

**siam**®  
Mexico Section



# UNA APLICACIÓN DEL "FLEXIBLE JOB SHOP SCHEDULING PROBLEM" EN UNA EMPRESA MEXICANA

**Irma Delia García Calvillo**

Universidad Autónoma de Coahuila

Angelina Sifuentes, Edgar Reséndiz, Efraín Ruíz

Instituto Tecnológico de Saltillo

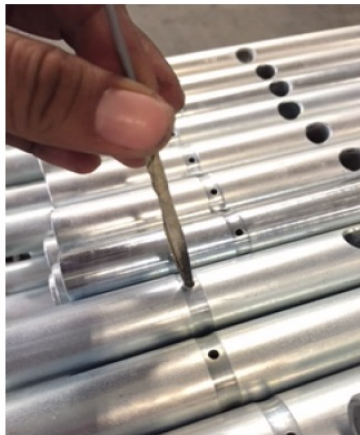
Agosto 2019

- Introducción: el problema de la empresa
- Obtención de datos
- FJSP: modelo y solución
- Resultados del modelo en el problema práctico
- Implementación de resultados y mejoras
- Conclusiones

El caso de aplicación se desarrolla en una empresa manufacturera de partes metal-mecánicas para la industria agropecuaria. La compañía emplea 21 personas, la planta produce 720 000 unidades anuales y genera ventas de 2.5 millones de dólares.

El problema se centra en la fabricación de perno de seguridad para cargadoras.

# Introducción: el problema de la empresa



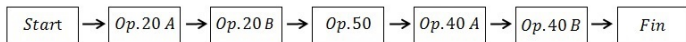
# Introducción: el problema de la empresa

- Se cuenta con un sistema de flujo del tipo push.
- El sistema tiene 9 operaciones:
  - 5 requieren del uso de máquinas,
  - una es un proceso externo y
  - 3 son manuales.
- Todas las máquinas son semi-automatizadas y requieren de la interacción con un operador.
- Existe precedencia en las operaciones.
- Para realizar la operación externa se requieren mínimo 3000 piezas:  
Se trabaja con 2 órdenes de trabajo de 1500 piezas.
- Se trabaja por lotes de 250 piezas.

5 operaciones en máquinas.

# Introducción: el problema de la empresa

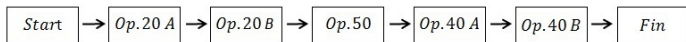
- Para la realización de la pieza, la planta está equipada con 3 tornos horizontales, 3 centros de maquinado verticales y 2 roscadores para su uso exclusivo: 8 máquinas en total.
- La secuencia para fabricar una pieza es la siguiente:



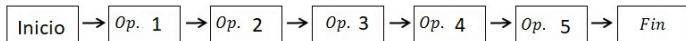
→ *Precedencia Obligatoria*

# Introducción: el problema de la empresa

- Para la realización de la pieza, la planta está equipada con 3 tornos horizontales, 3 centros de maquinado verticales y 2 roscadores para su uso exclusivo: 8 máquinas en total.
- La secuencia para fabricar una pieza es la siguiente:



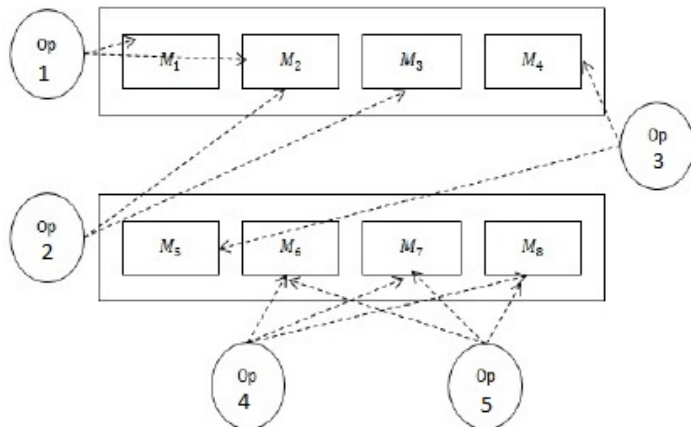
→ *Precedencia Obligatoria*





# Introducción: el problema de la empresa

## Relación máquinas operaciones



## Situación año 2016:

- Se emplea 18.5 días aproximadamente en elaborar 3000 piezas en el proceso en las máquinas, esto es, 5 operaciones y 8 máquinas.
- Se fabrican en total este año 52878 piezas.
- Se paga en total este año 1436 horas extra para poder cumplir con la demanda y la satisfacción al cliente.
  
- Se desea disminuir el tiempo de fabricación y el pago de horas extra en este proceso.

- Escenario 2016: Lotes de 250 piezas, 5 operaciones y 8 máquinas.

Los tiempos de procesamiento por lote en horas, son los siguientes:

<i>Op.</i>	<i>Maquinas</i>							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	9.26	10.00						
2		10.00	10.00					
3				2.43	2.43			
4						6.94	6.94	10.42
5						6.94	6.94	10.42

- El problema se puede modelar como un FJSP: Flexible Job Shop Scheduling Problem.
- FJSP es una generalización del clásico JSP, usualmente mas complejo.
- En el FJSP cada operación puede ser procesada por una máquina entre un conjunto de máquinas disponibles.
- El problema de la empresa tiene estas características.
- Para elaborar 1500 piezas:  $j = 6$  trabajos,  $h = 5$  operaciones y  $m = 8$  máquinas.
- Función Objetivo: minimizar Makespan

Tomamos como base el Modelo de:

Fattahi, P., Mehrabad, M., Jolai, F.: Mathematical modeling and heuristic approaches to flexible job shop scheduling problems. *J. Intell. Manuf.* 18, 331–342 (2007)

Un modelo más compacto:

Özgülven, C., Özbakir, L., Yavuz, Y.: Mathematical models for job-shop scheduling problems with routing and process plan flexibility. *Appl. Math. Model.* 34, 1539–1548 (2010)

Más recientemente:

Birgin, E.G., Feofiloff, P., Fernandes, C.G., de Melo, E.L., Oshiro, M.T, Ronconi, D.P. A MILP model for an extended version of the Flexible Job Shop Problem. *Optimization Letters*, 8, 1417 –1431 (2014)

Parámetros:

- $n$ : número de trabajos
- $m$ : número de máquinas
- Cada trabajo consiste en la secuencia de operaciones,  $O_{jh}$ ,  $h = 1, \dots, h_j$
- $O_{jh}$ : operación  $h$  del trabajo  $j$ .
- $h_j$  número de operaciones necesarias para el trabajo  $j$ .
- $M = \{M_1, M_2, \dots, M_m\}$  conjunto de máquinas

$$a_{ijh} = \begin{cases} 1 & \text{si } O_{jh} \text{ se puede realizar en la máquina } i \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

- $P_{ijh}$ : tiempo de procesamiento de la operación  $h$  del trabajo  $j$  en la máquina  $i$ .

- $C_{max}$ : Makespan



$$y_{ijh} = \begin{cases} 1 & \text{si la maquina } i \text{ es seleccionada para la op } O_{jh} \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$



$$x_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{si } O_{jh} \text{ si es la } k - \text{ésima operación} \\ & \text{se realiza la maquina } i \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

- $t_{jh}$ : tiempo de inicio del procesamiento de la operación  $O_{jh}$ .
- $Tm_{ik}$ : tiempo de inicio de la op  $k$ -ésima en la máquina  $i$
- $k_i$  número de operaciones asignadas a la máquina  $i$
- $Ps_{jh}$  Tiempo de procesamiento de la operación  $O_{jh}$  después de seleccionar una máquina

Minimizar  $C_{max}$   
 sujeto a

$$C_{max} \geq t_{jh_j} + P_{s_{jh_j}} \quad (1)$$

$$\sum_i y_{ijh} P_{ijh} = P_{s_{jh}} \quad (2)$$

$$t_{jh} + P_{s_{jh}} \leq t_{j,h+1} \quad (3)$$

$$T_{m_{ik}} + P_{s_{jh}} x_{ijhk} \leq T_{m_{i,k+1}} \quad (4)$$

$$T_{m_{ik}} \leq t_{jh} + (1 - x_{ijhk})L \quad (5)$$

$$T_{m_{ik}} + (1 - x_{ijhk})L \geq t_{jh} \quad (6)$$

$$y_{ijh} \leq a_{ijh} \quad (7)$$

$$\sum_j \sum_h x_{ijhk} = 1 \quad (8)$$



$$\sum_i y_{ijh} = 1 \quad (9)$$

$$\sum_k x_{ijk} = y_{ijh} \quad (10)$$

$$t_{jh} \geq 0, P_{s_{jh}} \geq 0, T_{m_{ik}} \geq 0$$

$$x_{ijk}, y_{ijh} \in \{0, 1\}$$

## Restricciones:

- (1) Determina el Makespan
- (2) Determina el tiempo de procesamiento de la operación  $O_{jh}$  por la máquina seleccionada
- (3) Secuencia de operaciones de cada trabajo
- (4) Cada máquina procesa un trabajo a la vez
- (5) y (6) Cada operación inicia después que la máquina asignada esté disponible y al terminar la operación anterior
- (7) Máquinas habilitadas para cada operación
- (8) Asigna operaciones a máquinas
- (9) y (10) Cada operación se realiza sólo en una máquina y en orden de prioridad

Software para resolver el modelo con los datos reales:

- Decision Optimization on Cloud (DOcplexcloud) de IBM. Se envían archivos CPO (Constraint Programming Optimization), se resuelve en línea en centésimas de segundos.
- Xpress con tiempo máximo CPU 7200 seg. Siempre se agotaba el tiempo máximo de ejecución.

# Resultados del modelo en el problema práctico

Con DOpplexcloud se resolvieron varios escenarios posibles de la empresa:

- 1 Todas las máquinas se encuentran disponibles, se realiza una orden de trabajo de 1500 piezas (6 trabajos, 8 máquinas)
- 2 Falla la máquina 1, se realiza una orden de trabajo de 1500 piezas (6 trabajos, 7 máquinas)
- 3 La máquina 7 está en reparación y se realiza una orden de trabajo de 1500 piezas (6 trabajos, 7 máquinas)
- 4 Se incrementa la orden de trabajo a 3000 piezas con todas las máquinas disponibles, (12 trabajos, 8 máquinas).

Escenario	1	2	3	4
óptimo(días)	9.51	9.59	9.51	16.17

Para la elaboración de 3000 piezas:

- En el óptimo de DOplexcloud se obtiene que el tiempo de terminación de todas las tareas es de 16.17 días.
- El tiempo de procesamiento de la empresa es de 18.5 días.

- Se detecta la operación cuello de botella
- Se detecta las máquinas mas relevantes en el proceso y se definen estrategias de mantenimiento preventivo para estas máquinas.
- Un operario no es necesario
- Una de las máquinas es innecesaria, se puede emplear como máquina de apoyo.

- En el año 2017 se incrementa la demanda del cliente.
- Se resuelve el modelo para procesar 3200 piezas con lotes de 200 piezas, con 8 o 16 trabajos.
- Para la realización de 3200 piezas el tiempo total de terminación del modelo es de 15.61 días.

Año 2018:

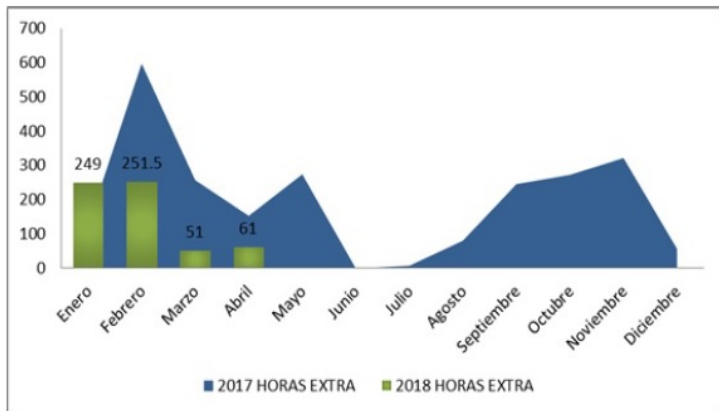
- Con los resultados obtenidos se realiza una redistribución de Layout en la empresa, logrando una mejor distribución del área de trabajo dedicada a la fabricación de esta pieza.
- Sólo son necesarias 6 máquinas en el proceso.
- No hay necesidad de trabajar con lotes, se realiza la producción en serie.
- Con simulación obtienen que con la nueva distribución y tiempos se realizan 3000 piezas en 9.8 días.



Tiempo extra años 2016, 2017 y 2018.

Año	Producción piezas	Horas extra
2016	52878	1436
2017	69471	2397
2018	83500	613

# Implementación de resultados y mejoras



- El tiempo de producción disminuye de 18.5 días a 9.8 días.
- El resultado representa una disminución 47 % del tiempo de entrega
- La línea de trabajo disminuyó de 216  $m^2$  a 104  $m^2$ , representando la reducción del 52 % del área asignada en el layout.
- La productividad incrementa en 69 %.
- Se tiene un beneficio del 0.8 % adicional a las ventas.

- Se ha aplicado un FJSP a un problema real
- Se resuelve en línea para varias instancias
- Se valida la solución del modelo en la instancia real
- Se implementa la solución y se obtienen mejoras en la empresa
- La aplicación de modelos matemáticos y optimización en problemas reales otorga beneficios a las empresas



**Gracias**