

Reporte Final del Proyecto:

**“Evaluación y validación del Modelo Matemático de Optimización y
Probar su Implementación para las Subastas de Largo Plazo”**

Octubre 2016

**Realizado por la Coordinación de Ingeniería Eléctrica de la Sección de
Estudios de Posgrado e Investigación de la ESIME Zacatenco del IPN**

Contenido del Reporte

1.	Información del proyecto	3
1.1.	Documentación presentada por el centro nacional de control de la energía (CENACE)	3
1.2.	Antecedentes.....	3
1.3.	Objetivo del Proyecto.....	4
1.3.1.	Objetivos Particulares.....	4
2.	Análisis al modelo de Optimización para las Subastas de Largo Plazo	5
3.	Pruebas realizadas al modelo de subastas de largo plazo.....	8
3.1.	Descripción del código que representa al modelo de optimización de enteros mixtos para la SLP	8
3.2.	Resultados de la evaluación al programa del modelo matemático para subastas de largo plazo	12
3.3.	Resultados del pre y post procesamiento de datos	17
4.	Conclusiones y comentarios finales.....	18
5.	Referencias Bibliográficas.....	19

1. Información del proyecto

1.1. Documentación presentada por el centro nacional de control de la energía (CENACE)

- ✓ Manual de Subastas de Largo Plazo [3]
- ✓ Las Bases del Mercado Eléctrico Mayorista [3]
- ✓ Términos de referencia del proyecto

1.2. Antecedentes.

El principal objetivo de las Subastas, específicamente las de Largo Plazo es fomentar la competitividad y estabilidad de precios en la adquisición de Potencia, Energía Eléctrica Acumulable y CELs por los Suministradores de Servicios Básicos, además de garantizar una fuente estable de pagos que contribuyan a apoyar el financiamiento de las inversiones requeridas para desarrollar nuevas Centrales Eléctricas con un menor riesgo y mantener las existentes.

Es en el artículo 108 de la LIE, donde se establece que el CENACE podrá realizar de manera periódica Subastas para la celebración de Contratos de Cobertura Eléctrica para los Suministradores de Servicio Básico. Los términos para llevar a cabo dichas Subastas y asignar los Contratos respectivos se establecen en las Bases del Mercado Eléctrico. Asimismo, la CRE establecerá los requisitos y montos mínimos de Contratos de Cobertura que los Suministradores deberán celebrar que les permitan cubrir sus necesidades esperadas.

Asimismo, en el artículo Tercero Transitorio de la LIE, se señala que por única ocasión, la SENER emitirá las Primeras Reglas del Mercado.

Para efecto de llevar a cabo las Primeras Subastas de Largo Plazo, éstas deberán tomar como base las disposiciones generales contenidas en las Bases del Mercado, las disposiciones operativas contenidas en el Manual de Prácticas de Mercado para Subastas de largo Plazo y las reglas bajo las cuales se efectuará la subasta contenidas en las Primeras Bases de Licitación.

Lo anterior conforma el conjunto de instrumentos que resultan del trabajo que, actualmente, coordina SENER con el CENACE y la CRE, los cuales, en fechas próximas, se deberán emitir de forma oficial en los medios correspondientes para darlos a conocer a los participantes del mercado.

Para llevar a cabo las Primeras Subastas de Largo Plazo, se identificó la necesidad de contar con un servicio especializado de: VALIDACION DEL MODELO MATEMÁTICO DE OPTIMIZACIÓN desarrollado e implementado para la ejecución de las subastas.

La realización de las Primeras Subastas de Largo Plazo se efectuará en el periodo que comprende de Noviembre de 2015 a abril de 2016.

En este orden de ideas, es importante que el proveedor del servicio de validación del modelo matemático de optimización, cuente con el conocimiento teórico y técnico en materia de investigación de operaciones y aplicación de técnicas de optimización, que permita asegurar que éstos sean diseñados de acuerdo con las mejores prácticas internacionales para garantizar la competencia e igualdad de condiciones entre los participantes.

Por lo anterior, el CENACE está solicitando el apoyo una institución de investigación para realizar la validación del modelo matemático de optimización que será utilizado en la Subasta de Largo Plazo del Mercado Eléctrico Mayorista.

1.3. Objetivo del Proyecto.

Llevar a cabo la **evaluación, mejoras y validación del modelo matemático de optimización** y probar su implementación en la herramienta de optimización **AMPL** utilizando el motor de solución CPLEX para la ejecución de la subasta de largo plazo, que garantice la integridad, la competencia y transparencia en la ejecución de las Subastas.

1.3.1. Objetivos Particulares

Contar con los servicios de un proveedor especializado con alta experiencia demostrable en el desarrollo de algoritmos y modelos matemáticos de optimización, particularmente para el sector público, con la capacidad de Certificar mediante la evaluación, mejoras y validación el modelo matemático de optimización y probar su implementación en la herramienta de optimización AMPL utilizando el motor de solución CPLEX [1] que se utilizara en la ejecución de la subastas de largo plazo, que emana de las Bases del Mercado [2], así como, del Manual de Subastas de Largo Plazo [3] y en las Bases de Licitación [4].

2. Análisis al modelo de Optimización para las Subastas de Largo Plazo

El presente documento hace referencia al Anexo 2 del Manual de Subastas de Largo Plazo [3] correspondiente al Programa de Optimización de Enteros Mixtos señalada en el anexo 2 del mismo manual. La descripción siguiente explica de forma resumida lo que se consigue con cada una de las expresiones matemáticas contenidas en el mencionado anexo 2.

De esta forma se describe la función objetivo de la ecuación (1) y las restricciones que considera (ecuaciones 2 a la 21):

De acuerdo a lo anterior, la función objetivo está definida mediante la expresión matemática dada en (1)

$$\begin{aligned}
 & \underset{u, \text{VentaP}, \text{VentaE}, \text{VentaC}}{\text{Maximizar}} \sum_{zp \in ZP} \left\{ \sum_{bp \in BP_{zp}} \text{VentaP}_{bp} \text{PrecioP}_{bp} \right\} + \sum_{be \in BE} \text{VentaE}_{be} \text{PrecioE}_{be} \\
 & + \sum_{bc \in BC} \text{VentaC}_{bc} \text{PrecioC}_{bc} - \sum_{p \in PAQ} u_p \text{PrecioPaquete}_p \quad (1)
 \end{aligned}$$

Esta función objetivo consiste en encontrar una estrategia de decisión óptima que maximice el excedente total. Esta decisión está dada por la selección del paquete, venta de potencia, energía eléctrica acumulable y certificados de energías limpias, de conformidad con lo señalado en el numeral 5.7.5 y el Anexo 2 del Manual, así como, con el numeral 3.8.7 y 6.5.3 de las Bases de Licitación. Con base en esto, se considera que la función objetivo sí está matemáticamente bien formulada. Debido a la naturaleza de las variables, el problema dado por (1) pertenece al área de programación Mixta-Entera, y que resulta clara para el lector especializado en el área.

Dicha función objetivo se encuentra sujeta a las siguientes restricciones dadas por las ecuaciones (2), (3) y (4) siguientes:

$$\text{VentaP}_{bp} \leq \text{DemP}_{bp}^{\max} \quad \forall bp \in BP_{zp}, \forall zp \in ZP \quad (2)$$

$$\text{VentaE}_{be} \leq \text{DemE}_{be}^{\max} \quad \forall be \in BE \quad (3)$$

$$\text{VentaC}_{bc} \leq \text{DemC}_{bc}^{\max} \quad \forall bc \in BC \quad (4)$$

En estas restricciones se establece que la cantidad de los productos vendidos a las Entidades Responsables de Carga en la Subasta no debe exceder a la oferta de compra de los mismos productos, considerando los requerimientos de contratación definidos por la CRE.

La ecuación (5) muestra que la cantidad total de paquetes de potencia ofertada deben ser suficiente para cubrir la cantidad de ofertas de compra

$$\sum_{bp \in BP_{zp}} \text{Venta}P_{bp} \leq \sum_{p \in PAQ(zp)} u_p \text{Paquete}P_p \quad \forall zp \in ZP \quad (5)$$

En esta parte el modelo se simplifica al eliminar la restricción que representaba a la ecuación de balance de la cantidad total de potencia vendida en una determinada zona de potencia zp .

Con referencia al documento *Propuesta ModeloSubastasinsexcedentes* [5], se tiene lo siguiente para las dos restricciones siguientes:

$$\sum_{p \in PAQ(zp)} u_p \text{Paquete}P_p \text{FechaIrrAnt}_p \leq K \text{FechaIrrAnt}P \sum_{bp \in BP_{zp}} \text{Venta}P_{bp} \quad \forall zp \in ZP \quad (6)$$

$$\sum_{p \in PAQ(zp)} u_p \text{Paquete}P_p \text{FechaIrrDesp}_p \leq K \text{FechaIrrDesp}P \sum_{bp \in BP_{zp}} \text{Venta}P_{bp} \quad \forall zp \in ZP \quad (7)$$

Estas son para cada una de las zonas de potencia, no se permite generar un **exceso en la compra global de producto de potencia y no permite comprar una cantidad mayor de productos en las fechas irregulares**. Estas ecuaciones muestran la condición de que la cantidad total de potencia vendida a las ERCs en la Subasta, asignada a paquetes con fecha de inicio irregular anterior ec. (6) y posterior ec. (7) de la fecha de inicio estándar respectivamente solo pueden ser menores o iguales a un determinado porcentaje de la potencia vendida a las ERCs en la subasta para la zp de que se trate. Con base en el siguiente punto del numeral 5.7.5.(b).(vi) del manual: “*Se respetarán los porcentajes máximos de Potencia y de CELs que se podrá comprar a Ofertas de Venta con fechas de inicio ofertadas irregulares.*”

$$\sum_{be \in BE} \text{Venta}E_{be} \leq \sum_{p \in PAQ} u_p \text{Paquete}E_p \quad (8)$$

$$\sum_{bc \in BC} \text{Venta}C_{bc} \leq \sum_{p \in PAQ} u_p \text{Paquete}C_p \quad (9)$$

Las restricciones representadas por las ecuaciones (8) y (9), establecen que la suma de cantidades de energía eléctrica acumulable ec. (8) y de certificados de energía limpia, ec. (9), dados en el paquete p (en caso de existir y sujeta a u_p) puede ser mayor o igual a las cantidades de EEA y CELs vendidos en la subasta a las ERCs.

En las expresiones (10) y (11) definen que la suma de CELs vendida (en caso de existir, dependiendo del valor de u_p) en fechas irregulares anterior, ec (10) y posterior, ec. (11) deben ser menores o máximo iguales a la oferta total de compra de certificados en la subasta por las ERCs.

$$\sum_{p \in PAQ} u_p \text{Paquete}C_p \text{FechaIrrAnt}_p \leq K \text{FechaIrrAnt}C \sum_{bc \in BC} \text{Venta}C_{bc} \quad (10)$$

$$\sum_{p \in PAQ} u_p \text{Paquete}C_p \text{FechaIrrDesp}_p \leq K \text{FechaIrrDesp}C \sum_{bc \in BC} \text{Venta}C_{bc} \quad (11)$$

La restricción dada en (12) establece que para el caso de paquetes de ofertas condicionadas, éstas solo son válidas si se ofrecen como **un par de paquetes consecutivos**.

$$u_p \leq u_{pi} \quad \forall oci \in OC \mid oci = (p, pi) \quad (12)$$

La ecuación (13) muestra que para paquetes mutuamente excluyentes, la condición es que **solo uno de estos paquetes** sea adquirido para cumplir con los requisitos de la subasta.

$$\sum_{p \in omei} u_p \leq 1 \quad \forall omei \in OME \quad (13)$$

La restricción dada en (14) (propuesta en Marzo de 2016), define el límite de interconexión dado (para la zona de interconexión dada) y que prohíbe que las centrales contenidas en ofertas de compra o paquetes no rebasen el límite de capacidad para las Zonas de Interconexión donde el CENACE haya definido sin considerar sus contratos heredados.

$$\sum_{c \in C(z_i)} \mathbf{u}_c \text{CapacidadDePlaca}_c \text{SinPrelación}_c \leq \text{LimInterconexiónZI}_{z_i} \quad \forall z_i \in ZI \quad (14)$$

$$\mathbf{u}_p \leq \mathbf{u}_c \quad \forall c \in C_p, \forall p \in PAQ$$

Finalmente, la restricción dada en (15) define el límite de energía eléctrica para las zonas de exportación el cual debe ser mayor o igual a la suma de los paquetes contratados donde el CENACE haya definido límites.

$$\sum_{p \in PAQ(z_e)} \sum_{c \in C_p} u_p PE_c \% EEA_{(p,c)} \text{SinPrelación}_c \leq \text{LimEnergíaEléctricaZE}_{z_e} \quad \forall z_e \in ZE \quad (15)$$

3. Pruebas realizadas al modelo de subastas de largo plazo

El proceso de validación del modelo de optimización para las subastas de largo plazo consiste en un análisis de los documentos disponibles en el sitio web del Centro Nacional de Control de la Energía (CENACE). Los documentos con lo que se cuenta son entre otros los manuales de operación del programa de enteros mixtos para las subastas de LP que sirve para implementar el modelo de subastas de largo plazo. Este código consta de archivos que se ejecutan mediante instrucciones sencillas en el software de optimización matemática AMPL [1]. A continuación se describen algunos de los archivos principales de este modelo.

3.1. Descripción del código que representa al modelo de optimización de enteros mixtos para la SLP

El código que representa al programa desarrollado "modelofinal11.mod" el cual es ejecutado en el software de optimización AMPL y que define al programa de optimización de enteros mixtos para las subastas de largo plazo. En este código, todas las variables usadas, constantes y la función objetivo principal a optimizar junto con todas las restricciones son las descritas en la sección 2 del manual de subastas de largo plazo [3]. Las restricciones son claras y no deben provocar confusión al lector especializado.

Como parte del mismo código se incluye otro archivo necesario para poder ejecutar el modelo de optimización ya definido anteriormente. Este programa llamado "modelofinal11.run" incluye todas las opciones requeridas para la simulación, desde el tipo de motor de optimización (CPLEX) hasta los archivos de datos de entrada / salida, mientras que las inicializaciones de datos se integran en el archivo con extensión ".mod", como se muestra a continuación.

```
option solver cplex;  
model modelofinal11.mod;  
data modelofinal11.dat;  
solve;  
display Diferencia;  
display Paq;  
display Paq > sol.txt;
```

En este código, se usa un archivo para la llamada de lectura de datos de entrada con nombre "modelofinal11.dat". La información de entrada está dada en una base de datos planos tipo ASCII. Se debe aclarar que estos datos son resultado de una etapa de preprocesamiento en el cual se calculan los precios nuevos ajustados de los paquetes y se verifica que no se violen los límites de interconexión, entre otras evaluaciones las cuales ya fueron realizadas a priori por personal especializado de CENACE y cuyos datos se encuentran disponibles en su página para todo el público [5]. Los archivos disponibles en ese lugar se encuentran en formato de Microsoft Excel por lo que hubo la necesidad de modificar solo el formato en el que dichos datos se presentan (sin modificación alguna a los datos numéricos *per se*).

Por ejemplo para el caso del archivo de generadores (gen.xlsx) el archivo de entrada solo tiene una sola hoja de cálculo con una sola columna que define el número que le corresponde a cada generador de acuerdo al orden en el que aparecen, por lo que se tienen un número dado de generadores con un número identificador asociado:

GEN
428
429
430
.
.
.
424
425
426
427

y su equivalente en el archivo .dat es el siguiente:

```
data;  
set GEN:=  
428  
429  
430  
.  
.  
.  
424  
425  
426  
427;
```

Como puede verse, los datos son los mismos aunque el formato difiere un poco sobre todo en las tablas de Excel que contienen grandes cantidades de datos ya que éstos deben acomodarse en columnas separadas por un espacio de tabulador para ser reconocidas como un formato .dat

El contenido del archivo en formato “dat” final usado para estas pruebas debido a su longitud no se incluye en este reporte por completo, sin embargo un pequeño extracto se muestra a continuación:

```
data;          464          31          69          107  
set GEN:=      465          32          70          108  
428            466          33          71          109  
429            467          34          72          110  
430            468          35          73          111  
431            469          36          74          112  
432            470          37          75          113  
433            471          38          76          114  
434            1          39          77          115  
435            2          40          78          116  
436            3          41          79          117  
437            4          42          80          118  
38             5          43          81          119  
439            6          44          82          120  
440            7          45          83          121  
441            8          46          84          122  
442            9          47          85          123  
443            10         48          86          124  
444            11         49          87          125  
445            12         50          88          126  
446            13         51          89          127  
447            14         52          90          128  
448            15         53          91          129  
449            16         54          92          130  
450            17         55          93          131  
451            18         56          94          132  
452            19         57          95          133  
453            20         58          96          134  
454            21         59          97          135  
455            22         60          98          136  
456            23         61          99          137  
457            24         62          100         138  
458            25         63          101         139  
459            26         64          102         140  
460            27         65          103         141  
461            28         66          104         142  
462            29         67          105         143  
463            30         68          106         144
```

145	214	283	352	421
146	215	284	353	422
147	216	285	354	423
148	217	286	355	424
149	218	287	356	425
150	219	288	357	426
151	220	289	358	427;
152	221	290	359	set ERC:=
153	222	291	360	1
154	223	292	361	2;
155	224	293	362	set PAQUETES:=
156	225	294	363	1
157	226	295	364	2
158	227	296	365	3
159	228	297	366	4
160	229	298	367	5
161	230	299	368	6
162	231	300	369	7
163	232	301	370	8
164	233	302	371	9
165	234	303	372	10
166	235	304	373	11
167	236	305	374	12
168	237	306	375	13
169	238	307	376	14
170	239	308	377	15
171	240	309	378	16
172	241	310	379	17
173	242	311	380	18
174	243	312	381	19
175	244	313	382	20
176	245	314	383	21
177	246	315	384	22
178	247	316	385	23
179	248	317	386	24
180	249	318	387	25
181	250	319	388	26
182	251	320	389	27
183	252	321	390	28
184	253	322	391	29
185	254	323	392	30
186	255	324	393	31
187	256	325	394	32
188	257	326	395	33
189	258	327	396	34
190	259	328	397	35
191	260	329	398	36
192	261	330	399	37
193	262	331	400	38
194	263	332	401	39
195	264	333	402	40
196	265	334	403	41
197	266	335	404	42
198	267	336	405	43
199	268	337	406	44
200	269	338	407	45
201	270	339	408	46
202	271	340	409	47
203	272	341	410	48
204	273	342	411	49
205	274	343	412	50
206	275	344	413	51
207	276	345	414	52
208	277	346	415	53
209	278	347	416	54
210	279	348	417	55
211	280	349	418	56
212	281	350	419	57
213	282	351	420	58

59	27	66	33	72
60	28	67	34	73
61	29	68	35	74
62	30	69;	36	75
63	31	set MAX_EJEC:=	37	76
64	32	0;	38	77
65	33	set OFERTAS:=	39	78
66	34	1	40	79
67	35	2	41	80
68	36	3	42	81
69	37	4	43	82
70;	38	5	44	83
set PAQUETES2:=	39	6	45	84
1	40	7	46	85
2	41	8	47	86
3	42	9	48	87
4	43	10	49	88
5	44	11	50	89
6	45	12	51	90
7	46	13	52	91
8	47	14	53	92
9	48	15	54	93
10	49	16	55	94
11	50	17	56	95
12	51	18	57	96
13	52	19	58	97
14	53	20	59	98
15	54	21	60	99
16	55	22	61	100;
17	56	23	62	
18	57	24	63	
19	58	25	64	
20	59	26	65	
21	60	27	66	
22	61	28	67	
23	62	29	68	
24	63	30	69	
25	64	31	70	
26	65	32	71	

3.2. Resultados de la evaluación al programa del modelo matemático para subastas de largo plazo

Los resultados de la ejecución del proceso de optimización del programa realizado por el IPN-ESIME se muestran en pantalla. La versión usada en estos estudios se ejecuta en un Servidor HP Proliant DL 585 G7 Server Chipset SR5690/SP5100 con Procesadores Opteron de las series 6300 y 6200, con sistema operativo **Linux a 64 bits**, tal como lo muestra la siguiente imagen de pantalla.

```
[enrique@cfedata pruebas]$ ampl -v
AMPL Version 20160920 (Linux x86_64)
Licensed to Jorge Salgado <jorge.salgado@jasev.com.mx> (cfedata.ssed.ipn.mx).
Maintenance expires with version 20170930.
Using license file "/home/enrique/Documents/ampl/ampl.linux64/ampl.lic".
ampl: █
```

Al ejecutar el modelo anterior se tienen los siguientes resultados:

```

ampl: include modelofinal11.run;
CPLEX 12.6.3.0: optimal integer solution within mipgap or absmipgap; objective 3950226304
192 MIP simplex iterations
31 branch-and-bound nodes
absmipgap = 300389, relmipgap = 7.60435e-05
No basis.
Diferencia = 3950230000

Paq [*,*] (tr)
:      1  2  3  4  5  6  7  8  9  10  11  12  13  14  15  16  17  18  19 :=
8      0  0  0  0  0  0  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .
26     0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  .
29     0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  .  .  .  .  .  .  .  .
30     .  .  .  .  .  .  .  .  .  0  0  0  0  0  0  .  .  0  0
32     0  0  .  0  0  0  1  1  0  0  .  .  .  .  .  .  .  .  .
40     0  0  0  0  0  0  0  1  .  .  .  .  0  0  0  0  0  0  .
41     0  0  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .
45     0  0  1  0  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .
51     0  .  0  .  .  1  .  1  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .
56     0  0  0  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .
57     0  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .
64     0  0  0  0  0  0  0  0  0  .  0  .  .  .  .  .  .  .  .
66     1  1  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .
79     0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  .  .  .  .  .  .  .  .  .
96     1  1  0  0  0  0  0  1  1  0  0  0  0  0  0  0  .  .  .
103    1  .  0  0  1  1  1  .  1  0  0  1  .  .  .  .  .  .  .
119    0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  .  .  .  .  .  .  .  .  .
123    1  0  0  0  1  0  0  0  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .
124    1  1  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .
126    0  0  1  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .
128    0  0  0  1  0  0  1  0  0  0  .  .  .  .  .  .  .  .  .
129    0  0  0  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .
137    0  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .
143    0  0  0  .  0  0  0  .  0  0  0  .  0  0  0  .  .  .  .
148    .  .  0  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  0  .  .  .  .  .
150    .  .  .  .  .  .  0  0  0  .  .  .  .  .  .  .  .  .  0
151    .  .  .  .  .  .  .  .  .  1  1  1  .  .  .  .  .  .  .
157    0  0  0  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .
163    0  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .
164    0  0  0  1  1  0  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .
170    0  0  0  0  0  0  0  0  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .

143    0  0  0  .  0  0  0  .  0  0  0  .  0  0  0  .  .  .  .
148    .  .  0  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  0  .  .  .  .
150    .  .  .  .  .  .  0  0  0  .  .  .  .  .  .  .  .  .  0
151    .  .  .  .  .  .  .  .  .  1  1  1  .  .  .  .  .  .  .
157    0  0  0  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .
163    0  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .
164    0  0  0  1  1  0  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .
170    0  0  0  0  0  0  0  0  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .
171    0  .  .  0  0  0  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .
173    0  0  0  0  0  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .
174    0  0  0  0  0  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .
175    1  1  1  1  1  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .
178    0  0  0  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .
186    .  0  0  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .
189    1  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .
190    0  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .
191    .  0  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .
192    0  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .
193    .  .  .  1  1  1  0  0  .  .  .  .  .  .  .  0  0  0
194    .  .  0  0  0  0  0  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .
195    0  0  0  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .
203    .  .  0  1  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .
204    .  .  0  0  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .
206    1  1  0  0  0  0  0  0  0  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .
209    0  0  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .
211    0  0  0  0  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .
217    .  .  0  0  1  1  1  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .
218    0  0  0  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .
233    .  1  1  1  0  1  1  1  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .
234    0  0  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .
245    1  0  0  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .
246    0  0  0  0  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .
255    1  0  0  0  0  0  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .

:      20  21  22  23  24  27  28  29  30  31  32  35  36  37  38 :=
30    .  .  1  1  1  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .
40    .  0  0  .  .  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
103   .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .  .
150   0  0  .  .  .  .  .  0  0  .  .  .  .  0  0

ampl: █
    
```

El archivo de salida del programa es un documento de texto con nombre “sol.txt”. Este archivo contiene los datos de la variable Paq la cual es bidimensional y creada por el programa como resultado de la ejecución.

Los datos del archivo de salida almacenados en “sol.txt”, son los siguientes:

```

Paq [*,*] (tr)
: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 :=
8 0 0 0 0 0 0 . . . . . . . . . .
26 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 . . . .
29 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 . . . . . . . . . .
30 . . . . . . . . 0 0 0 0 0 0 . . 0 0
32 0 0 . 0 0 0 1 1 0 0 . . . . . . . . .
40 0 0 0 0 0 0 0 1 . . . . 0 0 0 0 .
41 0 0 . . . . . . . . . . . . . . . .
45 0 0 1 0 . . . . . . . . . . . . . .
51 0 . 0 . . 1 . 1 . . . . . . . . . .
56 0 0 0 . . . . . . . . . . . . . . .
57 0 . . . . . . . . . . . . . . . . .
64 0 0 0 0 0 0 0 0 0 . 0 . . . . . . . .
66 1 1 . . . . . . . . . . . . . . . .
79 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 . . . . . . . . .
96 1 1 0 0 0 0 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 . . . .
103 1 . 0 0 1 1 1 . 1 0 0 1 . . . . . . .
119 0 0 0 0 0 0 0 0 0 . . . . . . . . .
123 1 0 0 0 1 0 0 0 . . . . . . . . . .
124 1 1 . . . . . . . . . . . . . . . .
126 0 0 1 . . . . . . . . . . . . . . .
128 0 0 0 1 0 0 1 0 0 0 . . . . . . . .
129 0 0 0 . . . . . . . . . . . . . . .
137 0 . . . . . . . . . . . . . . . . .
143 0 0 0 . 0 0 0 . 0 0 0 . 0 0 0 . . . .
148 . . 0 . . . . . . . . . . 0 . . . . .
150 . . . . . . 0 0 0 . . . . . . . . 0
151 . . . . . . . . . . 1 1 1 . . . . .
157 0 0 0 . . . . . . . . . . . . . . .
163 0 . . . . . . . . . . . . . . . . .
164 0 0 0 1 1 0 . . . . . . . . . . .
170 0 0 0 0 0 0 0 0 . . . . . . . . . .
171 0 . . 0 0 0 . . . . . . . . . . .
173 0 0 0 0 0 . . . . . . . . . . . .
174 0 0 0 0 0 . . . . . . . . . . . .
175 1 1 1 1 1 . . . . . . . . . . . .
178 0 0 0 . . . . . . . . . . . . . . .
186 . 0 0 . . . . . . . . . . . . . . .
189 1 . . . . . . . . . . . . . . . . .
190 0 . . . . . . . . . . . . . . . . .
191 . 0 . . . . . . . . . . . . . . . . .
192 0 . . . . . . . . . . . . . . . . .
193 . . . . 1 1 1 0 0 . . . . . . 0 0 0
194 . . 0 0 0 0 0 . . . . . . . . . . .
195 0 0 0 . . . . . . . . . . . . . . .
203 . . 0 1 . . . . . . . . . . . . . .
204 . . 0 0 . . . . . . . . . . . . . .
206 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 . . . . . . . .
209 0 0 . 0 . . . . . . . . . . . . . .
211 0 0 0 0 . . . . . . . . . . . . . .
217 . . 0 0 1 1 1 . . . . . . . . . .
218 0 0 0 . . . . . . . . . . . . . . .
233 . 1 1 1 0 1 1 1 . . . . . . . . . .
234 0 0 . 0 . . . . . . . . . . . . . .
245 1 0 0 . . . . . . . . . . . . . . .
246 0 0 0 0 . . . . . . . . . . . . . .
255 1 0 0 0 0 0 . . . . . . . . . . .
: 20 21 22 23 24 27 28 29 30 31 32 35 36 37 38 :=
30 . . 1 1 1 . . . . . . . . . .
40 . 0 0 . . 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 .
103 . . . . . . . . 0 . . . . .
150 0 0 . . . . . 0 0 . . . . 0 0
;

```

De estos datos, la primera columna representa el número del generador mientras que el primer renglón muestra el número que corresponde a cada paquete y que están asociados con cada uno de los generadores. Una lógica binaria muy simple define si el paquete (ó paquetes) asociado con un generador en particular, resulta seleccionado (1) o no seleccionado (0). Con esta lógica, se tienen entonces los datos (una vez exportados a Microsoft Excel) en la tabla siguiente:

Gen	Numero de Paquete																																					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	27	28	29	30	31	32	35	36	37	38				
8	0	0	0	0	0	0	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
30	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
32	0	0	.	0	0	0	1	1	0	0	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
40	0	0	0	0	0	0	0	1	.	.	.	.	0	0	0	0	0	0	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
41	0	0	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
45	0	0	1	0	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
51	0	.	0	.	.	1	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
56	0	0	0	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
57	0	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
64	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
66	1	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
79	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
96	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
103	1	.	0	0	1	1	1	.	1	0	0	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
119	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
123	1	0	0	0	1	0	0	0	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
124	1	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
126	0	0	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
128	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
129	0	0	0	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
137	0	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
143	0	0	0	.	0	0	0	.	0	0	0	.	0	0	0	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
148	.	.	0	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
150	.	.	.	.	.	.	0	0	0	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
151	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	1	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
157	0	0	0	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
163	0	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
164	0	0	0	1	1	0	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
170	0	0	0	0	0	0	0	0	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
171	0	.	.	0	0	0	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
173	0	0	0	0	0	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
174	0	0	0	0	0	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
175	1	1	1	1	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
178	0	0	0	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
186	0	0	0	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
189	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
190	0	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
191	.	0	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
192	0	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
193	.	.	.	1	1	1	0	0	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
194	.	.	0	0	0	0	0	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
195	0	0	0	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
203	.	.	0	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
204	.	.	0	0	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
206	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
209	0	0	.	0	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
211	0	0	0	0	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
217	.	.	0	0	1	1	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
218	0	0	0	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
233	.	1	1	1	0	1	1	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
234	0	0	.	0	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
245	1	0	0	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
246	0	0	0	0	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
255	1	0	0	0	0	0	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.

En esta tabla se resaltan ya en negrita los generadores y sus respectivos paquetes (con un valor de 1) que resultaron seleccionados en esta simulación. De una forma compacta, dichos datos se resumen en una sola columna como se muestra a continuación:

Generador	Paquete Aceptado
30	22 ,23,24
32	7,8
40	8
45	3
51	6,8
66	1,2
96	1,2,7,8
103	1,5,6,7,9,12
123	1,5
124	1,2
126	3
128	4,7
151	10,11,12
164	4,5
175	1,2,3,4,5
189	1
193	5,6,7
203	4
206	1,2
217	5,6,7
233	2,3,4,6,7,8
245	1
255	1

Una comparación de los datos de la ejecución demuestra que los resultados son los mismos que los publicados por CENACE en su página de internet [5], en el archivo 40 “Anexo A” que muestra los paquetes ganadores de la segunda subasta de energía de largo plazo con un valor de la función objetivo igual a **3950226304**.

Las restricciones impuestas al modelo de optimización incluyendo la última restricción derivada de los resultados de la primera subasta de energía, **operan de manera adecuada** al no permitir violar los límites establecidos en la compra de potencia o energía eléctrica acumulable ya que de acuerdo a los resultados obtenidos nunca se sobrepasó la cantidad de productos adquiridos del límite previamente establecido por las ERCs. Se puede mencionar que incluso con las restricciones impuestas, el comportamiento del programa tiende a limitar en mucho la compra de productos que pudieran acercarse aún más el porcentaje de compra al límite impuesto por las ERCs.

De acuerdo a las cantidades de productos ofrecidos por los participantes, se logró asignar de manera eficiente el **80.05% de la oferta de compra total de Potencia**, el **83.82% de la oferta de compra de energía** y el **87.26% de la oferta de compra de Certificados de Energías Limpias (CEL)**. Estas cantidades **coinciden totalmente** con las reportadas por el Centro Nacional de Control de la Energía como resultado de la segunda subasta de energía.

3.3 Resultados del pre y post procesamiento de datos

En esta etapa, los datos de las ofertas dadas por los generadores y los resultados de las cantidades de productos asignados a cada ERC son sujetos a una serie de acondicionamientos para que su participación dentro de la subasta sea considerada más justa. De esta forma, se tiene una serie de cálculos y ajustes previos a la introducción de las ofertas de los generadores en la subasta. El precio de los distintos productos se ven sujetos a ajustes de tipo horario, ajustes por inflación o por tipo cambiario. De igual forma, los valores obtenidos del programa de optimización deben ser procesados antes de ser considerados como valores finales.

De lo anterior y de acuerdo a [3], en su numeral 4.6.2, el procesamiento de datos para el cálculo por inflación tomando en cuenta factores del mercado mexicano y americano es básico para poder conocer el nuevo precio ajustado de los paquetes de productos ofertados.

Estos ajustes se realizan al evaluar las formulas siguientes:

$$pct20 = \frac{20 \cdot CantCEL}{70,000 \cdot CantPot + 4 \cdot CantEn + 2 \cdot CantCEL}$$

$$VPN_{INDEXDLS} = 7.1022 + pct20 \cdot 0.7480$$

$$VPN_{INDEXPESOS} = 6.6809 + pct20 \cdot 0.6337$$

$$FactorDevEsp = \frac{VPN_{INDEXDLS}}{VPN_{INDEXPESOS}}$$

$$\begin{aligned} PrecioPaquete_p &= \left(PrecioOriginalPaquete_p + \frac{HoraDeRecepcion - HoraDeInicio}{1000} \right. \\ &\left. + \Delta PML_{zpr} PaqueteE_p \right) \cdot (FactorPrefPesos \cdot FactorDevEsp)^{IndexUSD_p} \end{aligned}$$

4. Conclusiones y comentarios finales

De acuerdo al análisis de cada una de las restricciones mostradas en el anexo 2 del manual de subastas de largo plazo [3] y con base en la función objetivo principal se puede concluir que el modelo de optimización requerido para subastas de largo plazo **es coherente e integra todas las restricciones a las que hace referencia dicho anexo.**

Se realizó como parte de la primera evaluación del modelo, una serie de pruebas para validar cada una de las restricciones contenidas en el modelo de optimización matemática. Se analizaron los resultados y no se obtuvieron casos en los que existieran incoherencias entre lo manifestado en las fichas de prueba entregadas por parte del CENACE y las pruebas realizadas en este documento.

Se puede concluir también que **dicho modelo resulta claro en su código para el lector especializado**, y los resultados que arroja de acuerdo a las simulaciones realizadas son aceptables, ya que en ningún caso viola alguna de las restricciones.

Los resultados del programa de optimización de enteros mixtos para la segunda subasta de largo plazo realizado por la ESIME-IPN usando como datos de entrada los archivos disponibles en la página de internet de CENACE para todo público [5] arrojaron los mismos resultados que los expuestos en el fallo oficial de la misma página de CENACE por lo tanto **se validan los resultados de esta segunda subasta de largo plazo.**

5. Referencias Bibliográficas

- [1]. AMPL: A Modeling Language for Mathematical Programming, Robert Fourer, David M. Gay, Brian W. Kernighan, Second edition, 517 + xxi pp., ISBN 0-534-38809-4
- [2]. Bases del Mercado Eléctrico Mayorista, Diario Oficial de la Federación, DOF: 08/09/2015
- [3]. Manual de Subastas de Largo Plazo (Disposiciones Operativas del MEM), DOF 2015 11 19
- [4]. Bases de Licitación de la Subasta de Largo Plazo SLP-1/2016, 13 mayo 2016, Centro Nacional de Control de la Energía.
- [5]. Información sobre el mercado de largo plazo ofrecida por el CENACE disponible en línea en: <http://www.cenace.gob.mx/Paginas/Publicas/MercadoOperacion/SubastasLP.aspx>