



**Comisión de Regulación
de Energía y Gas**

**Manual del programa para calcular la Energía Firme para el
Cargo por Confiabilidad de Plantas Hidráulicas
– ENFICC –**

**RESOLUCIÓN CREG 079 DE 2006
RESOLUCIÓN CREG 085 DE 2007**

Octubre de 2007

MANUAL DEL PROGRAMA PARA CALCULAR LA ENERGÍA FIRME PARA EL CARGO POR CONFIABILIDAD – ENFICC –

INDICE GENERAL

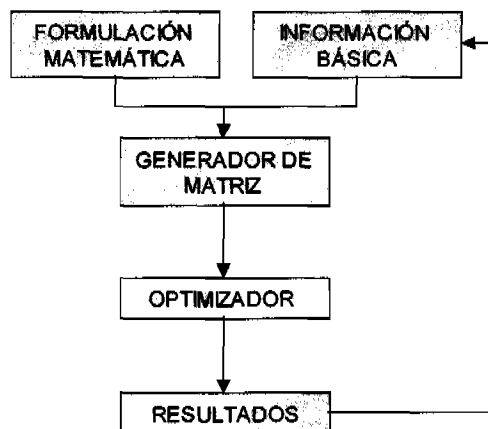
1	DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROGRAMA COMPUTACIONAL	4
2	REQUISITOS PARA LA INSTALACIÓN	5
3	ESPECIFICACIONES	6
3.1	DESCRIPCIÓN GENERAL	6
3.1.1	Problema matemático del cálculo de la ENFICC	6
3.1.2	Problema matemático del cálculo de la ENFICC del 95% PSS para cadenas	8
3.2	HORIZONTE DE ANÁLISIS	9
3.3	PERÍODOS DE OPTIMIZACIÓN	9
3.4	VOLUMEN NIVEL INICIAL DEL EMBALSE	9
3.5	CURVA DE DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD	9
4	INSTALACIÓN DEL PROGRAMA COMPUTACIONAL	11
5	FUNCIONAMIENTO DE LA APLICACIÓN	12
5.1	PANEL DE CONTROL (HOJA "DATOS")	13
5.1.1	Volumen útil inicial (p.u)	13
5.1.2	Optimizador cplex = 1 / glpk = 2	13
5.1.3	Modelo Autónomo / Modelo Cadena	14
5.1.4	Planta inicial y Planta final	14
5.1.5	Carpeta Seleccionada	15
5.1.6	Cálculo del modelo de 2 iteraciones para cadenas	16
5.2	INFORMACIÓN BÁSICA DE PLANTAS (HOJA "DATOS")	17
5.2.1	Nombre de la planta	17
5.2.2	Turbinamiento máximo (m3/s)	17
5.2.3	Turbinamiento mínimo (m3/s)	18
5.2.4	Vertimiento mínimo (m3/s)	18
5.2.5	Factor de conversión (MW/m3/s)	18
5.2.6	Almacenamiento máximo (hm3)	18
5.2.7	Almacenamiento mínimo (hm3)	19
5.2.8	Filtración (m3/s)	19
5.2.9	Cod. Planta	19
5.2.10	En la celda adyacente a la filtración (Columna K) se escribe el número de la planta desde donde proviene el caudal de filtración. Factor Recup. (pu)	19
5.2.11	Número de la serie	19
5.2.12	Planta que turбина	19
5.2.13	Planta que vierte	19
5.2.14	Capacidad Efectiva Neta	19
5.2.15	Índice de Disponibilidad Salidas Forzadas (IHF)	19
5.2.16	Bandera Bombeo	20
5.2.17	Planta que bombea	20
5.2.18	Curva guía Min (1/0)	20
5.2.19	Curva guía Máx(1/0)	20
5.2.20	Volumen inicial	20
5.2.21	Acueducto Riego (1/0)	20
5.2.22	Cod Planta	20
5.2.23	Factor Recup. (pu)	20

5.3	INGRESO DE DATOS	20
5.3.1	Caudales de los ríos (m3/s)	20
5.3.2	Curvas Guías Mínimas	21
5.3.3	Curvas Guías Máximas.....	21
5.3.4	AcctoRiego(m3s)	21
6	RESULTADOS	22
6.1	CÁLCULO DE LA ENFICC Y DEL 95% PSS.....	22
6.2	ENFICC PARA CADA PERIODO DE OPTIMIZACIÓN	22
6.3	ENERGÍA DISPONIBLE ADICIONAL	23
6.4	ENERGÍA GENERADA EN CADA ETAPA ANALIZADA.....	23
6.5	VOLUMEN TURBINADO	23
6.6	VOLUMEN ALMACENADO EN EL EMBALSE.....	24
6.7	VERTIMIENTOS	24
6.8	BOMBEO.....	24
6.9	APORTES NETOS AL EMBALSE	24
6.10	ARCHIVOS DE SALIDA.....	24

1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROGRAMA COMPUTACIONAL

El programa para calcular la Energía Firme para el Cargo por Confiabilidad (ENFICC) está contenido en el archivo con el nombre “**HIDENFICC2007vr3.0.xls**” desarrollado en Microsoft Visual Basic 6.3 para Microsoft Office Excel 2003. Dicho programa genera archivos en formato LP, los cuales replican el modelo de optimización para el cálculo de la ENFICC descrito en el Anexo 9 de la Resolución CREG 079 de 2006.

El cálculo de la ENFICC para plantas hidráulicas se resuelve a través de un algoritmo de Programación Entera Mixta (MIP por sus siglas en inglés) usando el software comercial de optimización CPLEX 10.0. La Gráfica 1 muestra la forma como es resuelto el problema del cálculo de la ENFICC.

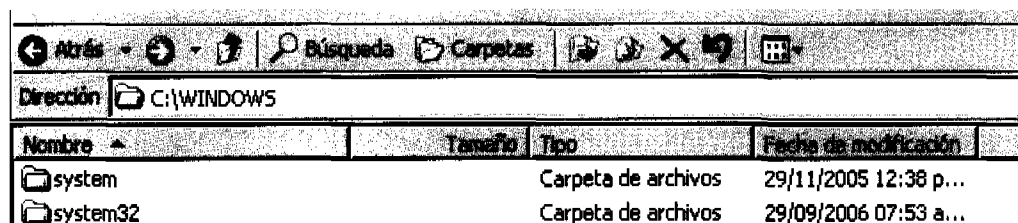


Gráfica 1. Esquema de Solución

2 REQUISITOS PARA LA INSTALACIÓN

Para instalar y ejecutar correctamente este programa es necesario:

1. Disponer de un acceso a Internet que permita bajar de Internet el programa oficial para el cálculo de la ENFICC de plantas hidráulicas.
2. Un ordenador PC con sistema operativo Microsoft Windows® 2000 Professional o XP, con un procesador Pentium III o superior y 128 MegaBytes (MB) de memoria RAM o superior. Mínimo 10 MB libres en disco duro para poder guardar la aplicación y los archivos de salida LP.
3. Para la solución del problema de optimización se debe tener instalado el paquete comercial de optimización CPLEX 10.0. La librería cplex100.dll debe ser copiada en el directorio C:\WINDOWS\system32\, el cual debe estar asociado a una licencia válida de CPLEX en la máquina donde se va a ejecutar la aplicación.



Gráfica 2. Directorio de instalación de la Librería de optimización

4. Como opción alternativa, para la solución del problema de optimización se puede instalar el paquete libre optimización glpk. En caso de usar este software, el cual no es garantizado por el proveedor al ser libre, se debe copiar la librería glpk410.dll en el directorio C:\WINDOWS\system32\.

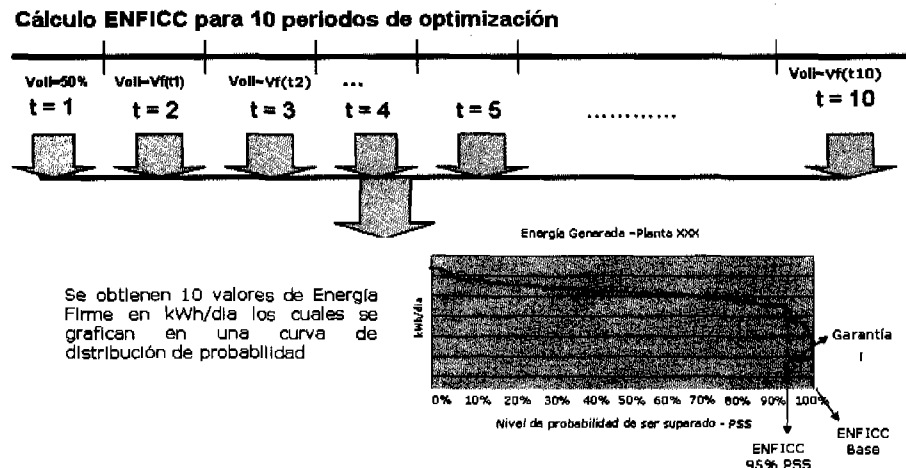
Adicionalmente a estos requisitos técnicos, el usuario debe:

- Conocer el entorno informático de Windows y estar familiarizado con el manejo de Microsoft Office Excel 2003.
- Tener conocimiento de todas las reglas y normativa relacionada con el cálculo de la ENFICC para plantas hidráulicas.

3 ESPECIFICACIONES

3.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

El programa computacional permite calcular la ENFICC empleando la metodología descrita en la resolución CREG 079 de 2006.



Gráfica 3. Metodología de Cálculo ENFICC

Adicionalmente de acuerdo con la resolución CREG 085 de 2007, la aplicación permite calcular la ENFICC del 95% PSS para las cadenas del sistema.

3.1.1 Problema matemático del cálculo de la ENFICC

Para calcular la ENFICC para plantas hidráulicas despachadas centralmente se debe resolver el siguiente problema de optimización¹:

Maximice

ENFICC

Sujeto a:

- Restricción de balance hidráulico*
- Restricción de producción de ENFICC base*
- Restricción de Generación de Energía Disponible Adicional*
- Restricciones para controlar bombeo*
- Restricciones para controlar vertimientos*
- Restricciones de criterios definidos para plantas con curva guía máxima o volumen de espera*
- Restricciones para cumplir los criterios definidos para plantas con curva guía mínima*
- Restricciones para Garantizar convergencia por Turbinamientos Mínimos*
- Restricciones de límites de variables*

¹ La formulación completa del modelo está en la Resolución CREG 079 de 2006

El programa computacional debe calcular la Energía Firme para el Cargo por Confiabilidad (ENFICC) teniendo en cuenta las características y restricciones propias de cada uno de los sistemas hidráulicos, para lo cual se consideran:

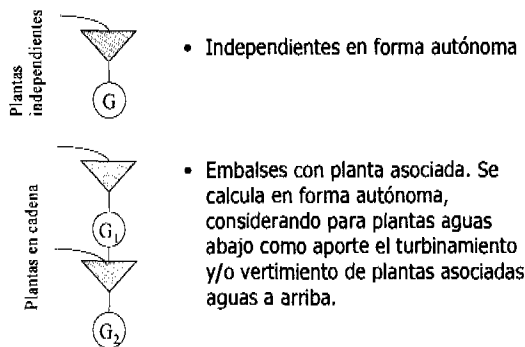
- La topología de la planta o grupo de plantas.
- Los límites del embalse: volumen mínimo técnico y volumen máximo técnico.
- Restricciones de uso del embalse: curva guía mínima y curva guía máxima.
- La curva guía mínima de un embalse solamente puede ser afectada para cumplir con los flujos mínimos para acueducto y riego, en aquellos períodos donde no es posible cumplirlos, sin remover esta restricción.
- Capacidad de turbinamiento máxima y mínima de la planta.
- Índice de Indisponibilidad Histórica de Salidas Forzadas – IHF
- Capacidad máxima de bombeo.
- Capacidad de canales de descarga.
- La Información Hidrológica Oficial del SIN

Adicionalmente, el programa computacional considera:

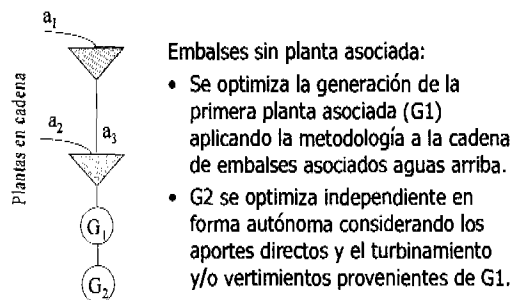
- Solamente se generará por encima de la ENFICC (esta generación corresponde a la denominada Energía Disponible Adicional de la planta hidráulica) de cada período de optimización cuando: *i)* en los meses en que el nivel de embalse sea igual o mayor al de la curva guía máxima o el volumen de espera, en caso de tenerlo, o *ii)* en caso en que el volumen del embalse sea igual al volumen máximo.
- Los vertimientos solamente se pueden presentar cuando se alcance el límite máximo del embalse y el turbinamiento de la planta esté a su máxima capacidad factible.
- El volumen del embalse sólo podrá estar por encima del volumen correspondiente a la curva guía máxima o el nivel de espera, si el embalse correspondiente tiene modelada esta restricción, cuando la planta haya alcanzado su capacidad máxima de turbinamiento.
- El nivel del volumen del embalse sólo podrá ser menor o igual a la curva guía mínima, si la tiene la planta, cuando la planta este turbinando 0 m³/s.

Este programa permite calcular la ENFICC de las siguientes configuraciones de plantas hidroeléctricas:

- La ENFICC de plantas autónomas, las cuales están compuestas por el sistema embalse planta;
- la ENFICC de varios Embalse-Planta en cadena, en donde se calcula la ENFICC a la primera planta aguas arriba (G1). Para la siguiente planta (G2) se utiliza el mismo modelo considerando como aportes al embalse asociados a esta planta, además de los naturales, el caudal turbinado y/o vertido de la planta aguas arriba obtenido del paso anterior. Así sucesivamente para las plantas de la cadena (Ver Gráfica 3);
- la ENFICC de un sistema de varios embalses asociados a una cadena de plantas, en donde se calcula la ENFICC a la primera planta aguas arriba (G1), aplicando la metodología a la cadena de embalses asociados aguas arriba. Para la siguiente planta (G2) se optimiza de forma autónoma considerando como aportes, además de los naturales, optimizando plantas con varios embalses asociados aguas, el caudal turbinado y/o vertido de la planta aguas arriba (Ver Gráfica 4).



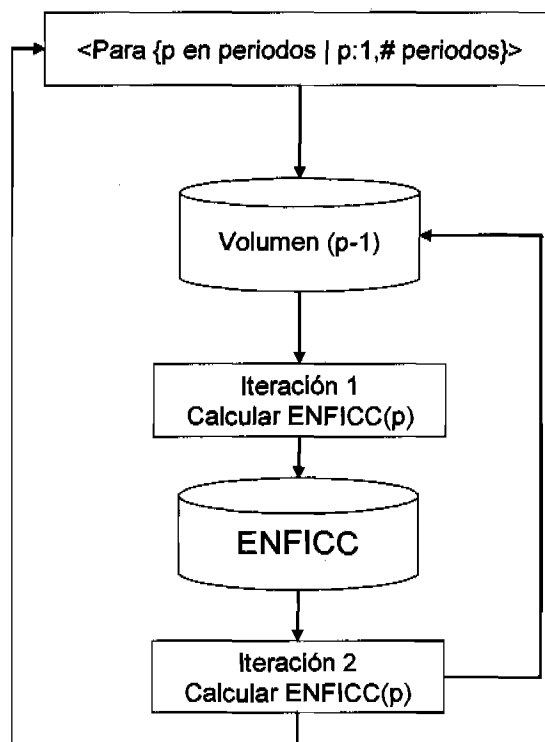
Gráfica 3. Tratamiento de plantas autónomas y cadena de plantas



Gráfica 4. Tratamiento un sistema de varios *embalses* asociados a cadena de plantas

3.1.2 Problema matemático del cálculo de la ENFICC del 95% PSS para cadenas.

De acuerdo con la resolución CREG 085 de 2007, las plantas cuyo tratamiento se asocia a cadenas, podrán calcular la ENFICC del 95% PSS aplicando una metodología con dos iteraciones. En general, el procedimiento se muestra en la gráfica 6.



Gráfica 6. Metodología de dos iteraciones para el cálculo del 95% PSS de cadenas.

Iteración 1: Calcular la ENFICC para cada periodo aplicando la metodología descrita en el Numeral 3.1.1

Iteración 2: Maximizar el volumen al final de cada periodo manteniendo constante la ENFICC calculada en la iteración anterior.

Los volúmenes calculados en la iteración 2 se utilizan como volúmenes iniciales del siguiente periodo. La formulación matemática corresponde a la formulación del anexo 9, artículo 20 de la resolución CREG 079 de 2006, con la siguiente función objetivo:

Maximice

$$\sum_{j \in \Phi_i} \varepsilon_{i,m,j}$$

Además como la ENFICC debe fijarse en el valor calculado en la iteración anterior se adiciona el siguiente límite:

$$ENFICC = ENFICC_{ite1}$$

3.2 HORIZONTE DE ANÁLISIS.

Corresponde al horizonte de la Información Hidrológica Oficial del SIN por planta. Cuando existen diferentes horizontes de información de ríos que aportan a una misma planta, se toma un horizonte de análisis estandarizado correspondiente a la historia hidrológica más reciente. El usuario debe asegurar la consistencia de la longitud de las series hidrológicas para el cálculo de la ENFICC de acuerdo con lo establecido en la Resoluciones CREG 071 y 079 de 2006.

3.3 PERÍODOS DE OPTIMIZACIÓN.

Son periodos de un año, contado desde el primero de mayo del primer año hasta el 30 de abril del siguiente año, y así sucesivamente hasta completar el horizonte de análisis.

El número de periodos de optimización es igual al número de años de información del horizonte de análisis estandarizado, descontando los periodos que queden remanentes por efecto de iniciar el primero de mayo y terminar el 30 de abril. Para los años bisiestos el programa considera el cambio de número de horas del mes de febrero en dicho año.

3.4 VOLUMEN NIVEL INICIAL DEL EMBALSE.

Para el primer periodo de optimización, que inicia el mes de mayo del primer año del horizonte de análisis estandarizado, se toma un volumen de embalse útil del 50%. Para los siguientes periodos de optimización se toma como nivel inicial el nivel final del embalse para el último mes del año inmediatamente anterior, que resulta de la aplicación de la metodología.

3.5 CURVA DE DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD.

Con la ENFICC que se obtiene para cada periodo de optimización, expresada en kWh/día para cada uno de los años analizados, se construye una curva de distribución de probabilidad por planta, ordenando los resultados de menor a mayor. El menor valor

corresponderá al 100% de probabilidad de ser superado y el mayor valor corresponderá al 0% de probabilidad de ser superado.

A cada planta se le calculan los siguientes tipos de ENFICC:

- **ENFICC BASE**
Corresponde a aquella generación que es capaz de entregar la planta en la condición del 100% PSS.
- **ENFICC 95% PSS**
Corresponde a aquella generación que es capaz de entregar la planta en la condición del 95% PSS de la curva de distribución de probabilidades. El valor que se asigne corresponderá a la energía calculada para el período más próximo a la condición del 95% PSS.

4 INSTALACIÓN DEL PROGRAMA COMPUTACIONAL

Para la correcta instalación de la aplicación se debe hacer lo siguiente:

- El archivo **"HIDENFICC2007vr3.0.xls"** debe ser copiado en cualquier folder de la máquina donde se vaya a calcular la ENFICC.
- Se debe instalar el software comercial CPLEX y copiar correctamente la librería `cplex100.dll` en la misma máquina donde se copió el archivo **"HIDENFICC2007vr3.0.xls"**. En caso que se vaya a calcular la ENFICC usando la opción del software libre glpk, sólo se debe copiar la librería `glpk 410.dll` como aparece en el numeral 2 de este manual.
- Se debe verificar que el sistema operativo tenga definido como separador de miles el signo punto (".").

5 FUNCIONAMIENTO DE LA APLICACIÓN

Una vez copiado el programa y las librerías de optimización, se debe abrir el libro de Excel "**HIDENFICC2007vr3.0.xls**", el cual contiene las siguientes hojas:

Q(m3s)Datos	Hoja de ingreso de datos de aportes hidrológicos en m3/s. Cada columna $k-1$ de la hoja corresponde a la información de aportes de la planta k
ActoRiego(m3s)	Hoja de ingreso de datos de acueducto y riego en m3/s. Cada columna $k-1$ de la hoja corresponde a la información de acueducto y riego de la planta k
VolMn(Hm3)Datos	Hoja de ingreso de datos curva guía mínima en Millones de m3. Cada columna $k-1$ de la hoja corresponde a la información de la curva mínima de la planta k
VolMax(Hm3)Datos	Hoja de ingreso de datos curva guía máxima o volumen de espera en Millones de m3. Cada columna $k-1$ de la hoja corresponde a la información de la curva máxima o volumen de espera de la planta k
Datos	Hoja de ingreso de parámetros generales de la aplicación e información básica de las plantas hidráulicas.
Bomb(Hm3)	Hoja de resultados del valor de bombeo en Millones de m3. Cada columna $k-1$ de la hoja corresponde al resultado del bombeo de la planta k para cada mes m
Turb(Hm3)	Hoja de resultados del valor turbinado en Millones de m3. Cada columna $k-1$ de la hoja corresponde al resultado del turbinamiento de la planta k para cada mes m
Vol(Hm3)	Hoja de resultados del nivel de volumen en Millones de m3. Cada columna $k-1$ de la hoja corresponde al resultado del volumen final de la planta k para cada mes m
Vert(Hm3)	Hoja de resultados del valor de vertimiento en Millones de m3. Cada columna $k-1$ de la hoja corresponde al resultado del vertimiento de la planta k para cada mes m
GWh	Hoja de resultados de la generación en GWh/mes. Cada columna $k-1$ de la hoja corresponde al resultado de la energía mensual en GWh/mes de la planta k para cada mes m
EF(Ordenado)	Hoja de resultado con la información de la ENFICC ordenada en forma descendente, expresada en kilovatios hora día para cada año analizado (kWh/día). Cada columna $k-1$ de la hoja corresponde al resultado de la ENFICC ordenada de la planta k para cada mes m . Adicionalmente se entrega el valor de la ENFICC base y del 95%PSS
EF(kWh)	Hoja de resultado con la información mensual de la ENFICC que se obtiene para cada período de optimización, expresada en kilovatios hora día (kWh/día) para cada año analizado. Cada columna $k-1$ de la hoja corresponde al resultado de la ENFICC de la planta k para en el año analizado correspondiente.
EFAdicional	Hoja de resultado con la información mensual de la Energía Disponible Adicional que se obtiene para cada período de optimización, expresada en kilovatios hora día (kWh/día) en cada mes analizado. Cada columna $k-1$ de la hoja corresponde al resultado de la planta k para cada mes m
QFinal(Hm3)	Hoja de verificación del aporte final (considerando todos los aportes) para cada planta en Millones de m3. Cada columna $k-1$ de la hoja corresponde al valor del aporte en Millones de m3 de la planta k para cada mes m
Reporte	Hoja en la que aparece el reporte de condiciones que deben ser verificadas por el usuario para garantizar el resultado de la ENFICC calculada

5.1 PANEL DE CONTROL (HOJA "DATOS")

Los siguientes parámetros deben ser ingresados por el usuario en la hoja DATOS previo a la ejecución del problema de optimización.

The screenshot shows a software interface with a dark background. At the top right, there are two input fields containing the values '0.5' and '1'. Below these are two empty input fields. A button labeled 'Seleccionar' is visible. Further down is a checkbox labeled 'Maximizar Vol. Final (desfibraciones)'. At the bottom is a large button labeled 'Ejecutar ENFICC 1 ITE'.

Gráfica 6. Panel de Control - Hoja Datos

5.1.1 Volumen útil inicial (p.u)

Dato del porcentaje volumen útil inicial en por unidad (p.u) del embalse para el primer año del horizonte de optimización. Para el caso particular, este valor tiene que estar en 0.5 (50% del embalse). La aplicación calcula el volumen inicial de acuerdo con la siguiente formula:

$$\mathcal{E}_{inicial} = (\mathcal{E}_{m\acute{a}x_i} - \mathcal{E}_{min_t\acute{e}c_i}) * 0.5 + \mathcal{E}_{min_t\acute{e}c_i}$$

Donde:

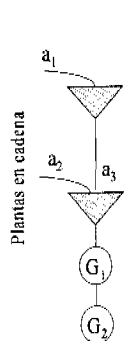
$\mathcal{E}_{m\acute{a}x_i}$ Volumen máximo técnico del embalse en la etapa i en $Mm3$
 $\mathcal{E}_{min_t\acute{e}c_i}$ Volumen Mínimo técnico en el mes i en $Mm3$

5.1.2 Optimizador cplex = 1 / glpk = 2

Parámetro que le indica a la aplicación el tipo de software de optimización a emplear para la solución del problema de optimización. En caso de ser 1, el problema será resuelto usando el CPLEX, en caso de ser 2 el programa usará el glpk para la solución del cálculo de la ENFICC.

5.1.3 Modelo Autónomo / Modelo Cadena

Parámetro que le indica a la aplicación el tipo de modelo que debe ser optimizado. El usuario debe elegir el tipo de modelo antes de ejecutar el cálculo con el fin de cumplir con el procedimiento establecido por la CREG y descrito en el numeral 3.1 (e) de este manual.



Caso Ejemplo

Embalses sin planta asociada:

- Se optimiza la generación de la primera planta asociada (G1) aplicando la metodología a la cadena de embalses asociados aguas arriba.
- G2 se optimiza independiente en forma autónoma considerando los aportes directos y el turbinamiento y/o vertimientos provenientes de G1.

Para el caso particular de este ejemplo. Se debe realizar el siguiente procedimiento para el cálculo de la ENFICC:

- Primero seleccionar la opción de Modelo de Cadena para la primera planta (G1) y el embalse aguas arriba.
- Una vez obtenida la ENFICC para esta cadena, se debe seleccionar la opción de Modelo Autónomo para el cálculo de la planta aguas abajo (G2)

Gráfica 6. Ejemplo Selección de Tipo de Modelo

Modelo Autónomo se aplica para el cálculo de la ENFICC de:

- Plantas compuestas por el sistema embalse planta (ver Gráfica 3)
- Secuencia de varios Embalse-Planta en cadena, en donde se calcula la ENFICC a la primera planta aguas arriba (Ver Gráfica 3),

Modelo de Cadenas se aplica para el cálculo de la ENFICC de:

- Sistema con varios embalses (sin planta) asociados a una cadena de plantas, en donde se calcula la ENFICC a la primera planta aguas arriba (Ver Gráfica 6).

5.1.4 Planta inicial y Planta final

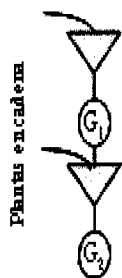
En la hoja de datos se pueden modelar todas las plantas hidráulicas del SIN y cada una tiene asignado un número y un nombre como aparece en la siguiente Gráfica:

Número de la planta	Nombre de la planta
23.3	1

Por ejemplo: en la celda L2 debe aparecer el nombre de la planta 1. Con la anterior información el usuario debe escribir el número de la planta inicial y final (rango) de plantas de la cadena o el rango de plantas autónomas a las que se les quiere calcular la ENFICC.

- Cálculo de ENFICC para plantas Autónomas. La Aplicación permite calcular de forma simultánea todas las plantas que se encuentren ingresadas en la hoja de datos. El cálculo de la ENFICC se hace en forma secuencial, iniciando con la planta inicial hasta calcular la ENFICC de la planta final. Por tanto, se debe tener en cuenta el orden del ingreso de la información de las plantas o de la ejecución del programa para aquellas plantas aguas abajo que reciben el caudal turbinado y/o vertido de la planta aguas arriba.

Caso Ejemplo



- Embalses con planta asociada. Se calcula en forma autónoma, considerando para plantas aguas abajo como aporte el turbinamiento y/o vertimiento de plantas asociadas aguas arriba.

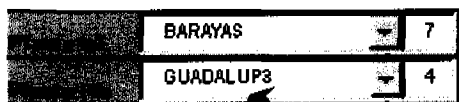
Para el caso particular de este ejemplo. Se debe realizar el siguiente procedimiento para el cálculo de la ENFICC:

- Ingresar en la información de Plantas, primero la información de G1 y luego la de G2.
- Ingresar como dato de Planta Inicial a G1 y como planta final a G2.
- Ejecutar el proceso de cálculo de la ENFICC

OBS: Es posible ejecutar para cada planta independiente haciendo Planta inicial = Planta final (se debe tener la precaución de correr primero el cálculo de ENFICC para G1)

Gráfica 7. Ejemplo Selección Planta Inicial – Planta Final

Para activar por primera vez el ListBox, de forma que despliega el nombre de las plantas, es necesario darle doble clic a la parte interna del ListBox como se muestra a continuación:



Doble Clic en la parte interna del ListBox

5.1.5 Carpeta Seleccionada

Con el fin de verificar la formulación del problema matemático, la aplicación genera un archivo que contiene toda la información del problema de optimización (Función Objetivo y Restricciones) en formato de matriz LP. Por tanto, el usuario deberá escribir en la celda B12 de la Hoja de Datos la dirección de la carpeta en donde almacenará los archivos *.lp. Para el caso particular presentado en la Gráfica 6, la dirección de almacenamiento es la siguiente:



El usuario también podrá seleccionar la carpeta usando el botón de "Seleccionar Carpeta", el cual abrirá una ventana para seleccionar un archivo de la carpeta en la

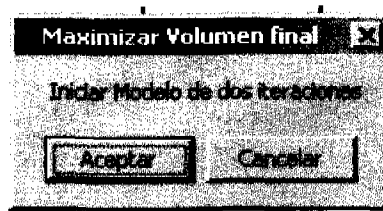
que se eligió almacenar la información (la aplicación automáticamente escribe el directorio en el que debe almacenar los archivos *.lp).

5.1.6 Cálculo del modelo de 2 iteraciones para cadenas.

Para ejecutar el modelo de dos iteraciones, se debe activar el check-box "Maximizar Vol.Final (2 iteraciones)" en la hoja "Datos".

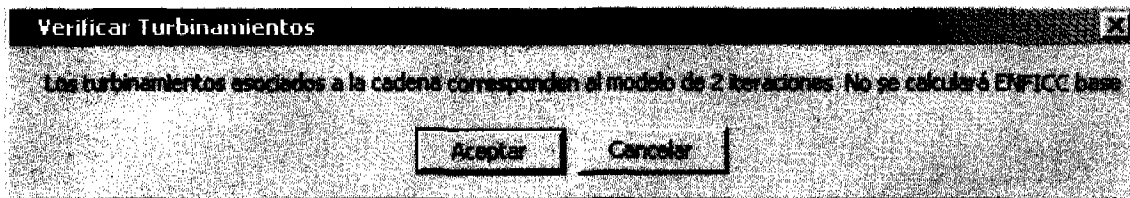


Con esta opción la aplicación ejecuta para todo el horizonte el modelo de una iteración para calcular la ENFICC base. Cuando finaliza este cálculo se muestra el siguiente mensaje por pantalla:



Se presiona el botón "Aceptar" y se inicia el cálculo del modelo de dos iteraciones, maximizando el volumen final de cada etapa.

Se debe tener en cuenta que esta segunda iteración actualiza la hoja de turbinamientos "(Turb Hm3)", luego si una vez terminada esta ejecución se calcula la ENFICC para las plantas con modelo autónomo aguas abajo de la cadena, se tomarán estos turbinamientos para el cálculo de la ENFICC base. Para alertar al usuario de este hecho se presenta en pantalla el siguiente mensaje:



En este caso solo se calcula la ENFICC del 95% PSS del modelo autónomo.

5.2 INFORMACIÓN BÁSICA DE PLANTAS (HOJA "DATOS")

Nombre de la planta	Capacidad (MW)	Indice de Disponibilidad Forzada (IDF)	Capacidad Efectiva (MW)	Número de segundos del mes (s)
Celda 1	23.3	0	0	0
Celda 2	0	0	0	0
Celda 3	0	0	0	0
Celda 4	0	0	0	0
Celda 5	0	0	0	0
Celda 6	0	0	0	0
Celda 7	0	0	0	0
Celda 8	0	0	0	0
Celda 9	0	0	0	0
Celda 10	0	0	0	0

Gráfica 8. Parámetros Generales de Plantas

Cada recurso hidráulico tiene definidos los siguientes parámetros:

5.2.1 Nombre de la planta

Es el nombre de la planta y todos los resultados se escribirán con este nombre. Corresponde a la Celda L_i (para cada planta i , formato de color naranja).

5.2.2 Turbinamiento máximo (m3/s)

En esta celda se encuentra el valor del caudal máximo que puede ser turbinado. Este dato debe ser ingresado o es calculado por la aplicación de acuerdo con los siguientes criterios:

- El dato debe ser ingresado para canales de descarga y embalses en m3/s. La aplicación identifica automáticamente que la información corresponde a un embalse o a un arco de descarga (el cual puede ser modelado como una planta ficticia, con Turbinamiento Máximo = Capacidad del arco) cuando el valor de la capacidad es 0 MW.
- El dato es calculado internamente por la aplicación, cuando el valor de $\rho \neq 0$ y la capacidad en MW es mayor que cero (>0MW) y convertido a millones de m3 utilizando la siguiente expresión:

$$\tau_{\max} = \frac{(1 - IHF) * CEN_{(MW)} * \sigma_{m(s)}}{1000000 * \rho_{(MW / m3/s)}}$$

Donde:

ρ	Datos del factor medio de conversión en MW/m3/s
IHF	Índice de Disponibilidad Forzada de la planta en pu
CE	Capacidad Efectiva de la planta en MW
$\sigma_{m(s)}$	Número de segundos del mes m

Para el caso en que se quiera modelar el límite máximo de un arco de descarga o túnel de conducción (m3/s), el usuario debe ingresar el valor del límite máximo en la celda

correspondiente al Turbinamiento máximo en m3/s. La aplicación convierte este valor internamente en Millones de m3, aplicando la siguiente fórmula:

$$\tau_{\max_i} = \frac{\tau_{\max_i} * \sigma_{m(s)}}{1000000}$$

5.2.3 Turbinamiento mínimo (m3/s)

Es el mínimo caudal que debe ser turbinado por la planta para usos diferentes a la generación de energía eléctrica, el cual debe ser ingresado en m3/s. La aplicación convierte este valor internamente en Millones de m3, aplicando la siguiente fórmula:

$$\tau_{\min_i} = \frac{\tau_{\min_i(m3/s)} * \sigma_{m(s)}}{1000000}$$

5.2.4 Vertimiento mínimo (m3/s)

Es el caudal mínimo que debe ser descargado del embalse por restricciones diferentes a la generación de energía eléctrica, el cual debe ser ingresado en m3/s. La aplicación convierte este valor internamente en Millones de m3, aplicando la siguiente fórmula:

$$V_{\min_i} = \frac{V_{\min_i(m3/s)} * \sigma_{m(s)}}{1000000}$$

5.2.5 Factor de conversión (MW/m3/s)

Es el factor de conversión medio para las plantas hidráulicas definido bajo la regulación vigente. Para que la ecuación de producción y los cálculos internos sean consistentes, este factor es convertido en MWh/Millones de m3 de la siguiente forma:

$$\rho_i = \frac{\rho_{i(MW/m3/s)}}{0.0036}$$

Para el caso en que se quiera modelar el límite máximo de un arco de descarga o túnel de conducción usando plantas ficticias para:

- El modelo Autónomo. el usuario deberá ingresar un valor de $\rho_i \neq 0$ que le garantice el turbinamiento máximo (máximo caudal) del arco de descarga.
- El modelo de Cadena. el usuario deberá ingresar un valor de $\rho_i = 0$.

5.2.6 Almacenamiento máximo (Hm3)

Corresponde al Volumen máximo Técnico del embalse. Se ingresa en millones de m3 (Hm3).

5.2.7 Almacenamiento mínimo (Hm3)

Corresponde al Volumen Mínimo Técnico del embalse igual al volumen entre el nivel mínimo técnico y el nivel mínimo físico. Se ingresa en millones de m3 (Hm3).

5.2.8 Filtración (m3/s)

El valor indicado en esta celda corresponde al caudal que se debe sacar del agua disponible en el embalse (*i*) para efectos de cumplir con descargas por filtración que puede ser utilizado para desviar agua hacia acueductos, unidades de generación, otros, el cual debe ser ingresado en m3/s. La aplicación convierte este valor internamente en millones de m3, aplicando la siguiente fórmula:

$$Filtración_i = \frac{Filtración_{i(m3/s)} * \sigma_{m(s)}}{1000000}$$

5.2.9 Cod. Planta

Corresponde al código de la planta de la cual proviene la filtración. La planta que corresponde a este código deberá tener un valor de filtración en (m3/s) diferente de cero correspondiente al caudal que deberá ser extraído de dicho elemento.

5.2.10 En la celda adyacente a la filtración (Columna K) se escribe el número de la planta desde donde proviene el caudal de filtración. Factor Recup. (pu)

En la celda adyacente a Cod. Planta (Columna L) se escribe el valor en por unidad del caudal que es aprovechado por la planta que proviene de la filtración de otra planta. Si todo se recupera se escribe 1.

5.2.11 Número de la serie

Esta celda es calculada por el programa y le indica al usuario desde que fila está leyendo los caudales que llegan a la planta en cuestión. La hoja de caudales "Hoja: (Q(m3s)Datos" contiene los caudales de cada río en el mismo orden de las plantas.

5.2.12 Planta que turбина

Se indica en esta celda el número de la planta que le turбина a la planta que se está analizando. Se pueden tener hasta cinco valores indicando que hasta cinco plantas aguas arriba le pueden turbinar a una planta que se esté analizando. Por ejemplo, Playas debe tener en la fila "Planta que Turbina" los valores de los números de las plantas que turbinan en ella sus caudales.

5.2.13 Planta que vierte

Se indica en esta celda el número(s) de la(s) planta(s) que vierte(n) hacia la planta que se está analizando. Se tienen hasta cinco plantas aguas arriba que le pueden verter a una planta determinada.

5.2.14 Capacidad Efectiva Neta

Se escribe el valor de Capacidad Efectiva Neta de la planta en MW.

5.2.15 Índice de Disponibilidad Salidas Forzadas (IHF)

Se escribe en la celda adyacente a la celda que contiene el valor de Capacidad Efectiva (Columna L). Se indica en por unidad.

5.2.16 Bandera Bombeo

Esta opción se utiliza para tomar parte del caudal que se turbinaba en una planta y direccionarlo hacia una planta diferente de la que le turbinaba normalmente, si la bandera esta en 1 le indica al programa que debe modelar bombeo para la planta en particular. Esta opción sólo debe ser modelada para el caso de ejecutar el modelo de cadenas.

En la columna *M* de la fila donde aparece la Bandera Bombeo se escribe el valor máximo y mínimo obligatorio de bombeo en m³/s.

5.2.17 Planta que bombea

En esta celda se escribe el número de la planta desde donde proviene el bombeo. La planta de la que proviene el bombeo debe tener la bandera de bombeo = 1 y el valor de máximo de bombeo debe ser mayor a 0 m³/s.

5.2.18 Curva guía Min (1/0)

En esta celda se escribe 1 si se desea modelar la curva guía mínima para la planta y/o embalse y cero (0) si no se desea modelarla.

5.2.19 Curva guía Máx(1/0)

En esta celda se escribe 1 si se desea modelar la curva guía máxima o volumen de espera para la planta y cero (0) si no se desea modelarla.

5.2.20 Volumen inicial

En esta celda el programa, una vez termine su ejecución, escribe el valor del volumen útil inicial que tenía el embalse (*i*) en el año inicial de la simulación. Este valor es el resultado de aplicar la formula:

$$\varepsilon_{inicial} = (\varepsilon_{máx} - \varepsilon_{min_téc}) * 0.5 + \varepsilon_{min_téc}$$

5.2.21 AcueductoRiego (1/0)

En esta celda se escribe 1 si se desea modelar demanda de acueducto o riego (m³/s) y cero (0) si no se desea modelarla.

5.2.22 Cod Planta

En la celda adyacente al de AcueductoRiego se escribe el número de la planta desde donde proviene caudal de Acueducto y Riego.

5.2.23 Factor Recup. (pu)

En esta celda se escribe el valor en por unidad, que es aprovechado por la planta del caudal que proviene de Acueducto y Riego de otra planta. Si todo el caudal asociado al Acueducto y Riego se recupera, se escribe 1.

5.3 INGRESO DE DATOS

5.3.1 Caudales de los ríos (m³/s)

Los valores de los caudales mensuales en m³/s que llegan a cada planta (*k*) modelada en la hoja "Datos" se deben ingresar en la Hoja denominada "Q(m³s)Datos" en la columna

$k+1$. Es decir, la primera columna de la hoja "Q(m3s)Datos" se usa para ingresar el caudal en m³/s de la primera planta, la segunda columna para la segunda planta y así sucesivamente. Si los caudales son nulos se debe escribir cero.

En general, se debe tener en cuenta que:

- Los caudales deben iniciar en mayo del año más lejano del cual se tenga información disponible de caudales de los ríos.
- La aplicación comienza a leer los datos de los caudales desde la fila en que estos sean diferentes de nulo (""). Si tienen ceros, la aplicación lo tomará como valor válido e iniciará el cálculo de la ENFICC desde este mes asumiendo que éste corresponde al primer mayo de la serie histórica.
- Para la aplicación las fechas en la columna A son relativas (es decir el usuario los puede definir en la columna A) y el programa escribirá en la hoja "Datos" desde que celda está leyendo los caudales.
- Para el caso de cadenas (archivo PrototipoCadenaVr1.xls) se debe asegurar que los caudales inicien todos en el mismo año para la cadena que se esté analizando.

5.3.2 Curvas Guías Mínimas

En la hoja denominada "VolMn(Hm3)Datos", se escribe el valor en Millones de m³ de los volúmenes correspondientes a la curva guía mínima del embalse para cada uno de los meses de la optimización. Si la ENFICC se calcula para n años se debe "repetir" la curva guía mínima para cada periodo de optimización. Los valores se deben escribir en la columna $(k+1)$ correspondiente a la planta (k) e iniciar en la fila en que comienzan los datos de caudales de la serie histórica ingresados en la Hoja "Q(m3s)Datos".

5.3.3 Curvas Guías Máximas

En la hoja denominada "VolMax(Hm3)Datos", se escribe el valor en Millones de m³ de los volúmenes correspondientes a la curva guía máxima o volumen de espera del embalse para cada uno de los meses de la optimización. Si la ENFICC se calcula para n años se debe "repetir" la curva guía máxima para cada periodo de optimización. Los valores se deben escribir en la columna $(k+1)$ correspondiente a la planta (k) e iniciar en la fila en que comienzan los datos de caudales de la serie histórica ingresados en la Hoja "Q(m3s)Datos".

5.3.4 AcdtoRiego(m3s)

En la hoja denominada "AcdtoRiego(m3s)", se escribe el valor en m³/s de la demanda de Acueducto y Riego. El ingreso de datos es mensual, si el valor es constante para el periodo de optimización (año t), se repiten doce valores correspondientes al dato de demanda de Acueducto y Riego de la planta para el año t . Los valores se deben escribir en la columna $(k+1)$ correspondiente a la planta (k) e iniciar en la fila en que comienzan los datos de caudales de la serie histórica ingresados en la Hoja "Q(m3s)Datos".

6 RESULTADOS

6.1 CÁLCULO DE LA ENFICC Y DEL 95% PSS

En la hoja "EF(Ordenado)", como fue descrito en el numeral 3.5 de este documento se utiliza para la construcción de la Curva de Distribución de Probabilidad, en esta se escribe el valor de la Energía Firme en kWh/día para cada uno de los periodos de optimización en forma descendente y se toma el menor valor como ENFICC Base y se calcula la energía para el primer periodo más próximo a la condición del 95% PSS de la siguiente forma:

Por ejemplo, en caso de tener para una planta los siguientes seis resultados de ENFICC (kWh/día) ordenados para cada uno de los periodos en forma descendente:

ENFICC Ordenado	%
560	0
550	0.2
540	0.4
530	0.6
520	0.8
500	1

La columna % se calcula como:
 $\% = 1/\text{periodos} - 1$

Por tanto, para este ejemplo:

$\% = 0.2$

Siendo $\% = 0$ para el último valor (menor valor de ENFICC o ENFICC Base)

El valor más próximo a 0.95%, diferente a la ENFICC base (100%), es 520, el cual será reportado como el correspondiente al 95%PSS

6.2 ENFICC PARA CADA PERIODO DE OPTIMIZACIÓN

En la hoja "EF(Kwh)" se escribe el valor de la ENFICC en kWh/día para cada uno de los periodos de optimización. El reporte permite consultar para cada uno los periodos de optimización su respectivo valor de ENFICC. Se debe buscar los resultados en la columna que corresponda a la planta analizada.

Para escribir el resultado de la ENFICC en kWh/día el programa hace internamente el siguiente cálculo:

$$ENFICC_{(kWh/dia)} = ENFICC_{(MW)} * 1000 * 24_{horas}$$

Adicionalmente el valor de la ENFICC es redondeado a cero decimales aplicando la siguiente regla:

- Dígito menor que 5. Si el primer siguiente decimal es menor que 5, el valor no se modifica.
- Dígito mayor o igual que 5. Si el primer decimal es mayor o igual que 5, el valor se incrementa en una unidad.

La forma en que esta regla ha sido implementada calculando el valor entero de la ENFICC en kWh/día +0.5 de la siguiente manera:

$$ENFICC_{(redondeo)} = Enter(ENFICC_{(kWh/dia)} + 0.5)$$

Por ejemplo, el valor 12.589555 es redondeado encontrando el valor entero de (12.589555+0.5) que es igual a 13.

6.3 ENERGÍA DISPONIBLE ADICIONAL

La Hoja “EFA adicional” contiene la información mensual de la Energía Disponible Adicional que se obtiene para cada período de optimización, expresada en kWh-día. Se debe buscar los resultados en la columna que corresponda a la planta analizada.

El valor de la Energía Disponible Adicional para cada planta (*i*) y para cada mes (*m*) del período de optimización se calcula de la siguiente manera:

$$ENFICCAdicional_{i,m} = \tau_Adicional_{i,m} * 1000 * (\rho / 0.0036)$$

Donde:

$\tau_Adicional_{i,m}$	Variable de nivel de turbinamiento adicional en Mm3 en el mes <i>m</i> para la planta <i>i</i>
ρ	Datos del factor medio de conversión en MW/m3/s

Para llevar el valor de la “EFA adicional” a kWh-día, se divide el valor por el número de días correspondiente de cada mes de la siguiente manera:

$$ENFICCAdicional_{i,m} = (\tau_Adicional_{i,m} * 1000 * (\rho / 0.0036)) / diasMes_m$$

Adicionalmente el valor de la ENFICC Adicional es redondeado a cero decimales aplicando la regla explicada anteriormente.

6.4 ENERGÍA GENERADA EN CADA ETAPA ANALIZADA

En la hoja denominada “GWh” se escribe la generación obtenida del proceso de optimización para el mes, es decir, el resultado es escrito en GWh/mes. Se debe buscar los resultados en la columna que corresponda a la planta analizada y en la fila donde se leyó el primer dato de hidrología. Este valor es calculado por la aplicación como:

$$GWh / mes = \tau_{i,m} * (\rho / 3.6)$$

Donde:

$\tau_{i,m}$	Variable de nivel de turbinamiento en Mm3 en el mes <i>m</i> para la planta <i>i</i>
ρ	Datos del factor medio de conversión en MW/m3/s

6.5 VOLUMEN TURBINADO

En la hoja denominada “Turb(Hm3)” se escribe el valor final de los turbinamientos totales en millones de m3 para cada mes del período de optimización. Se debe buscar los resultados en la columna que corresponda a la planta analizada y en la fila donde se leyó el primer dato de hidrología.

6.6 VOLUMEN ALMACENADO EN EL EMBALSE

En la hoja denominada "Vol(Hm3)" se escribe el volumen final del embalse en millones de m3 almacenado para cada mes del período de optimización. Se debe buscar los resultados en la columna que corresponda a la planta analizada y en la fila donde se leyó el primer dato de hidrología.

6.7 VERTIMIENTOS

En la hoja denominada "Vert(Hm3)" se escribe el valor final de los vertimientos en millones de m3 para cada mes del período de optimización. Se debe buscar los resultados en la columna que corresponda a la planta analizada y en la fila donde se leyó el primer dato de hidrología.

6.8 BOMBEO

En la hoja denominada "Bomb(Hm3)" se escribe el valor final del bombeo en millones de m3 para cada mes del período de optimización. Se debe buscar los resultados en la columna que corresponda a la planta de la planta que tenga activa la bandera de bombeo (sólo para el caso de ejecutar el Modelo de Cadena) y en la fila donde se leyó el primer dato de hidrología.

6.9 APORTES NETOS AL EMBALSE

En la hoja "QFinal(Hm3)" se escribe en millones de m3 el valor de:

- la suma de los aportes que llegan al embalse
- menos la filtración y/o Acueducto y Riego que se deba hacer de esta embalse.
- más la filtración y/o Acueducto y Riego que provenga de otra planta
- más, para el caso de Plantas Autónomas, los turbinados y/o vertimientos de plantas aguas arriba asociadas.

Los datos almacenados en esta Hoja sirven para revisar que el caudal neto de la planta contiene todas las operaciones descritas anteriormente.

6.10 ARCHIVOS DE SALIDA

La aplicación escribe en el directorio seleccionado para tal fin (ver numeral 5.1.5) los archivos *.lp que genera para resolver el problema de optimización.

Para el modelo de una iteración el nombre del archivo es generado de la siguiente forma:

<Nombre de la planta> + <"Periodo"> + <# del período> + <"ITE1"> + <".lp">

Para el modelo de dos iteraciones se generan dos archivos. El de la primera iteración con la siguiente estructura:

<Nombre de la planta> + <"Periodo"> + <# del período> + <"ITE2"> + <".lp">

Y para la segunda iteración:

<Nombre de la planta> + <"VolMx"> + <"Periodo"> + <# del periodo> + <"ITE2"> + <".lp">

Maximize Obj:

```

FT
Subject To
Rest_vol_27_1 : volm_27_1 + Turb_27_1 + vert_27_1 = 178.5664
Rest_Aux1_27_1 : Turb_27_1 - ATurbBase_27_1 - ATurbInv_27_1 = 0
RestVerMn_27_1 : Vert_27_1 - 0 Iver1_27_1 >= 0
RestVerMx_27_1 : Vert_27_1 - 999999999 Iver1_27_1 <= 0
RestVolMx_27_1 : volm_27_1 - 31.46 Iver_27_1 >= 6.15
RestEFA0_27_1 : ATurbInv_27_1 - 0 Iver_27_1 >= 0
RestEFA1_27_1 : ATurbInv_27_1 - 170.517469006601 Iver_27_1 - 0 Iver2_27_1 <= 0
RestTurMx_27_1 : Turb_27_1 - 170.517469006601 Iver1_27_1 >= 0
RestAux3_27_1 : Iver1_27_1 - Iver_27_1 <= 0
Rest_vol_27_2 : volm_27_2 - volm_27_1 + Turb_27_2 + vert_27_2 = 99.0144
Rest_Aux1_27_2 : Turb_27_2 - ATurbBase_27_2 - ATurbInv_27_2 = 0
RestVerMn_27_2 : Vert_27_2 - 0 Iver1_27_2 >= 0
RestVerMx_27_2 : Vert_27_2 - 999999999 Iver1_27_2 <= 0
RestVolMx_27_2 : volm_27_2 - 31.46 Iver_27_2 >= 6.15
RestEFA0_27_2 : ATurbInv_27_2 - 0 Iver_27_2 >= 0
RestEFA1_27_2 : ATurbInv_27_2 - 165.016905490259 Iver_27_2 - 0 Iver2_27_2 <= 0
RestTurMx_27_2 : Turb_27_2 - 130.4744 Iver1_27_2 >= 0
RestAux3_27_2 : Iver1_27_2 - Iver_27_2 <= 0
Rest_vol_27_3 : volm_27_3 - volm_27_2 + Turb_27_3 + vert_27_3 = 43.65792
Rest_Aux1_27_3 : Turb_27_3 - ATurbBase_27_3 - ATurbInv_27_3 = 0
RestVerMn_27_3 : Vert_27_3 - 0 Iver1_27_3 >= 0
RestVerMx_27_3 : Vert_27_3 - 999999999 Iver1_27_3 <= 0
RestVolMx_27_3 : volm_27_3 - 31.46 Iver_27_3 >= 6.15
RestEFA0_27_3 : ATurbInv_27_3 - 0 Iver_27_3 >= 0
RestEFA1_27_3 : ATurbInv_27_3 - 170.517469006601 Iver_27_3 - 0 Iver2_27_3 <= 0
RestTurMx_27_3 : Turb_27_3 - 75.11792 Iver1_27_3 >= 0
RestAux3_27_3 : Iver1_27_3 - Iver_27_3 <= 0
Rest_vol_27_4 : volm_27_4 - volm_27_3 + Turb_27_4 + vert_27_4 = 31.87296
Rest_Aux1_27_4 : Turb_27_4 - ATurbBase_27_4 - ATurbInv_27_4 = 0
RestVerMn_27_4 : Vert_27_4 - 0 Iver1_27_4 >= 0
RestVerMx_27_4 : Vert_27_4 - 999999999 Iver1_27_4 <= 0
RestVolMx_27_4 : volm_27_4 - 31.46 Iver_27_4 >= 6.15
RestEFA0_27_4 : ATurbInv_27_4 - 0 Iver_27_4 >= 0
RestEFA1_27_4 : ATurbInv_27_4 - 170.517469006601 Iver_27_4 - 0 Iver2_27_4 <= 0
RestTurMx_27_4 : Turb_27_4 - 63.33296 Iver1_27_4 >= 0
RestAux3_27_4 : Iver1_27_4 - Iver_27_4 <= 0
Rest_vol_27_5 : volm_27_5 - volm_27_4 + Turb_27_5 + vert_27_5 = 50.2848

```

Gráfica 9. Archivo LP