

Modelado de Contratos en Modalidad de Take Or Pay.

Enrique Briglia –Elías Carnelli – Fernando Ron

Instituto de Ingeniería Eléctrica – FING.

Julio 2010

Montevideo - Uruguay.

IMPORTANTE: Este trabajo se realizó en el marco del curso Simulación de Sistemas de Energía Eléctrica (SimSEE) y fue evaluado por el enfoque metodológico, la pericia en la utilización de las herramientas adquiridas en el curso para la resolución del estudio y por la claridad de exposición de los resultados obtenidos. Se quiere dejar expresamente claro que no es relevante a los efectos del curso la veracidad de las hipótesis asumidas por los estudiantes y consecuentemente la exactitud o aplicabilidad de los resultados.

1 Objetivo.

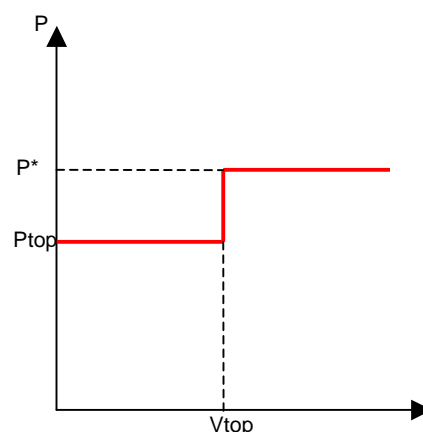
Los contratos de suministro de combustibles, normalmente presentan cláusulas conocidas bajo el nombre de *Take or Pay*. Dichas cláusulas, imponen al comprador de combustible la obligación de tomar una cantidad fija de dicho bien, independientemente de que el combustible sea consumido o no y de forma tal de garantizar al suministrador una demanda mínima. En sistemas eléctricos que presentan una generación con alta participación de recursos renovables (especialmente hidráulicos o eólicos), las demandas de combustibles presentan alta variabilidad por lo que las cláusulas de *Take or Pay* en los contratos de combustibles pueden representar un riesgo importante.

El objetivo del trabajo es modelar, un primera aproximación “*muy sencilla*” a este tipo de contratos con cláusulas de *Take or Pay* (ToP de aquí en adelante); de forma de poder evaluar costos y riesgos de estas cláusulas cuando se enfrentan a una demanda que es abastecida con una participación importante de generación hidráulica y generación eólica.

2 Hipótesis de trabajo.

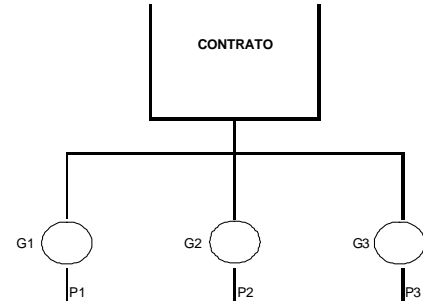
Como se estableció en el punto 1, el objetivo es modelar una aproximación muy sencilla a una cláusula del tipo ToP. En este sentido se realizan los siguientes supuestos acerca del contrato:

- El comprador de combustibles se compromete a adquirir una cantidad fija de combustible V_{top} a un precio P_{top} cada un determinado periodo de tiempo T_{top} , así la cantidad V_{top} de combustible adquirida en el periodo anterior halla sido consumida o no. Es decir el suministrador de combustible tiene garantizado un ingreso fijo igual a $P_{top} \cdot V_{top}$ cada T_{top} pasos de tiempo.
- Si en algún periodo de duración T_{top} el comprador necesita una cantidad de combustible mayor a V_{top} , el suministrador se compromete a entregarla a un precio P^* por unidad de combustible, teniendo en cuenta que $P^* > P_{top}$.



Si bien existen diferentes alternativas en cuanto a la forma que se realiza el pago del combustible ($V_{top} * P_{top}$) asumimos que el mismo se realiza en los instantes correspondientes al inicio del período T_{top} .

- Se asume también, que con el contrato con cláusulas ToP, se puede abastecer a más de una máquina generadora G_i . En donde cada máquina generadora entrega una potencia P_i definida por el despacho. Por lo tanto, en cada paso de tiempo, es el contrato el que define el precio del combustible para cada una de las máquinas que es abastecida por dicho contrato.



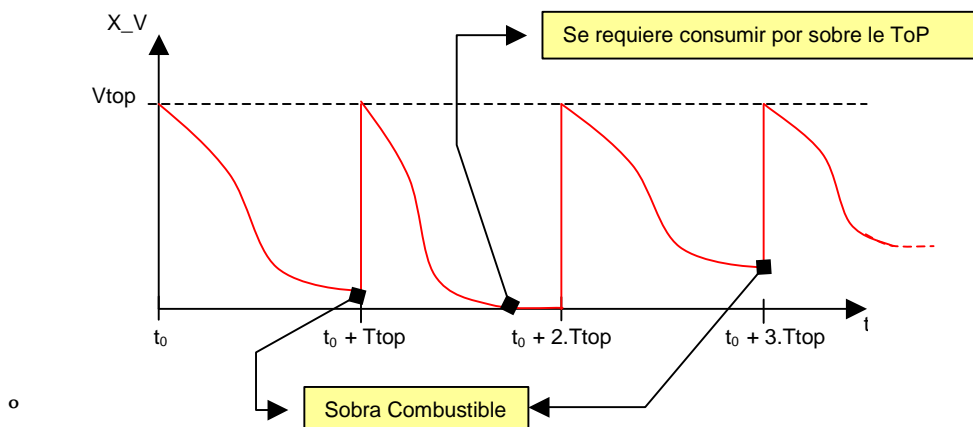
3 Metodología.

3.1 Modelo Descriptivo

El problema que se presenta requiere de un estado que permita evaluar el costo de oportunidad de utilizar el combustible en el presente vs. utilizarlo en el futuro. Las decisiones que se tomen en un instante de tiempo dependen del pasado y afectarán en alguna medida al futuro, requiriendo por ello de mantener variables de estado que serán utilizadas por el sistema.

Definimos entonces, en el modelado de este contrato, una variable de estado (X_V) que identifica el “crédito” de combustible disponible dentro del contrato ToP. Es decir, como variable de estado se tomara la diferencia entre V_{top} y el volumen efectivamente consumido dentro de cada período T_{top} , siempre y cuando esta diferencia sea positiva.

En cada inicio de período esta variable se inicializa con el volumen V_{top} y comenzará a decrecer en la medida que el combustible sea consumido. Al iniciar un nuevo período, el valor de X_V (en caso de ser positivo) indicará el combustible no consumido del ToP.



Se eligió esta variable de estado (en lugar de elegir directamente el volumen consumido) porque para la interpretación de la función de costos futuros es mejor que las variables de estado reflejen la disponibilidad de un recurso y por lo tanto el costo futuro es decreciente al crecer las variables de estado.

Cuando llevamos esto a un modelo de simulación en el que se define un paso de tiempo, ocurrirá que los instantes de tiempo $(t_0 + T_{top})$, $(t_0 + 2T_{top})$... $(t_0 + nT_{top})$ se encuentren incluidos dentro de algún paso de tiempo de simulación. Si esto sucede, asumimos que el incremento de la variable de estado ($X_V := V_{top}$) se realiza al finalizar el paso de tiempo, es decir que el volumen V_{ToP} está recién disponible para el siguiente paso de tiempo.

Para modelar un contrato ToP, será necesario también definir como interactúan los diferentes actores (generadores) y eventualmente será necesario modificar su implementación.

3.1.1 Modelado en el SimSEE

A efectos de modelar el problema en el SimSEE se definirá un nuevo actor que llamaremos “*Suministro de Combustible*” y se modificarán los generadores térmicos para que tengan la posibilidad de conectarse a un “*Suministro de Combustible*” (sin importar si se trata de un contrato ToP otra modalidad) el cual ofrecerá una interfaz que permita la interacción entre los actores.

Luego se implementará un tipo de suministro particular que será el encargado de modelar los contratos ToP al que se llamará “*Suministro de Combustible_TakeOrPay*” (en adelante los llamaremos “actor ToP”). Todo suministro de combustible, permitirá la selección del Tipo de Combustible a considerar (esto es importante pues según el tipo de combustible se tienen diferentes constantes como ser el pci , contante de conversión a kW, etc.)

Este esquema permitirá que en el futuro se modelen otro tipo de suministros de combustible diferentes dejando la puerta abierta para que cualquier generador los pueda utilizar.

3.1.2 Parámetros del modelo

Comenzamos definiendo los parámetros que definen el modelo:

Parámetro	Descripción
F_i	Fecha de inicio de contrato
F_f	Fecha de fin del contrato
T_{top}	Duración del ToP, es decir, cada T_{top} el comprador tendrá que afrontar un pago de TOP.
V_{top}	Es el volumen del comprometido en el ToP
P_{top}	Es el precio por unidad de volumen del combustible dentro del ToP
P^*	Es el precio por unidad de volumen del combustible por fuera del ToP

Nota:

Las fechas de inicio y fin del contrato estarán dadas por las fechas de nacimiento y muerte de las fichas dinámicas, no siendo necesario implementar propiedades específicas para mantener esta información.

3.1.3 Variables de Estado

Si bien se utiliza una única variable que mantiene el estado del sistema, para la implementación del modelo se utilizarán:

Variable	Descripción
X_V_k	El valor de la variable de estado en el paso k y representa el volumen restante (sin consumir) del contrato de ToP vigente en dicho instante. Es lo que se tiene disponible en el ToP al inicio del paso.
Xs_V_k	El valor de la variable de estado al finalizar el paso.

3.1.4 Variables de Control

Estas son las variables sobre las cuales podremos operar. El valor de estas variables será calculado en cada paso de simulación/optimización y deberá estar estrechamente ligado a las potencias despachadas por las maquinas generadoras que obtienen su combustible a partir de este suministro (contrato ToP)

Variable	Descripción
$V_k^{consumidoToP}$	Volumen que despacho de combustible por debajo del disponible en el paso k (variable de control introducida por el actor ToP).
$V_k^{extraToP}$	Volumen que despacho de combustible por sobre el disponible en el paso k (variable de control introducida por el actor ToP).

3.1.5 Restricciones introducidas por el actor ToP

A continuación describimos las restricciones impuestas a las variables de control utilizadas por este modelo, así como también restricciones que se deben imponer a los generadores térmicos que obtengan combustible de este actor.

Sean:

- P_i es la potencia consumida por la máquina i que esta ligada al contrato ToP.
- Q_i es el volumen por unidad de tiempo que consume la máquina i .
- η_i es el rendimiento de la máquina i .
- pci es el poder calorífico inferior del combustible suministrado.

Entonces:

$$\bullet \quad \boxed{X_V_k - V_k^{ConsumidoToP} \geq 0} \quad (a)$$

Esta restricción garantiza que el $V_k^{consumidoToP}$ se encuentre por debajo del disponible en el ToP.

- $$V_k^{ExtraToP} \geq 0 \quad (b)$$

- $\forall i \Rightarrow \frac{P_i}{\eta_i p_{ci}} = Q_i$ por lo que el volumen consumido por cada máquina en un

paso de tiempo es : $Q \delta t = \frac{P_i}{\eta_i p_{ci}} \delta t$

$$\Rightarrow \sum_i \frac{P_i}{\eta_i p_{ci}} \cdot \delta t - V_k^{ConsumidoToP} - V_k^{ExtraToP} = 0 \quad (c)$$

Esta última restricción garantiza que las máquinas generadoras, que están vinculadas al contrato, obtengan el combustible necesario, obligando a que si hay un incremento en la potencia despachada por las máquinas, entonces deberá existir un incremento en el volumen de combustible consumido.

3.1.6 Actualización de la variable de estado

Sea t_k la fecha de inicio del paso k de la simulación, entonces las posibles evoluciones del estado serán:

$$Xs - V_k = V_{top} \Leftrightarrow \forall t_k, i/i \geq 0, t_k \leq t_0 + i.T_{top} < t_{k+1}$$

$$Xs - V_k = X - V_k - V_k^{consumidoToP} \Leftrightarrow \forall t_k, i/i \geq 0, t_0 + i.T_{top} < t_k < t_{k+1} < t_0 + (i+1).T_{top}$$

Nota:

Como hipótesis de trabajo, se asumió que el volumen de ToP se actualiza al final del paso de simulación.

3.1.7 Costo directo del Paso introducido por el contrato ToP.

Al modelar un suministro de combustible, al cual se pueden conectar varios generadores, delegaremos en él la responsabilidad de calcular el costo del combustible suministrado. Por lo tanto el costo que el actor aportará el costo directo del paso (C_k) es el costo de combustible del paso, por lo que se tienen los siguientes casos:

- 1) Se esta en un paso de tiempo en que se afronta un pago por ToP, entonces:

$$C_k = P_{top} \cdot V_{top} + P^* \cdot \max(0, V_k^{extraToP})$$

Como el volumen de ToP se actualiza al final del paso se puede consumir combustible extra ToP.

- 2) Se esta en un paso de tiempo en que NO se afronta un pago por ToP, entonces:

$$C_k = P^* \cdot \max(0, V_k^{extraToP})$$

Es importante notar que si en un paso de tiempo dado, las centrales no demandan combustible por sobre el establecido en el contrato ToP y no se esta en un paso de

tiempo en el que hay que afrontar un pago de ToP, el costo del combustible para ese paso de tiempo es 0

Por lo tanto, dada la función de costo directo de paso antes definida, para cumplir la restricción (c) el actor ToP siempre despachara primero combustible disponible del ToP (es decir incrementara la variable $V_k^{ConsumidoToP}$) dado que esto tiene costo 0 para el paso siempre y cuando se cumpla la restricción (a) , es decir, siempre restringido al volumen disponible dado por la variable de estado.

3.1.8 Modelado en el optimizador SIMPLEX

Para utilizar el algoritmo de SIMPLEX se crea una matriz con todos los coeficientes, en donde en la primera fila figuran las variables de control, en la última fila están los coeficientes de “menos” la función de costos y el resto de las filas corresponde cada una a una restricción (de igualdad o desigualdad). Cada actor involucrado (suministro de combustible y generadores) deberá hacer su correspondiente aporte a esta matriz a efectos de que el algoritmo obtenga los valores correspondientes a las variables de control que minimizan la función de costos.

3.1.8.1 Aportes al SIMPLEX por el Suministro de Combustible

Para la implementación del aporte que el actor ToP realiza a la función de costos futuros (última fila de la matriz del SIMPLEX) se considero un criterio distinto al utilizado para el cálculo de los costos directos del paso.

Este criterio considera que el aporte a la función de costos futuros (CF) se puede separar en los siguientes casos:

$$1) \text{ Si } V_k^{ConsumidoToP} > 0 \text{ y } V_k^{ExtraToP} = 0 \Rightarrow C_{contratoToP} = -\frac{\partial CF}{\partial X - V_k} \cdot V_k^{ConsumidoToP}$$

Es el caso en que se esta consumiendo combustible por debajo del establecido en el contrato ToP, el aporte el actor hará a la función de costos futuros será:

Nota:

En el Capitulo 4 Optimización de Operación se establece que la información de la función CF que importa para el calculo de la política de operación está en las derivadas de CF con respecto al estado y no en el valor absoluto de CF.

$$2) \text{ Si } V_k^{ConsumidoToP} = 0 \text{ y } V_k^{ExtraToP} > 0 \Rightarrow C_{contratoToP} = P^* \cdot V_k^{extraToP}$$

Es el caso en el que solamente se esta consumiendo combustible por encima del volumen V_{top} .

$$3) \text{ Si } V_k^{ConsumidoToP} > 0 \text{ y } V_k^{ExtraToP} > 0 \Rightarrow C_{contratoToP} = -\frac{\partial CF}{\partial X - V_k} \cdot V_k^{ConsumidoToP} + P^* \cdot V_k^{ExtraToP}$$

Es el caso de que se esta demandando volumen restante del V_{top} y también se consumió combustible por encima del TOP.

En los periodos en los cuales es necesario afrontar un pago por ToP, se decidió agregar en el lugar correspondiente al término independiente, el monto $P_{top}.V_{top}$. Esto se realiza por coherencia dado que este monto no se tiene en cuenta en la función de costos futuros del SIMPLEX, pero sin embargo es interesante que figure, para que cuando se comparen las funciones de costo futuro del SIMPLEX y la función de costos directos del paso no existan diferencias significativas.

Intuitivamente, el optimizador verá que con una determinada frecuencia la variable de estado pasara a valer V_{top} , por lo que a medida que se acerca el paso de tiempo en que esto ocurre, si existe volumen disponible por debajo del V_{top} , su valor será cada vez menor.

3.1.8.2 Aportes al SIMPLEX por los generadores.

El modelado del ToP afecta directamente a la implementación de los diferentes modelos correspondientes a los distintos tipos de centrales generadoras que demandan combustibles en modalidad ToP y por ende se deberá cambiar la forma en que los mismos aportan a la función de costos.

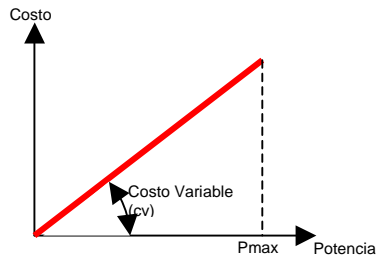
En forma general, podemos decir que el costo correspondiente a la utilización de combustible, deberá ser introducido por cada Suministro de Combustible y no por los propios generadores. Es decir, los generadores no deberán incluir entre sus costos los correspondientes al combustible (si deberán incluir otros costos como ser costos variables no combustibles, de arranque y parada, etc.). Por otro lado, si deberá ser su responsabilidad informar (o aportar) lo necesario para calcular el volumen de combustible consumido por cada uno de los generadores.

A continuación analizaremos el caso correspondiente a un Generador Simple y a un Generador con Mínimo Técnico y costo de arranque y parada.

3.2 Caso: Generador Simple

A modo de ejemplo analizamos el caso de que un generador simple se conecte a un suministro de combustible en modalidad de contrato ToP. Este caso se utilizó para evaluar como implementar el modelo y como deberían interactuar los actores.

Recordemos que estos generadores poseen una función de costo similar a la expresada en la siguiente figura:



Esto nos da un rendimiento constante para el generador i al que llamaremos η_i

Asimismo, recordemos que el generador introduce una variable de control P correspondiente a la potencia despachada por el mismo.

A modo de ejemplo supongamos la existencia de 2 generadores (G_1 y G_2) que se conectan a un mismo suministro de combustible y analicemos dos posibles casos, que determinan diferentes matrices, en función de si en un determinado paso de simulación debemos afrontar o no un pago correspondiente al ToP :

- Primer caso : no corresponde pagar aportes por ToP

Variables Control	P_1	P_2	$V_k^{ExtraToP}$	$V_k^{ConsumidoToP}$	1	
Restricción	$\frac{\delta t}{\eta_1 pci}$	$\frac{\delta t}{\eta_2 pci}$	1	1	0	= 0
				-1	$X - V_k$	≥ 0
- Costo	0	0	$- P^*$	$\frac{\partial CF}{\partial X - V_k}$		

- Segundo caso : si corresponde pagar aportes por ToP

Variables Control	P_1	P_2	$V_k^{ExtraToP}$	$V_k^{ConsumidoToP}$	1	
Restricción	$\frac{\delta t}{\eta_i pci}$	$\frac{\delta t}{\eta_i pci}$	1	1	0	= 0
				-1	$X - V_k$	≥ 0
- Costo	0	0	$- P^*$	$\frac{\partial CF}{\partial X - V_k}$	$P_{top} \cdot V_{top}$	

3.3 Caso: Generador con mínimo técnico y costo de arranque y parada

Analicemos el caso correspondiente a un generador térmico con mínimo técnico y costos de arranque y parada. Este será el caso que finalmente será implementado en el ámbito de este trabajo.

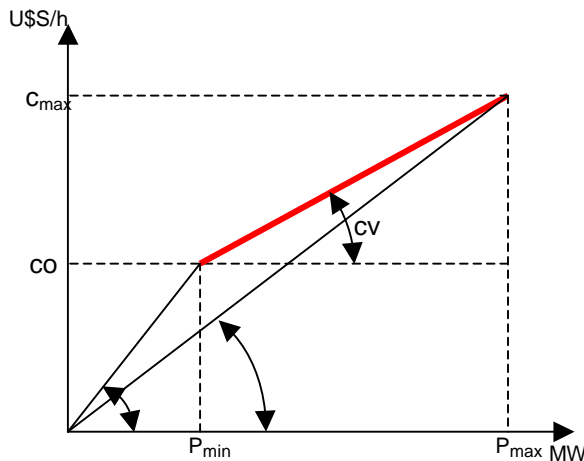
Recordemos que en este caso el generador posee las siguientes variables de control:

- p : potencia generada por encima del mínimo técnico.
- A : que indica si el generador esta prendido.
- B : Es igual a $1-A$ e indica si el generador esta apagado.

Es importante destacar que en este modelo se considera que el rendimiento (que es diferente para cada generador) es función de la potencia y por lo tanto es variable:

$$\eta = \eta(P)$$

La función de costos por unidad de tiempo de un generador con mínimo técnicos, puede ser caracterizada por la siguiente curva:



Siendo:

$\eta(P_{\min})$: Rendimiento en el mínimo técnico

$\eta(P_{\max})$: Rendimiento a plena potencia

$$c_0 = \frac{P_{\min}}{\eta(P_{\min})} \cdot \text{Precio}$$

$$c_{\max} = \frac{P_{\max}}{\eta(P_{\max})} \cdot \text{Precio}$$

$$cv = \frac{1}{P_{\max} - P_{\min}} \left(\frac{P_{\max}}{\eta(P_{\max})} - \frac{P_{\min}}{\eta(P_{\min})} \right) \cdot \text{Precio}$$

Con las definiciones anteriores la función de costos por unidad de tiempo será:

$$c = cv \cdot (P - P_{\min}) + c_0$$

Es decir :

$$c = \frac{1}{P_{\max} - P_{\min}} \left(\frac{P_{\max}}{\eta(P_{\max})} - \frac{P_{\min}}{\eta(P_{\min})} \right) \cdot \text{Precio} \cdot (P - P_{\min}) + \frac{P_{\min}}{\eta(P_{\min})} \cdot \text{Precio}$$

Por otra parte tenemos que el costo es la cantidad de combustible (Q) por el precio:

$$c = Q \cdot \text{Precio} = \frac{1}{P_{\max} - P_{\min}} \left(\frac{P_{\max}}{\eta(P_{\max})} - \frac{P_{\min}}{\eta(P_{\min})} \right) \cdot \text{Precio} \cdot (P - P_{\min}) + \frac{P_{\min}}{\eta(P_{\min})} \cdot \text{Precio}$$

Si eliminamos el *Precio* de la ecuación tenemos:

$$Q = \frac{1}{P_{\max} - P_{\min}} \left(\frac{P_{\max}}{\eta(P_{\max})} - \frac{P_{\min}}{\eta(P_{\min})} \right) \cdot (P - P_{\min}) + \frac{P_{\min}}{\eta(P_{\min})}$$

$$\eta^{-1}(P) = \frac{Q}{P} = \frac{1}{P_{\max} - P_{\min}} \left(\frac{P_{\max}}{\eta(P_{\max})} - \frac{P_{\min}}{\eta(P_{\min})} \right) \cdot \frac{(P - P_{\min})}{P} + \frac{P_{\min}}{P \cdot \eta(P_{\min})}$$

Si p es tal que $p = (P - P_{\min})$ entonces resulta que

$$Q = \frac{1}{P_{\max} - P_{\min}} \left(\frac{P_{\max}}{\eta(P_{\max})} - \frac{P_{\min}}{\eta(P_{\min})} \right) \cdot p + \frac{P_{\min}}{\eta(P_{\min})}$$

Es decir que el volumen consumido por la máquina será:

$$\text{Volumen} = \left(\frac{1}{P_{\max} - P_{\min}} \left(\frac{P_{\max}}{\eta(P_{\max})} - \frac{P_{\min}}{\eta(P_{\min})} \right) \cdot p + \frac{P_{\min}}{\eta(P_{\min})} \right) \cdot \delta t$$

Observación:

En la expresión anterior se considero que el volumen consumido viene dado en unidades de energía. En el caso de que el “volumen” “V” venga dado en unidades de “volumen” la expresión anterior queda:

$$V = \left(\frac{1}{P_{\max} - P_{\min}} \left(\frac{P_{\max}}{\eta(P_{\max})} - \frac{P_{\min}}{\eta(P_{\min})} \right) \cdot p + \frac{P_{\min}}{\eta(P_{\min})} \right) \cdot \frac{\delta t}{pci}$$

En el caso normal, para de cada generador G_i , simplemente se tenía (sin considerar los suministros de combustible) lo siguiente:

$$CF_i = .cv_i \cdot \delta t \cdot p_i + (co_i \cdot P_{\min} \cdot \delta t + c_{-arranque_i}) \cdot A_i + c_{-parada_i} \cdot B_i$$

Entonces, si suponemos la existencia generadores G_i con mínimos técnicos y costos de arranque y parada con un precio de combustible dado por un contrato ToP, las mismas intervienen en la fila de costos en la matriz del SIMPLEX de la siguiente forma:

Variables Control	p_i	A_i	B_i	$V_k^{ExtraToP}$	$V_k^{ConsumidoBP}$	1	
	$\frac{1}{P_{max} - P_{min}} \left(\frac{P_{max}}{\eta(P_{max})} - \frac{P_{min}}{\eta(P_{min})} \right) \cdot \frac{\delta}{pci}$	$\frac{\delta}{\eta(P_{min}) pci} \cdot P_{min}$		-1	-1	0	= 0
		1	1		-1	X_{V_k}	≥ 0
						-1	= 0
						-1	= 0
-Costo	$-cvnc \cdot \delta$	$-cvnc \cdot P_{min} \cdot \delta - c_{larranque}$	$-c_{lparada}$	$-P^*$	$\frac{\partial CF}{\partial X_{V_k}}$		

Importante:

Los parámetros cv y co dependen del costo del combustible, y como el costo del combustible esta dado por el contrato ToP, el generador no realiza aporte (por este concepto) a la función de costo. Sin embargo, como al realizar el cálculo de los costos variables de las máquinas, se tienen en cuenta un costos variables no combustible (al que llamamos $cvnc$) , este término si deberá aparecer a pues al momento de trasladar los costos hacia el suministro de combustible, esa componente del costo variable no puede ser eliminada. Esto hace que aparezca ese término en las columnas correspondientes.

Tal cual como se expresa en el capítulo 6, en la matriz del SIMPLEX presentada arriba, se tiene que agregar en la columna correspondiente a la variable “A” la diferencia de costos futuros por el cambio de estado de la central de pasar de A=0 a A=1 pero por motivos de simplicidad y para no recargar la matriz se decidió considerar solamente las expresiones que se modificaban.

Análogamente en la columna correspondiente a la variable “B” se tiene que agregar la diferencias de costo futuro por el cambio de estado de la central por pasar de A=0 (B=1) a A=1 (B=0)

En el caso de que se esté en un periodo que se tenga que afrontar un pago por ToP , al igual que para el generador simple, en la matriz del SIMPLEX en el elemento correspondiente a la última fila (fila de costos futuros) y a la columna correspondiente al término independiente el monto $P_{top} \cdot V_{top}$.

3.4 Cálculo del costo para los generadores.

Como se expreso anteriormente, el costo variable de las máquinas corresponde fundamentalmente al costo de combustible. El costo de combustible de las centrales asociadas al contrato ToP es aportado por el actor ToP por lo que en el modelo se decidió que cada generador ponga su costo variable como 0.

Con el objetivo de poder consultar el costo de las centrales generadoras asociadas al contrato ToP y por ejemplo poder compararla con otras centrales no asociadas al contrato ToP se decidió que actor contrato ToP exponga hacia actores asociados un precio, que permita calcular del costo variable (cv), de la siguiente forma:

- a) Si se esta demandando volumen por debajo del V_{top} (es decir $V_k^{consumidoToP} > 0$)

$$\text{precio} = -\frac{\partial CF}{\partial X - V_k}$$

- b) Si solamente se esta demandando volumen por encima del V_{top} (es decir que $V_{kconsumidoToP} = 0$)

$$\text{precio} = P^*$$

- c) Si se esta demandando volumen por debajo del V_{top} (es decir $V_k^{ConsumidoToP} > 0$) y también por encima del ToP (es decir $V_k^{ExtraToP} > 0$)

$$\text{precio} = \frac{-\frac{\partial CF}{\partial X - V_k} \cdot V_k^{ConsumidoToP} + P^* \cdot V_k^{ExtraToP}}{V_k^{ConsumidoToP} + V_k^{ExtraToP}}$$

Luego para calcular el costo variable de cada generador se tiene que:

- 1) *Caso de Máquina Simple: se asume que los rendimientos no son función de la potencia:*

$$cv = \frac{1}{\eta_i pci} \text{ precio}$$

- 2) *Generador con mínimo técnico y costo de arranque y parada: se asume que los rendimientos son en función de la potencia despachada:*

$$cv = \frac{1}{P_{\min} - P_{\max}} \left(\frac{P_{\max}}{\eta(P_{\max})} - \frac{P_{\min}}{\eta(P_{\min})} \right) \cdot \frac{1}{pci} \cdot \text{Precio}$$

$$co = \frac{P_{\min}}{\eta(P_{\min})} \cdot \frac{1}{pci} \cdot \text{Precio}$$

3.5 Como evaluación del contrato ToP

Con la finalidad de evaluar el contrato ToP se plantea llevar el conteo de las siguientes variables:

$V_k^{ExtraToP}$: Si esta variable y su acumulado toman valores importantes, quiere decir que el V_{top} establecido en el contrato ToP tendría que haber sido mayor.

$V_k^{NoConsumidoToP}$: Solamente tiene sentido en los paso de tiempo k en los que se afronta un pago ToP , siendo $V_k^{NoConsumidoToP} = X - V_k - V_k^{ConsumidoToP}$ evaluado antes de evolucionar el estado.

Si esta variable y su acumulado toman valores importantes, quiere decir que el V_{top} establecido en el contrato ToP tendría que haber sido menor.

3.6 Ecuaciones, Combustibles y Unidades

Los contratos de suministros de combustible, están dados en distintas unidades dependiendo del combustible en cuestión. Esto introduce ciertas constantes de cambio de unidades que modifican en parte las ecuaciones vistas anteriormente

Producto	unidad	PCI	PCS	Densidad
carbón mineral	kcal/kg	7000	-----	-----
fuel oil pesado	kcal/lt	9691	10146	1,0091
gas natural	kcal/m ³	8300	9300	0,62
gas oil	kcal/lt	8656	9222	0,8487
petróleo crudo	kcal/lt	8719	9284	0,8591

3.6.1 Contratos de GNL y GN

Normalmente para gas natural y gas natural licuado los contratos se establecen en **MMBtu** (millones de *Btu*), que de por si es una unidad de energía por lo que en realidad no se especifican “volúmenes” sino “cantidades” de energía.

En los contratos de GN y GNL se especifican las unidades de energía en el poder calorífico superior (pcs), sin embargo en el modelo de despacho de las máquinas se tiene que considerar el poder calorífico inferior (pci)

Teniendo en cuenta lo anterior la restricción de volumen quedaría dada como un balance de energía siendo sus unidades **MMBtu**

$$\frac{1000}{k_{MMBtu kW-h}} \cdot \frac{pcs}{pci} \sum \frac{P_i}{\eta_i} \cdot \delta t - V_k^{ConsumidoToP} - V_k^{ExtraToP} = 0$$

Siendo:

- $k_{MMBtu kW-h} = 233.0711$ la constante para pasar de **MMBtu** a **kW-h**
- P_i (**MW**)
- δt (**horas**)
- $V_k^{ConsumidoToP}$ (**MMBtu**) en realidad no es un volumen, sino es una cantidad de energía.
- $V_k^{ExtraToP}$ (**MMBtu**) en realidad no es un volumen, sino es una cantidad de energía.
- pci (**kcal/m³**) poder calorífico inferior

- pci ($kcal/m^3$) poder calorífico superior

Por otra parte la variable de estado X_V también estará medida en $MMBtu$ dado que es “cantidad” de energía

Los precios estarán dados en $U\$/MMBtu$

3.6.2 Contratos de Gas Oil, Fuel Oil

Normalmente los contratos de de GO y FO están dados en litros, por lo que la restricción de volumen quedaría:

$$\frac{1000}{k_{kcalkW-h}} \sum \frac{P_i}{\eta_i pci} \cdot \delta t - V_k^{ConsumidoToP} - V_k^{ExtraToP} = 0$$

Siendo:

- $k_{kcalkW-h} = 0.001163$ la constante que permite pasar de $kcal$ a $kW-h$ P_i ($kW-h$)
- P_i (MW)
- δt ($horas$)
- $V_k^{ConsumidoToP}$ (lt)
- $V_k^{ExtraToP}$ (lt)
- $pci_{gasoil} = 8656(kcal / lt)$
- $pci_{fueoil} = 9691(kcal / lt)$

Por otra parte la variable de estado X_V también estará medida en litros y los precios estarán dados en $U\$/lt$

Observación:

Pueden existir contratos de GN que estén dados en metros cúbicos En este caso la ecuación es la misma que la anterior pero el poder calorífico inferior esta dado en $kcal/m^3$ por lo que todas las variables que expresen volúmenes estarán dadas en m^3 y la restricción será un balance en volúmenes expresados en m^3

La constante $k_{kcalkW-h}$ explica la relación entre $kcal$ y $kW-h$ y por lo tanto es la misma que para el caso anterior

Hay que tener en cuenta además que $pci_{gasnatural} = 8300(kcal / m^3)$

3.6.3 Contratos de carbón

En este caso la ecuación es la misma que la anterior pero el poder calorífico inferior está dado en $kcal/kg$ por lo que todas las variables que expresen volúmenes, en realidad estarán expresando masa y estarán dadas en kg y la restricción será un balance en volúmenes expresados en kg

La constante $k_{kcalKW-h}$ explica la relación entre $kcal$ y $kW-h$ y por lo tanto es la misma que para el caso anterior.

Hay que tener en cuenta además que $pci_{carbon} = 7000(kcal / kg)$

3.6.4 Costo Específico y Rendimiento

En el modelo del generador con mínimo técnico con costos de arranque y parada se decidió utilizar el rendimiento de la máquina $\eta = \eta(P)$ en lugar del costo específico $CE = CE(P)$

En el caso de que se tengan los datos de las máquinas en sus costos específicos, para pasar a rendimientos se tendrán que realizar los siguientes cálculos

$$\eta = \frac{1000 \cdot \rho}{CE \cdot pci \cdot k_{kcalKW-h}}$$

Siendo:

1. Para el caso de Fuel Oil, Gas Oil, o Petróleo Crudo

- pci ($kcal / lt$)
- $CE(g / kWh)$
- ρ (kg / lt)
- $k_{kcalKW-h} = 0.001163$ la constante que permite pasar de $kcal$ a $kW-h$

2. Para el caso de Gas Natural

- pci ($kcal / m^3$)
- $CE(g / kWh)$
- ρ (kg / m^3)
- $k_{kcalKW-h} = 0.001163$ la constante que permite pasar de $kcal$ a $kW-h$

4 Detalles de Implementación en SimSEE

Se decidió implementar el modelado del TakeOrPay, modificando el actor correspondiente a los Generadores Térmicos con mínimo técnico y costo de arranque y parada, respetando el diseño orientado a objetos del SimSEE y obteniendo una implementación que facilite la extensión futura hacia otros tipos de suministros y hacia otros generadores.

Se presentarán a continuación, el análisis realizado para el diseño y la implementación de la aplicación. Asimismo se describirán las principales modificaciones a los objetos existentes y se describirán las principales características de los objetos nuevos.

4.1 Análisis y Diseño

Primeras Conclusiones:

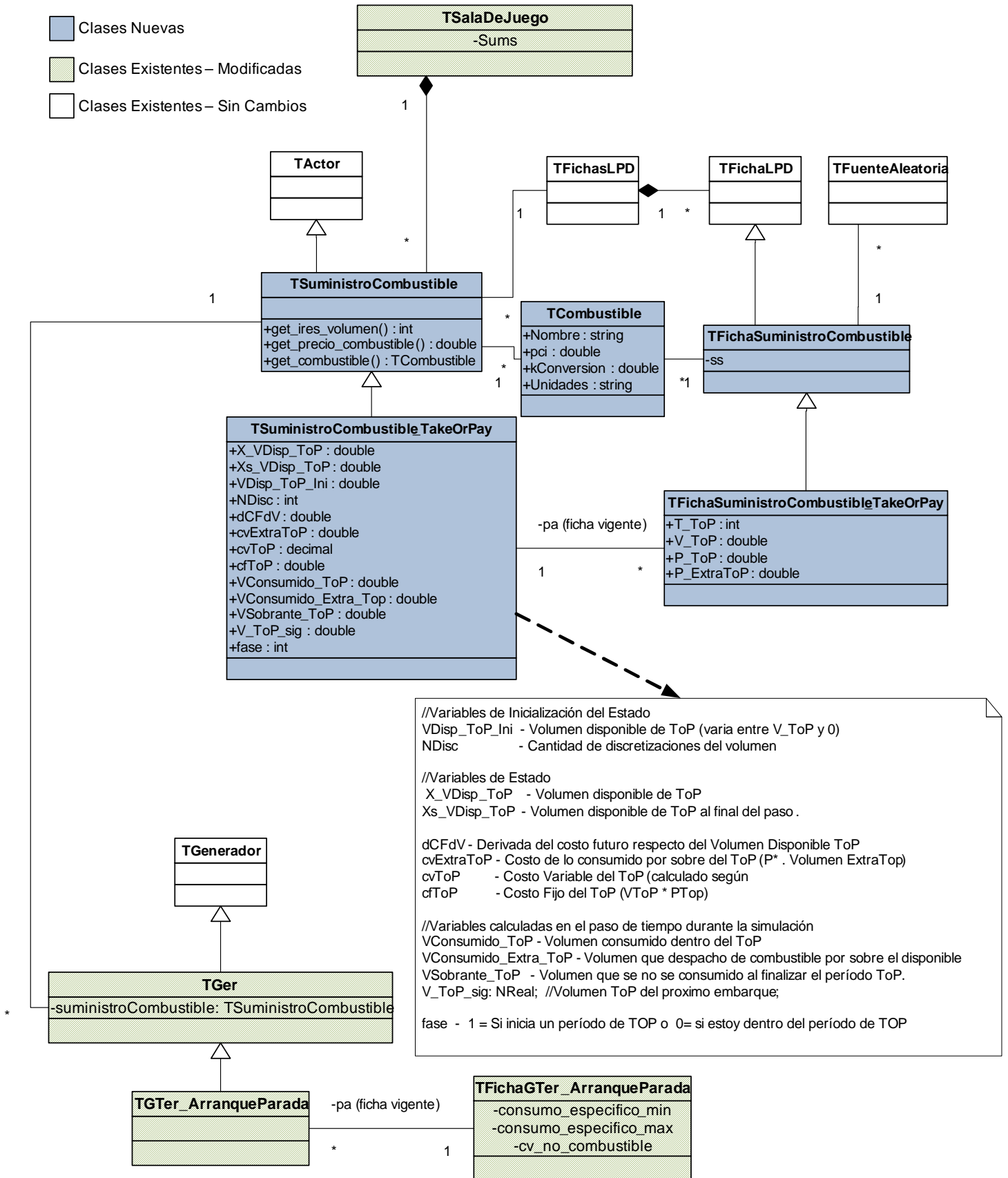
El actor “Suministro de Combustible” solicita la restricción de volumen pero la misma debe ser completada con aportes de cada uno de los generadores.

El actor “Suministro de Combustible” deberá exponer hacia los restantes actores una propiedad que indique cuál fue la restricción que el impuso y deberá también informar las constantes correspondientes al tipo de combustible a utilizar en el contrato (*pci* en este caso)

De todo el análisis anterior resulta la necesidad de implementar tanto un conjunto de actores como de modificaciones de otros existentes, debiendo establecer las siguientes interacciones entre los actores:

1. Todo generador tendrá la posibilidad de indicar o no un suministro de combustible.
2. Todo suministro de combustible deberá definir un tipo de combustible. Este tipo de combustible determinará las unidades de medida, constantes de conversión, *pci*, etc.
3. Los suministros de combustible deberán registrar sus variables antes que los generadores.
4. Todo generador conectado a un suministro de combustible deberá:
 - a. Consultarle al suministro de combustible cual es el índice *ires* correspondiente a la restricción de volumen que el impuso.
 - b. Cargar en la restricción *ires* los términos para el cálculo del volumen consumido (tal como se detallo anteriormente)
 - c. Hacer su aporte a la función de costos según como se detallo anteriormente.
 - d. Luego de finalizado el paso (cuando se lee la solución) los generadores consultarán al suministro de combustible cuál es el precio del combustible.

4.2 Diagramas de Clases



TEditarTsuministroCombustibleTakeOrPay

Alta de Contrato Take Or Pay con Pago al Inicio del Periodo

Nombre del Contrato: ContratoTakeOrPay

Combustible: Gas Oil

Variables de Estado:

Volumen Disponible ToP Inicial[lt]:

Nro de puntos de discretización del Volumen:

Fichas: Ver Periodicidad Expandida

Fecha de Inicio	Información Adicional	Periodo
Auto	T_ToP= 100diasV_ToP= 100 lt, P_ToP= 100 USD/lt, P_ExtraToP= 100 USD/lt,	no

Se selecciona el Tipo de Combustible

TEditarFichaSuministroCombustible

TEditarFichaSuministroCombustibleTakeOrPay

Ficha Take Or Pay

Fecha de inicio (dd/MM/yyyy): Auto

Periodica?

Duración ToP [dias]	100
Volumen ToP [lt]	100
Precio ToP [USD/lt]	100
Precio Extra ToP [USD/lt]	100

Indice de Precios por Combustible[p.u. del precio]: <Ninguna>

Borne:

TEditarTGter_ArranqueParada

Editando "GeneradorArranque/Parada" GT...

Nombre del Generador: Generador

Asignado al Nodo: Nodo

Suministro Externo de Combustible: ContratoTakeOrPay

Estado Inicial: <Agregar nuevo...>

Fichas: Ver Periodicidad Expandida

Fecha de Inicio	Información Adicional	Periodica?

Al seleccionar un suministro de combustible , el combustible seleccionado por ese suministro determina las unidades de la ficha.

Asimismo , se ocultan las propiedades de costo variable y variable a mínimo técnico (cv y c 0) y aparecen los consumos (o rendimientos) así como el costo variable no combustible .

TEditarFichaGter_ArranqueParada

Agregar ficha de "GeneradorArranque/Parada" ...

Fecha de inicio (dd/MM/yyyy): 0

Periodica?

Potencia Mínima[MW]	
Potencia Máxima[MW]	
Consumo Especifico Mínima Carga[lt/MWh]	
Consumo Especifico Máxima Carga[lt/MWh]	
Costo Variable No Combustible[USD/MWh]	
Coefficiente de Disponibilidad Fortuita[p.u.]	
Tiempo de Reparación[horas]	
Costo de Arranque[USD]	
Costo de Parada[USD]	

E MaxPaso[MWh]:

Indice de Precios por Combustible[p.u. del precio]: <Ninguna>

Borne:

4.3 Modificaciones a la Sala de Juego

Esta clase, que cumple las funciones de ser el controlador principal, fue modificada para que mantenga un registro de la lista de actores del tipo “Suministro de Combustible” en forma separada del resto de los actores. Para ello se definió una variable *Sums* : *TListaDeCosasConNombre*

También se debió tener cuidado en que estos actores se registren antes que los generadores, en particular se colocó luego de las demandas y antes de los generadores, a forma de ejemplo:

```
for i := 0 to nods.Count -1 do
  listaActores.Add(TCosaConNombre(nods[i]));
for i := 0 to dems.Count -1 do
  listaActores.Add(TCosaConNombre(dems[i]));
for i := 0 to sums.Count -1 do
  listaActores.Add(TCosaConNombre(sums[i]));
for i := 0 to gens.Count -1 do
  listaActores.Add(TCosaConNombre(gens[i]));
for i := 0 to arcs.Count -1 do
  listaActores.Add(TCosaConNombre(arcs[i]));
for i := 0 to ComercioInternacional.Count -1 do
  listaActores.Add(TCosaConNombre(ComercioInternacional[i]));
```

```
procedure TSalaDeJuego.Prepararse( TiempoHaciaAdelante: boolean );
var
.
.
begin
.
.
//Armar el listado de actores
for k := 0 to nods.Count -1 do
begin
  actores[j] := TActor(nods[k]);
  inc(j)
end;
for k := 0 to dems.Count -1 do
begin
  actores[j] := TActor(dems[k]);
  inc(j)
end;
for k := 0 to sums.Count -1 do
begin
  actores[j] := TActor(sums[k]);
  inc(j)
end;
for k := 0 to arcs.Count -1 do
begin
  actores[j] := TActor(arcs[k]);
  inc(j)
end;
.
.
end;
```

Esto tiene como objetivo, que los suministros de combustible estén cargados al momento que los generadores requieran sus propiedades. Por ejemplo, la Sala de Juegos invocará todos los procedimientos (*prepararPaso_as*, *SorteosDelPaso*, , *prepararPaso_ps*, *leer_solucion*, etc.) de los suministros de combustible antes que a los generadores. En particular, nos aseguramos que los suministros de combustible ya hayan registrado las restricciones de volumen y que por lo tanto los generadores le podrán preguntar a los mismos en que restricción deberán incluir los términos correspondientes al cálculo del volumen consumido.

4.4 Modificaciones a los Editores de los generadores

Se modificó la clase base *TGer* de forma tal que permita seleccionar un suministro de combustible para el generador. Al hacer esto se actualizaron todos los editores de los generadores térmicos incluyendo un combo para permitir seleccionar un suministro, definir uno nuevo y no seleccionar a ninguno.

En particular se modificó el editor y la ficha correspondiente al generador con mínimo técnico y costos de arranque y parada (*TEditarTGer_ArranqueParada* y *TEditarFichaGTer_ArranqueParada*). En el caso particular de la ficha (*TEditarTGer_ArranqueParada*), en su constructor se interroga al padre (editor *TEditarTGer_ArranqueParada*) para que retorne el suministro de combustible seleccionado de forma tal que se ocultan los controles de ingreso de algunas propiedades y se muestran otras. Además se obtiene el tipo de combustible para mostrar las unidades adecuadas en el formulario.

```
Constructor TEditarFichaGTer_ArranqueParada.Create(AOwner : TComponent;
                                                    cosaConNombre : TCosaConNombre ;
                                                    ficha : TFichaLPD;
                                                    sala : TSalaDeJuego );

var
  fichaAux : TFichaGTer_ArranqueParada;
  padre : TEditarTGer_ArranqueParada;
begin
  inherited Create(AOwner, cosaConNombre, ficha, sala);
  padre := TEditarTGer_ArranqueParada(AOwner);
  Generador := cosaConNombre as TGer_ArranqueParada;
  self.bConSuministroCombustible := padre.tieneSuministro();
  self.suministro := padre.getSuministro();
  .
  .
end;

procedure TEditarFichaGTer_ArranqueParada.FormCreate(Sender: TObject);
begin
  .
  .
  if self.bConSuministroCombustible then
  begin
    self.IntFicha.RowCount := 9;

    self.IntFicha.cells[0, 0] := 'Potencia Mínima[MW]';
    self.IntFicha.cells[0, 1] := 'Potencia Máxima [MW]';
    self.IntFicha.cells[0, 2] := 'Rendimiento a Mínima Potencia';
    self.IntFicha.cells[0, 3] := 'Rendimiento a Máxima Potencia';
    self.IntFicha.cells[0, 4] := 'Costo Variable No Combustible[USD/MWh]';
    self.IntFicha.cells[0, 5] := 'Coeficiente de Disponibilidad Fortuita[p.u.]';
    self.IntFicha.cells[0, 6] := 'Tiempo de Reparación[horas]';
    self.IntFicha.cells[0, 7] := 'Costo de Arranque[USD]';
    self.IntFicha.cells[0, 8] := 'Costo de Parada[USD]';
  end
  else
  begin
    self.IntFicha.RowCount := 8;
    self.IntFicha.cells[0, 0] := 'Potencia Mínima[MW]';
    self.IntFicha.cells[0, 1] := 'Potencia Máxima[MW]';
    self.IntFicha.cells[0, 2] := 'Costo Variable a Potencia Mínima[USD/MWh]';
    self.IntFicha.cells[0, 3] := 'Costo Variable[USD/MWh]';
    self.IntFicha.cells[0, 4] := 'Coeficiente de Disponibilidad Fortuita[p.u.]';
    self.IntFicha.cells[0, 5] := 'Tiempo de Reparación[horas]';
    self.IntFicha.cells[0, 6] := 'Costo de Arranque[USD]';
    self.IntFicha.cells[0, 7] := 'Costo de Parada[USD]';
  end;
  .
  .
end;
```

4.5 Modificaciones a los actores Generadores Térmicos

A continuación se describen los principales cambios realizados, al actor Generador Térmico con Arranque y Parada (las propiedades/métodos que no se mencionan es porque no fueron modificados o porque el cambio no es significativo para la implementación del modelo).

```
procedure TGTer_ArranqueParada.prepararPaso_ps;
var
  indice: NReal;
  precio_combustible : NReal;
begin
  //Hay que discriminar en función de si el generador está conectado
  a un suministro de combustible o no.
  if (self.suministroCombustible = NIL) then
    //En este caso se comporta como hasta ahora
    .
    .
    .
  else
    // En este caso, el suministro es el que indexa el precio del combustible
    por lo que no tiene sentido el indexador
    begin
      PMin:= pa.PMin;
      PMax:= pa.PMax - pa.PMin;

      //En este caso, si bien los costos cv y c0 son 0 (no aportan a la función de
      costos) pero si se debe introducir en cv_no_combustible
      c0:= pa.PMin * pa.cv_no_combustible;
      cv:= pa.cv_no_combustible;
    end;
  end;
end;
```

```
procedure TGTer_ArranqueParada.opt_cargue( s: TSimplex );
.
.
begin
  .
  .
  {* No hay cambios en las restricciones asociadas a las variables de acople ni a la
  variable de potencia. Todo lo que estaba hasta el momento de la implementación de este
  modelo sigue siendo válido. *}
  .
  .
  {*En el caso de existir un suministro de combustible, en la restricción impuesta por
  este actor para el balance del volumen, cada generador debe colocar sus términos que
  permitan calcular el volumen consumido en función de la potencia despachada

  Para ello se requiere de el rendimiento de la maquina, de los PCI, de la constante de
  conversión a KWHora (en función del tipo de combustible)

  El Termino a incluir será: 1/k_conversion * 1/rendimiento * duración del poste

  Lo primero es obtener la fila correspondiente a la restricción:
  *}
  if (self.suministroCombustible <> NIL) then
  begin
    iresvolumen := self.suministroCombustible.get_ires_volumen();

    for iposte:= 0 to globs.NPostes-1 do
    begin

      combustible := self.suministroCombustible.get_combustible();
      coef_volumen := (1/(pa.PMax-pa.PMin)) * (pa.PMax/pa.rendimiento_pmax -
      pa.PMin/pa.rendimiento_pmin) *
      1/(combustible.kConversion*combustible.PCI);

      s.spon_e( iresvolumen, ivar+iposte, coef_volumen*globos.durpos[iposte] );
      //Volumen despachado por encima del mínimo técnico en el poste(Ptotal-Pmin)
```

```
end
end

//Pongo los terminos para calcular el volumen en el mínimo técnico
coef_volumen := pa.PMin / (pa.rendimiento_pmin *
                          combustible.kConversion*combustible.PCI);
s.pon_e( iresvolumen, ivar+globs.NPostes, globs.HorasDelPaso * coef_volumen );
//Volumen despachado en el mínimo técnico en el poste

// El aportes a la función de utilidad se mantiene incambiado pues al preparar el paso
ya se considera la existencia del suministro de combustible y en ese caso el c0 y cv
vienen con el costo variable no combustible.

//Pongo el aporte para el mínimo técnico
s.pon_e( s.nf, ivar+globs.NPostes, -c0 * globs.HorasDelPaso );

// aportes a la función de utilidad
for iposte:= 0 to globs.NPostes -1 do
  s.pon_e( s.nf, ivar+iposte, -cv * globs.DurPos[iposte] );
end;

// Se mantiene incambiado el agregar costos de Arranque o Parda según corresponda, las
restricciones de caja, etc.

end;
```

```
procedure TGTer_ArranqueParada.opt_leerSolucion( s: TSimplex );
var
  .
  .
  .
Begin

//Este método no es modificado. Dado que cv y c0 solo tienen los costos no
combustibles, el costo directo del paso de este actor solo introducirá los no
combustibles.

end;
```

4.6 Implementación del Suministro de Combustible.

4.6.1 Clase Base

Se implementó una clase base llamada *TSuministroCombustible*. Esta clase se define para brindar la posibilidad futura de que se pueda extender el SimSEE a otros tipos de suministros diferentes del TakeOrPay

Esta clase define los siguientes métodos abstractos (que deberán implementarse en las clases que hereden de ella)

```
function get_ires_volumen:NInt; virtual; abstract;
function get_precio_combustible:NReal; virtual; abstract;
function get_combustible:TCombustible; virtual; abstract;
```

4.6.2 Clase Suministro de Combustible Take Or Pay

La clase *TSuministroCombustible_TakeOrPay* que hereda de *TSuministroCombustible* es la que implementa directamente el actor que modela el contrato de ToP.

A continuación se describirá los principales implementaciones de los métodos abstractos definidos en la clase base:

```
function TSuministroCombustible_TakeOrPay.get_ires_volumen:NInt;  
begin  
    //Retorna el índice correspondiente a la restricción de volumen impuesta.  
    //Es utilizado por los generadores para cargar el Simplex  
    result := self.ires;  
end;
```

```
function TSuministroCombustible_TakeOrPay.get_combustible:TCombustible;  
begin  
    result := pa.combustible;  
end;
```

```
function TSuministroCombustible_TakeOrPay.get_precio_combustible:NReal;  
begin  
    if (VConsumido_ToP > 0) and (VConsumido_Extra_Top = 0) then  
        result := dCFdV  
    else  
        if (VConsumido_ToP > 0) and (VConsumido_Extra_Top > 0) then  
            result := pa.P_ExtraToP  
        else  
            if (VConsumido_ToP = 0) and (VConsumido_Extra_Top > 0) then  
                result := ( -1 * dCFdV * VConsumido_ToP + pa.P_ExtraToP *  
VConsumido_Extra_Top) / (VConsumido_ToP + VConsumido_Extra_Top)  
            else  
                result := pa.P_ExtraToP  
            end  
        end  
    end  
end;
```

```
procedure TSuministroCombustible_TakeOrPay.SorteosDelPaso( sortear: boolean );  
var  
    fecha_ToP_ant : TDateTime; //Fecha del último embarque recibido (anterior al paso)  
    fecha_ToP_sig : TDateTime; //Fecha del siguiente embarque  
    i, cntDias:Integer;  
    ficha: TFichaSuministroCombustible_TakeOrPay;  
  
begin  
    V_ToP_sig := 0;  
    //Calculamos cuando fue el último embarque (más reciente) para la ficha de inicio  
    //del paso. Esto puede dar la fecha de vigencia de la ficha (cuando comienza a seguir  
    //una ficha entra combustible) o una fecha posterior tal que es múltiplo de T_ToP  
    cntDias := Trunc(globs.FechaInicioDelpaso.dt) - Trunc(pa.Fecha.dt);  
    cntDias := cntDias mod pa.T_ToP;  
    fecha_ToP_ant := globs.FechaInicioDelpaso.dt - cntDias;  
  
    //Calculamos la siguiente fecha de ingreso de TakeOrPay y la hacemos igual a la  
    //fecha anterior + T días  
    //Si hay un cambio de ficha antes de esa fecha, colocamos como fecha del próximo  
    //ingreso la próxima fecha de vigencia  
    fecha_ToP_sig := fecha_ToP_ant + pa.T_ToP;  
    V_ToP_sig := pa.V_ToP;  
  
    //Ahora debemos detectar si hay una ficha que comienza a regir en el paso de  
    //simulación.  
    //En este caso, en el paso no se actualiza el volumen, se consume todo lo que resta  
    //y el volumen se actualizará en el siguiente paso de tiempo.  
    for i:= 0 to lpd.Count - 1 do  
        begin  
            ficha:= TFichaSuministroCombustible_TakeOrPay(lpd[i]);  
            if (ficha.fecha.dt > globs.FechaInicioDelpaso.dt)  
                and (ficha.fecha.dt < globs.FechaFinDelpaso.dt) then  
                if (fecha_ToP_sig > ficha.fecha.dt) then  
                    begin  
                        fecha_ToP_sig := ficha.fecha.dt;  
                        V_ToP_sig := ficha.V_ToP;  
                    end  
                end  
            end  
        end  
    end
```

```
end;
end;

//Ahora determinamos la fase en función de cuando ingreso el cargamento anterior y
cuando ingresa el siguiente

if (globs.FechaInicioDelPaso.dt <= fecha_ToP_sig)
and
(TFecha.Create_Offset(globs.FechaInicioDelPaso, globs.HorasDelPaso).dt >=
fecha_ToP_sig)
then
//Atención: se pone globs.FechaFinDelPaso.dt > fecha_ToP_sig pues en caso de la igualdad
//se toma en el inicio del siguiente paso.
fase:= 1 //En este paso de simulación ingresa un volumen T_ToP del contrato
else
fase:= 0; //En este paso de simulación no ingresa combustible

//Si estamos en la fase 1, debemos actualizar el volumen disponible al final del paso
//y el volumen restante lo ponemos como perdido
//Si estamos en la fase 0, significa que tenemos un contrato vigente y estamos a la
espera de un cargamento ToP

end;
```

```
procedure TSuministroCombustible_TakeOrPay.prepararPaso_ps;
var
dCFdV_Inc, dCFdV_Dec: NReal;

begin
self.VConsumido_ToP := 0;
self.VConsumido_Extra_Top := 0;
self.VSobrante_ToP :=0;

//Los suministros de combustible se preparan antes que los generadores. Esto permite que
el generador tenga las cosas que necesita del suministro de combustible.

cvToP := 0;
cvExtraToP := 0;

if globs.EstadoDeLaSala = CES_OPTIMIZANDO then
globs.CF.devxr_estrella(ixr, globs.kPaso_+1, dCFdV_Inc, dCFdV_Dec, rescod )
else
globs.CF.devxr_continuo( ixr, globs.kPaso_+1, dCFdV_Inc, dCFdV_Dec, rescod, xrpos );

dCFdV:=dCFdV_Dec;
cvToP:= -dCFdV;

if fase= 1 then
begin
if pa.indicePreciosPorCombustible <> NIL then
begin
cfToP :=pa.P_ToP * pa.V_ToP *
pa.indicePreciosPorCombustible.bornera[pa.nroBornePreciosPorCombustible];
cvExtraToP:= pa.P_ExtraToP *
pa.indicePreciosPorCombustible.bornera[pa.nroBornePreciosPorCombustible];
end
else
begin
cfToP :=pa.P_ToP * pa.V_ToP;
cvExtraToP:= pa.P_ExtraToP;
end;
end
else
begin
cfToP :=0; //No ingresa combustible en esta etapa
if pa.indicePreciosPorCombustible <> NIL then
cvExtraToP:= pa.P_ExtraToP *
pa.indicePreciosPorCombustible.bornera[pa.nroBornePreciosPorCombustible]
else
cvExtraToP:= pa.P_ExtraToP;
end;
end;
end;
```



```
procedure TSuministroCombustible_TakeOrPay.opt_nvers( var ivar, ivae, ires: integer );
begin
  self.ivar:= ivar; //Cantidad de variables (columnas)
  self.ires:= ires; //Cantidad de restricciones (filas)

  ivar:= ivar + 2; // Columnas de VExtraTop y VConsumido_ToP
  ires:= ires + 1; // 1 restricción. Luego los generadores deberán completar en sus
  columnas y en esta fila la restricción de volumen
end;
```

```
procedure TSuministroCombustible_TakeOrPay.opt_cargue( s: TSimplex );
begin
  {$IFDEF SPXCONLOG}
  spx_NombrarVariables(s);
  {$ENDIF}

  //Restricción de balance de volumen (Sumatoria de lo consumido por las maquinas -
  VExtraTop - VConsumidoTop debe ser igual a 0
  s.pon_e(ires, ivar , 1);
  s.pon_e(ires, ivar + 1 , 1);

  //Aporte a la función de Costo
  s.pon_e( s.nf, ivar , -cvExtraToP);
  s.pon_e( s.nf, ivar+1 , -cvToP);

  //Termino independiente (vale 0 o Vtop*Ctop)
  s.acum_e( s.nf, s.nc, - cfToP);

  //Cada uno de los generadores conectados debe ser responsable de cargar sus
  //columnas en la restricción de volumen y en la función de costo objetivo

end;
```

```
procedure TSuministroCombustible_TakeOrPay.Sim_Cronica_Inicio;
begin
  inherited Sim_Cronica_Inicio;
  X_VDisp_ToP := VDisp_ToP_Ini;
end;

procedure TSuministroCombustible_TakeOrPay.opt_fijarRestriccionesDeCaja( s: TSimplex
);
var
  iposte: integer;
begin
  //La restricción de volumen pasa a ser de igualdad
  s.FijarRestriccionIgualdad(ires);

  //Agregamos la restricción de caja que dice que el
  0 <= VConsumidoToP >= VDisponibleTop
  s.cota_inf_set( ivar+1, 0 );
  s.cota_sup_set( ivar+1, X_VDisp_ToP );
end;
```

```
procedure TSuministroCombustible_TakeOrPay.opt_leerSolucion( s: TSimplex );
var
  VDisp_ToP_: NReal;
Begin

  self.VConsumido_Extra_Top := s.xval(ivar);
  self.VConsumido_ToP := s.xval(ivar + 1);

  //Calculo del costo directo del paso y actualizo el estado al final del paso

  //Costo Fijo mas variable. El fijo es 0 si no estoy fecha de renovación de
  contrato, o VTop*PTop
  //y cvExtraTop es el Volumen Extra por el Precio extra Top (esto ya se calculo al
  preparar el paso)
  CostoDirectoDelPaso:= cfToP + cvExtraToP * s.xval(ivar);
  Xs_VDisp_ToP:= X_VDisp_ToP - s.xval(ivar + 1);
```

```
if fase=1 then
begin
  VSobrante_ToP := Xs_VDisp_ToP; //Lo que quedó disponible en el tanque es
sobrante (sin consumir)
  Xs_VDisp_ToP:= V_ToP_sig; //Actualizo el estado, ingreso el combustible
end
else if Xs_VDisp_ToP >= 0 then
  Xs_VDisp_ToP:= Xs_VDisp_ToP //En esta fase, simplemente consumí y
actualize el estado
else
  Xs_VDisp_ToP:= 0;

end;
```

```
procedure TSuministroCombustible_TakeOrPay.EvolucionarEstado;
begin
  X_VDisp_ToP:= Xs_VDisp_ToP;
end;
```

```
procedure TSuministroCombustible_TakeOrPay.optx_nvxs( var ixr, ixd, iauxr, iauxd:
integer );
begin
  self.ixr:= ixr;
  ixr:= ixr + 1;
end;
```

```
procedure TSuministroCombustible_TakeOrPay.PosicionarseEnEstrellita;
begin
  X_VDisp_ToP:= globs.CF.xr[ixr];
end;
```

```
procedure TSuministroCombustible_TakeOrPay.ActualizarEstadoGlobal;
begin
  globs.CF.xr[ixr]:= X_VDisp_ToP;
end;
```

```
procedure TSuministroCombustible_TakeOrPay.optx_RegistrarVariablesDeEstado(
adminEstados: TAdminEstados );
begin
  adminEstados.Registrar_Continua(
    ixr,
    0.0,
    pa.V_Top,
    NDisc,
    nombre+'_V_Disponible_ToP', // nombre de la variable
    combustible.Unidades // unidades
  );
end;
```

```
procedure AlInicio;
begin
  registrarClaseDeCosa( TSuministroCombustible_TakeOrPay.ClassName,
TSuministroCombustible_TakeOrPay );
  registrarClaseDeCosa( TFichaSuministroCombustible_TakeOrPay.ClassName,
TFichaSuministroCombustible_TakeOrPay );
end;
```

5 Resultados del estudio.

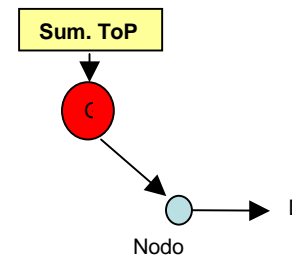
Como resultado del estudio se presentan dos casos que se utilizaron para testear el comportamiento del modelo. Estos casos son sencillos y no tienen como objetivo realizar apreciaciones que vayan más allá que aquellas que permitan determinar el correcto comportamiento del actor “Suministro de Combustible – TakeOrPay”

Se realizaron 2 pruebas:

- Caso A – Un único generador con suministro ToP.
- Caso B – Comparar el comportamiento de un generador sin ToP y con ToP.

5.1 Caso A – Un único generador con suministro ToP

A los efectos de testear el funcionamiento del modelado del ToP se creo una sala sencilla compuesta por con un nodo, una demanda, un suministro de combustible y un único generador conectado al suministro.



Se asumió que el contrato ToP se efectivizaba cada 90 días con un suministro de 100.000m³ de combustible y un costo de 300U\$/m³ y un costo de 600U\$/m³ si consumía combustible extra ToP. El paso de simulación corresponde a 1 día y el período de simulación es de 2 años.

Nota: En este modelo, la máquina siempre se despachara a pleno pues es la única que puede suministrar la demanda

En la figura 1 se observa la evolución del volumen disponible de ToP (X_V) y su comportamiento de acuerdo a los esperado

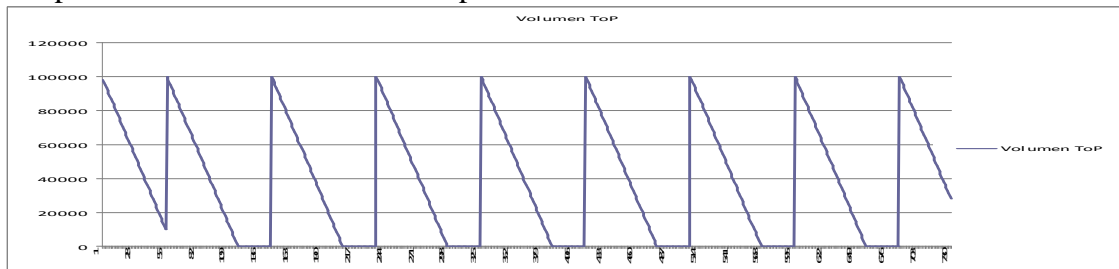


Fig.1 Evolución del Volumen Disponible ToP.

La máquina se encuentra despachada a pleno pero el suministro ToP no le alcanza para cubrir el despacho durante 90 días provocando el vaciamiento del tanque y la necesidad de consumir combustible extra ToP (ver figura2).

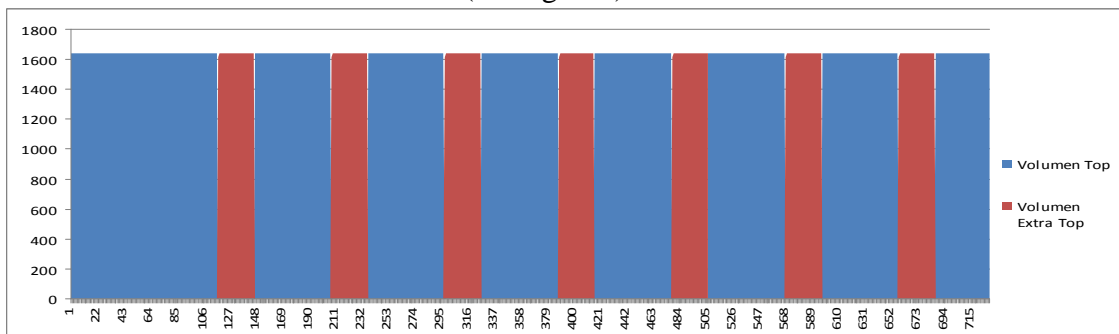


Fig.2 Consumo de combustible del Generador.

En el primer tramo se tira combustible porque se supone que el tanque inicia con todo el volumen de ToP disponible y la próxima carga de combustible llega antes de poder consumirlo.

5.1.1 Comportamiento del Costo Futuro

Un tema interesante de analizar es el comportamiento del costo futuro. A los efectos de la optimización se discretizó la variable de estado (X_V) en 5 puntos o volúmenes disponibles de ToP (0, 25000, 50000, 75000 y 100000).

En la figura 3 se observa el comportamiento del costo futuro. La gráfica está ordenada del presente al futuro. En un instante del tiempo dado, la gráfica indicará el Costo Futuro de Generación en función del combustible disponible del suministro ToP en ese instante de tiempo.

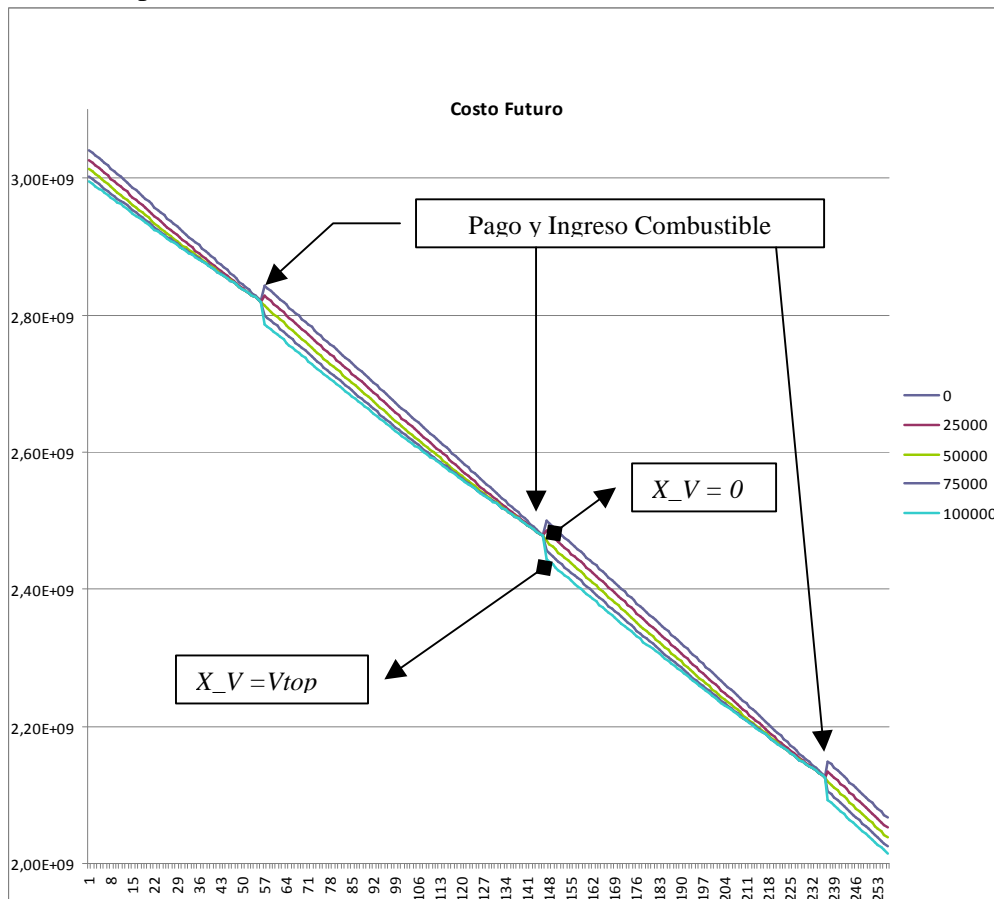


Fig.3 Costo Futuro

La cota superior de la gráfica corresponde a un estado sin combustible disponible y la cota inferior al estado en el que todo el volumen está disponible ("tanque lleno"). Se puede apreciar que el comportamiento es adecuado ya que siempre es más barato operar si tengo el tanque lleno que si lo tengo vacío.

Importante: La gráfica no representa la evolución de un estado a otro.

Es interesante observar que muy próximo al ingreso del ToP da lo mismo tener disponibilidad de combustible que no tenerla, ya que va a ingresar combustible y este debe pagarse por completo. Esto hace que la curvas se peguen en los momentos próximos al ingreso de un volumen de combustible.

En esos momentos, es decir al afrontar el pago del combustible, el estado evoluciona de forma tal que sin importar cuanto combustible tenía previamente, se pasa al estado de disponibilidad total (curva de menor costo). Si por algún motivo (se perdió combustible, se “evaporó”, etc.) el estado siguiente pasa a ser uno de menor volumen disponible, el costo futuro de operar aumenta sustancialmente pues se pagó el combustible pero el mismo no está disponible.

Análogamente si me paro inmediatamente después de pagar el ToP y tengo el tanque lleno, el costo de operar es más barato y esto genera la discontinuidad en la curva un pico hacia abajo.

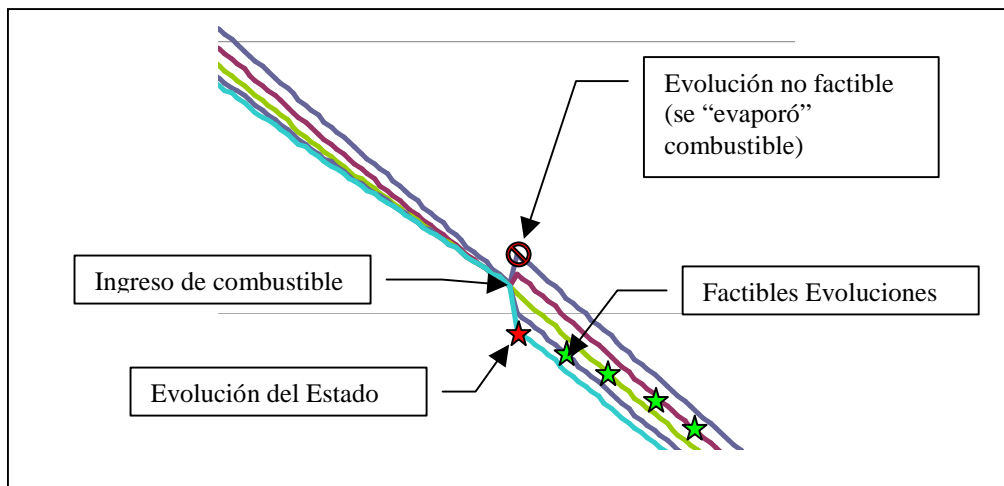


Fig.4 Derivada del Costo Futuro respecto al Volumen ToP

En la gráfica 5 se observa la derivada del costo futuro respecto a la variable de estado. Al igual que en la gráfica del costo futuro se observa que el comportamiento es adecuado siendo un costo más caro cuando no tengo combustible que cuando tengo el mismo. Por otro lado se observa que el costo del combustible queda con un límite superior determinado por el valor de combustible extra ToP.

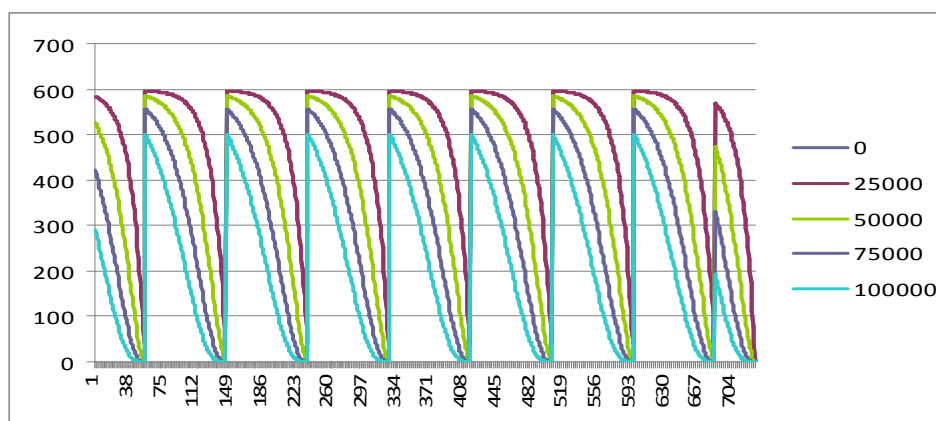


Fig.5 Derivada del Costo Futuro respecto al Volumen ToP

5.2 Caso B – Comparar el comportamiento de un generador sin ToP y con ToP.

Otra prueba que se realizó es conectar en el nodo 2 máquinas más y observar el comportamiento del generador con suministro ToP y sin suministro ToP.

En particular se conectó una maquina G1 (color verde) con el rendimiento similar a CTR con suministro ToP, otra G2 (color rojo) similar a la 6ta (ambas con costo de arranque y parada de U\$5000) y una G3 (color azul) similar a una central de motores de 160MW .

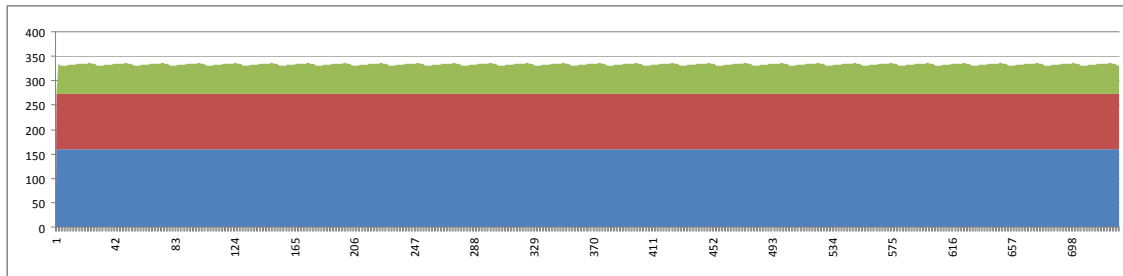


Fig.6 Despacho de máquinas sin ToP

En la gráfica 6 se observa que la G1 por ser la máquina más cara es la que se utiliza para marginar y completar la demanda.

En el caso de tener suministro ToP el comportamiento es totalmente distinto en el despacho de las máquinas como se observa en la figura 7

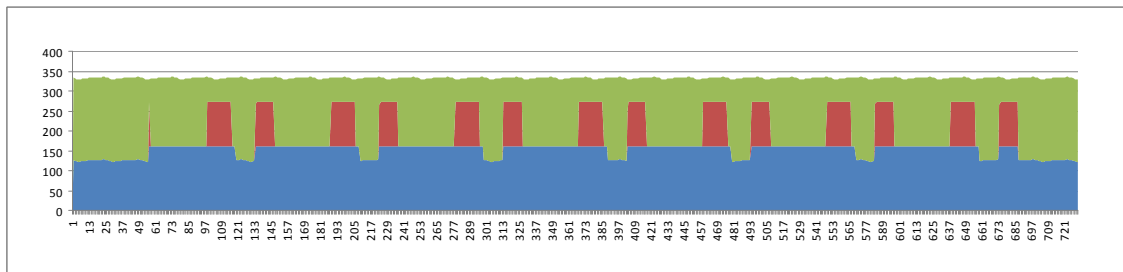


Fig.7 Despacho de máquinas con ToP

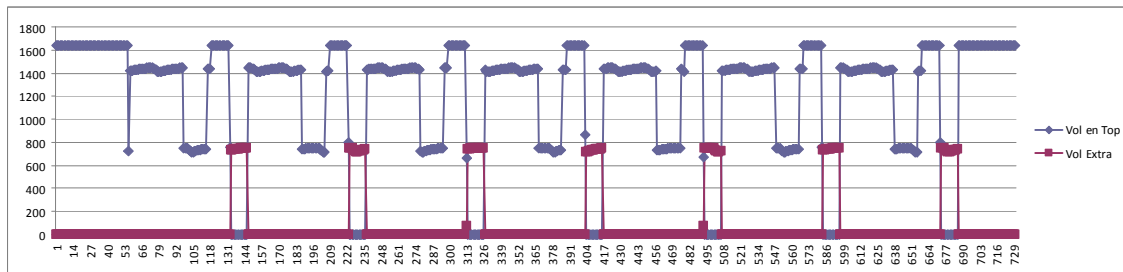


Fig.8 Volumen de Combustible utilizado en el Despacho de G1.

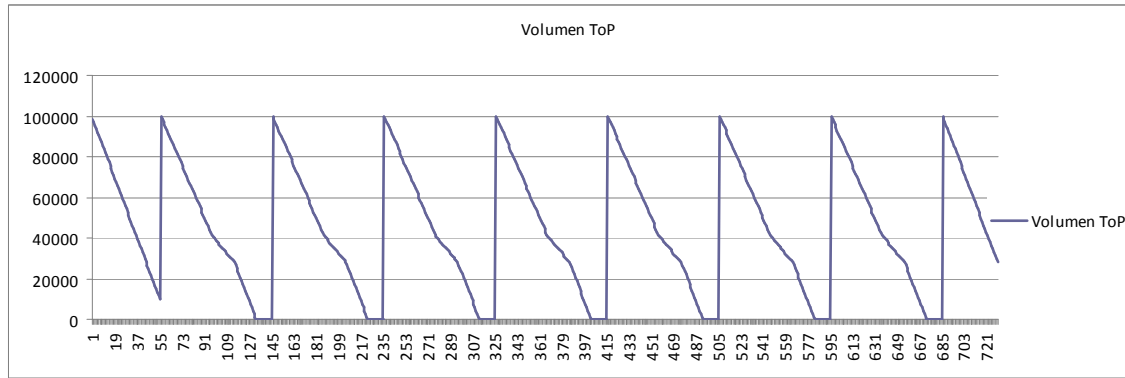


Fig.9 Volumen ToP de Combustible en el tanque.

Como se observa en la figura 7 y 8 cuando el combustible estaba disponible en la primera parte del gráfico despachó G1 al máximo y marginó con G3. Aún así se debió tirar combustible ya que no se pudo utilizar todo (ver figura 9).

Siempre que necesitó utilizar G2 la utilizó al máximo y completó la demanda con G1. Las veces que tuvo que comprar combustible extra ToP marginó con G1 que era la máquina más cara lo cual es correcto.

En la figura 10 se observa la derivada del costo futuro respecto a al volumen ToP como se observó antes el valor es inferior al precio extra ToP.

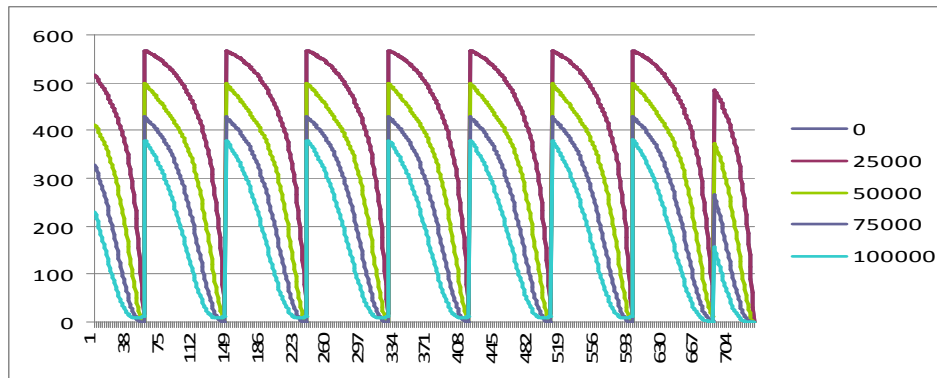


Fig.10 Derivada del Costo Futuro respecto al Volumen ToP

Si bien estas pruebas no son exhaustivas, se entienden satisfactorias para una prueba preliminar del modelo. En trabajos posteriores se debe verificar el correcto funcionamiento en la condición de borde con el ingreso del ToP. En particular cuando se encontró en un paso previo al ingreso del ToP y con disponibilidad de combustible decidió no despachar la máquina a full, despachando G2 en vez de utilizar el combustible disponible que termina desperdiciandose.

		Montevideo	DemandaTOP				G1	G2	G3
		[USD/MWh]	[MW]	Vol. en ToP	Vol. disponible	Vol. sobrante	[MW]	[MW]	[MW]
		cmg_P1	P_P1	m3	m3	m3	G1_P_P1	G2_P_P1	G3_P_P1
55	24/02/2009	93,8	329,6	1639	9856,1	0	207	0	122,6
56	25/02/2009	141,2	330,4	722	100000	9856,1	57,4	113	160
57	26/02/2009	99,7	331,3	1419,8	98580,2	0	171,3	0	160

6 Posibles futuros trabajos.

Si bien se debería seguir trabajando en el análisis de otros tipos de generadores y su implementación, creemos que los trabajos más importantes que se deberían considerar para extender el modelado del TakeOrPay son los siguientes:

- Introducción de *Make Up*. Este esta constituido por el conjunto volúmenes de ToP sobrantes. Estos volúmenes sobrantes son almacenados en un tanque virtual y pueden ser consumidos en periodos posteriores. El MUP tiene un periodo de “maduración” es decir que luego de un cierto periodo T_{mup} (generalmente múltiplo de T_{top}) el volumen se pierde.
- Con el objetivo de definir contratos ToP óptimos seria importante considerar los parámetros T_{top} , V_{top} y P_{top} como variables de control y poder optimizar en ellas.
- Se podrían implementar otras modalidades de ToP, como por ejemplo asumir que el combustible V_{top} no esta disponible al inicio del período, sino que hay que almacenarlo en tanques físicos existiendo costos adicionales asociados al llenado de ese tanque (por ejemplo costos de logística) introduciendo así variables de control asociadas a la decisión de llenado de tanque.
- Modelado de las maquinas térmicas de forma tal que puedan ser multicomcombustibles