

Optimización del Programa de Mantenimiento Preventivo para Equipos de Imagenología en Hospitales del Este y Centro del Estado de Guanajuato.

R.G. Juárez-Valdivia¹, A. Rodríguez-Navarro¹, D. Marmolejo-Correa^{2*}

¹Departamento de Ingenierías Química, Electrónica y Biomédica. División de Ciencias e Ingenierías, Campus León, Universidad de Guanajuato. juarezvr2011@licifug.ugto.mx y rodriguezna2011@licifug.ugto.mx

^{2*}Departamento de Ingeniería Física. División de Ciencias e Ingenierías, Campus León, Universidad de Guanajuato. d.marmolejocorrea@ugto.mx

Resumen— El presente trabajo consiste en la optimización de recursos humanos para la realización de Mantenimiento Preventivo en equipos médicos de Tomografía Computarizada y Resonancia Magnética Nuclear que se encuentran en varios hospitales de las ciudades de León, Irapuato, Salamanca y Celaya. Por medio del Método de la Ruta más Corta se busca la optimización de la distancia a nivel local y, empleando Redes de Proyectos se pretende optimizar los recursos económicos y el tiempo para el mantenimiento de los equipos que se encuentran en los hospitales de los municipios Irapuato, Salamanca y Celaya.

Palabras clave— Investigación de Operaciones, Mantenimiento preventivo, Optimización de procesos, Resonancia Magnética Nuclear, Ruta Crítica, Ruta más Corta, Tomografía Computarizada.

I. INTRODUCCIÓN

En el Sector Salud (SS) los Ingenieros Biomédicos (IB) tienen la tarea de impulsar el financiamiento y establecimiento de protocolos para la renovación y mantenimiento de Equipo Médico (EM), promoviendo la resolución de problemas en la Gestión de EM en México. En la actualidad, una eficiente planeación de Mantenimiento Preventivo (MP) en Equipos y Dispositivos Médicos (EDMs) tiene gran importancia, debido a que se pueden evitar gastos fuertes e innecesarios para el hospital, promoviendo la calidad y cantidad del servicio de atención a la salud ^[1]. Los servicios de MP pueden ser ofrecidos y realizados por: (1) el proveedor del EM, (2) empresas independientes (outsourcing) y (3) por el Departamento de IB del hospital. En este trabajo se toma como ejemplo una empresa independiente que ofrece el servicio de mantenimiento preventivo y correctivo a EDMs ^[2]. Lamentablemente, no existen protocolos o estudios de optimización en los cuales se busque minimizar

éstos parámetros para la realización de MP, dando este estudio una alta relevancia y aporte teórico-práctico de la Investigación de Operaciones (IO) en la Ingeniería Biomédica.

En general, existen tres fuentes de generación de costos para la empresa que presta el servicio de MP ^[2]: (i) Transporte, (ii) Mano de Obra, y (iii) Consumibles. Donde las primeras dos fuentes tienen dependencia directa de las distancias, tiempos y la calidad de servicio. En este estudio se tiene como objetivo minimizar los parámetros de tiempo, costos y distancias para realizar el MP de los EM de Imagenología (EMI) y ofertar un mejor servicio en calidad, cantidad y a la vez la optimización de recursos empresariales.

A. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Una Empresa Líder pionera en el área de tecnología médica de alto nivel cuenta con personal Biomédico capacitado y preparado para la atención a los equipos de prestación de atención a la salud. Otorgando mantenimiento preventivo y correctivo de la amplia gama de EDM's que son vendidos a hospitales públicos y privados, es decir, organizaciones de salud. A los Ingenieros Biomédicos (IBs) de esta empresa pionera se les ha otorgado la labor de realizar el primer Mantenimiento Preventivo (MP) de los equipos de Tomografía Computarizada (TC) y Resonancia Magnética Nuclear (RMN) vendidos en hospitales del Este y Centro del Estado de Guanajuato, en un lapso no mayor a los 2 meses pasados dos años de adquisición del equipo. La primera etapa de este MP es el levantamiento de la orden de servicio para posteriormente realizar el MP. Se tiene estimado que el tiempo máximo para realizar el levantamiento de estos equipos es cercano a los 60 minutos si se realiza por dos IBs y el doble de tiempo si lo realiza solo uno. Sin embargo, el gasto por mano de obra calificada es significativo por lo

que se busca, entonces, la posibilidad de tener solo un IB encomendado a estas tareas. El planteamiento del problema es el siguiente:

Téngase que realizar el levantamiento de la orden de servicio de 12 EDMs en 4 ciudades del estado de Gto; minimizar tanto el tiempo de traslado del personal, el uso del combustible así como el costo de mano de obra.

En la siguiente sección se describe la metodología seguida para dar una solución óptima al planteamiento hecho por la empresa prestadora del servicio de MP.

II. METODOLOGÍA

Los Hospitales y Centros de Imagenología (HCIs) a los que se les dará MP se muestran en la FIG. 1 y Tabla 1. Dado el número y distribución de clientes, la administración de la compañía puede optar por dividir el servicio en Local y Regional. El servicio Local se dedicará a solo satisfacer a los HCIs en la Ciudad de León de los Aldama y el servicio Regional se dedicará solamente a hacer los levantamientos de los HCIs de Irapuato, Salamanca, Celaya y del Hospital Regional de Alta Especialidad Bajo. Para ambos servicios se tienen estimados los siguientes tiempos y salarios:

- i. Tiempo de levantamiento: 2 hrs por IB.
- ii. Salario por levantamiento completo (honorarios) a un IB: 13000 MXN.
- iii. Mano de Obra por Actividad 1000 MXN
- iv. Horas-Hombre por día laboral: 8 hrs.
- v. Horas- Extra se pagan doble.
- vi. Precio promedio de Combustible 14 MXN por litro.

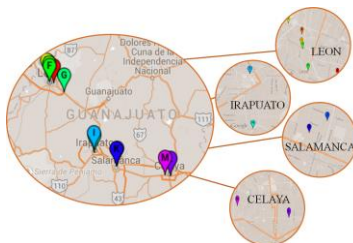


FIG. 1. HOSPITALES Y CENTROS DE IMAGENOLOGÍA REGIONALES [3]

TABLA 1. HOSPITALES Y CENTROS DE IMAGENOLOGÍA CON EL EDM Y SU LOCALIZACIÓN RESPECTO A LA OFICINA CENTRAL.

	Nombre		Cd.
	OFL	Oficina Central León	León
A	HL1	Hospital La Luz	León
B	HL2	Hospital Medica Campestre	León
C	HL3	León Scanner	León
D	HL4	Hospital Ángeles León	León
E	HL5	IMSS T1	León
F	HL6	Hospital Aranda de la Parra	León
G	HL7	Hospital Regional de Alta Especialidad Bajío	León
H	HI1	Hospital Médica Insurgentes	Irapuato
I	HI2	Centro Médico Neurológico y de Especialidades	Irapuato
J	HS1	Imagen Médica	Salamanca
K	HS2	Hospital General de Salamanca	Salamanca
L	HC1	Centro Médico Quirúrgico de Celaya	Celaya
M	HC2	Hospital General de Celaya	Celaya

vii. Rendimiento y velocidad promedio del transporte terrestre:

- a. Ciudad: 13.7 km por litro y 30 km/hr ^[4].
- b. Carretera: 19.2 km por litro y 80 km/hr ^[4].

A. SERVICIO LOCAL

La Oficina Central León (OFL) se encontraría localizada en el noreste de la Ciudad de León. Las distancias entre los diferentes HCIs y la OFL están dadas en la Tabla 2. Se suponen dos escenarios para proveer el Servicio Local.

- i. Realizar los seis levantamientos en un solo día laboral.
- ii. Dividir el trabajo en varios días.

Se debe determinar cuál es el escenario y secuencia óptimos dados los costos y las horas-hombre disponibles por día. Se considera a la OFL como origen y destino final de todos los recorridos. La Fig. 2 muestra el Diagrama de Red para el Servicio Local. Se utiliza el Método de la Ruta más Corta ^[5] para resolver el problema ya que el costo es proporcional la distancia recorrida y así se obtendrá la ruta más óptima por la cual no se generaría un alto y bajo coste en el tiempo de realización del levantamiento. Los costos unitarios están definidos por la Ec.(1)

$$c_{i,j} = \frac{d_{i,j}g}{r} \quad i \neq j \quad (1)$$

TABLA 2. DISTANCIAS ENTRE LOS HCIS LOCALES Y LA OFICINA CENTRAL (KMS)

	HL1	HL2	HL3	HL4	HL5	HL6	OFL
HL1		7,0	7,0	10,0	5,0	4,0	7,7
HL2	7,0		1,0	2,0	2,0	4,0	8,6
HL3	7,0	1,0		2,4	0,5	3,0	9,3
HL4	10,0	2,0	2,4		2,9	5,0	12,0
HL5	5,0	2,0	0,5	2,9		2,1	9,9
HL6	4,0	4,0	3,0	5,0	2,1		12,0
OFL	7,7	8,6	9,3	12	9,9	12	

Donde, c_{ij} es el costo unitario en MXN que se desprende el traslado desde i hasta j , $d_{i,j}$ es la distancia en km de i a j , g es el costo promedio del combustible en MXN/lit y r es el rendimiento promedio del transporte en km/lit.

El modelo matemático a resolver es el siguiente:

$$\text{Min } \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{i,j} x_{i,j}$$

Sujeta a

$$\sum_{j=1}^n x_{i,j} - \sum_{j=n}^n x_{j,i} = \begin{cases} 1 & i = OLF1 \\ 0 & i = HL1, \dots, HL6 \\ -1 & i = OLF2 \end{cases}$$

y

$$x_{i,j} \in \{0,1\} \quad i, j = \{OFL1, HL1, HL2, HL3, HL4, HL5, HL6, OFL2\}$$

$i \neq j$

Nótese que para el modelo la entrada y salida son nodos distintos, sin embargo es una sola OLF en la realidad. Para el escenario i se cambia la restricción binaria a la dada en la Ec. (2), ya que se considera que todos los hospitales se deben visitar en solo una jornada.

$$x_{i,j} = 1 \quad (2)$$

Adicionalmente, se agrega la restricción de Horas-Hombre máximas por día laboral dada por la Ec. (3), para el escenario ii .

$$\sum_{j=1}^n t_{i,j} x_{i,j} \leq 8 \quad (3)$$

Donde, $t_{i,j} = \bar{v}d_{i,j} + \bar{a}_{i,j}$

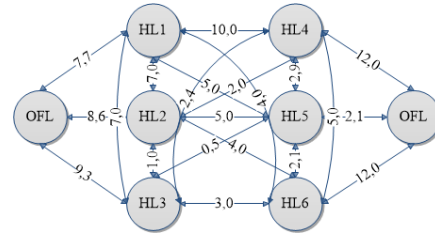


FIG. 2. DIAGRAMA DE RED PARA EL SERVICIO LOCAL (KMS).

y \bar{v} es la velocidad promedio que se toma de 40 km/hr dentro de ciudad y $\bar{a}_{i,j}$ es el tiempo promedio que se lleva por actividad y es igual a 2 hr.

Es de interés para un trabajo más extenso el optimizar el tiempo del levantamiento y del MP teniendo un máximo y mínimo de tiempo para los diferentes EDMs. Sin embargo para este caso se considera un tiempo constante. Como primer cálculo se determinaron las distancias y tiempos máximos para llevar a cabo todas las actividades en una jornada con horas extra, a continuación se realizó el cálculo para terminar las actividades en el tiempo mínimo, finalmente se analizó el caso de utilizar solo 8 hrs laborales y dividir el MP en varios días.

B. SERVICIO REGIONAL

Para el Servicio Regional se considera que el origen y el destino es el HL7. Puesto que también éste requiere el levantamiento de la orden de MP, este tiempo y costo se agregará de manera arbitraria en las Funciones Objetivo. Las distancias totales entre los HCIs regionales con la OFL así como las distancias recorridas en carretera se encuentran respectivamente en la Tabla 3. En el Servicio Regional, la empresa ha contratado a dos IBs pensando que los tiempos de levantamiento se pueden reducir a la mitad sin embargo los costos de mano de obra se incrementan al doble. Es necesario el establecer si dos IBs son necesarios o si se pueden realizar las tareas contratando solamente a un IB. En la Figura 3 se muestra el diagrama de red para el Servicio Regional. Se hizo un balance (trade-off) entre los beneficios y perjuicios de contratar a dos IBs para ofrecer servicios en un tiempo menor. Después, se realiza el balanceo entre los dos criterios a optimizar, costo y tiempo.

TABLA 3. DISTANCIAS TOTALES ENTRE LOS HCIS REGIONALES Y LA OFICINA CENTRAL (KMS) [6]

	HC1	HC2	HI1	HI2	HL7	HS1	HS2	OFL
HC1		6	72	79	123	46	47	137
HC2	6		66	74	117	41	42	132
HI1	72	66		2	61	27	28	75
HI2	79	74	2		59	30	31	73
HL7	123	117	61	59		79	81	18
HS1	46	41	27	30	79		2	93
HS2	47	42	28	31	81	2		95

Para el siguiente análisis se usa el Método de la Ruta Crítica (CPM) y la Técnica de Evaluación y Revisión de Proyectos (PERT) [5], el primero para optimizar el tiempo y costo de la ruta más conveniente a tratar y el segundo para tener una mejor eficiencia y eficacia en elaborar el adecuado plan de levantamiento de MP que se tiene pensado hacer. Sea Z el costo de reducir el tiempo de las actividades, x_{rj} la reducción de la duración de la actividad j , y_j el tiempo de inicio de la actividad j . El objetivo es minimizar Z de modo que la duración del proyecto sea menor o igual al tiempo deseado. El modelo matemático para la minimización del costo de reducir el tiempo de las actividades. Para el PERT-CPM los cálculos se hacen hacia delante Para todas las actividades i, j definidas y donde TIP es el Tiempo de Inicio más Próximo de todas las actividades que se originan en la actividad i . D_{ij} es la duración de la actividad (i, j) .

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

A. SERVICIO LOCAL.

Se ingresó el modelo matemático en una hoja de cálculo. Para el escenario donde todos los EM son visitados en un solo día se obtuvo que la ruta más corta es OFL-HL1-HL6-HL5-HL3-HL2-HL4-OFL, la cual se recorre en 29,3 km en un tiempo de 60 mins con un costo total de 7029 MXN sin embargo la jornada es de 15 hrs. Por lo que el costo se incrementa a 10030 MXN pagando horas extra. Para el segundo escenario los resultados fueron los siguientes: para el primer día es de 11.9 km., 23 mins de recorrido OFL-HL3-HL5-OFL con un costo total de 2012 MXN; b) el segundo día la distancia es de 23.7 km, 47,4 mins para OFL-HL1-HL6-OFL y 2024 MXN; por consiguiente, se tiene que para el último día se realizará la siguiente jornada OFL-HL2-HL4-OFL con 22.6 km en un aproximado de

45 mins de recorrido, el costo sería de 2023 MXN. Tendiendo un costo total de 7030 MXN.

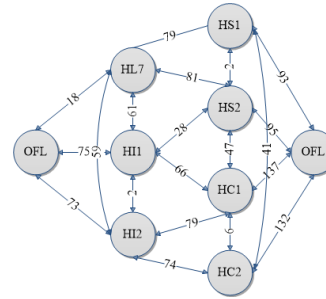


FIG.3. DIAGRAMA DE RED PARA EL SERVICIO REGIONAL (KMS).

B. SERVICIO REGIONAL.

Los costos y tiempos normales así como los quiebre, de acuerdo a las velocidades de carretera y ciudad propuestas y al rendimiento que se tiene por el gasto de gasolina dan como resultado que el uso de un solo IB es mejor que usar dos y disminuir el tiempo. El costo total al usar dos IBs es de 42000 MXN y el tiempo que se reduce a la mitad 11.3 hrs

IV. CONCLUSIÓN

Para la secuencia óptima dados los costos y horas-hombre disponibles por día, en el servicio local fueron encontradas tres rutas divididas en tres días, en los cuales puede llevarse a cabo el levantamiento del diagnóstico de MP, reduciendo el tiempo a un total de recorrido de 115.4 min y generando un costo total de 7030 MXN dado a que el servicio podrá ser llevado a cabo por un solo IB. En el servicio regional, se realizó la selección de la mejor opción a optimizar en el servicio, dado a que el solicitar los servicios de dos IBs provoca un aumento del costo total, sin embargo, el tiempo de realización del servicio se disminuye considerablemente (11.3 hrs). Se tiene como prioridad reducir el costo de la empresa, la selección de la optimización se dio de acuerdo a que un solo IB realice el MP, teniendo un ahorro de 21000 MXN sin necesitar otro IB. Otra de las aplicaciones que puede llegar a tener el método PERT-CPM es la adecuación de la rotación del personal dentro de una Institución de salud, optimizando recursos como horas laborales y salarios; la distribución de equipos, insumos y/o consumibles de acuerdo a las necesidades y localización de las áreas hospitalarias, etcétera.

Siendo éstas algunas muestras que avalan la aplicación de la IO dentro del área clínica.

RECONOCIMIENTOS.

En esta sección se quiere agradecer a las aplicaciones gratuitas que ofrece Google para conocer las distancias y tiempos de traslado que existen entre los destinos de interés; a los sitios de web gubernamentales que dan a conocer la información ecológica y económica de los vehículos en uso.

BIBLIOGRAFÍA

[1] González-Silva C.A y Hernandez, A. (1996) *Manual de mantenimiento de los servicios de salud: instalaciones y bienes de equipo*. Editado por Novaes H. y Hernandez A. en *Series: HSP-UNI/ Manuales operativos PALTEX*, Vol. II, n°6, ISBN 92 75 32181 7.

[2] Vilcahuaman, L. y Rivas, R. (2006) *Ingeniería Clínica y Gestión de Tecnología en Salud: Avances y Propuestas*. 1ra Ed, Lima, 50 p. ISBN 997-22885-0-1.

[3] Marmolejo-Correa, D (2015) *Hospitales locales, Mapa interactivo*, en Google Maps (Acceso 02 de septiembre del 2015: <https://www.google.com/maps/d/edit?mid=zNZZ4cdeu2ak.kaPqcehesF3g&usp=sharing>)

[4] INECC, CONUEE, PROFECO. *Eco-Etiquetado de Automóviles*; (Acceso 02 de septiembre del 2015). http://www.ecovehiculos.gob.mx/ecoetiquetado.php?vehiculo_id=11477.

[5] Hillier, F.S. y Lieberman, G.J., *Introducción a la Investigación de Operaciones*, 8va Ed. Mc Graw Hill, 2010.