

Programación óptima de procesos con recursos limitados y múltiples modos de ejecución en proyectos de infraestructura eléctrica

Multimode resource constrained project scheduling problem in electric infrastructure projects

J. Arrieta¹, J. Mora²,

¹ ICE3 research group., Universidad tecnológica de Pereira, Colombia. Email: jsarrieta@utp.edu.co

² ICE3 research group., Universidad tecnológica de Pereira, Colombia. Email: jjmora@utp.edu.co

RECIBIDO: abril 21, 2017. ACEPTADO: junio 2, 2017. VERSIÓN FINAL: noviembre 1, 2017

RESUMEN

En este artículo se integran conceptos de optimización matemática con las particularidades e incertidumbres propias de la ejecución de proyectos de infraestructura eléctrica, como base fundamental de una metodología de apoyo para la toma de decisiones en la planeación de los proyectos, en la que una decisión errónea puede implicar sobrecostos y retrasos de gran impacto.

Esta metodología se fundamenta en la representación del problema de la ejecución de proyectos de infraestructura eléctrica en Colombia, mediante un modelo ajustado de un problema de programación de actividades con recursos limitados y múltiples modos de ejecución (MRCPSP). Se busca minimizar la duración del proyecto y los costos asociados al mismo, teniendo en cuenta que los recursos con los que se cuenta para el proyecto se clasifican en renovables y no renovables.

PALABRAS CLAVE: Optimización, mejoramiento de procesos, recursos renovables, recursos no renovables, infraestructura eléctrica.

ABSTRACT

This paper integrates concepts of mathematical optimization with the particularities and uncertainties of the execution of electric infrastructure projects, as a fundamental basis of a methodology to support decision making in project planning, where an erroneous decision may cause high over cost and delays.

This methodology is based on the representation of the problem of the execution of electric infrastructure projects in Colombia, through an adjusted model of Multimode resource constrained project scheduling problem in electric infrastructure projects (MRCPSP). It seeks to minimize the duration of the project and the costs associated with it, taking into account that the resources available for the project are classified as renewable and non-renewable.

KEYWORDS: Optimization, process improvement, renewable resources, non-renewable resources, electrical infrastructure.

1. INTRODUCCIÓN

En los proyectos de infraestructura eléctrica se ejecutan un conjunto de actividades orientadas a la puesta en operación de los nuevos activos en el sistema de transmisión. El orden, la simultaneidad, la cantidad de recursos y tiempos programados para cada una de estas

tareas, afectan directamente la toma de decisiones y el cumplimiento de los objetivos de los proyectos.

Obtener una programación óptima en un proyecto, cuando existen recursos limitados y diferentes formas de ejecutar las actividades (cambiando la cantidad de recursos), es un problema de gran complejidad y de



naturaleza combinatoria [1], [13]. La necesidad de coordinar restricciones y secuencias específicas con requerimientos (legales o normativos) y disponibilidades, dificulta una programación favorable en términos de costo y tiempo por parte de los miembros del equipo encargado del proyecto [14].

En este artículo se propone una metodología de programación óptima de actividades, cuyo objetivo es minimizar la duración y los costos de un proyecto cuando éste cuenta con una cantidad limitada de recursos renovables (que se ocupan de la ejecución de una actividad y se liberan al terminar la misma para iniciar otra, sucesivamente durante todo el proyecto), y no renovables (recursos cuya disponibilidad va disminuyendo a medida que se consumen), y en los que, en casos puntuales, ciertas actividades están sujetas a relaciones de precedencia. Adicionalmente, cada una de las actividades a desarrollar en el proyecto puede presentar distintas formas o “modos” de ejecución. Cada modo tiene asociado una duración y un consumo de recursos determinados [2], [3].

Esta clase de problema es conocido en la documentación científica, como un problema de programación de actividades con recursos limitados y múltiples modos de ejecución (MRCPSP en inglés), el cual ha sido objeto de estudio en el ámbito de la investigación de operaciones. En este marco, normalmente se plantea como un problema de optimización matemática [4], [12].

En los últimos años, se han desarrollado un gran número de propuestas y técnicas para resolver el problema desde un punto de vista teórico y computacional [1], [14]. Sin embargo, actualmente no se encuentran trabajos que materialicen estos conceptos al contexto de la aplicación práctica o industrial, considerando las particularidades e incertidumbres propias de la ejecución de proyectos de infraestructura de los sistemas eléctricos de potencia.

El aporte principal de este artículo consiste entonces en representar el problema de la ejecución de proyectos de infraestructura eléctrica en Colombia, mediante un modelo ajustado de MRCPSP para minimizar la duración y los costos del proyecto, con recursos renovables y no renovables.

Como resultado principal, se propone una metodología de apoyo para la toma de decisiones en la planeación de los proyectos.

2. PROGRAMACIÓN DE ACTIVIDADES CON RECURSOS LIMITADOS Y MÚLTIPLES MODOS DE EJECUCIÓN

2.1. Definición del problema

La búsqueda de una programación óptima en un proyecto, es un problema de gran complejidad debido a la naturaleza combinatoria del mismo, ya que se coordina restricciones y secuencias tecnológicas con requerimientos y disponibilidades de recursos.

La programación de proyectos con recursos limitados y múltiples modos de ejecución, denominada MRCPSP (Multi-Modal Resource Constrained Project Scheduling), es un tema de gran interés por parte de la comunidad científica. La literatura técnica especializada cuenta con gran número de trabajos en los cuales se muestran diferentes técnicas de optimización combinatoria para resolver el problema. Sin embargo, pocos trabajos se enfocan en desarrollar un modelo ajustado del problema que permita obtener una solución específica y de calidad.

Actualmente en Colombia, la ejecución de proyectos de infraestructura eléctrica requiere de estudios académicos rigurosos, que permitan obtener una representación matemática para su planeación y las técnicas de solución asociadas.

2.2. Modelo matemático

Para la ejecución de un proyecto, inicialmente se cuenta con un número entero de actividades a realizar. Todas las actividades se tienen que ejecutar y cada una de ellas se debe realizar de manera continua, sin pausas o interrupciones una vez se les da inicio. Adicionalmente, se consideran dos actividades ficticias 0 y n+1, que sirven para representar el inicio y el fin del proyecto. Todas las actividades forman el conjunto $V = \{0, 1, \dots, n, n+1\}$. Cada actividad i tiene un tiempo de ejecución asociado p_i y las actividades ficticias tienen un tiempo de procesamiento igual a cero, es decir, $p_0 = p_{n+1} = 0$ [3].

Normalmente, la programación de proyectos se refiere a la asignación de tiempos de inicio de las actividades a realizar y también esta asociada con la toma de decisiones en la manera de ejecutar una actividad. Con este modelo, se considera la asignación de actividades o de recursos a diferentes equipos de trabajo [4].

A partir de lo expuesto, se incluye los siguientes conceptos, el primero de ellos es el conjunto M_i , asociado a los modos de ejecución de la actividad i . La variable $x_{im} \in \{0,1\}$, $i \in V$, $m_i \in M_i$, la cual indica que la actividad i se realiza en el modo de ejecución m_i . Como restricción, cada actividad se debe ejecutar en un único modo de ejecución, como se representa en (1).

$$\sum_{m_i \in M_i} x_{im_i} = 1, i \in V \quad (1)$$

El modelo de MRCSPS establece una diferenciación entre dos tipos de recursos: R^v denota los recursos no renovables (recursos cuya disponibilidad va disminuyendo a medida que se consumen), y R^p los recursos renovables (recursos que se ocupan de la ejecución de una actividad y se liberan al terminarla para iniciar otra de forma sucesiva durante todo el proyecto). Ambos tipos de recursos tienen un parámetro de disponibilidad asociado R_k , $k \in R^v \cup R^p$. [5] Adicionalmente, se define la variable r_{ikm_i} como el consumo de recurso k requerido por la actividad i en el modo de ejecución m_i . De acuerdo a lo anterior, el consumo de recursos no renovables k por una actividad i se calcula de acuerdo a (2).

$$r_{ik}^v = \sum_{m_i \in M_i} r_{ikm_i} x_{im_i}, \quad i \in V, k \in R^v \quad (2)$$

El consumo global de un recurso no renovable para una secuencia de ejecución programada está dado por (3).

$$r_k^v(x) = \sum_{i \in V} r_{ik}^v(x), \quad k \in R^v \quad (3)$$

Un programa de ejecución del proyecto es factible siempre y cuando se cumpla con el límite de consumo de recursos no renovables (4).

$$r_k^v(x) \leq R_k, \quad k \in R^v \quad (4)$$

Además del consumo de recursos, los tiempos de ejecución también dependen del modo de ejecución asignado. Por lo tanto, el tiempo de la actividad i en el modo m_i se denota por p_{im_i} . Después de asignar un modo de ejecución, el tiempo de procesamiento de la actividad está dado por (5).

$$p_i = \sum_{m_i \in M_i} p_{im_i} x_{im_i}, \quad i \in V \quad (5)$$

Para las restricciones asociadas a las actividades predecesoras y sucesoras, se consideran todos los tipos de relaciones de precedencia: Fin – Comienzo FC, Comienzo – Comienzo CC; Fin – Fin FF o Comienzo – Fin CF, donde se incluyen los períodos de adelanto o retraso entre actividades. Ésta consideración dentro del modelo matemático formulado en este trabajo, constituye un aporte a destacar, debido a que, en versiones del modelo encontradas en la literatura, únicamente se contemplan las relaciones de tipo FC.

$$S_j - S_i \geq p_i(x) + diasFC_{ij}(x) \quad j \in sucFC(i) \quad (5)$$

$$S_j - S_i \geq diasCC_{ij}(x) \quad j \in sucCC(i) \quad (6)$$

$$S_j - S_i \geq p_i(x) - p_j(x) + diasFF_{ij}(x) \quad j \in sucFF(i) \quad (7)$$

$$S_i - S_j \geq p_j(x) + diasCF_{ij}(x) \quad j \in sucCF(i) \quad (8)$$

Se considera que la actividad i puede tener un conjunto de actividades sucesoras $sucFC(i)$, $sucCC(i)$, $sucFF(i)$ o $sucCF(i)$, dependiendo de la relación de precedencia con las demás actividades, al igual que un periodo de retraso o adelanto establecido en días.

Los requerimientos de recursos renovables para la actividad i en la secuencia de ejecución programada x se representan con la expresión (9).

$$r_{ik}^p = \sum_{m_i \in M_i} r_{ikm_i} x_{im_i}, \quad (9)$$

Así, el conjunto de actividades en ejecución durante el periodo t programado para un horizonte de tiempo S y una secuencia de ejecución programada x se expresa con (10).

$$A(S, t, x) = \{i \in V \mid S_i \leq t < S_i + p_i(x)\} \quad (10)$$

Con esta definición, es posible formular el consumo de recursos renovables programados para un horizonte de tiempo S con respecto a una secuencia de ejecución asignada x , tal como se presenta en (11).

$$r_k^p(S, t, x) = \sum_{i \in A(S, t, x)} r_{ik}^p(x), \quad k \in R^p, t \geq 0 \quad (11)$$

Para la formulación completa del problema, es necesario establecer una cota superior de la duración de todo el proyecto y declarar las restricciones de consumo de recursos renovables, utilizando el mayor tiempo de ejecución de cada actividad i , tal como se presenta en (12) [6].

$$\bar{d} = \sum_{i \in V} \max p_{im_i} \quad (12)$$

Con lo anterior, se tienen todos los elementos necesarios para declarar las restricciones de recursos renovables para el MRCSPS, segun se presenta en (13) [7].

$$r_k^p(S, t, x) \leq R_k(x), \quad k \in R^p, 0 \leq t \leq \bar{d} \quad (13)$$

Cuando se codificar la expresión (13) de forma determinística, se presentan dificultades para declarar el conjunto de actividades activas en un tiempo t programado para un periodo de tiempo S y una secuencia de ejecución programada x , debido a que la ejecución de cada actividad depende de las variables de

decisión. A continuación, se propone una estrategia que considera la implementación de variables binarias, que permite expresar el consumo de recursos renovables de una manera novedosa y práctica.

Inicialmente se introduce la variable binaria $a_{(im_t)}$, la cual sólo es igual a 1 durante el tiempo de ejecución de la actividad i en el modo de ejecución m para el periodo de tiempo t . A partir de este supuesto se obtiene (14).

$$a_{im_t} = \begin{cases} 1 & S_i \leq t < S_i + p_i \\ 0 & t < S_i \\ 0 & t \geq S_i + p_i \end{cases} \quad (14)$$

Posteriormente es necesario plantear la intersección de variables binarias para determinar los rangos en los que $a_{(im_t)}$ puede tomar el valor de 1, como se muestra de (15) a (17).

$$a_{im_t} \geq x_{im} + a_{1it} + a_{2it} - 2, \quad i \in V, m \in M_i, t = 0 \dots \bar{d} \quad (15)$$

$$BigM * a_{1it} \geq (S_i + p_i) - t + 1, \quad i \in V, t = 0 \dots \bar{d} \quad (16)$$

$$BigM * a_{2it} \geq t - S_i, \quad i \in V, t = 0 \dots \bar{d} \quad (17)$$

Con las restricciones binarias planteadas se garantiza que la actividad i se ejecute de forma ininterrumpida, desde su periodo de inicio S_i y durante su duración p_i respectiva al modo de ejecución m_i asignado. El parámetro BigM es ampliamente usado en este tipo de formulaciones binarias para “activar” o “desactivar” una restricción según el valor que tome la variable binaria asociada.

De esta manera es posible formular el consumo de recursos renovables durante el proyecto mediante (18).

$$r_{kt}^p = \sum_{i \in V} \sum_{m \in M_i} r_{ikm_i} a_{im_t}, k \in R^p, \quad t = 0 \dots \bar{d} \quad (18)$$

Para formular un problema multi-objetivo, donde no solo se busque minimizar el tiempo de ejecución del proyecto sino también su costo, se usa (19).

$$\text{Min } (g1 * S_{n+1} + g2 * r_k^v(x)) \quad s.a. \quad (19)$$

Donde $g1$ y $g2$ corresponden a factores de ponderación de la función objetivo que permiten dar mayor importancia a uno de los objetivos. Para efectos de comparación con el sistema de prueba de referencia, se toma $g1=1$ y $g2=0$.

3. TÉCNICAS DE SOLUCIÓN

En el proceso de implementación de la técnica de solución para el modelo matemático que representa el problema, es necesario identificar a qué tipo de problema pertenece. Los problemas de optimización matemática se clasifican según los siguientes aspectos [8]:

- a. Forma de su función objetivo y de sus restricciones (Programación Lineal y Programación No Lineal).
- b. Tipo de variables (Programación Entera, Programación Mixta y Programación Binaria).
- c. Existencia o no de restricciones (Programación Irrestricta y Programación Restricta).
- d. Dimensión de sus variables (Programación en una variable y programación Multivariable).
- e. Dimensión de la función objetivo (Programación Mono-objetivo y Programación Multiobjetivo).
- f. Complejidad computacional del problema (Problemas tipo P, Problemas tipo NP y Problemas tipo NP completos).

A partir de la clasificación del problema a resolver, se debe seleccionar e implementar la técnica de solución adecuada. El modelo matemático del MRCPS se clasifica dentro de los problemas de programación lineal entera mixta y restricta. Además, tiene grado de complejidad computacional NP completo, para proyectos con un gran número de actividades [4].

Según análisis de referencias se demuestra que, entre mayor sea el número de actividades consideradas para el modelo de MRCPS, se hace más difícil llegar a una solución óptima con una técnica de solución exacta debido a la explosión combinatoria de soluciones factibles [9]. Por lo anterior, en la práctica los métodos aproximados como las heurísticas y metaheurísticas son las más adecuadas para encontrar soluciones factibles y cercanas al óptimo global del problema [4].

La mayor parte de los métodos exactos usados para resolver este problema se basan en procedimientos de ramificación y poda (Branch and Bound) [10]. De forma general, estos procedimientos enumeran las soluciones posibles a través de un árbol de búsqueda. La eficiencia de estos métodos depende de la cota inferior seleccionada para el problema, que se obtiene por diferentes procedimientos, como la relajación de restricciones del consumo de recursos [4].

El método de solución usado en este trabajo es una técnica exacta, mediante el uso del solver CPLEX 12.5 (desarrollado por IBM) por medio del lenguaje de

programación matemática AMPL. La utilización de este tipo de herramientas es común en los procesos de optimización, debido a que cuentan con técnicas especializadas de alto nivel, que permiten obtener una adecuada representación matemática de los procesos.

En este caso, el lenguaje AMPL es el utilizado para articular todos los componentes del problema de optimización: el modelo matemático, los datos de entrada y la técnica de solución. El “solver” es el algoritmo que contiene la técnica de solución óptima. Un mismo modelo desarrollado en AMPL puede ser solucionado con diferentes “solvers”.

4. MRCPS APLICADO A PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA ELÉCTRICA

Para implementar la metodología propuesta a la ejecución de proyectos de infraestructura eléctrica, se sigue lo presentado en esta sección.

Inicialmente se parte de un cronograma de actividades, normalmente formulado en el software Microsoft Project. En éste se define tanto la duración como las relaciones de precedencia de cada actividad.

Posteriormente, se construye una tabla en donde de acuerdo a la preparación de la oferta del proyecto, a cada actividad se le asigna una variedad de modos de ejecución en los que ésta se puede ejecutar. También se especifican los requerimientos de recursos renovables y no renovables asociados a cada uno de los modos de ejecución definidos.

Luego se debe realizar un preprocesamiento de toda la información del proyecto consolidada en esta tabla, para obtener un archivo de datos con los parámetros de entrada del problema. De igual forma se programa el modelo matemático del MRCPS en lenguaje AMPL, donde se declaran todas las variables, parámetros, conjuntos, restricciones y función objetivo.

Finalmente, AMPL se encarga de articular toda la información suministrada en el archivo de datos, con el modelo programado para posteriormente entregarla al solver CPLEX 12.5, encargado de encontrar la solución óptima del problema. Esta solución contiene la siguiente información básica:

a. Instante de tiempo en el que inicia cada una de las actividades del proyecto, respetando todas las

relaciones de precedencia propuestas en el marco del cronograma.

b. Modo de ejecución en que se debe realizar cada actividad.

A partir de la información anterior, se obtiene una programación del proyecto en la que se garantiza el menor tiempo, menor costo o ambas cosas, dependiendo de lo expresado en la función objetivo.

La nueva metodología propuesta permite guiar la ejecución óptima de proyectos de infraestructura eléctrica, con recursos limitados y múltiples modos de ejecución.

5. PRUEBAS Y RESULTADOS

Para validar el funcionamiento de la metodología propuesta e ilustrar la aplicación del MRCPS en la ejecución de proyectos de infraestructura eléctrica, se toma un sistema de prueba de la base de datos PSPLIB [11]. Esta información es comúnmente utilizada para la investigación de este tipo de problemas. Todas las actividades del sistema de prueba se asignan a los hitos de actividades relacionadas con la ejecución de proyectos de infraestructura eléctrica, sin modificar ninguno de sus parámetros.

Adicionalmente, si se considera que cualquier relación de precedencia puede ser expresada en términos de otra (FC en términos de una FF, CC o CF), también se realizan estas modificaciones al sistema de prueba para contar con todo tipo de relaciones de precedencia, sin afectar los parámetros y la solución óptima de referencia para dicho sistema de prueba.

Para la realización de las pruebas, inicialmente se implementa el sistema propuesto en MS Project, teniendo en cuenta solo un modo de ejecución para las actividades y sin considerar recursos como se muestra en la figura 1.

Posteriormente, se genera la tabla que incluye los diferentes modos de ejecución y los recursos requeridos por cada actividad como se muestra en el Anexo 1.

Después de tener todos los parámetros de entrada requeridos por la metodología, se realiza el procesamiento de la información, con el fin de generar un archivo de datos que contiene toda la información en diferentes matrices, como lo requiere el modelo matemático del problema.

	EDT	Nombre de tarea	Duración	Sucesoras	Predecesoras
1		General	0 mss	3FF+1 ms;4CC	
2		Adjudicación de la convocatoria	2 mss	6;9;14	
3		Contrato de conexión, acuerdos técnicos y administrativos	1 ms	5CC+1 ms;8CC+1 ms;1 1FF+1 ms	
4	▲	Gestión ambiental y predial	4 mss	12FF+3 mss;16;20	1CC
4.1		Diagnóstico ambiental de alternativas DAA	2 mss	9CC+2 mss;17	3CC+1 ms
4.2		Estudio de impacto ambiental EIA y obtención de la licencia	1 ms	7;12CC+1 ms;18CC+1 ; 2	
4.3		Analisis de alternativas y negociación del lote	1 ms	8CC+1 ms;17	6
5	▲	Diseños	1 ms	15;16	3CC+1 ms;7CC+1
5.1		Diseño conceptual y diseño basico	5 mss	10;13;16	2;5CC+2 mss
5.2		Diseño detallado	2 mss	12CC+2 mss;20	9
6	▲	Bienes	3 mss	14CC+3 mss;15FF+1 m	3CC+1 ms
6.1		Equipos de alta tensión y sistemas secundarios	3 mss	19;21	4FF+3 mss;6CC+1
6.2		Nacionalización y transporte de equipos	2 mss	15CC+2 mss	9
7	▲	Obras civiles	3 mss	18	2;11CC+3 mss
7.1		Adecuación de terreno y obras complementarias	1 ms	21	8;11FF+1 ms;13C
7.2		Fundaciones y edificaciones	4 mss	21	4;8;9
8	▲	Montaje	5 mss		5;7
8.1		Montaje de equipos de alta incluyendo estructuras	10 mss	20	6CC+1 ms;14
8.2		Montaje de sistemas secundarios incluyendo cableado y conexionado	4 mss	22FF	11CC+3 mss;12
9	▲	Pruebas	1 ms	22FF	4;10;18
9.1		Pruebas individuales y de conjunto	2 mss	22FF	12;15;16
10		Puesta en servicio	0 mss		19FF;20FF;21FF

Figura 1. Sistema de prueba implementado en MS Project.

Finalmente se ejecuta AMPL el cual se encarga de articular toda la información suministrada en los archivos de datos e interactuar con el “solver” CPLEX 12.5, para encontrar el óptimo del problema. Para el caso del ejemplo de aplicación propuesto, los resultados obtenidos de presentan en la tabla 2.

Teniendo en cuenta que la duración de la primera y de la última actividad es igual a cero, debido a que son los hitos que marcan el inicio y el fin del proyecto, el instante de tiempo en que la actividad final inicia es igual a la duración óptima del proyecto. En este caso, la duración del proyecto es de 33 unidades de tiempo, la cual se constituye como el resultado óptimo de este sistema de prueba.

Tabla 1. Resultado óptimo.

Actividad	Modo de ejecución	Periodo de inicio	Actividad	Modo de ejecución	Periodo de inicio
1	1	0	12	3	17
2	1	0	13	3	10
3	1	0	14	1	6
4	3	0	15	3	20
5	1	1	16	1	20
6	3	2	17	2	18
7	2	9	18	2	15
8	2	15	19	2	27
9	2	3	20	2	25
10	2	14	21	3	24
11	2	1	22	1	33

A partir de la realización de las pruebas, se verificó que aun reescribiendo las relaciones de precedencia Fin-Comienzo en términos de otras relaciones, esta modificación al modelo no altera su solución.

Como se observa en la tabla 1, el resultado de la metodología implementada selecciona el modo de ejecución para cada una de las actividades e indica el periodo en el cual se debe iniciar una actividad. Considerando que, para este caso, la actividad 22 es ficticia, no tiene predecesoras y tiene una duración igual a 0, la duración total de la ejecución del proyecto es de 33 unidades de tiempo. Este resultado corresponde a la respuesta óptima para el problema de referencia tomado de la base de datos PSPLIB [11].

De esta manera, la nueva metodología implementada garantiza la obtención de la solución óptima al problema, considerando cualquier tipo de relación de precedencia y restricciones binarias que aseguran que cada actividad se ejecute de forma ininterrumpida desde su periodo de inicio y durante su ejecución.

6. CONCLUSIONES

En este artículo se presenta el desarrollo de una metodología novedosa para el apoyo en la toma de decisiones, durante la programación óptima de actividades en proyectos de infraestructura eléctrica, con recursos limitados y múltiples modos de ejecución. Se utilizan herramientas desarrolladas para procesar de forma automática, los datos provenientes de MS Project

y suministrar los datos de entrada para resolver el modelo matemático mediante AMPL.

Como resultado valioso adicional, se presentó el desarrollo de un modelo matemático genérico, que requiere datos de entrada y procesamiento mínimos, gracias a la formulación disyuntiva (combinación de variables binarias y parámetro bigM), para indicar la ejecución de una actividad durante un periodo de tiempo determinado. Este aspecto constituye una diferencia con otros modelos que utilizan datos adicionales como el Comienzo Temprano y Fin Temprano (Earliest/Latest start), que acotan el espacio de solución con el fin de facilitar su implementación.

Adicionalmente a lo anterior, en este documento se presenta el desarrollo de la formulación matemática, que permite incluir en el modelo todas las relaciones de precedencia (FC, CC, FF, CF), considerando adelanto o retraso.

Finalmente, la nueva metodología implementada garantiza la obtención de la solución óptima (menor tiempo, menor costo o ambas), al problema de ejecución de proyectos de infraestructura eléctrica, los cuales son de recursos limitados y múltiples modos de ejecución, mediante la toma de decisiones y la asignación de recursos. Este aspecto permite obtener mejores soluciones que las propuestas por otras plataformas orientadas a la administración y el seguimiento de proyectos.

7. REFERENCIAS

- [1] BLAZEWICZ, Jacek. Scheduling Computer and Manufacturing Processes. Softcover of Or (7 de diciembre de 2010). Bonn Alemania. Springer. 496 p.
- [2] BLAZEWICZ, Jacek. Scheduling subject to resource constraints: classification and complexity. Discrete Applied Mathematics, 1983, pp 11-24.
- [3] STURM, Martin. Solving Multimodal Resource Constrained Project Scheduling Problems. Wien, Austria, 2012, 20 p. Trabajo de grado en inteligencia computacional. Universidad Técnica de Viena. Facultad de ingeniería.
- [4] CERVANTES POSADA, Mariamar. Nuevos Métodos Meta Heurísticos para la Asignación Eficiente, Optimizada y Robusta de Recursos Limitados. Valencia, 2009, 14 p. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. Facultad. Departamento de Sistemas Informáticos y Computación.
- [5] Talbot, Brian. Resource-Constrained Project Scheduling with Time-Resource Tradeoffs: The Nonpreemptive Case. Management Science, 28, 1982, 1197 – 1210
- [6] HARTMANN, Sönke. Project Scheduling under Limited Resources. 1. Berlin: Springer, 1999. 221 p.
- [7] NEUMANN, Klaus. Project Scheduling with Time Windows and Scarce Resources. 1. Karlsruhe: Springer, 2002. 385.
- [8] ESCOBAR, Antonio. Programación lineal entera. 1. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira, 2007. 251 p.
- [9] KOLISCH, Rainer. Local search for nonpreemptive multi-mode resource-constrained project scheduling. IIE Transactions, 1997, 29 p.
- [10] DEMEULEMEESTER, Erik. Project Scheduling: A Research Handbook. 1. New York: Springer, 2002. 675 p.
- [11] R. Kolisch und S. Hartmann (2005). PROJECT SCHEDULING PROBLEM LIBRARY – PSPLIB [Online]. [Citado Nov. 2016].<http://www.omdb.wi.tum.de/psplib/getdata.cgi?mode=mm>.
- [12] BRUCKER, Peter. Resourceconstrained project scheduling: Notation, classification, models and methods. 1999, pp 3-41.
- [13] Project Management Institutue. PMI. A Guide to the Project Management Body of Knowledge. 2004.
- [14] ROMERO, Carlos. Técnicas de Programación y Control de Proyectos. 2002.
- [15] KOLISCH, Rainer. Characterization and generation of a general class of resource-constrained project scheduling problems. 1995, pp 1-18.

ANEXO 1

Número de la actividad	Nombre de la actividad	Numero de modos de ejecución	Duración de la actividad en cada modo de ejecución	Actividades sucesoras	Recursos no renovables tipo 1	Recursos no renovables tipo 2	Tipo de recurso 1	Tipo de recurso 2
1	General	1	0	2FC;3FF;4CC	0	0	0	0
1		2	0	2FC;3FF;4CC	0	0	0	0
1		3	0	2FC;3FF;4CC	0	0	0	0
2	Adjudicación de la convocatoria	1	2	6FC;9FC;14FC	0	9	0	7
2		2	8	6FC;9FC;14FC	0	9	7	0
2		3	10	6FC;9FC;14FC	0	9	6	0
3	Contrato de conexión, acuerdos técnicos y administrativos	1	1	5CC;8CC;11CC	4	0	0	2
3		2	5	5CC;8CC;11CC	0	3	0	2
3		3	7	5CC;8CC;11CC	4	0	0	1
4	Gestión ambiental y predial	1	4	12FF;16FC;20FC	0	5	9	0
4		2	6	12FF;16FC;20FC	10	0	7	0
4		3	10	12FF;16FC;20FC	0	3	0	2
5	Diagnóstico ambiental de alternativas DAA	1	2	9CC;17FC	0	2	0	3
5		2	3	9CC;17FC	9	0	0	3
5		3	5	9CC;17FC	8	0	0	2
6	Estudio de impacto ambiental EIAY obtención de la licencia	1	1	7FC;12CC;18CC	9	0	0	4
6		2	6	7FC;12CC;18CC	8	0	0	4
6		3	7	7FC;12CC;18CC	6	0	0	2
7	Análisis de alternativas y negociación del lote	1	1	8CC;17FC	0	10	0	10
7		2	6	8CC;17FC	0	2	0	9
7		3	10	8CC;17FC	5	0	0	9
8	Diseños	1	1	15FC;16FC	9	0	7	0
8		2	2	15FC;16FC	5	0	5	0
8		3	3	15FC;16FC	0	6	4	0
9	Diseño conceptual y diseño básico	1	5	10FC;13FC;16FC	0	3	0	9
9		2	7	10FC;13FC;16FC	0	2	0	9
9		3	10	10FC;13FC;16FC	0	2	0	7
10	Diseño detallado	1	2	12CC;20FC	0	10	0	6
10		2	3	12CC;20FC	0	4	0	5
10		3	3	12CC;20FC	0	7	0	3
11	Bienes	1	3	14CC;15FF;19CC	0	4	0	4
11		2	5	14CC;15FF;19CC	0	2	3	0
11		3	6	14CC;15FF;19CC	3	0	1	0
12	Equipos de alta tensión y sistemas secundarios	1	3	19FC;21FC	0	9	0	4
12		2	5	19FC;21FC	0	8	4	0
12		3	6	19FC;21FC	3	0	0	3
13	Nacionalización y transporte de equipos	1	2	15CC	0	5	7	0
13		2	6	15CC	0	4	6	0
13		3	10	15CC	0	2	0	6
14	Obras civiles	1	3	18FC	0	4	6	0
14		2	7	18FC	5	0	2	0
14		3	8	18FC	4	0	0	2
15	Adecuación de terreno y obras complementarias	1	1	21FC	5	0	0	1
15		2	3	21FC	5	0	3	0
15		3	4	21FC	2	0	2	0
16	Fundaciones y edificaciones	1	4	21FC	3	0	0	4
16		2	8	21FC	0	3	0	3
16		3	8	21FC	3	0	0	1
17	Montaje	1	5	19FF	0	7	7	0
17		2	9	19FF	1	0	0	9
17		3	10	19FF	0	4	0	8
18	Montaje de equipos de alta incluyendo estructuras	1	10	20CC	9	0	1	0
18		2	10	20CC	0	3	0	2
18		3	10	20CC	0	5	5	0
19	Montaje de sistemas secundarios incluyendo cableado y conexionado	1	4	22FC	0	5	3	0
19		2	6	22FC	0	4	1	0
19		3	10	22FC	2	0	0	4
20	Pruebas	1	1	22FC	5	0	0	5
20		2	7	22FC	3	0	6	0
20		3	9	22FC	0	5	3	0
21	Pruebas individuales y de conjunto	1	2	22FC	8	0	7	0
21		2	8	22FC	4	0	6	0
21		3	9	22FC	2	0	3	0
22	Puesta en servicio	1	0	-	0	0	0	0
22		2	0	-	0	0	0	0
22		3	0	-	0	0	0	0

Anexo 1. Parámetros de entrada para la metodología propuesta.