

Trabajo de Grado – Angela Moreno, Alejandro Rivera y Camilo Zuleta
Anexo 4 – Modelo de Programación Lineal y Pruebas en Gusek

El modelo de Programación Lineal construido para este proyecto tiene los siguientes conjuntos, parámetros, variables de decisión, función objetivo y restricciones:

Conjunto	Notación Matemática
Salas de Cirugía.	$S = \{1, \dots, 7\}$
Categorías de prioridad con la que se debe programar cada cirugía electiva.	$A = \{a, b, c\}$
Periodos - se programarán las cirugías en intervalos de tiempo de 15 minutos.	$T = \{1, \dots, 48\}$
Días - el horizonte de programación será de una semana.	$D = \{1, \dots, 7\}$
ID Cirugía - cada cirugía pendiente de ejecutar.	$I = \{1 \dots Cola de cirugias\}$
Cirujanos – conjunto de especialistas que atenderán las cirugías.	$C = \{1 \dots 210\}$
Equipos especiales – aquellos equipos que son limitados y que restringen las cirugías que se pueden realizar simultáneamente.	$E = \{1, \dots, Equipos especiales\}$
Especialidad – tipo de procedimientos agrupados por categoría médica.	$P = \{1, \dots, 35\}$

No.	Parámetros	Notación Matemática
1	Parámetro binario que vale 1 si la cirugía i pertenece a la especialidad p ; 0 en caso contrario.	$CIRESP_{ip} \quad i \in I, p \in P$
2	Parámetro binario que vale 1 si la cirugía i será operada por el cirujano c ; 0 en caso contrario.	$CIRCIRUJANO_{ic} \quad i \in I, c \in C$
3	Porcentaje máximo de ocupación de cada sala.	$MAXOCUP = 85\%$
4	Parámetro binario que vale 1 si en la sala s se operan cirugías de especialidad p , en el periodo t del día d .	$SALAESP_{spt}$
5	Parámetro binario que vale 1 si cirujano c puede operar en el periodo t en el día d .	$HORARIOCIRUJANO_{cdt} \quad \forall c \in C, d \in D, t \in T$
6	Parámetro binario que vale 1 si el cirujano c puede operar en la sala s en el día d .	$CIRUJANOSALA_{csd} \quad \forall c \in C, s \in S, d \in D$
7	Duración estimada (en número de periodos) del procedimiento identificado con la cirugía i .	$DUREST_i \quad \forall i \in I$
8	Tiempo (en número de periodos) de alistamiento para una cirugía asociada con la especialidad p .	$ALISTA_p \quad \forall i \in I$
9	Duración total del procedimiento identificado con la cirugía i , teniendo en cuenta su alistamiento.	$DURTOTAL_i = DUREST_i + \sum_{p \in P} ALISTA_p * CIRESP_{ip}$
10	Fecha de radicación (en número de días) de la cirugía i .	$FECHARAD_i \quad \forall i \in I$
11	Plazo máximo de programación (en número de días) de una cirugía de categoría de prioridad a .	$MAXPROG_a \quad \forall a \in A$
12	Parámetro binario que vale 1 si la cirugía i tiene asignada la categoría de prioridad a ; 0 en caso contrario.	$CIRCAT_{ia} \quad \forall i \in I, a \in A$
13	Parámetro binario que vale 1 si la cirugía i puede ejecutarse durante el periodo t , dado que fue empezada en el periodo l .	$BINARIODESAROLLO_{itl} \quad \forall i \in I, t \in T, l \in T$ Está definido así: if(DURTOTAL[i]>=l-t+1 and l>=t) then 1 else 0 (Notación de Gusek)
14	Parámetro binario que vale 1 si la cirugía i puede comenzarse en el periodo t , de tal manera que pueda completarse el total de su duración calculada; 0 en caso contrario.	$BINARIOINCIO_{it} \quad \forall i \in I, t \in T, l \in T$ Está definido así: if(DURTOTAL[i]<=card(T)-t-1) then 1 else 0 (Notación de Gusek)
15	Parámetro que determina la fecha máxima teórica en la cual un paciente debe ser operado, a partir de su fecha de radicación y el tipo de prioridad del mismo.	$FECHADESEO_i = FECHARAD_i + \sum_{a \in A} (CIRCAT_{ia} * MAXPROG_a) \quad ; \forall i \in I$
16	Cantidad de equipos de tipo e disponibles en la clínica.	$CANTEQUIP_e \quad \forall e \in E$

17	Parámetro binario que vale si la cirugía i requiere una unidad de equipo tipo e ; 0 en caso contrario.	$CIREQUIP_{ie} \quad \forall i \in I, \forall e \in E$
No.	Variable de Decision	Notación Matemática
1	Variable binaria que vale 1 si se asigna la cirugía i a la sala s , el día d , iniciando a partir del periodo t ; 0 en caso contrario	$INI_{idst} \quad \forall i \in I, d \in D, s \in S, t \in T$
2	Variable binaria que vale 1 si la cirugía i es ejecutada en el periodo t dentro de la sala s durante el día d ; 0 en caso contrario.	$EJECUCION_{idst} \quad \forall i \in I, d \in D, s \in S, t \in T$
3	Variable binaria que vale 1 si se asigna la cirugía i a la sala s , el día d , terminando luego del periodo t ; 0 en caso contrario	$FIN_{idst} \quad \forall i \in I, d \in D, s \in S, t \in T$
4	Varianza que determina la fecha (en número de días) en la que la cirugía i tuvo lugar si es que se opera).	$FECHAOPERADO_i \quad \forall i \in I$
5	Variable que determina la tardanza de la cirugía tipo i	$TARDANZA_i \quad \forall i \in I$
6	Variable que mide el porcentaje de utilización de la sala s durante el día d	$UTILIZACION_{ds} \quad \forall d \in D, s \in S$
7	Variable binaria que determina si la cirugía i NO es programada durante el horizonte de programación; 0 en caso contrario	$NOPROG_i \quad \forall i \in I$

Función Objetivo	Notación Matemática
Consistirá en la minimización de la suma de la tardanza de las cirugías programadas y aquella de las no programadas (para las segundas se asignará una fecha ficticia de programación equivalente al día inmediatamente posterior al final del horizonte de programación ($ D +1$))	$MIN Z = \sum_{\forall i \in I} \sum_{\forall a \in A} TARDANZA_i * CIRCATA_{ia}$

No.	Restricción	Notación Matemática
1	La fecha de operación de una cirugía consiste en el día del horizonte de programación en el cual se inicia y ejecute.	$FECHAOPERADO_i \geq \sum_{\forall s \in S} \sum_{\forall t \in T} \sum_{\forall d \in D} d * INI_{idst} \quad ; \forall i \in I$
2	La tardanza de una cirugía equivale a la diferencia entre la fecha de operación respecto de la fecha máxima teórica permitida de acuerdo con su tipo de prioridad.	$TARDANZA_i \geq (FECHAOPERADO_i - FECHADESEO_i); \forall i \in I$
3	Una cirugía no puede iniciarse en un periodo en el cual no alcance a completarse en su totalidad.	$INI_{idst} \leq BINARIODINICIO_{it} \quad ; \forall i \in I, d \in D, s \in S, t \in T$
4	Una cirugía solamente puede iniciarse una sola vez.	$\sum_{\forall s \in S} \sum_{\forall t \in T} \sum_{\forall d \in D} INI_{idst} \leq 1 \quad ; \forall i \in I$
5	Una cirugía se da por finalizada si es iniciada, y se asigna dicho fin de acuerdo con el periodo de inicio más los periodos de su duración.	$INI_{idst} \geq FIN_{idst} + DURTOTAL_i \quad ; \forall i \in I, d \in D, s \in S, t \in T$
6	Una cirugía puede ejecutarse en un periodo solamente si fue iniciada y su duración abarque el periodo en cuestión	$EJECUCION_{idst} \geq BINARIDESAROLLO_{itl} * INI_{idst}; \forall i \in I, d \in D, s \in S, t \in T; l \in T$
7	Una cirugía tiene asignada una especialidad y no todas las salas permiten operar todas las especialidades	$EJECUCION_{idst} * CIRESP_{ip} \leq SALAESPS_{pdt} \quad ; \forall i \in I, d \in D, s \in S, t \in T, p \in P$
8	No todos los cirujanos pueden operar todas las cirugías, y su ejecución está condicionada a la disponibilidad de horario del especialista.	$EJECUCION_{idst} * CIRCIRUJANO_{ic} \leq HORARIOCIRUJANO_{cat} \quad ; \forall i \in I, d \in D, s \in S, t \in T, c \in C$
9	No todos los cirujanos pueden operar todas las cirugías, y su ejecución al igual que su asignación de sala ejecución están condicionados también a que el cirujano pueda operar en esa sala.	$EJECUCION_{idst} * CIRCIRUJANO_{ic} \leq CIRUJANOSALA_{csd} \quad ; \forall i \in I, d \in D, s \in S, t \in T, c \in C$
10	Las cirugías que tengan el requerimiento de usar equipos especiales pueden ser asignadas siempre y cuando los equipos se encuentren disponibles	$\sum_{s \in S} \sum_{i \in I} EJECUCION_{idst} * CIREQUIP_{ie} \leq CANTEQUIP_e \quad ; \forall d \in D, e \in E, t \in T$
11	El porcentaje de utilización de una sala se calcula como la proporción de periodos en los que una sala está ocupada diariamente y la cantidad total de periodos disponibles para asignar.	$\sum_{i \in I} \sum_{t \in T} \frac{EJECUCION_{idst}}{ T } \leq UTILIZACION_{ds} \quad ; \forall d \in D, s \in S$
12	El porcentaje máximo de utilización diario de una sala no debe superar el 85% de ocupación.	$UTILIZACION_{ds} \leq MAXOCUP \quad ; \forall d \in D, s \in S$

13	Una cirugía que no se programó no tiene un periodo ni fecha de inicio/ejecución.	$\sum_{\forall s \in S} \sum_{\forall t \in T} \sum_{\forall d \in D} INI_{dst} = (1 - NOPROG_i) ; \forall i \in I$
14	Si una cirugía no está programada se le asignará una fecha posterior programación al horizonte temporal definido para el scheduling.	$FECHAOPERADO_i \geq (D + 1) - ((1 - NOPROG_i) * M); \forall i \in I$
15	No negatividad de las variables de decisión	$INI_{dst} \geq 0 ; \forall i \in I, d \in D, s \in S, t \in T$ $FIN_{dst} \geq 0 ; \forall i \in I, d \in D, s \in S, t \in T$ $EJECUCION_{dst} \geq 0 ; \forall i \in I, d \in D, s \in S, t \in T$ $FECHAOPERADO_i \geq 0 ; \forall i \in I$ $TARDANZA_i \geq 0 ; \forall i \in I$ $UTILIZACION_{ds} \geq 0 ; \forall d \in D, s \in S$

Pruebas de rendimiento del modelo de Programación Lineal en Gusek

Para medir la efectividad y grado de respuesta del modelo matemático de programación lineal se procedió a implementarlo en el software Gusek y realizar una prueba de estrés. Esta prueba consistió en validar en diferentes instancias y determinar el tiempo que tardaba el software en encontrar y en imprimir la solución óptima del modelo. Posteriormente, se comparó dicha instancia con los parámetros y conjuntos reales para concluir si el modelo funciona. Además, se tuvo en cuenta el siguiente supuesto: los primeros 15 días hacen parte del periodo de radicación de las cirugías y los siguientes 7 conforman el horizonte de programación.

Como se puede identificar en la siguiente tabla, esta prueba de estrés tuvo en cuenta 10 iteraciones, en las cuales se incrementaba la cantidad de parámetros y variables principales y se registraba el tiempo de ejecución luego del cual Gusek mostraba la solución y resultado de la función objetivo. Después de la novena prueba, el modelo no encuentra el óptimo en un tiempo razonable; en la décima prueba la solución no se encontró después de 24 horas de búsqueda. En la siguiente tabla se muestran los resultados de la prueba:

Prueba	Cantidad salas	Cantidad cirugías	Cantidad días	Cantidad periodos por día	Cantidad cirujanos	Cantidad de equipos especiales	Cantidad especialidades	Tiempo que tarda en correr y generar la solución en Gusek
1	2	5	2	12	2	2	2	0.32 segundos
2	3	10	3	12	3	2	4	0.56 segundos
3	3	10	3	24	3	2	4	1.21 segundos
4	4	10	5	24	4	2	4	3.93 segundos
5	4	15	5	24	4	3	4	12.648 segundos
6	7	15	7	24	5	3	5	14.5 segundos
7	7	20	7	24	5	3	5	19.7 segundos
8	7	30	7	24	5	3	5	32.6 segundos
9	7	40	7	24	5	3	5	2 horas 11 minutos
10	7	45	7	24	7	4	5	No encuentra la solución en 24 h

Considerando que el equipo de programadores requiere una herramienta que determine resultados en un corto tiempo y que se tiene una gran cantidad de cirugías a programar, se concluye que un modelo de programación lineal no es la estrategia adecuada para solucionar este problema. Por lo tanto, es necesario plantear un escenario y metodología de solución más robusto. Debido a que se ha demostrado que el óptimo global no será encontrado fácilmente, se procedió a utilizar metodologías de óptimos locales, como lo son heurísticas y/o metaheurísticas.

Pontificia Universidad Javeriana
Ingeniería Industrial
Coordinación Proyecto y Trabajo de Grado

Concepto Final - Trabajo de Grado

Estimados Estudiantes,

A continuación se presenta el concepto final del Trabajo de Grado identificado con el código 173004 por parte del profesor(a) Otero Caicedo Ricardo Fernando, asignado para la evaluación.

Evalúe el Documento escrito: Calificación: 4

Aspectos a mejorar: Mejorar la ortografía., Mejorar la redacción.

Evalúe la recolección y análisis de información.: Calificación: 5

Evalúe el cumplimiento de los objetivos aprobados en el proyecto: Calificación: 5

Evalúe el diseño realizado: Calificación: 5

Evalúe las herramientas de Ingeniería Industrial Aplicadas: Calificación: 4

Comentarios: Hizo falta medir los estimadores y su impacto en la simulación.

Evalúe la medición del impacto: Calificación: 5

Evalúe la innovación y alcance del proyecto: Calificación: 4

Concepto Final= Aprobado

Comentarios Finales= Revisar comentarios enviados en el documento.

Tengan presente que si el concepto final de al menos uno de los miembros del comité de evaluación es Reprobado, el concepto final del Trabajo es Reprobado.

Pontificia Universidad Javeriana
Ingeniería Industrial
Coordinación Proyecto y Trabajo de Grado

Concepto Final - Trabajo de Grado

Estimados Estudiantes,

A continuación se presenta el concepto final del Trabajo de Grado identificado con el código 173004 por parte del profesor(a) Suarez Venegas Daniel Ricardo, asignado para la evaluación.

Evalúe el Documento escrito: Calificación: 5

Evalúe la recolección y análisis de información.: Calificación: 5

Evalúe el cumplimiento de los objetivos aprobados en el proyecto: Calificación: 4

Evalúe el diseño realizado: Calificación: 5

Evalúe las herramientas de Ingeniería Industrial Aplicadas: Calificación: 4

Evalúe la medición del impacto: Calificación: 5

Evalúe la innovación y alcance del proyecto: Calificación: 4

Concepto Final= Aprobado

Comentarios Finales= .

Tengan presente que si el concepto final de al menos uno de los miembros del comité de evaluación es Reprobado, el concepto final del Trabajo es Reprobado.