

4. MODELACIÓN DEL SISTEMA MAULE EN OASIS

4.1 Aspectos Generales

OASIS with OCL™ es un programa generalizado para modelar la operación del recurso agua en un sistema. OASIS simula las rutas de agua de un sistema representado por nodos y arcos.

Una de las características más poderosas de OASIS es que simula las rutas de agua mediante programación lineal entera. Esto significa, para el usuario, que todas las reglas de operación son expresadas como “Función Objetivo”, “Variables” y “Restricciones”.

Función Objetivo: es una medida cuantitativa del sistema que se desea optimizar (maximizar o minimizar) (Linares et al, 2001)

Variables: representan las decisiones que se pueden tomar para afectar el valor de la Función Objetivo. Desde un punto de vista funcional, se pueden clasificar en variables independientes o principales y variables dependientes o auxiliares o de estado, aunque matemáticamente son todas iguales (Linares et al, 2001)

Restricciones: Representan el conjunto de relaciones (expresadas mediante ecuaciones e inecuaciones) que ciertas variables están obligadas a satisfacer (Linares et al, 2001)

En Programación Lineal, la Función Objetivo debe ser una función lineal, y las restricciones deben ser expresables como ecuaciones e inecuaciones lineales (Faulín y Juan, 2004)

Debido a esta naturaleza, las metas están en competencia con otras metas, y para ello, el usuario define la precedencia de una meta sobre otra mediante los “pesos relativos”, lo que implica que se realiza una especie de ranking de metas.

Por lo tanto, los **pesos** describen la importancia relativa que una variable en particular tiene en el sistema. Es una prioridad asignada a las variables (caudales, demandas, volúmenes embalsados, etc) (Calsim, water resources simulation model, 2005)

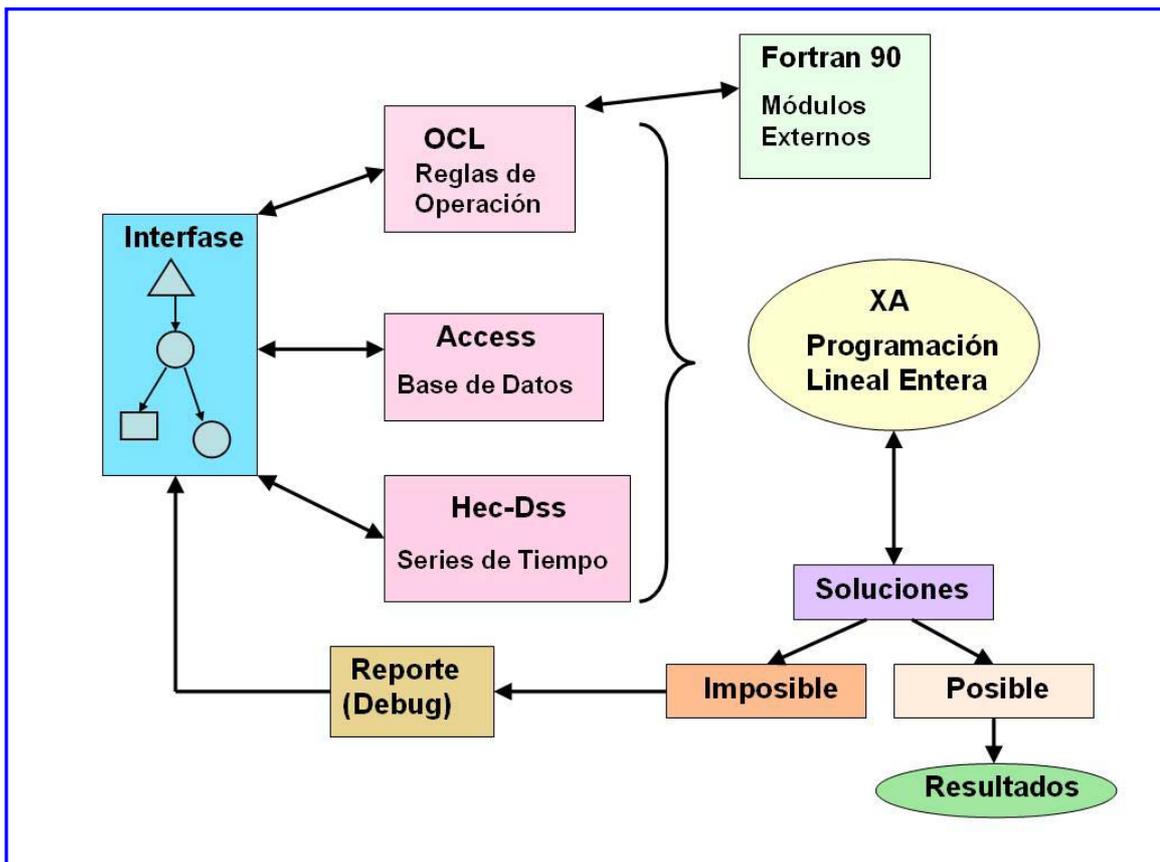
Otra propiedad de OASIS, no menos importante, es el uso de OCL (*operations control language*). El rol de OCL es similar a un “macro lenguaje” en otros tipos de

programas computacionales, es decir, es el lenguaje base de entrada a OASIS que posee una gran flexibilidad para definir reglas de operación.

En caso que se desee programar ciertas reglas que tanto OASIS como OCL no sean capaces de realizar, se puede recurrir a otros lenguajes de programación, como por ejemplo Fortran 90 (utilizado en esta tesis), es decir, se puede realizar un programa aparte, llamado “**módulo externo**”, el cual intercambia información con OASIS, ya que este último está diseñado para compartir información con otros modelos, programas o simplemente rutinas.

La Figura 4.1 muestra la estructura de OASIS y el diagrama general de flujo de la información:

Figura 4.1
Diagrama de Flujo de OASIS



Solución Posible (Feasible Solution) es cuando todas las restricciones y límites de las variables son obedecidos.

Solución Imposible (Infeasible LP) es donde LP no todas las restricciones y límites de las variables simuladas pueden ser obedecidas, por ejemplo, la Ec. N°1.

$$\begin{aligned} A &> 5 \\ A &= B \\ B &< 0 \end{aligned} \qquad \text{(Ec. N°1)}$$

Durante este capítulo se explicará en mayor detalle cada una de las etapas en que OASIS opera.

Modelo: Es un esquema teórico, generalmente en forma matemática, de un sistema o de una realidad compleja, que se elabora para facilitar su comprensión y el estudio de su comportamiento (Diccionario de la Lengua Española, Real Academia Española)

A continuación se presentará cómo se realizó la modelación del Modelo Maule en OASIS.

La idea central es mostrar al lector la flexibilidad y versatilidad de OASIS, así como también las limitaciones que posee.

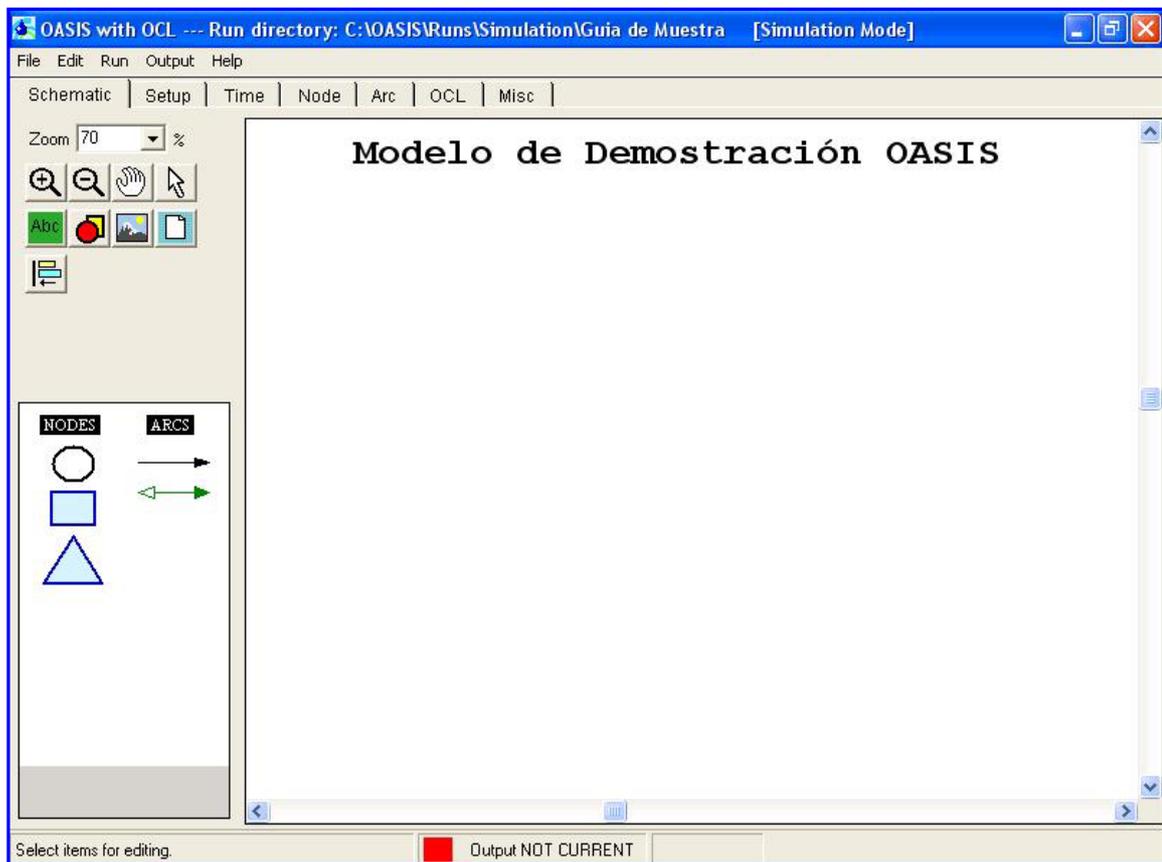
4.2 Representación Física del Sistema

Antes de comenzar a ingresar cualquier tipo de información, se debe crear el esquema del sistema. Se debe abrir OASIS y seleccionar la paleta *Schematic* ubicada en la parte superior de la pantalla.

La Figura 4.2 donde se muestra donde se ingresa el esquema del sistema.

Los botones que aparecen en la parte izquierda de la pantalla pertenecen a: Zoom, movimiento de esquema, insertar texto, insertar imágenes, para seleccionar un objeto y para configurar la página.

Figura 4.2
Ingreso del Esquema del Sistema



Luego se comienzan a ingresar los nodos y arcos del sistema. Los círculos son uniones, donde se realiza balance hídrico o se pueden utilizar como nodos finales o salidas de la cuenca. Los rectángulos son las demandas del sistema, en este caso, se utilizaron como zonas de riego. Los triángulos pertenecen a los embalses del sistema y las flechas indican la dirección de las aguas. Existen dos tipos de arcos, los negros que llevan agua desde un nodo a otro, y los arcos verdes que se utilizan cuando existe un caudal reversible. Un ejemplo para explicar cómo se utiliza el caudal reversible, es para la simulación de un pozo subterráneo, en él, el caudal que va en una dirección (positivo) sería el caudal de bombeo, y el que va en el sentido contrario (negativo), sería el caudal de recarga.

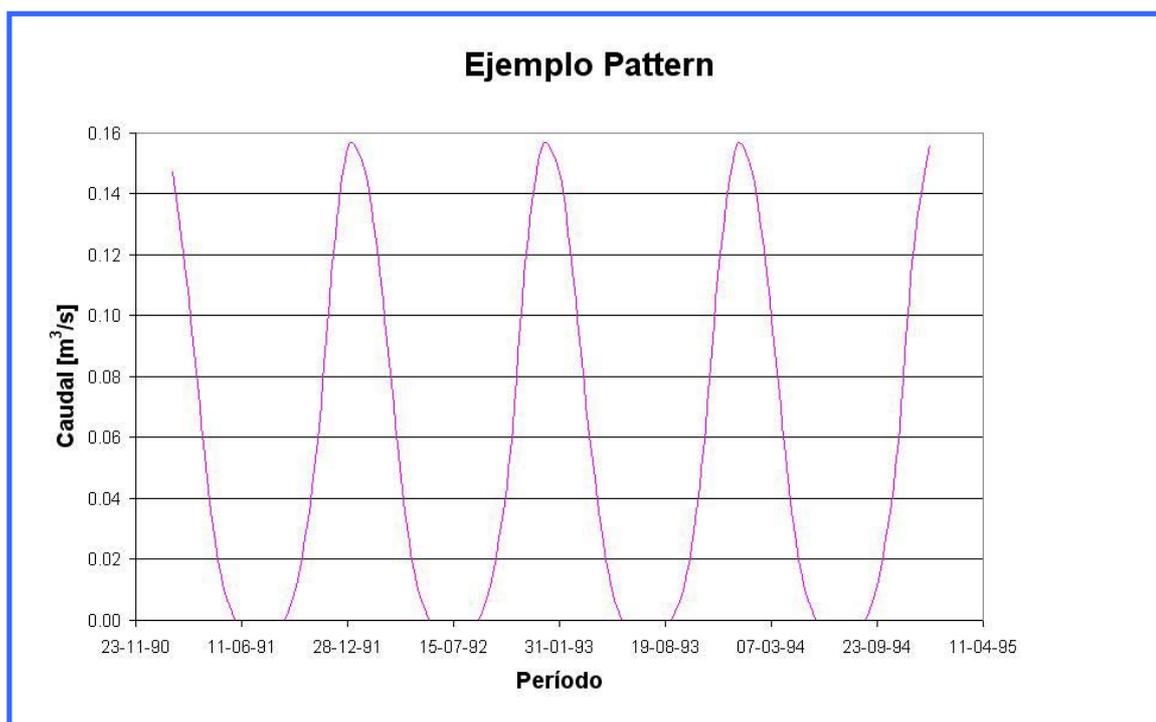
Cada vez que se dibuja un elemento Nodo, Demanda o Embalse, se deben ingresar los datos pedidos por OASIS, por ejemplo: Número y Nombre del Nodo, los cuales se van guardando automáticamente en una base de datos (Access).

Además, se debe explicitar si el nodo posee *inflow* o caudal entrante. Si posee inflow, se debe explicitar si se ingresará a través de OCL, pattern o Time Series.

OCL permite ingresar las series a través de curvas que el usuario establece, mediante reglas de entrada, por ejemplo, el caudal de febrero debe ser igual al caudal de noviembre; ya que al se poseen todas las ventajas que un lenguaje de programación acepta.

Los datos se ingresarán a través de Pattern, sólo cuando los valores poseen un patrón fijo año a año. La Figura 4.3 muestra un ejemplo del tipo de curvas que se pueden ingresar mediante la opción Pattern.

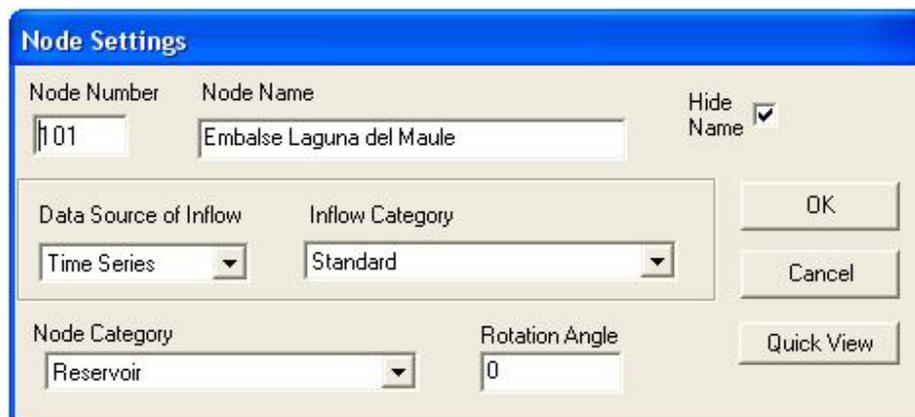
Figura 4.3
Ejemplo de Ingreso mediante Pattern



Finalmente, Hec-Dss, que es una base de datos desarrollada por US Army Corps of Engineers Hydrologics Engineering Center (HEC), especialmente diseñada para trabajar con series de tiempo DSS (Stands for Data Storage System), la cual no posee ningún tipo de restricción en el ingreso de datos (manual OASIS with OCL™, 2005).

En la Figura 4.4 se muestra el ingreso de un nodo embalse, numerado 101 (dato ingresado por el usuario), llamado Embalse Laguna del Maule. Los caudales de entrada al nodo (inflow) se ingresarán mediante Time Series, y la categoría del nodo es estándar (esta opción es por default, a menos que se defina otra opción)

Figura 4.4
Ingreso de Información a los Nodos Dibujados



Para el ingreso de los arcos, los datos requeridos son: Nombre del Arco, seleccionar si existe un caudal máximo, un caudal mínimo o un caudal reversible (no son excluyentes entre si). Si es así para alguna de las alternativas, se debe escoger si la estadística de caudales (máximos, mínimos o reversibles), se ingresará por medio de OCL, Pattern o Time Series. En la Figura 4.5 se muestra el cuadro asociado a los arcos.

La opción *Dummy Arc* se utiliza cuando se dibuja un arco, pero aún no se está utilizando, cuando se requiera su uso, se desactiva esta opción.

Figura 4.5
Ingreso de Información a los Arcos Ingresados

The image shows a dialog box titled "Arc Settings" with a blue header. It contains the following fields and controls:

- Arc Name:** Text input field containing "1° Tramo Río Maule".
- Hide Name:** Checkmark box (checked).
- Hide Entire Arc:** Checkmark box (unchecked).
- US Node Number:** Text input field containing "101".
- US Node Name:** Text input field containing "Embalse Laguna del Maule".
- DS Node Number:** Text input field containing "102".
- DS Node Name:** Text input field containing "Nodo de Unión".
- Rotation Angle:** Text input field containing "0".
- Dummy Arc:** Checkmark box (unchecked).
- Category:** Dropdown menu with "Two-way Arc" selected.
- Data Source of Max Flow:** Dropdown menu with "Pattern" selected.
- Data Source of Min Flow:** Dropdown menu with "OCL" selected.
- Data Source of Max Reverse Flow:** Dropdown menu with "Time Series" selected.
- Buttons:** "OK", "Cancel", and "Quick View" are located on the right side of the dialog.

Luego de terminado el esquema, se selecciona la paleta Node (ubicada en la parte superior de la pantalla), y se escoge en **Databases Tables** la opción *Node*, aquí aparecerá toda la información ingresada cuando se dibujó el sistema.

Al escoger la paleta *Arc* (ubicada en la parte superior de la pantalla), opción *Arc* **Databases Tables**, se encontrará la información ingresada para los Arcos dibujados.

La Figura 4.6 y Figura 4.7 muestran la información tanto para nodos como para arcos respectivamente.

Figura 4.6
Base de Datos de los Nodos

Node	Name	Category	Type	Inflow
1	CH1 (Central Isla)	Demand	Demand	None
2	CH2 (Central Curillínque)	Demand	Demand	None
101	EM1 (Embalse Laguna del Maule)	Reservoir	Reservoir	Time Series
102	Pié de Muro Embalse Laguna del Maule	Junction	Junction	None
103	Río Puelche en cota 1.400	Junction	Junction	Time Series
105	Hoya Intermedia Puelche	Junction	Junction	Time Series
106	Río Maule en junta con río Puelche	Junction	Junction	Time Series
108	Río Maule en bocatoma Central Isla	Junction	Junction	Time Series
109	EM2 (Embalse Laguna La Invernada)	Reservoir	Reservoir	Time Series
111	Río Cipreses en bocatoma Central Isla	Junction	Junction	Time Series
112	Aducción Central Isla	Junction	Junction	None
115	Río Maule en junta con río Cipreses	Junction	Junction	Time Series
116	Estero Corrientes	Junction	Junction	Time Series
117	Río Colorado en cota 800	Junction	Junction	Time Series
118	Bocatoma Central Loma Alta	Junction	Junction	None
121	Río Maule en bocatoma Aducción C. Melado	Junction	Junction	Time Series
122	EM4 (Embalse Melado)	Reservoir	Reservoir	Time Series
124	Río Claro en San Carlos	Junction	Junction	Time Series
125	Río Maule en Armerillo	Junction	Junction	Time Series
201	Afluentes a Laguna El Dial	Junction	Junction	Time Series
203	Proyecto Embalse Guaiquivilo	Junction	Junction	Time Series
204	Río de la Puente en cota 1220	Junction	Junction	Time Series
207	Río Melado en junta río De la Puente	Junction	Junction	Time Series
209	Río Melado en bocatoma canal Melado	Junction	Junction	Time Series
301	Río Lontue en cabecera	Junction	Junction	Time Series
302	Río Claro en cabecera	Junction	Junction	Time Series
303	Hoya Intermedia Río Claro	Junction	Junction	Time Series
304	Río Claro en camarico	Junction	Junction	None
305	Hoya Intermedia R. Claro	Junction	Junction	Time Series
306	Río Lircay en Puente Las Rastras	Junction	Junction	Time Series

Por lo tanto, OASIS es una interfase de Access, ya que toda la información requerida para dibujar una figura, es guardada en una base de datos para su posterior utilización.

Figura 4.7
Base de Datos de los Arcos

OASIS with OCL --- Run directory: C:\OASIS\Runs\Simulation\Maule [Simulation Mode]

File Edit Run Output Help

Schematic | Setup | Time | Node | Arc | OCL | Misc

Database Tables

- Arc
- Minimum Flow
- Maximum Flow
- Max Reverse Flow
- Arc Weights

US	DS	Name	Category	Min Flow	Max Flow	MaxRev Flow	Dummy	Hide
1	116	1_2	Normal Arc	None	OCL	None	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
2	118	2_2	Normal Arc	None	OCL	None	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
101	501	RI1_1	Normal Arc	None	OCL	None	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
101	602	Re1_1	Normal Arc	None	None	None	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
102	106	RI1_2	Normal Arc	None	None	None	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
103	106	RI2_1	Normal Arc	None	None	None	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
105	106	105_106	Normal Arc	None	None	None	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
106	108	RI1_3	Normal Arc	None	None	None	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
108	112	CA1 (Rama Maule)	Normal Arc	None	OCL	None	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
108	115	RI1_4	Normal Arc	None	None	None	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
109	502	RI3_1	Normal Arc	None	OCL	None	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
109	604	Re2_1	Normal Arc	None	None	None	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
109	605	F2_1	Normal Arc	None	None	None	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
111	112	CA2 (Rama Cipreses)	Normal Arc	None	OCL	None	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
111	115	RI3-2	Normal Arc	None	None	None	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
112	1	1_1	Normal Arc	None	OCL	None	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
112	115	RI29-1	Normal Arc	None	None	None	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
115	121	RI1_5	Normal Arc	None	None	None	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
116	2	2_1	Normal Arc	None	OCL	None	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
116	121	RI5_1	Normal Arc	None	None	None	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
117	121	RI4_1	Normal Arc	None	None	None	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
118	121	RI32_1	Normal Arc	None	None	None	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
121	122	CA123 (C.Pehuenche)	Normal Arc	None	OCL	None	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
121	125	RI1_6	Normal Arc	None	None	None	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
121	802	CA30_1	Normal Arc	None	OCL	None	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
121	806	CA31_1	Normal Arc	None	OCL	None	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
121	900	CA5	Normal Arc	None	OCL	None	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
122	504	Arco Extra EM4	Normal Arc	None	OCL	None	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
122	606	Re4_1	Normal Arc	None	OCL	None	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
122	608	Arco Aux1	Normal Arc	None	None	None	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Output CURRENT

4.3 Definición de Unidades

Antes de ingresar cualquier tipo de información numérica, se deben definir las unidades a utilizar.

Una de las flexibilidades del software OASIS es que se pueden definir las unidades que se deseen, en el sistema que se requiera.

Para poder realizar la Definición de Unidades se debe escoger la paleta *Misc*, ubicada en la parte superior de la pantalla, seleccionar la opción *Units Definitions* de **Databases Tables** y luego seleccionar el botón *Units Wizard*.

En la Figura 4.8 se muestra cómo se definieron las unidades para modelar el sistema Maule:

Figura 4.8
Pantalla de Definición de Unidades

Specify Units of Measurement

Edit the data so that all conversion equations are correct.

If you change a primary unit, you must then change the conversion factors for other units that are defined by that primary unit.

	Primary Units <small>By default all calculations, OCL, and output are in primary units</small>	Alternate Units <small>Input data can be entered in alternate units, and CASIS will convert the data into primary units.</small>
Volume Units <small>Most OCL variables and output variables are measured in primary volume units</small>	Name of Primary Unit: <input type="text" value="M3"/> 1 M3 = 1 m ³	1 <input type="text"/> = <input type="text"/> M3 1 <input type="text"/> = <input type="text"/> M3
Big Volume Units <small>Reserved for larger quantities of volume. Big volume units are used as alternates for volume units. No calculations use these as defaults.</small>	Name of Primary Unit: <input type="text" value="Hm3"/> 1 Hm3 = 1000000 M3	1 <input type="text"/> = <input type="text"/> Hm3 1 <input type="text"/> = <input type="text"/> Hm3
Flow Rate Units <small>No calculations use these as defaults but they can be used for input and output.</small>	Name of Primary Unit: <input type="text" value="m3_s"/> 1 m3_s = 86400 M3 / Day	1 <input type="text"/> = <input type="text"/> m3_s 1 <input type="text"/> = <input type="text"/> m3_s
Surface-Area Units <small>Used in evaporation calculations.</small>	Name of Primary Unit: <input type="text" value="Ha"/> 1 Ha = 10000 m ²	1 <input type="text"/> = <input type="text"/> Ha 1 <input type="text"/> = <input type="text"/> Ha
Elevation Units <small>Used for calculations of reservoir elevation and evaporation.</small>	Name of Primary Unit: <input type="text" value="m"/> 1 m = 1000 mm	1 <input type="text"/> = <input type="text"/> m 1 <input type="text"/> = <input type="text"/> m
Evaporation Units <small>Reserved for smaller quantities of length. Evaporation units are used as alternates for elevation units.</small>	Name of Primary Unit: <input type="text" value="mm"/>	1 <input type="text"/> = <input type="text"/> mm 1 <input type="text"/> = <input type="text"/> mm

Luego de ingresadas las unidades a utilizar en la modelación del sistema, se puede comenzar a ingresar información de embalses, estadísticas, reglas de operación, etc.

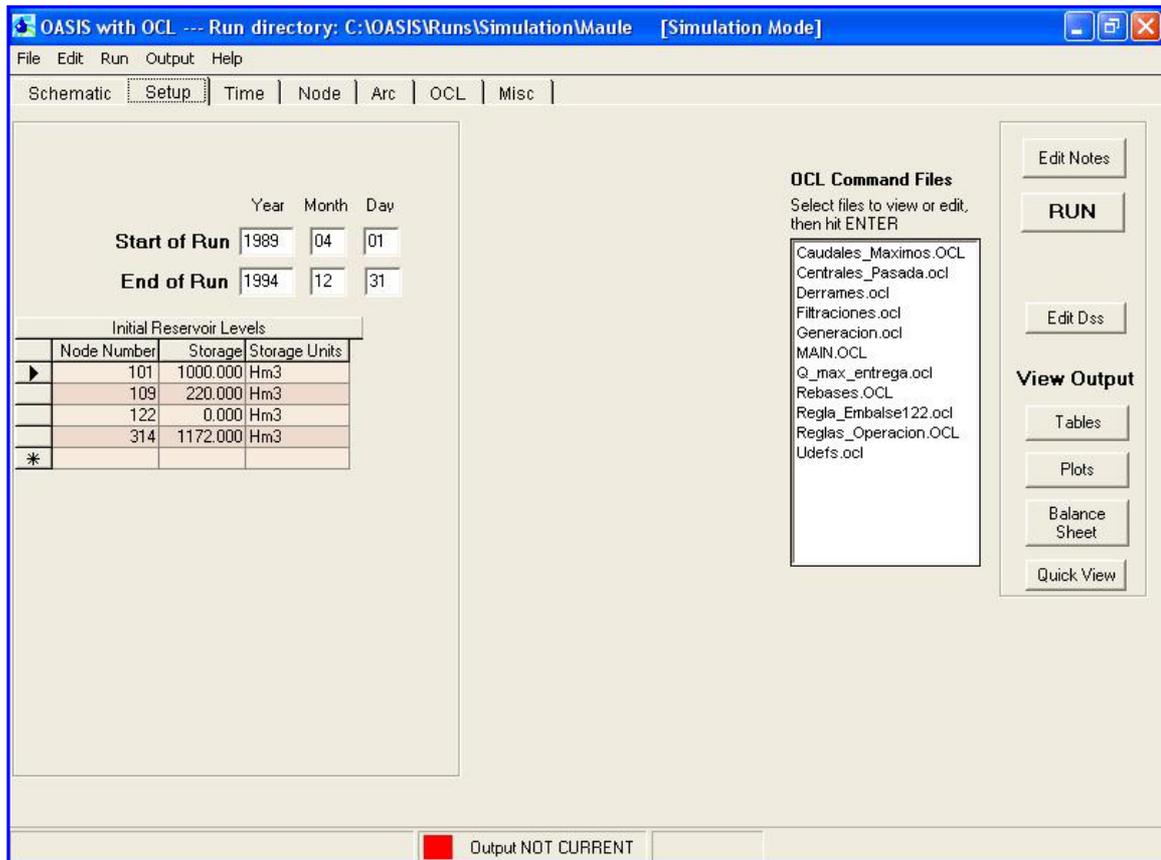
4.4 Datos y Condiciones Iniciales

Si seleccionamos la paleta *Setup* ubicada en la parte superior de la pantalla, se puede apreciar que requiere la fecha de inicio y fin de la modelación, además de las condiciones iniciales de los embalses (Volumen Embalsado).

En la parte derecha de la pantalla aparecen los **OCL Command Files**, es decir, los archivos de OCL que uno crea para definir las diferentes reglas de operación.

La Figura 4.9 muestra la paleta *Setup*, con las condiciones iniciales y los archivos OCL creados para la simulación del Modelo Maule.

Figura 4.9
Datos Iniciales y Archivos OCL



Es un beneficio obvio que los registros históricos sean lo más largo posibles, ya que es la mejor forma de apreciar las magnitudes y frecuencias de los extremos hidrológicos. Tiene un valor muy importante la extensión de registros hidrológicos (Gleick y Nash, 1991). Los inconvenientes de probar los diseños contra sólo los caudales históricos, se han acentuado (Loucks, 1981), especialmente para sistemas con grandes cantidades de almacenamiento al final de la temporada. La síntesis de flujos estadísticamente equivalentes a registros hidrológicos observados ha sido utilizada por hidrólogos durante muchos años (Bras y Rodríguez-Iturbe, 1985). Aunque teóricamente atractivo y útil en muchos casos, la hidrología estocástica ha encontrado limitaciones en contextos de decisión a causa de la incertidumbre de los parámetros. Por estas razones es que el registro

histórico se utiliza más a menudo para probar los diseños y las reglas de operación.

Por lo tanto, las fechas entre las cuales se realizó la simulación fue entre 01 de Abril de 1989 y el 31 de Diciembre de 1994.

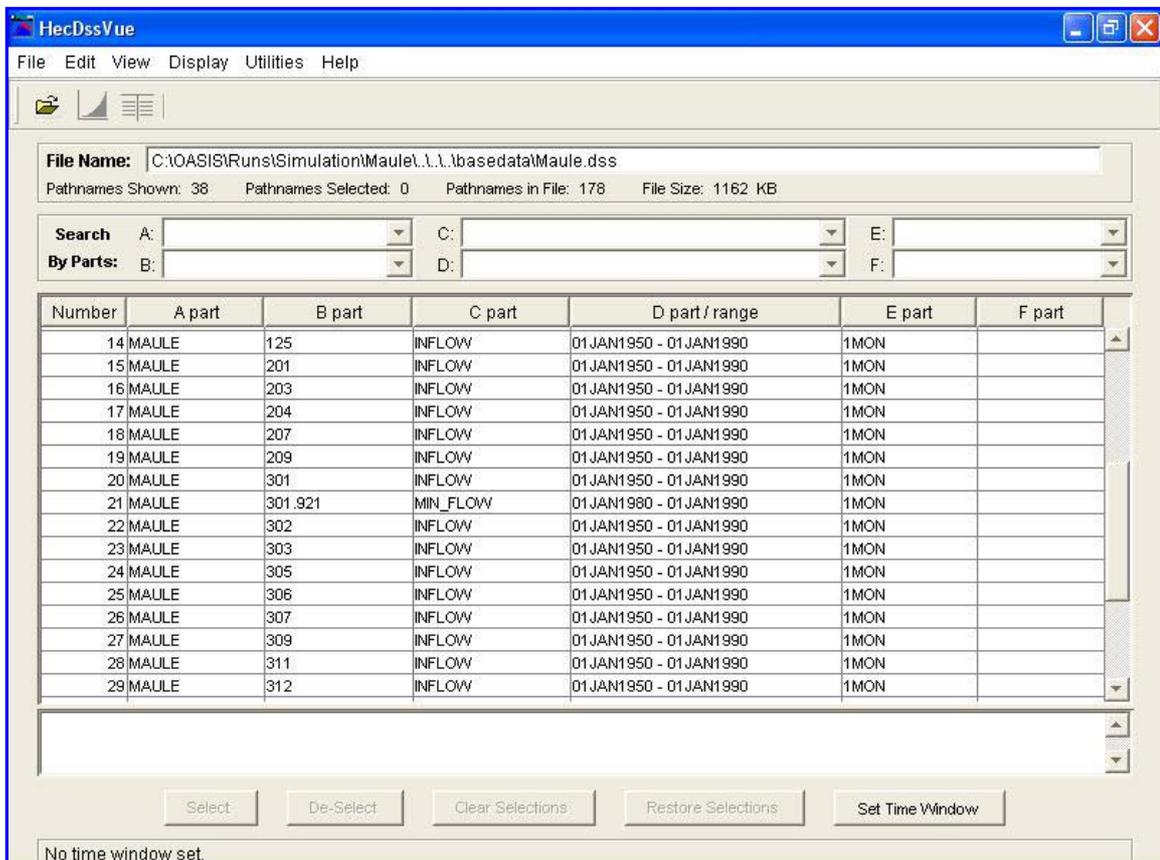
Notar que las unidades son muy importantes al momento de ingresar un valor, ya que el programa se rige por las unidades ingresadas por el usuario y por default utiliza las unidades de m³, por lo que no deben ser olvidadas ni mal ingresadas.

Notar que en la parte derecha de la pantalla, aparece el botón **Edit Dss**, el cual se utiliza para editar los archivos de Time Series ingresados en Hec – Dss.

4.5 Programa Hec – Dss

Como ya se explicó anteriormente, Hec – Dss trabaja con series de tiempo. Estas series pueden ser de caudales mínimos, máximos, demandas, Inflow, etc.

Figura 4.10
Ejemplo de Hec – Dss



La Figura 4.10 muestra el inicio de Hec – Dss.

Los datos deben ser ingresados con cierto orden y poseen una configuración muy rígida al momento de definir cada serie de tiempo. También se requiere ingresar las unidades en que se ingresan los datos, debido a que OASIS lee las unidades ingresadas en Hec – Dss.

Notar que en la parte A, se ingresa el nombre del Modelo de Simulación en que se utilizarán las estadísticas.

En la parte B se ingresa el número del nodo, al cual pertenece la estadística ingresada.

En la parte C, se define el tipo de estadística que se está ingresando; esta puede ser: INFLOW, MIN_FLOW, MAX_FLOW, DEMAND, MAXREV_FLOW, EVAP, UPPER_RULE y LOWER_RULE.

La parte D no es definida por el usuario, sino que depende de los datos ingresados (Año – Inicio y Año – Final). Hec – Dss automáticamente completa esta información.

La parte E es definida por el usuario y depende de las series de tiempo que se poseen. Pueden ser a nivel diario, anual, trimestral, etc. Para esta modelación se utilizaron estadísticas a nivel mensual.

La Figura 4.11 presenta un ejemplo de caudales ingresados a Hec – Dss.

Figura 4.11
Ejemplo de Time Series



The screenshot shows a software window titled "/MAULE/125/INFLOW/01 JAN 1950/1MON//". The window contains a table with the following data:

Ordinate	Date	Time	125 INFLOW
Units			m3_s
Type			PER-AVER
1	31 Jan 50	24:00	2.96
2	28 Feb 50	24:00	2.27
3	31 Mar 50	24:00	2.02
4	30 Apr 50	24:00	1.30
5	31 May 50	24:00	10.64
6	30 Jun 50	24:00	12.33
7	31 Jul 50	24:00	8.04
8	31 Aug 50	24:00	18.39
9	30 Sep 50	24:00	13.37

En la parte superior derecha de la Figura 4.11 se puede apreciar, que la unidad de ingreso de la estadística *inflow* fue en m^3/s para el nodo 125. Esta información es ingresada por el usuario.

4.6 Reglas de Operación

Antes de continuar con el ingreso de datos al modelo, se definirá lo que son las reglas de operación.

Reglas de Operación: son instrumentos políticos usados para definir las condiciones de operación y los procedimientos implementados cuando las condiciones no son ideales (Johnson, 1996).

Un problema clásico en la gestión de los recursos hídricos, es la necesidad de incluir criterios de gestión que tengan en cuenta un grado conveniente de anticipación en las acciones tanto durante la etapa de planificación como en la de explotación del sistema, hecho que adquiere mayor relevancia en presencia de eventos extremos. Es importante entonces, contar con reglas operativas que contemplen tanto las restricciones a los suministros en el caso de una sequía hidrológica como las restricciones en las descargas de los embalses para poder afrontar eventos de crecidas. Sin embargo, fijar reglas que se adapten a todos los escenarios de oferta y de demanda de agua posibles, implica establecer para cada uno de estos casos, reglas específicas que indiquen por ejemplo, cuándo comenzar a aplicar tal o cual medida de mitigación; el grado adecuado de las restricciones de uso del agua y el grado de prioridad de afectación de los usuarios, entre otros factores, lo cual obliga a discretizar el problema antes de modelarlo.

En períodos hidrológicos normales, la regla de gestión de sistemas hídricos más utilizada (normal) consiste en suministrar todo el volumen de agua demandado al sistema mientras se disponga de recurso y entregar el recurso disponible cuando es inferior a la demanda. Sin embargo, esta regla no contempla la no linealidad de las pérdidas asociadas a los déficits en algunos sectores de usuarios. La introducción de restricciones es uno de los elementos matemáticos más utilizados para solucionar este inconveniente. Sin embargo, en sistemas hídricos complejos, con más de un embalse, debe establecerse además de qué manera se va a distribuir el recurso entre los elementos de almacenamiento. Esto abre un nuevo abanico de posibilidades de operación, aumentando considerablemente la dimensionalidad del problema de gestión del sistema en su conjunto.

Algunos esfuerzos se han realizado en la determinación, en base a la experiencia de distintos investigadores y operadores de sistemas de múltiples embalses, de grupos de consignas (o maniobras) operativas aconsejables para cada tipo de

sistema (embalses en cadena o en serie) y cada tipo de propósito (control de crecidas, generación de energía, riego, agua potable, recreación, almacenamiento de energía) y estación o período (llenado o vaciado). En este sentido Luna J. y Guzmán J., (1999), sintetizan en dos tablas (Tabla 4.6-1 y Tabla 4.6-2) las reglas conceptuales básicas para una conveniente operación de estos sistemas (orden de llenado y vaciado de cada embalse, ubicación de espacios para control de crecidas, maximización del almacenamiento de energía en el caso del uso energético, y otras). Todas estas ideas pueden derivar en una ecuación matemática específica para cada propósito factible de optimizar buscando maximizar o minimizar alguna función objetivo determinada. Sin embargo, este esquema sólo entrega un marco operacional donde movernos, el cual estará regido en la realidad por situaciones especiales y excepciones, lo cual evidentemente supone que para resolver el problema de gestión de un sistema hídrico en su conjunto no sólo deba realizarse un refinamiento del conjunto de reglas a utilizar sino que en algunos casos, las reglas específicas para un período o un propósito particular se contrapongan con el objetivo global del sistema en su conjunto.

Tabla 4.6-1
Reglas Generales para Manejo de Embalses en Serie
(Lund y Guzman, 1999)

Propósito	Estación/Período	
	Llenado	Vaciado
Uso Doméstico e Industrial	Llenar primero los embalses aguas arriba	Vaciar primero los embalses aguas abajo
Control de Crecidas	Llenar primero los embalses aguas arriba	Vaciar primero los embalses aguas abajo
Almacenamiento de Energía	Llenar primero los embalses aguas arriba	Vaciar primero los embalses aguas abajo
Producción de Hidroenergía	Maximizar el almacenamiento en embalses con mayor capacidad de producción de energía	Maximizar el almacenamiento en embalses con mayor capacidad de producción de energía
Recreación		Compensar la explotación marginal de la recreación

Tabla 4.6-2
Reglas Generales para Manejo de Embalses en Paralelo
(Lund y Guzman, 1999)

Propósito	Estación/Período	
	Llenado	Vaciado
Uso Doméstico e Industrial	Compensar la probabilidad de derrames estacionales entre los embalses	Compensar la probabilidad de vaciado entre los embalses
Control de Crecidas	Dejar más espacio de almacenamiento en los embalses sometidos a crecidas	No es aplicable en este caso
Almacenamiento de Energía	Compensar el valor esperado de la energía de los derrames estacionales entre los embalses	Para el último paso de tiempo, compensar el valor esperado de la energía de los derrames de la estación de llenado entre los embalses
Calidad de Agua	Compensar el valor esperado de la calidad del agua estacional marginal entre los embalses	Para el último paso de tiempo, compensar el valor esperado de la energía de los derrames de la estación de llenado entre los embalses
Producción de Hidroenergía	Maximizar el almacenamiento con embalses con mayor capacidad de producción de energía	Maximizar el almacenamiento en embalses con mayor capacidad de producción de energía
Recreación	Compensar la explotación marginal de la recreación de almacenamientos adicionales entre los embalses	Compensar la explotación marginal de la recreación de almacenamientos adicionales entre los embalses

Ahora bien, las reglas de operación adecuadas para períodos hidrológicos normales, en general no serán las adecuadas para períodos hidrológicos extremos donde puede esperarse, por ejemplo, una crecida o una situación de sequía hidrológica prolongada. En estos casos, las reglas de operación deben modificarse no sólo durante este período sino con un cierto grado de anticipación, lo que obliga a realizar un análisis de gestión para horizontes de largo y mediano plazo antes de definir conjuntos de reglas de manejo y planificación.

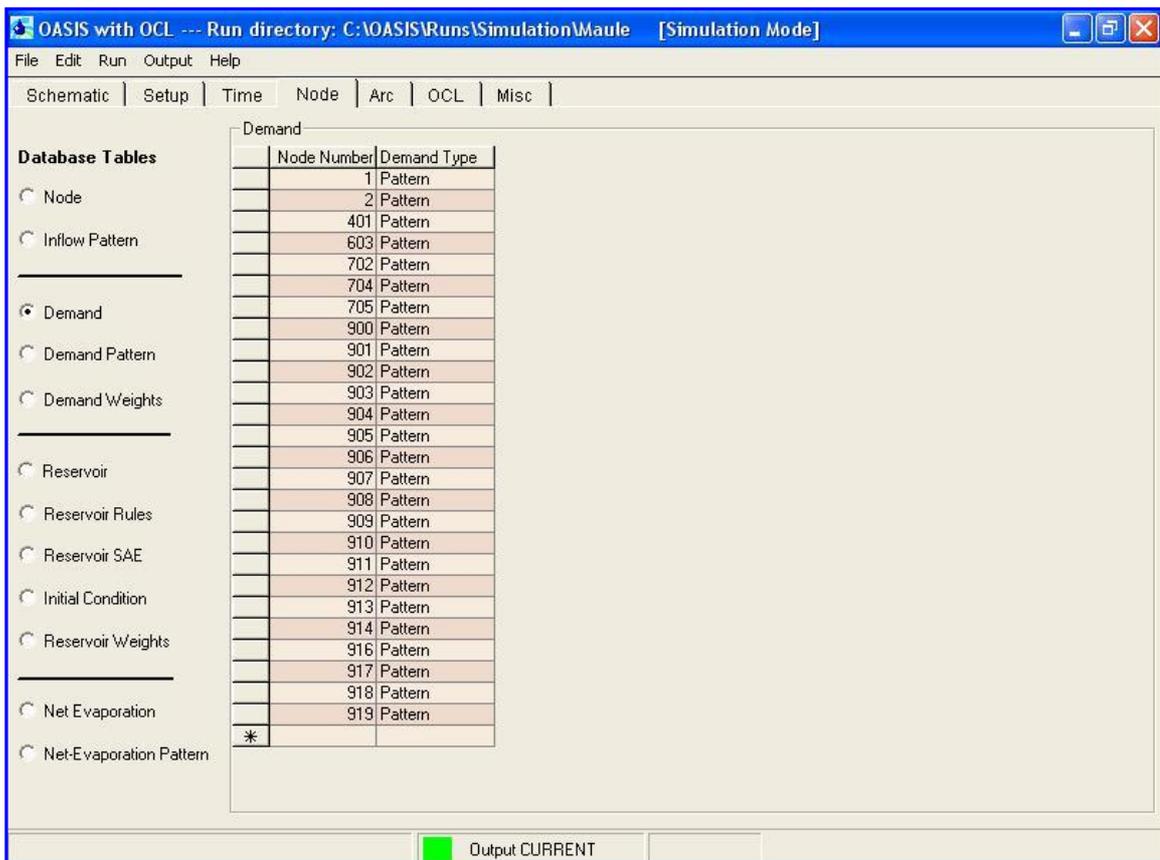
4.7 Demandas: Zonas de Riego y Centrales Hidroeléctricas

Las demandas se modelan en la paleta *Node* (ubicada en la parte superior de la pantalla), opciones *Demand*, *Demand Pattern* y *Demand Weights* de **Databases Tables**.

a. Opción Demand

En esta tabla se definen todas las demandas existentes en el sistema y es acá donde se ingresa el formato en que se ingresarán las estadísticas para cada una de ellas (OCL, Time Series y Pattern). La Figura 4.12 muestra la opción *Demand*.

Figura 4.12
Opción Demand



b. Opción Demand Pattern

Esta opción permite ingresar las estadísticas de las demandas cuando los valores no varían año a año, por ejemplo, todos los años en el mes de febrero, el nodo 603 demanda 160 m³/s (ver Figura 4.13).

Figura 4.13
Opción Demand Pattern

The screenshot shows the OASIS with OCL software interface. The 'Demand Pattern' option is selected in the left sidebar. The main window displays a table with the following data:

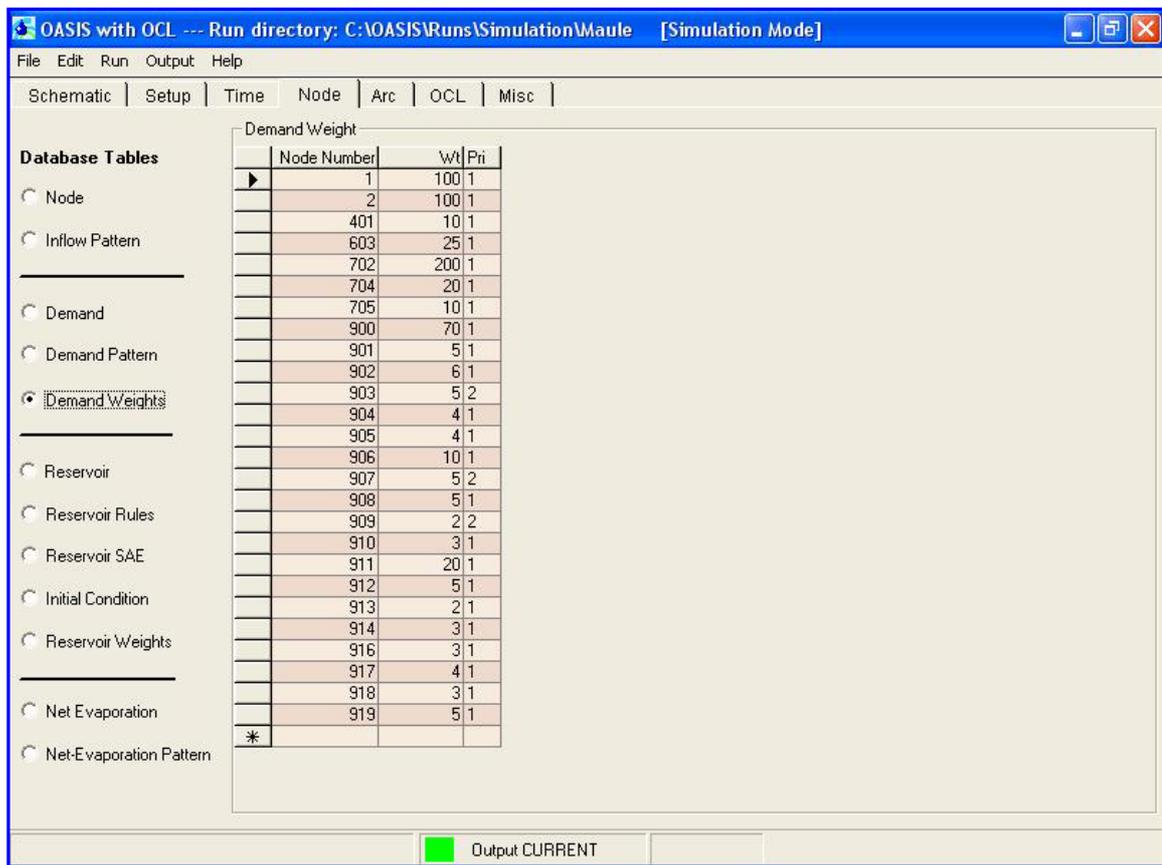
Node Number	units	factor	Month	Day	Deman
603	m3_s	1	1	1	200.00
603	m3_s	1	1	31	200.00
603	m3_s	2	2	1	160.00
603	m3_s	2	2	28	160.00
603	m3_s	3	3	1	110.00
603	m3_s	3	3	31	110.00
603	m3_s	4	4	1	60.00
603	m3_s	4	4	30	60.00
603	m3_s	5	5	1	20.00
603	m3_s	5	5	31	20.00
603	m3_s	6	6	1	0.00
603	m3_s	6	6	30	0.00
603	m3_s	7	7	1	0.00
603	m3_s	7	7	31	0.00
603	m3_s	8	8	1	0.00
603	m3_s	8	8	31	0.00
603	m3_s	9	9	1	40.00
603	m3_s	9	9	30	40.00
603	m3_s	10	10	1	120.00
603	m3_s	10	10	31	120.00
603	m3_s	11	11	1	180.00
603	m3_s	11	11	30	180.00
603	m3_s	12	12	1	200.00
603	m3_s	12	12	31	200.00
702	m3_s	1	1	1	30.10
702	m3_s	1	1	31	30.10
702	m3_s	2	2	1	24.10
702	m3_s	2	2	28	24.10
702	m3_s	3	3	1	25.00

c. Opción Demand Weights

Esta opción permite ingresar los pesos y las prioridades de las demandas, es decir, permite decidir cuales demandas serán suplidas antes que otras y en qué cantidad.

La Figura 4.14 muestra la opción Demand Weights.

Figura 4.14
Opción Demand Weights



4.8 Embalses

Las reglas de operación para embalses, a menudo se definen para incluir un solo nivel de almacenamiento, pero también varias zonas asignadas con distintos niveles de almacenamiento. Estas zonas pueden variar en el tiempo y son especificadas como parte de una curva de operación de tiempo.

A continuación se definirán cada una de las zonas de almacenamiento de un embalse:

Zona de Control de Crecidas: Esta zona sirve para disminuir los impactos de grandes inundaciones. Bajo circunstancias normales, el nivel del agua en el embalse se mantiene en el nivel de medidas para controlar las crecidas, para así, mantener un nivel de almacenamiento óptimo de protección y reserva para el

suministro. Si el nivel del agua está en la zona de control de crecidas, el caudal entregado se libera con una tasa alta hasta el máximo que se puede entregar aguas abajo (Introducing Basin Management Modelling, DHI Software 2001).

Zona Normal de Operación: Es la zona en que todas las demandas son cumplidas (Introducing Basin Management Modelling, DHI Software 2001).

Zona de Operación Reducida: Si el nivel del agua está en esta zona, la demanda será satisfecha parcialmente (Introducing Basin Management Modelling, DHI Software 2001).

Zona de Conservación: Si el nivel de agua alcanza esta zona, se liberará un caudal mínimo, solo con propósitos de conservación del río. También se puede entender por conservación, a la calidad del agua que se desea tener (Introducing Basin Management Modelling, DHI Software 2001).

Zona Muerta de Almacenamiento / Sedimentación / Zona Inactiva: El límite superior de esta zona, es la puerta más baja para liberaciones del embalse. Es decir, ninguna entrega de caudal es posible cuando el nivel del agua está en ésta zona. La evaporación, la precipitación y la infiltración son los únicos flujos que impactan el nivel del agua en esta zona (Introducing Basin Management Modelling, DHI Software 2001).

La Figura 4.15 muestra la ubicación de cada una de estas zonas en un embalse.

Figura 4.15
Zonas de un Embalse



Para modelar los embalses (Reservoir), se escoge la paleta *Node*, y luego se seleccionan las opciones *Reservoir*, *Reservoir Rules*, *Reservoir SAE*, *Initial Condition*, *Reservoir Weighs*, *Net Evaporations* y *Net Evaporation Patterns*.

a. Reservoir

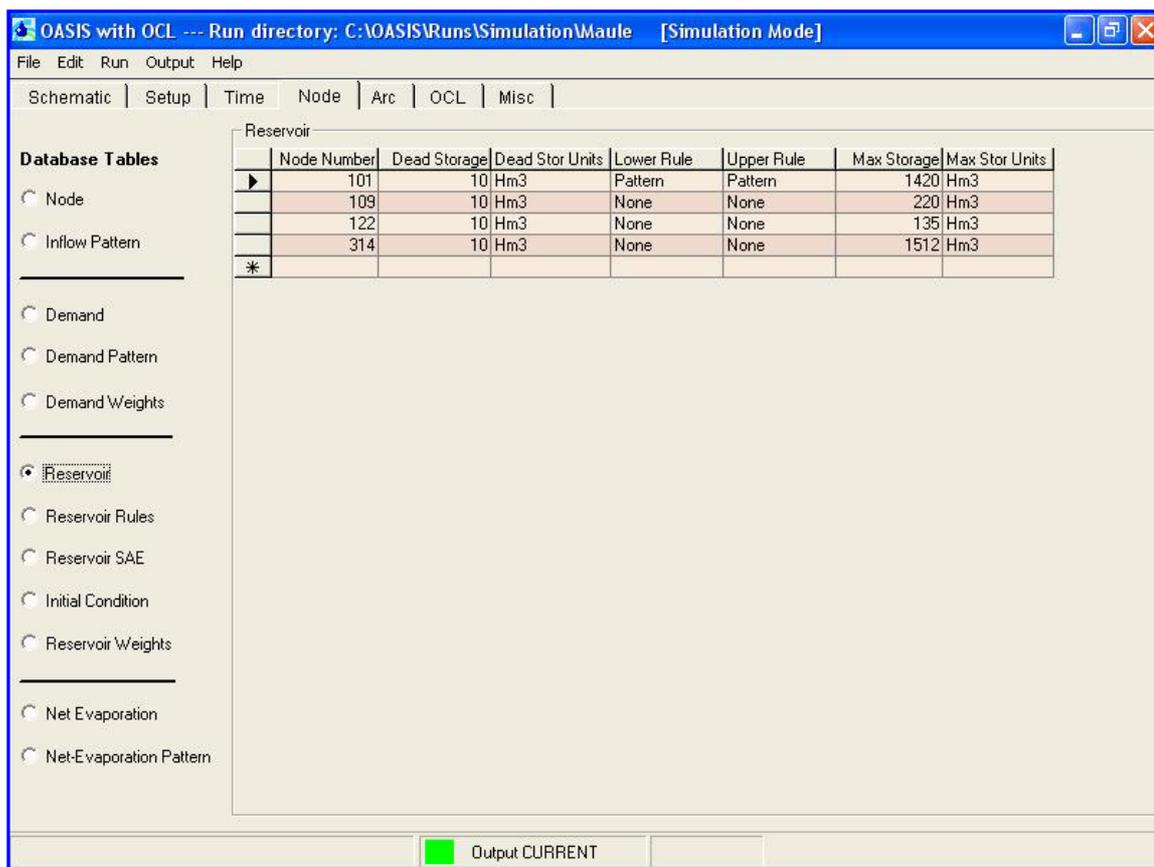
En esta opción se definen todos los embalses y para cada uno de ellos se define el volumen mínimo para que operen las turbinas (*Dead Storage*). Esta opción es obligatoria.

Si el embalse posee cuatro colchones, es aquí donde se definen (*Lower Rule* y *Upper Rule*). Los datos que definen cada colchón, se pueden ingresar de tres formas: OCL, Pattern y Time Series, dependiendo de qué reglas se desean modelar.

Finalmente, se define el volumen máximo embalsado (*Max Storage*) y sus unidades correspondientes (*Max Stor Units*).

La Figura 4.16 muestra todos los elementos descritos anteriormente.

Figura 4.16
Opción Reservoir



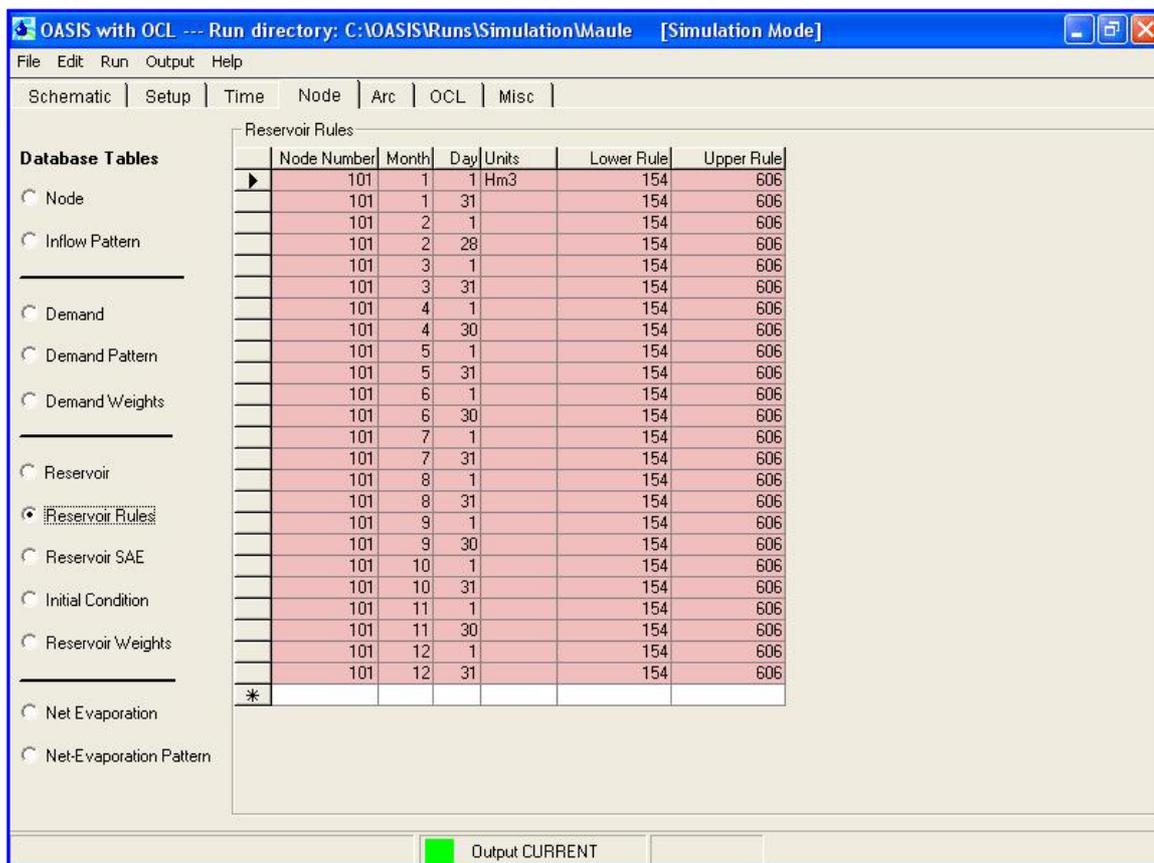
Notar que las opciones *Lower Rule* y *Upper Rule* están solo habilitadas para el embalse 101 (Embalse Laguna del Maule).

b. Reservoir Rules

Si un embalse esta compuesto por cuatro colchones, esta opción nos permite ingresar los valores de cada colchón (sólo si se escogió la opción *Pattern* para el

ingreso de upper y lower rule). Si el embalse posee solo un colchón, no se utiliza esta opción (Ver Figura 4.17)

Figura 4.17
Opción Reservoir Rules



Como en la opción Reservoir se seleccionó *Lower Rule* y *Upper Rule (Pattern)* para el Embalse 101 solamente, los demás embalses no utilizan esta opción.

c. Reservoir SAE (Storage – Area – Elevation)

Esta opción es utilizada para ingresar las curvas de capacidad de los embalses. Cada registro contiene tríos de valores: superficie inundada, en hectáreas, volúmenes, en millones de m³ y las cotas correspondientes, en metros. (Ver Figura 4.18).

Figura 4.18
Opción Reservoir SAE

The screenshot shows the OASIS software interface in Simulation Mode. The main window displays a table titled 'Reservoir SAE' with the following columns: Node Number, Elevation, Elevation Units, Storage, Storage, and Area. The table contains data for nodes 101 and 109. The 'Reservoir SAE' option is selected in the left-hand menu.

Node Number	Elevation	Elevation Units	Storage	Storage	Area	Area Units
101	2154.54	m	0	Hm3	4305	Ha
101	2155.7	m	50		4420	Ha
101	2156.82	m	100		4520	Ha
101	2157.88	m	150		4600	Ha
101	2158.94	m	200		4680	Ha
101	2160.04	m	250		4750	Ha
101	2161.1	m	300		4800	Ha
101	2162.11	m	350		4870	Ha
101	2163.13	m	400		4940	Ha
101	2164.14	m	450		4990	Ha
101	2165.13	m	500		5050	Ha
101	2166.11	m	550		5100	Ha
101	2167.1	m	600		5160	Ha
101	2168	m	650		5210	Ha
101	2169.09	m	700		5260	Ha
101	2170.08	m	750		5300	Ha
101	2171	m	800		5360	Ha
101	2171.94	m	850		5410	Ha
101	2172.89	m	900		5460	Ha
101	2174.76	m	1000		5540	Ha
101	2176.55	m	1100		5640	Ha
101	2178.37	m	1200		5720	Ha
101	2180.29	m	1300		5800	Ha
101	2181.9	m	1400		5900	Ha
101	2183.45	m	1500		6000	Ha
101	2184.89	m	1600		6100	Ha
109	1280	m	0	Hm3	0	Ha
109	1281	m	3		230	Ha

d. Initial Condition

Initial Condition nos muestra los volúmenes iniciales de los embalses, los cuales son los mismos que los mostrados en la Figura 4.9.

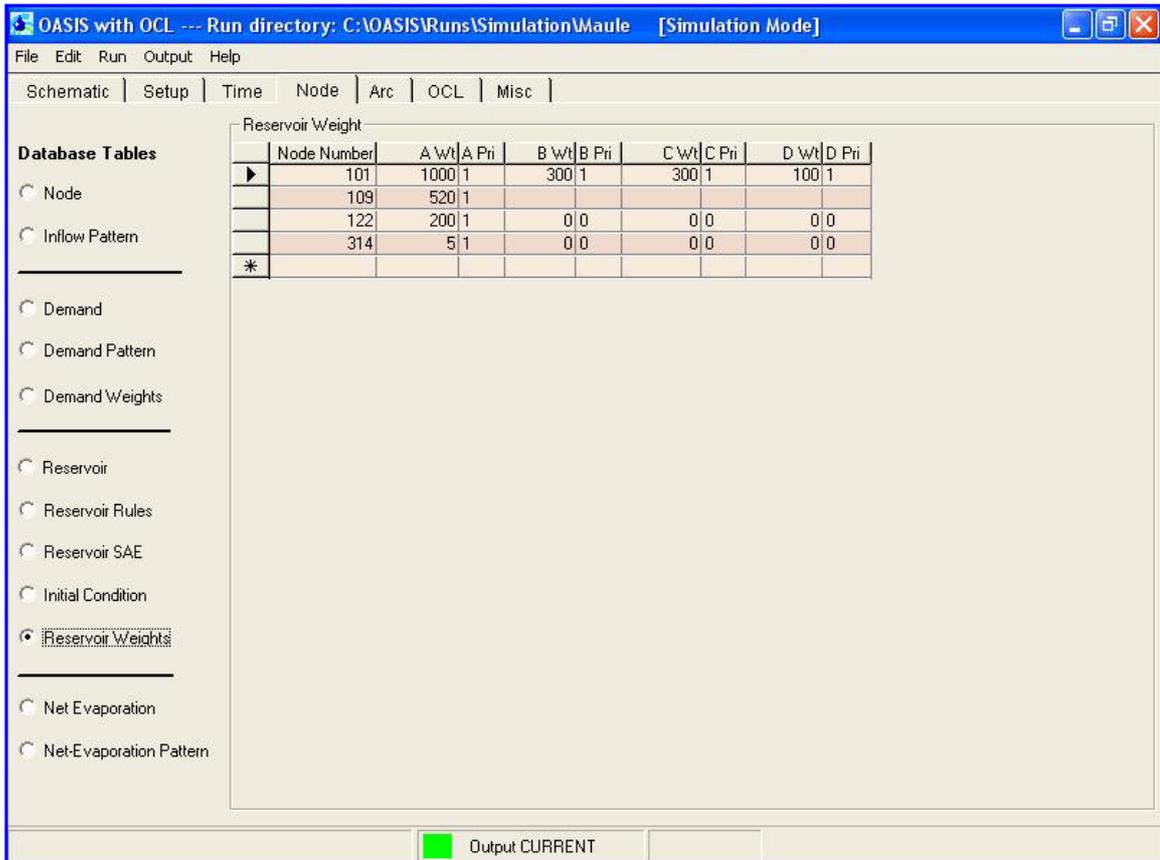
e. Reservoir Weights

Esta opción permite definir los “pesos” para cada uno de los colchones de los embalses, dependiendo de cuántos tenga cada uno de ellos.

Dependiendo el peso que se les asigne es cómo repartirá cada embalse el recurso agua y la prioridad indica cuáles entregaran recurso agua primero que otros.

Si un embalse posee solo un colchón, se le asignará sólo un *peso* a este y los demás colchones tendrán *peso cero* por default (Ver Figura 4.19).

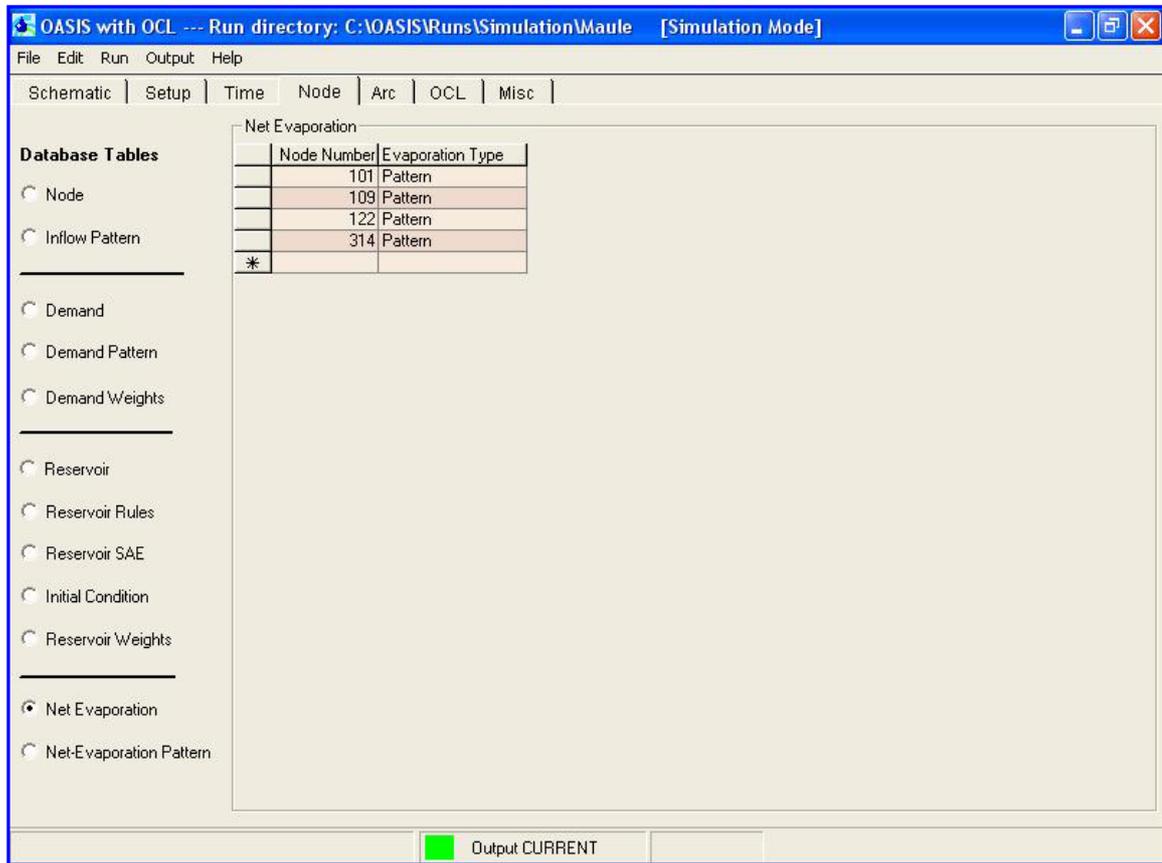
Figura 4.19
Opción Reservoir Weights



f. Net Evaporation

La opción Net Evaporation, se utiliza solamente si los embalses poseen evaporación. Si la respuesta es afirmativa, entonces se define si la estadística de evaporación se ingresará a través de Pattern o Time Series (Ver Figura 4.20).

Figura 4.20
Opción Net Evaporation



g. Net Evaporation Pattern

Si en la opción anterior se seleccionó Pattern, para la evaporación de alguno de los embalses, entonces *Net Evaporation Pattern* será utilizada, en caso contrario, quedará vacía.

La Figura 4.21 muestra como se ingresa Net Evaporation Pattern.

Figura 4.21
Opción Net Evaporation Pattern

The screenshot shows the OASIS software interface with the 'Net-Evaporation Pattern' table selected. The table has the following columns: Node Number, Units, Factor, Month, Day, and Evaporation. The data is as follows:

Node Number	Units	Factor	Month	Day	Evaporation
101	mm	0.7	1	1	200.7
101	mm	0.7	1	31	200.7
101	mm	0.7	2	1	178.6
101	mm	0.7	2	28	178.6
101	mm	0.7	3	1	158.5
101	mm	0.7	3	31	158.5
101	mm	0.7	4	1	102.8
101	mm	0.7	4	30	102.8
101	mm	0.7	5	1	59.3
101	mm	0.7	5	31	59.3
101	mm	0.7	6	1	31
101	mm	0.7	6	30	31
101	mm	0.7	7	1	37.7
101	mm	0.7	7	31	37.7
101	mm	0.7	8	1	54.6
101	mm	0.7	8	31	54.6
101	mm	0.7	9	1	79.6
101	mm	0.7	9	30	79.6
101	mm	0.7	10	1	104.5
101	mm	0.7	10	31	104.5
101	mm	0.7	11	1	147
101	mm	0.7	11	30	147
101	mm	0.7	12	1	194
101	mm	0.7	12	31	194
109	mm	0.7	1	1	200.7
109	mm	0.7	1	31	200.7
109	mm	0.7	2	1	178.6
109	mm	0.7	2	28	178.6
109	mm	0.7	3	1	158.5
109	mm	0.7	3	31	158.5

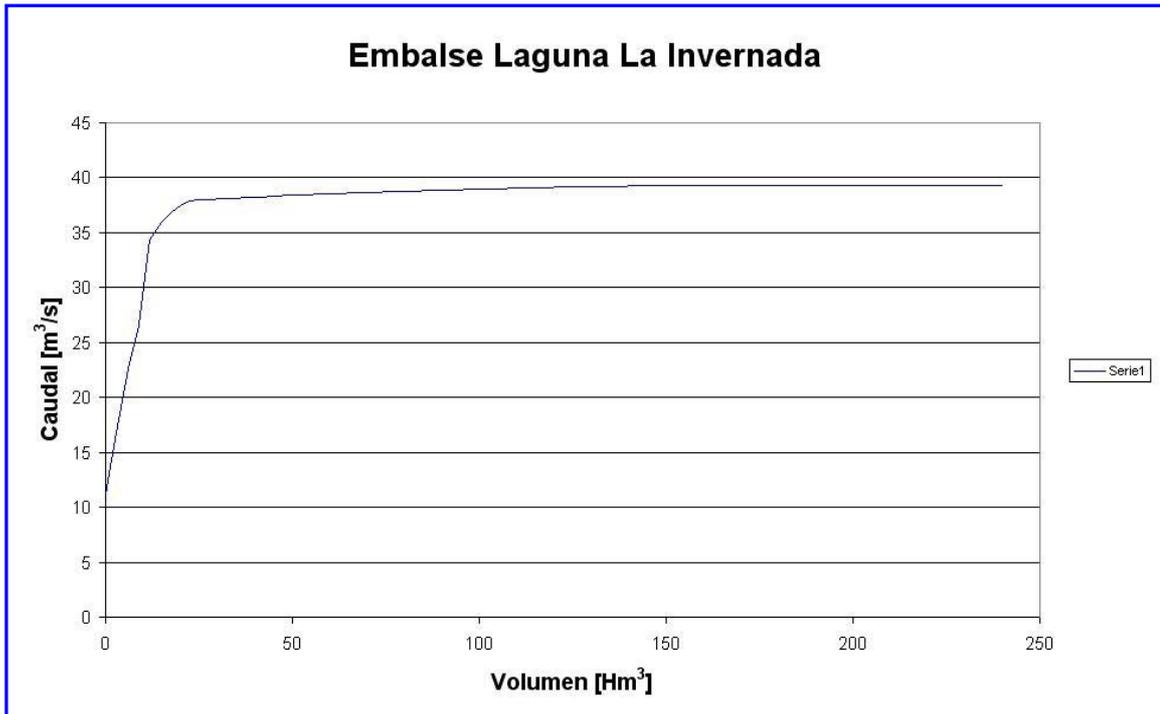
Como caso especial, en esta simulación se debió modelar un caudal máximo entregado por período, desde cada embalse al sistema, dependiendo del volumen embalsado. Para crear esta regla de operación se ejecutaron los siguientes pasos:

1° Paso: Se creó la variable QV_EM2 (el nombre puede ser definido como se desee), la cual será la que genera la curva de entrega máxima.

2° Paso: Se ingresaron en OASIS los valores de la curva (paleta OCL, opción OCL Lookup), como muestra la Figura 4.23, la primera columna posee el nombre de la variable que se está definiendo, en la segunda columna se define la forma en que se unirán los valores, en este caso, por medio de interpolación (INTERP). La columna N°3 es completada con los valores de la variable independiente (en este caso, el volumen) y la última columna el valor de la variable dependiente (en este caso, el valor de el caudal). En resumen, se ingresan los valores de los pares

ordenados que definirán la curva de entrega del embalse Laguna La Invernada, la cual se muestra en Figura 4.22:

Figura 4.22
Curva de Operación Embalse N°2



3° Paso: Se programa la regla en OCL, tal como muestra la Figura 4.24.

Donde,

```
Set: QV_EM2  
{value: lookup {QV_EM2 , Storage109 } }
```

De esta forma, OCL ingresa el valor de estado de la variable QV_EM2 a la curva y entrega como resultado el volumen asociado a ese caudal.

Luego,

```
Set: max_flow109_502  
{ Value: convert_units {QV_EM2, m3_s, mt3} }
```

Esta programación asigna como caudal máximo el valor de la variable QV_EM2, evaluado anteriormente, al arco 109 – 502.

Figura 4.23
Opción OCL Lookup

Name	Interp	Independent	Dependent
QV_EM2	INTERP	0	11.15
QV_EM2	INTERP	3000000	16.79
QV_EM2	INTERP	5900000	22.6
QV_EM2	INTERP	8900000	26.6
QV_EM2	INTERP	1.19E+07	34.3
QV_EM2	INTERP	1.49E+07	36
QV_EM2	INTERP	1.79E+07	36.9
QV_EM2	INTERP	2.02E+07	37.45
QV_EM2	INTERP	2.26E+07	37.85
QV_EM2	INTERP	2.52E+07	37.97
QV_EM2	INTERP	2.81E+07	38.05
QV_EM2	INTERP	3.12E+07	38.11
QV_EM2	INTERP	3.44E+07	38.16
QV_EM2	INTERP	3.79E+07	38.22
QV_EM2	INTERP	4.15E+07	38.27
QV_EM2	INTERP	4.53E+07	38.33
QV_EM2	INTERP	4.93E+07	38.38
QV_EM2	INTERP	5.34E+07	38.44
QV_EM2	INTERP	5.78E+07	38.49
QV_EM2	INTERP	6.23E+07	38.55
QV_EM2	INTERP	6.7E+07	38.6
QV_EM2	INTERP	7.18E+07	38.66
QV_EM2	INTERP	7.68E+07	38.71
QV_EM2	INTERP	8.2E+07	38.77
QV_EM2	INTERP	8.74E+07	38.82
QV_EM2	INTERP	9.3E+07	38.88
QV_EM2	INTERP	9.88E+07	38.93
QV_EM2	INTERP	1.046E+08	38.99
QV_EM2	INTERP	1.107E+08	39.04
QV_EM2	INTERP	1.169E+08	39.1

Figura 4.24
Modelación en OCL, Entrega de Caudal Máximo (Laguna La Invernada)

```

Set: QU_EM2
    {value: lookup { QU_EM2 , Storage109 }}

Set: max_flow109.502
    { Value: convert_units {QU_EM2, m3_s, mt3} }

```

4.9 Arcos

Para definir las propiedades de los arcos, se utiliza la opción *Minimun Flow*, *Maximun Flow*, *Max Reverse Flow* y *Arc Weights* de la paleta *Arc*.

a. **Minimun Flow, Maximun Flow y Max Reverse Flow**

Estas opciones se utilizan cuando los arcos presentan un caudal Máximo, Mínimo o Máximo Reversible y si además, se escogió la opción *Pattern*, ya que si se elige la opción *OCL* o *Time Series*, se ingresarán de forma diferente las estadísticas y esta opción quedará vacía por default.

Para algunos caudales máximos, se utilizó el lenguaje OCL. A continuación se muestra como se modeló mediante este lenguaje de programación.

Figura 4.25
Programación de Caudales Máximos en OCL

```
Set: Max_flow809.909
{ condition: month >= 1 and month <= 12
  value: convert_units { 10.5, m3_s, mt3 } }
```

Como se ha explicado anteriormente, los caudales pueden ser ingresados a través de reglas de operación. La Figura 4.25 muestra como se modeló el caudal máximo para el arco 809 – 909. Para ello se realizaron los siguientes pasos:

1° Paso: Se definió la variable a utilizar y/o asignar una restricción (Set: Max_flow809.909)

2° Paso: Se condicionó sobre qué período iba a funcionar la restricción (condition: month >= 1 and month <= 12)

3° Paso: Finalmente, se asignó el caudal máximo al arco 809 – 909 (value: convert_units {10.5, m3_s, mt3}). Por lo tanto, el caudal máximo del arco 809 – 909 es de 10,5 m³/s durante todo el año.

La Figura 4.26 muestra como se utiliza la opción Minimum Flow. De la misma forma se utilizan las opciones Maximum Flow y Max Reverse Flow.

La utilización de la opción Pattern para Minimum Flow, fue utilizada debido a que el tramo comprendido entre los nodos 310 y 319 posee un caudal ecológico. Este caudal es de 1 m³/s para todo el año, debido a esto, se utilizó la planilla Pattern para el ingreso de esta estadística.

Figura 4.26
Opción Minimum Flow

US Number	DS Number	Units	Month	Day	Min Flow
310	319	m3_s	4	1	1.000
310	319		5	1	1.000
310	319		6	1	1.000
310	319		7	1	1.000
310	319		8	1	1.000
310	319		9	1	1.000
310	319		10	1	1.000
310	319		11	1	1.000
310	319		12	1	1.000
310	319		1	1	1.000
310	319		2	1	1.000
310	319		3	31	1.000
310	319		4	30	1.000
310	319		5	31	1.000
310	319		6	30	1.000
310	319		7	31	1.000
310	319		8	31	1.000
310	319		9	30	1.000
310	319		10	31	1.000
310	319		11	30	1.000
310	319		12	31	1.000
310	319		1	31	1.000
310	319		2	28	1.000
310	319		3	1	1.000
*					

b. Arc Weights

La opción *Arc Weights*, tal como su nombre lo dice, permite ingresar los pesos a los arcos. Se pueden aplicar pesos sobre el caudal mínimo, máximo o sobre el total del caudal que pasa por el arco.

Los pesos se utilizan para decidir el arco por el que se desea que pase más recurso agua que por otro, o cual arco debe recibir recurso agua antes que otro o simplemente cual arco debe al menos poseer un caudal mínimo (como ocurre con los caudales ecológicos).

La Figura 4.27 presenta la opción Arc Weights descrita anteriormente.

Figura 4.27
Opción Arc Weights

The screenshot shows the OASIS with OCL software interface. The title bar indicates the directory is C:\OASIS\Runs\Simulation\Maule and it is in Simulation Mode. The menu bar includes File, Edit, Run, Output, and Help. The main window has tabs for Schematic, Setup, Time, Node, Arc, OCL, and Misc. On the left, under 'Database Tables', several options are listed with radio buttons: Arc, Minimum Flow, Maximum Flow, Max Reverse Flow, and Arc Weights (which is selected). The main area displays a table titled 'Arc Weight' with the following data:

	US Number	DS Number	A Wt	A Pri	B Wt	B Pri	Total Wt	Total Pri
▶	101	501					-150	1
	108	112					3	1
	111	112					4	1
	121	900					10	1
	122	504					50	1
	209	122					100	1
	209	609					-500	1
	209	920					200	1
	301	801					10	1
	305	310					50	1
	305	907					-5	1
	307	308					50	1
	309	310					50	1
	314	505					20	1
	501	601					50	1
	501	603					30	1
	502	702					400	1
	504	704					100	1
	505	401	6	1	4	1		
	505	705					5	1
*								

At the bottom of the window, there is a green indicator light and the text 'Output CURRENT'.

Notar que los pesos *negativos* solo significan que en vez de ser una meta es un penalty.

4.10 Archivos OCL

Todas las modelaciones programadas en OCL, como por ejemplo, reglas de operación, caudales máximos, Rebases, Filtraciones, Derrames, Centrales de Pasada, Generación, etc., se presentarán en el Anexo Digital, debido a la gran extensión de la información.

4.11 Programación Lineal Entera

Varios métodos analíticos se han desarrollado para identificar la magnitud y la certeza de los rendimientos que se pueden conseguir diferentes configuraciones de sistemas, capacidades y esquemas operacionales. Dos categorías básicas de modelación son la simulación y la optimización. Un modelo de simulación consiste esencialmente en una sucesión de declaraciones matemáticas y lógicas que escriben la operación de una cuenca en el tiempo. Por medio de tanteos o posiblemente mediante algún procedimiento de búsqueda, el tamaño del sistema, la configuración, o el conjunto de reglas de operación, se puede encontrar mejor el objetivo deseado. El enfoque de las simulaciones ha sido utilizado tradicionalmente y continúa siendo el método primario para investigar las alternativas, pero demasiadas simulaciones pueden consumir demasiado tiempo y costos.

Mientras que los métodos de simulación son los más efectivos para evaluar y refinar distintas alternativas de sistemas y procedimientos de operación, no son los más efectivos para escoger o definir las “mejores” políticas. Con este fin, los modelos de optimización tienen una efectividad probada, aunque no se encuentre la mejor solución, pero si eliminan las peores soluciones. El análisis de un sistema complejo puede implicar miles de variables de decisión y muchas restricciones. Pero una vez que los objetivos y las limitaciones han sido determinados (matemáticamente), la mayoría de los problemas pueden ser resueltos por métodos desarrollados en distintos campos de la investigación. La elección del método depende de las características del sistema a considerar, de la disponibilidad de datos, y de los objetivos y las limitaciones específicas. En general, los métodos disponibles se pueden clasificar como sigue (Yeh, 1985):

- Programación Lineal (PL)
- Programación Dinámica (PD)
- Programación No Lineal (PNL)

Es muy común tener esquemas de optimización unidos a un modelo de simulación para realizar ciertos grados de optimización. Para ello, es deseable que el modelo de simulación tenga alguna capacidad de auto-optimización para reducir la capacidad de cómputos. Las estrategias adicionales para el uso combinado de optimización y simulación se han desarrollado (por ejemplo, Jonson, 1980).

Se ha observado que los grandes beneficios de la modelación matemática aún no son dimensionados. Yeh (1985) observó que los operadores de embalses son reacios a utilizar los modelos de optimización por varias razones: (1) las personas que manejan los embalses y que toman las decisiones operacionales, no son incluidas en el desarrollo del modelo, por lo tanto, no se sienten familiarizados en su utilización; y (2) las limitaciones institucionales que estorban en las interacciones con el usuario. Rogers y Fiering (1986) recalcan este punto de vista, dado que los factores institucionales limitan la aplicabilidad de los modelos y la inclusión de la gama de objetivos y grupo de intereses.

Desde un punto de vista técnico, hay cinco supuestos que debe cumplir todo problema de Programación Lineal (Faulín y Juan, 2005):

1º Los coeficientes, tanto de la función objetivo como de las restricciones, son conocidos con exactitud y además no varían durante el período de tiempo en que se realiza la simulación (supuesto de certidumbre)

2º Tanto en la función objetivo como en las restricciones hay proporcionalidad.

3º Aditividad de actividades: tanto en la función objetivo como en las restricciones, la contribución de cada variable es independiente de los valores del resto de las variables, siendo el total de las actividades igual a la suma de cada actividad individual.

4º Las soluciones serán, en general, números reales no necesariamente enteros (supuesto de divisibilidad). Para aquellos casos en los cuáles sólo tenga sentido obtener soluciones enteras (cuando las soluciones se refieran a objetos indivisibles), se usarán técnicas de Programación Lineal Entera (PLE).

5º Las variables tomarán siempre valores positivos (supuesto de no negatividad).

A continuación se presenta la forma de las ecuaciones que rigen la Programación Lineal Entera:

Figura 4.28
Ecuaciones de la Programación Lineal Entera

$$\underset{x}{\text{Min}} \quad C^T x + D^T y$$

$$Ax + By = b$$

$$x, y \geq 0$$

$$x \in \mathbb{Z}^n, y \in \mathbb{R}^l, c \in \mathbb{R}^n, d \in \mathbb{R}^l$$

$$A \in \mathbb{R}^{m \times n}, B \in \mathbb{R}^{m \times l}, b \in \mathbb{R}^m$$

4.12 Programación Lineal en OASIS

La programación lineal entera es una de las herramientas más poderosas de OASIS, el cual insertó el programa XA, desarrollado por Sunset Software Technology para desarrollar la programación lineal (PL), la cual es una librería dinámica llamada por OASIS.

OASIS realiza PL en cada tiempo de simulación, y al ser resuelta, determina los valores de cada una de las variables decisión.

Como OASIS trabaja con Programación Lineal Entera, debe realizar dos pasos antes de llegar a los resultados finales. Primero, resuelve el problema sin tomar en cuenta las restricciones de valores enteros. Luego, modifica los resultados, forzando a las variables enteras a tomar valores enteros. Es por eso que al final de cada modelación aparece un error en el reporte de LP out (ver anexo digital).

La PL se construye a través de los “pesos” ingresados al modelo, además de las metas y restricciones programadas en OCL, como se ha explicado anteriormente.

Las ecuaciones que utiliza OASIS son las siguientes:

4.12.1 Función Objetivo

La cual es siempre llamada OBJ. OASIS la genera como un set de funciones objetivos con prioridad uno. La prioridad objetivo es simplemente la suma de todos los términos que son designados con el mismo nivel de prioridad, si se definen funciones con otras prioridades, entonces se generaran más de una función objetivo, dependiendo los niveles que se designen. Así, la función objetivo es siempre escrita en OASIS de la siguiente forma:

$$OBJ : POBJ [xx] \quad (\text{Ec. N}^\circ 2)$$

Donde [xx] es el número del nivel de prioridad para el cual LP irá siendo resuelta.

Para cada prioridad objetivo, [xx], existe una restricción como la siguiente:

$$POBJ[xx]: -POBJ[xx] + [W1] * [DVAR1] + [W2] * [DVAR2] + [...] = 0 \quad (\text{Ec. N}^\circ 3)$$

Donde [Wn] es el peso sobre [DVARn] determinado por el usuario.

Notar que POBJ[xx] es el nombre de la restricción y el nombre de la variable.

4.12.2 Restricción de Continuidad

OASIS escribe la restricción de continuidad para cada nodo excepto para el nodo final.

Para un **nodo de unión** [nnn], la restricción de continuidad es la siguiente:

$$CON[nnn]: -QT[xxa][nnn] - QT[xxb][nnn] - [...] + QT[nnn][yya] + QT[nnn][yyb] + [...] = [\text{caudal irregular}] \quad (\text{Ec. N}^\circ 4)$$

Donde:

QT[xxa][nnn] es el caudal total en el arco que va desde el nodo [xxa] al nodo [nnn]

[xxa],[xxb],[...] son los números de los nodos conectados al nodo [nnn] desde aguas arriba

$[yya],[yyb],[...]$ son los números de los nodos conectados al nodo $[nnn]$ desde aguas abajo

Para un **embalse** número $[nnn]$, la restricción de continuidad es el mismo que para los nodos de unión, pero en el lado izquierdo suma:

$$+ STO[nnn] \quad (\text{Ec. N}^\circ 5)$$

que es el volumen total embalsado en el nodo $[nnn]$

Y al lado derecho, suma:

$$- [\text{evaporación}] + [\text{Volumen embalsado al inicio del período}] \quad (\text{Ec. N}^\circ 6)$$

Para un **nodo de demanda** número $[nnn]$, la restricción de continuidad es:

$$\begin{aligned} CON[nnn]: \quad & - QT[xxa][nnn] - QT[xxb][nnn] - [...] \\ & + DEL[nnn] = [\text{caudal de entrada irregular}] \end{aligned} \quad (\text{Ec. N}^\circ 7)$$

Donde:

$DEL[nnn]$ es la entrega del nodo $[nnn]$

$[xxa],[xxb],[...]$ son los números de los nodos conectados al nodo $[nnn]$ desde aguas arriba

La diferencia entre las restricciones de continuidad de los nodos de demanda y los nodos de unión es que el caudal en los arcos que salen del nodo de demanda no son reingresados al sistema, y la variable de decisión de entrega ha sido sumada.

4.12.3 Restricciones de las zonas de un embalse

Para cada nodo embalse definidos con cuatro zonas estándares, OASIS escribe una restricción en LP. La segmentación es hecha para cada zona, y cada una puede recibir un peso distinto. Para embalses que son definidos con una sola zona no se utiliza esta misma restricción.

La restricción para embalses formados por cuatro colchones se escribe de la siguiente forma:

(Ec. N°8)

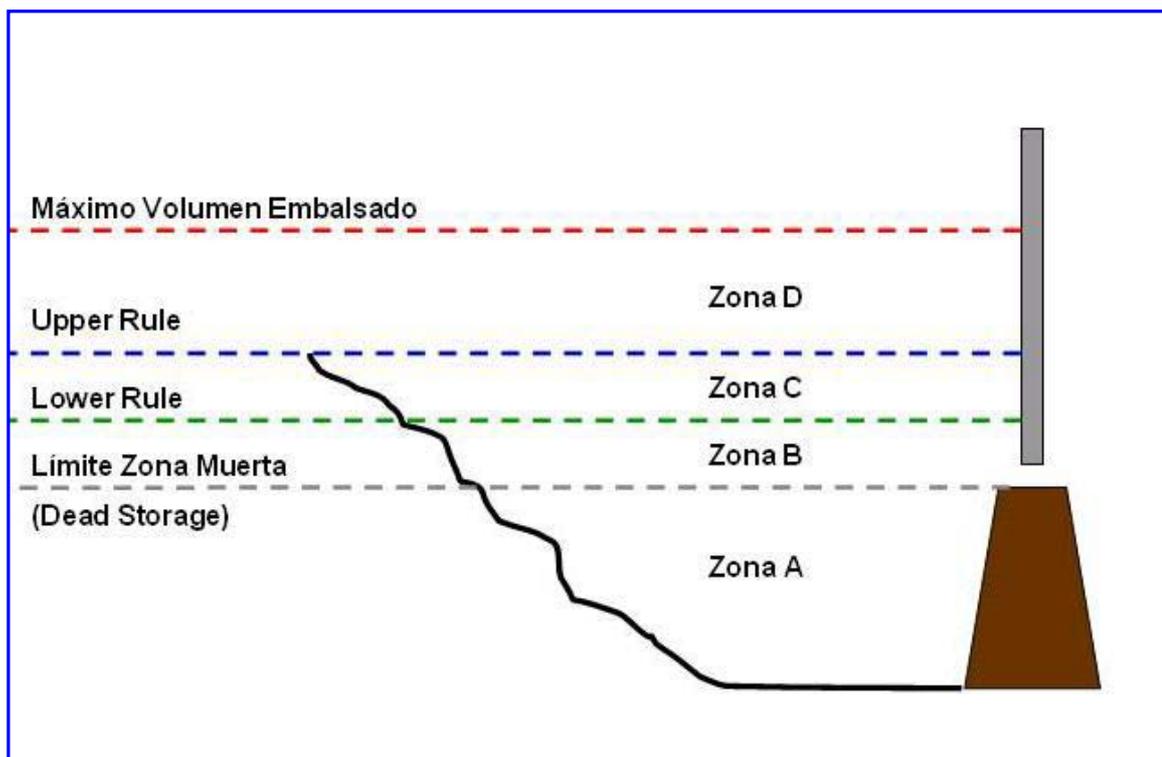
$$SSP[nnn]: -STO[nnn] + STA[nnn] + STB[nnn] + STC[nnn] + STD[nnn] = 0$$

Donde:

$STA[nnn], STB[nnn], STC[nnn], STD[nnn]$ son los volúmenes embalsados en cada uno de los cuatro colchones (A, B, C y D) del nodo embalse.

La Figura 4.29 muestra las zonas descritas anteriormente y los límites que osee cada una de ella.

Figura 4.29
Límites de las Zonas de Embalses



En la Figura 4.30 se muestra una parte del archivo de PL y las ecuaciones descritas anteriormente aplicadas al modelo Maule. En el anexo digital se muestra el archivo completo.

Figura 4.30
Muestra de Programación Lineal Entera

```

[1] C:\OASIS\Runs\Simulation\Maule\lp.out
CON301: QT301801 + QT301921 = 5.88384e+007
CON302: QT302304 + QT302904 + QT302905 = 9.38304e+006
CON303: QT303304 + QT303901 + QT303905 = 25920
CON304: - QT302304 - QT303304 + QT304310 + QT304914 + QT304916 + QT304918
- QT901304 - QT905304 = 0
CON305: QT305310 + QT305902 + QT305904 + QT305907 + QT305911 = 1.1664e+006
CON306: QT306308 + QT306903 + QT306906 + QT306907 = 0
CON307: QT307308 + QT307902 + QT307906 + QT307909 = 751680
CON308: - QT306308 - QT307308 + QT308310 + QT308919 - QT809308 - QT903308
- QT906308 - QT907308 - QT909308 = 0
CON309: QT309310 + QT309907 = 25920
CON310: - QT304310 - QT305310 - QT308310 - QT309310 + QT310319 + QT310917
- QT907310 - QT909310 - QT911310 - QT914310 - QT916310 - QT918310 = 0
CON311: QT311319 + QT311908 + QT311913 = 414720
CON312: QT312319 = 0
CON314: - QT125314 + QT314505 + QT314607 + QT314610 + QT314922 - QT704314
STO314 = 1.18319e+009
CON315: QT315317 + QT315912 + QT315913 - QT402315 - QT404315 - QT505315
- QT607315 - QT610315 = 0
CON317: - QT315317 + QT317319 - QT413317 - QT912317 = 336960
CON319: - QT310319 - QT311319 - QT312319 - QT317319 + QT319321 - QT913319
- QT915319 - QT917319 - QT919319 - QT923319 = 0
CON401: - QT505401 + DEL401 = 0
CON402: - QT401402 + QT402315 + QT402810 = 0
CON403: QT403404 + QT403409 + QT403912 - QT705403 = 0
CON404: - QT403404 + QT404315 + QT404808 + QT404912 = 0
CON413: QT413317 = 9.22337e+008
  
```

BLOCK #1 Line: 92 COL: 42 N

En la figura anterior se observa cómo se configura la programación lineal utilizada en el Sistema Maule.

Este archivo está escrito en lenguaje OCL, como la mayoría de los archivos bases de OASIS.

4.13 Modelación de un nuevo escenario

Como se ha visto anteriormente, se modeló el sistema Maule en la situación actual. Para estudiar la flexibilidad del software OASIS, se modeló un nuevo escenario (situación futura).

El nuevo escenario incluye el Embalse Huaiquivilo (Nodo 203), el cual fue modelado con las siguientes reglas de operación.

- Se modeló con una capacidad máxima de 600 Hm³
- Se ingresó una curva de capacidad del embalse, la que se presenta en la Tabla 4.13-1.

Tabla 4.13-1
Curva de Capacidad Embalse Huaiquivilo

Elevación [m]	Volumen [Hm ³]	Área [Há]
1070	0	0
1080	4.3	60
1090	15.6	170
1100	38.4	380
1110	74.6	620
1120	125	920
1130	184	1280
1140	254	1680
1150	338	2170
1160	450	2800
1170	600	3570

- Se agregó también, una tabla correspondiente a la estadística de evaporación del Embalse Huaiquivilo.
- Además, se modeló el embalse mediante cuatro colchones (Primer colchón entre 0 y 50 Hm³, Segundo colchón entre 50 y 200 Hm³, Tercer colchón entre 200 y 500 Hm³ y un cuarto colchón entre 500 y 600 Hm³).
- Los cuatro colchones se crearon debido a que se insertaron dos reglas de operación, la primera de ellas impone que el embalse solo puede entregar recurso – agua cuando el volumen embalsado se encuentra entre el tercero y cuarto colchón (200 y 600 Hm³), es decir, el embalse siempre poseerá al menos 200 Hm³ (regla que se puede utilizar como volumen mínimo para recreación, por ejemplo), salvo en la etapa de llenado del embalse. La segunda regla es que el embalse no posea un volumen mayor a 500 Hm³ al final de cada período, esta regla se debe a control de crecidas.

- Se modeló además, un nuevo nodo de demanda (Nodo 706), que representa entrega de recurso – agua desde el Embalse, para uso de generación hidroeléctrica.

Para crear el nuevo escenario, además de las reglas de operación explicadas anteriormente, se insertaron dos nuevos nodos: el nodo 203 (Nodo Embalse Huaiquivilo) y el nodo 503 para repartir y controlar las aguas del embalse. La Figura 4.31 muestra la nueva configuración del sistema, en la parte derecha del esquema, se pueden apreciar los nodos insertados.

El volumen inicial del Embalse Huaiquivilo fue 0 Hm³.

Luego de ingresar todo lo explicado anteriormente, se corrió el modelo. Debido a que los nuevos nodos no poseían “pesos”, es decir, sus pesos eran cero por default, OASIS no los consideraba dentro de la modelación, y fue necesario calibrar “solo” los nuevos nodos. Luego de calibrarlos (tantear los pesos), se corrió nuevamente el modelo, obteniendo los resultados que se presentarán en el capítulo siguiente.

4.14 Comentarios del Capítulo

De lo anterior se puede apreciar que el software es muy amigable para trabajar con el programa Hec – Dss que fue incorporado por Hydrologics Inc para facilitar el manejo de series de tiempo.

Este Capítulo fue diseñado con el fin de que un usuario que no conoce el software, pueda hacerse una idea general de su uso e introducirse con un poco mas de facilidad que la tesista, debido a que el manual ofrecido por OASIS, no es muy amistoso y antes de su uso, se requiere conocer todas las opciones y elementos explicados anteriormente.

El uso del lenguaje OCL es un poco más complejo y su uso debe ser estudiado antes de utilizar OASIS. En el anexo digital se presentan los archivos OCL utilizados en la modelación del sistema Maule.

Como se mencionó al inicio del capítulo, si se requiere modelar reglas que no pueden ser reproducidas ni por OASIS, ni por OCL, se puede recurrir a crear Librerías Dinámicas (DLL).

En esta tesis, se estudió el uso del lenguaje fortran 90, debido a que la tesista no sabía programar en el y es un lenguaje muy utilizado en programaciones hidráulicas, pero existen otros lenguajes, como por ejemplo visual Basic 6.0 o C++, entre otros, que pueden ayudar a solucionar este tipo de problemas. La elección del lenguaje a utilizar depende solamente del usuario, es decir, con el cual el programador sea más hábil y se sienta capaz de realizar la programación externa.