

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL Y SISTEMAS
ICS1113 – OPTIMIZACIÓN

“Programación óptima del mantenimiento de maquinaria en centros hospitalarios”

Isidora Becker
Samir Hadwa
Fernando Iturbe
Fabian Muñoz
Josefina Nicolet
Fernanda Reyes

Fecha: 10 de septiembre de 2019

Índice

1. Introducción

- 1.1. Introducción del problema página 3
- 1.2. Justificación de elección página 3
- 1.3. Descripción formal del problema página 5

2. Modelo

- 2.1. Conjuntos página 6
- 2.2. Parámetros página 6
- 2.3. Variables página 7
- 2.4. Función objetivo página 7
- 2.5. Restricciones página 7

3. Definición de Datos página 8

4. Validación de Resultados página 10

5. Análisis de Sensibilidad página 11

6. Conclusión página 11

7. Anexos página 12

1.Introducción

1.1. Introducción del problema

En este proyecto se busca llegar a un sistema optimizado para la programación del servicio técnico para los distintos tipos de máquinas utilizados en centros hospitalarios y así maximizar la cantidad de pacientes que utilizan estas máquinas. En consecuencia de esto, se minimiza la probabilidad de falla de las máquinas, lo que brinda mejor servicio a los pacientes, además de minimizar también el tiempo de espera entre las mantenciones de las distintas máquinas.

1.2. Justificación de elección.

El 24 de noviembre del año 2017 el Ministerio de salud aprobó la “Norma de Seguridad del paciente y calidad en la atención respecto a: mantenimiento preventivo de equipamiento médico crítico”, en la que se especifica que su objetivo es “Contar con un programa de mantención preventiva de la institución” (Minsal, 2017).

Esta norma está hecha porque las máquinas son esenciales para el funcionamiento de los centros hospitalarios, y el mantener el funcionamiento de máquinas sin revisiones periódicas aumenta el riesgo de fallas en estas.

“(...) Estudios atribuibles a la ocurrencia de eventos adversos asociados al uso de equipos médicos considera una estimación entre 0.5% y 3% en relación al total de eventos adversos registrados en los últimos reportes.” (Minsal, 2017)

Estos fallos generan consecuencias, ya sean leves, moderadas o graves, en los pacientes, por lo que es importante mantener al mínimo la probabilidad de fallo.

Por otra parte, al ser esenciales, es importante el día de la mantención de las máquinas, porque dependiendo de este, gran número de pacientes pueden quedarse sin atención, o tener que esperar para poder ser atendidos, lo que puede tener consecuencias graves, además de obstaculizar el funcionamiento ininterrumpido del centro hospitalario, tal como se menciona en el documento “La espera en el sistema de salud chileno: una oportunidad para poner a las personas al centro”:

“De acuerdo con los datos entregados por la Comisión Médica Asesora del Ministerio de Salud (2017a), en 2016 hubo 3.321.791 eventos o solicitudes de derivación en el RNLE (repositorio nacional de listas de esperas), lo que

correspondería a 2.362.304 personas en espera. De ellas, el 78% esperaba por consulta de nueva especialidad; 12%, la realización de un procedimiento; y 10%, una intervención quirúrgica.”(Centro de políticas públicas UC,2017)

Estas estadísticas pueden disminuir al optimizar la elección de fecha para la revisión de las máquinas, buscando que pueda seguir atendiendo al mayor número de personas.

Entonces, se espera que el modelo de optimización planteado se pueda implementar en cualquier tipo de centro hospitalario, entregando la mejor programación de días para mandar al servicio técnico las máquinas, para así poder atender a la **mayor cantidad de pacientes posibles, teniendo el mínimo porcentaje de fallas y respetando las limitaciones del centro hospitalario.**

1.3. Descripción formal del problema.

Cada centro hospitalario $k \in K$ debe contar con un programa de mantenimiento preventivo para las máquinas $j \in \{1...J\}$, las cuales están divididas en diferentes tipos que se encuentran en el subconjunto I con $i \in I$ lo que requiere que estas sean revisadas cada cierta cantidad de días $t \in T$ o cada cierta cantidad de personas atendidas por la máquina número j del tipo i d_{ij} (lo que pase primero). Para esto se debe considerar que a las máquinas se les debe hacer mantenimiento cada cierto periodo de tiempo l_{ij} y también se debe considerar que cada máquina se demora una cierta cantidad de días t_{ij} en realizarle el mantenimiento, además se sabe que hay una cierta cantidad de pacientes p_{ijt} que deben ocupar la máquina número j del tipo i el día t . Se busca elegir las mejores fechas para revisarlas para que esta revisión interrumpa lo menos posible el funcionamiento general del centro hospitalario, por lo que se debe elegir las fechas que puedan maximizar el número de pacientes atendidos. Para esto se debe considerar que hay r_i cantidad de máquinas del tipo i en el centro hospitalario.

Para este problema se supondrá que las máquinas no fallan.

Además se supondrá que las máquinas que son mandadas a mantenimiento estarán un mínimo de un día sin funcionar.

Sin embargo, para garantizar un buen funcionamiento se debe tener en cuenta los siguientes requisitos:

- > Hay un costo c_{ij} para realizar la mantención a la máquina número j del tipo i , para esto el centro hospitalario tiene un presupuesto mensual para la mantención de todas las máquinas del lugar que se debe respetar.

- > En todo momento debe haber por lo menos 1 máquina de cada tipo funcionando, independiente de si se esté usando o no.
- > Cada máquina número j tipo i tiene una prioridad la cual se le asocia considerando la cantidad de pacientes que atiende, y la importancia que tiene dentro del centro hospitalario, siendo estas las de mayor prioridad. Para esto definiremos el conjunto prioridad $\gamma = \{1,2,3\}$, el cual cuando toma valor 1 es de máxima prioridad y cuando toma valor 3 es de mínima prioridad.
- > Sólo se consideran las máquinas que funcionan las 24 horas del día, porque son las que tienen más problemas para programar la revisión.
- > Si pasa el periodo de revisión de una máquina, y todavía no es revisada, queda fuera de uso, para evitar fallas.
- > Cada máquina necesita mantención si cumple con el máximo de personas que puede utilizarla.

2. Modelo Matemático

El modelo matemático de programación lineal que define el problema planteado anteriormente es el siguiente:

2.1. Conjuntos

- J : número de máquinas; $j = 1,2,\dots, J$
- T : periodo de tiempo en días; con $t \in T = \{1,2,\dots, T\}$
- I : tipos de máquinas; con $i \in I$

2.2. Parámetros

- t_{ij} : cantidad de días que demora el mantenimiento de la máquina número j del tipo i .
- l_{ij} : máxima cantidad de días que la máquina número j del tipo i puede ser utilizada sin necesidad de mantenimiento .
- r_i : cantidad de máquinas del tipo i .
- c_{ij} : costo de realizar la mantención a la máquina número j del tipo i .
- d_{ij} : cantidad de pacientes que puede utilizar la máquina número j del tipo i antes de realizar la mantención a dicha máquina.
- P : presupuesto mensual para mantenimiento de máquinas en hospital.
- s_{ijt} : cantidad máxima de pacientes que la máquina número j tipo i puede atender durante el día t .
- β_i : prioridad de la máquina $i \in \{1,2,3\}$.

- p_{it} : cantidad de pacientes que van a ocupar la máquina del tipo i en el día t .

2.3. Variables

- $x_{ijt} \in \{0,1\}$: Si máquina número j tipo i no está funcionando y tampoco está en mantenimiento en día t .
- $y_{ijt} \in \{0,1\}$: Si máquina número j tipo i comenzó mantenimiento en día t .
- $z_{ijt} \in \{0,1\}$: Si máquina número j tipo i está en mantenimiento en día t .
- $w_{ijt} \in \{0,1\}$: Si máquina número j tipo i está funcionando en día t .
- b_{ijt} : cantidad de pacientes que ocupan la máquina número j tipo i en día t .
- n_{it} : cantidad de pacientes que se atienden en día t en las máquinas de tipo i (se añadió esta variable para organizar de mejor manera el gurobi).

2.4. Función Objetivo

A través de la función objetivo se busca maximizar la cantidad de pacientes que se atienden usando máquinas.

$$Max. \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J \sum_{i \in I} b_{ijt}$$

2.5. Restricciones

R1) El costo de las mantenciones de todas las máquinas en el mes no puede superar el presupuesto del que dispone el hospital.

$$\sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J \sum_{i \in I} y_{ijt} \cdot c_{ij} \leq P \quad \text{mod.}(t, 30) > 0$$

R2) Siempre debe haber al menos una máquina del tipo i funcionando cada día.

$$\sum_{j=1}^J w_{ijt} \geq 1 \quad \forall i \in I \quad \forall t = 1, 2, \dots, T$$

R3) La cantidad de tiempo en uso de la máquina número j tipo i no debe superar al periodo de tiempo en el que se le debe realizar el mantenimiento.

$$\sum_{t=1}^T w_{ijt} \leq l_{ij} \cdot \left(\sum_{t=1}^T y_{ijt} + 1 \right) \quad \forall i \in I \quad \forall j = 1, 2, \dots, J$$

R4) A la máquina se le debe hacer mantenimiento si se usa en el máximo de pacientes que se puede antes de realizar su mantenimiento.

$$\sum_{t=1}^T b_{ijt} \leq d_{ij} \cdot \left[\sum_{t=1}^T (1 - w_{ijt} - x_{ijt}) - ((t_{ij} - 1) \cdot \sum_{t=1}^T y_{ijt}) + 1 \right]$$

$$\forall j = 1, 2, \dots, J \quad \forall i \in I$$

R5) La cantidad de tiempo en días que la máquina número j tipo i está en mantenimiento debe ser igual a la cantidad de días que demora en mantenimiento.

$$\sum_{t=1}^T z_{ijt} = t_{ij} \cdot \sum_{t=1}^T y_{ijt} \quad \forall i \in I \quad \forall j = 1, 2, \dots, J$$

R6) Las máquinas comienzan el mantenimiento según orden de prioridad.

$$(z_{ijt} + w_{ijt}) \geq y_{ikt} \quad \forall t = 1, 2, \dots, T \quad \forall \beta_i \geq \beta_k \\ \forall k \neq j \in 1, 2, \dots, J \quad \forall i \neq l \in 1, 2, \dots, I$$

R7) La cantidad de pacientes que utilizan la máquina número j tipo i en día t es a lo más la cantidad máxima de pacientes que puede utilizar dicha máquina ese día. Toma en cuenta si la máquina está funcionando.

$$b_{ijt} \leq s_{ijt} \cdot w_{ijt} \quad \forall j = 1, 2, \dots, J \quad \forall i \in I \quad \forall t = 1, 2, \dots, T$$

R8) Relación de variables.

a) Si la máquina número j tipo i necesita mantenimiento, es porque no está en este proceso.

$$1 - x_{ijt} \geq z_{ijt} \quad \forall j \in j = 1, 2, \dots, J \quad \forall i \in I \quad \forall t \in t = 1, 2, \dots, T$$

b) Si la máquina número j tipo i esta en mantenimiento, entonces no está funcionando.

$$1 - (x_{ijt} + z_{ijt}) = w_{ijt} \quad \forall j = 1, 2, \dots, J \quad \forall i \in I \quad \forall t = 1, 2, \dots, T$$

c) Si la máquina número j tipo i necesita mantenimiento pero no lo ha comenzado, esta se encuentra en la lista de espera.

$$1 - x_{ijt} \geq y_{ijt} \quad \forall j \in j = 1, 2, \dots, J \quad \forall i \in I \quad \forall t \in t = 1, 2, \dots, T$$

d) Si la máquina se encuentra en mantenimiento puede haber comenzado en el día t o anterior a este.

$$z_{ijt} \geq y_{ijt} \quad \forall j \in j = 1, 2, \dots, J \quad \forall i \in I \quad \forall t \in t = 1, 2, \dots, T$$

- e) Si la máquina está en funcionamiento, entonces no puede estar en espera ni en mantenimiento.

$$1 - w_{ijt} \leq z_{ijt} + y_{ijt} + x_{ijt} \quad \forall j \in j = 1, 2, \dots, J \quad \forall i \in I \quad \forall t \in t = 1, 2, \dots, T$$

- f) Control de Flujo (se utilizó para generar un mayor orden en el gurobi).

$$n_{it} = \sum_{j=1}^J (b_{ijt}) \quad \forall i \in I \quad \forall t \in t = 1, 2, \dots, T$$

R9) Repartición de pacientes en mismo tipo de máquina i para el día t.

$$p_{it} \geq \sum_{j=1}^J (b_{ijt} \cdot w_{ijt}) \quad \forall i \in I \quad \forall t = 1, 2, \dots, T$$

R10) Naturaleza de variables.

$$x_{ijt} = \{0, 1\} \quad \forall j \in j = 1, 2, \dots, J \quad \forall i \in I \quad \forall t \in t = 1, 2, \dots, T$$

$$y_{ijt} = \{0, 1\} \quad \forall j \in j = 1, 2, \dots, J \quad \forall i \in I \quad \forall t \in t = 1, 2, \dots, T$$

$$z_{ijt} = \{0, 1\} \quad \forall j \in j = 1, 2, \dots, J \quad \forall i \in I \quad \forall t \in t = 1, 2, \dots, T$$

$$w_{ijt} = \{0, 1\} \quad \forall j \in j = 1, 2, \dots, J \quad \forall i \in I \quad \forall t \in t = 1, 2, \dots, T$$

$$b_{ijt} \in N$$

3. Definición de datos

Para el modelamiento en el programa Gurobi, se simplificará el problema restringiendo el tiempo total de un mes, para esto se relacionarán los periodos de tiempo de mantención de acuerdo al tiempo total estimado.

Los datos utilizados en el planteamiento del problema fueron otorgados por Munir Gauro odontólogo de “Clínica odontológica Universidad del Desarrollo”, los cuales se adjuntan en el documento “Definición de datos.xlsx”. Sin embargo estos datos fueron modificados relacionándolos con el periodo de tiempo utilizado en el programa Gurobi (un mes). Para esto los datos son:

		Máquina de rayos X		
Parámetros	Sillones dentales	Intraorales	Extraorales	Esterilización
Cantidad (unidades) (r_i)	5	5	5	5
Intervalo de mantención (días) (l_{ij})	15	25	25	7
Tiempo de mantención (días) (t_{ij})	1	1	1	1
Costo de mantención (pesos chilenos) (c_{ij})	80.000	50.000	80.000	25.000
Cantidad máxima de personas atendidas al día (s_{ijt})	24	24	24	24
Cantidad de pacientes que pueden hacer uso de la máquina antes de su mantención (d_{ij})	300	800	800	200
Prioridad de la máquina (β_i)	3	2	1	1

Se considerará además un presupuesto semanal $P = \$ 2.000.000$.
 Los datos del parámetro p_{it} se encuentra en el archivo “Definición de datos.xlsx”, hoja 2.
 Todos estos supuestos se harán con el fin de simplificar y optimizar el tiempo de ejecución del programa.

4. Validación de Resultados

Resultados:

“Tabla de envío de mantención de los dispositivos”

Sillones Dentales	Días	Intraorales	Días	Extraorales	Días	Esterilización	Días
1	7 - 15	1	9	1	9	1	9- 10 - 19
2	25	2	9	2	7	2	6 - 7 - 8
3	2 - 6	3	10 - 15	3	10	3	2 - 20 - 30
4	1 - 9	4	1	4	6	4	1 - 2 - 25
5	9	5	7 - 25	5	15 - 25	5	3 - 9 - 15

El resultado obtenido mediante el software entrega valores no acordes a la optimización de mantención de máquinas por prioridad debido a que otorga días seguidos de mantención para una misma máquina sin cumplir con un lapso de ocupación para esta. Además, hay varios dispositivos con lapsos reducidos entre periodos de optimización y se puede notar que al ser la máquina enviada días seguidos a mantención no es posible que durante el lapso de uso haya atendido a todos los pacientes posibles antes de otra revisión si existen otras en uso. Así mismo, existen dispositivos que se enviaron para revisión más veces de las que necesitaba al mes, lo que nos indica que el programa no está optimizando de mejor manera el problema.

Una de las causas que pueden generar lo anterior, es que el modelo necesariamente debe ser un problema “entero”, debido a que todos los valores no deben tener números decimales porque representan personas y días. De esta manera, se podrá obtener el mejor valor entero de b_{ijt} , generando para la función objetivo un incumbente de 12459 con un GAP de 0.02%; estimando lo anterior mencionado, gurobi puede estar generando estos cambios de orden en los días para alcanzar el valor entero.

Así mismo, otro error posible puede ser que el lapso de tiempo adaptado al problema (1 mes) fue muy estrecho. Esto, puede estar generando la acumulación de máquinas del mismo tipo en el mismo día debido a que el programa no tiene una

suficiente frontera en días para estimar el mejor valor para la mantención de máquinas.

Sin embargo; el modelo presenta una respuesta de organización para la mantención de máquinas en un ambiente controlado, lo cual es válido para un problema básico, con un dominio acotado en sus parámetros y variables; es decir, una baja cantidad de máquinas, días hábiles, tipos de máquinas y pacientes. De esta manera, se podrá maximizar los pacientes atendidos en un problema acotado y sencillo, entregando una posible agenda para el envío de los dispositivos a su mantención. Por otro lado, para situaciones más reales en que los pacientes cancelen y reajusten sus horas, que las máquinas fallen sin aviso o que estas sean perdida total y haya que comprar otra, el modelo no sería lo suficientemente correcto ya que no se sabría las fechas de entrada y salida de las máquinas por lo que no se podrían optimizar bien las fechas de mantenimiento.

5. Análisis de Sensibilidad

Las restricciones que se encuentran activas son la número 3, 7, 8B y 9. Estas, si son modificadas generan un cambio importante en nuestro resultado, por lo que se puede concluir que necesariamente el resultado depende de estas rectas. Las demás restricciones, si bien generan un cambio en el GAP, no modifican el incumbente. Esto nos indica que se reduce la cuota máxima del problema pero se mantiene constante la solución entera y por ende, el problema no encuentra su solución en las intersecciones de estas.

En el caso de la restricción 1, al introducir un presupuesto excesivo, no genera cambios en la solución. Sin embargo; si se reduce a un nivel inferior de \$1.565.000, el programa gurobi no encuentra una solución. Esto puede ser debido a que la variable de presupuesto se activa y genera una serie de puntos que producen una demora mayor a la esperada en el software (>1 hora). Se estima que si se reduce lo suficiente el presupuesto en el problema el conjunto de soluciones es vacío, debido a que no habría un suficiente presupuesto como para mantener los servicios de la clínica.

6. Conclusiones

A modo de conclusión, al realizar un análisis crítico del modelamiento del problema respecto una situación social realista, se concluye que las variables creadas junto sus respectivos supuestos se complementan para considerar la gran cantidad de situaciones posibles. Además de esto, el modelo contempla las distintas variedades

de máquinas que pueden existir en este contexto, clasificándolas por prioridad y considerando su demanda.

Por otra parte, el modelo no contempla algunas situaciones, las cuales son de suma importancia al momento de llevar el modelo a una situación realista, ya que no se considera la posibilidad de que las máquinas fallen y se incluyen sólo máquinas que funcionen las veinticuatro horas del día. Si bien el modelo no considera todos los aspectos necesarios de la realidad, se asemeja bastante, por lo que es una buena aproximación a esta.

Con respecto a la colaboración grupal, la distribución de roles y dominio de conocimiento pudo haber sido de manera más parcial y equitativa para así disminuir la repartición de labores y poder realizar cada tarea en conjunto, con esto cada parte del proyecto podría haber sido hecha de manera más crítica y complementada.

A futuro se espera corregir estos errores, profundizando en la distribución parcial de los labores para obtener un proyecto más crítico y completo, que considere a su vez, una mayor cantidad de variables y situaciones en este determinado contexto, para ser una ayuda mucho más cercana a la situación social real de nuestro país.

7. Anexo

- MINSAL (2017, noviembre). Aprueba "Norma de seguridad del paciente y calidad en la atención respecto a: Mantenimiento preventivo de equipamiento médico crítico". Recuperado de <https://www.minsal.cl/wp-content/uploads/2017/11/Aprueba-Mantenimiento-preventivo-de-equipamiento-Médico-Crítico-N°-1341.pdf>
- Bedregal, P., Ferrer, J., Figueroa, B., Téllez, A., Tello, C., Vera, J., & Zurob, C. (2017a, diciembre). La espera en el sistema de salud chileno: una oportunidad para poner a las personas al centro. Recuperado de <https://politicaspUBLICAS.uc.cl/wp-content/uploads/2017/12/PDF-TEMAS-DE-LA-AGENDA-102-.pdf>