| Piedra                 | 145.7                           | 47.2                 | 0.58                  | 29                             | 156                   | 137                   | 118                               | 58                    | 4                     |
| Arena                  | 169.02                          | 53.32                | 0.35                  | 24                             | 87                    | 111                   | 87                                | 30                    | 0                     |
| Grava                  | 136.02                          | 55.95                | 0.33                  | 39                             | 92                    | 117                   | 152                               | 28                    | 0                     |
| Tepezil                | 159.33                          | 56.65                | 0.32                  | 11                             | 61                    | 90                    | 66                                | 21                    | 0                     |
| <b>Promedio y Suma</b> | 152.5175                        | 53.28                | 0.395                 | 103                            | 396                   | 455                   | 423                               | 137                   | 4                     |

Como se puede observar la adquisición de un nuevo camión de volteo aunado a la construcción de centro de distribución en la comunidad de San Tadeo, logra favorables resultados con una reducción de un promedio de 152.21 horas que son prácticamente 6 días de retraso en los pedidos actualmente a un promedio de 0.39 horas con la implementación de las dos propuestas.

## 8.5. Conclusiones

La simulación nos ayuda de una manera muy favorable en el análisis de un problema que se está presentando, en cualquier ámbito, de igual manera podemos analizar y verificar cual es la mejor decisión que nos puede traer grandes beneficios en un futuro, e implementar nuevas mejoras más adelante en el proceso, nos ayuda en la reducción de los costos, en los tiempos de espera que se generan y las pérdidas en los productos.

En resumen, la simulación es una gran herramienta que puede ser aplicada para todas las áreas y así ver miles de escenarios y observar cual es el que mejor nos beneficiara, como lo hemos observado en este problema y propuesto una solución, y podemos hacer muchos más modelos y ver cuál es que tiene un beneficio mayor.

## Referencias

- [1] Julio Juan Anaya Tejero and Sonia Polanco Martín. *Innovación y mejora de procesos logísticos: Análisis, diagnóstico e implantación de sistemas logísticos*. Esic Editorial, Madrid, 2a edition, 2007.
- [2] Eduardo García Dunna, Heriberto García Reyes, and Leopoldo Eduardo Cárdenas Barrón. *Simulación y análisis de sistemas con ProModel*. Pearson Educación, 2006.
- [3] Álvaro García Sánchez and Miguel Ortega Mier. Introducción a la simulación de sistemas discretos, November 2006.
- [4] Sandra Huchim Pérez. Simulación y optimización logística: dos escenarios, dos experiencias, December 2011.
- [5] Miguel Ángel Piera, Toni Guasch, Josep Casanovas, and Juan José Ramos. *Cómo mejorar la logística de su empresa mediante la simulación*. Ediciones Díaz de Santos, S.A., Madrid, 1a edition, 2006.

# 9 Gestión del Inventario de una Planta de Producción de Remolques con Demanda Intermitente

Pamela A. Rosales\*<sup>1</sup>, Ann G. Wllens<sup>1</sup>, Esther Segura<sup>1</sup>

1 – DIMEI-FI, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.

\*e-mail: pamela.barbier@hotmail.com

Es común que las empresas desconozcan las ventajas que se tienen al gestionar de forma correcta su inventario, lo que ocasiona problemas de falta o exceso de inventario y que en ambos casos conlleva a costos. Adquirir la cantidad de inventario necesario, que a su vez le permita a una organización alcanzar y/o superar el target de ventas trazado, no es una tarea sencilla. Este artículo describe el desarrollo de un proyecto para una empresa mexicana dedicada a la fabricación de remolques y semirremolques. En este proyecto se trabajará con el pronóstico de la demanda, para proponer una solución a la preocupación de la empresa para contar con inventarios exactos en sus almacenes. Este procedimiento podría posibilitar una mayor eficiencia en cuanto a operatividad, ya que el negocio contaría con la capacidad de planificar sus actividades a futuro.

*Palabras clave:* Pronóstico; Inventario; Demanda.

## 9.1. Introducción

La aparición del concepto inventario se da desde tiempos remotos, ya que pueblos de la antigüedad como los egipcios solían almacenar grandes cantidades de alimentos con el objeto de ser utilizados en épocas de sequía y escasez, y de esa forma es que surge el dilema de llevar un registro, distribución y cuidado de los recursos, para hacer frente a la travesía de sobrevivir con los recursos almacenados. Sin embargo, hoy en día es un término cotidianamente utilizado dentro de las empresas, ya que representa una alta inversión y repercute en todas las áreas de una empresa. El propósito de los pronósticos es intentar reducir la incertidumbre y respaldar la toma de decisiones en algo más que la intuición de los empresarios, debido a que es un componente esencial para que cualquier sistema de inventarios tenga un nivel de éxito favorable. Con ello se podrán crear políticas que permitan definir el nivel deseado de inversión en inventarios y mantener los niveles del inventario físico tan cerca como sea posible de lo planificado.

Este trabajo analizará a una empresa 100 % mexicana, fundada en el año de 1959 en la Ciudad de México, dedicada a la fabricación de los remolques y semirremolques. Es una empresa que trabaja bajo el esquema de producción bajo pedido, también conocido como MTO (Make to Order), el cual consiste en concentrar todos los esfuerzos para elaborar un solo producto a la vez. Sin embargo, la utilización de este esquema da un resultado diferente en cada ocasión, debido a que cada cliente tiene especificaciones diferentes que la empresa debe cumplir en cada proyecto.

Las principales problemáticas observadas dentro de la empresa son la falta de planeación del inventario, una base de datos errática e inconsistente y una producción bajo pedido, por lo que se requiere determinar la cantidad y temporización óptimos del inventario, con el propósito de alinearlos con las

capacidades de ventas y producción. La empresa sólo emplea un inventario de materias primas, el cual es difícil de manejar porque los materiales requeridos en cada proyecto de producción varían dependiendo de los modelos de remolque solicitados. Por dicha variedad de modelos, las materias primas empleadas y consiguiente falta de inventario en ciertos elementos específicos, se presenta el problema de cumplir con los tiempos de entrega de los productos finales.

Ya que la producción de esta empresa es bajo pedido, se debe presentar un control óptimo del inventario para que se pueda cumplir con los proyectos que lleguen a ella, en el tiempo correcto y con la calidad máxima. Este proyecto consiste en encontrar el método de pronóstico más adecuado para algunos de los artículos que utiliza la empresa como materia prima y con ello dar una base para que en un futuro se puedan implementar las políticas de inventario necesarias que ayuden a la empresa.

### 9.2. Metodología

Para este proyecto se recolectaron y analizaron los datos con los que cuenta la empresa en estudio para poder generar los pronósticos más adecuados para cada producto. La selección de los productos se hizo mediante una matriz multicriterio que ayudó a deducir cuales son los productos que generan más ganancias y al mismo tiempo son los más estables en el tiempo utilizados dentro de la producción de cada remolque.

En la Figura 9.1, se muestra un resumen de lo que implica cada etapa de la metodología.



Figura 9.1: Metodología

#### 9.2.1. Primera etapa

Para la identificación de cómo era el proceso de control de inventario antes de la presente intervención, se realizaron entrevistas al Director General, al encargado de compras, al encargado del control de inventarios y al ingeniero encargado de producción; así mismo se realizó una visita de campo para observar cómo se llevaba a cabo el proceso de control de inventario.

Por otro lado, se utilizó el diagrama de flujo del proceso, el análisis de los datos históricos de compras y de la base de datos de entradas y salidas de materia prima, para la identificación de los problemas que evitan que se lleve a cabo el correcto manejo del inventario.

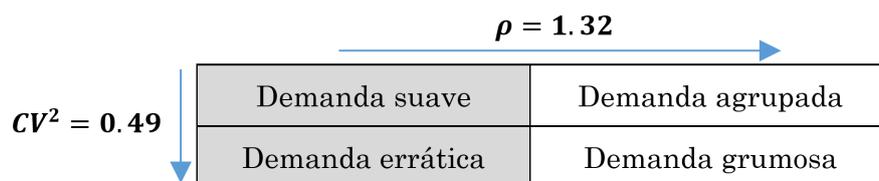
#### 9.2.2. Segunda etapa

Los datos históricos que se recabaron corresponden a 2014-2016 y para el análisis de estos se utilizaron los siguientes programas: Excel y RStudio. Con ayuda de estos *softwares* se pudo depurar toda la información, así como ordenarla, y realizar distintos cálculos y gráficos. Se utilizó un análisis multicriterio ABC XYZ para determinar los artículos que aportan mayor valor al inventario y que además son los que se utilizan con mayor frecuencia.

El análisis ABC/XYZ es una extensión de la clasificación ABC en la que se agrupan los productos, además de por su valor de inventario, por sus patrones de demanda o algún otro criterio. Se crea una matriz de 3x3 en la que las filas son la clasificación ABC según el valor del inventario y las columnas son una clasificación XYZ según la variabilidad de la demanda o el número de líneas de pedidos. De esta forma, las referencias de productos quedarán clasificadas en nueve categorías: AX, AY, AZ, BX, BY, BZ, CX, CY y CZ.

La caracterización de la demanda de los artículos seleccionados con la matriz multicriterio se llevó a cabo bajo el esquema de:

- *Serie de tiempo continua o intermitente.* La primera es aquella serie de tiempo donde la ocurrencia de los eventos de la demanda se presenta de manera continua periodo a periodo de manera ininterrumpida. La segunda es aquella donde la ocurrencia de los eventos de la demanda no se presenta de manera continua o se presentan interrupciones de un período a otro.
- La *categorización para demanda intermitente* creado por [?], donde los patrones de demanda se clasifican en 4 categorías, de acuerdo con dos parámetros de comportamiento como lo describe la Figura 9.2.



**Figura 9.2:** Esquema de categorización de demanda intermitente de [?].

Donde:

$\rho =$  Intervalo promedio entre demandas (ADI)

$CV^2 =$  Coeficiente de variación cuadrático

Conforme a la clasificación de la demanda obtenido, se tomó la decisión de qué tipo de método utilizar para realizar el pronóstico de cada artículo.

La descripción de la clasificación de la demanda presentada en la figura 2 es la siguiente:

- Demanda suave: los productos tienen un comportamiento de demanda con patrones que son caracterizados por infrecuencia en sus transacciones y con tamaños de demanda similares a los artículos tradicionales de baja rotación, en los que la demanda media por periodo es pequeña.
- Demanda errática: gran variabilidad en los requerimientos en cuanto a cantidad demandada.
- Demanda grumosa: es caracterizada por varios períodos en los que la demanda es cero y cuando la demanda ocurre, presenta gran variabilidad en la cantidad demandada.
- Demanda intermitente: caracterizados por una esporádica demanda, es decir varios periodos en los que la demanda es cero y no hay una marcada variabilidad en la cantidad demandada, es decir, cuando la demanda ocurre es constante o casi constante.

### 9.2.3. Tercera etapa

Después de realizar el análisis multicriterio, se procedió a seleccionar los artículos sujetos a estudio, caracterizar la demanda de cada uno de ellos y llevar a cabo el pronóstico para cada uno con distintos métodos; con la medición del error en pronóstico de demanda, se evaluó cuál de los pronósticos era el más efectivo, haciendo uso de dos tipos de errores:

- MAD (Desviación media absoluta): mide la dispersión del error de pronóstico o, dicho de otra forma, la medición del tamaño del error en unidades. Es el valor absoluto de la diferencia entre la demanda real y el pronóstico, dividido sobre el número de periodos.
- MSE (Error cuadrático medio): es una medida de dispersión del error de pronóstico; sin embargo, esta medida maximiza el error al elevar al cuadrado, castigando aquellos periodos donde la diferencia fue más alta a comparación de otros.

## 9.3. Resultados

### 9.3.1. Análisis multicriterio ABC XYZ

Los datos recabados corresponden a los años 2014, 2015 y 2016, así que en primera instancia se realizó un análisis ABC para cada uno de ellos, basado en el criterio de clasificación de costo unitario y así determinar los artículos que dieron mayor valor al inventario en cada año. También se realizó un análisis XYZ, para determinar los artículos que se solicitan con mayor frecuencia a proveedor. Finalmente, con ambas clasificaciones, se formó la matriz multicriterio que dio como resultado los artículos que dan mayor valor al inventario y que al mismo tiempo son los más utilizados en producción.

La Tabla 17.1 presenta un resumen que contiene los artículos que resultaron de la intersección ABC/XYZ y que pertenecen al área AX de cada año (2014, 2015 y 2016), y la parte sombreada en gris indica los artículos del área AX, que son constantes cada año, esto quiere decir que cada año esos artículos agregaron el mayor valor al inventario y además fueron los que constantemente se solicitaban a los proveedores. Este trabajo se enfocó en los artículos sombreados en gris, para analizar su demanda y crear un pronóstico adecuado.

Más adelante, cada que se haga mención de los productos seleccionados para su estudio, se manejará como “artículo 1”, “artículo 2”, y así sucesivamente, conforme aparecen en Tabla 9.2.

### 9.3.2. Caracterización de la demanda

Para caracterizar la demanda de los artículos seleccionados, primero se determinó si la demanda de los productos era continua o intermitente, una vez definido esto, se calculó el coeficiente de variación (CV) para demanda continua y el coeficiente de variación cuadrática (CV2) para demanda intermitente. Con estos coeficientes se puede determinar si la demanda es constante o variable. Si  $CV < 0.5$ , la demanda es variable, de lo contrario es constante, y lo mismo ocurre al evaluar el CV2 para la demanda intermitente.

Como todos los productos seleccionados presentaron demanda intermitente, se procedió al cálculo del ADI y finalmente se clasificó la demanda conforme al esquema de [? ], tomando en cuenta el ADI y el CV2.

La Tabla 9.3 muestra los resultados de los pasos descritos anteriormente para la caracterización de la demanda. Se observó que todos los artículos se caracterizan por tener demanda intermitente, lo cual era de esperarse debido a que la empresa trabaja con una producción bajo pedido, en la cual hay

**Tabla 9.1:** Área AX 2014-2016 del análisis multicriterio

| 2014                      | 2015                          | 2016                      |
|---------------------------|-------------------------------|---------------------------|
| ABRAZADERAS Y ASIENTOS    | BALERO HDHM518445             | BUJES DE BRONCE           |
| BUJES DE BRONCE           | BOLSAS DE AIRE                | ENSAMBLES UNIMONT CON ABS |
| BUJES TRIFUNCIONALES      | BUJES TRIFUNCIONALES          | ENSAMBLES UNIMONT SIN ABS |
| ENSAMBLES UNIMONT CON ABS | CAMARAS DOBLES 30-30          | LLANTAS 11R24.5           |
| ENSAMBLES UNIMONT SIN ABS | ENSAMBLES UNIMONT CON ABS     | LLANTAS 255/70/22.5       |
| LAMINA CAL. 10            | ENSAMBLES UNIMONT SIN ABS     | MANGUERAS FRENOS          |
| LLANTAS 11R24.5           | ESCOTILLA CIEGA Y OTROS       | MUÑON                     |
| LLANTAS 255/70/22.5       | LAMINA CAL. 12                | OXIGENO Y GAS             |
| MUÑON                     | LAMINA CAL. 8                 | PLACA 1/2"                |
| PISO MADERA 1-1/2"        | LLANTAS 11R24.5               | PLACA 1/4"                |
| PLACA 1"                  | LLANTAS 11R24.5 XZE2 MICHELIN | PLACA 3/4"                |
| PLACA 1/4"                | LLANTAS 255/70/22.5           | PLACA 3/8"                |
| PLACA 3/16"               | MUÑON                         | RINES UNIMONT 825 X 22.5  |
| PLACA 3/4"                | OXIGENO Y GAS                 | SOLDADURA                 |
| PLACA 3/8"                | PATINES                       |                           |
| RINES UNIMONT 825 X 22.5  | PLACA 1"                      |                           |
| SOLDADURA                 | PLACA 1/4"                    |                           |
| SOLERAS DE 5/8" X6"       | PLACA 3/16"                   |                           |
| SOLVENTES                 | PLACA 3/8"                    |                           |
| TUBO 5" X 1580 MM         | PLACA DE 1-1/4"               |                           |
|                           | RINES UNIMONT 825 X 22.5      |                           |
|                           | RINES UNIMONT 825 X 24.5      |                           |
|                           | SALPÍCADERAS ALUMINIO         |                           |
|                           | SISTEMA ABS.                  |                           |
|                           | SOLDADURA                     |                           |
|                           | SOLERAS DE 5/8" X6"           |                           |
|                           | SOLVENTES                     |                           |

**Tabla 9.2:** Renombramiento de artículos seleccionados

- 
- Artículo 1: Ensamblados unimont con ABS
  - Artículo 2: Llantas 255/70/22.5
  - Artículo 3: Muñón
  - Artículo 4: Placa 1/4"
  - Artículo 5: Placa 3/8"
  - Artículo 6: Rines unimont 825 x 22.5
  - Artículo 7: Soldadura
- 

intervalos de tiempo en los que no entra ningún pedido para realizar algún tipo de remolque, lo que provoca que la empresa no necesite solicitar material.

**Tabla 9.3:** Caracterización de la demanda

| Artículo | Media   | Desv. Stand. | CV   | CV2  | Serie Tiempo | Comportamiento | ADI  | Caracterización demanda |
|----------|---------|--------------|------|------|--------------|----------------|------|-------------------------|
| 1        | 20.33   | 16.47        | 0.81 | 0.66 | Intermitente | Variable       | 2.92 | Grumosa                 |
| 2        | 22.11   | 11.5         | 0.52 | 0.27 | Intermitente | Constante      | 1.84 | Intermitente            |
| 3        | 962.69  | 841.76       | 0.87 | 0.76 | Intermitente | Variable       | 2.13 | Grumosa                 |
| 4        | 3619.29 | 1972.7       | 0.55 | 0.3  | Intermitente | Constante      | 1.67 | Intermitente            |
| 5        | 4692.79 | 3316.3       | 0.71 | 0.5  | Intermitente | Variable       | 1.94 | Grumosa                 |
| 6        | 22.96   | 14.64        | 0.64 | 0.41 | Intermitente | Constante      | 1.35 | Intermitente            |
| 7        | 4.52    | 3.95         | 0.87 | 0.77 | Intermitente | Variable       | 1.21 | Errática                |

Por otro lado, la demanda intermitente plantea considerables dificultades en términos de previsión y control de inventario debido a su naturaleza compuesta, ya que las llegadas de la demanda se combinan con una distribución del tamaño de la demanda. Por lo tanto, los gerentes de operaciones enfrentan

un problema de pronóstico doble: (1) ¿Cuándo ocurrirá la próxima demanda? (2) Una vez realizada la demanda, ¿Cuál será el volumen respectivo?

Los métodos tradicionales de pronóstico más simples, como la media móvil, suavizado exponencial simple (SES) o Hol Winter, a menudo no son adecuados en escenarios de demanda intermitente. El método de Croston [?] y sus variantes (Syntetos-Boylan approximation, SBA, y Teunter, Syntetos and Babai, TSB [?]), que aplican el suavizado exponencial por separado a los intervalos entre las demandas no nulas y sus tamaños, son los enfoques más utilizados que abordan los problemas relacionados con la previsión de la demanda intermitente.

Para realizar el pronóstico de la demanda, se utilizó el método Croston y dos de sus variantes, SBA y TSB. Esto se llevó a cabo con la paquetería “tsintermittent” de RStudio.

### 9.4. Evaluación de resultados

Las medidas de error de pronóstico calculadas para un solo método en un solo período de tiempo carecen de significado. Su utilidad se muestra al comparar las medidas de error con las medidas de otros métodos de pronóstico o con otros períodos de tiempo.

Al analizar la Tabla 9.4, se observó que para los artículos 1, 3, 4, 6 y 7, el método TSB es el más adecuado, ya que presenta el menor error MAD y MSE en comparación con los otros dos métodos. Por otro lado, para el artículo 2 el mejor método sería Croston y para el artículo 5 convendría comparar con otras medidas de error, ya que presenta un menor MAD con el método TSB y un menor MSE con el método Croston, así que aún no se puede decidir cuál sería el mejor método de pronóstico para este artículo.

**Tabla 9.4:** Medidas de error de pronóstico

| MÉTODO /ERROR  | ARTÍCULO 1 |       | ARTÍCULO 2 |       | ARTÍCULO 3 |        | ARTÍCULO 4 |       | ARTÍCULO 5 |       | ARTÍCULO 6 |       | ARTÍCULO 7 |      |
|----------------|------------|-------|------------|-------|------------|--------|------------|-------|------------|-------|------------|-------|------------|------|
|                | MAD        | MSE   | MAD        | MSE   | MAD        | MSE    | MAD        | MSE   | MAD        | MSE   | MAD        | MSE   | MAD        | MSE  |
| <b>Croston</b> | 10.2       | 187   | 12         | 197.7 | 522.3      | 546988 | 2118.4     | 6E+06 | 2600.6     | 1E+07 | 13.8       | 304.6 | 2.7        | 16.1 |
| <b>SBA</b>     | 10.2       | 187.4 | 12.7       | 220.8 | 528.8      | 557636 | 2114.4     | 6E+06 | 2601.6     | 1E+07 | 14.2       | 314.2 | 2.7        | 16.2 |
| <b>TSB</b>     | 10         | 185.3 | 12.1       | 211.3 | 515.1      | 541466 | 2088.5     | 6E+06 | 2548.9     | 1E+07 | 13.2       | 261.2 | 2.6        | 16.1 |

Estudiando desde otra perspectiva cuál sería el mejor método, se tomaron en cuenta los costos que generaría elegir uno u otro método de pronóstico, es decir, los costos de mantener inventario o el costo por faltante. Por ejemplo, para el artículo 4, se generó la Tabla 9.5, que indica el inventario o los faltantes generados en el período de estudio 2014-2016, de acuerdo con el método de pronóstico utilizado. De primera instancia se observa que el método SBA es el que menos inventario produjo en el período de estudio, con una cifra de 28756 unidades, y el método TSB es el que menos faltantes generó con una cifra de 43725.

**Tabla 9.5:** Artículo 4 (Inventario y faltantes generadas por la elección del método de pronóstico)

| Croston    |          | SBA        |          | TSB        |          |
|------------|----------|------------|----------|------------|----------|
| Inventario | Faltante | Inventario | Faltante | Inventario | Faltante |
| 28804      | 45339    | 28756      | 45247    | 29373      | 43725    |

La Tabla 9.6 muestra el costo por mantener el inventario generado para cada método, para varias tasas de mantenimiento. En esta tabla,  $i$  es la tasa de mantenimiento anual,  $c$  es igual al costo unitario del artículo y  $h$  es el costo total anual de mantener el inventario, resultado de la tasa de mantenimiento por el costo unitario. Se observa que el método sombreado en gris es el que genera menos costo para el

artículo 4, el método SBA. Para todos los métodos de pronóstico, al aumentar la tasa de mantenimiento el costo se incrementa.

**Tabla 9.6:** Artículo 4 (Costo por mantener inventario Cm)

| $i$  | $c$   | $h$  | Costo por mantener |              |              |
|------|-------|------|--------------------|--------------|--------------|
|      |       |      | Croston            | SBA          | TSB          |
| 10 % | 12.14 | 1.21 | \$34,967.64        | \$34,910.03  | \$35,658.43  |
| 15 % | 12.14 | 1.82 | \$52,451.46        | \$52,365.05  | \$53,487.65  |
| 20 % | 12.14 | 2.43 | \$69,935.28        | \$69,820.07  | \$71,316.87  |
| 25 % | 12.14 | 3.04 | \$87,419.10        | \$87,275.09  | \$89,146.08  |
| 30 % | 12.14 | 3.64 | \$104,902.91       | \$104,730.10 | \$106,975.30 |
| 35 % | 12.14 | 4.25 | \$122,386.73       | \$122,185.12 | \$124,804.52 |

Finalmente, la Tabla 9.7 muestra el costo por faltante, Cf, para el artículo 4, donde  $\pi$  es el costo por faltante por unidad y b es el número de faltantes. En la tabla se muestra que el método TSB es el que genera menor costo para el artículo 4.

**Tabla 9.7:** Artículo 4 (Costo por faltante Cf)

| $\pi$ | Croston |              | SBA   |              | TSB   |              |
|-------|---------|--------------|-------|--------------|-------|--------------|
|       | b       | Cf           | b     | Cf           | b     | Cf           |
| 9.26  | 45339   | \$419,842.60 | 45247 | \$418,991.58 | 43725 | \$404,896.61 |

El análisis anterior ilustra cómo se puede elegir un método de pronóstico adecuado para un artículo con demanda intermitente, disminuyendo errores en la toma de decisiones y generando menores costos. Se ejemplificó este procedimiento para el artículo 4, para el que el método TSB fue el mejor, ya que los errores MAD y MSE correspondientes, así como el costo por faltante fueron menores. Para 6 de los 7 artículos analizados, el método TSB fue el mejor, incluyendo el artículo 5, para el que había discrepancia entre los errores MAD y MSE, pero que mostró un menor costo por faltante para el método TSB. Solo para el artículo 2, el mejor método fue Croston.

Las limitaciones de los métodos de pronóstico habituales, como el SES, para casos de demanda intermitente han llevado a desarrollar diferentes enfoques específicos de pronóstico para este tipo de demanda. El primer método desarrollado fue el de Croston; sin embargo, por limitaciones como el sesgo, falta de parámetros de suavizado independientes para el tamaño de la demanda y del intervalo, y el hecho de no tomar en cuenta la obsolescencia del producto, no siempre produce resultados adecuados. El método TSB es el que dentro de sus parámetros considera la obsolescencia, por eso es lógico que fuese el que mejor se adecuó al comportamiento de los artículos sujetos a estudio en este trabajo.

## 9.5. Conclusiones

Uno de los problemas más serios por los que atraviesa la empresa bajo estudio, es que año con año los pedidos han ido disminuyendo exponencialmente. Un pronóstico adecuado de la demanda puede disminuir costos y/o pérdidas bajo este escenario desfavorable. Se pueden explorar diferentes métodos específicos para pronosticar demandas intermitentes y así determinar el óptimo para cada artículo; en este trabajo se buscó ajustar el pronóstico con menor incertidumbre para los datos de una empresa que fabrica remolques. En trabajos futuros se desea probar el de redes neuronales artificiales, que ha demostrado su capacidad para resolver problemas donde el cómputo tradicional ha mostrado dificultad.

## *9 Inventario con Demanda Intermitente*

Por otro lado, sería importante contar con una base de datos históricos consistentes, ya que con información de calidad se espera poder caracterizar mejor la demanda y los pronósticos presentarían un mejor ajuste. Por ello, se le recomendaría a la empresa el uso de un software que le permitiese llevar un mejor control de su inventario y de sus datos históricos. Esto también ayudaría a crear, en un futuro, políticas de inventario que lo conviertan en un inventario flexible y colaborativo, para eficientar los tiempos de entrega y minimizar costos.

# 10 A Location-inventory Optimization Model Design For A Lignocellulosic Biomass Biofuel Supply Chain

Marcela María Morales Chávez<sup>\*1</sup>, William Sarache<sup>1</sup>, Rodolfo E. Pérez<sup>1</sup>, Yasel Costa<sup>1</sup>

1 – Universidad Libre Seccional Pereira, Colombia.

2 – Universidad Nacional del Colombia, Colombia.

3 – Fundacion Zaragoza Logistics Center, Zaragoza, Spain.

\*e-mail: marcelam.moralesc@unilibre.edu.co

Biofuels have been proposed as a potential solution for climate change mitigation. However, the high logistics costs of this supply chain have put the viability of its commercialization at risk. This research proposes a model for the design of a sustainable lignocellulosic biomass supply chain, in which location decisions are integrated with those of inventory, in a multi-period, multiproduct problem. Regarding localization decisions, facilities may be established during time periods different from the initial period. Additionally, they may experience a process of capacity expansion during the planning period. Utilizing the  $\varepsilon$ -restriction method, a series of chain configurations were obtained for ethanol production, using coffee waste. The results allow for observation of the model's flexibility in the time periods in which facilities may be opened. Additionally, the advantages of expanding capacities in existing facilities, and avoiding the need to open new facilities, are presented.

*Keywords:* biofuels; inventory-location problem; supply chain design.

## 10.1. Introduction

One such example is that the supply of biomass fluctuates greatly between seasons, depending on variant climatic conditions. This is a significant hindrance to the maintenance of production levels in biorefineries. In order to remedy this problem, biomass must be stored for periods of time. This increases the cost of inventory holding, which is finally reflected in the total cost of the supply chain (4). As such, the development of a system which allows for a constant, sustainable supply, and which guarantees biorefinery viability, is necessary (3).

Facility operation depends on the supply quantity which flows through them. In the case of lignocellulosic raw material, this is highly variable. One must determine the best moment to open a facility, its operating capacity (5), and additionally, whether it is necessary to expand capacity during the planning period (6).

With this goal, various authors have proposed mathematical models for the design of biofuel supply chains (1,7,8). In an attempt to address this problem, immerse in questions of biomass supply, the importance of simultaneously considering localization decisions and inventory has been identified. This contrasts with the traditional approach, which addresses them separately (2,9).

On the other hand, it is of great importance to establish equilibrium between the different dimensions of sustainability in supply chain design, which, from an integral perspective, not only considers system cost efficiency, but also the growing concern for the social and environmental impacts of business

processes (2,9). Although modeling for biofuel supply chain design is a field with extensive literature available, problems related to the following aspects have not been widely studied:

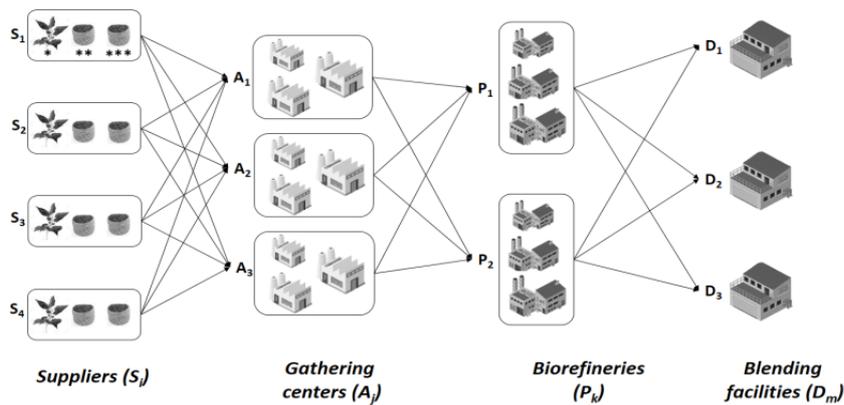
- Integration of inventory and localization decisions in a multi-period problem, which guarantees production process continuity in biorefineries.
- Incorporation of the three dimensions of sustainability (economic, environmental, social), where facility and inventory decisions are integrated.
- Opening of facilities in time periods different from the initial period, and the additional possibility of capacity expansion during the planning period.

This paper presents a model for the design of a sustainable lignocellulosic biofuel supply chain, in which location and inventory decisions are integrated. This integration aims to guarantee continuity in the raw material flow, considering the seasonality of biomass, in a multi-period, multiproduct problem. Regarding location decisions, biorefineries may be established in time periods different from the initial period. Additionally, they may go through an expansion process during the planning period.

## 10.2. Proposed methodology

Coffee residues have been identified as an attractive lignocellulosic source of biomass. Bonilla-Hermosa, Duarte & Schwan (2014), Rocha et al. (2014), and Triana, Quintero, Agudelo, Cardona & Higueta’s (2011) investigations have proven that coffee residues are a viable alternative, given their enormous organic potential, in addition to their profitability and environmental friendliness. In particular, stems, pulp, and mucilage are potential biomasses for ethanol production, owing to their high sugar content.

Configuration of the biofuel supply chain, using coffee residues, requires a network of biomass suppliers (residues: stems, mucilage, and pulp), collection centers, in which residue preprocessing is performed, and load consolidation is permitted, biorefineries, where residues are converted to ethanol, and blending facilities in which this is combined with fossil fuel, in accordance with governmental regulations (see Figure 1).



**Figura 10.1:** Diagram of an ethanol supply chain using coffee residues

\* Coffee stems; \* \* Pulp; \* \* \* Mucilage

|   |
|---|
| Decision variables                      |
| Facility variables                      |
| Material flow                           |
| Demand variables                        |
| Objective function                      |
| Max F1 = Net present value              |
| Min F2= Negative environmental impacts  |
| Max F3= Positive social impacts         |
| Constraints                             |
| Facility assignment constraints         |
| Inventory constraints                   |
| Capacity constraints                    |
| Transport network constraints           |
| Sets                                    |
| W, Residue type                         |
| I, Supplier list                        |
| J, Potential gathering center locations |
| K, Potential biorefinery locations      |
| M, Blending facility                    |
| B, Gathering center capacity            |
| C, Biorefinery capacity                 |
| UB, Set of gathering center expansion   |
| UC, Set of biorefinery expansion        |
| T, Set of time periods                  |

**Tabla 10.1:** Components of the mathematical model

Given these three types of biomass and their availability, in addition to the potential locations of gathering centers and biorefineries, the objective is to establish the number, size, and location of these biorefineries, the time periods in which they should open or expand their capacity. Biomass and ethanol flow through the supply chain and gathering center inventory levels should also be determined.

A summary of model components is presented in 10.1. Decision variables considered are related to facility opening (gathering centers and biorefineries), capacity increases in time periods, flow through the network, and demand left unsatisfied by biorefineries

In relation to the objective function, in accordance with the sustainable approach, three functions are proposed:

$$\text{Max}F1 = \text{Netpresentvalue} \quad (1)$$

$$\text{Min}F2 = \text{Negativeenvironmentalimpacts} \quad (2)$$

$$\text{Max}F3 = \text{Positivesocialimpacts} \quad (3)$$

Regarding the economic objective, the function seeks to maximize net present value, considering income from biofuel sale, residue purchase costs, facility opening and expansion costs, their fixed, variable, and inventory costs, and lastly, the cost of biomass and ethanol transport (see Equation 1).

In Equation (2), the CO<sub>2</sub> generation is minimized throughout the supply chain. Finally, in Equation (3), positive social impacts are maximized, considering a contribution to the reduction of the rate of unemployment in the region in which biorefineries will be established.

The model considers various groups of constraints, related to facilities (gathering centers and biorefineries), inventory, capacity, and transport. In relation to facilities, they may be opened in multiple locations, with different capacities, and throughout the time periods considered. In addition, they will be supplied by multiple providers. However, only one facility will be opened in each location. Thus, gathering centers and biorefineries both will be able to expand their capacity just once, within the planning period.

In the case of inventory constraints, direct flow is considered for pulp and mucilage, owing to their high rate of decomposition. In contrast, stems may be stored when required, in order to guarantee the flow of raw material to biorefineries. Capacity constraints guarantee that the quantity of residues that flows through gathering centers does not exceed the selected capacity for the pretreatment process or storage. This will occur similarly, with respect to the production of bioethanol in biorefineries. Finally, in transport constraints, flow will be addressed throughout the network.

### 10.3. Computational results

The proposed model is applied to a real case in the Colombian coffee zone. Colombia is composed of 21 departments, which are grouped into five regions. Within these regions, four possible locations for gathering centers and three for biorefineries are selected, in accordance with the quantity of residue production. Demand is zoned in the northern, central, and southern parts of the country (see Figure 2). The planning period is established as 240 weeks.

In relation to residue supply, values are obtained from coffee production, in the case of pulp and mucilage. Regarding stems, this is considered to be the crop renewal plan. Demand is obtained through consideration of normal and extra fuel consumption, and the biofuel-fossil fuel mix percentage corresponding to each department in the country.

In order to solve the multi-objective problem, the  $\varepsilon$ -restriction method was used, from which various non-dominated solutions were obtained. One of these was selected to present the final supply chain structure, as an example (see Figure 3).

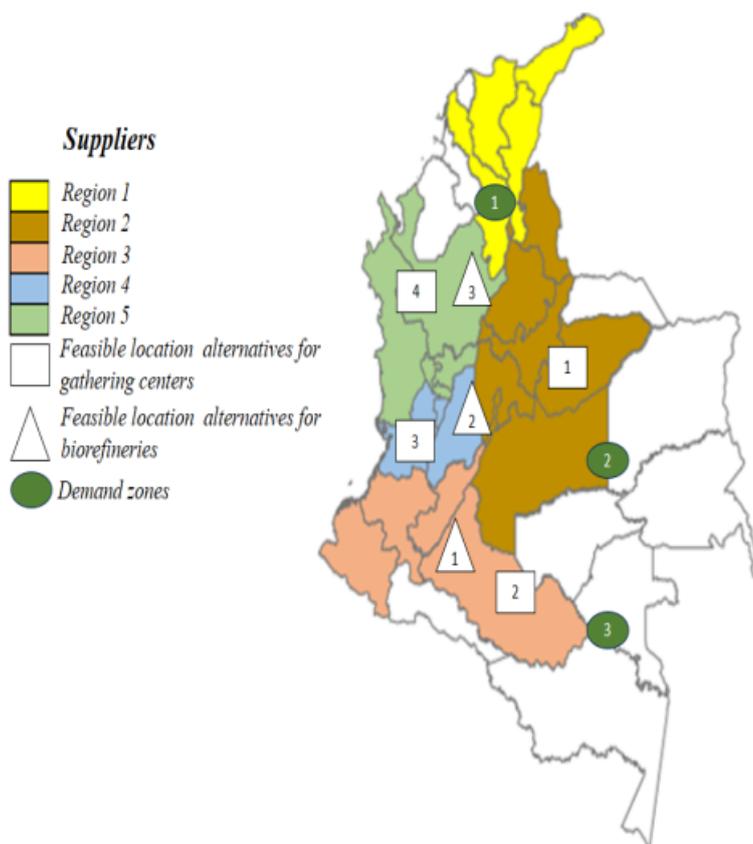
This supply chain configuration begins with the opening of two gathering centers in time period one; the first in location two (A2), and the second in location three (A3), both with a medium capacity (2). Later, in the sixth time period, a biorefinery is opened in location one (P1) with the lowest capacity (1). Additionally, in time period seven, another biorefinery is opened in location two (P2) with medium capacity (2).

Continuing with the chain structure monitoring, in time period nine, gathering center three (A3) expands its capacity from medium (2) to high (3), and biorefinery one (P1) expands from a small (1) to large size (3). This chain structure is used until time period 240.

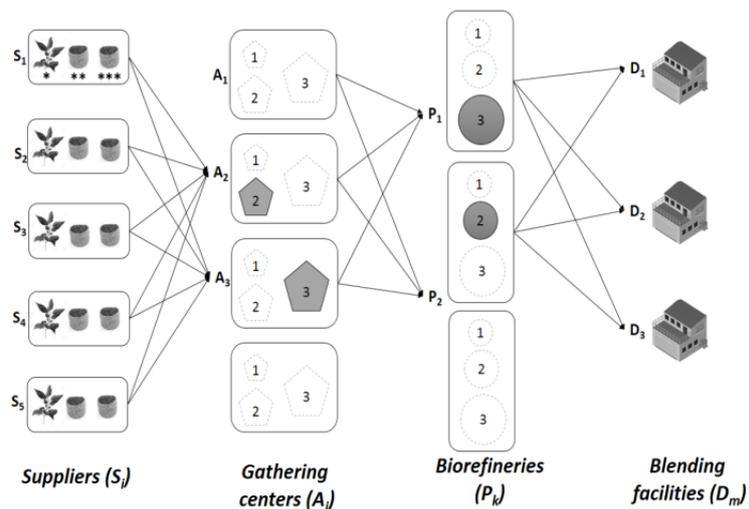
A sensitivity analysis was performed, in which ethanol prices and supply availability variations were considered. Results show that, despite changes in the input parameters, the chain's configuration remains stable in the majority of the cases.

### 10.4. Conclusions

Considering the challenges in the production and commercialization of lignocellulosic biofuels, a model for its supply chain design was developed. It integrates localization and inventory decisions in a problem with multiple periods, steps, and products. Additionally, striving to strengthen the pillars



**Figure 10.2:** Schematic depiction of the case study



**Figure 10.3:** Final case study supply chain configuration  
 \* Coffee stems; \* \* Pulp; \* \* \* Mucilage

of sustainability, the model considers three objective functions (maximization of net present value, minimization of negative environmental impacts, and maximization of positive social impacts).

## Referencias

1. Lin T, Rodríguez LF, Shastri YN, Hansen AC, Ting KC. Integrated strategic and tactical biomass-biofuel supply chain optimization. *Bioresour Technol.* 2014;156:256–66.
2. You F, Tao L, Graziano DJ, Snyder SW. Optimal design of sustainable cellulosic biofuel supply chains: Multiobjective optimization coupled with life cycle assessment and input-output analysis. *AIChE J.* 2012;58(4).
3. Zhang F, Johnson DM, Johnson MA. Development of a simulation model of biomass supply chain for biofuel production. *Renew Energy.* 2012;44.
4. Quddus MA, Chowdhury S, Marufuzzaman M, Yu F, Bian L. A two-stage chance-constrained stochastic programming model for a bio-fuel supply chain network. *Int J Prod Econ.* 2018;195.
5. Ivanov B, Stoyanov S. A mathematical model formulation for the design of an integrated biodiesel-petroleum diesel blends system. *Energy.* 2016;99.
6. Lee S, Park SJ, Seshadri S. Plant location and inventory level decisions in global supply chains: Evidence from Korean firms. *Eur J Oper Res.* 2017;262(1):163–79.
7. Ng RTL, Maravelias CT. Design of Cellulosic Ethanol Supply Chains with Regional Depots. *Ind Eng Chem Res.* 2016;55(12).
8. Eksioglu SD, Acharya A, Leightley LE, Arora S. Analyzing the design and management of biomass-to-biorefinery supply chain. *Comput Ind Eng.* 2009;57(4):1342–52.
9. Bairamzadeh S, Pishvae MS, Saidi-Mehrabad M. Multiobjective Robust Possibilistic Programming Approach to Sustainable Bioethanol Supply Chain Design under Multiple Uncertainties. *Ind Eng Chem Res.* 2016;55(1).

# 11 Modelo matemático para la programación de horarios de cursos de una institución de educación del nivel superior en México

Nancy M. Arratia Martínez<sup>\*1</sup>, Cristina Maya Padrón<sup>2</sup>, Paulina A. Ávila Torres<sup>1</sup>

1 – Universidad de las Américas Puebla, San Andrés Cholula, Puebla.

2 – Universidad Politécnica de García, García, Nuevo León.

\*e-mail: nancy.arratia@udlap.mx

La programación de horarios es un problema que surge en muchas organizaciones e instituciones del sector público y privado, en el caso de instituciones educativas, puede ser clasificado de acuerdo al tipo de horario que se desea generar. Entre ellos, programación de horarios de exámenes, horarios de cursos, asignación de profesores, asignación de espacios, entre otros.

En este trabajo se aborda el problema de programación de horarios y asignación de docente en una institución educativa del nivel superior.

Las características consideradas son: profesores de contratación permanente que tienen una carga mínima de cursos de acuerdo a su perfil académico y profesores de contratación temporal; se define una matriz profesor-curso que indica las materias de acuerdo a su disciplina, existen restricciones de horarios para los cursos de distintos semestres, los cursos de un mismo semestre no se deben asignar en un mismo horario, entre otras restricciones.

Se presenta un modelo de programación lineal entero con variables binarias para el caso de estudio, así como la solución del mismo.

*Palabras clave:* Programación de horarios; Programación lineal entera.

## 11.1. Introducción

El problema de programación de horarios es conocido por su complejidad y por la diversidad de restricciones que existen de una universidad a otra, considerando que cada institución educativa tiene requerimientos particulares. En la literatura, existen dos principales corrientes de investigación con respecto a este problema: el primero, mediante modelos de programación matemática [6, 9, 10, 2, 4], el cual es el enfoque del presente trabajo. El segundo, haciendo énfasis en el desarrollo de algoritmos de solución, en donde la intención principal es la obtención de mejores soluciones a modelos establecidos [3, 1, 5, 8, 7]. Con respecto a la modelación matemática, en la literatura se pueden encontrar trabajos con modelos lineales que incorporan variables de penalización en la función objetivo y restricciones, en caso de no cumplir con ciertos criterios [6, 4, 10]. Para el presente caso de estudio, ha sido posible obtener solución sin esta consideración. Respecto a la asignación de maestros, en trabajos como [6, 10] se considera información sobre la disponibilidad del maestro y relación de cursos que pueden impartir, mientras que en el presente trabajo, además de esto, se añade información asociada a categorías de contratación y cumplimiento de cantidad de cursos asignados a cada profesor.

Como podemos ver, cada modelación matemática representa la problemática de una institución, y por tanto, tiene características propias, tal es el caso de [9] que hace uso de una lista de preferencias para la asignación de cursos; [4] que considera el desplazamiento de docentes en varias sedes; ó [10] que realiza una replaneación de un horario en caso de cambios.

En este trabajo se aborda el problema de programación de horarios para los cursos ofertados en un periodo semestral de una institución de educación de nivel superior en México. La descripción del problema y formulación matemática se presentan en la sección 16.2; en la sección 14.3 se muestran los datos del caso específico y la solución del mismo; y en la sección 17.5 se presentan las conclusiones y trabajo futuro.

### 11.2. Descripción del problema

En este trabajo, la programación de horarios es una tarea realizada de forma independiente para cada carrera. El proceso actual de programación de horarios implica flujo de información de distintos niveles en la institución. Primero, la administración informa a cada departamento académico la cantidad de estudiantes que están por inscribir cada asignatura. Posteriormente, cada departamento académico puede definir el número de grupos, es decir, el número de cursos de una misma asignatura que se necesitan programar. De acuerdo a la plantilla de profesores se hace un programa de horarios y asignación de cursos-profesor tentativo, mismo que debe cumplir todos los lineamientos que se establecen por parte de la institución y sus administrativos. Después de hacer una verificación manual de los lineamientos, se procede a confirmar la asignación de cursos con cada profesor, y se establecen los horarios especialmente con aquellos que son de contratación temporal y tienen otras obligaciones laborales.

La administración asigna los espacios para cada curso, y a pesar de existir aulas para cada facultad, es posible que excedan su capacidad en algún semestre. Finalmente, el departamento académico procede a la publicación de la programación de horarios para consulta previa al periodo de inscripciones.

El modelo matemático propuesto permite hacer un programa para la asignación de asignatura-grupo-profesor-bloque facilitando la tarea de creación del programa y la confirmación de horarios con cada profesor, dado que se proporciona con antelación la información sobre su disponibilidad. Los lineamientos que se establecen por la administración son:

- Los cursos de un mismo semestre se asignan en diferente horario permitiendo que el estudiante tenga la flexibilidad de elegir entre varias opciones.
- Los cursos del 1ro. al 4to. semestre, se asignan en horario matutino, y los cursos de 5to. a 8vo. se asignan en horario vespertino o a las 7:00 a.m.
- Los cursos que se le asignan a cada docente son de acuerdo a su área de conocimiento y credenciales.
- A cada profesor de contratación permanente se le asigna la cantidad de cursos de acuerdo a su perfil, mientras que a los profesores de contratación temporal se les asigna como máximo dos cursos.
- Existen requerimientos sobre la cantidad de cursos programados en cada bloque horario para cursos disciplinarios y cursos disciplinarios de servicio o de apoyo a toda la escuela, esto para el mejor uso de los espacios a nivel institucional.
- Existen cursos que no pueden asignarse en bloques de horarios específicos. O por el contrario, pueden definirse horarios específicos para uno o más cursos.

- Los bloques de horario para el departamento académico son de una hora de clase los días lunes, miércoles y viernes; y de 1.5 horas con clases los días martes y jueves.

### 11.2.1. Modelo matemático

Conjuntos:

$C$ : Cursos.

$P$ : Profesores de contratación permanente y contratación temporal.

$M$ : Conjunto de profesores de contratación temporal.

$Q$ : Conjunto de profesores de contratación permanente.

$B$ : Bloques de horario para asignar cursos.

$B_{am}$ : Bloques de horario matutinos para asignar cursos, con cardinal  $|B_{am}|$ .

$B_{pm}$ : Bloques de horario vespertinos para asignar cursos, con cardinal  $|B_{pm}|$ .

$S$ : Conjunto del máximo número de grupos por asignatura.

$T$ : Semestres.

$D_j$ : Cursos que puede impartir el profesor  $j$  de acuerdo a su área del conocimiento.

Parámetros:

$\beta_i$ : Número de grupos necesarios del curso  $i$ .

$\sigma_j$ : Cantidad máxima de cursos a asignar al profesor  $j$ .

$\tau_i$ : Semestre al que pertenece el curso  $i$ .

Variables

$$X_{ijkl} = \begin{cases} 1 & \text{si, se asigna el curso } i \text{ al profesor } j \text{ en el bloque de horario } k \text{ en el grupo } l \\ 0 & \text{en otro caso.} \end{cases}$$

$$\text{mín} \sum_{i \in C} \sum_{j \in M} \sum_{k \in B} \sum_{l \in S} X_{ijkl} \quad (11.1)$$

s.a.

$$\sum_{i \in C} \sum_{j \in P} \sum_{k \in B} \sum_{l \in S} X_{ijkl} = \sum_{i \in C} \beta_i \quad (11.2)$$

$$\sum_{i \in \{C | \tau_i = s\}} \sum_{j \in P} \sum_{l \in S} X_{ijkl} \leq 1; \quad \forall s \in T, \forall k \in B \quad (11.3)$$

$$\sum_{i \in C} \sum_{l \in S} X_{ijkl} \leq 1; \quad \forall j \in P, \forall k \in B \quad (11.4)$$

$$\sum_{j \in P} \sum_{k \in B} X_{ijkl} \leq 1; \quad \forall i \in C, \forall l \in \{1 \dots \beta_i\} \quad (11.5)$$

$$\sum_{j \in P} \sum_{k \in B} \sum_{l \in S} X_{ijkl} = \beta_i; \quad \forall i \in C \quad (11.6)$$

$$\sum_{i \in C} \sum_{k \in B} \sum_{l \in S} X_{ijkl} \leq \sigma_j; \quad \forall j \in P \quad (11.7)$$

$$\sum_{i \in C} \sum_{k \in B} \sum_{l \in S} X_{ijkl} \geq \sigma_j; \quad \forall j \in Q \quad (11.8)$$

$$X_{ijkl} \leq 0; \quad \forall j \in P, \forall i \notin D_j, \forall l \in S, \forall k \in B \quad (11.9)$$

$$\sum_{j \in P} \sum_{k \in B_{am}} X_{ijkl} \leq 0; \quad \forall i \in \{C | i \neq 1 \wedge \tau(i) \leq 4\} \quad \forall l \in \{S | l \leq |B_{am}|\} \quad (11.10)$$

$$\sum_{j \in P} \sum_{k \in B_{pm}} X_{ijkl} \leq 0; \quad \forall i \in \{C | \tau(i) \geq 5\} \quad \forall l \in \{S | l \leq |B_{pm}|\} \quad (11.11)$$

$$\sum_{l \in S} \sum_{j \in P} \sum_{k \in \{V | V \subset B\}} X_{ijkl} \geq \beta_i; \quad \forall i \in \{\omega | \omega \subset C\} \quad (11.12)$$

$$\sum_{j \in P} \sum_{k \in \{R | R \subset B\}} \sum_{l \in S} X_{1jkl} \leq 0 \quad (11.13)$$

La función objetivo (11.1) minimiza la cantidad de profesores de contratación temporal con asignación de cursos. El modelo, está sujeto a las siguientes restricciones: La restricción (11.2) garantiza que para todos los cursos  $i$  se asignarán los grupos requeridos. Los cursos que pertenecen a un mismo semestre deben asignarse en diferentes bloques horarios (11.3). Con la restricción (11.4) aseguramos que a ningún profesor le será asignado dos o más cursos en el mismo bloque horario. Cada grupo de un curso será asignado solo una vez (11.5), también se garantiza que para cada curso solo se asignarán los grupos necesarios (11.6).

La restricción (11.7) asegura que la cantidad de cursos asignados a un profesor no excederá la carga máxima permitida de acuerdo a su perfil académico, y la restricción (11.8) indica que la cantidad de cursos asignados a un profesor de contratación permanente será igual a la carga máxima permitida, los cursos que se le asignen a los profesores serán de acuerdo a sus credenciales (11.9).

Los cursos del primero al cuarto semestre deben programarse en horario matutino (11.10), lo anterior se cumple para todos los cursos, excepto el curso número uno (11.1), el cual tiene una demanda muy alta. Los cursos del quinto semestre en adelante deben programarse en horario vespertino o bien a primera hora de la mañana (11.11). La restricción (11.12) indica que algunos cursos ( $\omega \subset C$ ) solo pueden programarse en bloques de horarios específicos ( $V \subseteq B$ ). Además, los cursos disciplinares de 1er semestre no deben programarse después de las 19 horas (11.13).

### 11.3. Caso de estudio

En esta sección se describe la aplicación del modelo matemático para el conjunto de asignaturas disciplinares que componen una de las carreras ofertadas por la universidad de interés. Véase en la tabla 11.1 la clave de la asignatura y su información respectiva para un semestre determinado. El caso de estudio abordado está incluye 24 cursos, resultando en un total de 64 grupos para asignar hora y profesor, así como 22 bloques de horario. En el momento de la programación, se tenían 16 profesores de contratación permanente y 13 profesores de contratación temporal. La última columna de la tabla indica si es un curso con un horario diferente de los establecidos por los bloques horarios por semestre.

El modelo de programación lineal se implementó en el software ILOG CPLEX Optimization Studio versión 12.8. La programación de horarios se presenta en la tabla 11.2, en la programación se indica *clave del curso + #de grupo - tipo de contratación (CT/CP) + número de profesor* con un identificador del 1 al 29 y aquellos con el identificador PP son los profesores que deben contratarse para cubrir todos los cursos que se ofertan. Posterior a la obtención del programa en la tabla 11.2, se añadieron restricciones para balancear la cantidad de cursos en cada bloque horario, lo que permitió reducir el número de cursos siendo entre tres y cuatro cursos por bloque.

**Tabla 11.1:** Información sobre los cursos a programar.

| #  | Clave de curso | No. grupos | Semestre | CD/CSD | Horario regular |
|----|----------------|------------|----------|--------|-----------------|
| 1  | FA             | 14         | 1        | CSD    | No              |
| 2  | CH             | 2          | 4        | CSD    | Si              |
| 3  | DE             | 3          | 5        | CD     | Si              |
| 4  | CE             | 3          | 2        | CD     | Si              |
| 5  | CM             | 6          | 3        | CD     | Si              |
| 6  | TI             | 4          | 3        | CSD    | Si              |
| 7  | CA             | 1          | 4        | CD     | Si              |
| 8  | MD             | 4          | 4        | CD     | Si              |
| 9  | EB             | 2          | 5        | CD     | Si              |
| 10 | LO             | 2          | 6        | CD     | Si              |
| 11 | AO             | 1          | 6        | CD     | Si              |
| 12 | AC             | 1          | 6        | CD     | Si              |
| 13 | PN             | 1          | 6        | CD     | Si              |
| 14 | AA             | 1          | 4        | CD     | Si              |
| 15 | AS             | 1          | 7        | CD     | Si              |
| 16 | EN             | 3          | 7        | CD     | Si              |
| 17 | PP1            | 2          | 7        | CD     | No              |
| 18 | TS1            | 1          | 7        | CD     | Si              |
| 19 | SE             | 1          | 8        | CD     | Si              |
| 20 | AP             | 4          | 8        | CSD    | Si              |
| 21 | RSE            | 4          | 8        | CD     | Si              |
| 22 | PP2            | 1          | 8        | CD     | No              |
| 23 | TS2            | 1          | 8        | CD     | Si              |
| 24 | TS3            | 1          | 8        | CD     | Si              |

**Tabla 11.2:** Programación de horarios de cursos resultante.

| Horario     | Lunes, Miércoles y Viernes  | Horario     | Martes y Jueves                                  |
|-------------|---|-------------|--|
| 07:00-08:00 | FA10-CP5, DE1-CT21, PP11-CP9, AP3-CP10                                      | 07:00-08:30 | FA4-CP2, DE3-CT21, CE2-CP5, TI4-CT25             |
| 08:00-09:00 | CM4-CP2, TI2-CT24   | 08:30-10:00 | FA1-CT19, CM3-CP2, CA1-CP7                       |
| 09:00-10:00 | CM6-CT23  | 10:00-11:30 | FA8-CT17, CM1-CT23                               |
| 10:00-11:00 | FA3-CP4   | 11:30-13:00 | FA2-CT17, TI1-CT26                               |
| 11:00-12:00 | CE3-CP5, TI3-CT25   | 13:00-14:30 | FA14-CP1, CH2-CP11, EB1-CTPP, EN1-CP12, AP2-CP13 |
| 12:00-13:00 | FA9-CT18, CE1-CP5, CM2-CTPP, MD3-CP8, LO1-CP6, AA1-CP11, EN2-CP15, SE1-CP14 | 14:30-16:00 | FA6-CT18, EB2-CP9                                |
| 13:00-14:00 | CH1-CP3, MD1-CP8, RSE2-CP10   | 16:00-17:30 | FA7-CT19, MD2-CP14                               |
| 14:00-15:00 | CM5-CP2, TS31-CP16  | 17:30-19:00 | FA5-CP6, AC1-CTPP, AS1-CP16, AP1-CTPP            |
| 15:00-16:00 | FA13-CP1, MD4-CT28, LO2-CP1, TS11-CT27, RSE4-CP10                           | 19:00-20:30 | DE2-CT22, PN1-CTPP, PP12-CP9, PP21-CTPP          |
| 16:00-17:00 | FA11-CT20, EN3-CP15, RSE1-CTPP  |             |  |
| 17:00-18:00 | TS21-CTPP   |             |  |
| 18:00-19:00 | FA12-CP6, RSE3-CP11   |             |  |
| 19:00-20:00 | AO1-CP7, AP4-CP13   |             |  |

## 11.4. Conclusiones

Como parte de este trabajo se ha desarrollado un modelo de programación lineal entero con variables binarias que permite crear una programación de horarios semestral para los cursos disciplinares del departamento académico interesado. Con ello se facilita la planificación y se asegura el total cumplimiento de los lineamientos administrativos y propios del departamento académico. Se espera

incorporar la asignación de espacios como trabajo futuro, y de ser posible, hacer la programación a nivel facultad.

## Referencias

- [1] Cagdas Hakan Aladag and Gülsüm Hocaoglu. A tabu search algorithm to solve a course timetabling problem. *Hacettepe journal of mathematics and statistics*, 36(1):53–64, 2007.
- [2] Fernanda Brendy Bedoya Tello. Modelo matemático para la asignación de horarios en la institución educativa de ciencias aplicadas Víctor Valenzuela Guardia–Cociap–Unasam. Master’s thesis, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, 2018.
- [3] Luca Di Gaspero and Andrea Schaerf. Neighborhood portfolio approach for local search applied to timetabling problems. *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms*, 5(1):65–89, 2006.
- [4] Linda Lucia Esquivel T. and Juan Pablo Orejuela. Programación de horario escolar con multi-localización y preferencias docentes.[school course timetable with multi location and preferences of teachers]. *Revista Logos Ciencia & Tecnología*, 11(1):20–29, 2019.
- [5] Paul McMullan. An extended implementation of the great deluge algorithm for course timetabling. In *International Conference on Computational Science*, pages 538–545. Springer, 2007.
- [6] SA MirHassani. A computational approach to enhancing course timetabling with integer programming. *Applied Mathematics and Computation*, 175(1):814–822, 2006.
- [7] Clemens Nothegger, Alfred Mayer, Andreas Chwatal, and Günther R Raidl. Solving the post enrolment course timetabling problem by ant colony optimization. *Annals of Operations Research*, 194(1):325–339, 2012.
- [8] Rong Qu and Edmund K Burke. Hybridizations within a graph-based hyper-heuristic framework for university timetabling problems. *Journal of the Operational Research Society*, 60(9):1273–1285, 2009.
- [9] John Van Den Broek, Cor Hurkens, and Gerhard Woeginger. Timetabling problems at the tu eindhoven. *European Journal of Operational Research*, 196(3):877–885, 2009.
- [10] Marjolein Veenstra and Iris FA Vis. School timetabling problem under disturbances. *Computers & Industrial Engineering*, 95:175–186, 2016.

# 12 Planificación a largo plazo de las operaciones de corte en la fabricación de muebles

Marta Cabo<sup>1</sup>

1 – ITAM, México

\*e-mail: marta.cabo@itam.mx

En este trabajo se presenta un problema de corte y empaquetamiento bidimensional que optimiza el uso de materia prima en una fábrica de muebles. Dado que el material proviene de una fuente natural, como son las planchas de contrachapado de madera, pueden presentar defectos. Estos defectos afectan la cantidad de materia prima disponible en cada plancha, ya que no siempre se pueden incluir en las piezas finales. La heurística presentada en este trabajo, muestra la mejor manera de tratar con los defectos. También consideramos el uso de las planchas de contrachapado en una planeación a largo plazo, dado que la compra de materia prima normalmente se realiza de forma periódica, y las existencias deben ser suficientes para completar la demanda de varias semanas.

*Palabras clave:* Programación Entera; Problema de Asignación; Modelo Matemático.

## 12.1. Introducción

El problema del corte bidimensional se define como el de cortar un conjunto dado de rectángulos pequeños (piezas) en otro más grande (plancha o placa). Este problema tiene múltiples aplicaciones en la industria. En este trabajo nos centraremos en el corte de planchas de madera contrachapada para la realización de muebles bajo demanda. En esta industria, al igual que en muchas otras, la materia prima es muy costosa, por lo que optimizar la labor de corte de las piezas y utilizar la menor cantidad de la misma es crucial para la reducción de costes. En la mayoría de los casos, cuando la plancha proviene de material manufacturado, como puede ser el aluminio o el papel, podemos garantizar planchas homogéneas. Sin embargo, si el material proviene de una fuente natural como la madera, el cuero o algodón, la aparición de defectos es normal. Estos defectos suelen inutilizar ciertas áreas de la plancha y por tanto el área disponible para el corte se reduce según la placa que estemos utilizando.

En este trabajo nos concentramos en el corte de piezas de madera para la fabricación de muebles. En este caso, la placa de contrachapado puede presentar defectos, mismos que pueden aparecer en cualquier lugar dentro de la placa, y su ubicación no es conocida hasta el mismo momento en el que se comienzan las operaciones de corte. Para la compañía proveedora de materia prima, la calidad de sus planchas de contrachapado se basa en la cantidad de defectos que se puedan encontrar, sin embargo, para nuestros propósitos, la calidad la tenemos que definir por la posición y tamaño de estos defectos. Este pequeño cambio en la definición de la calidad por parte del proveedor y del usuario, resulta en un problema importante cuando queremos planear la producción y compra del contrachapado para el largo plazo. Por eso tendremos esta restricción adicional en consideración, ya que la compañía tiene un tiempo de espera desde que realiza el pedido de su materia prima, y hasta que la recibe de unas 3 semanas. Para no paralizar la producción, debemos asegurarnos que la materia prima adquirida, aún

con sus defectos, debe ser suficiente para satisfacer la demanda durante este lapso de tiempo entre que se solicita el material y hasta que llega a la fábrica.

Este trabajo presenta una heurística eficiente que minimiza el número de placas de contrachapado necesarias para la producción de los muebles, teniendo en cuenta los posibles defectos en las placas, y asegurándonos que la solución obtenida sea factible para un horizonte de planeación de varias semanas. Además, y dado que el problema viene inspirado por las necesidades reales de una compañía, intentaremos que nuestros planes de corte ofrezca la posibilidad de reutilizar el sobrante. Probaremos además, que esta heurística en combinación con una sencilla búsqueda local sobre la selección de placas, podemos reducir el número de placas necesarias, alcanzando en algunos casos la cota inferior. Además, mostramos que los sobrantes son tales que, en su mayoría pueden ser reutilizados para futuras operaciones de corte.

### 12.1.1. Trabajo previo

El problema de corte bidimensional (2DBPP por sus siglas en inglés) ha sido estudiado en gran medida a lo largo de los años. De acuerdo a la tipología presentada en (**author?**) [7], este problema se enmarca dentro de los problemas de minimización de insumos donde las piezas son regulares. Las primeras investigaciones que tratan este problema, se han concentrado en encontrar soluciones óptimas para este problema, como se menciona en (**author?**) [4]. La mayoría de los artículos sobre este tema, y en particular los que consideramos para esta revisión del trabajo previo, consideran que las piezas no pueden ser rotadas. En nuestro caso, se permite una rotación de  $90^\circ$  de las piezas.

Uno de los primeros trabajos en 2DBPP que incorpora defectos en las placas bidimensionales, corresponde a [1] el cual desarrolla un problema de programación lineal binario. Sin embargo, la base de esta formulación está en la discretización de la placa en puntos donde colocar las piezas. Esto claramente limita la precisión, ya que existe una compensación entre precisión y rapidez en la solución. Mas tarde, [5] proponen un método exacto que adopta un esquema de ramificación en dos niveles, donde en un primer nivel las piezas se asignan a las placas y en el otro un árbol de decisión enumera posibles secuencias para la posición final de las piezas en la placa correspondiente. Este caso, sin embargo, no considera defectos en las placas.

En cuanto a métodos heurísticos, [2] proponen cuatro heurísticas para empacar piezas: *finite next-fit* (FNF), *finite first-fit* (FFF), *finite best-strip* (FBS) y *finite bottom-left* (FBL). Las heurísticas FNF, FFF y FBL empaquetan directamente en un número finito de placas, mientras que FBS es una heurística de dos etapas en la que primero se empaqueta en una tira de longitud infinita y luego esta tira se divide en bloques, que a su vez son reempaquetados en placas finitas. Estas heurísticas no toman en cuenta defectos en las placas, ni por supuesto se preocupa del sobrante a la hora de colocar las piezas.

En nuestro problema, el uso del sobrante es crucial para futuras operaciones de corte. Aún y cuando en este trabajo no consideramos su uso, nos interesa que estos sobrantes sean lo más grandes posibles para un posible uso en el futuro. Así buscamos soluciones de corte que compacten al máximo el sobrante. [3] introducen el concepto de *espacio residual* definidos como el rectángulo más grande que se puede obtener en un área libre después de colocar una pieza. [6] utilizan este concepto para desarrollar una heurística donde se maximice el espacio residual de cada placa, al mismo tiempo que se minimiza el número total de placas utilizadas. El punto crítico de este procedimiento es la determinación de los espacios residuales (*RS* por sus siglas en inglés) una vez que se coloca una pieza. La heurística de empaquetamiento maximizando el espacio residual (RSMP por sus siglas en inglés) desarrollada por [6] utiliza este concepto para seleccionar la mejor posición para la colocación de la siguiente pieza. Esta heurística se explicará en detalle, junto con las modificaciones introducidas por nuestro problema en la Sección 16.3.

El resto del manuscrito se divide de la siguiente manera. En la Sección 16.2 se describe a detalle el problema, e introducimos la notación. En la sección 16.3 explicamos la heurística RSMP y las adaptaciones que hemos introducido para adecuarlo a las necesidades específicas de este problema.

## 12.2. Descripción del problema

El objetivo del problema es el de minimizar el número de planchas de madera contrachapado necesarias para la fabricación de los muebles demandados. Además, buscamos una disposición de las piezas de modo que, una vez todas las piezas hayan sido colocadas, el desperdicio se concentre en rectángulos de mayor tamaño.

Denotamos por  $\mathcal{B}$  el conjunto de planchas de contrachapado, y  $B_i \in \mathcal{B}$  la  $i$ -ésima plancha disponible para la colocación de las piezas. Todas las planchas tienen la misma altura ( $H$ ) y ancho ( $W$ ), y las piezas  $k \in P$  son todos rectángulos de ancho  $w_k$  y alto  $h_k$ . Consideramos que todas las piezas son diferentes, y en caso de haber piezas iguales, listamos todas las copias disponibles. Para este problema, admitimos defectos en las planchas de contrachapado. Estos defectos los representaremos como un un rectángulo. A pesar de que en realidad las formas de los defectos suelen ser óvalos o formas más irregulares, considerarlas como rectángulos no le resta generalidad al problema, ya que al colocar rectángulos evitando los defectos, el área que rodeará al defecto tendrá esta forma. Como mencionamos en la Sección 17.1, para la compañía distribuidora de materia prima, la calidad del contrachapado viene medido por el número de defectos que se pueden encontrar. En nuestro caso trabajaremos únicamente con contrachapado de calidad alta, la cual puede presentar a lo máximo un defecto.

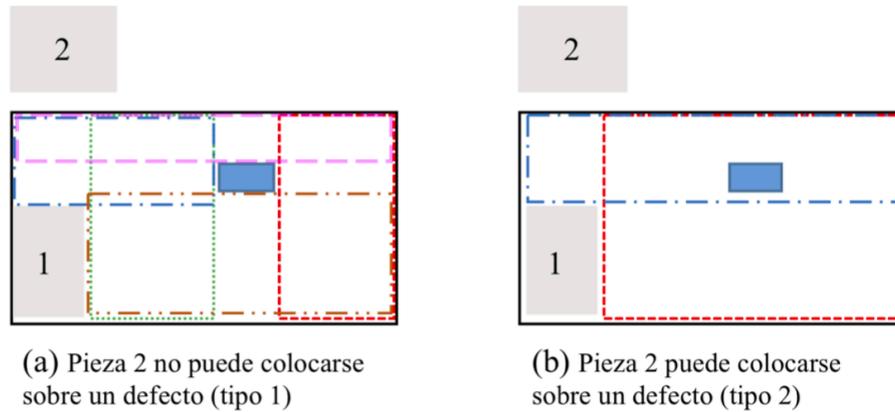
El segundo elemento importante para la descripción del problema, son las piezas que vamos a colocar. Como acabamos de mencionar, todas las piezas son rectangulares, sin embargo necesitamos diferenciar dos tipos de piezas: aquellas que no pueden llevar ningún defecto (piezas tipo 1) y las que pueden absorber los defectos (piezas tipo 2). Las piezas tipo 1 normalmente corresponden a zonas visibles en el mueble donde importa la veta de la madera; mientras que las tipo 2, suelen pertenecer a zonas escondidas dentro del mueble, o aquellas que irán recubiertas por capas de pintura lacada, y por tanto no se aprecia el defecto.

El tipo de pieza que vamos a colocar, es de vital importancia a la hora de determinar los espacios residuales disponibles para colocar la pieza, ya que, como podemos apreciar en la Figura 12.1 estos cambian dependiendo de si la pieza puede o no absorber el defecto. Como podemos observar el número de espacios residuales es mayor si la pieza no puede absorber el defecto, añadiendo mayor dificultad al problema.

En la siguiente sección, explicaremos a detalle la heurística para la colocación de las piezas, teniendo en cuenta todas las particularidades del problema.

## 12.3. Metodología de solución

En esta sección explicaremos a detalle la heurística RSMP propuesta por [6]. Los autores proponen un preprocesamiento de las piezas, donde todas las piezas se rotan de modo que su altura es siempre menor o igual que su ancho ( $h_k \leq w_k$  para toda  $k \in P$ ), y después utilizar tres secuencias ordenadas: por altura, desempataando mediante el ancho; por ancho, desempataando por altura; y por área, con desempates arbitrarios. Para cada pieza, en esta lista, tenemos 8 posibles configuraciones dentro de un mismo espacio residual: colocar la pieza, y su rotación, en cada una de las cuatro esquinas del espacio residual considerado. La heurística RSMP, selecciona la configuración que produce los mayores espacios residuales en términos de área. Comienza con una lista de las piezas ordenadas según su ancho, alto o



**Figura 12.1:** Espacios residuales creados dependiendo de si la siguiente pieza es de tipo 1 o de tipo 2.

área, y coloca la piezas de forma ordenada según cada una de las listas. Para todas las configuraciones posibles, se escoge la colocación que produce el espacio residual  $RS$  más grande. Si la pieza seleccionada no entra en ningún  $RS$ , entonces se utiliza una nueva placa. La heurística termina cuando todas las piezas están colocadas.

En nuestro caso, consideramos el defecto como una pieza ya colocada que puede aparecer en cualquier lugar de la placa. Por ello, el número de  $RS$  es variable según el tipo de pieza que se vaya a colocar. La actualización de los  $RS$  no se puede hacer inmediatamente después de colocar la pieza, sino justo antes de decidir cuál es la siguiente pieza, ya que tenemos que saber si ésta puede colocarse o no encima de un defecto. Por ello, nosotros introducimos una medida de la calidad de una placa  $Q_i$  basada en la posición del defecto:

$$Q_i = \frac{A(RS_1) + A(RS_2)}{2A(B_i)} \quad (12.1)$$

donde  $A(RS_1)$  y  $A(RS_2)$  denotan las áreas de los dos espacios residuales más grandes, y  $A(B_i)$  el área de la placa. Cuanto más cercano  $Q_i$  esté a 1, más próximo estará el defecto a alguna de las esquinas de la placa, y por tanto el espacio disponible es más similar al área total de la placa. Ordenaremos las placas en orden ascendente según su calidad. Esta es una modificación importante sobre la heurística original, ya que no sólo tenemos que tomar una decisión sobre qué pieza y en qué orientación colocarla, sino también en qué placa debe ir. Cambiar el orden de las placas, afecta al número total de placas, como veremos en la Sección 12.4.

### 12.3.1. Fase de mejora

La heurística constructiva inicial, ordena la placa de contrachapado de acuerdo a su calidad y utiliza los de peor calidad primero. A pesar de que los resultados obtenidos fueron buenos, este procedimiento puede tener impacto en las operaciones a largo plazo. Así pues implementamos una fase de mejora en aquellas instancias en las que no se obtuvo la cota inferior en el número de placas necesarias.

El objetivo secundario de este trabajo es el de compactar el desperdicio de modo que pueda ser reusado en operaciones futuras. Para ello introducimos el concepto de *desperdicio reutilizable*  $R_i$  como el área del  $RS$  más grande una vez que todas las piezas se han colocado. Implementamos nuestra fase de mejora sólo sobre las planchas de madera con  $R_i$  mayor al 15 % del área de la placa. Para aquellas placas candidatas a aplicarles la mejora, extraemos las piezas y las colocamos en placas de mejor

calidad (mayores valores de  $Q_i$ ).

Con esta mejora, conseguimos reducir el número de placas. Presentamos algunos resultados preliminares donde vemos que la heurística constructiva utilizó 11 placas, y con la fase de mejora la reducimos a 8. La Tabla 12.1 presenta la solución obtenida con la heurística constructiva, y una vez aplicada la fase de mejora, respectivamente. La fila  $ID$  representa el identificador de la placa. Dado que las hemos ordenado en orden creciente de su calidad, los primeros números indican calidad inferior, como se puede ver en la fila  $Q_i$ . La fila  $R_i$  nos muestra el porcentaje de área que ocupa el desperdicio reutilizable.

**Tabla 12.1:** Calidad de las placas utilizadas antes y después de la fase de mejora

|       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $ID$  | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   |
| $Q_i$ | 0,53 | 0,54 | 0,57 | 0,58 | 0,59 | 0,60 | 0,64 | 0,66 | 0,66 | 0,66 | 0,67 |
| $R_i$ | 3    | 19   | 18   | 13   | 18   | 35   | 56   | 56   | 56   | 56   | 56   |
| $ID$  | 1    | 4    | 17   | 18   | 19   | 20   | 21   | 22   |      |      |      |
| $Q_i$ | 0,53 | 0,58 | 0,76 | 0,76 | 0,77 | 0,95 | 0,95 | 0,96 |      |      |      |
| $R_i$ | 3    | 13   | 15   | 24   | 15   | 8    | 8    | 10   |      |      |      |

A pesar de esta reducción en el número de placas, debemos tener en cuenta que la empresa tiene un stock limitado para satisfacer la demanda de varias semanas, antes de que llegue más materia prima, por ello, debemos asegurarnos que las placas sean suficientes para operaciones futuras. Utilizar placas de gran calidad, como vemos puede reducir el número en una operación particular, pero también puede impactar en la cantidad de materia prima necesaria para el resto de las semanas. Por tanto, para asegurarnos que el stock es suficiente y la solución viable para un período de tres semanas, implementamos una búsqueda local sencilla que nos ayude a equilibrar la calidad del contrachapado utilizado en cada operación de corte.

### 12.3.2. Búsqueda Local

La búsqueda local seleccionada tiene por objetivo el reducir la calidad de las placas de contrachapado sin afectar a la cantidad. La idea es balancear la calidad de las placas durante las tres semanas, bajo el entendido de que será más sencillo ser más eficiente en el empaquetado de placas de buena calidad. Para ello comenzamos reempacando las piezas de la placa con mayor  $Q_i$ , en otra que no esté ya en la solución. Si es posible, se reemplaza, y nos movemos a la siguiente placa. Este procedimiento lo llevamos a cabo hasta que no se pueda realizar ninguna mejora. De este modo nos aseguramos el mantener el mismo número de placas, pero “empeorando” la calidad de las elegidas.

La Tabla 12.2 muestra como utilizando el mismo número de placas, hemos sido capaces de utilizar aquellas de peor calidad (placas del 1 al 5) guardando placas de mejor calidad para el futuro.

**Tabla 12.2:** Calidad de las placas utilizadas antes y después de la búsqueda local

|         |       |      |      |      |      |      |      |      |      |
|---------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|         | $ID$  | 1    | 4    | 17   | 18   | 19   | 20   | 21   | 22   |
| Antes   | $Q_i$ | 0,53 | 0,58 | 0,76 | 0,76 | 0,77 | 0,95 | 0,95 | 0,96 |
|         | $R_i$ | 3    | 13   | 15   | 24   | 15   | 8    | 8    | 10   |
|         | $ID$  | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 17   | 18   | 19   |
| Después | $Q_i$ | 0,53 | 0,54 | 0,57 | 0,58 | 0,58 | 0,76 | 0,76 | 0,77 |
|         | $R_i$ | 3    | 13   | 24   | 13   | 13   | 14   | 6    | 6    |

## 12.4. Resultados Computacionales

Para evaluar nuestra heurística, utilizamos datos de una compañía de fabricación de muebles en madera contrachapada. Consideramos una demanda constante de tres tipos de muebles, con un total de 155 piezas. Para evaluar la bondad de nuestras soluciones creamos una cota inferior sobre el número de placas necesarias. Esta cota inferior, se calculó tomando el área de todas las placas disponibles y dividiéndolo entre el área disponible para colocar piezas (área de la placa menos área del defecto). Dado que la medida de la calidad de la madera contrachapada es diferente para el proveedor que para nosotros, y no se tienen datos exactos de la calidad de la madera disponible, creamos placas de forma aleatoria con una calidad promedio de  $Q_i = 0.65$ . Por otro lado, la empresa trabaja con 4 grosores de contrachapado: 9, 12, 15 y 18 mm; por lo que podemos evaluar la calidad de nuestra heurística en 4 instancias dependiendo del grosor de contrachapado que se vaya a utilizar.

La Tabla 12.3 presenta los resultados para los 4 grosores de contrachapado antes y después de la fase de mejora. Como podemos ver, en todos los casos la fase de mejora logra alcanzar la cota inferior, y los desperdicios reutilizables se han reducido considerablemente. Sólo en el caso de las placas de 9 mm se podrían reutilizar desperdicios en todas las placas, mientras que en el 18 mm las placas reutilizables tienen el tamaño mínimo elegido como reusable.

**Tabla 12.3:** Resultados antes y después de la fase de mejora

|         | Grosor de placa | Cota inferior | Número de placas | Mínimo $R_i$ (%) | Máximo $R_i$ (%) |
|---------|-----------------|---------------|------------------|------------------|------------------|
| Antes   | 09 mm           | 3             | 3                | 15               | 17               |
|         | 12 mm           | 8             | 11               | 3                | 52               |
|         | 15 mm           | 9             | 9                | 3                | 28               |
|         | 18 mm           | 3             | 4                | 5                | 63               |
|         | Grosor de placa | Cota inferior | Número de placas | Mínimo $R_i$ (%) | Máximo $R_i$ (%) |
| Después | 09 mm           | 3             | 3                | 15               | 17               |
|         | 12 mm           | 8             | 8                | 2                | 24               |
|         | 15 mm           | 9             | 9                | 3                | 28               |
|         | 18 mm           | 3             | 3                | 5                | 15               |

Sin embargo estos resultados se obtuvieron con placas de calidad alta ( $Q_i$  cercano a 1). La búsqueda local, mantiene el número de placas, pero su efecto se ve reflejado en la planeación a largo plazo. En nuestro caso, consideramos un periodo de 12 semanas, con demanda semanal y donde la materia prima llega cada 3 semanas, excepto para el primer y último periodo que son de 2 y 1 semana respectivamente. Los datos se muestran en la Tabla 12.4 donde se muestra, la demanda semanal (Piezas), la cota inferior (L.B.) en el número de placas necesarias según la demanda, la cantidad de material utilizado actualmente con la compañía (C.O.) y el resultado obtenido con nuestra heurística (RSMP Mod). Asimismo mostramos la mejora obtenida con la nueva heurística en comparación con la operación actual.

Observamos como en todas las semanas nuestra heurística mejora a la operación actual en más del 18%, y en dos semanas se alcanza la cota inferior en cuanto al número de placas. La mejora real se traduce en 68 placas de contrachapado en un horizonte de planeación de 12 semanas, lo cual corresponde a un promedio del 20,6%. Esto con un contrachapado de calidad promedio del  $Q_i = 0.65$ .

**Tabla 12.4:** Comparativa entre la operación actual y la heurística propuesta

| Semana     | 1    | 2    | 3    | 4   | 5    | 6    | 7  | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   |
|------------|------|------|------|-----|------|------|----|------|------|------|------|------|
| Piezas     | 165  | 84   | 74   | 143 | 106  | 49   | 69 | 165  | 168  | 222  | 74   | 49   |
| L.B.       | 24   | 13   | 10   | 19  | 15   | 9    | 11 | 24   | 25   | 31   | 10   | 9    |
| C.O.       | 35   | 19   | 14   | 28  | 22   | 11   | 15 | 35   | 34   | 47   | 14   | 11   |
| RSMP Mod   | 26   | 14   | 11   | 21  | 18   | 9    | 12 | 26   | 26   | 33   | 12   | 9    |
| Mejora (%) | 25,7 | 26,3 | 21,4 | 25  | 18,2 | 18,2 | 20 | 25,7 | 23,5 | 29,8 | 14,3 | 18,2 |

## 12.5. Conclusiones

En este trabajo hemos presentado un heurístico para resolver un problema de corte bidimensional aplicado a la fabricación de muebles. Esta heurística está dividida en tres fases, en la que primero se construye una solución inicial, luego se mejora y finalmente se adapta para poder ser viable en una planificación a largo plazo. Asimismo vimos que la colocación de las piezas es tal, que es posible en muchos casos, reutilizar el sobrante para futuras operaciones de corte.

Con esta heurística no sólo mejoramos la operación actual de la compañía, ahorrando más de 65 placas de contrachapado, sino que además garantizamos que para algunas semanas, la solución obtenida fue la óptima.

A pesar de que nosotros nos concentramos en desarrollar un heurístico que concentrara el desperdicio, no hemos hecho ningún análisis en cómo este desperdicio puede ser utilizado. Un estudio más exhaustivo de este problema podría ofrecer soluciones en las que se reduzca aún más la cantidad de materia prima utilizada, ya que se podrían cortar piezas comunes a los diferentes muebles por anticipado, haciendo un uso más eficiente del desperdicio.

## Referencias

- [1] J. E. Beasley. An exact two-dimensional non-guillotine cutting tree search procedure. *Operations Research*, 33(1):49 – 64, 1985.
- [2] J. O. Berkey and P. Y. Wang. Two-dimensional finite bin-packing algorithms. *Journal of the Operational Research Society*, 38(5):423–429, 1987.
- [3] K. K. Lai and W. M. Chan. Developing a simulated annealing algorithm for the cutting stock problem. *Computers & Industrial Engineering*, 32(1):115 – 127, 1997.
- [4] A. Lodi. *Algorithms for two-dimensional bin packing and assignment problems*. PhD thesis, Università di Bologna, 1999.
- [5] S. Martello and D. Vigo. Exact solution for the two-dimensional finite bin packing problem. *Management Science*, 44:388 – 399, 1998.
- [6] Y. Wang and L. Chen. Two-dimensional residual-space-maximized packing. *Expert Systems with Applications*, 42(7):3297 – 3305, 2015.
- [7] G. Wäscher, H. Haußner, and H. Schumann. An improved typology of cutting and packing problems. *European Journal of Operational Research*, 183:1109 – 1130, 2007.



# 13 Valor del Tiempo de Carga en Carretera

Héctor G. Muñoz Esquivel\*<sup>1</sup>, Ricardo Aceves García<sup>1</sup>

1 – Departamento de Sistemas, Universidad Nacional Autónoma de México

\*e-mail: munoz.esquivel.hector@gmail.com

La literatura del estudio del valor del tiempo para tránsito de pasajeros es bastante nutrida. En cambio, se ha estudiado poco el fenómeno del valor del tiempo del transporte de carga por carretera. El Instituto Mexicano del transporte tiene una metodología para el cálculo del valor del tiempo, pero lo hace tomando en cuenta únicamente el ingreso y no contempla el valor de la carga. En este artículo se trata de asignarle un valor al ahorro del tiempo de viaje de transporte de carga (VFTTS “Value of freight time travel savings” por sus siglas en inglés). Es importante que las condiciones de la infraestructura carretera se mantengan en óptimas condiciones lo cual permite a las empresas una disminución en sus gastos de operación y representa un ahorro social importante.

*Palabras clave:* Valor del tiempo; valor de la carga; VFTTS.

## 13.1. Introducción

El valor del tiempo se ha estudiado desde diferentes perspectivas, el primero en realizar una formulación fue Becker [1] con un enfoque microeconómico donde se modela al usuario como si maximizara una función de utilidad dependiendo de las actividades y los bienes de consumo, donde se establece que el usuario tiene ciclos de trabajo y de consumo. Para 1967 Chiswick [2] plantea que existe una relación entre bienes y tiempo, ya que para consumir un bien es necesario dedicar una cantidad de tiempo de trabajo asociado al costo de ese bien. Small [8] aplica el modelo para viajes al trabajo, considerando un enfoque de elecciones discretas y utilizando logit. Para 1990 Juster [6] asocia los flujos de utilidad con las actividades que se realizan. Posteriormente, Jara-Díaz [3] propone un “valor subjetivo del tiempo” al incluir todas las actividades, consumo de bienes y cualquier elección discreta.

Para 2001 Mackie et al. [7], introducen el concepto de Valor Subjetivo del Ahorro del Tiempo de Viaje (SVTTS por sus siglas en inglés), pero el estudio de este concepto se enfoca mayormente en el transporte de pasajeros y en la voluntad que estos tienen a pagar, una mayor tarifa a cambio de una mayor certidumbre en el tiempo de viaje. En 2007 Zamparini y Reggiani [9] realizan una metodología más específica sobre el valor subjetivo del ahorro del tiempo en carretera, para transporte de carga (VFTTS por sus siglas en inglés) y lo definen como la utilidad o beneficio marginal que se deriva de una reducción unitaria en la cantidad de tiempo, necesario para mover una cantidad particular de mercancías de un origen a un destino específico.

Luego de hacer esta revisión sobre cómo ha evolucionado el estudio del valor del tiempo desde su aparición, se encontró que muchos de los modelos con que se estudia tienen similitudes entre sí, en general se tratan de funciones de optimización que pretenden maximizar una utilidad, abordando el problema desde dos diferentes enfoques:

### 13.1.1. Microeconómicos:

Modelan al individuo como si maximizara una función de utilidad dependiente del tiempo asignado a las actividades y los bienes consumidos, sujeto a una restricción de ingreso, una de tiempo total disponible y restricciones tecnológicas que ligan tiempo con consumo de bienes.

### 13.1.2. Basados en actividades:

Buscan entender el contexto en el cual se toma la decisión de viajar, reconociendo principalmente que la demanda por viajes deriva de la necesidad de realizar actividades distribuidas a través del espacio y el tiempo. Más que concebir el viaje como un costo asociado en tiempo y dinero, en este tipo de enfoque se entiende todo el proceso que motiva a viajar.

La condición de la vía juega un papel importante para que las empresas transportistas mejoren sus operaciones, con una vialidad en buen estado, se ahorra en el mantenimiento de las unidades y se reduce la incidencia de accidentes y con condiciones de seguridad las empresas no tienen que gastar en seguridad privada.

Es muy importante que las instituciones encargadas de la gestión de la infraestructura se den cuenta que tener una red carretera en buen estado, no solo aporta a la seguridad de los usuarios sino también es más rentable.

## 13.2. Descripción del problema

El tránsito de la carga que circula por carretera en el país representa un monto importante para la economía nacional, según el Foro “Pesos y Dimensiones de las Configuraciones Vehiculares que Transitan en las Vías Federales de Comunicación” realizado por la SCT en 2016, en México se moviliza por carretera el 81.3% del valor de la carga nacional, esto es 522 millones de toneladas al año, lo que representa el 38% del PIB nacional. Por este motivo es importante estudiar el fenómeno del tiempo de viaje de la carga en carretera y asignarle un valor monetario y social, para brindarle mayor certidumbre a las empresas y los usuarios de este modo de transporte y aportar también, una mayor certidumbre a las instituciones encargadas de la planificación de nuevos ejes carreteros.

Las empresas saben de la importancia del ahorro del tiempo, pero lo aprenden de forma empírica y realizan medidas arriesgadas como: Bajar los sueldos de los operadores, optar por rutas más económicas aunque más peligrosas, explotar el rendimiento y la capacidad de sus unidades, no dar el apropiado mantenimiento a las unidades e incrementar la velocidad. Estas medidas acarrearán malos hábitos de operación y vuelven las vías más inseguras para los usuarios.

### 13.2.1. Modelo Matemático

Para este caso se utilizó una adaptación del modelo de Jara Díaz [4] para el estudio del valor subjetivo del tiempo de viaje, pero considerando el valor de la carga. Por otro lado, en [5] se sugiere que el tiempo de trabajo ganado puede ser reasignado como tiempo de ocio o tiempo para realizar una nueva actividad productiva.

$$Max u = U(\beta_G + \beta_C C_i + t_i + R_\sigma + \epsilon) \quad (13.1)$$

$$Sujeto a : \frac{\beta_G + \beta_C C_i}{w} \geq W \quad (13.2)$$

$$L + W + t_i = \tau \quad (13.3)$$

$$T_p \geq L \quad (13.4)$$

donde:

|           |   |
|-----------|---|
| $W$       | Tiempo de trabajo                             |
| $\sigma$  | Desviación estándar del tiempo de viaje       |
| $G$       | Bien de consumo en \$/ton de carga            |
| $w$       | Tasa salarial                                 |
| $\beta_G$ | Factor de corrección del bien de consumo      |
| $\tau$    | Tiempo total disponible                       |
| $C_i$     | Costo de viaje en el modo $i$ en \$           |
| $t_i$     | Tiempo asignado al viaje en el modo $i$       |
| $\beta_C$ | Factor de corrección del costo de viaje       |
| $T_p$     | Diferencia entre carretera federal y de cuota |
| $R$       | Coefficiente de confiabilidad                 |
| $L$       | Tiempo perdido                                |

Los coeficientes de costo y tiempo de viaje representan la sensibilidad de los viajeros hacia los cambios en el tiempo de viaje y el costo de este.

La ecuación 13.2 nos dice que un mayor valor de la carga y del costo de viaje representarán un mayor efecto en el tiempo de trabajo dependiendo de la tasa salarial. La ecuación 13.3 restringe que la suma de los tiempos no puede ser mayor que el tiempo total disponible asignado.

La ecuación 13.4 señala que el tiempo debe ser menor que el tiempo de diferencia con la carretera de cuota, de lo contrario no sería rentable transitar por el camino de pago.

El  $VFTTS$  está relacionado con el valor monetario del tiempo ahorrado y se refiere a la cantidad de dinero que el transportista está dispuesto a pagar para reducir el tiempo de viaje:

$$VFTTS = \frac{\delta U / \delta C_i}{\delta U / \delta t_i} = \frac{t_i}{C_i} \cdot 60 = \left[ \frac{\text{utilidad}/\text{min}}{\text{utilidad}/\$} \right] = \left[ \frac{\$}{\text{min}} \right] \quad (13.5)$$

Con la ecuación 13.5 podemos calcular el  $VFTTS$  a partir de una relación de costos entre tiempo. Si multiplicamos el  $VFTTS$  por el TDPA (Transito Diario Promedio Anual) podríamos obtener un valor aproximado del tiempo de ahorro en general que se puede tener en una carretera específica cada periodo de tiempo dado.

### 13.3. Conclusiones

Brindar una mayor certidumbre a la circulación de la carga traerá mejoras significativas para la economía nacional, si se reduce la cantidad de accidentes, la probabilidad de perder la carga por siniestro y dañar las vías se verá reducida; además, al optimizar los tiempos de viaje se promueve una mejora a la economía y se podría aspirar a aumentar el valor del PIB que circula por las carreteras en forma de carga.

Conocer el valor del tiempo de viaje permite que instituciones como SCT, CAPUFE y las empresas concesionarias encargadas, promuevan el buen estado de los tramos carreteros a su cargo e incentiven el buen mantenimiento y una cultura de reducción de accidentes.

El estudio del tiempo de viaje les permite a las empresas encontrar otras formas de mejorar sus tiempos de viaje, diferentes a solo incrementar la velocidad.

Mejorar los tiempos de viaje, brinda a las empresas la posibilidad de ser más rentables y ampliar su área de cobertura, ya que pueden recorrer una mayor distancia en el mismo tiempo.

## Referencias

- [1] Gary S Becker. A theory of the allocation of time. *The economic journal*, pages 493–517, 1965.
- [2] Barry R Chiswick. The economic value of time and the wage rate: comment. *Economic Inquiry*, 5(3):294, 1967.
- [3] Sergio R Jara-Díaz. Time and income in travel demand: towards a microeconomic activity framework. *Theoretical Foundations of Travel Choice Modelling*. Elsevier, 1998.
- [4] Sergio R Jara-Díaz. Allocation and valuation of travel-time savings. in: Handbook of transport modelling. 2000.
- [5] Sergio R Jara-Díaz and Cristián A Guevara. Behind the subjective value of travel time savings. *Journal of Transport Economics and Policy (JTEP)*, 37(1):29–46, 2003.
- [6] F Thomas Juster. Rethinking utility theory. 1990.
- [7] Peter J Mackie, S Jara-Díaz, and AS Fowkes. The value of travel time savings in evaluation. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 37(2-3):91–106, 2001.
- [8] Kenneth A Small. The scheduling of consumer activities: work trips. *The American Economic Review*, 72(3):467–479, 1982.
- [9] Luca Zamparini and Aura Reggiani. Freight transport and the value of travel time savings: A meta-analysis of empirical studies. *Transport Reviews*, 27(5):621–636, 2007.

# 14 Aplicación de Value Stream Map (VSM) con simulación: un caso de estudio

Mariana Vargas Sánchez<sup>\*1</sup>, Lourdes Loza Hernández<sup>2</sup>, José Luis López Cervantes<sup>1</sup>, Marlenne Cruz Romero<sup>1</sup>

1 – Facultad de Ingeniería, UAEMex, Toluca, Edo. Méx.

2 – Estancia Posdoctoral de CONACYT, Facultad de Ingeniería, UAEMex, Toluca, Edo. Méx.

\*e-mail: mariana.v.sanchez@hotmail.com

Actualmente la Cadena de Suministro de cualquier sector debe ser competitiva ante las exigencias del mercado global, debido a ello identificar sus fortalezas y debilidades en sus procesos a través de métodos de evaluación cuantitativa, logrando la competitividad requerida. Existe una gran variedad de herramientas que permiten evaluar una cadena de suministro y detectar los procesos en los cuales es necesario realizar mejoras, para lograr los objetivos de las empresas. Una de estas herramientas es Value Stream Mapping (VSM) el cual permite identificar aquellos procesos que no generan valor al producto en la cadena de suministro. El objetivo del presente trabajo es evaluar el proceso de producción de una empresa dedicada a la elaboración de productos artesanales (rama cerámica de alta temperatura). Para ello es importante analizar la situación actual del proceso de producción a través de la aplicación de VSM y proponer alternativas de mejora enfocadas a satisfacer la demanda del cliente, la cual actualmente no se cubre. Las propuestas de mejora son simuladas a través del software de simulación Arena Versión. 14.0. Los resultados del modelo de simulación muestran que la integración de recursos en el proceso de producción, alcanza a cubrir la demanda pronosticada.

*Palabras clave:* Proceso de producción; Value Stream Map; Simulación; Arena.

## 14.1. Introducción

El uso de herramientas cuantitativas para analizar los procesos que se desarrollan en cualquier sector productivo, permite la identificación de áreas de oportunidad para el crecimiento de las empresas. En el presente trabajo se analiza el proceso de producción de una empresa dedicada a la elaboración de productos artesanales, específicamente en la rama de cerámica de alta temperatura, la cual no logra satisfacer la demanda de sus clientes. La aplicación del método Value Stream Mapping (VSM) para este caso de estudio, permitió identificar los procesos que no generan valor en la cadena de suministro e identificar los puntos en los que los recursos de la cadena son subutilizados. La propuesta de alternativas para la mejora de sus procesos es el objetivo principal del trabajo. Los resultados de las propuestas de mejora, son probadas con ayuda de software de simulación (Arena Ver. 14.0) como herramienta de apoyo, para generar escenarios del proceso de producción de la empresa (actual y mejorado), con el objetivo de satisfacer la demanda de piezas.

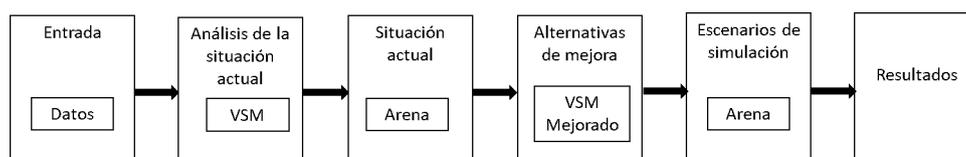
La literatura muestra que el VSM se puede aplicar en cualquier sector y funciona como una herramienta efectiva para mejorar y recopilar la información de un proceso sobre los tiempos y recursos que se utilizan en cada actividad, el tiempo de configuración, el inventario y el flujo de información desde la materia prima hasta el producto terminado [7]. La aplicación del VSM mejora la efectividad de la línea de producción de una compañía, disminuyendo los residuos y las actividades sin valor agregado

[14]. El VSM es compatible con herramientas como Lean, Just-In-Time y 5S, que son estrategias de mejora continua, y con los modelos de simulación. Al implementar procesos Lean se debe tener el enfoque de reducir riesgos y no sólo de aumentar la producción [4]. [11] comentan que es necesario aplicar el VSM en casos reales para analizar cómo y en qué nivel la teoría puede implementarse en la práctica real, así como considerar las fortalezas, debilidades y los aspectos clave para obtener el máximo rendimiento del VSM; también afirman que esta herramienta es fundamental para rediseñar los sistemas productivos de acuerdo con el sistema Lean, dado su aplicación en casos reales. [2] muestran los efectos de la implementación de VSM en los costos, rechazos y desechos durante proceso, el valor agregado porcentual, el tiempo de entrega, el inventario de trabajo en proceso y la distancia recorrida por los componentes, al obtener la valoración correspondiente para detectar los puntos que requieren de una acción de mejora para incrementar la productividad y la calidad en el servicio al cliente de las empresas. También [10] mencionan que el VSM proporciona la facilidad de proyectar las ganancias estimadas en diferentes escenarios al elaborarse mapas de estado futuros, con el fin de seleccionar el escenario más conveniente sin correr riesgos en la práctica para mejorar la eficacia en general. [12] consideran que el VSM se ha desarrollado como una teoría sistemática que puede aplicarse en varios escenarios para identificar el desperdicio y eliminarlo del proceso, pero las especificaciones de dichos escenarios pueden afectar la aplicabilidad y la efectividad de la implementación de VSM, al igual que explican [10]. Por lo tanto, las acciones en VSM deben centrarse en los tipos de métricas y técnicas Lean, así como en la forma en que las soluciones Lean recomiendan su implementación con respecto al flujo de valor [12]. Una de las razones por las que una empresa no tiene éxito al tratar de implementar la herramienta Lean Manufacturing (LM) se debe al hecho de que no se tiene visión de los resultados, por lo que el VSM puede representar una visión a priori, sin embargo, la revisión de la literatura reveló que tiene varios defectos, por lo cual la simulación se puede utilizar junto con el VSM para brindar resultados más completos. La simulación permite evaluar los escenarios con los elementos que se modifiquen, eliminen o agreguen en el estado actual para el estado futuro, con el propósito de obtener mejoras y proporcionar mayor información al tomador de decisiones [6]. [13], con base al análisis de un caso de estudio de la industria de la India, exponen que se considera al VSM una técnica LM, en el que concluyen que es necesario realizar el análisis de costo-beneficio de los cambios propuestos sobre el VSM futuro, además de que mencionan que dicho análisis casi no se ha aplicado en el área de administración de proveedores. También concluyen que el efecto de los cambios realizados en el estado actual durante la implementación de VSM aún no se ha reflejado en el factor humano.

El documento está conformado por cinco apartados que muestran el contenido y desarrollo del trabajo. El primer apartado es la introducción sobre los antecedentes de la metodología aplicada. El segundo apartado describe la metodología a seguir al caso de estudio en cuestión: VSM y simulación usando el software Arena Ver. 14.0. En el tercer apartado se detalla el objeto de estudio y se muestra la aplicación de VSM a la situación actual. El cuarto apartado presenta el análisis de resultados que se obtuvo con el VSM del estado actual y futuro, así como la simulación de las alternativas propuestas. Finalmente, en el apartado cinco se exponen las conclusiones generadas con la aplicación del caso de estudio mencionado.

### 14.2. Metodología de solución

Los pasos a seguir para el análisis del caso de estudio se muestran en la Figura 14.1.



**Figura 14.1:** Etapas de análisis del caso de estudio

Las entradas al análisis del estado actual están dadas por los datos del caso de estudio (proporcionados por personal de la empresa), los cuales permiten el mapeo de la situación actual y el diseño del VSM inicial, este último sirve como entrada al modelo de simulación diseñado que muestra el escenario actual del proceso. Posteriormente, se identifican los puntos a fortalecer y se realiza nuevamente el mapeo de las alternativas (VSM mejorado), para analizar los nuevos parámetros en la situación futura, el nuevo VSM sirve como entrada para generar la simulación de las alternativas de mejora y proporcionar, finalmente, los resultados obtenidos del comportamiento de la cadena de suministro mejorada.

Value Stream Map (VSM) también conocido como gráficas del flujo de valor, herramienta utilizada para conocer a profundidad los procesos en la cadena de suministro. El VSM permite identificar ampliamente las actividades que no agregan valor al proceso, del mismo modo permite conocer el tiempo asociado a dichas actividades. Un flujo de valor consiste en: **i.** Un diagrama de las todas las actividades en el proceso, incluidas las actividades sin valor agregado, que hacen que la transformación de información y materiales en bruto se convierta en algo (producto terminado), que el cliente está dispuesto a pagar. **ii.** Comunicación (información) a lo largo de la cadena de suministro con respecto a pedidos y previsiones de pedidos. **iii.** Una red de procesos y operaciones a través de la cual los materiales y la información fluyen, en tiempo y espacio, a medida que se transforman.

La literatura muestra que las medidas de desempeño de un VMS son:

1. **Tiempo Takt:** Es un indicador de la frecuencia de compra del cliente, el cual determina qué tan rápido debe ejecutarse un proceso para satisfacer la demanda del cliente.
2. **Tiempo de ciclo individual:** Es el tiempo estándar asociado a cada operación del proceso.
3. **Tiempo de ciclo total (Lead Time de fabricación):** Es el tiempo que duran todas las operaciones, se calcula sumando los tiempos de ciclo individuales.
4. **Tiempo de previsión de las necesidades del cliente (Lead time GAP):** En este intervalo de tiempo es cuando se deben realizar las previsiones respecto a los puntos y cantidades de pedido futuras. La magnitud del GAP es directamente proporcional con los errores en las previsiones.
5. **Tiempo de entrega logística (Lead Time Logistic):** Comprende el intervalo de tiempo que tarda la organización desde que se abastece de materias primas, materiales e insumos hasta que el producto terminado es distribuido al cliente.

En este trabajo solo es considerado el Tiempo Takt como medida de desempeño del proceso, el cual es calculado de la siguiente manera:

$$\text{Tiempo Takt} = \frac{\text{Tiempo disponible}}{\text{Demanda}} \quad (14.1)$$

Dónde: *Demanda* es la cantidad de unidades de trabajo requeridas por un cliente y, *Tiempo disponible* es el tiempo de trabajo disponible del personal restando descansos [1].

La literatura muestra estándares para la elaboración del diagrama de flujo para analizar la cadena de suministro en estudio. Para mayor detalle de estos estándares consultar [1].

Los pasos generales para construir un VSM [1] son: **i.** Dibujar los iconos del cliente (comenzado desde la esquina superior izquierda), proveedor y control de producción. **ii.** Ingresar la demanda. **iii.**

Dibujar todos los procesos (entrada y salida). **iv.** Listar todos los atributos del proceso. **v.** Dibujar tiempos de cola entre procesos. **vi.** Dibujar todas las comunicaciones que ocurren dentro del flujo de valor. **vii.** Dibujar iconos de empujar o tirar para identificar el tipo de flujo de trabajo. **viii.** Completar el mapa con otros datos y calcular el Tiempo Takt.

Las herramientas de simulación permiten mostrar la situación actual de los problemas que se desean resolver, diseñando, desarrollando y probando alternativas de solución a menor costo. Para este trabajo se hace uso del software Arena Versión 14.0 (Systems Modelling Corporation, Rockwell Automation, 2012), el cual nos permite visualizar los resultados de las alternativas de mejoras al caso de estudio que se analiza.

Arena es un software que brinda un entorno de trabajo integrado para construir modelos de simulación; proporciona las funciones necesarias para el desarrollo de una simulación exitosa (animaciones, análisis de entrada y salida de datos y verificación del modelo), es un sistema fácil de comprender, funciona sobre el lenguaje de programación para simulaciones SIMAN [9].

Arena es un software diseñado para la simulación de eventos discretos para la optimización de procesos complejos. El modelado de eventos discretos es el proceso de representar el comportamiento de un sistema complejo como una serie de eventos bien definidos y ordenados en el tiempo, para analizar el comportamiento del proceso o sistema a lo largo de un período o tiempo definido [3].

Otra herramienta cuantitativa utilizada en este trabajo es el análisis de pronósticos para la determinación de la demanda. Existen varios métodos de pronósticos que nos permiten identificar el comportamiento de la demanda, en este caso de estudio el método de pronósticos utilizado es el de descomposición multiplicativa, con un patrón estacional de 6 meses, a través del uso del software Minitab Versión 17, (Minitab Inc., 2017) [5].

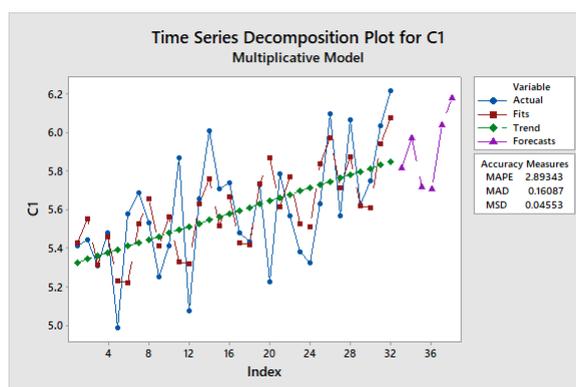
### 14.3. Caso de estudio

El objeto de estudio de este trabajo es una empresa dedicada a la elaboración de productos artesanales (rama: cerámica de alta temperatura). La empresa desarrolla sus actividades de producción en el Estado de Oaxaca, México, siendo el personal administrativo de la empresa quien proporcionó la información que se muestra en los siguientes párrafos:

En el año 2018 se reportó un total de 28,858 piezas vendidas, que representa un total de 6,922,771 pesos de 75 artículos que se producen, lo anterior indiscutiblemente gracias a la estrategia competitiva que la empresa ejecuta, la cual se centra en fusionar las técnicas artesanales y los avances tecnológicos para cerámica de alta temperatura.

Debido a que se cuenta con una variedad de productos, se realizó un análisis ABC para identificar los productos de mayor venta y centrar el comportamiento de la demanda sobre estos productos. El análisis ABC se puede categorizar con varios indicadores, la más usada es la que se realiza con el flujo de efectivo de las ventas realizadas anualmente [8]. Al ejecutar el análisis ABC de las ventas totales en 2018 de la empresa, se determina que 25 artículos son clasificación A representando el 80.85 % de las ventas con 33 % de artículos, 15 artículos clasificación B con 13.86 % de las ventas para el 18 % de artículos y, 35 artículos clasificación C con el 5.29 % de las ventas para 47 % de artículos.

Para llevar a cabo el pronóstico fue necesaria la revisión y análisis de los datos de las ventas de 31 meses anteriores, lo que permitió la identificación del volumen general de ventas, la tendencia y patrón estacional (Figura 14.2). Dado que la serie de tiempo cuenta con tendencia y patrón estacional, el método que se utiliza en Minitab para realizar el pronóstico es el de “Descomposición – Multiplicativo”, este método proporciona un error del 2 % y un mayor ajuste comparado con los demás métodos que Minitab permite realizar (Figura 14.2).



**Figura 14.2:** Pronóstico

Dado el volumen de ventas, la relación de producción en piezas mensual se muestra en el pronóstico de piezas a producir para los próximos seis meses, ambos pronósticos se muestran en la Tabla 14.1.

**Tabla 14.1:** Pronóstico de piezas a producir y ventas en un periodo de 6 meses

| Año  | Mes        | Pronóstico de piezas | Pronóstico de ventas |
|------|------------|----------------------|----------------------|
| 2019 | Junio      | 1699                 | \$653,611.97         |
| 2019 | Julio      | 4624                 | \$943,256.92         |
| 2019 | Agosto     | 4398                 | \$524,565.83         |
| 2019 | Septiembre | 4441                 | \$509,448.16         |
| 2019 | Octubre    | 8838                 | \$1,104,358.30       |
| 2019 | Noviembre  | 3355                 | \$1,523,456.30       |

La importancia de cubrir la demanda del cliente es uno de los objetivos de la empresa. Para ello, es importante identificar los tiempos de proceso y capacidad de producción de la empresa, a continuación se detalla su proceso de producción.

De forma general el proceso de producción comienza con el prensado de la pasta para formar la pieza, la cual después se tiene que secar durante cierto tiempo. Al terminar su secado, la pieza es enviada a retornar y de nuevo se deja secando, cuando termina el segundo secado se lija y pule la pieza para realizar un horneado a nivel sancocho, al sacar las piezas del horno son enviadas al almacén de Work In Process (WIP), donde permanecen en espera hasta que se genera una orden de compra con las características específicas de diseño y color, entonces son selladas y esmaltadas para hornearse en el horno de vidriado y ser enviadas finalmente, al almacén de producto terminado para su entrega.

Para iniciar el análisis VSM y el cálculo del tiempo Takt para el objeto de estudio, este último se computó hasta el almacenamiento del producto en proceso, aplicando una estrategia de demanda Push implementada hasta ese punto de la cadena de producción, después del almacén WIP las piezas son terminadas acorde a las especificaciones de diseño del cliente, donde el proceso cambia de demanda Push a demanda Pull.

Para efectos del desarrollo de VSM del caso de estudio se consideran los siguientes datos, los cuales fueron proporcionados por personal de la empresa: se cuenta con 9 horas al día de mano de obra disponible de lunes a viernes, sábados 3.5 horas durante 22 días al mes, con 1 hora de descanso y 11 trabajadores disponibles. La distribución del personal en las actividades está determinada de la siguiente forma: Prensado 1 persona, Retorneado 1 persona, Lijado 2 personas, Pulido 2 personas, Horneado 1 persona, Sellado 1 persona, Esmaltado 2 personas y Horneado de vidrio 1 persona.

14 Aplicación de VSM con simulación

El número de piezas promedio producidas al mes es de 4,000 piezas.  
 Cálculo de la demanda diaria:

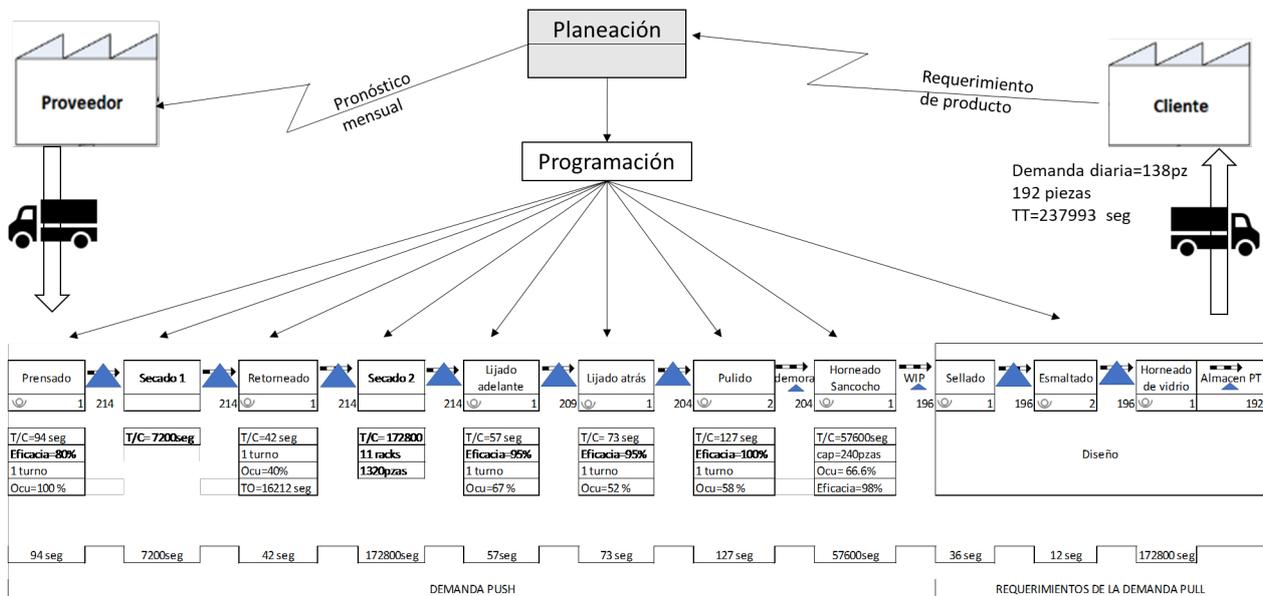
$$\text{Demanda diaria} = \frac{4000 \text{ (piezas/mes)}}{22 \text{ (días/mes)}} = 182 \text{ (piezas/día)}$$

Cálculo del Tiempo Takt:

$$\text{Tiempo Takt} = \frac{25200 \text{ (seg/día)}}{182 \text{ (piezas/día)}} = 139 \text{ (seg/piezas)}$$

Maquinaria disponible: 2 hornos de vidriado, 1 horno de sancocho, 2 máquinas de prensado, 11 racks con una capacidad de 120 piezas cada uno y 1 máquina de retorneado.

Con base en los datos anteriores se efectuó el mapeo del proceso de producción de artículos de cerámica a través del método VSM (estado actual), suponiendo un nivel de inventario inicial de cero piezas; como se mencionó anteriormente, el análisis de los procesos se realizó hasta el Horneado de Sancocho debido a que las piezas quedan en espera de una orden de compra, como se muestra en la Figura 14.3.



VSM-Estado actual

Figura 14.3: VSM sistema actual

Los resultados del cálculo del Tiempo Takt muestran que para satisfacer la demanda del cliente, cada pieza se debe producir en 139 seg. El análisis VSM muestra que actualmente las piezas se realizan en un tiempo de 1,239.5 seg, por lo que es necesario realizar algunas mejoras en los procesos y en la utilización de los recursos.

La capacidad aproximada de la máquina de presando es de 192 piezas, por lo que una propuesta de mejora es la integración de una segunda máquina de prensado, la cual está fuera de uso actualmente. El horno para la actividad de sancocho de las piezas no puede comenzar su proceso hasta no completar su capacidad (240 piezas), cabe mencionar que los hornos requieren de 18 horas para terminar su proceso.

El área de secado 2 requiere de 24 a 48 horas de secado, es un proceso que se requiere forzosamente, sin embargo, ésta retrasa en gran medida el proceso total, por lo que se propone integrar una máquina de secado que reduce el tiempo de secado a 4 horas.

Se puede observar en los datos del VSM de la Figura 14.3, que la ocupación de las áreas de lijado y pulido están subutilizadas, debido a que el proceso de secado es muy largo. Al integrar al proceso, la máquina de secado 2 se aumenta la ocupación de estas áreas como se muestra en el VSM mejorado de la Figura 14.4.

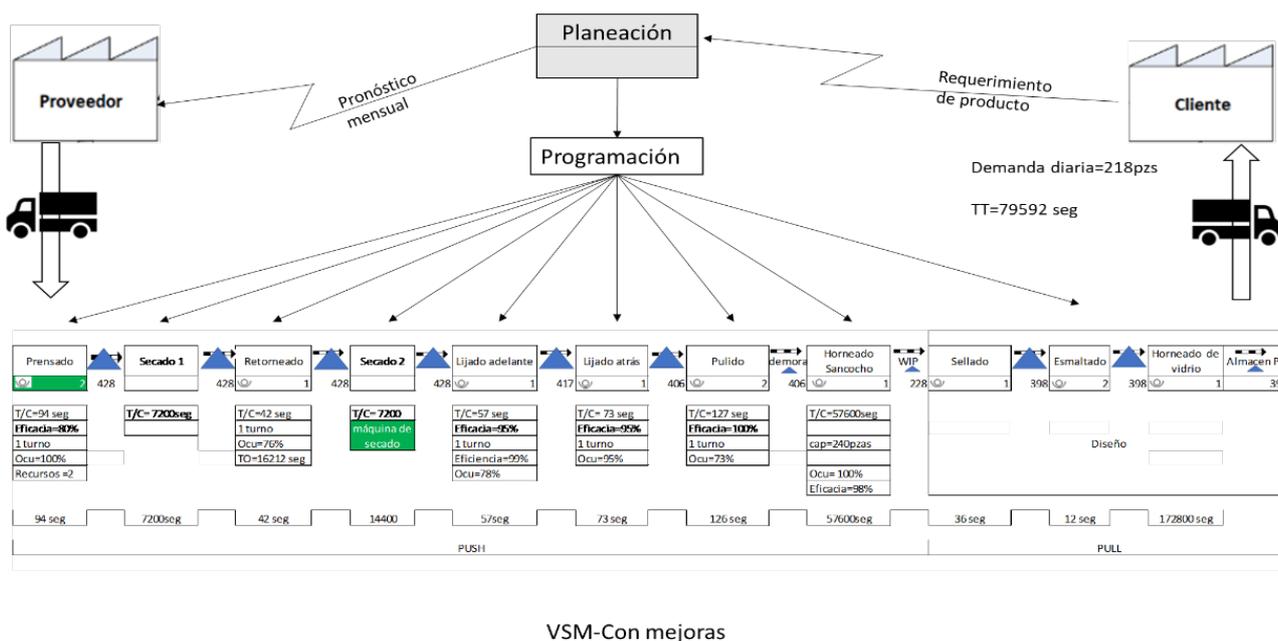


Figura 14.4: VSM sistema mejorado

## 14.4. Experimentación computacional

Para la representación abstracta de la realidad del sistema de producción que se muestra en el VSM Figura 14.3, se realizó la construcción y ejecución de un modelo de simulación utilizando el software Arena Versión 14.0 (Systems Modelling Corporation, Rockwell Automation), instalado en una computadora personal con procesador AMD Ryzen y 12 Gb en RAM, los tiempos de solución observados en general son de 1 minuto con 50 segundos. Cabe mencionar que se realizaron dos modelos de simulación: el primer modelo representa la situación actual y es validado por la empresa, y el segundo modelo donde se incorporan las mejoras presentadas en la Figura 14.4, con el objetivo de cubrir la demanda pronosticada y mejorar la utilización de los recursos.

Para la generación de escenarios en ambos modelos se está considerando un inventario inicial de cero piezas. Los resultados del primer modelo para el período de un mes muestran una producción total de 4,320 piezas (Tabla 14.2), el tiempo promedio de proceso es de 16.7 días y la utilización de los recursos se muestran en la Tabla 14.3, en donde se puede observar que en las áreas de pulido 1 y 2, y torno 1 y 3 existe una subutilización de recursos cercana al 50%. Avanzando en nuestro razonamiento y generando los escenarios necesarios para cubrir la demanda, en el segundo modelo se incorporó una prensa adicional, con las mismas características a la utilizada actualmente, una máquina de secado más (para el área de secado 2) que reduce el tiempo de proceso a 4 horas, y un horneado adicional de 18

horas al mes para el horno de sancocho. Los resultados obtenidos incorporando las mejoras muestran una producción total de 4,800 piezas con un tiempo total de proceso de 16.2 días, los resultados del periodo se presentan en la Tabla 14.2, así como la utilización de los recursos en la Tabla 14.3.

**Tabla 14.2:** Escenarios para satisfacer la demanda pronosticada

| <b>Sistema Actual</b>   |              |              |               |                   |                |                  |
|-------------------------|--------------|--------------|---------------|-------------------|----------------|------------------|
| <b>Mes</b>              | <b>Junio</b> | <b>Julio</b> | <b>Agosto</b> | <b>Septiembre</b> | <b>Octubre</b> | <b>Noviembre</b> |
| Producción Actual       | 4320         | 4320         | 4320          | 4320              | 4320           | 4320             |
| Demanda Pronosticada    | 1699         | 4624         | 4398          | 4441              | 8838           | 3355             |
| Inventario en Almacén   | <b>2621</b>  | <b>2317</b>  | <b>2239</b>   | <b>2118</b>       | <b>-2400</b>   | <b>965</b>       |
| Inventario Inicial      | 0            |              |               |                   |                |                  |
| <b>Sistema Mejorado</b> |              |              |               |                   |                |                  |
| Producción Actual       | 4800         | 4800         | 4800          | 4800              | 4800           | 4800             |
| Demanda Pronosticada    | 1699         | 4624         | 4398          | 4441              | 8838           | 3355             |
| Inventario en Almacén   | <b>3101</b>  | <b>3277</b>  | <b>3679</b>   | <b>4038</b>       | <b>0</b>       | <b>1445</b>      |
| Inventario Inicial      | 0            |              |               |                   |                |                  |

**Tabla 14.3:** Utilización de los recursos Sistema Actual y Sistema Mejorado

| <b>Recurso</b>    | <b>Utilización (Sistema actual)</b> | <b>Utilización (Sistema mejorado)</b> |
|-------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| Horno 1           | 0.92                                | 0.95                                  |
| Prensa 1          | 1.00                                | 1.00                                  |
| Pulidor 1         | 0.58                                | 1.00                                  |
| Pulidor 2         | 0.58                                | 1.00                                  |
| Torno 1           | 0.40                                | 0.73                                  |
| Torno 2           | 0.67                                | 0.72                                  |
| Torno 3           | 0.52                                | 0.76                                  |
| Máquina de secado |                                     | 0.78                                  |
| Prensa 2          |                                     | 0.95                                  |

Al comparar la situación actual con el escenario de mejora, se observa que en primer lugar se cumple con la demanda pronosticada, los hornos tanto el de salida del producto como el de secado están cercanos al 100 % de su utilización, al igual que las prensas se aumentó en 15 % la utilización de área de pulido, un 36 % en el torno 1, un 11 % en el torno 2 y un 41 % en el torno 3.

Como se muestra en la Tabla 14.2, existe un exceso de inventario al final del periodo, el cual para estabilizarlo en el periodo siguiente, es necesario no realizar un horneado adicional de 18 horas al mes para el horno de sancocho, lo cual equivale a una producción de 4,560 piezas al mes, si el nivel de demanda se mantiene como el pronosticado en el periodo analizado.

## 14.5. Conclusiones

El objetivo principal del trabajo es presentar alternativas de mejora al proceso de producción de la empresa objeto de estudio, lo anterior a través del uso de métodos cuantitativos y herramientas de simulación que permitan representar los resultados de las mejoras a menor costo.

Con base en el análisis del caso de estudio descrito en el apartado tres, podemos concluir que el uso de métodos cuantitativos y de herramientas de simulación en el análisis de procesos en la cadena de suministro, permiten identificar áreas de oportunidad a las empresas, logrando optimizar el uso de sus recursos y mejorando su nivel de servicio al clientes.

El análisis realizado a través del VSM y el modelo de simulación desarrollado para representar la situación actual del caso de estudio, permite identificar claramente las áreas que es necesario fortalecer para satisfacer la demanda del cliente, así como identificar el desempeño de los recursos con los que cuenta la empresa y procurar utilizar éstos al máximo al proponer las alternativas de mejora.

Con las alternativas de mejora propuestas descritas en el VSM modificado, así como los resultados obtenidos del modelo de simulación aplicando las mejoras, podemos concluir que el desempeño de los recursos se incrementa y por consecuencia, un decremento del Tiempo Takt en el proceso de producción analizado permite incrementar el nivel de servicio al cliente, logrando el objetivo propuesto del trabajo que se presenta.

## Referencias

- [1] Ray Bert. Value stream management for the lean office: Eight steps to planning, mapping, and sustaining lean improvements in administrative areas. *Civil Engineering*, 73(10):82–82, 2003.
- [2] Jaiprakash Bhamu, JV Shailendra Kumar, and Kuldip Singh Sangwan. Productivity and quality improvement through value stream mapping: a case study of indian automotive industry. *International Journal of Productivity and Quality Management*, 10(3):288–306, 2012.
- [3] A. Bradley. *USER'S GUIDE*,. Allan Bradley, 2010.
- [4] Hans De Steur, Joshua Wesana, Manoj K Dora, Darian Pearce, and Xavier Gellynck. Applying value stream mapping to reduce food losses and wastes in supply chains: A systematic review. *Waste management*, 58:359–368, 2016.
- [5] P. Grima and P. Hall. Introducción a minitab 17, 2010.
- [6] Anand Gurumurthy and Rambabu Kodali. Design of lean manufacturing systems using value stream mapping with simulation: a case study. *Journal of manufacturing technology management*, 22(4):444–473, 2011.
- [7] Nirav Patel, Naresh Chauhan, P Trivedi, Nirav Patel, Naresh Chauhan, and Mr Parthiv Trivedi. Benefits of value stream mapping as a lean tool implementation manufacturing industries: A review. *IJIRST–International Journal for Innovative Research in Science & Technology*, 1(8):53–57, 2015.
- [8] A Ravi Ravindran and Donald P Warsing Jr. *Supply chain engineering: Models and applications*. CRC Press, 2016.
- [9] Rodrigo Wadnipar Rojas, Alfonso Mancilla Herrera, Aldo Fábregas Ariza, and Carlos Paternina Arboleda. Simulación de sistemas productivos con arena (ebook), 2003.
- [10] Praveen Saraswat, Manoj Kumar Sain, and Deepak Kumar. A review on waste reduction through value stream mapping analysis. *International Journal of Research*, 1(6):200–207, 2014.
- [11] Ibon Serrano Lasa, Carlos Ochoa Laburu, and Rodolfo de Castro Vila. An evaluation of the value stream mapping tool. *Business process management journal*, 14(1):39–52, 2008.

- [12] Wenchi Shou, Jun Wang, Peng Wu, Xiangyu Wang, and Heap-Yih Chong. A cross-sector review on the use of value stream mapping. *International Journal of Production Research*, 55(13):3906–3928, 2017.
- [13] Bhim Singh, Suresh K Garg, and Surrender K Sharma. Value stream mapping: literature review and implications for indian industry. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 53(5-8):799–809, 2011.
- [14] Seyed Mojib Zahraee, Ahmad Hashemi, Ahmed Ali Abdi, Ataollah Shahpanah, and Jafri Mohd Rohani. Lean manufacturing implementation through value stream mapping: A case study. *Jurnal Teknologi*, 68(3):119–124, 2014.

# 15 Implementación de la metodología DMAIC en una empresa metalmeccánica

Jesús Guillén,\*<sup>1</sup>, Ann Wellens<sup>1</sup>

1 – Facultad de Ingeniería, UNAM-MÉXICO

\*e-mail: jj\_19@live.com, wann@unam.mx

En la actualidad, el tema de la calidad en todas las industrias es un factor muy importante, para lograr posicionarse en los primeros lugares de su mercado y ser líderes en sus ramos. Por esta razón es importante adoptar una estrategia de mejora continua, que es fundamental para lograr alcanzar el mayor aprovechamiento de todos los recursos y ofrecer un mejor producto o servicio al cliente. Este artículo pone en práctica la metodología DMAIC para disminuir el porcentaje de defectos en una empresa mexicana dentro de la rama de la metalmeccánica. Con la implementación de la metodología DMAIC en una empresa metalmeccánica, se logró disminuir la variabilidad de sus procesos y aumentar el aprovechamiento de sus recursos, obteniendo un mejor manejo de material, un proceso estable y la identificación oportuna de defectos con el fin de evitar procesos innecesarios que aumentan costos en sus líneas de producción.

*Palabras clave:* Mejora continua; Seis sigma, Calidad; Procesos.

## 15.1. Introducción

Seis sigma es una metodología de gestión de calidad basada en la disminución de la variabilidad de los procesos; consta de 5 etapas que son definir, medir, analizar, mejorar y controlar (DMAIC) y se basa en el ciclo de calidad PHVA (planear, hacer, verificar y actuar), propuesto por Deming. La metodología aplica en forma estructurada una serie de herramientas y técnicas a un problema identificado por la empresa para llegar a soluciones viables. Los resultados pueden minimizar o eliminar el problema, poniendo a la organización en un puesto más competitivo. La empresa en donde se aplicó la metodología es dedicada al giro metalmeccánico y los defectos pueden aparecer mayormente en el área de fundición y de maquinado. El International Atlas of Casting Defects ayuda a clasificar e identificar las causas de defectos de fundición que suelen aparecer con más frecuencia en las piezas fundidas y que tienen su origen en partes del proceso indebidamente controladas, principalmente en el manejo de material y en los procesos de mecanizado. Para este trabajo se describirán los defectos con los nombres que la empresa le ha asignado a cada uno de ellos. Estos son:

- *Poros*: son burbujas esféricas o aplanadas de superficie lisa, provocadas por gases disueltos en el metal que escapan en el acto de la solidificación.
- *Golpe*: es un defecto presentado en la parte superior del tourillón de la pieza este genera una zona aboyada, este se detecta de forma visual ya que deforma la circunferencia de la pieza.
- *Posición*: se presenta en el proceso de barrenado y este defecto es la posición en donde se deben realizar los barrenos, esto quiere decir que la posición de donde fue mecanizada no es la correcta de acuerdo con las medidas del dibujo de la pieza

- Chueca: es el nombre que se le da al defecto cuando el clip de la parte trasera de la pieza esta chueco, esto afecta al momento de ensamblar ya que actúa como seguro.
- Distancia: este concepto es otorgado al defecto por una medida incorrecta que tiene la pieza desde su la base hasta la ranura, esta medida está dada por el dibujo y éste es generado por la variabilidad que existe en la máquina ranuradora.
- Ajustes: Este defecto es descrito así, ya que, son las piezas que son usadas para poder ajustar las máquinas de barreno, ranura y machuelo para poder establecer las medidas correctas en las que la máquina.
- Pasa no go: este defecto es presentado al mecanizar la pieza en la máquina barrenadora, es cuando el pin no go, que es el que tiene una medida superior establecida en la tolerancia del dibujo pasa a través de los barrenos, esto quiere decir que el barreno tiene un diámetro mayor al establecido en las especificaciones.

Se decidió aplicar la metodología Seis Sigma en este trabajo por las razones siguientes: a) está orientada a la reducción de defectos; b) existe compromiso por parte de la alta dirección y el personal involucrado y c) se impactará de manera importante en el aspecto financiero y de la calidad del producto.

## 15.2. Metodología

Se llevó a cabo la implementación de la metodología DMAIC en una empresa metalmeccánica, que tenía problemas en el área de producción, para ser más específicos en el área de maquinado, con la finalidad de mejorar los procesos realizados en la empresa (Figura 1).

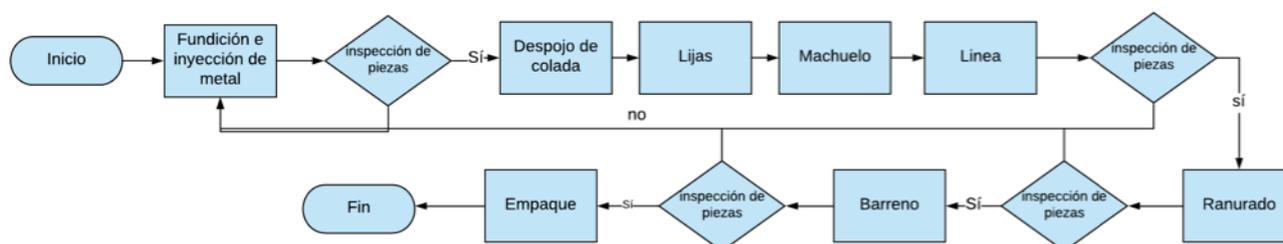


Figura 15.1: Metodología.

## 15.3. Definir

Se identificó cual fue el proyecto a partir de una entrevista con el gerente, en la que se propuso aplicar la metodología a la línea del base bracket, dado que presentó mayores problemas generando reclamos de clientes, inconformidades e incumplimiento de piezas por defectos de calidad. Se observó el proceso para detectar las fallas, conocer las operaciones que se llevan a cabo en cada una de las áreas, identificar el movimiento de las piezas, el comportamiento cotidiano de la gente y verificar los problemas expresados con anterioridad, para seleccionar de manera adecuada el problema a tratar. La figura 2 muestra el flujo del material y las actividades del proceso. Cabe mencionar que el ranurado y

barrenado ambos son necesarios en el proceso; sin embargo, la líder de la línea decide a qué operación mandar cada pieza primero.



**Figura 15.2:** Diagrama de flujo de base bracket.

### 15.3.1. Medir

En esta fase se analizaron los registros históricos de la empresa, para contar con datos cuantitativos sobre la producción y los defectos, así como su evolución en el tiempo. Se reunió la información en una tabla, que muestra los defectos y la cantidad que se presentó de cada uno de ellos; con esta información construyó un diagrama de Pareto, para separar los errores más repetitivos y analizar los más importantes.

### 15.3.2. Analizar e implementar

Se hizo un análisis sobre el proceso en su flujo y layout de la planta para buscar una mejora sobre el, para así disminuir los movimientos innecesarios y cruces de material, evitando accidentes. También se analizó el movimiento de máquinas para tener un mejor orden de los procesos con una oportuna detección de defectos, ahorrando costos por operaciones que no le agregan valor. Se analizó cada defecto, se buscó encontrar la o las actividades que estaban causando la falla en la pieza o el proceso mediante un diagrama de Ishikawa; se utilizó el método de las 6 M's para encontrar las posibles causas-raíz del defecto a estudiar. Se buscaron soluciones para cada causa encontrada y estas propuestas de mejora fueron implementadas en el proceso.

### 15.3.3. Controlar

En esta fase se buscó estandarizar las mejoras implementadas para asegurar que se mantuvieran; se supervisó que los nuevos métodos se llevaran a cabo y se buscó documentarlos con una verificación continua. El reto de esta etapa fue que las mejoras superaran la prueba del tiempo.

## 15.4. Resultados

### 15.4.1. Definición del problema

Entrevistas revelaron que los problemas más importantes tuvieron en común el mal flujo de material: éste causaba confusión en los procesos de maquinado, porque no se tenía bien definido de dónde llegaba el material y qué proceso era el que continuaba. Por este problema también había una alta probabilidad de que se mezclaran materiales de diferentes procesos, de forma que a algunas piezas les podría faltar alguna operación. Esto ocasionaba la necesidad de una inspección extra antes de mandar la pieza a pintura. Asimismo, la decisión de mandar a la pieza al ranurada o barrenada dependía de qué proceso necesitará material o no estuviera parado por fallas de la máquina. Se observó que el flujo del proceso era inadecuado y que generaba movimientos excesivos del material, confusión de su movimiento, así como mezclas de material en diferentes estados de procesamiento. Se identificó que en el proceso de ranura se generaba un rechazo de piezas por el defecto de *poro*; como esta detección ocurría al final de la línea, las piezas a rechazar ya habían pasado por diferentes operaciones del proceso, generando costos innecesarios.

### 15.4.2. Medición de los defectos

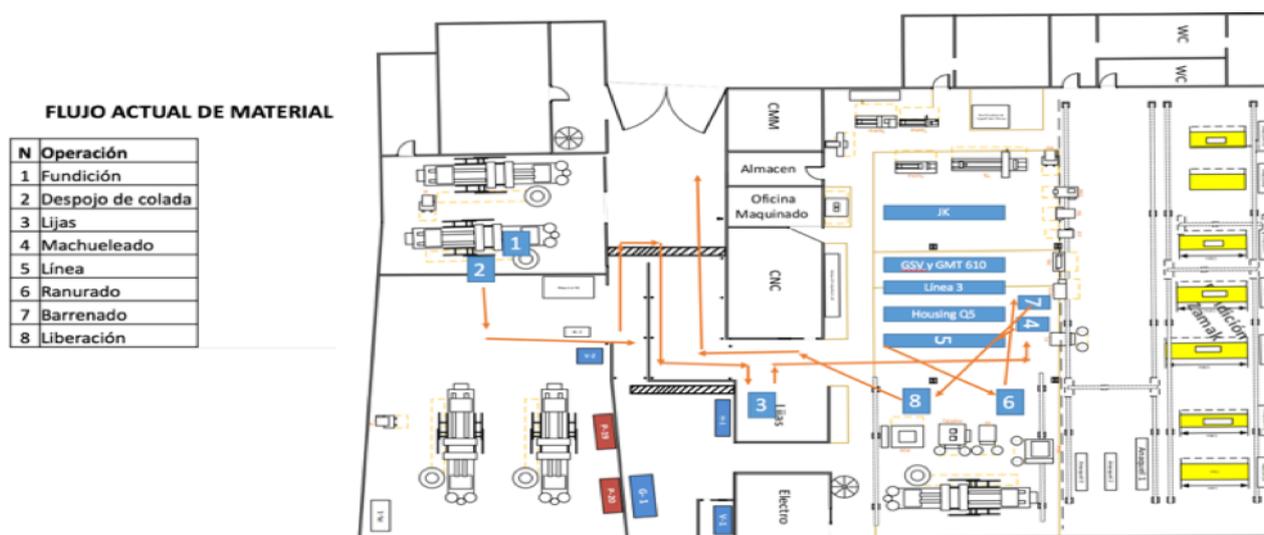
La recopilación de datos históricos ayudó para conocer cómo se había comportado el proceso a través del tiempo, tanto en el grado de alcance del objetivo de producción de la línea, como en los defectos generados en cada operación del proceso. La Tabla 1 muestra los incidencia de los 10 defectos principales.

La información de los defectos permitió la construcción de un diagrama de Pareto, identificando como principales defectos: *Poro*, *Golpe*, *Posición*, *Chueca*, *Distancia*, *Ajustes* y *Pasa no go*, y sirvió para la evaluación posterior de las mejoras implementadas.

| Defecto    | Poro | Golpe | Posición | Chueca | Distancia | Pruebas /Ajustes | Pasa NoGo | Ajuste | Barreno grande | Clip Chueco |
|------------|------|-------|----------|--------|-----------|------------------|-----------|--------|----------------|-------------|
| Agosto     | 37   | 296   | 294      | 601    | 206       |                  | 151       |        | 65             |             |
| Septiembre | 2304 | 1517  | 838      | 333    | 592       | 467              | 162       | 306    | 228            | 273         |
| Total      | 2341 | 1813  | 1132     | 934    | 798       | 467              | 313       | 306    | 293            | 273         |

### 15.4.3. Análisis del proceso

Se usó el layout de la planta para analizar los movimientos de las piezas; se tomaron en cuenta las escalas de cada uno de los equipos y las áreas, para poder realizar el diagrama de spagueti (Figura 3). Se logró ver que durante el flujo de la pieza Q5 existen muchos cruces entre actividades. Estos pueden tener como consecuencia la contaminación de material, accidentes del personal si estos se realizan simultáneamente, la toma de decisión en los últimos procesos, y, como consecuencia de todos los anteriores, una falta de calidad. De acuerdo con los defectos previamente definidos, se observó que el defecto de *poro* era el más importante. Este defecto impacta directamente en la productividad de las las piezas trabajadas, ya que la única forma de detectarlo es ranurando la pieza, siendo esta una de las últimas operaciones. Además, no existía una comunicación de los operadores de las últimas operaciones con el supervisor de fundición para evitar su aparición.



**Figura 15.3:** Diagrama de spaghetti en layout de la planta.

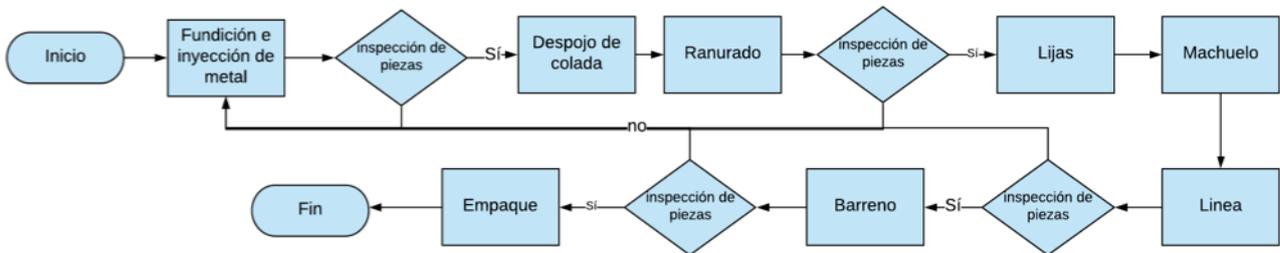
#### 15.4.4. Análisis del proceso

El siguiente defecto que se analizó mediante el diagrama de Ishikawa fue el *golpe*. Las causas-raíz encontradas fueron:

1. La forma de trasladar la pieza en la línea de producción. Se observó que en la línea de producción existían pequeños transportes de la pieza entre las diferentes estaciones, provocando que las piezas se golpearan entre ellas.
2. Una de las operaciones de la pieza era limar la rebaba que quedaba en la parte superior del tourillón; en ocasiones, se limaba de más la pieza, generándole una marca en ciertas operaciones posteriores.
3. Al momento de salir de la máquina de inyección, por la alta temperatura con la cual salía la pieza, el metal contaba con una mayor maleabilidad; al acomodar las piezas en las tarimas para que se enfriaran, éstas tenían contacto y por la misma maleabilidad generaban con más facilidad el *golpe* en ellas.
4. Algunos inspectores de calidad no estaban capacitados adecuadamente, ni tenían un criterio uniforme sobre la aceptación o rechazo de los defectos. A pesar de contar con un gauge go, había golpes que aunque el gauge entrara en la pieza, los inspectores lo estaban desechando o había golpes que en el área de producción eran aceptados, pero que en el departamento de calidad eran rechazados.
5. El manejo de material en proceso era a través de cajas de plástico, sin ninguna protección dentro de ella durante todo el proceso, facilitando el golpeteo entre las piezas acomodadas. Asimismo, la forma de acomodo de las piezas para su traslado estaba dejando la parte del tourillón expuesta, y al apilarse las cajas se aplastaban las piezas de arriba.

### 15.4.5. Implementación de las mejoras

En el análisis se observó que el mayor defecto es el *poro*, y que este defecto únicamente se detecta al momento de ranurar la pieza; las piezas con este defecto son rechazadas y fundidas de nuevo. Como el ranurado es una de las últimas actividades, el no detectar este defecto oportunamente, genera costos de procesamiento innecesarios, por lo que se propuso un nuevo flujo del proceso (Figura 4).



**Figura 15.4:** Nuevo diagrama de flujo.

Se movió la máquina de ranurado hacia adelante en el proceso para detectar oportunamente el material con *poro* y evitar que éste avanzara a todos los demás procesos, además de evitar la contaminación de material por la cercanía con la mesa de trabajo y de la machueledora, de disminuir los cruces de personal y por consiguiente posibles accidentes y de simplificar la toma de decisiones de los operadores en cuanto a primero barrenar o primero ranurar la pieza. El segundo defecto más importante fue el *golpe*. La principal causa fue el inadecuado acomodo de las piezas en las cajas; la solución propuesta fue acomodar las piezas de tal forma que el torillón no quedara expuesto y que no tuvieran movimiento dentro de la caja. Cabe mencionar que las cajas contienen las mismas 80 piezas que con el procedimiento anterior. Por último, se cambió la mesa de trabajo en estaciones por una mesa lineal, en la cual los operadores tienen que deslizar la pieza a la siguiente operación evitando dejar caer las piezas dentro de las cajas, como lo hacían anteriormente.

### 15.4.6. Medidas de control del proceso

Como primera medida se estandarizó el nuevo acomodo de piezas y se capacitó a todo el personal sobre esta nueva práctica. Esta actividad fue de las más complicadas, ya que muchos operadores interactuaban con las piezas. Por otro lado, en la línea de maquinado se les explicó a la líder y operadores las ventajas de tener una mesa lineal y la razón por la cual se debía deslizar la pieza y no arrojarla. Se supervisó que los operadores no tuvieran cajas entre estaciones para acumular el material y que hubiera un flujo continuo de material en la línea. Para poder controlar el flujo se capacitó e informó a cada uno de los procesos el nuevo flujo que se tendría y se hizo responsable a la líder de línea el estar supervisando constantemente el movimiento de material para seguir el nuevo orden establecido; se colocaron tarjetas viajeras en las cajas de traslado de material, en donde los líderes de proceso agregan su firma cuando haya pasado por su proceso, para poder identificar por qué operaciones has pasado las piezas de esa caja. Esto ayudó para que, en caso de ser necesario interrumpir el flujo por fallas de alguna máquina, tener identificado los procesos por los que ya habían pasado las piezas para completarlos después.

## 15.5. Evaluación de resultados

Los cambios efectuados en el acomodo de las piezas, la nueva mesa de la línea y el cambio de flujo de material dio una disminución significativa en el defecto de *golpe*, aunque este defecto no se pudo eliminar, porque los movimientos siguen siendo largos y el material en algunos momentos queda estancado debido a que la máquina de fundición trabaja tres turnos por día mientras que en maquinado únicamente se trabaja un turno diario. Se observa el comportamiento del *golpe* en la figura 5; se puede ver que durante octubre y noviembre se tuvo una disminución del *golpe* por la implementación de la nueva forma de acomodo y el cambio de la mesa de trabajo. En diciembre y enero se mantuvo alto el *golpe*, porque en estos meses se realizó el inventario y se hizo limpieza en la planta generando exceso de movimientos; en febrero se empezó a observar los resultados de las mejoras implementadas. El movimiento de la máquina ranuradora en noviembre del 2017 también obtuvo resultados favorables para una detección oportuna de *poro*, como se observa en la figura 6. Además, el nuevo flujo de material quitó el último proceso que existía de liberación por parte del departamento de calidad, ayudando a que las piezas fueran entregadas de manera más rápida a almacén.



Figura 15.5: Comportamiento del *golpe* a través del tiempo.



Figura 15.6: Comportamiento del *poro* a partir de las mejoras.

## 15.6. Conclusiones

En el presente trabajo, se logró alcanzar el objetivo de identificar las áreas de oportunidad en la producción de una empresa metalmeccánica. Se confirma, con los resultados logrados, que la implementación de una metodología de mejora continua se vuelve fundamental en cualquier empresa para

## *15 Implementación de la metodología DMAIC*

aprovechar los recursos al máximo. Un buen uso de las herramientas de calidad pueden ayudar significativamente para obtener resultados benéficos, aumentando la productividad y competitividad de las empresas, sin importar el tamaño de estas.

Utilizando la metodología DMAIC es posible definir, clasificar y analizar las causas principales de los errores de un proceso, para encontrar las mejores soluciones y así evitar su reaparición. Con la ayuda de las medidas de control es posible mantener los procesos conformes y en constante mejora.

# 16 Optimización del Inventario en un Sistema de Bicicletas Compartidas

Esteban Castillo<sup>1</sup>, Edgar Possani\*<sup>1</sup>

1 – Departamento Académico de Matemáticas, ITAM, Ciudad de México.

\*e-mail: est\_92@hotmail.com, epossani@itam.mx\*

En este trabajo se presenta un modelo para optimizar el balanceo de inventario de un sistema de bicicletas compartidas. Se aplica con datos reales de Ecobici de un número específico de estaciones en la zona de Polanco de la Ciudad de México para realizar un re-balanceo estático (durante un periodo definido del día). Se define una función de satisfacción que toma en cuenta la probabilidad de hallar bicicletas disponibles y espacios libres para dejarlas en cada estación. Se optimiza una función ponderada de la satisfacción y el tiempo total de la ruta para llevar a cabo la carga y descarga con un vehículo al resolver un problema de programación lineal mixto entero. Los resultados sugieren que es posible realizar una optimización del re-balanceo de inventario en un sistema de bicicletas compartidas con mínimos recursos.

*Palabras clave:* Sistema de Bicicletas Compartidas; Optimización de Inventarios; Programación Lineal Mixta Entera; Función de satisfacción; Procesos Estocásticos.

## 16.1. Introducción

Los sistemas de bicicletas compartidas brindan una alternativa de transporte para viajes cortos con beneficios a la salud de los usuarios y al medio ambiente, a un bajo costo en infraestructura para una ciudad. Han sido implementados en más de 700 ciudades, y usualmente, son operados por los respectivos gobiernos de las ciudades correspondientes, o son otorgados a concesión a una empresa privada. El sistema consiste en diferentes estaciones, distribuidas alrededor de la zona de cobertura, donde cada usuario registrado puede tomar una bicicleta y utilizarla por tiempo limitado. Antes de finalizar el tiempo de uso, el usuario debe regresar la bicicleta a cualquier estación, de lo contrario, se incurre en una falta que puede resultar en una sanción. Cada estación tiene una capacidad limitada de bicicletas, y no requiere de empleados para su operación al contar con tecnología para el autoservicio de los usuarios. La demanda por tomar o dejar bicicletas en cada estación varía en función de la hora y ubicación de la misma, y usualmente no suelen ser iguales.

Para mejorar el servicio y la confiabilidad del sistema el administrador puede transportar bicicletas de una estación a otra durante todo el día (re-balanceo dinámico) o en un tiempo definido cuando el sistema deja de funcionar (re-balanceo estático). La disponibilidad en todo momento de bicicletas y espacios para regresarlas determina en gran medida la satisfacción de los usuarios con el sistema y su viabilidad como alternativa de transporte para el día a día. Mientras más usuarios puedan tomar o regresar una bicicleta en la estación de su elección, mayor será la confianza de éstos con el sistema, e incrementará la proporción de viajes que están dispuestos a hacer por medio de éste. Es por esto que el problema de re-balanceo de estaciones toma gran importancia para el prestador del servicio de bicicletas compartidas y para cualquier ciudad que decida implementar uno.

En [1] se estudia un problema utilizando datos del sistema *Válib* en París. Se resuelve un problema de re-balanceo estático, para minimizar el costo de traslado con un inventario objetivo por estación, sin tiempo restringido para la operación. A diferencia de ese modelo, el propuesto considera niveles de inventario para satisfacer a los clientes y optimiza una ponderación de este objetivo y el tiempo de traslado en un tiempo restringido, como se sugiere en [2] y [3]. Otra aplicación interesante al sistema de bicicletas en Singapur es [4].

## 16.2. Descripción del problema

El problema de mejorar la satisfacción de los usuarios con el sistema se puede dividir en dos sub-problemas. El primero consiste en poder estimar la satisfacción en cada estación dado un inventario inicial, con una función que considere la naturaleza estocástica de la demanda de cada estación y pueda estimarse para cualquier periodo del día. El segundo consistirá en resolver el problema de re-balanceo de inventarios de las estaciones que modelamos como un problema de programación lineal mixta entera (MILP).

Para evaluar el modelo propuesto se utilizaron datos de la colonia Polanco en la Ciudad de México. Se seleccionó esta colonia por varias razones. En primer lugar, es una zona que incluye residencias, oficinas, turismo, y comercios, lo cual permite ver todo tipo de estaciones en la muestra. Además, el sistema de Ecobici tiene mayor cobertura en zonas cercanas al centro de la ciudad, incluida la colonia Polanco. Por último, la colonia es una de las zonas más seguras de la ciudad y las distancias entre puntos son relativamente cortas, lo cual propicia que los usuarios utilicen bicicletas públicas como medio de transporte, y hace que sus estaciones sean de las más concurridas en el sistema. Observamos de un análisis preliminar de la base de datos que en los días laborales la demanda de bicicletas tiene tres picos, los cuales corresponden con la hora en que inicia una jornada laboral, la hora de la comida y la hora de salida. En un fin de semana, el número de viajes va creciendo hasta llegar a un pico a las 12:00, siendo casi nulo el número de viajes antes de las 08:00. La mayoría de los viajes ocurren entre las 10:00 y 16:00, lo cual sugiere que el sistema se utiliza para fines recreativos y turísticos en días no laborales.

### 16.2.1. Modelo

Sea  $C$  la capacidad (número de cajones) en una estación, definimos el proceso estocástico  $\{I(t)\} \in \{0, \dots, C\}$  como el número de bicicletas en la estación en el tiempo  $t$ . Los eventos de rentar y regresar bicicletas se modelan como dos procesos de Poisson no homogéneos  $\mu(t)$  y  $\lambda(t)$  con tasas de arribo  $\mu_t$  y  $\lambda_t$  respectivamente, y la diferencia entre estos sigue una distribución *Skellam*( $\mu_t, \lambda_t$ ). La probabilidad de que el proceso llegue al estado  $j$  en el tiempo  $t$  partiendo del periodo inicial,  $t = 1$ , dado  $I_0 = i$  se denota por  $\pi_{i,j}(t)$ . La matriz de transición del proceso es  $\pi(t)$ .

Se considera un tiempo finito  $[0, T]$  donde el inventario en el tiempo 0 es  $I_0$ . Sea  $p$  el costo de penalización por cada usuario que intente rentar una bicicleta y no encuentre ninguna disponible y  $h$  el costo de penalización por cada usuario que intente regresar una bicicleta y no encuentre cajones disponibles para devolverla. Para poder evaluar el estado de una estación dado un inventario inicial definimos como función de satisfacción a:

$$f(t) = \pi_{I_0,0}(t)E[\mu(t)]p + \pi_{I_0,C}(t)E[\lambda(t)]h \quad (16.1)$$

Así, la insatisfacción esperada acumulada durante todo el periodo, se puede calcular como:

$$F[I_0] = \int_0^T (\pi_{I_0,0}(t)\mu_t p + \pi_{I_0,C}(t)\lambda_t h) dt$$

Se discretizan los intervalos de tiempo, lo cuál permite estimar las matrices de transición del periodo inicial al tiempo  $t$ ,  $\pi(t)$ . Se obtiene una función de satisfacción para cada estación, la cual es convexa y se lineariza para facilitar la solución del problema de optimización.

Para optimizar la ruta e instrucciones de carga y descarga en cada estación se plantea un MILP. El planteamiento busca maximizar la satisfacción esperada, minimizando el costo de la ruta en segundos, el cual se pondera por un parámetro  $\alpha$  de la importancia del tiempo de la ruta de carga/descarga.

$$\min_{x,y,y_U,y_L,s,q} = \sum_{i \in N} f_i(s_i) + \alpha \sum_{i \in N_0} \sum_{j \in N_0} \sum_{v \in V} t_{ij} x_{ijv} \quad (16.2)$$

Se cuentan con los siguientes datos/parámetros del problema: (a)  $N$  el conjunto de estaciones en el sistema, cada una con un índice  $i = 1, \dots, |N|$ , (b)  $N_0$  un conjunto de nodos, incluidas las estaciones y el deposito, (c)  $V$  el conjunto de vehículos, (d)  $s_i^0$  el inventario inicial (en bicicletas) en la estación  $i$ , (e)  $c_i$  la capacidad (en bicicletas) de la estación  $i$ , (f)  $k_v$  la capacidad (en bicicletas) del vehículo  $v$ , (g)  $f_i(s_i)$  la función de penalización del nodo  $i$ , dado el inventario final  $s_i$ , (h)  $t_{ij}$  el tiempo de traslado entre la estación  $i$  y la estación  $j$ , (i)  $\alpha$  el ponderador dado al costo total del re-balanceo en la función objetivo, (j)  $T$  Tiempo total disponible para realizar el re-balanceo, (k)  $L$  el tiempo que toma subir una bicicleta a un vehículo, (l)  $U$  el tiempo que toma bajar una bicicleta de un vehículo y dejarla en una estación.

Consideramos la siguientes variables de decisión:

- $x_{ijv}$  Variable binaria igual a 1 si el vehículo  $v$  va de la estación  $i$  a  $j$ , 0 de lo contrario.
- $y_{ijv}$  Número de bicicletas transportadas en el vehículo  $v$  de la estación  $i$  a  $j$
- $y_{iv}^L$  Número de bicicletas cargadas en el vehículo  $v$  en la estación  $i$
- $y_{iv}^U$  Número de bicicletas descargadas en el vehículo  $v$  en la estación  $i$
- $s_i$  Inventario en la estación  $i$  al final del rebalanceo
- $M$  Cota superior para el número de estaciones que un sólo vehículo puede visitar
- $q_{iv}$  Variable auxiliar de eliminación de subtours

Por lo que el modelo MILP a resolver es:

$$\min_{x,y,y_U,y_L,s,q} = \sum_{i \in N} f_i(s_i) + \alpha \sum_{i \in N_0} \sum_{j \in N_0} \sum_{v \in V} t_{ij} x_{ijv} \quad (16.3)$$

s.a

$$s_i = s_i^0 - \sum_{v \in V} (y_{iv}^L - y_{iv}^U) \quad \forall i \in N_0 \quad (16.4)$$

$$y_{iv}^L - y_{iv}^U = \sum_{j \in N_0, j \neq i} y_{ijv} - \sum_{j \in N_0, j \neq i} y_{jiv} \quad \forall i \in N_0, \forall v \in V \quad (16.5)$$

$$y_{ijv} \leq k_v x_{ijv} \quad \forall i \in N_0, \forall v \in V \quad (16.6)$$

$$\sum_{j \in N_0, j \neq i} x_{ijv} = \sum_{j \in N_0, j \neq i} x_{jiv} \quad \forall i \in N_0, \forall v \in V \quad (16.7)$$

$$\sum_{j \in N_0, j \neq i} x_{ijv} \leq 1 \quad \forall i \in N_0, \forall v \in V \quad (16.8)$$

$$\sum_{v \in V} y_{iv}^L \leq s_i^0 \quad \forall i \in N_0 \quad (16.9)$$

$$\sum_{v \in V} y_{iv}^U \leq c_i - s_i^0 \quad \forall i \in N_0 \quad (16.10)$$

$$\sum_{i \in N_0} (y_{iv}^L - y_{iv}^U) = 0 \quad \forall v \in V \quad (16.11)$$

$$\sum_{i \in N} (Ly_{iv}^L + Uy_{iv}^U) + \sum_{i \in N} (Ly_{i0v} + Uy_{i0v}) + \sum_{i,j \in N_0, i \neq j} t_{ij} x_{ijv} \leq T \quad \forall v \in V \quad (16.12)$$

$$q_{jv} \leq q_{iv} + 1 - M(1 - x_{ijv}) \quad \forall i \in N_0, \forall j \in N, i \neq j, \forall v \in V \quad (16.13)$$

$$x_{ijv} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in N_0 : i \neq j, \forall v \in V \quad (16.14)$$

$$y_{iv}^L \geq 0, y_{iv}^U \geq 0 \text{ enteros} \quad \forall i \in N_0, \forall v \in V \quad (16.15)$$

$$y_{iv} \geq 0 \quad \forall i, j \in N_0 : i \neq j, \forall v \in V \quad (16.16)$$

$$s_i \geq 0 \quad \forall i \in N_0 \quad (16.17)$$

$$q_{iv} \geq 0 \quad \forall i \in N_0, \forall v \in V \quad (16.18)$$

La función objetivo (3) minimiza el costo total del re-balanceo. El primer término es la insatisfacción de los usuarios, y el segundo el costo en minutos del re-balanceo, el cual está ponderado por el parámetro  $\alpha$ . (4) garantiza que cada estación, incluido el depósito termina con exactamente el inventario inicial más lo que subieron o bajaron en ella. (5) es la conservación de inventario por vehículo. (6) limita lo que puede cargar un vehículo a su capacidad. (7) asegura que si un vehículo llega a una estación, tiene que salir de la misma. (8) restringe a poder salir solo a un destino por estación. (9) limita la cantidad de bicicletas que se pueden tomar de una estación. (10) limita la cantidad que se puede dejar en una estación a su capacidad. (11) asegura que todo lo que se cargue en un vehículo se deje en alguna estación. (12) limita el tiempo total destinado al re-balanceo, considerando también el tiempo que toma subir o bajar bicicletas a un vehículo. (13) son restricciones para eliminar subtours y así obtener una sola ruta que parte del depósito. (14) hace que las variables  $x_{ij}$  sean binarias. (15) hace que la cantidad de bicicletas subidas y bajadas sean enteras. (16-18) restringe que sean mayores a 0, y no es necesario que sean enteras, ya que el resto de las restricciones lo imponen.

### 16.3. Metodología de solución

Se utilizó principalmente  $R$  para el manejo de la información, incluida la infraestructura de optimización  $ROI$  y  $NEOS Server$  con el solver  $Mosek$  para resolver el problema, el cual toma entre 8 y 10 segundos de procesamiento en  $NEOS Server$ . El sistema Ecobici tiene datos abiertos y disponibles a través de una API lo cual permite hacer análisis con datos reales. Se enlista a continuación los pasos seguidos para la aplicación del modelo a los datos del sistema Ecobici de la Ciudad de México

- Análisis de la Base de datos: Extracción de información de Ecobici CDMX, incluyendo información de estaciones, disponibilidad en un momento en el tiempo, y datos históricos de uso desde enero del 2016.
- Calculo de Llegadas y salidas: Conteo diario de llegadas y salidas por estación e intervalo de tiempo.
- Estimación de los parámetros del modelo estocástico: Estimación de parámetros Poisson para cada día de la semana por estación, así como estimación de las matrices de transición y estados para cada estación.
- Construcción y linearización de funciones de penalización para cada estación.
- Cálculo de los costos de transporte: Creación de matrices de distancia entre estaciones.
- Aplicación del método de Optimización: Resolución del problema de programación mixta entera.
- Análisis y visualización de resultados.

### 16.4. Resultados

En la Tabla 1 se muestra la mejora en satisfacción total sobre las estaciones de la Colonia Polanco ( $n = 40$ ), comparando para diferentes valores del tiempo total permitido para el re-balanceo ( $T$ ) y distintos valores de  $\alpha$ , el ponderado de importancia del tiempo que lleva realizar el re-balanceo, con un solo vehículo ( $|V| = 1$ ). Se usa como escenario base de comparación el re-balanceo real observado que realizó Ecobici el 14 de julio 2019.

**Tabla 16.1:** Mejora estimada en satisfacción sobre re-balanceo observado.

| $T$  | $\alpha = 0$ | $\alpha = \frac{1}{900}$ | $\alpha = \frac{1}{300}$ |
|------|--------------|--------------------------|--------------------------|
| 2.00 | 14.2 %       | 11.5 %                   | 11.2 %                   |
| 2.50 | 10.0 %       | 16.1 %                   | 11.3 %                   |
| 3.00 | 11.4 %       | 11.6 %                   | 9.4 %                    |
| 3.50 | 15.1 %       | 17.1 %                   | 12.1 %                   |
| 4.00 | 10.2 %       | 19.1 %                   | 12.1 %                   |
| 4.50 | 10.8 %       | 12.9 %                   | 22.1 %                   |
| 5.00 | 10.5 %       | 16.9 %                   | 15.9 %                   |
| 5.50 | 16.1 %       | 14.5 %                   | 17.0 %                   |

Se encuentra que 5 horas y media ( $T = 5.5$ ), tiempo en el cual permanece cerrado Ecobici, son suficientes para atender la colonia completa con un sólo vehículo y obtener una mejor satisfacción. Incluso con solo 2 horas se puede mejorar la satisfacción. Notemos que  $\alpha = \frac{1}{300}$  corresponde al modelo



De cualquier manera, la metodología propuesta puede ser adoptada por un sistema con menos recursos destinados al re-balanceo, y ayudaría a hacerlo de manera más eficaz. Por estas razones, el modelo propuesto podría utilizarse en casi cualquier contexto para operar un re-balanceo estático, ofreciendo mejoras significativas en reducción de costos y mejor uso de los recursos disponibles.

## Referencias

- [1] Daniel Chemla, Frédéric Meunier, and Roberto Wolfler Calvo. Bike sharing systems: Solving the static rebalancing problem. *Discrete Optimization*, 10(2):120–146, 2013.
- [2] Marian Rainer-Harbach, Petrína Papazek, Bin Hu, and Günther R Raidl. Balancing bicycle sharing systems: A variable neighborhood search approach. In *European conference on evolutionary computation in combinatorial optimization*, pages 121–132. Springer, 2013.
- [3] Tal Raviv, Michal Tzur, and Iris A Forma. Static repositioning in a bike-sharing system: models and solution approaches. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 2(3):187–229, 2013.
- [4] Jia Shu, Mabel C Chou, Qizhang Liu, Chung-Piaw Teo, and I-Lin Wang. Models for effective deployment and redistribution of bicycles within public bicycle-sharing systems. *Operations Research*, 61(6):1346–1359, 2013.



# 17 Optimization model for a sustainable sugarcane irrigation system at Altas Montañas Area, Veracruz, Mexico

Ana Laura Piña-Martínez<sup>1</sup>, Miguel Ángel Sólis-Jiménez<sup>1</sup>, Jaime Mora-Vargas<sup>2</sup>, Roberto Castañeda Maya<sup>2</sup>

1 – Tecnológico de Monterrey, Atizapán, Estado de México.

2 – Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico Superior de Huatusco, Veracruz.

\*e-mail: A01318253@itesm.mx

This document presents an optimization model based on Mixed Integer Linear Programming, which allows optimizing the number of hydrants used in an irrigation system for sugarcane sowing, in order to cover the maximum area of land with the minimum number of them. As a second phase, a minimum spanning tree is used to connect hydrants in order to minimize the pipe length used. Currently, the methods used to establish irrigation systems may not be totally efficient, due to the investment may be greater than necessary, and consequently, more hydrants are acquired than required. The coverage models in the literature take for granted the regularity of the perimeter and the areas where it is developed, a situation that is not always possible so that the developed model seeks to overcome this complication considering the irregularity of the land where it is sought to optimize the irrigation system. In addition, problems of soil saturation can arise or the number of hydrants can be underestimated, which means that the benefits of the irrigation system are not adequately utilized. This methodology was implemented in a case study at Altas Montañas, Veracruz Mexico a reduction on the hydrants of 42.11 % was reached while 33.96 % on pipeline use.

*Keywords:* Agro-optimization; Operational research; Irrigation network.

## 17.1. Introduction

Human activities consume and pollute great amount of water. At a global scale, most of the water use occurs in agricultural production [22]. In 2006 it was estimated that the total volume of water globally for agricultural production is 6390 Gm<sup>3</sup>/yr at field level [10]. Also, the global consumption of water is doubling every twenty years [5]. Water consumption and pollution can be associated with specific activities, such as irrigation, bathing, washing, cleaning, cooling and processing [2]. As the global population grows and the standards of living improve there is an increasing need to optimize water consumption during the production of food. Water productivity is projected to increase through gains in crop yield and reductions in irrigations [15]. In accordance with the framework to assess the sustainability of operational activities proposed by (author?) [13], the water resources are considered part of the environmental sustainability. Agricultural sustainability under climate change is a major challenge due to overexploited water resources [17]. It is expected that drought will increase their impact on crops by changing its frequency, intensity, and distribution of the precipitation [19]. The lack of efficient, equitable and sustainable water management effective policies becomes more and more challenging across the world [14]. This challenge is particularly intense in the agricultural

irrigation system [4], where a number of research efforts have been made to facilitate decision makers to regulate sustainable water resources. Sustainable social and economic development depends on the availability and efficient use of water resources [7]. To achieve a successful irrigation system an optimization process is necessary to support the design and operation of water applications in agriculture, by combining variables that satisfy the irrigation conditions, for which the selection is necessary to appropriate methods and strategies related to water availability, climate characteristics, soil and cultivation; likewise, of the social and economic conditions and of the distribution restrictions of the systems [11]. To increase the sustainability of agriculture, an important aspect that has been considered by numerous researchers is the efficient design of irrigation systems. (author?) [18] mentions that the optimal design of a distribution network has several relevant aspects of the hydraulic type, profitability, availability of pipes, water quality and distribution of demand. (author?) [3] state that a decrease in water use on the crop harvest could maximize the efficiency of the water use. The design and management of irrigation systems affect in a substantive way the efficiency of application and involves numerous variables and restrictions, whose main objective is to maximize the benefits and minimize costs. Investment in irrigation systems involves high-cost capital; however, operating and operating costs are insignificant compared to those costs that are derived from the repair of machinery, fuel, water, and labor costs if they do not have a well-designed irrigation system [9]. The challenge on the irrigation system design is to accommodate all the different combinations of variables that control irrigation performance, namely: length and slope of the field, flow rate, infiltration, surface roughness and soil moisture deficit [20], scheduling of the irrigation, soil monitoring technology [1], flows variability, watering duration [16]. The coverage models in the literature take for granted the regularity of the perimeter and the areas where it is developed, a situation that is not always possible so that the developed model seeks to overcome this complication considering the irregularity of the land where it is sought to optimize the irrigation system. The purpose of this paper is to show an alternative which, based on binary optimization models, will redistribute the placement of the sprinklers in the plots and once the redistribution is achieved, join them from minimum tree model expansion to achieve with this the connection of all hydrants with the minimum possible pipeline, achieving with this the significant reduction of costs.

## 17.2. Materials and methods

### 17.2.1. Definition and formulation of the problem

One of the problems that arise when trying to place an irrigation system in a plot, is to determine the appropriate number of hydrants that are required so that it is achieved by covering the total area of the plot without leaving any part without irrigation. The methods that are currently used are not entirely efficient, since according to the research developed in this project, it was observed that in many cases the total of the plots was not covered by irrigation, and sometimes there were certain places that had hydrants to spare, this situation caused the concern to verify if from the use of a model of operations research could analyze and improve this situation. Of the techniques reviewed, it could be seen within the models of integer programming, there are Binary models this type of models in one of its applications has precisely the determination whether a business center is opened or not, in a certain city, and from this determination, this can have contact with neighboring cities. If you think now that the place where the hydrant is located serves as a business center and the surrounding land where the hydrant is placed would be the neighboring cities, then this adaptation can be done. Only that it would be necessary to grid the land so that each square is like a city and according to the scope of the hydrant it can be likened to the cities with which one would have contact. The

objective would be first to determine in which places of the plot the hydrates would be placed, and later using some technique as a tree of minimum expansion, these hydrants can be joined to be fed by the same tube. Figure 1(a) is a simple example that will show the way in which the methodology will be implemented in a real case. Example. Cropland must be covered by irrigation hydrants. There are two types of these: the hydrant G that has a large range and the hydrant M that has a medium range. The terrain has been divided into a grid such that, in each painting, it is possible to locate any of the two hydrants. The cost of a G hydrant is \$40 each and the average cost is \$15 each. The ranges according to the operation manual are shown below. The shape of the land is presented in Figure 1(b).

|   | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 2 |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 3 |   |   |   | G |   |   |   |   |
| 4 |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 5 |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 6 |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 7 |   |   |   |   |   | M |   |   |
| 8 |   |   |   |   |   |   |   |   |

(a) A range of each type of sprinkler.

|   | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 2 |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 3 |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 4 |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 5 |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 6 |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 7 |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 8 |   |   |   |   |   |   |   |   |

(b) The dimension of the terrain already squared.

**Figura 17.1:** Types of hydrants used and the shape of the land.

The objective is to determine the allocations that minimize the total cost and comply with the maximum possible coverage.

### 17.2.2. Construction of the model

The model must specify quantitative relationships for the objective and the constraints of the problem in terms of the decision variables. Starting from this definition, an approach similar to the location models presented in the previous chapter is made. For this, two types of variables are defined.

STEP 1: Define Variables. Let  $M_{ij}$  install a medium hydrant at the  $ij$  coordinate site. Let  $G_{ij}$  install a large Hydrant at the  $ij$  coordinate site. Two types of variables have been proposed since there are two types of hydrants, large and medium.

STEP 2: Write the mathematical model. With the above, we proceed to the construction of the optimization model is build considering a Set Covering Problem:

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^n X_i \quad (1 \leq i \leq n)$$

Subject to:

$$\sum_{j=1}^n X_j > 1 \forall j = 1, 2, \dots, n.$$

Where

$$X_j = 0, 1$$

For  $i$  represent the number of hydrants and the variables  $j$  are neighboring sites

### 17.2.3. The solution of the model

Gurobi Optimizer was used to solve the model. The result indicates that only 4 hydrants should be placed, which will be 3 large types that will be located in the tables (3,2),(5,6),(6,3), and a medium hydrant whose location will be in the box (3,4). The above will have a total cost of \$ 145.00 for the 4 hydrants. It is said that the solution obtained for the mathematical model is valid if it is consistent with the results that will be obtained when applying another procedure in the same situation and under the same conditions. For the previous thing, it is going away to observe which would be according to the result obtained the locations of hydrants in the original map. From the above we have that the results already showed are:

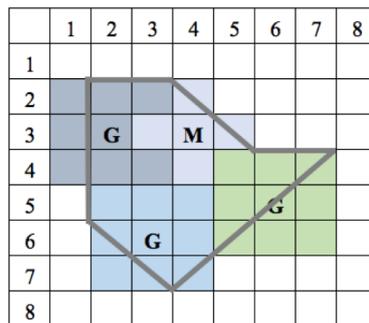


Figura 17.2: Location of the hydrants in the plot.

As can be seen in Figure 2, the total area of the plot is covered with the four hydrants and only in a part that is in the quadrant (3,3) is there going to be an overlap of the hydrants, which can cause a waterlogging, but outside this situation, the rest is perfectly covered.

### 17.3. Study Case

The methodology presented in the previous section was applied to the Altas Montañas region in Veracruz, Mexico. This region was selected because it produces the largest amount of sugarcane in Mexico; according to *Instituto Nacional de Estadística y Geografía* [12] this region produced 284,000 ha of sugarcane which represents approximately 35% of the total production in Mexico, Figure 3 shows the comprehended region and its neighborhoods.

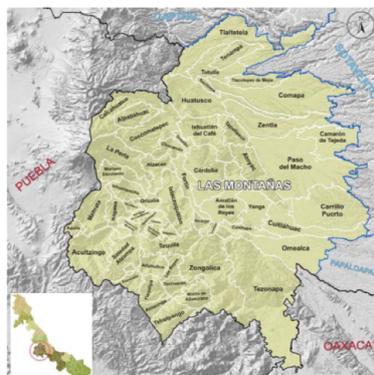
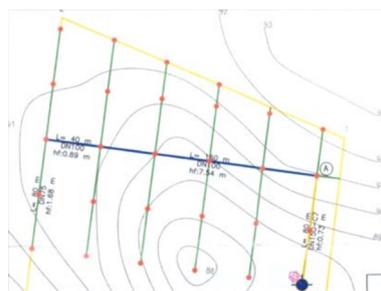


Figura 17.3: Altas Montañas Region. (author?) [21]

(author?) [8] identified that an optimum irrigation system impact on the total production, quality and cost of the sugarcane crops. However, according to *Comisión Nacional del Agua CONAGUA* [6] in Mexico, there is a lack of irrigation systems due to an inaccurate distribution of hydrants and pipeline diameter. Therefore, the total irrigation of the optimal surface is not satisfied. In this paper, the optimal irrigation system is reached by using a binary mathematical model of coverage, that seeks determine the minimum number of hydrants to be used in the system, in order to cover the maximum crop area while minimizing the pipeline used. In Figure 4, a map corresponding to a plot of approximately three hectares is shown, for which an irrigation system has been implemented.



**Figura 17.4:** Original terrain layout with the current hydrant system.

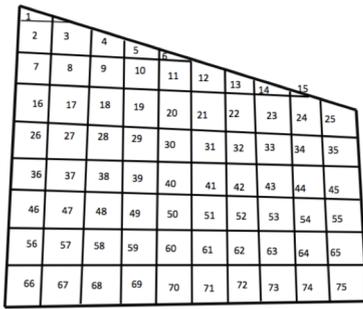
The red points correspond to the sprinklers that are currently placed (27 in total). These are connected by means of 6" PVC pipes, corresponding to the yellow lines, and 3" pipes corresponding to green lines. The blue line corresponds to a 4" tube, but for the size of the earth it is not necessary to use it, so in practice, it was not necessary to place the said tube. The blue dot on the bottom right is the well where water is obtained for irrigation. For the purpose of the model to be built, it is considered that all sprinklers will be joined using a 3" tube so that the union of the 27 sprinklers from the well is achieved with a total of 904.6 meters. Starting from this plane, it is proceeded to grid every place in order to identify the different places where it is possible to place the hydrants. The size of each of the squares equals 20 meters on each side. Figure 5(a) shows the way in which the plan and the numbering assigned to each of the tables was squared.

### 17.3.1. Model construction.

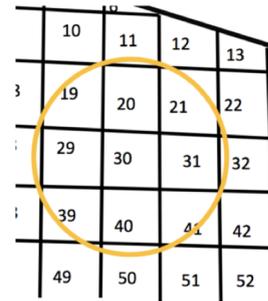
Starting from the grid plan of Figure 5(a), we proceed to the construction of the model, it is important to mention that according to the model that is going to be built, the center of each frame will be considered as the possible place for the placement of the sprinkler. Also, according to the diameter reached by each of the sprinklers (64 meters), the area that can be covered is shown in Figure 5(b), by means of the yellow circle.

For the purpose of the model, it is considered that if the sprinkler is placed in the center of the frame 30, the areas that can be covered without problems correspond to frames 20, 29, 30, 31, and 40, but frames 19, 21, 39 and 41 cannot be covered 100%, so these are not considered as that this sprinkler would water them and the model should seek the placement of another sprinkler nearby to cover these areas. Starting from these assumptions, the objective function of the model is minimization with a total of 75 restrictions whose variables are binary.

17 Sustainable sugarcane irrigation system



(a) Original grid plan.



(b) Irrigation area by sprinkler.

**Figure 17.5:** Grid of the plane and area that will cover the sprinkler.

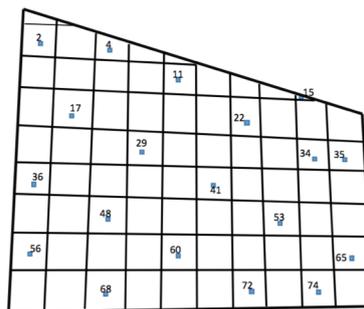
### 17.4. Computational experimentation

Gurobi Optimizer was used to generate the solution of the model, and the results obtained are shown in Table 17.1.

|   |       |
|---|-------|
| Objective value   | 19.00 |
| Model Class   |       |
| Total variables:  | 75.00 |
| Total constraints:  | 76.00 |
| $X_i = 1, i = \{2, 4, 11, 15, 17, 22, 29, 34, 35, 36, 41, 48, 53, 56, 60, 65, 68, 72, 74\}$ |       |

**Table 17.1:** The solution of the model

The result of the objective function indicates a value of  $Z = 19$ , which is interpreted as having 19 places to place the sprinklers, these correspond to the variables that are shown. Considering that the original plan has 27 sprinklers, with the new distribution there is a reduction of 42%. Considering the numbers of sprinklers and using its diameter in Figure 6, it is possible to cover the total area of the proposed land.

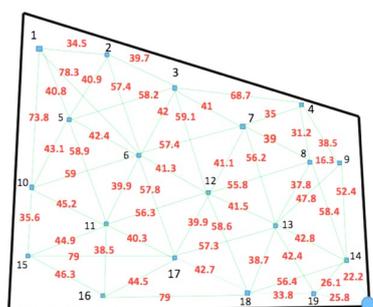


**Figure 17.6:** Places where the sprinklers will be placed.

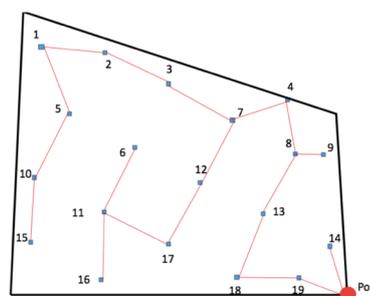
#### 17.4.1. Connection of the sprinklers from the minimum expansion tree model.

Once determined the points where the sprinklers will be placed, the next step is to join them by means of a pipe, it is important to remember that the original plan has a total of 27 sprinklers joined

by means of 904.6 meters of 3-inch pipe. The procedure that is carried out is to measure the distance between each sprinkler and the sprinklers closest to it so that the distance will be the cost that will be had to feed the model. From the plane, a total of 55 branches are obtained. The plane with the distances between the sprinklers (branches) is presented in Figure 7(a). The data of the distances and the nodes are now fed into the software QM for Windows version 4. The map with the unions is presented in Figure 7(b).



(a) Distance between sprinklers and waterhole.



(b) Union of the sprinklers using the tree of minimum expansion.

**Figura 17.7:** Distance between the sprinklers and their connection to the waterhole.

With the results obtained from the minimum expansion tree of the model, and the data were originally 904.6 meters, the following reduction is achieved 33.96 %.

## 17.5. Conclusions

This document presents a mathematical model based on Mixed Integer Linear Programming to cover with a minimum of sprinklers an area of approximately three hectares, achieving a reduction in the number of sprinklers of 42.11 %. A minimum spanning tree is used to connect the hydrants as the least amount of pipe in order to minimize the cost of the project. The current irrigation system occupies 904.6 meters of pipe, the proposed system proposes the union of the sprinklers with a total of 675.2 meters, which is equivalent to a reduction of 33.96 %. The use of mathematical models allows optimizing processes of any kind, achieving with this a considerable improvement in the way in which many processes are currently operated, including irrigation processes such as the one shown in the project. However, a mathematical model cannot replace the decision-maker, and the solution obtained from such a model should not always be implemented at face value, but rather it is the administration of the system who should judge to what extent that solution is applicable. For the previously written, it is necessary to show the obtained result and to see with an expert and the landowner the viability of the result presented by the mathematical model.

## Referencias

- [1] Hussein M Al-Ghobari, Fawzi S Mohammad, and Mohamed SA El Marazky. Evaluating two irrigation controllers under subsurface drip irrigated tomato crop. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 14(4):1206, 2017.
- [2] Maite M Aldaya, Ashok K Chapagain, Arjen Y Hoekstra, and Mesfin M Mekonnen. *The water footprint assessment manual: Setting the global standard*. Routledge, 2012.

- [3] MH Ali and MSU Talukder. Increasing water productivity in crop production—a synthesis. *Agricultural water management*, 95(11):1201–1213, 2008.
- [4] Malika Azzi, Javier Calatrava, and Slimane Bedrani. Farmers’ willingness to pay for surface water in the west mitidja irrigated perimeter, northern algeria. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 16(1):0101, 2018.
- [5] Maude Barlow and Tony Clarke. *Blue gold: the battle against corporate theft of the world’s water*. Routledge, 2017.
- [6] Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Programa nacional hídrico 2014-2018. Report, Comisión Nacional del Agua, 2018.
- [7] Xiangzheng Deng and Chunhong Zhao. Identification of water scarcity and providing solutions for adapting to climate changes in the heihe river basin of china. *Advances in Meteorology*, 2015, 2015.
- [8] Katia Angélica Figueroa Rodríguez, Ana María Teresa García García, Yesica Mayett Moreno, Francisco Hernández Rosas, and Benjamín Figueroa Sandoval. Factores que explican el rendimiento de caña de azúcar a nivel municipal en méxico. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 6(6):1345–1358, 2015.
- [9] EC Herwin. The economics of irrigating field vegetables in the united kingdom. In *III International Symposium on Water supply and Irrigation in the open and under Protected Cultivation 119*, pages 381–384.
- [10] Arjen Y Hoekstra and Ashok K Chapagain. *Water footprints of nations: water use by people as a function of their consumption pattern*, pages 35–48. Springer, 2006.
- [11] Eduardo A Holzapfel, Ximena M Pardo, Vital P da S Paz, A Rodríguez, Ximena C Orrego, and Marco A Lopez. Análisis técnico-económico para selección de aspersores. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 11(6):557–563, 2007.
- [12] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Los principales cultivos del país son la caña de azúcar el maíz blanco y el maíz amarillo. Report, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2018.
- [13] Carin Labuschagne, Alan C Brent, and Ron PG Van Erck. Assessing the sustainability performances of industries. *Journal of cleaner production*, 13(4):373–385, 2005.
- [14] Hongwei Lu, Guohe Huang, and Li He. An inexact rough-interval fuzzy linear programming method for generating conjunctive water-allocation strategies to agricultural irrigation systems. *Applied Mathematical Modelling*, 35(9):4330–4340, 2011.
- [15] Enrique Playán and Luciano Mateos. Modernization and optimization of irrigation systems to increase water productivity. *Agricultural water management*, 80(1-3):100–116, 2006.
- [16] Modesto Pérez-Sánchez, Francisco-Javier Sánchez-Romero, Helena M Ramos, and Petra Amparo López Jiménez. Calibrating a flow model in an irrigation network: Case study in alicante, spain. *Spanish Journal of Agricultural Research (Online)*, 15(1):1–13, 2017.

- [17] Marion Robert, Jacques-Eric Bergez, and Alban Thomas. A stochastic dynamic programming approach to analyze adaptation to climate change—application to groundwater irrigation in india. *European Journal of Operational Research*, 265(3):1033–1045, 2018.
- [18] K Rodríguez, O Fuentes, M Jiménez, and F De Luna. Diseño Óptimo de redes de distribución de agua potable utilizando un algoritmo genético multiobjetivo. *VI SEREA-Seminario Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimiento Urbano de Agua*, 2006.
- [19] Jorge Ruiz, María Bielza, Alberto Garrido, and Ana Iglesias. Dealing with drought in irrigated agriculture through insurance schemes: an application to an irrigation district in southern spain. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 13(4):0106, 2015.
- [20] RJ Smith, MJ Uddin, and MH Gillies. Estimating irrigation duration for high performance furrow irrigation on cracking clay soils. *Agricultural water management*, 206:78–85, 2018.
- [21] Gobierno del Estado de Veracruz. Programas regionales 2013-2016, 2016.
- [22] WWAP. The world water development report 1 . Report, United Nations World Water Assessment Programme., 2009.



# 18 Estudio Comparativo de Herramientas Open Source en la Implementación de Matrices Varianza-Covarianza para la Diversificación de Portafolios

Carlos Rodríguez Contreras<sup>1</sup>, Katya Rodríguez Vázquez<sup>1</sup>

1 – Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y en Sistemas –Universidad Nacional Autónoma de México

\*e-mail: crc@unam.mx

El propósito de este documento es presentar los resultados de un estudio comparativo entre los lenguajes de programación de cuarta generación Python y R que se llevó a cabo con el fin de conocer las ventajas y desventajas de estos para respaldar la toma de decisiones en la selección de la cartera de inversiones. El estudio consideró aspectos como la capacidad de recopilar datos de proveedores de datos financieros en Internet; la velocidad para identificar, limpiar y manipular los datos para producir matrices de varianza-covarianza que permitan una rápida toma de decisiones con respecto a los componentes de una cartera de inversiones. Las matrices de varianza-covarianza han demostrado ser útiles para analizar los rendimientos de una cartera de inversiones. De hecho, son herramientas invaluable para los analistas financieros, pero parecen conceptos matemáticos oscuros para quienes invierten en los mercados financieros. Por tal motivo, también analizamos la facilidad de uso de dichas herramientas para los inversionistas. Encontramos que, a pesar de ser parte del reino de los Quants, como lo son actualmente, las matrices de varianza-covarianza podrían ser usadas por los analistas financieros, con menos capacitación en programación de computadoras. Estos analistas pueden encontrar útil aprender ambos lenguajes de programación revisados en esta investigación, que de hecho son lenguajes de programación de alto nivel. Python y R son los dos lenguajes de programación actualmente en controversia por la posición como el más útil en la Ciencia de Datos. Ambos tienen pros y contras discutidos aquí. Ninguno prevalece sobre el otro, más bien se complementan entre sí como lo encontramos en este estudio. Al conocer estos lenguajes de programación, los analistas financieros podrían adquirir una ventaja estratégica para operar en la arena de los mercados de valores actuales.

*Palabras clave:* Variance-Covariance Matrix; Shrinkage Estimation; Financial Analytics

## 18.1. Preliminaries

The variance-covariance matrix is a convenient expression of statistics in data describing patterns of variability and covariation. It is widely used both as a summary statistic of data and as the basis for key concepts in many multivariate statistical models [1]. Remember that the difference between covariance and variance consists in that variance measures the variation of a single random variable (like the height of a person in a population), whereas covariance is a measure of how much two random variables vary together (like the height of a person and the weight of a person in a population). The

formula for variance is given by:

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (18.1)$$

where  $n$  is the number of samples (e.g. the number of people) and  $\bar{x}$  is the mean of the random variable  $x$  (represented as a vector). The covariance  $\sigma(x, y)$  of two random variables  $x$  and  $y$  is given by:

$$\sigma(x, y) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \quad (18.2)$$

with  $n$  samples. The variance  $\sigma_x^2$  of a random variable  $x$  can be also expressed as the covariance with itself by  $\sigma(x, x)$  [2].

### 18.1.1. The Variance-Covariance Matrix

The variance-covariance matrix, referred in several software options to as  $Cov()$ , is an average cross-products matrix of the columns of a data matrix in deviation score form. A deviation score matrix is a rectangular arrangement of data from a study in which the column average taken across rows is zero. The variance-covariance matrix expresses patterns of variability as well as covariation across the columns of the data matrix. In most contexts the columns of the data matrix consist of variables under consideration in a study and the rows represent individual records. Variance-covariance matrices may, however, be calculated from any pairwise combination of individuals or variables [1].

The variance-covariance matrix is a square matrix given by  $C_{i,j} = \sigma(x_i, x_j)$  where  $C \in \mathbb{R}^{d \times d}$  and  $d$  which describes the dimension or number of random variables of the data (e.g. the number of features like height, width, weight, etc.). Also the covariance matrix is symmetric since  $\sigma(x_i, x_j) = \sigma(x_j, x_i)$ . The diagonal entries of the covariance matrix are the variances and the other entries are the covariances. For this reason, this matrix is called the **variance-covariance matrix** and belong to the class of matrices known as nonnegative-definite symmetric matrices. The variance-covariance matrix can be mathematically expressed as:

$$C = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(X_i - \bar{X})^T \quad (18.3)$$

where the dataset is expressed by the matrix  $X \in \mathbb{R}^{n \times d}$ . As a result, the covariance matrix can be computed for a dataset with zero mean with  $C = \frac{XX^T}{n-1}$  by using the semi-definite matrix  $XX^T$  [2].

The  $Cov()$  matrix has as many rows and columns as the columns of  $X$  and is symmetric (meaning that the value associated with the  $j^{th}$  row and  $k^{th}$  column in  $Cov()$  is equal to the value in the  $k^{th}$  row and  $j^{th}$  column). Diagonal elements of  $Cov()$  represent the variances of the column variables; and off-diagonal elements represent covariances or, if based on  $Z_x$  (with variance 1 which results in a correlation matrix), they represent correlation coefficients.

Variance-covariance matrices are compact summaries of the variability and covariation present in data. The variance-covariance matrix and vector of means constitute sufficient statistics for models that assume a multivariate normal distribution. As such, the covariance matrix may be used in lieu of the raw data in calculating a number of multivariate statistical models, such as confirmatory and

exploratory factor analysis, path analysis, or other general linear models, including the special cases of multiple regression, analysis of variance, and repeated measures analysis of variance or MANOVA.

In many statistical models, finding an optimal basis for representing the covariance matrix in a compact fashion is of primary interest. Such reduced or optimal bases are referred to as principal components analysis (PCA). On the other side,  $Cov()$  matrices alone are not sufficient statistics for other more sophisticated models, such as those involving weighted least squares, sampling weights, or other categorical or distributional adjustments to reflect the dichotomous, polytomous, or other distributional characteristics of the variables under consideration [3].

## 18.2. Variance-Covariance Matrix in Financial Analytics

It must be clear from the above that the purpose of a variance-covariance matrix is to illustrate the variance of a particular variable (diagonals) while covariance illustrates the covariances between the exhaustive combinations of variables.  $Cov()$  matrices are part of the baggage of Machine Learning tools, for financial analytics, they are particularly useful to analyse the volatility between elements of a dataset. For example,  $Cov()$  matrix has particular applications to analyzing the returns of an investment portfolio [4].

### 18.2.1. Investment Portfolio

A portfolio is basically a collection of items. This collection can be anything, for example drawings of an artist, or pictures of an actor or various investments of an investor.

Investment Portfolio in most simple terms is a collection of various investments made by an investor. This means that a investment portfolio will consist of more than one financial products which may belong to a single asset class or multiple asset classes. Portfolio owner can be a single investor and/or a group of investors and/or maybe managed by financial professionals and money managers for their investors.

An asset class is a grouping of investments that exhibit similar characteristics and are subject to the same laws and regulations. Historically, the three main asset classes have been equities (stocks), fixed income (bonds) and cash equivalent or money market instruments.

An investment portfolio should be constructed by an investor, in accordance with their risk tolerance and investment objectives. Investors can also have multiple portfolios for various purposes. Moreover, an investment portfolio may be actively managed or passively managed by investors. Stocks held by a Mutual Fund is an example of actively managed investment portfolio. Similarly, exchange-traded funds are examples of passively managed portfolios [5].

### 18.2.2. The use of Covariance in Modern Portfolio Theory

Covariance is used in portfolio theory to determine what assets to include in the portfolio. Portfolio theory uses this statistical measurement to reduce the overall risk for a portfolio. A positive covariance means that assets generally move in the same direction. Negative covariance means assets generally move in opposite directions.

Covariance is an important measurement used in modern portfolio theory (MPT). MPT attempts to determine an efficient frontier for a mix of assets in a portfolio. The efficient frontier seeks to optimize the maximum return versus the degree of risk for the overall combined assets in the portfolio. The goal is to choose assets that have a lower standard deviation for the combined portfolio that is less than

the standard deviation of the individual assets. This can reduce the volatility of the portfolio. MPT seeks to create an optimal mix of higher-volatility assets with lower-volatility assets. By diversifying the assets in a portfolio, investors can reduce risk and still allow for a positive return [8].

In the construction of a portfolio, it is important to attempt to reduce overall risk by including assets that have a negative covariance with each other. For analysis purpose, it is used historical prices data or financial time series to determine the measure of covariance between different stocks. It is assumed that the same statistical relationship between the asset prices will continue into the future, which, of course, is not always the case. By including assets that show a negative covariance, the risk of a portfolio is minimized.

A drawback to the use of covariance is that the calculation is sensitive to higher volatility returns. More volatile assets include returns that are farther from the mean. These outlying returns can have an undue influence on the resulting covariance calculation. Large single-day price moves can impact the covariance, which leads to an inaccurate estimate of the measurement [8].

For financial analysts, it is crucial to advise how to diversify a portfolio to reduce the risk. Covariance can be used to maximize diversification in a portfolio of assets. By adding assets with a negative covariance to a portfolio, the overall risk is quickly reduced. Covariance provides a statistical measurement of the risk for a mix of assets [8].

### 18.2.3. Building of a $Cov()$ for Portfolio Diversification

Portfolio diversification typically requires an estimate of a variance-covariance matrix of asset returns. There are many approaches for constructing such a variance-covariance matrix, some using the sample covariance matrix as a starting point. We must acknowledge that the variance-covariance matrix for portfolio optimization contains an estimation error of the kind, most likely, of perturbation of the traditional Markowitz's mean-variance optimizer. To reduce this perturbation, it can be used one of the two more known methods: random matrix theory and shrinkage estimation. Each method attempts to clean or remove noise related to the sampling process from the sample covariance matrix.

Random matrix theory does this by using the known eigenvalue distribution of a random matrix as the null hypothesis, scaling any eigenvalues below a threshold to a lower bound, thus eliminating the noise related to the idiosyncratic noise of the matrix. Shrinkage estimation shrinks the sample covariance matrix towards a so-called global average that theoretically represents a truer estimate of the covariance matrix [6].

### 18.2.4. Shrinkage of the $Cov()$

For the purpose of the present study, we manipulate the variance-covariance matrix through the shrinkage transformation. This tends to pull the most extreme coefficients towards more central values, thereby systematically reducing the estimation error.[7].

By shrinking the variance-covariance matrix keeping all other parameters unchanged in the portfolio optimization process, we show on actual stock market data which shrinkage reduces the tracking error relative to a benchmark index, and substantially increases the discovery of information of the portfolio analyzed.

Once the variance-covariance matrix is shrunk, it becomes a better tool for financial portfolio analysis as it is much more clear how the covariances behave.

The use of more sophisticated models such as those of Machine Learning to try to perform the task of building a variance-covariance matrix would not be adequate, in Data Science, the principle of parsimony is very relevant: "given the same conditions of a problem, the correct explanation is used to be the simplest".

## 18.3. Building $Cov()$ matrices with Open Source Programming Languages

We promote the use of Open Source programming languages to calculate the variance-covariance matrices, and achieve a better idea of which actions have a negative covariance and, therefore, are more attractive for risk analysis purposes.

Specifically, we proof R and python programming languages. They both provide implementations of the two above mentioned methods: random matrix theory and shrinkage estimation. As said, each method attempts to clean or remove noise related to the sampling process from the sample covariance matrix.

### 18.3.1. The R ecosystem for Financial Analytics

Open Source R is highly rich in tools for Quants (and with some effort, for Financial Analysts). At the moment of writing these lines, it has been created a huge ecosystem called **tidyQuant** which has absorbed the former ecosystem for financial analytics, **quantmod**.

For the purpose of this evaluation we build a variance-covariance matrix with data obtained from Stock Exchange markets, let us stream such stock data with **quantmod** to analyse the following five stocks:

- AAPL (Apple Computing)
- CBS (Columbia Broadcasting System)
- EFX (Equifax)
- GOOGL (Google)
- VZ (Verizone)

We proceed to download the relevant stock prices for the past 30 days. Next R chunk output shows the Close prices of the last six days for each stock.

```
##           AAPL.Close
## 2019-06-21      198.78
## 2019-06-24      198.58
## 2019-06-25      195.57
## 2019-06-26      199.80
## 2019-06-27      199.74
## 2019-06-28      197.92
##           CBS.Close
## 2019-06-21       50.47
## 2019-06-24       50.29
```

```
## 2019-06-25      49.42
## 2019-06-26      48.60
## 2019-06-27      48.82
## 2019-06-28      49.90
##                EFX.Close
## 2019-06-21     134.07
## 2019-06-24     133.16
## 2019-06-25     130.98
## 2019-06-26     131.10
## 2019-06-27     132.43
## 2019-06-28     135.24
##                GOOGL.Close
## 2019-06-21     1125.37
## 2019-06-24     1116.70
## 2019-06-25     1087.58
## 2019-06-26     1080.32
## 2019-06-27     1076.63
## 2019-06-28     1082.80
##                VZ.Close
## 2019-06-21      57.77
## 2019-06-24      58.27
## 2019-06-25      58.00
## 2019-06-26      56.99
## 2019-06-27      57.25
## 2019-06-28      57.13
```

Then we convert into daily returns by obtaining the log and daily difference for each stock to account for compounding the matrix. We then combine each stock into the one data frame named portfolio. Next R chunk shows only the first six values of this dataframe:

```
##          aapl          cbs          efx          googl          vz
## 1 -0.031769202 -0.001447927  0.001320099 -0.0208528152  0.015713355
## 2  0.018989507  0.012547671  0.012292214  0.0085076474  0.008269425
## 3 -0.020684082 -0.012340716  0.008596250  0.0012206565 -0.004210533
## 4 -0.017217040 -0.008521303 -0.022704104 -0.0091344768 -0.006434174
## 5 -0.003847998 -0.009015681  0.005437059 -0.0058932994  0.007614911
## 6 -0.004143371  0.002944250  0.013707794  0.0008340677 -0.009995848
```

As there are five stocks, we will generate a 5 x 5 variance-covariance matrix:

```
##          AAPL          CBS          EFX          GOOGL          VZ
## AAPL  2.422535e-04  3.658174e-05  9.051441e-05  1.332601e-04 -1.442018e-05
## CBS   3.658174e-05  1.535007e-04  7.072125e-05  7.015312e-05 -8.961547e-06
## EFX   9.051441e-05  7.072125e-05  1.666836e-04  8.068646e-05  4.071441e-05
## GOOGL 1.332601e-04  7.015312e-05  8.068646e-05  2.539757e-04 -8.502774e-05
## VZ   -1.442018e-05 -8.961547e-06  4.071441e-05 -8.502774e-05  2.235486e-04
```

The readings above indicate the extent to which the volatility in prices move together. For instance, we can see that the volatility between GOOGL and CBS is significantly less than that between GOOGL and AAPL, since the latter are both computer technology stocks.

### Shrinkage Estimate of Covariance

If the sample size  $n$  is small and the number of considered variables  $p$  is large (which we arguably do given we are using 30 days of five stocks data), the empirical estimators of covariance and correlation are very unstable. It is possible to furnish estimators that improve considerably upon the maximum likelihood estimate in terms of mean squared error. Moreover, for  $n < p$  (the number of observations is less than the number of random variables) the empirical estimate of the covariance matrix becomes singular and it cannot be inverted to compute the precision matrix. Many methods have been suggested to improve the estimation of the covariance matrix. All of these approaches rely on the concept of shrinkage. This is implicit in Bayesian methods and in penalized maximum likelihood methods and explicit in the Stein-type shrinkage approach [9].

A simple shrinkage estimator of the covariance matrix can be constructed considering a convex combination of the empirical estimator  $A$  with some suitable chosen target  $B$ , e.g., the diagonal matrix. Subsequently, the mixing parameter  $\delta$  is selected to maximize the expected accuracy of the shrunken estimator. This can be done by cross-validation, or by using an analytic estimate of the shrinkage intensity. The resulting regularized estimator  $\delta A + (1 - \delta)B$  can be shown to outperform the maximum likelihood estimator for small samples [10].

The shrunk variance-covariance matrix ends up in the following matrix:

```
## Estimating optimal shrinkage intensity lambda.var (variance vector): 1
##
## Estimating optimal shrinkage intensity lambda (correlation matrix): 0.7755
##          AAPL          CBS          EFX          GOOGL
## AAPL  9.629553e-09 -1.001518e-10  6.934827e-10  1.484758e-09
## CBS   -1.001518e-10  9.629553e-09  4.488945e-10  7.980019e-10
## EFX    6.934827e-10  4.488945e-10  9.629553e-09  6.405587e-10
## GOOGL  1.484758e-09  7.980019e-10  6.405587e-10  9.629553e-09
## VZ    -1.413584e-09 -1.327116e-09 -6.852510e-10 -2.046776e-09
##
##          VZ
## AAPL  -1.413584e-09
## CBS   -1.327116e-09
## EFX   -6.852510e-10
## GOOGL -2.046776e-09
## VZ     9.629553e-09
## attr(,"lambda")
## [1] 0.7755428
## attr(,"lambda.estimated")
## [1] TRUE
## attr(,"class")
## [1] "shrinkage"
## attr(,"lambda.var")
## [1] 1
## attr(,"lambda.var.estimated")
## [1] TRUE
```

## The Correlation Matrix

Once we have ensured that our covariance matrix is positive definite, we can convert it into a correlation matrix - i.e. determine the extent to which returns move together rather than volatility.

```
##           AAPL           CBS           EFX           GOOGL           VZ
## AAPL  1.00000000  0.18970297  0.4504394  0.5372408 -0.06196547
## CBS   0.18970297  1.00000000  0.4421283  0.3553004 -0.04837732
## EFX   0.45043938  0.44212835  1.0000000  0.3921554  0.21091905
## GOOGL 0.53724082  0.35530039  0.3921554  1.0000000 -0.35684415
## VZ   -0.06196547 -0.04837732  0.2109190 -0.3568442  1.00000000
```

There are a number of ways to use the R ecosystem for Quantitative Finance. At a high level, the estimation techniques can be applied to a portfolio and optimized portfolio weights are returned. This is followed by calculation of basic portfolio statistics and comparison functions to provide a quick, visual check to the results.

### 18.3.2. The Python ecosystem for Financial Analytics

As is the purpose of this study, we affirm that finance professionals involved in data analytics and data science must know and make use of R, Python and other programming languages to perform analysis on a variety of data sets.

Python has been getting a lot of interest and is becoming a language of choice for data analysis. Python also has a very active community which is willing to contributing to the growth of python libraries.

Contrary of the philosophy of R, and because it is a general-purpose language, in python we need to load the traditional libraries for data analysis like **numpy**, **scipy** and **pandas** besides the specific finance analytics libraries like **QuantPy** and **pyfolio**. One of the characteristics that position python in the preference of financial analysts is its easiness for learning and using.

On the other side, python also has a hard to use library, maybe oriented to Quants, known as **QuantSoftware Toolkit**.

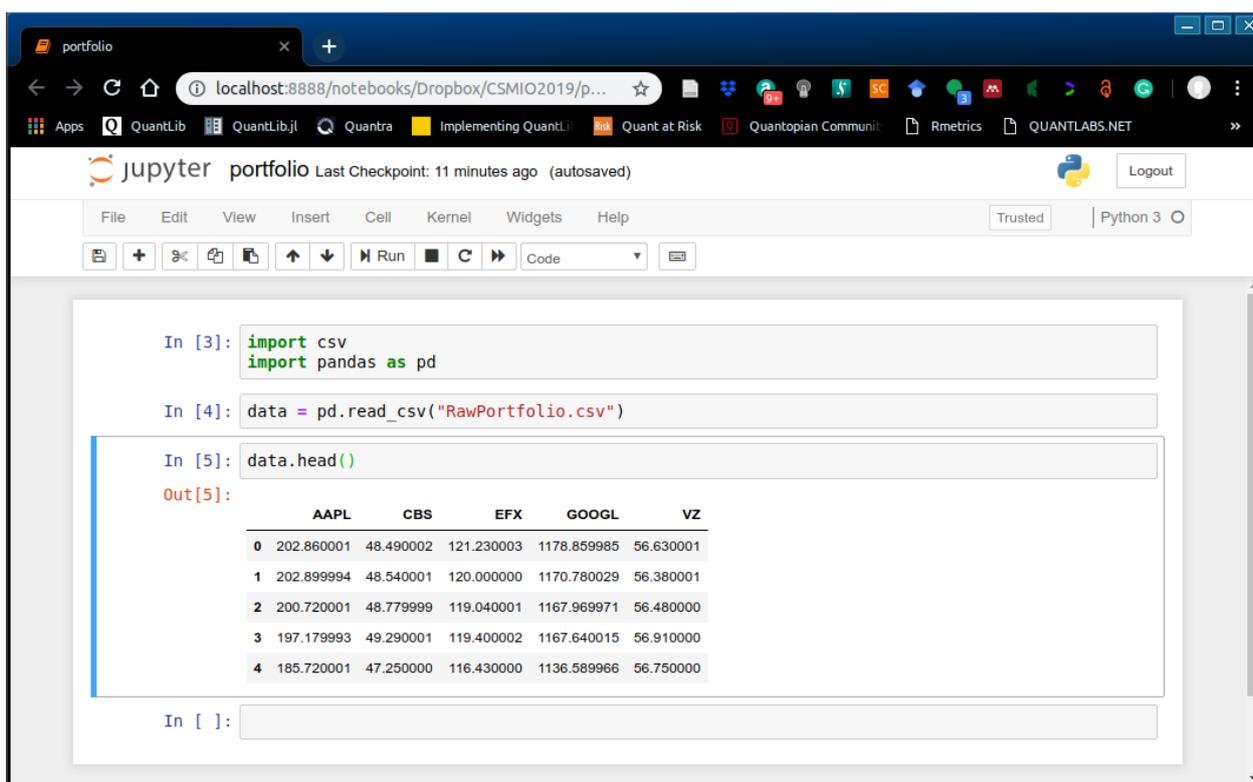
The Figure 1 shows the same portfolio of stocks we used in the case of R. We consider also the last 30 readings and only the Close prices for each stock.

The values of the arrays were contrived such that as one variable increases, the other decreases. We would expect to see a negative sign on the covariance for these two variables, and this is what we see in the covariance matrix [11].

As appreciated by the authors, it was a bit little different to obtain the variance-covariance matrix for these stock prices using python. Moreover, we do not transform the matrix as done in R, by obtaining logs and executing a shrinkage. Next figure shows the matrix. Although less transformed, this is as useful than that obtained with R.

## 18.4. Discussion

In this study, we do not need to use the sophisticated ecosystems of R and python developed to perform financial analyses. As it is relatively common, they both can build a variance-covariance matrix by means of their respective regular libraries.



```

In [3]: import csv
import pandas as pd

In [4]: data = pd.read_csv("RawPortfolio.csv")

In [5]: data.head()
Out[5]:

```

|   | AAPL       | CBS       | EFX        | GOOGL       | VZ        |
|---|------------|-----------|------------|-------------|-----------|
| 0 | 202.860001 | 48.490002 | 121.230003 | 1178.859985 | 56.630001 |
| 1 | 202.899994 | 48.540001 | 120.000000 | 1170.780029 | 56.380001 |
| 2 | 200.720001 | 48.779999 | 119.040001 | 1167.969971 | 56.480000 |
| 3 | 197.179993 | 49.290001 | 119.400002 | 1167.640015 | 56.910000 |
| 4 | 185.720001 | 47.250000 | 116.430000 | 1136.589966 | 56.750000 |

```

In [ ]:

```

**Figura 18.1:** Reading financial data in python using pandas.

To retrieve the financial data from stock markets portals on the internet, R and python depend on the velocity of transference, they both have tools each time much more sophisticated for penetrating secure servers and get the financial data.

Being a specific purpose programming language, R demonstrated to have advantages over python to perform statistical analyses, like those needed to obtain a variance-covariance matrix. On the other side, being a general-purpose programming language, python demonstrates to can quickly interact with the underlying operating system. We confirm python to be more easy to use as many specialists affirm.

Currently, there are a lot of discussion forums which argue in favour or against these both programming languages. No one prevails over the other, each one has advantages and disadvantages that make us affirm that they both are needed if we are to enter the realm of data science. Even more, they are not the only tools a data scientists need to know, there exist other computer tools that perform faster than R and python but they are also more difficult to learn. This the case, for example, of julia programming language and C++.

All mentioned tools belong to the Open Source initiative. There are commercial tools that perform well for financial analysis, that is the case of MATLAB (which has a counterpart in Open Source Octave) The more tools the Quant or Financial Analyst knows, the better the analysis he can exert.

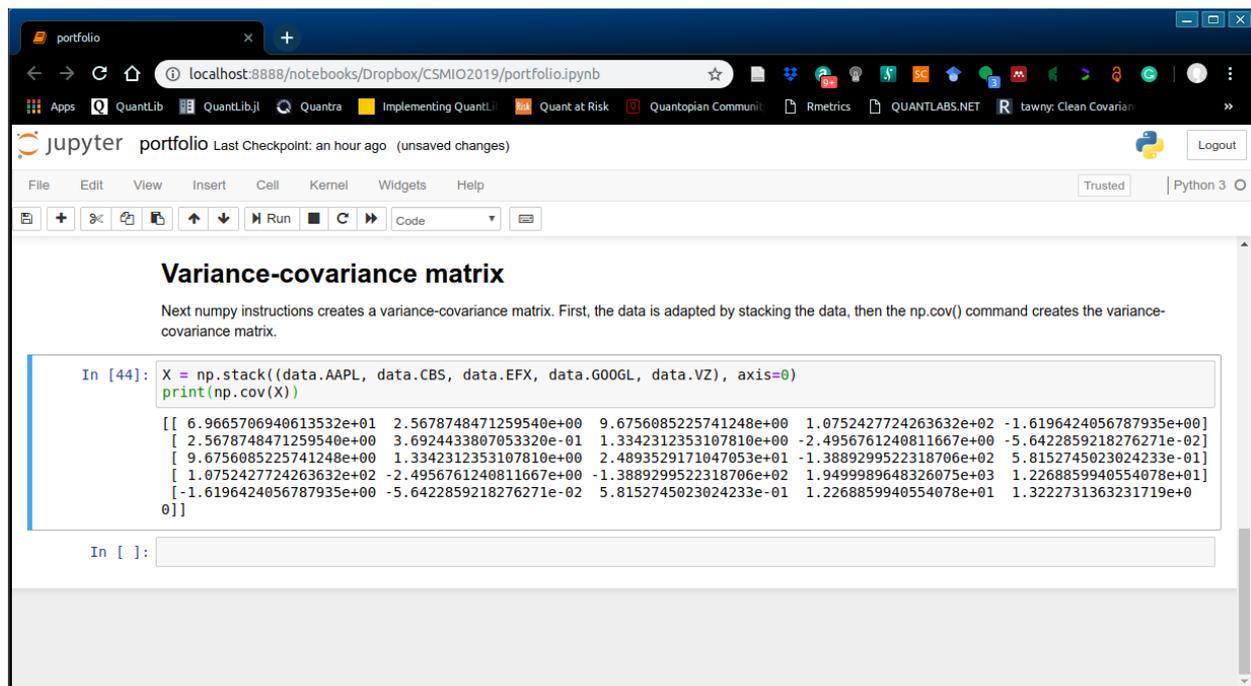


Figura 18.2: The variance-covariance matrix created with numpy.

## Referencias

- [1] Cattell, Raymond. The Meaning and Strategic Use of Factor Analysis. In Handbook of Multivariate Experimental Psychology, eds. John R. Nesselrode and Raymond B. Cattell *Plenum Press*, 1988.
- [2] Wood, Phillip. Understanding the Covariance Matrix. *datascienceplus*, 2018.
- [3] Molenaar, Peter, and Dorret, Boomsma. The Genetic Analysis of Repeated Measures. II: The Karhunen-Loève Expansion. *Behavior Genetics*, 17 (3) 1987.
- [4] Grogan, Michael. Variance-Covariance Matrix: Stock Price Analysis. *MGCodesandStats*, 2018.
- [5] Agarwal, Siddharth. What is portfolio investment? *www.quora.com*, 2018.
- [6] Sober, Elliot. Ockam's Razor: A User's Manual. *Cambridge University Press*, p. 4: 2015.
- [7] Ledoit, Oliver. Honey, I Shrunk the Sample Covariance Matrix. *Journal of Empirical Finance*, 2003.
- [8] Investopedia. How is covariance used in portfolio theory? *www.investopedia.com* 2015.
- [9] Towlomis, A. Nonparametric Stein-type shrinkage covariance matrix estimators in high-dimensional settings. *Computational Statistics and Data Analysis*, 83: 251-261 2015.
- [10] Schafer, J., and Strimmer, K. A Shrinkage Approach to Large-Scale Covariance Matrix Estimation and Implications for Functional Genomics. *Statistical Applications in Genetics and Molecular Biology*, Vol. 4: No. 1 2005.
- [11] Brownlee, Jason. A Gentle Introduction to Expected Value, Variance, and Covariance with NumPy. *www.machinelearningmastery.com* 2018.