

Un modelo matemático para la optimización de recursos de los proyectos científicos

Mario Alberto Zurita-Barrón¹, Jorge A. Ruiz-Vanoye², Ocotlan Diaz-Parra²,
Alejandro Fuentes-Penna², María Beatriz Bernabé-Loranca³

¹ IBM de México,
México

² Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, ESTI,
México

³ Benemérita Universidad Autónoma de Puebla,
México

jorge@ruizvanoye.com

Resumen. México, como economía emergente, requiere maximizar los resultados que se obtienen al invertir en proyectos de desarrollo. Una de las entidades públicas promotoras de estas inversiones es el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT). Los proyectos no siempre concluyen de manera exitosa, en especial por una planeación inadecuada de sus recursos, ocasionando retrasos, esfuerzo adicional, o fracasos. La presente investigación desarrolla y prueba un modelo matemático para determinar la factibilidad económica de los proyectos de innovación del CONACYT, comprobando la hipótesis de que los proyectos son una variante de la intratabilidad matemática, y por lo tanto, se puede obtener una aproximación bastante certera de los costos reales de los proyectos usando algoritmos y la teoría de la NP-Completo.

Palabras claves. México, CONACYT, proyectos de innovación tecnológica, modelo matemático, NP-completo.

A Mathematical Model for Optimizing Resources of Scientific Projects

Abstract. Mexico, as an emerging economy, requires maximizing the results obtained by investing in development projects. One of the promoters of these investments is the National Council of Science and Technology (CONACYT). The projects are well intentioned but not always successfully concluded, especially inadequate planning of its resources, causing delays, rework and in the worst case scenario, failure thereof, who in turn adversely affect the assignment of financial

sponsorship or other projects. This research develops and testing a mathematical model to determine the economic feasibility of the innovation projects of CONACYT, testing the hypothesis that the projects are a variant of the mathematical intractability, and therefore, you can get a fairly accurate approximation of the actual project costs using algorithms and the theory of NP-Completeness.

Keywords. Mexico, CONACYT, technology innovation projects, mathematical model, NP-completeness.

1. Introducción

En México, para el año 2013, el Gobierno Federal designó 5.4 mil millones de pesos en su Presupuesto de Egresos de la Federación para invertirlos en Proyectos de Innovación Tecnológica gestionados por el CONACYT. Muchos de éstos Proyectos terminan con sobrecostos y con subestimaciones. En el primer caso, el de los sobrecostos, el presupuesto sobrante es regresado a la Federación sin posibilidad de reasignación a otros proyectos; y para el caso de las subestimaciones, los proyectos terminan inconclusos y entran nuevamente a concurso para asignarles más recursos. Actualmente no existen estudios que indiquen el porcentaje de proyectos de innovación finalizados como exitosos, dudosos o fracasados en México, sin embargo Garza-Cantú, M. (2010), en la revista Política Digital indica que a nivel mundial los proyectos que finalizan

como exitosos oscilan entre el 32% y 40%, y consideran que en México el porcentaje es aún inferior.

Dentro de los Procesos del CONACYT, existe uno cuya función es determinar si los Proyectos de Inversión son aprobados o no, en base a criterios técnicos y económicos. Los pasos en forma general van desde la presentación del Proyecto por parte de los investigadores, la asignación de un grupo especializado de revisores en el área de competencia, la evaluación económica que determina la factibilidad del proyecto en base a lo solicitado en el proyecto. La evaluación final de factibilidad técnica se determina en base a criterios ya establecidos y se realiza un *checklist* de dichos criterios para calificar el cumplimiento de todos. La evaluación económica solo se limita a revisar si existen los suficientes fondos en las partidas.

2. Planteamiento del problema

Kimms (2001) menciona que un proyecto es un esfuerzo temporal y único que, con un conjunto de recursos, busca satisfacer objetivos específicos en un período de tiempo determinado. La innovación es la creación e implementación de nuevas ideas que den valor al cliente o negocio. Existen varios tipos de innovación de acuerdo a Schumpeter (1934): nuevos productos, nuevos métodos de producción, nuevos mercados, nuevas fuentes de suministro de materias primas u otros insumos, y nuevas estructuras de mercado en una industria.

Un proyecto de Innovación Tecnológica es aquel responsable de la creación e implementación de nuevas ideas tecnológicas que proporcionan un valor para el cliente o negocio.

La planificación eficaz de los Proyectos de Innovación Tecnológica depende de la planificación detallada, anticipándose a los problemas que pueden surgir. Los Problemas de Calendarización de Proyectos de Innovación Tecnológico o *Technological Innovation Project Scheduling Problems (TI-PSP)* son una variante del *Project Scheduling Problems (PSP)*. El PSP es un nombre genérico que se da a toda una clase de problemas en los que la mejor forma, tiempo, recursos y costos para la programación de proyectos son necesarios.

El problema estudiado en la presente investigación corresponde a un tema de PSP debido

a que involucra variables de asignación de recursos a tareas y procesos (computación), y como tal es un problema NP-Completo.

3. Justificación y propósito de la investigación

Actualmente no existen modelos matemáticos para optimizar recursos de los proyectos científicos, por lo que la presente investigación supone un hito en el tema buscando una solución matemática.

Adicionalmente, aunque se probará sobre proyectos de innovación del CONACYT, la investigación servirá de base para cualquier problema industrial que requiera optimizar costos. Por último, servirá para focalizar el uso de los recursos económicos de una forma más real.

El principal aporte social de la investigación será ampliar la cobertura de investigadores del presupuesto asignado al CONACYT y aumentar la finalización de los mismos. Se conseguirá conforme se determine de forma real el presupuesto de cada proyecto, para evitar sobrecostos y subestimaciones de los mismos.

4. Modelo matemático

El modelo matemático que se presenta en esta sección responde a las necesidades del CONACYT para optimizar los costos de los Proyectos de Innovación Tecnológica que les son presentados por los investigadores. El modelo contempla los parámetros generales que se incluyen en cada Proyecto.

Problema tratado en el artículo. El objetivo del artículo es desarrollar y probar un modelo matemático orientado a optimizar los costos de los proyectos de innovación tecnológica.

Cada proyecto incluye: recursos materiales (infraestructura e inmuebles que serán tratados como costos fijos del proyecto), recursos humanos (dedicados al desarrollo de diversas actividades del proyecto dependiendo de sus habilidades y nivel de conocimiento), y las actividades requeridas por el proyecto.



Fig. 1. Proceso de evaluación de Proyectos del CONACYT

Escenarios. Partiendo de las hipótesis acerca de la optimización de recursos y por ende la minimización de los costos de un proyecto, se presentará una alternativa por instancia para demostrar la forma en la que se debe distribuir las horas y recursos asignados a un Proyecto con el fin de observar el comportamiento que tienen, sin alterar las necesidades del propio Proyecto.

Los escenarios se mostrarán en tablas y gráficas para poder hacer un análisis más preciso de los resultados y obtener interpretaciones del mismo de manera más objetiva y certera.

Elementos del modelo. El modelo matemático del problema de optimización de recursos financieros de proyectos de innovación tecnológica tendrá los siguientes elementos:

Consideraciones del Modelo:

- Cada trabajador contemplado en el Proyecto tiene asignado un sueldo base fijo y una serie de habilidades con costos variables, los cuáles en su conjunto y dependiendo de la asignación que dé el modelo al Proyecto se determinará su salario final.
- Las horas de trabajo tendrán un límite.
- Cada trabajador podrá desempeñar más de una actividad si sus habilidades lo permiten.

La función objetivo es minimizar el costo del proyecto de innovación tecnológica. En forma general comprende la suma de todos los costos implicados, y cada costo individual se obtiene al multiplicar cada costo de determinada actividad por los costos fijos que emplee y por el tiempo ejercido



Fig. 2. Planteamiento del problema

para cumplir con dicha actividad. Función Objetivo se formula de la siguiente manera (Eq. 1):

$$Z = \min \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^j C_{p_i} A_k t_{k_{p_i}}, \quad (1)$$

$$i = \{1, 2, 3, \dots, n-1, n\},$$

$$k = \{1, 2, 3, \dots, j-1, j\},$$

donde C_{p_i} corresponde al costo del proyecto, A_k corresponde a las actividades del proyecto, t corresponde al tiempo de las actividades involucradas en el proyecto, i corresponde al número de proyecto seleccionado para apoyo y p corresponde al proyecto y k corresponde al número de las actividades programadas en el proyecto.

Restricciones del Modelo:

El presupuesto del proyecto B_{p_i} , es el resultado de la suma de los costos de cada una de las actividades más el costo de infraestructura IE del proyecto, en la Eq. 2 se presenta restricción 1:

$$\sum_{i=1}^n B_{p_i} = \sum_{k=1}^j C_{a_{k_{p_i}}} + IE_{p_i}, \quad (2)$$

$$i = \{1, 2, 3, \dots, n-1, n\},$$

$$k = \{1, 2, 3, \dots, j-1, j\},$$

donde i corresponde al índice del número de proyecto seleccionado, p_i corresponde al proyecto en cuestión, k corresponde al índice de actividades del proyecto, Ca corresponde al costo por actividad del

proyecto e IE corresponde al costo de la infraestructura solicitada en el proyecto P_i .

El costo total del presupuesto asignado a cada proyecto a priori B_d es el estimado del total del fondo CONACYT para proyectos F_T entre el número de solicitudes de proyectos debidamente seleccionados, en la Eq. 3 se presenta restricción 2:

$$B_d = F_T / \sum_{i=1}^n P_i, \quad (3)$$

$$i = \{1, 2, 3, \dots, n-1, n\},$$

donde P_i son los proyectos seleccionados y aceptados para apoyo y F_T es el total del presupuesto con que cuenta CONACYT para apoyar a las solicitudes de proyectos, por ejemplo si se tiene un total de 10 proyectos aceptados y un total del presupuesto de 1000 pesos a cada proyecto correspondería (1000/10=100 pesos estimado para cada proyecto). La suma del monto total del presupuesto del proyecto B_{pi} no debe exceder el costo total del presupuesto asignado B_d o disponible, en la Eq. 4 se presenta restricción 3:

$$\sum_{i=1}^n B_{p_i} \leq B_d, \quad (4)$$

$$i = \{1, 2, 3, \dots, n-1, n\}.$$

El costo por actividad de cada proyecto de innovación tecnológica involucra al costo base por trabajador W_w , más el costo adicional de la habilidad de cada trabajador S_{qW_w} , por el tiempo que tarda en realizar la actividad en cuestión t_{ak} , en la Eq. 5 se presenta restricción 4.

$$\sum_{k=1}^j C_{a_k, p_i} = \sum_{w=1}^m \sum_{q=1}^r (W_w + S_{qW_w}) t_{a_k}, \quad (5)$$

$$k = \{1, 2, 3, \dots, j-1, j\},$$

$$w = \{1, 2, 3, \dots, m-1, m\},$$

$$q = \{1, 2, 3, \dots, r-1, r\},$$

donde k representa el número de actividades del proyecto, w representa el número de trabajadores implicados en cada actividad y q representa el número de habilidades por cada trabajador.

El tiempo total de desarrollo del proyecto está restringido por los tiempos de convocatoria

normalmente son a 12 meses que equivalen a 365 días del año por 8 horas al día dando un total de 2920 horas involucrando sábados y domingos y días festivos. Si se toma un promedio de 20 días laborables por mes, se tendría 240 días laborables, si se multiplica por la jornada de 8 horas al día se tendrían 1920 horas en promedio estimado dedicadas a la elaboración del proyecto.

Entonces por actividad se tendría un tiempo de 1920 entre el número de actividades. Por ejemplo suponiendo que el proyecto tiene 25 actividades de la misma complejidad entonces $1920/25 = 76.8$ horas, por cada actividad. A esta cantidad se le restaría el 10% de 76.8 y eso correspondería al tiempo neto invertido en cada actividad.

Tabla. 1. Elementos del modelo matemático

w	Conjunto de personas involucradas (trabajadores) en el proyecto (workers)
q	Conjunto de habilidades del trabajador W (skills)
S_w	Costo por habilidad del trabajador W (skills)
T_p	Tiempo estimado de conclusión del proyecto
A_p	Conjunto de actividades del proyecto
C_{pi}	Costo del proyecto (sugerida por el algoritmo)
C_a	Costo por actividad del proyecto
B_p	Presupuesto solicitado del proyecto
IE_p	Costo estimado de Infraestructura y Equipo solicitado para el proyecto
B_d	Presupuesto CONACYT (\$) o recurso disponible para proyectos
D_p	Duración del proyecto
t_a	Duración de actividades
Mt	Margen de tiempo por actividad
s	Porcentaje de tiempo adicional considerado para cada actividad
H	Es el tiempo en horas laborable considerado por la empresa
F_T	Fondo total de dinero para proyectos CONACYT
C_{lpi}	Es el costo de infraestructura
C_{Epi}	Es el costo de equipo requerido para la elaboración del proyecto

Entonces dependiendo del número de actividades del proyecto la duración de cada actividad t_{ak} , en la Eq. 6 se presenta restricción 5:

$$t_{a_k} = \left(H / A_{p_i} - M_{t_{a_k}} \right),$$

$$k = \{1, 2, 3, \dots, j-1, j\}. \quad (6)$$

El tiempo estimado de conclusión del proyecto T_p se construye con los tiempos de duración del proyecto D_p más un margen de tiempo por actividad Mt , en la Eq. 7 se presenta restricción 6.

$$T_{p_i} = D_{p_i} + \sum_{k=1}^j M_{t_{a_k}},$$

$$i = \{1, 2, 3, \dots, n-1, n\}, \quad (7)$$

$$k = \{1, 2, 3, \dots, j-1, j\}.$$

El tiempo de duración del proyecto D_p es la suma de todos los tiempos que dura cada actividad considerada en el proyecto y esta debe ser menor al tiempo en horas laborable H considerado por la empresa para la realización del proyecto, en la Eq. 8 se presenta restricción 7:

$$D = \sum_{k=1}^j t_{a_k} < H. \quad (8)$$

El margen de tiempo por actividad Mt se considera como un margen de tiempo disponible en caso de no concluir la actividad en el tiempo establecido originalmente. Se toma un porcentaje de tiempo del total designado para el proyecto, es decir si el total de horas establecida para el proyecto es $H = 1920$ y el número de actividades consideradas A_{p_i} es de 25 entonces el tiempo de horas por actividad es de $t_{a_k} = 76.8$ horas. Considerando un $s = 10\%$ de tiempo adicional como margen de Mt tenemos $10 * 76.8 / 100 = 7.68$ horas, esta cantidad la restamos del t_{a_k} y obtenemos $76.8 - 7.68 = 69.12$ el tiempo dedicado a cada actividad. El porcentaje de tiempo queda a disposición de la empresa con respecto a las actividades del proyecto, en la Eq. 9 se presenta restricción 8.

$$M_{t_{a_k}} = (s) * (H / A_{p_i}) / 100\%,$$

$$H / A_{p_i} = 1920 / 25 = 76.8, \quad (9)$$

$$M_t = (10 * 76.8) / 100 = 7.68.$$

El costo estimado de Infraestructura y Equipo solicitado para el proyecto IE se considera como la suma de los costos de los equipos e infraestructura

considerados en el proyecto, en la Eq. 10 se presenta restricción 9.

$$IE_{p_i} = \sum_{l=1}^n (C_{I_{p_i}} + C_{E_{p_i}}), \quad (10)$$

donde C_{p_i} es el costo de infraestructura, el cual puede ser considerado como cero en caso de no ser solicitado, y $C_{E_{p_i}}$ es el costo de equipo requerido para la elaboración del proyecto.

5. Aplicación experimental del modelo y sus resultados

El modelo anterior se implementó en AIMMS. Para ello fue necesario seguir la recomendación de expandir el modelo y disminuir las anidaciones para una mejor comprensión y aplicación. Parte del modelo es desglosado dentro de las mismas premisas manuales para evitar mayores ciclos en el AIMMS y tener de esa manera una aproximación del resultado optimizado. El resto del modelo fue traducido a funciones de AIMMS para completar el diseño y su ejecución.

Se utilizó el modelo del problema de transporte para obtener la distribución óptima de horas laborales y su asignación a los empleados del Proyecto, y con estos resultados se aplicó en un modelo de fórmulas diseñado en Excel los resultados para obtener el costo total de la distribución hecha por AIMMS.

Las instancias fueron diseñadas a partir de datos reales cambiando los nombres de las empresas. Para los datos se emplearon fórmulas de azar en Excel tomando como rangos inferiores y superiores datos reales de los Proyectos de tal manera que no coincidieran para proteger la privacidad de los mismos. Para determinar los rangos se utilizaron como criterios el dato moda inferior y superior de: número de empleados, costo de los Proyectos, costo por hora de los servicios profesionales, sueldos base de los empleados por categoría, horas-hombre requeridas por actividad, costos fijos de cada Proyecto, número de actividades, horas-hombre ofrecidas por trabajador.

Para finalizar con esta etapa de alimentación de datos se contempló para todos los Proyectos un dato fijo de 230 días laborales con disponibilidad de 77 días máximo para cada empleado.

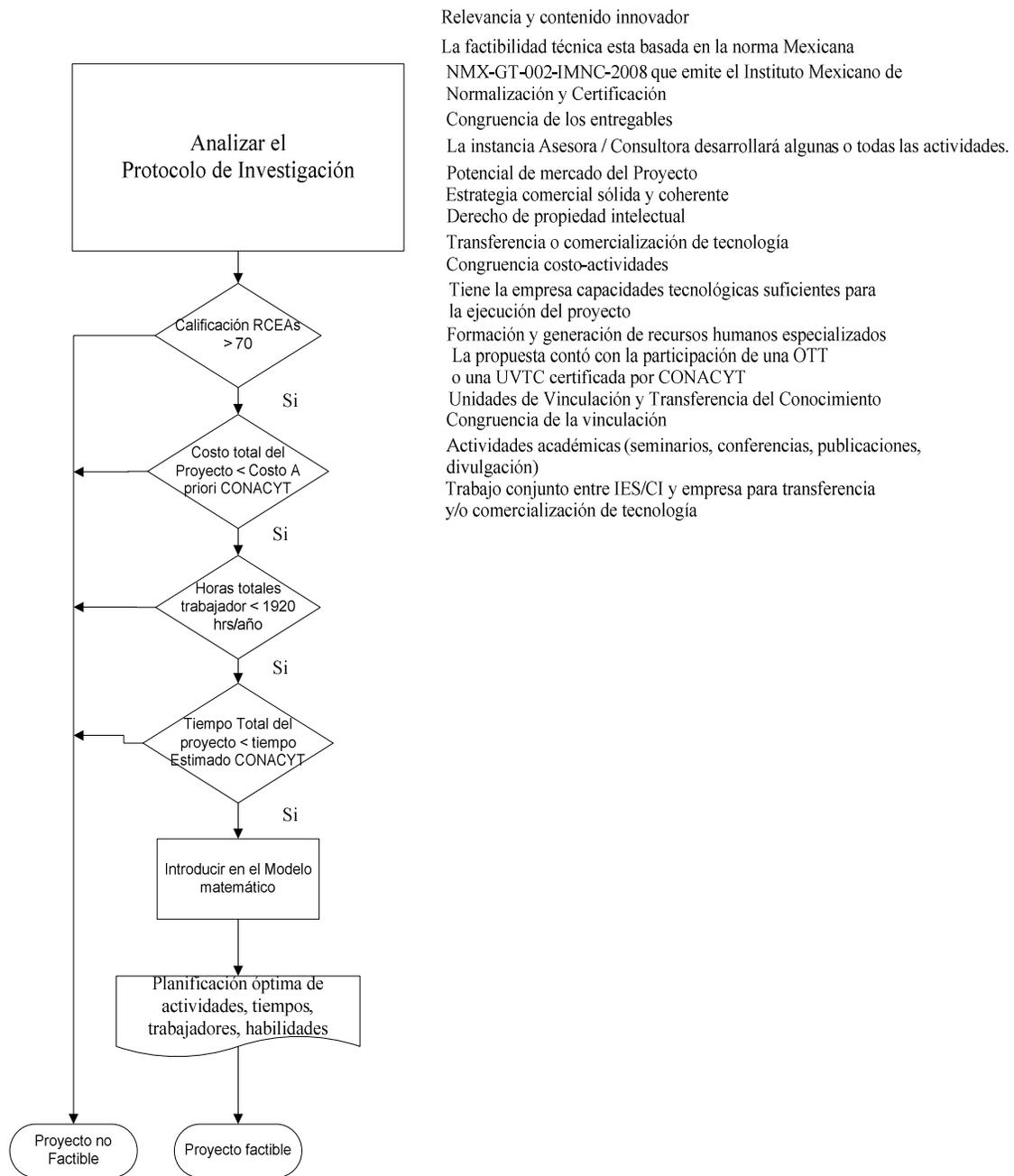


Fig. 3. Diagrama de flujo de proyectos factibles e infactibles

Variables. El resultado de estas variables depende del valor de los parámetros que se integran a la instancia y del comportamiento que se tenga al evaluar las rutas óptimas.

- CostoTotalProyecto: Abarca los costos fijos y variables del Proyecto y es calculado por el algoritmo mostrando el costo más bajo de acuerdo a la combinación de los elementos.

- Proyecto: Muestra la distribución óptima de las habilidades que cada trabajador aportará a las diferentes actividades del Proyecto.

Conjuntos. Los conjuntos representan las actividades empleadas por cada proyecto y la lista de habilidades de cada trabajador con sus máximos de horas. Es aquí donde se realizan los tres escenarios para observar el comportamiento de optimización del Modelo.

- Trabajadores. Empleados del proyecto con sus habilidades.
- ActividadesProyectos. Actividades que se requieren a lo largo del desarrollo del Proyecto de Innovación de acuerdo a los criterios de los investigadores.

Parámetros. Los parámetros son los datos de entrada que se dan al Modelo en el AIMMS para arrancar las simulaciones de resultados. Estos parámetros, al igual que los conjuntos, son valores fijos:

- CostoProyectoConacyt. Indica los costos por habilidades de los trabajadores asignados al Proyecto.
- HrsProyecto. Son las horas que cada actividad demanda por Proyecto.
- HrsTrabajadores. Son las horas que cada trabajador pone a disposición del Proyecto y que se utilizarán para ver los escenarios posibles con el fin de determinar el costo mas bajo del Proyecto.
- CostoInfraestructura. Es un costo fijo por Proyecto, y contempla los gastos de inmobiliarios, rentas, papelería, equipos eléctricos y electrónicos y cualquier otro que el Proyecto requiera.

Datos de Salida.

Distribución óptima de horas que cada trabajador otorgaría a cada actividad del Proyecto para optimizar los costos.

Cada Proyecto presenta una serie de trabajadores requeridos de acuerdo a sus necesidades y las horas que deben contratarse por cada actividad que desempeñen. La combinación es la óptima en busca del menor costo.

```

Procedure
MainExecution
Body
  solve MinimoCostoProyecto;
  if (MinimoCostoProyecto.ProgramStatus<>'Optimal') then
    empty Proyecto, CostoTotalProyecto;
  endif;

```

Fig. 4. Función principal representada en AIMMS

Type	Mathematical Progr
Identifier	MinimoCostoProyecto
Objective	CostoTotalProyecto
Direction	minimize
Constraints	AllConstraints
Variables	AllVariables
Text	
Type	Automatic
Violation penalty	
Comment	

Fig. 5. Función matemática – MinimoCosto Proyecto

Al final se realiza el cálculo del costo total con los datos obtenidos y éste dato alimenta la última fórmula en las tablas de Excel para el resultado final.

Presentación de resultados. La presentación del resultado se divide en dos secciones: “Datos de Entrada” y “Datos de Salida”. La primera contiene los datos con los que se alimenta la instancia a probar provenientes de los datos que el Excel arroja con las fórmulas basificadas en sistemas aleatorios inspirados en datos reales. La segunda sección presenta los resultados de la distrbución de horas y empleados por cada Proyecto, el costo total de acuerdo a la optimización y una gráfica de distribución de las cargas.

Cómputo de resultados. El AIMMS nos proporciona una tabla de resultados del cómputo que realiza por cada instancia. En esos resultados podemos ver el consumo de recursos y tiempo empleado.

Tabla general de resultados. En esta tabla se reflejan las 25 instancias probadas en el Modelo en AIMMS y Excel, presentando una comparación de los datos propuestos por los investigadores y los datos propuestos por el Algoritmo. Al final se presenta un resumen de la optimización general.

	CostoProyectoConacyt			Hrs Trabajadores
	A1	A2	A3	
T1H1	20.0	15.0	35.0	186
T1H2	35.5	10.0	5.0	200
T1H3	50.0	40.0	10.0	145
T2H1	38.0	10.0	15.0	130
T2H2	15.0	21.0	35.0	185
T2H3	11.0	2.0	10.0	130
T3H1	25.0	15.0	21.0	143
T3H2	13.0	15.0	12.0	152
T3H3	12.0	35.0	20.0	161
HrsProyecto	533	285	298	

Fig. 6. Ejemplo de valores de entrada



Fig. 7. Ejemplo de horas laboradas de los trabajadores

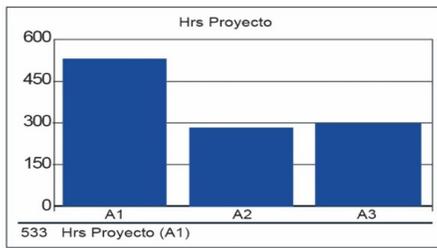


Fig. 8. Ejemplo gráfico de las horas de un Proyecto por actividad

	Proyecto		
	A1	A2	A3
T1H1	35	25	
T1H2			200
T1H3			98
T2H1		130	
T2H2	185		
T2H3		130	
T3H1			
T3H2	152		
T3H3	161		

Fig. 9. Salida optimizada de las horas requeridas por trabajador en cada actividad

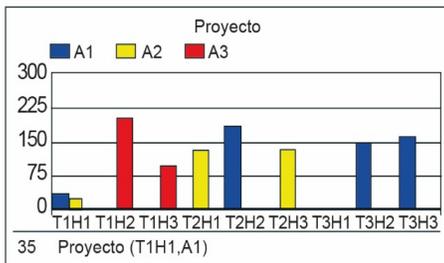


Fig. 10. Representación gráfica del resultado optimizado

CostoTotalProyecto 15298

Fig. 11. Resultado final del costo total del Proyecto

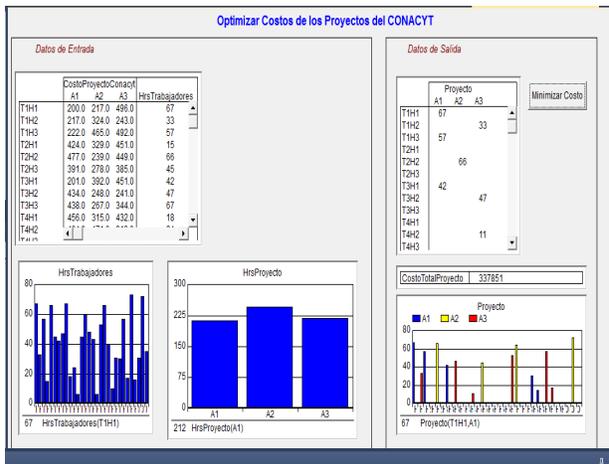


Fig. 12. Presentación de los resultados

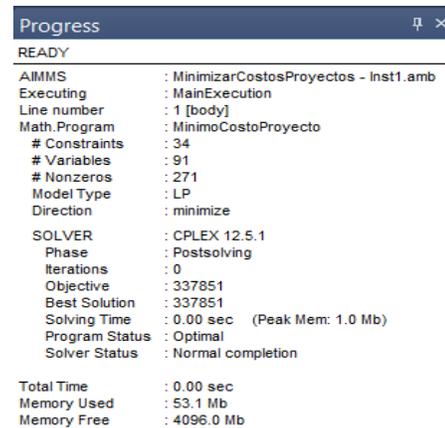


Fig. 13. Computación de los resultados

Proyectos de Innovación presentados al CONACYT Período 2014	Propuesto por los Investigadores		Propuesto por el Algoritmo	
	Costo Total	Trabajadores	Costo Total	Trabajadores
1 Grupo Moresa, S. A. de C.V.	\$ 2.991.372,00	10	\$ 2.369.352,00	9
2 Sistemas del Sureste, S. A. de C.V.	\$ 3.200.201,00	8	\$ 2.720.222,00	8
3 Centro de Estudios Universitarios de la Península	\$ 1.870.980,00	5	\$ 1.606.379,00	5
4 Electrónica del Sur, S. A. de C.V.	\$ 2.526.032,00	8	\$ 2.330.047,00	8
5 Editorial ABC	\$ 3.983.154,00	10	\$ 3.584.127,00	10
6 Librería Cristobal Colón	\$ 2.046.574,00	5	\$ 1.843.707,00	5
7 Universidad Tecnológica del Norte	\$ 2.536.594,50	8	\$ 2.449.983,00	8
8 Centro de Estudios Universitarios Latinoamericano	\$ 3.060.750,00	9	\$ 2.857.567,00	9
9 Computación del Istmo, S. A. de C.V.	\$ 1.627.835,00	5	\$ 1.399.088,00	5
10 Universidad Rey Juan Carlos I	\$ 2.471.530,00	8	\$ 2.002.958,00	8
11 Robótica y Sistemas Inteligentes, S. A. de C.V.	\$ 1.868.839,00	5	\$ 1.663.902,00	5
12 Dispositivos Médicos de Precisión, S. A. de C.V.	\$ 1.457.361,00	4	\$ 1.276.877,00	4
13 Exploración Marítima LNK, S. A. de C.V.	\$ 2.452.103,00	7	\$ 2.170.378,00	7
14 Grupo Industrial San Marcos, S. A. de C.V.	\$ 2.520.397,00	8	\$ 2.340.315,00	8
15 Sistemas de Facturación Electrónica del Centro, S. A. de C.V.	\$ 1.452.896,00	3	\$ 1.354.833,00	3
16 Servicio Express en Sistemas, S.A. de C.V.	\$ 2.031.360,00	6	\$ 1.875.375,00	6
17 Universidad Autónoma de Calakmul	\$ 1.374.169,00	4	\$ 1.235.648,00	4
18 Ferretería "El Martillo", S.A. de C.V.	\$ 1.825.459,00	5	\$ 1.683.191,00	5
19 Corrugados del Norte, S.A. de C.V.	\$ 2.237.584,00	6	\$ 1.912.631,00	6
20 Sistemas Inteligentes Azteca, S.A. de C.V.	\$ 893.809,00	3	\$ 848.947,00	3
21 Hospital Regional de Alta Especialidad de San Luis	\$ 3.427.003,00	9	\$ 3.090.920,00	9
22 Universidad Tecnológica de Occidente	\$ 3.163.327,00	10	\$ 2.812.441,00	10
23 Centro de Idiomas Omega	\$ 1.804.648,00	5	\$ 1.726.160,00	5
24 Metalistería Durango, S.A. de C.V.	\$ 2.050.390,00	7	\$ 1.901.827,00	7
25 Grupo Ferretero del Centro, S.A. de C.V.	\$ 1.394.860,00	4	\$ 1.221.252,00	4
Estadísticas finales de la Propuesta de Investigadores				
Total de proyectos evaluados		25		
Monto total de financiamiento	\$ 56.269.227,50			
Promedio de financiamiento por proyecto	\$ 2.250.769,10			
Número de trabajadores solicitados		162		
Promedio de trabajadores por proyecto		6		

Fig. 14. Tabla general de resultados

Datos de Entrada del Proyecto Presentado por: Sistemas de Facturación Electrónica del Centro, S. A. de C.V.									
Costos Fijos	\$	170.219,00							
Act Requeridas		5							
A1	A2	A3	A4	A5					
110	100	130	100	120					
Número de Trabajadores		3			Alg	3			
Costo Total		\$1.452.896,00			Alg	\$228.429,00			
Días laborales		230	77						
Trabajadores	Un1	Un2	A1	A2	A3	A4	A5	Total	
T1SB		12	\$ 30.440,00					\$365.280,00	
T1A1	55	11	\$ 331,00	\$ 152,00	\$ 94,00	\$ 318,00	\$ 2,00	\$ 9.867,00	
T1A2	45	9	\$ 224,00	\$ 335,00	\$ 80,00	\$ 276,00	\$ 259,00	\$ 10.566,00	
T1A3	15	3	\$ 27,00	\$ 205,00	\$ 376,00	\$ 150,00	\$ 266,00	\$ 3.072,00	
T1A4	35	7	\$ 256,00	\$ 289,00	\$ 59,00	\$ 432,00	\$ 390,00	\$ 9.982,00	
T1A5	65	13	\$ 177,00	\$ 405,00	\$ 466,00	\$ 413,00	\$ 395,00	\$ 24.128,00	
								\$422.895,00	
T2SB		12	\$ 32.700,00					\$392.400,00	
T2A1	40	8	\$ 429,00	\$ 146,00	\$ 121,00	\$ 479,00	\$ 318,00	\$ 11.944,00	
T2A2	55	11	\$ 267,00	\$ 170,00	\$ 416,00	\$ 128,00	\$ 392,00	\$ 15.103,00	
T2A3	35	7	\$ 412,00	\$ 99,00	\$ 350,00	\$ 191,00	\$ 344,00	\$ 9.772,00	
T2A4	35	7	\$ 135,00	\$ 67,00	\$ 474,00	\$ 437,00	\$ 155,00	\$ 8.876,00	
T2A5	50	10	\$ 47,00	\$ 110,00	\$ 96,00	\$ 482,00	\$ 359,00	\$ 10.940,00	
								\$449.035,00	
T3SB		12	\$ 30.727,00					\$368.724,00	
T3A1	65	13	\$ 163,00	\$ 422,00	\$ 395,00	\$ 137,00	\$ 281,00	\$ 18.174,00	
T3A2	15	3	\$ 220,00	\$ 189,00	\$ 418,00	\$ 65,00	\$ 430,00	\$ 3.966,00	
T3A3	5	1	\$ 154,00	\$ 115,00	\$ 230,00	\$ 65,00	\$ 297,00	\$ 861,00	
T3A4	10	2	\$ 309,00	\$ 178,00	\$ 277,00	\$ 134,00	\$ 171,00	\$ 2.138,00	
T3A5	60	12	\$ 46,00	\$ 244,00	\$ 494,00	\$ 390,00	\$ 233,00	\$ 16.884,00	
								\$410.747,00	

Fig. 15. Ejemplo de los datos de entrada de un Proyecto

Ejemplo de una instancia probada. Esta tabla de entrada de datos de una instancia se obtiene mediante fórmulas de Excel basadas en datos reales. Posteriormente sus resultados alimentan el modelo simplificado en AIMMS para optimizar costos.

Estadísticas de comparación. Al final de la experimentación se incluyen las estadísticas de comparación entre lo propuesto por los investigadores y lo propuesto por el algoritmo.

La interpretación de los resultados se ampliará en el siguiente capítulo.

Fórmulas para obtener datos aleatorios. Como se ha mencionado anteriormente, los datos están basados en reales propuestos en los Proyectos, sin embargo para garantizar la privacidad de los mismos se emplearon fórmulas de azar en Excel con rango inferiores y superiores para obtener los datos usados en las instancias de prueba. En los casos donde el rango inferior 0 se debe a que en algunas partidas los empleados no participaban y el costo erogado equivale a 0. Estas son las fórmulas empleadas:

Número de empleados.
ALEATORIO.ENTRE(3,10)

Costo de los Proyectos.
SUMA(i1:iX)

Costo por hora de los servicios profesionales.
ALEATORIO.ENTRE(0,500)

Sueldos base de los empleados por categoría.
ALEATORIO.ENTRE(10000,35000)

Horas-hombre por actividad.

Horas-hombre por actividad.
REDONDEAR.MAS(((ALEATORIO.ENTRE(0 \$D\$9)))/\$C\$3),0)

Costos fijos de cada Proyecto.
ALEATORIO.ENTRE(100000,350000)

Número de actividades.
ALEATORIO.ENTRE(3,10)

Horas-hombre por trabajador.
ALEATORIO.ENTRE(100,300)

6. Análisis de resultados

Un Proyecto de Innovación Tecnológica del CONACYT contempla una serie de variables que requieren cálculos anidados para poder obtener un resultado óptimo. Los niveles de anidación le suman una mayor complejidad a los cálculos que hacen necesario el uso de cómputo para poder realizarlo. Cada cálculo se basa en multiplicaciones de acuerdo a la profundidad de los niveles que se evaluarán en su conjunto para ir obteniendo el mejor resultado.

Estadísticas finales de la Propuesta de Investigadores	
Total de proyectos evaluados	25
Monto total de financiamiento	\$ 56.269.227,50
Promedio de financiamiento por proyecto	\$ 2.250.769,10
Número de trabajadores solicitados	162
Promedio de trabajadores por proyecto	6

Fig. 16. Estadísticas de los resultados propuestos por los Investigadores

Estadísticas finales de la Propuesta del Algoritmo	
Monto total ya optimizado	\$ 50,278,127.00
Monto recuperado	\$ 5,991,100.50
Promedio de financiamiento por proyecto optimizado	\$ 2,011,125.08
Número de trabajadores solicitados optimizado	161
Promedio de trabajadores por proyecto	6
Porcentaje de optimización (por monto total)	11%
Porcentaje de optimización (por número de trabajadores)	1%
Proyectos que podrían financiarse con la optimización	28
Trabajadores que podrían emplearse con la optimización	180

Fig. 17. Estadísticas de los resultados propuestos por el algoritmo

Proyectos de Innovación presentados al CONACYT Período 2014		Propuesto por los Investigadores		Propuesto por el Algoritmo		Optimización en costo	
		Costo Total	Trabajadores	Costo Total	Trabajadores		
1	Grupo Moresa, S. A. de C.V.	\$ 2,991,372.00	10	\$2,369,352.00	9	\$ 622,020.00	21%
2	Sistemas del Sureste, S. A. de C.V.	\$ 3,200,201.00	8	\$2,720,222.00	8	\$ 479,979.00	15%
3	Centro de Estudios Universitarios de la Península	\$ 1,870,980.00	5	\$1,606,379.00	5	\$ 264,601.00	14%
4	Electrónica del Sur, S. A. de C.V.	\$ 2,526,032.00	8	\$2,330,047.00	8	\$ 195,985.00	8%
5	Editorial ABC	\$ 3,983,154.00	10	\$3,584,127.00	10	\$ 399,027.00	10%

Fig. 18. Salida en resumen de 5 instancias

Estadísticas finales de la Propuesta de Investigadores	
Total de proyectos evaluados	25
Monto total de financiamiento	\$ 56,269,227.50
Promedio de financiamiento por proyecto	\$ 2,250,769.10
Número de trabajadores solicitados	162
Promedio de trabajadores por proyecto	6

Fig. 19. Estadísticas de los resultados propuestos por los Investigadores

Estadísticas finales de la Propuesta del Algoritmo	
Monto total ya optimizado	\$ 50,278,127.00
Monto recuperado	\$ 5,991,100.50
Promedio de financiamiento por proyecto optimizado	\$ 2,011,125.08
Número de trabajadores solicitados optimizado	161
Promedio de trabajadores por proyecto	6
Porcentaje de optimización (por monto total)	11%
Porcentaje de optimización (por número de trabajadores)	1%
Proyectos que podrían financiarse con la optimización	28
Trabajadores que podrían emplearse con la optimización	180

Fig. 20. Estadísticas de los resultados propuestos por el algoritmo

Para probar la optimización de los recursos económicos que son asignados al CONACYT para proyectos de innovación se emplearon como base los modelos matemáticos, principalmente el de ruta crítica de transporte para aterrizar el modelo.

El modelo matemático desarrollado ayudará a determinar los costos reales de los proyectos. Se presentan 25 instancias con datos ficticios pero inspirados en datos reales para preservar su privacidad. Los datos de cada instancia fueron ingresados en el modelo en AIMMS y se obtuvo su mejor resultado de acuerdo a una optimización en la combinación de las variables.

La implementación del Modelo y en particular los resultados obtenidos permiten observar de manera clara que se logran eliminar los sobrecostos en la muestra evaluada de Proyectos, al obtener un ahorro total de casi 6 millones de pesos que podrían ser empleados en financiar otros Proyectos.

Partiendo de la muestra se optimiza el 11% de los costos, podríamos tomar como premisa ese valor y trasladarlo a un monto total de \$1,500,000,000 que representarían una optimización de \$ 165,000,000 para financiar 82 Proyectos adicionales y generar 528 nuevos empleos de investigadores.

Interpretación de los resultados. En la Tabla General de Resultados se observan las instancias en cada línea con el Costo Total propuesto por los Investigadores y por el Algoritmo, y al final una columna con la optimización obtenida en cantidad y porcentaje de cada instancia, y en todos los resultados dieron a favor. Se observa una reducción promedio del 11% en todos los costos, con variaciones particulares que van desde el 3% hasta el 21% recuperado.

Análisis de las estadísticas de los resultados. La optimización de costos de los Proyectos permitirá

una reducción total de casi 6 millones de pesos tan solo en esta porción evaluada, permitiendo un financiamiento de 3 Proyectos adicionales que representarían 18 empleos nuevos. Con esto se reduce la cantidad de \$5'991,100.50 de sobrecostos en los Proyectos.

7. Conclusiones, contribuciones y futuras investigaciones

El conocimiento es la capacidad de actuar, procesar e interpretar información para generar más conocimiento o dar solución a un determinado problema, y puede ser interpretado y entendido por seres humanos e incluso por máquinas. Este conocimiento se produce principalmente por la investigación, y para ello se requiere financiamiento.

México cuenta con el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) para apoyar financieramente Proyectos de Innovación Tecnológica que tengan un impacto positivo en la sociedad. Sin embargo, como vimos al inicio del artículo, muchos Proyectos terminan sin éxito, o muchos otros no logran ser financiados por falta de recursos del mismo CONACYT, y es precisamente aquí donde se aprecia con mayor claridad la necesidad de optimizar los costos de los Proyectos para abarcar un mayor número de financiamiento.

En el desarrollo del Modelo se observa cómo se logra alcanzar tal optimización de una manera significativa con el fin primordial de contribuir al avance de la generación de conocimiento otorgando recursos económicos a un mayor número de propuestas de investigadores y emprendedores. En definitiva, se requiere dinero para generar conocimiento, y qué mejor que buscar la manera de optimizar los recursos que se tienen para poder cubrir un mayor número de Proyectos innovadores que impacten a nuestra sociedad. La misma optimización no solo representa un mayor número de Proyectos financiados, igualmente representa más empleos para investigadores.

El modelo matemático y las premisas teóricas del artículo no solo se limitan al problema tratado de optimizar costos en Proyectos de Innovación Tecnológica, igualmente puede ser empleado como base y desarrollo para optimizar costos de propuestas, proyectos, estimaciones y cualquier otro recurso económico donde el objetivo sea optimizar (y

primordialmente minimizar) costos, ya que es por demás sabido que cualquier reducción de costos se traduce en un mejor rendimiento empresarial.

Referencias

1. **Aceves, V. (2004).** *Dirección Estratégica*. México: McGraw-Hill Interamericana.
2. **AIMMS (2012).** *Advanced Interactive Multidimensional Modeling System*. <http://www.aimms.com/>. Última visita: 11 de Mayo de 2012.
3. **CONACYT (2013).** *Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología*. <http://www.conacyt.mx/>. Última visita: 20 de Febrero de 2013.
4. **Cornell-Pereira (2010).** *La implicación de los educandos en la obtención de algoritmos matemáticos*. España: Revista Científico Pedagógica. Educación y Sociedad.
5. **CPLEX (2012).** *CPLEX Optimizer*. <http://www.ibm.com/>. Última visita: 11 de Marzo de 2012.
6. **Dantzig, G. (1947).** *Annals of Mathematical Statistics*. Estados Unidos.
7. **Garza-Cantú, M. (2010).** El fracaso de los Proyectos TIC. *Política Digital*, 56, pp. 8–11.
8. **Gobierno Federal (2013).** *México Gobierno Federal*. México: Secretaría de Hacienda y Crédito Público. <http://www.ibm.com/>.
9. **IBM (2014).** *The International Business Machines Corporation*. <http://www.ibm.com/>, Última visita: 11 de Marzo de 2012.
10. **IBM ILOG CPLEX (2012).** *CPLEX Optimizer*. <http://www.ibm.com/>, Última visita: 11 de Marzo de 2012.
11. **Jaffe, A. M. (2006).** *The Millennium Grand Challenge in Mathematics*. US: Notices of the AMS.
12. **Kimms, A. (2001).** *Mathematical Programming and Financial Objectives for Scheduling Projects*. Publisher: Kluwer, Boston.
13. **Microsoft (2014).** *Microsoft Corporation*. <http://www.microsoft.com/>, Última visita: 11 de Agosto de 2014.
14. **Rubio-García, R., Gallego-Santos, R., Suárez-Quirós, J., & Cueto-González, J. E. (2012).** *Evaluación del alumno mediante nuevas técnicas en pruebas objetivas (tipo TEST)*. España: Escuela Universitaria de Ingenieros Técnicos Industriales de Gijón.
15. **Schumpeter, J. A. (1934).** The Theory of Economic Development: An Inquiry into Profits, Capital, Credit, Interest and the Business Cycle. *Journal of*

Comparative Research in Anthropology and Sociology, Vol. 3, No. 2, pp.137–148.

Mario Alberto Zurita Barrón es Doctor con mención honorífica en Planeación Estratégica y Dirección de Tecnología de la UPAEP, perteneciente al Programa Nacional del Posgrados de Calidad del CONACYT. Tiene los siguientes títulos de la industria de TI: IBM Certified Deployment Professional, *Microsoft Certified Systems Engineer and System Administrator Windows 2003/2000*, *Microsoft Certified Trainer, Harvard Business School Microeconomies for Competitiveness (New Strategies of Competitiveness: Firms, Clusters and Economic Development)*, y es socio del Institute of Industrial Engineers. Desde 2011 es IT Specialist en IBM de México.

Jorge A. Ruiz Vanoye recibió su grado del CENIDET en 2008. Actualmente es profesor Investigador de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo e Investigador Nacional Nivel I de CONACYT. Para más información ver www.ruizvanoye.com.

Ocotlán Díaz-Parra recibió su grado del CIICAP-UAEM en 2009. Actualmente es profesor Investigador de la Universidad Autónoma del Estado

de Hidalgo e Investigador Nacional Nivel I de CONACYT. Para más información ver www.diazparra.net.

Alejandro Fuentes-Penna, recibió su grado de la UPAEP en 2012. Actualmente es profesor de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Fue secretario Técnico del Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias - UNAM, entre otros. Para más información ver www.alexfontes.com.mx.

María Beatriz Bernabe Loranca ha sido 20 años docente en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla en la Facultad de Ciencias de la Computación. Obtuvo el grado de Licenciada en Ciencias de la Computación por la Escuela de Ciencias Físico-Matemáticas (Colegio de Computación) en 1994. Ella es Maestra en Ingeniería en Calidad por la Universidad Ibero-Americana donde obtuvo el grado en el año 2000 y en la UNAM en 2010 obtuvo el grado de Dra. en Ingeniería en Investigación de Operaciones y es miembro el SNI nivel I. Sus áreas de investigación son: Metaheurísticas, Técnicas Multiobjetivo, Diseño Territorial, Estadística y Optimización Combinatoria.

*Artículo recibido el 02/09/2015; aceptado el 15/12/2015.
Autor de correspondencia Mario Alberto Zurita Barrón.*