



# **Manual de Usuario del Modelo Computacional para la Subasta de Reconfiguración de Compra**

**Noviembre 2019**

Administrador del Sistema de Intercambios Comerciales  
Gerencia Mercado de Energía  
XM S.A. E.S.P.  
Noviembre, 2019



# Contenido

<b>Objetivo</b>	<b>1</b>
<b>Antecedentes</b>	<b>1</b>
<b>Modelo Computacional para la Subasta de Reconfiguración de Compra</b>	<b>2</b>
Entorno y Arquitectura del Modelo	2
Base de Datos – Datos de Entrada del Modelo	3
<i>Tabla Oferta</i>	3
<i>Tabla Parámetros</i>	4
Base de Datos – Datos de Salida del Modelo	4
<i>Tabla Resultado</i>	4
<i>Tabla ResultadoObjetivo</i>	5
Formulación del Modelo	5
Configuración de los Parámetros del Modelo	6
Ejecución del Modelo	7
Interfaz Para Correr El Modelo de Optimización	9
ANEXO	10



## Objetivo

De acuerdo con lo establecido en el numeral *iv*) del Artículo 17 de la **Resolución CREG 051 de 2012** y aquellas que la modifiquen, adicionen o sustituyan, el Administrador del Sistema de Intercambios Comerciales –ASIC- pone a disposición de la CREG, la actualización del Modelo Computacional, la Formulación Matemática y el Manual de usuario, con los aspectos de hardware y de software necesarios para realizar la optimización de la Subasta de Reconfiguración de Compra.

## Antecedentes

El Modelo Computacional para la Subasta de Reconfiguración de Compra fue desarrollado por XM S.A. E.S.P. en su función de ASIC como Administrador de la Subasta, de acuerdo con lo establecido en el numeral *iv*) del Artículo 17 de la Resolución CREG 051 de 2012 y aquellas que la modifiquen, adicionen o sustituyan.

### Programación Lineal Entera Mixta

El método utilizado para el desarrollo del Modelo Computacional para la Subasta de Reconfiguración de Compra, es conocido en la literatura como programación lineal entera mixta MILP (por sus siglas en inglés). Este método combina las fortalezas de la programación lineal, con algoritmos especializados para solución de problemas combinatorios como el Branch and Bound (BB) y Branch and Cut.

A diferencia de los problemas completamente lineales en donde se encuentra una solución óptima, la calidad de la solución de los problemas modelados con MILP, depende de varios factores:

**1. Optimizador comercial utilizado.**

Cada fabricante desarrolla sus propios algoritmos de BB, lo que implica que dependiendo del producto utilizado se pueden obtener soluciones cercanas en términos de valor de la función objetivo, pero diferentes en términos del recurso utilizado.

**2. Versión del optimizador.**

Los métodos para solucionar problemas MILP están en continua investigación. Esto implica que cada nueva versión de un optimizador incorpora nuevos desarrollos y metodologías, que apuntan básicamente a mejorar los tiempos de ejecución en problemas de gran tamaño.

**3. Plataforma utilizada.**

La solución de un problema MILP requiere de gran cantidad de cálculos numéricos. Esto implica que factores como el sistema operativo utilizado, memoria disponible y capacidad de procesamiento del ordenador (PC) o servidor, así como la cantidad de procesadores, influyen en la solución encontrada.

**4. Modelado del problema.**

La calidad en el modelo matemático generado a partir del problema real, es uno de los factores que influyen en la calidad de la solución. Un buen modelo requiere de la aplicación de buenas prácticas que eviten problemas numéricos, de convexidad e infactibilidades.

### 5. **Parámetros del optimizador.**

Cada optimizador incluye más de 100 parámetros de MILP, que permiten modificar desde las estrategias para las búsquedas de soluciones factibles, hasta los parámetros de convergencia.

El optimizador comercial en su versión actualizada, debe disponer de algoritmos de BB compatibles con multiprocesamiento. En la configuración por defecto del mismo, el número de procesadores es el máximo, lo que significa que utiliza todos los procesadores disponibles en la máquina. En el manual del optimizador se expresa claramente que solo se puede garantizar la misma solución MILP cuando se dispone de la misma plataforma computacional, los mismos parámetros y la misma versión, tal como se enuncia a continuación:

*“In this context, sequential means that the algorithm proceeds step by step, consecutively, in a predictable and repeatable order within a single thread. Deterministic means that repeated solving of the same model with the same parameter settings on the same computing platform will follow exactly the same solution path, yielding the same level of performance and the same values in the solution. Sequential execution is deterministic. In multi-threaded computing, a deterministic setting requires synchronization between threads. Opportunistic entails less synchronization between threads and thus may offer better performance at the sacrifice of repeatable, invariant solution paths and values in repeated runs on multiple threads or multiple processors.”*

## **Modelo Computacional para la Subasta de Reconfiguración de Compra**

El modelo computacional desarrollado por XM para la Subasta de Reconfiguración de Compra es un modelo de optimización de Programación Lineal Entera Mixta que tiene como función objetivo seleccionar entre las ofertas presentadas por los participantes, aquellas que minimicen la suma de las multiplicaciones entre las Obligaciones de Energía Firme (OEF) de Compra asignadas al Precio Oferta, diferenciado conforme al numeral *ii*) del Artículo 17 de la Resolución CREG 051 de 2012, más el producto entre la demanda no asignada y 1.5 veces el precio máximo del Cargo por Confiabilidad para el periodo de vigencia de la obligación a subastar. Lo anterior, sujeto a las restricciones planteadas en el numeral *iii*) del mismo Artículo 17.

El modelo fue desarrollado dando cumplimiento a lo establecido en la Resolución CREG 051 de 2012 y aquellas que la modifiquen, adicionen o sustituyan.

### **Entorno y Arquitectura del Modelo**

Como se indica en la Figura 1 el modelo de optimización toma y entrega datos desde y hacia una base de datos, la cual es consultada directamente por el usuario.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> La implementación final que será usada para la ejecución de la Subasta de Reconfiguración de Compra puede usar una interfaz para interacción con la base de datos.



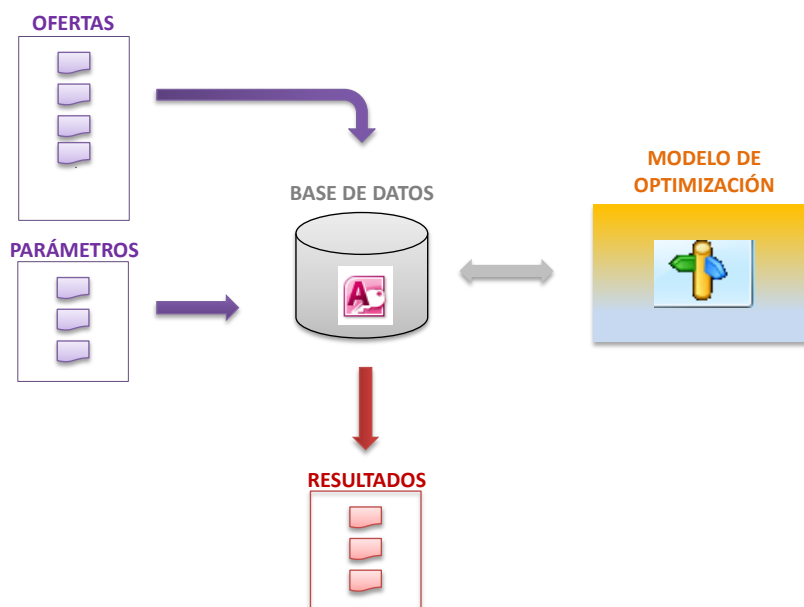


Figura 1 Entorno del Modelo de Optimización

Para el correcto funcionamiento del modelo es necesario que tanto el hardware y software (base de datos y optimizador) se encuentren en una versión actualizada y soportada por los desarrolladores.

## Base de Datos – Datos de Entrada del Modelo

Los datos de entrada del modelo son clasificados en dos tipos, los primeros corresponden a las ofertas realizadas por los participantes de la Subasta de Reconfiguración de Compra (tabla *Ofertas*) y los segundos corresponden a los parámetros definidos para la Subasta (tabla *Parametros*); toda la información debe reposar en la base de datos y cada tabla debe contener la estructura abajo mencionada.

### Tabla Oferta

En esta tabla debe estar depositada la información de las ofertas válidas realizadas por los participantes de la Subasta, diferenciadas conforme al numeral ii) del artículo 17 de la Resolución CREG 051 de 2012, de este modo se indica para cada oferta el nombre del participante, el nombre de la planta, la cantidad máxima y mínima de energía y el precio de oferta.

Oferta		
Nombre del campo	Tipo de datos	Descripción
Agente	Texto	Agente generador que representa la Planta - string
Planta	Texto	Planta con ENFICC no comprometida para respaldar OEF a asignar - string
Qmax	Número	Cantidad Maxima de Energía de OEF adicional que está dispuesto a comprometer kWh-día - entero
Qmin	Número	Cantidad Maxima de Energía de OEF adicional que está dispuesto a comprometer kWh-día - entero
Precio	Número	Precio USD\$/kWh - float

Figura 2 Diseño Tabla Oferta

- **Agente:** Nombre o denominación social del Participante que representa la Planta o unidad con ENFICC no comprometida.
- **Planta:** Nombre de la planta o unidad con ENFICC no comprometida con la cual se respaldarán las OEF que se lleguen a asignar.
- **Qmax:** Cantidad Máxima de energía de OEF que está dispuesto a comprometer en valores enteros de kWh-día.
- **Qmin:** Cantidad Mínima de energía de OEF que está dispuesto a comprometer en valores enteros de kWh-día.
- **Precio:** Precio ofertado en dólares de los Estados Unidos de América por kWh (USD\$/kWh) que incluye la diferenciación de ofertas de la que trata la Resolución CREG 051 de 2012 o aquella que adicione, modifique o sustituya.

### Tabla *Parámetros*

En esta tabla debe estar depositada la información de los parámetros únicos, de este modo se tiene información de la Cantidad a subastar y el Precio Máximo para el Cargo por Confiabilidad.

Nombre del campo	Tipo de datos	Descripción
Qsubastada	Número	Cantidad de OEF a subastar para compra en el año cargo en kwh-dia
PMCC	Número	Precio Maximo para el Cargo por Confiabilidad para el periodo de vigencia del Cargo USD\$/kwh - float

Figura 3 Diseño Tabla Parámetros

- **Qsubastada:** Cantidad a subastar en la Subasta de Reconfiguración de Compra en kWh-día.
- **PMCC:** Precio Máximo para el Cargo por Confiabilidad en dólares de los Estados Unidos de América por kWh.

### Base de Datos – Datos de Salida del Modelo

Los datos de salida del modelo son clasificados en dos tipos, los primeros corresponden a la información por oferta de asignación de OEF de Compra encontrada por el modelo de optimización por planta (tabla *Resultado*) y los segundos que corresponden al valor de la función objetivo obtenida en la ejecución del modelo (tabla *ResultadoObjetivo*); toda la información es puesta por el modelo en la base de datos y cada tabla cumple con la estructura abajo mencionada.

### Tabla *Resultado*

En esta tabla el modelo deposita la información del resultado de asignación de OEF de Compra para cada una de las plantas, de este modo se indica para cada oferta el nombre del agente, el nombre de la planta, la cantidad asignada de OEF de Compra y la variable binaria que representa la asignación de OEF de Compra asociada a la asignación.

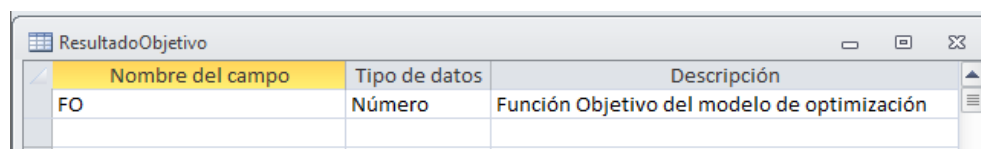
Nombre del campo	Tipo de datos	Descripción
Agente	Texto	Agente generador que representa la Planta - string
Planta	Texto	Planta con ENFICC no comprometida para respaldar OEF a asignar - string
Qasignada	Número	Cantidad Asignada de Energía de OFE para compra kWh-dia - entero
Binaria	Número	Variable Binaria de estado - Boolean

Figura 4 Diseño Tabla Resultado

- **Agente:** Nombre o denominación social del Participante que representa la Planta o unidad con ENFICC no comprometida.
- **Planta:** Nombre de la planta o unidad con ENFICC no comprometida con la cual se respaldarán las OEF que se asignaron.
- **Qasignada:** Cantidad asignada de OEF de Compra en la Subasta de Reconfiguración de Compra en kWh-día.
- **Binaria:** Variable binaria que representa la asignación de OEF de Compra:
  - Valor = 0: No hay asignación de OEF de Compra.
  - Valor = 1: Hay asignación de OEF de Compra en una cantidad entre la Cantidad Mínima y Máxima de OEF de Compra de la oferta.

### Tabla *ResultadoObjetivo*

En esta tabla el modelo deposita la información del resultado de la función objetivo del modelo.



Nombre del campo	Tipo de datos	Descripción
FO	Número	Función Objetivo del modelo de optimización

Figura 5 Diseño Tabla *ResultadoObjetivo*

- **FO:** Resultado de la función objetivo en dólares de los Estados Unidos de América.

### Formulación del Modelo

A continuación, se presenta la notación usada para la descripción del modelo de optimización. Letras mayúsculas son usadas para denotar parámetros y letras minúsculas para denotar índices y variables.

#### Índices

$r \in R$  Planta ( $r$ ), definido en el conjunto  $R$  (número total de plantas con ofertas válidas para participar en la Subasta de Reconfiguración de Compra).

#### Variables

$oefcomp_r$  OEF de Compra asignada a la planta ( $r$ ).

$binasig_r$  Binaria de estado asociada a la asignación de OEF de Compra de la planta ( $r$ ).

$oefnoasig$  Cantidad de Demanda no Asignada.

#### Parámetro

$Q_{subastada}$  Cantidad total a subastar en la Subasta de Reconfiguración de Compra.

$PMCC$  Precio Máximo para el Cargo por Confiabilidad para el periodo de vigencia a subastar.

$P_{ofertado_r}$  Precio ofertado diferenciado de la planta ( $r$ ) (según lo establecido en el numeral ii)



del Artículo 17 de la Resolución CREG 051 de 2012 y aquellas que la adicionen, modifiquen o sustituyan).

$\overline{Qmax}_r$  Cantidad Máxima de OEF de Compra de la oferta de la planta ( $r$ ).

$\underline{Qmin}_r$  Cantidad Mínima de OEF de Compra de la oferta de la planta ( $r$ ).

### Función Objetivo

La función objetivo del modelo minimiza la suma de las multiplicaciones entre OEF de Compra asignadas por el Precio Ofertado (diferenciado según lo establecido en el numeral ii) del Artículo 17 de la Resolución CREG 051 de 2012 y aquellas que la adicionen, modifiquen o sustituyan) para cada una de las plantas, más el producto entre la demanda no asignada y un precio igual a uno punto cinco (1.5) veces el Precio Máximo para el Cargo por Confiabilidad para el periodo de vigencia a subastar.

$$\min \sum_r^R \{Pofertado_r * oefcompra_r\} + 1.5 * (PMCC) * (oefnoasig)$$

### Restricciones

Dentro de las restricciones que debe cumplir el modelo se encuentran:

- La máxima asignación de OEF de Compra

$$\sum_r^R (oef compra) \leq Qsubastada$$

- Balance de asignación de OEF de Compra

$$\sum_r^R (oefcompra) + oefnoasig \geq Qsubastada$$

- La restricción asociada a la máxima cantidad de OEF de Compra a asignar a una planta, en caso de que esta resulte con asignación de OEF de Compra.

$$\overline{Qmax}_r * binasig - oefcompra \geq 0 \quad \forall r$$

- La restricción asociada a la mínima cantidad de OEF de Compra a asignar a una planta, en caso de que esta resulte con asignación de OEF de Compra.

$$\underline{Qmin}_r * binasig - oefcompra \leq 0 \quad \forall r$$

### Configuración de los Parámetros del Modelo

A continuación, se mencionan los parámetros para la ejecución del modelo, entre ellos se encuentra el número de procesadores en paralelo a utilizar, el cual estará definido como  $CPX\_PARAM\_THREADS = 2$  y el método de utilización y selección de estos procesadores como  $CPX\_PARAM\_PARALLELMODE = 1$ .





El parámetro referente al tiempo máximo para encontrar la solución es  $CPX\_PARAM\_ITILIM = 9223372036800000000$ , está dado en segundos y en la configuración determinada se tiene un valor lo suficientemente grande que garantiza que no sea el tiempo un factor que determine la solución del modelo.

En lo referente a los criterios de convergencia, un primer parámetro es el error absoluto entre la solución no entera y la solución entera:  $Tolerancia\ de\ diferencia\ absoluta - CPX\_PARAM\_EPAGAP = 1.0E-7$ , el segundo parámetro hace referencia al error relativo entre la solución no entera y la solución entera  $Tolerancia\ de\ diferencia\ absoluta - CPX\_PARAM\_EPGAP = 1.0E-12$ .

## Ejecución del Modelo

Se debe verificar la ruta de instalación de IBM ILOG CPLEX Optimization en directorio C:\ como se muestra en la Figura 6.

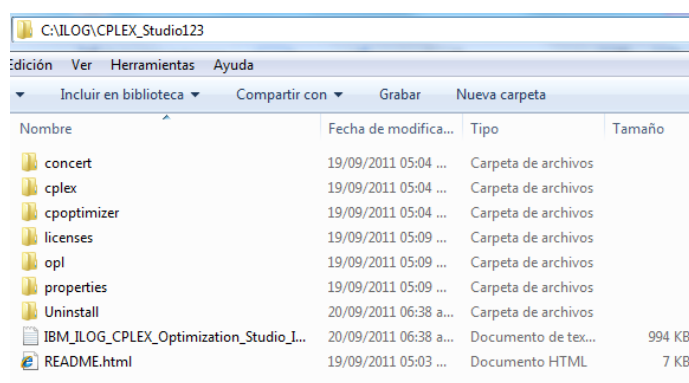


Figura 6 Directorio de archivos IBM ILOG

El archivo adjunto a este documento debe ser extraído en el disco C:\ del ordenador de este modo se deben tener la siguiente ruta y datos como se muestra en la Figura 7.

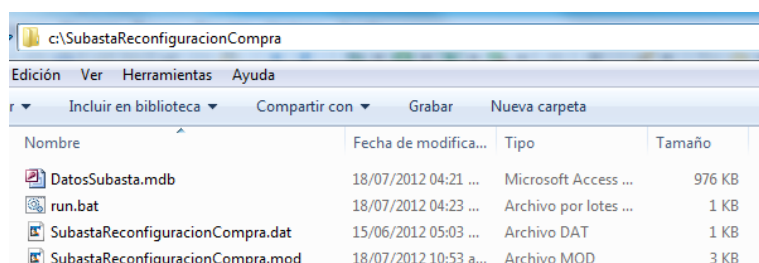


Figura 7 Directorio de archivos

Se debe ingresar en la base de datos DastosSubasta.mdb la información de Ofertas y Parámetros, descritos arriba y que se muestran en la Figura 8.

Agente	Planta	Qmax	Qmin	Precio	#
AGENTE XX	PLANTA AA	100500	1000	8	
AGENTE ZZ	PLANTA DD	459015	12378	5	
AGENTE CC	PLANTA MM	98000	8000	10	
AGENTE XX	PLANTA QQ	900600	7000	1	

Parametros
Qsubastada
1500000

Figura 8 Ingreso de datos en DastosSubasta.mdb

Para ejecutar el modelo se debe dar doble click sobre el archivo run.bat del directorio c:\SubastaReconfiguracionCompra, aquí se despliega una ventana de comandos DOS y en caso que la ejecución haya sido exitosa en las líneas finales se debe presentar un mensaje que indique el valor de la función objetivo (OBJECTIVE), post proceso y DONE, tal como se muestra en la Figura 9.

```
C:\Windows\system32\cmd.exe
Gomory fractional cuts applied: 1
Root node processing (before b&c):
  Real time = 0.06
Parallel b&c, 4 threads:
  Real time = 0.00
  Sync time (average) = 0.00
  Wait time (average) = 0.00
Total (root+branch&cut) = 0.06 sec.
<<< solve
OBJECTIVE: 2.395124e+10
<<< post process
<<< done
```

Figura 9 Ejecución exitosa

Los resultados pueden ser observados en las tablas *Resultado* y *ResultadoObjetivo* de la base de datos DastosSubasta.mdb que se describieron arriba y que se muestran en la Figura 10.

Agente	Planta	Qasignada	Binaria
AGENTE XX	PLANTA AA	100500	1
AGENTE ZZ	PLANTA DD	459015	1
AGENTE CC	PLANTA MM	98000	1
AGENTE XX	PLANTA QQ	842485	1

ResultadoObjetivo
FO
4921.56

Figura 10 Consulta de resultados en DastosSubasta.mdb



En caso de que la ejecución del modelo no haya sido exitosa se presentará un mensaje de error en la ventana de comandos, es importante verificar las rutas de instalación del optimizador, del modelo suministrado y de la calidad de los datos ingresados en la base de datos.

### ***Interfaz Para Correr El Modelo de Optimización***

La Subasta de Reconfiguración de Compra si bien, se realizará basados en las actividades anteriormente mencionadas, con el objetivo de facilitar el entendimiento del procedimiento y de conservar las actividades para las auditorías de la subasta, el ASIC podrá implementar una interfaz que permita ingresar y realizar la diferenciación de las ofertas, validar el cumplimiento regulatoria y correr el proceso de optimización salvaguardando la integridad, y la confidencialidad de la información.

Mediante este mecanismo las auditorías y los participantes de la subasta podrán validar de una manera más legible el cumplimiento de las reglas y validaciones que establece la regulación.

## ANEXO

Características Básicas del Equipo Computacional para Resolver la Función Objetivo en el Modelo de Optimización

- Base de datos: **Microsoft Access 2010**

<http://office.microsoft.com/es-es/access/>

- Runtime: **Microsoft Access Runtime 2013**

<https://www.microsoft.com/es-es/download/details.aspx?id=39358>

- Optimizador: **IBM ILOG CPLEX Optimization Studio 12.3 a 64 bits.**

<http://www-01.ibm.com/software/integration/optimization/cplex-optimizer/>

Las características computacionales de hardware para la ejecución del modelo son las siguientes:

- Sistema Operativo: Windows 10 versión 1803
- Procesador: Intel (R) Core (TM) i5-4590 CPU @3.30 GHz
- Memoria Instalada (RAM): 8.00 GB
- Tipo de sistema: Sistema operativo de 64 Bits.
- Disco: 465 GB.