



DEPARTAMENTO DE INGENIERIA INDUSTRIAL  
Facultad de Cs. Físicas y Matemáticas  
UNIVERSIDAD DE CHILE

Curso: IN47B - Ingeniería de Operaciones  
Sem.: Primavera 2004  
Profs: J. Miranda - A. Sauré  
Auxs: N. Fritis - C. Olguín  
M. Quinteros - J. Rodríguez

## PAUTA CONTROL #2:

### Pregunta 1 (40 %)

La aplicación de la heurística de *Clarke* y *Wright* se traduce en los siguientes pasos:

- Cálculo de Ahorros:

$$S_{12} = 14 + 21 - 12 = 23$$

$$S_{13} = 14 + 33 - 19 = 28$$

$$S_{14} = 14 + 17 - 31 = 0$$

$$S_{15} = 14 + 14 - 22 = 6$$

$$S_{16} = 14 + 11 - 17 = 8$$

$$S_{23} = 21 + 33 - 15 = 39$$

$$S_{24} = 21 + 17 - 37 = 1$$

$$S_{25} = 21 + 14 - 21 = 14$$

$$S_{26} = 21 + 11 - 28 = 4$$

$$S_{34} = 33 + 17 - 50 = 0$$

$$S_{35} = 33 + 14 - 36 = 11$$

$$S_{36} = 33 + 11 - 35 = 9$$

$$S_{45} = 17 + 14 - 20 = 11$$

$$S_{46} = 17 + 11 - 21 = 7$$

$$S_{56} = 14 + 11 - 25 = 0$$

- Ordenamiento de los Ahorros (de mayor a menor):

$$S_{23} \quad S_{45} \quad S_{26}$$

$$S_{13} \quad S_{36} \quad S_{24}$$

$$S_{12} \quad S_{16} \quad S_{14}$$

$$S_{25} \quad S_{46} \quad S_{34}$$

$$S_{35} \quad S_{15} \quad S_{56}$$

■ Generación de Rutas:

$S_{23} \Rightarrow$	$(2) + (3)$	$\Rightarrow$	$30 + 16$	$=$	$46$	$>$	$40$	NO
$S_{13} \Rightarrow$	$(1) + (3)$	$\Rightarrow$	$7 + 16$	$=$	$23$	$\leq$	$40$	✓
$S_{12} \Rightarrow$	$(1) + (2) + (3)$	$\Rightarrow$	$7 + 30 + 16$	$=$	$53$	$>$	$40$	NO
$S_{25} \Rightarrow$	$(2) + (5)$	$\Rightarrow$	$30 + 21$	$=$	$51$	$>$	$40$	NO
$S_{35} \Rightarrow$	$(1) + (3) + (5)$	$\Rightarrow$	$7 + 16 + 21$	$=$	$44$	$>$	$40$	NO
$S_{45} \Rightarrow$	$(4) + (5)$	$\Rightarrow$	$9 + 21$	$=$	$30$	$\leq$	$40$	✓
$S_{36} \Rightarrow$	$(1) + (3) + (6)$	$\Rightarrow$	$7 + 16 + 15$	$=$	$38$	$\leq$	$40$	✓
$S_{16} \Rightarrow$	$(1) + (3) + (6)$	$\Rightarrow$	$7 + 16 + 15$	$=$	$38$	$\leq$	$40$	✓
$S_{46} \Rightarrow$	$(1) + (3) + (4) + (5) + (6)$	$\Rightarrow$	$7 + 16 + 9 + 21 + 15$	$=$	$68$	$>$	$40$	NO
$S_{15} \Rightarrow$	$(1) + (3) + (4) + (5) + (6)$	$\Rightarrow$	$7 + 16 + 9 + 21 + 15$	$=$	$68$	$>$	$40$	NO
$S_{26} \Rightarrow$	$(1) + (2) + (3) + (6)$	$\Rightarrow$	$7 + 30 + 16 + 15$	$=$	$68$	$>$	$40$	NO
$S_{24} \Rightarrow$	$(2) + (4) + (5)$	$\Rightarrow$	$30 + 9 + 21$	$=$	$60$	$>$	$40$	NO
$S_{14} \Rightarrow$	$(1) + (3) + (4) + (5) + (6)$	$\Rightarrow$	$7 + 16 + 9 + 21 + 15$	$=$	$68$	$>$	$40$	NO
$S_{34} \Rightarrow$	$(1) + (3) + (4) + (5) + (6)$	$\Rightarrow$	$7 + 16 + 9 + 21 + 15$	$=$	$68$	$>$	$40$	NO
$S_{56} \Rightarrow$	$(1) + (3) + (4) + (5) + (6)$	$\Rightarrow$	$7 + 16 + 9 + 21 + 15$	$=$	$68$	$>$	$40$	NO

De esta manera se puede concluir lo siguiente:

- Para resolver su problema la empresa requiere contar con tres camiones (o que un camión realice tres viajes).
- Camión/Recorrido 1:  $(0) \rightarrow (1) \rightarrow (3) \rightarrow (6) \rightarrow (0)$
- Camión/Recorrido 2:  $(0) \rightarrow (4) \rightarrow (5) \rightarrow (0)$
- Camión/Recorrido 3:  $(0) \rightarrow (2) \rightarrow (0)$

**Pregunta 2 (40 %)**

1. De acuerdo a los datos proporcionados se tendría que:

- a) Si llamamos  $\lambda(n)$  al número de fallas por mes y  $n$  al número de inspecciones mensuales, es fácil notar que la multiplicación de los datos de cada fila de la Tabla 2 da como resultado 8.

$$\lambda(n) \times n = 8 \quad \Rightarrow \quad \lambda(n) = \frac{8}{n}$$

- b) Si consideramos los costos de falla y de intervención tanto para el caso de mantención preventiva (inspecciones) como el de mantención correctiva, se obtiene la siguiente expresión para el costo global mensual esperado  $c_g(n)$ .

$$\begin{aligned} c_g(n) &= c_{f,c} + c_{f,i} + c_{i,c} + c_{i,i} \\ &= c_f \times T_f \times \lambda(n) + c_f \times T_i \times n + c_{i,r} \times T_f \times \lambda(n) + c_{i,i} \times T_i \times n \end{aligned}$$

Si utilizamos el resultado de la parte (a)

$$\lambda(n) = \frac{k}{n}$$

llegamos a la siguiente expresión

$$c_g(n) = c_f \times T_f \times \frac{k}{n} + c_f \times T_i \times n + c_{i,r} \times T_f \times \frac{k}{n} + c_{i,i} \times T_i \times n$$

Derivando e igualando a cero, el número de inspecciones que minimiza el costo global mensual esperado está dado por:

$$n^* = \sqrt{k \frac{T_f}{T_i} \left( \frac{c_f + c_{i,r}}{c_f + c_{i,i}} \right)}$$

c)

$$n^* = \sqrt{8 \times \frac{8}{1} \times \frac{(100 + 2 \times 5)}{(100 + 10)}} = 8$$

Por lo tanto deberían realizarse 8 inspecciones mensuales.

2. Para determinar el período óptimo de reemplazo del equipo es necesario calcular el costo promedio anual asociado a cada una de las alternativas manejadas.

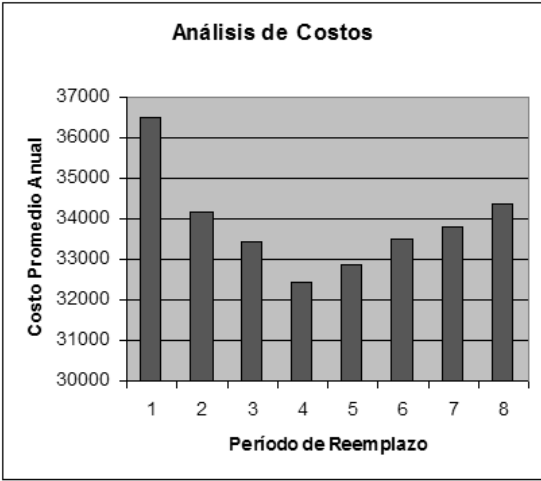
$$c_g(n) = \frac{\text{Precio} + \sum_{i=1}^n \text{Costo}_i - \text{Reventa}}{n}$$

La Tabla 4 resume el desarrollo de este análisis, y la Figura 2 lo muestra gráficamente.

**Tabla 4:** Análisis de Costos

Período	Costos	Reventa	$\sum_{i=1}^n Cotsos_i$	$c_g(n)$
1	32,000	10,500	32,000	36,500
2	31,100	9,700	63,100	34,200
3	31,200	8,900	94,300	33,467
4	29,700	9,200	124,000	32,450
5	32,900	7,500	156,900	32,880
6	35,900	6,900	192,800	33,483
7	35,300	6,400	228,100	33,814
8	37,900	5,900	266,000	34,388

**Figura 2:** Costo Promedio Anual vs Período de Reemplazo



### Pregunta 3 (40 %)

1. Variables de Decisión:

- $w_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si el trabajo } i \text{ va inmediatamente después del trabajo } j \\ 0 & \sim \end{cases}$
- $T_i^i$  = tiempo de entrada del trabajo i.
- $T_i^f$  = tiempo de salida del trabajo i.

2. Restricciones:

- Si el trabajo  $i$  se procesa inmediatamente después del trabajo  $j$ , éste sólo puede comenzar después de que el trabajo  $j$  halla terminado, considerando el tiempo de preparación del trabajo.

$$T_i^i \geq T_j^f + t_{ji} - M(1 - w_{ij}) \quad \forall i, j$$

- El trabajo  $i$  sólo puede empezar a ser procesado después de que llega.

$$\begin{aligned} T_i^i &\geq h_i & \forall i \\ T_i^f &= T_i^i + s_i & \forall i \end{aligned}$$

- Cada trabajo tiene exactamente un predecesor y un sucesor, menos el primero y el último.

$$\begin{aligned} \sum_j w_{ij} &= 1 & \forall i \\ \sum_i w_{ij} &= 1 & \forall j \end{aligned}$$

- Se deben crear dos trabajos artificiales, el trabajo 0 y el trabajo  $I + 1$ .

$$\begin{aligned} s_0 &= 0 \\ s_{I+1} &= 0 \\ T_0^i &= -1 \\ T_i^i &\geq T_0^i & \forall i \\ T_i^i &\leq T_{I+1}^i & \forall i \end{aligned}$$

- Todos los trabajos parten después del trabajo 0 y terminan antes del trabajo  $I + 1$ . Uno es el primero y uno es el último.

$$\begin{aligned} \sum_i w_{i0} &= 1 & \forall i \\ \sum_j w_{(I+1)j} &= 1 & \forall j \end{aligned}$$

- Naturaleza de las variables.

$$\begin{array}{lcl} w_{ij} & \in & \{0,1\} \quad \forall i,j \\ T_i^i, T_i^f & \geq & 0 \quad \forall i \end{array}$$

3. Función Objetivo:

$$Min \ z = \sum_{i=1}^I \frac{T_i^f}{I}$$

#### Pregunta 4 (20 %)

1. De acuerdo a lo discutido en clases:

- a) Un *Overhaul* puede ser considerado como un conjunto de medidas ejecutadas antes de una falla, con el fin de que el estado de un equipo quede en algún punto entre *como nuevo* y *tan bueno* como antes de la ejecución de las acciones. Los modelos de programación dinámica que incluyen *Overhauls* consideran distintos estados de evolución de los equipos debido a la existencia de diversas alternativas de acción. Incluso, el reemplazo del equipo puede ser considerado como una de estas acciones, la que vuelve el equipo al estado *como nuevo*. Además, se pueden definir probabilidades de evolución entre estados asociadas a las acciones que se tomen sobre el equipo. Con esto la función objetivo de la programación dinámica se transforma en un valor esperado.
- b) Los componentes de un equipo pueden fallar temprano tras su puesta en marcha por defectos de manufactura en su infancia, o en forma posterior, por la degradación causada por el uso y envejecimiento. La idea de las garantías ha sido siempre cubrir el primer tipo de fallas, las que ocurren en el período de infancia, sin embargo, las garantías largas puede estar cubriendo gran parte de la vida útil del equipo, incluyendo la degradación.

La explicación de lo anterior recae en la obligación que imponen los fabricantes respecto a los compradores, el mantenimiento preventivo. El mantenimiento preventivo, por un lado permite a las empresas ganar por el cobro del servicio, y por el otro, gracias a la reducción de los costos asociados a mantenimiento correctivo. Obviamente, si el fabricante logra reducir los costos correctivos durante el período de garantía en un monto mayor al invertido en intervenciones preventivas puede estar en condiciones de ofrecer más valor agregado a su producto/servicio alargando los períodos en cuestión.

2. De acuerdo a lo expuesto:

- a) Factores a tener en cuenta para el diseño de la flota de vehículos:
  - Frecuencias de viajes.
  - Congestión vehicular.
  - Ligazones cliente vehículo.
  - Tipos de vehículos (camiones, camionetas o motocicletas).
  - Ventanas de tiempo.
  - Penalidades por incumplimiento.
- b) Información respecto a los clientes:
  - Demandas de productos.
  - Ubicación geográfica: distancias y tiempos de viaje.
  - Costos por incumplimiento.

c) Principales beneficios al agregar la información de los clientes:

- Reducción de la variabilidad de la demanda de los clientes (mejor pronóstico).
- Simplificación del manejo de información.
- Facilita el uso de tecnologías menos avanzadas de resolución para este tipo de problemas.

3. **Bonus** (1.5 ptos.)

Según la Charla “Sistema para el Despacho Dinámico de Técnicos” dictada por el Sr. Sebastián Souyris se tiene:

- a) El carácter dinámico es atribuible a que las decisiones son analizadas en el tiempo y la asignación es realizada en tiempo real.
- b) En general este tipo de enfoques busca descomponer el problema general en un problema maestro y un conjunto de subproblemas con el fin de reducir la complejidad del mismo y los tiempos de resolución asociados.