



UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA  
URUGUAY



---

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
INSTITUTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA  
DEPARTAMENTO DE POTENCIA

# *Simulación del Sistema de Energía Eléctrica con Reserva rotante*

MONOGRAFÍA PRESENTADA A LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA  
UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA POR:

Facundo Artagaveytia y Michael Varela.

EN CUMPLIMIENTO PARCIAL DE LOS REQUERIMIENTOS PARA APROVACIÓN  
DEL CURSO DE POSTGRADO DE

“Simulación de Sistemas de Energía Eléctrica”

A CARGO DEL DOCENTE RESPONSABLE

Msc. Ing. Ruben Chaer

Montevideo

lunes, 13 de julio de 2015

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. Ni la Facultad de Ingeniería, ni el Instituto de Ingeniería Eléctrica, ni el o los docentes, ni los estudiantes asumen ningún tipo de responsabilidad sobre las consecuencias directas o indirectas que asociadas al uso del material del curso y/o a los datos, hipótesis y conclusiones del presente trabajo.

## Contenido

Resumen.....	2
1 Introducción .....	2
1.1 Objetivo .....	2
2 Hipótesis de trabajo .....	2
3 Metodología .....	3
3.1 Propuesta .....	3
3.1.1 Restricciones .....	3
3.1.2 Variables.....	4
3.2 Orden de despacho de reserva .....	4
3.3 Actores Influenciados.....	4
3.3.1 Nodo.....	4
3.3.2 Demanda .....	4
3.3.3 Central Térmica .....	4
3.4 Desarrollo .....	5
3.4.1 Globs.....	5
3.4.2 Nodo.....	5
3.4.3 Demanda Detallada.....	5
3.4.4 Generador Térmico Básico .....	5
4 Resultados .....	6
4.1 Casos de Prueba .....	6
5 Trabajos a futuro .....	10
5.1 Parque Eólico con reserva .....	10
5.2 Despacho de reserva forzada por usuario .....	10
5.3 Estimación de los valores de factor de Reserva .....	11
5.4 Tomar multiplicadores de LaGrange del nodo de Reserva .....	11
5.5 Agregar máquinas de falla de reserva.....	11
6 Conclusiones.....	12

## Resumen

En este informe realizado por 2 estudiantes de grado en el marco del curso de postgrado SimSEE, se detalla, cómo exitosamente fue agregado al programa, la nueva posibilidad de considerar la necesidad de mantener reserva rotante para hacer frente a variaciones en el SIN.

Además, se plantean algunos trabajos a futuro que se podrían agregar al presente proyecto.

## 1 Introducción

El planteo de este proyecto surge de la necesidad de contemplar las variaciones mencionadas en la demanda y generación de energía eléctrica. Tan es así que se han tomado decisiones relativas a la reserva en el sistema eléctrico uruguayo, sin poder contar con una herramienta que optimice dicho problema y proporcione el mejor escenario posible. Por decisiones relativas a la reserva nos referimos a modificaciones en el despacho de potencia ante la necesidad de contar con una reserva rotante lista para ser despachada en caso de ser requerida.

### 1.1 Objetivo

El objetivo es crear un conjunto de actores que puedan conformar una sala, no solamente intercambiando potencias a un costo óptimo, sino que también contemplando la necesidad de satisfacer las posibles variaciones imprevistas del sistema. Dichas posibles variaciones deben ser previstas mediante la creación de lo que llamaremos **Reserva Rotante**. En pocas palabras, la Reserva Rotante es potencia lista para ser despachada (pero que no es despachada).

En este proyecto, se trabajará contemplando las posibles variaciones imprevistas que pueda sufrir la demanda.

Para lograr el objetivo propuesto, se trabajará sobre el código fuente del programa SimSEE modificando los puntos necesarios para adherir la funcionalidad mencionada al programa.

## 2 Hipótesis de trabajo

Dada una sala con una demanda de potencia, la cual requiera a su vez reserva, será necesario en algún momento encender la siguiente máquina más costosa para satisfacer el despacho de reserva, cuando no hubiera sido necesario solamente considerando la potencia activa demandada.

### 3 Metodología

El programa SimSEE utiliza el método de optimización simplex para resolver el problema del despacho de potencia. Se trabajará sobre las restricciones y variables de dicho método para agregar la funcionalidad pretendida.

#### 3.1 Propuesta

Para lograr el objetivo se modificarán los actores para que puedan cargar en el simplex el siguiente problema:

Poste	Restricción	P.T1_1	P.T1_2	R.T1_1	R.T1_2	P.Falla_1	P.Falla_2	T.I.	
1	Np1	1				1		-D	=
2	Np2		1				1	-D	=
1	Nr1			1				-fR.D	=
2	Nr2				1			-fR.D	=
1	PnGen1	-1		-1				Pn	>
2	PnGen2		-1		-1			Pn	>
1	Encendido	100		-1					>
2	Encendido		100		-1				>
	costo	-Cv.DurPos	-Cv.DurPos	0	0	cFalla	cFalla		

Tabla 3.1 - Tabla de simplex de Ejemplo con Reserva

Además se debe agregar la restricción de caja:

$$R.T1 < fR.Pn \quad (1)$$

##### 3.1.1 Restricciones

**Np** es la restricción ya existente de un nodo de potencia donde la sumatoria de las potencias que son inyectadas y absorbidas del nodo es igual a cero.

**Nr** es la nueva restricción de "Nodo de reserva", dicha restricción es agregada al nodo de potencia, es decir, no se crea un nuevo nodo que intercambie reserva con los actores, sino que se le agrega al nodo de potencia la funcionalidad de manejar también reserva donde la sumatoria de las reservas inyectadas y absorbidas del nodo debe ser cero. A este nodo aportan reserva en una primera etapa las "máquinas térmicas simples" y consume reserva la "demanda". La demanda tiene un requerimiento de reserva que se considera como un factor del total de la demanda del paso y lo ingresamos como -fR.D, donde fR es el factor de reserva ingresado en el editor. Por otro lado la o las maquinas térmicas despachan en el orden más económico o deseado (ver punto 3.2) la reserva que demanda el sistema, en forma análoga a su despacho de potencia activa.

**PnGen** es la restricción asociada a la *potencia nominal* del generador, el cual no puede entregar más potencia que su valor nominal, por lo que la suma de la potencia y la reserva (que eventualmente tendría que ser despachada como potencia activa) no puede sobrepasar la *potencia nominal* del generador.

**Encendido** es una restricción que obliga a que la máquina este rotando (entregando potencia activa) para poder entregar reserva. Esto de forma provisoria y poco gentil pero no menos eficaz, lo realizamos solicitando que la reserva sea menor a 100 veces la potencia entregada, un número aleatoriamente “grande”, cuyo único fin es el de impedir que la reserva sea mayor a cero si la potencia es nula.

Finalmente se impone la **restricción de caja**  $R.T1 < fR.Pn$

(1), que impone que la reserva entregada por la máquina sea como máximo un porcentaje de su valor nominal, el cual será especificado por el factor de reserva de la máquina ingresado en el editor.

### 3.1.2 Variables

**RT** es la variable de optimización agregada para modelar la reserva. Dicha variable será optimizada considerando las restricciones agregadas y según se describe en el punto 3.

## 3.2 Orden de despacho de reserva

Es económicamente preferible a priori, despachar potencia primero con las máquinas con menor costo variable, dejando en las más caras, la capacidad de reserva ya que la reserva no es “realmente” despachada y no hay un aumento real de costos, pero sí disminuye el límite de potencia activa máxima capaz de entregar por la máquina<sup>1</sup>.

Para esto se le asigna a la reserva un costo variable igual a 0, por lo tanto el simulador siempre va a preferir despachar potencia con la máquina más barata y proporcionar la reserva con la máquina más cara.

## 3.3 Actores Influenciados

Todos los actores tienen que ser capaces de leer y escribir sobre archivos de texto (salas de juego = archivos de extensión .ese) como lo hacían antes y además hacerlo con las variables nuevas.

### 3.3.1 Nodo

El nodo, incluyendo ahora la reserva, no agrega nuevas variables al Simplex, pero sí agrega una restricción más, la restricción **Nr** descrita en 2.1.

### 3.3.2 Demanda

La demanda como Término Independiente, no solamente estará presente ahora en la restricción de nodo de potencia **Np**, sino también en la restricción de nodo de reserva **Nr** multiplicada por su factor de reserva.

### 3.3.3 Central Térmica

Las centrales térmicas, incluyendo ahora la capacidad de generar reserva, agregan al Simplex la variable **RT**, que tomará el valor necesario para satisfacer los requerimientos de Reserva.

Además agregan al Simplex las restricciones **PnGen** y **Encendido** descritas en 2.1.

También agrega la restricción de caja  $R.T1 < fR.Pn$

(1) descrita en 2.1.

---

<sup>1</sup> Si por ej. a una máquina de 100MW nominales le imponemos guarde 10MW para reserva, solo va a poder entregar 90MW, debiéndose producir 10MW de potencia real en la máquina más cara en funcionamiento.

### 3.4 Desarrollo

#### 3.4.1 Globs

1. Se crea la variable global booleana *flg\_ReservaRotante* en *uglobs.pas* cuyo valor será "True" si se activa la consideración de Reserva Rotante en el simulador.

#### 3.4.2 Nodo

1. Si la bandera *flg\_ReservaRotante* está activa (True), en el nodo:
  - 1.1. Se crean 2 filas para restricciones
  - 1.2. Se marcan como de igualdad

#### 3.4.3 Demanda Detallada

1. Se modifica el constructor agregándole un parámetro más: "*fReserva*"
2. Si la bandera *flg\_ReservaRotante* está activa, se carga el término independiente en la restricción **Nr** de forma que se demande en dicha restricción una reserva de *fR* veces el valor de la demanda del paso.
3. No se modifican los procedimientos *opt\_nvers* ni *opt\_fijarRestriccionesDeCaja*, porque no se agregan variables nuevas ni tampoco se agregan restricciones y no se va a agregar en esta etapa, máquinas de falla de reserva para obligar a cumplir la ecuación de igualdad de reserva.
4. En la clase padre "*TDemanda*" se modifican los métodos *read* y *write* para poder trabajar con la variable *fReserva*.

#### 3.4.4 Generador Térmico Básico

1. Se agregó la variable pública *fReserva* a la clase *TFichaGTer\_Basico*
2. Se modificó el constructor *Create* agregando el argumento *fReserva* seteada en 0 de momento, tanto en la declaración como en la implementación
3. Se agregó a la implementación del constructor una línea que copie en la variable de clase *fReserva*, el valor *fReserva* pasado como argumento
4. Se modificaron los procedimientos *opt\_nvers*, *opt\_cargue* y *opt\_fijarRestriccionesDeCaja* para agregar la funcionalidad del modo reserva.
5. En *opt\_nvers* se agregó 1 variable más por poste (reserva, ver 2.2) y dos restricciones más por poste debidas a la reserva (potencia nominal y encendido, ver 2.1)
6. En *opt\_cargue* se agregó la funcionalidad de cargar los valores relacionados a la variable *Reserva* y a sus restricciones
7. En *opt\_fijarRestriccionesDeCaja* se agregó la restricción de caja adicional debido a la reserva (ver 2.1)

## 4 Resultados

### 4.1 Casos de Prueba

A continuación se detallan las diferentes salas que se prepararon para testear la funcionalidad del modo reserva.

1) Sala1.ese – Sala con:

- a) 1 poste
- b) 1 demanda detallada que aumenta de 0 a 100 en una semana, con una demanda de reserva del 10% de su valor (factor de reserva  $fR = 0,1$ ).
- c) 2 generadores térmicos de 75 MW de  $P_n$ , 10% de factor de reserva; con factor de disponibilidad unitario (no se rompen); y costos variables 100 y 150

Se testean las funciones básicas de los actores modificados y se comparan y analizan los resultados obtenidos.

#### Sin considerar reserva

Se puede ver en la Figura 4.1 como la potencia despachada copia correctamente la demanda.

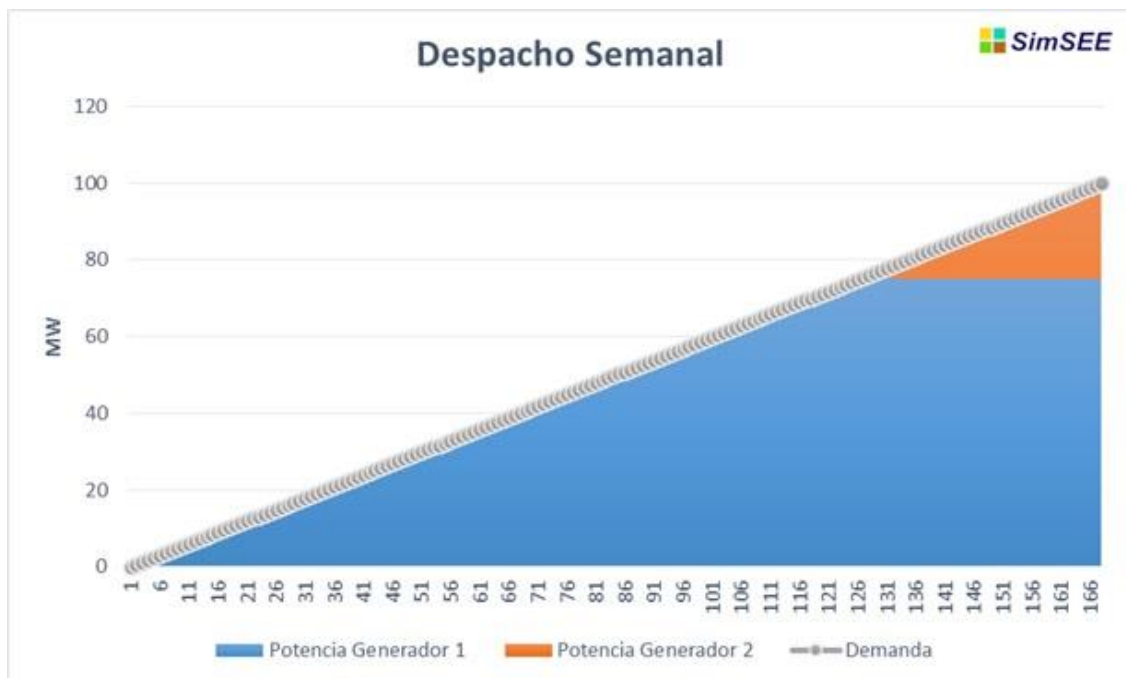


Figura 4.1 Despacho Semanal Caso 1 sin considerar reserva

Considerando reserva

En este cálculo se considera la reserva. En la Figura 4.2 no se grafica la demanda que es idéntica al caso anterior, para que sea posible observar la pequeña potencia despachada por el generador 2 cuando la demanda supera los 69 MW<sup>2</sup>.

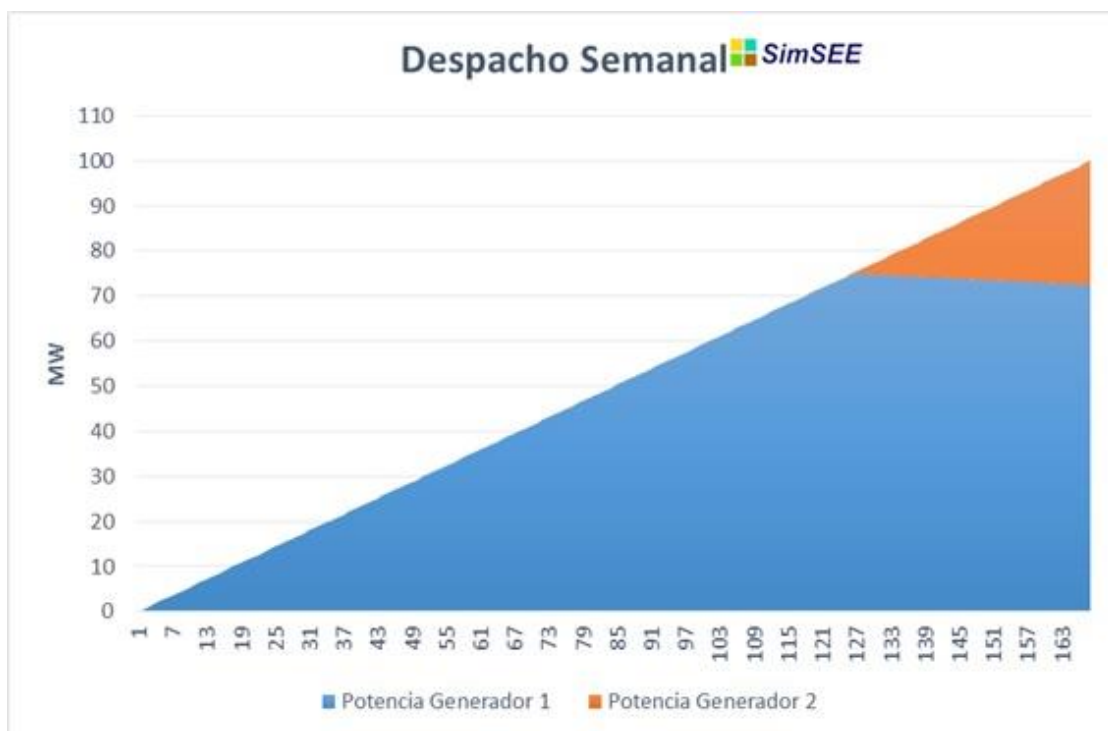


Figura 4.2 Despacho Semanal Caso 1 considerando reserva

Para poder observar mejor el encendido del generador 2, se puede ver la Tabla 4.1, donde se puede apreciar que cuando la demanda sobrepasa los 68,2 MW, la suma de la potencia entregada y la reserva que debe mantener el generador 1 supera su valor de potencia nominal<sup>3</sup>, por lo cual se debe encender el generador 2.

Gen1(MW)	65,27	65,87	66,47	67,07	67,66	68,26	68,85	69,45	70,04	70,63	71,22	71,82
Gen2(MW)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02	0,03	0,03	0,04
Dem(MW)	65,27	65,87	66,47	67,07	67,66	68,26	68,86	69,46	70,06	70,66	71,26	71,86

Tabla 4.1 Entrada del Generador 2 al sistema

Gen1(MW)	71,82	72,41	73,00	73,59	74,19	74,78	74,96	74,90	74,84	74,78	74,72	74,66
Gen2(MW)	0,04	0,05	0,05	0,06	0,07	0,07	0,49	1,15	1,81	2,47	3,13	3,79
Dem(MW)	71,86	72,46	73,05	73,65	74,25	74,85	75,45	76,05	76,65	77,25	77,84	78,44

Tabla 4.2 Aumento de la reserva entregada por el Generador 1

Luego en la Tabla 4.2 se puede observar que cuando la demanda supera los 75 MW, y por lo tanto, la reserva demandada es superior a 7,5 MW (10% de la potencia demandada), el generador 2 no es capaz de entregar dicha reserva, dado que su factor de reserva de 0,1 no se

<sup>2</sup> Es muy difícil de ver en la gráfica, ya que la condición de encendido fuerza a que la potencia despachada sea 100 veces menor que la reserva, por lo cual para aportar 7 MW de reserva, necesita despachar solo 0,07 MW de potencia activa al sistema.

<sup>3</sup> 68,2 MW \* 1,1 = 75,02 MW



lo permite (puede entregar como máximo 7,5 MW). Es por esto que el generador 1 debe reducir la potencia activa que entrega para poder entregar la reserva necesaria.

2) Sala2.ese – Sala con:

- a) 3 postes (4; 10; 10)
- b) 1 demanda detallada que aumenta de 0 a 100 en una semana
- c) 2 generadores térmicos de 75 MW de P<sub>n</sub>; factor de disponibilidad unitario; y costos 100 y 150

Se testea el uso de varios postes, se verifica se cargue bien el simplex.

Sin considerar reserva

Los puntos de la demanda representan el promedio de la potencia despachada en las 24hs, este promedio hace más visible el encendido del segundo generador.

Análogamente a la Figura 4.1, en la Figura 4.3, vemos como en el último día la máquina más barata despacha a pleno su potencia, sin guardar capacidad para reserva.

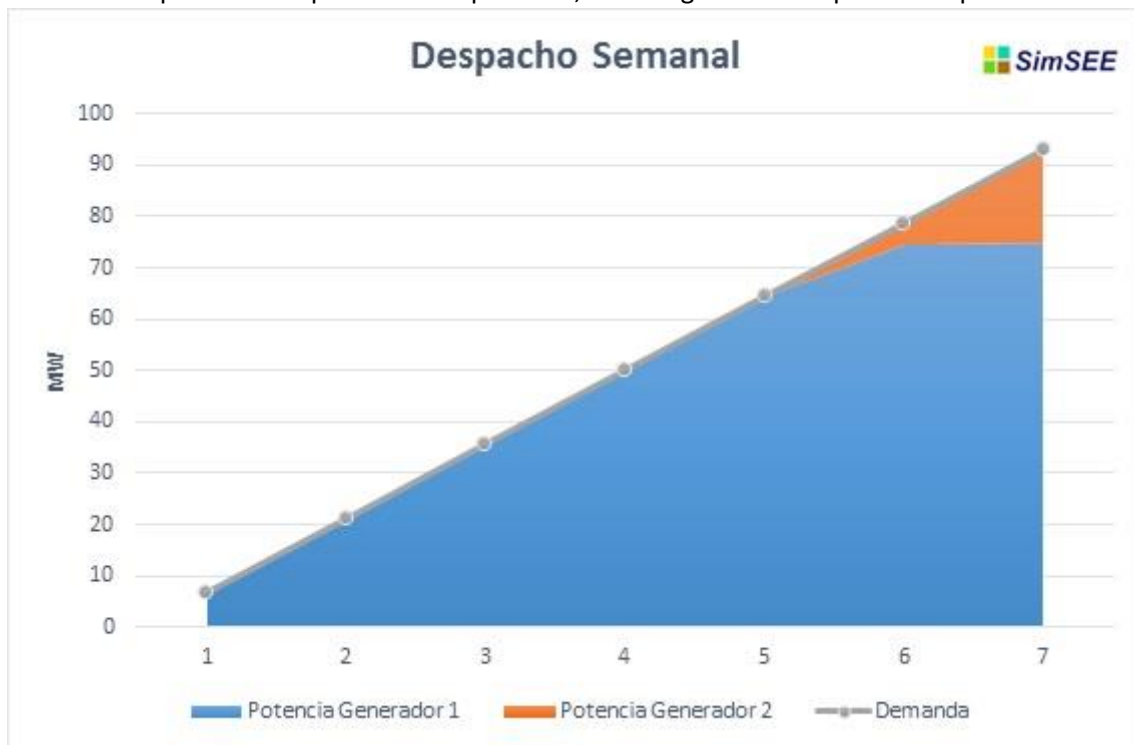


Figura 4.3 Despacho Semanal Caso 2 sin considerar reserva

### Considerando reserva

Análogamente a la Figura 4.2 , en la Figura 4.4 vemos como en el último día la máquina más barata va reduciendo su potencia despachada a medida que aumenta la demanda y junto a ella su requerimiento de reserva, para así poder guardar capacidad de reserva.

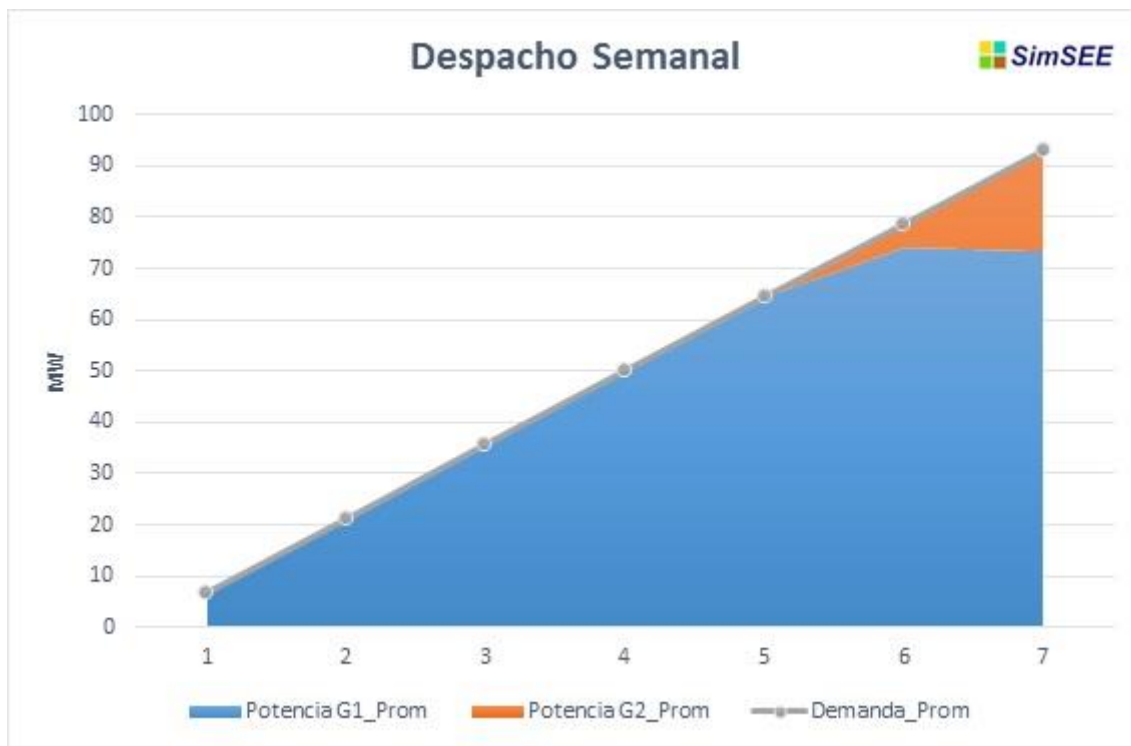


Figura 4.4 Despacho Semanal Caso 2 considerando reserva

### 3) Sim 15-08-01.es

Se corre la sala semanal de la semana 8 con la versión "v105c\_Tranquera"<sup>4</sup> y con los cambios introducidos. Se verifica no se haya influido en el despacho normal de potencia.

En esta sala semanal, no se pueden observar en el gráfico cambios en el despacho de potencias, pero si podemos apreciar en la hoja de cálculo, el hecho de que en el caso con reserva, se encendieron los generadores:<sup>5</sup>

- CB Motores
- PTI
- APR 1

Para poder cumplir con el requerimiento de reserva por parte de la demanda.

<sup>4</sup> Propuesta como oficial por ADME a la fecha

<sup>5</sup> Se los obligo a despachar decenas de kW para poder despachar reserva, estas decenas de kW es lo que vemos como condición de encendido.

## 5 Trabajos a futuro

### 5.1 Parque Eólico con reserva

La idea es modelar que los parques eólicos demanden reserva, al igual que la demanda, para prevenir posibles cambios en el viento. Como vemos en la Tabla 2, cada parque eólico tendría asignado un factor de reserva (al igual que la demanda), el cual deberá ser contemplado por el sistema, es decir, debe haber otra máquina en funcionamiento lista para contrarrestar esta posible reducción en la potencia.

El parque eólico con reserva si bien no agrega variables al simplex debe agregar al nodo de reserva en su campo de potencia entregada, el consumo de reserva de valor  $fR$  veces su potencia despachada como se puede ver en la Tabla 2.

Poste	Restricción	P.Pe	P.T1_1	P.T1_2	R.T1_1	R.T1_2	P.Falla_1	P.Falla_2	T.I.	
1	Np1	1	1				1		-D	=
2	Np2	1		1				1	-D	=
1	Nr1	-fR			1				-fR. D	=
2	Nr2	-fR				1			-fR. D	=
1	PnGen1		-1		-1				Pn	>
2	PnGen2			-1		-1			Pn	>
1	Encendido		100		-1					>
2	Encendido		-	100		-1				>
	costo	-Cv* DurPos	-Cv* DurPos	-Cv* DurPos	-(Cv - CvRes) * DurPos	-(Cv - CvRes) * DurPos	cFalla	cFalla		

Tabla 2 - Tabla de simplex de Ejemplo con Reserva

### 5.2 Despacho de reserva forzada por usuario

Se plantea como trabajo a futuro, darle al usuario la capacidad de decidir<sup>6</sup> que máquinas deben tener prioridad para despachar reserva, aun cuando este orden no sea el óptimo económico. Esto puede deberse por ejemplo a decisiones técnicas, de qué máquina es mejor para acumular reserva u otros motivos por fuera de lo económico que el usuario considere de interés.

Para esto se modifica la ecuación económica a minimizar, haciendo que el costo variable que se ahorra por no despachar por ej. 1MW de potencia, se pague por entregar esa reserva, por lo cual le costaría lo mismo despachar reserva que potencia. Además, al costo se le sustrae un "CvRes" costo variable de reserva asignado por el usuario, haciendo más económico, en la medida que se desee, guardar reserva que despachar potencia.

<sup>6</sup> Cuánto dinero está dispuesto a pagar por hacer que una máquina de menor costo variable produzca menos potencia y guarde capacidad de reserva

### 5.3 Estimación de los valores de factor de Reserva

Realizar un estudio estadístico para estimar el factor de reserva necesario a tener en cuenta para la demanda. Se cuenta como herramienta, con los valores históricos de demanda.

### 5.4 Tomar multiplicadores de LaGrange del nodo de Reserva

Crear el array cReserva de largo igual a la cantidad de postes para guardar los multiplicadores de Lagrange del nodo de reserva. Publicar los valores de los coeficientes de lagrange de la reserva (ver luego si este es el costo) y leer estos valores llamados cReserva: TDAarray.

### 5.5 Agregar máquinas de falla de reserva

De alguna forma lograr que cuando el sistema no puede entregar toda la reserva demandada exista alguna forma de representar esta falla, y de asignarle un costo, para evaluar al igual que con la potencia, cuanto se está dispuesto a pagar para despachar la reserva y no fallar.

## 6 Conclusiones

A modo de conclusión podemos afirmar que la consideración de la reserva rotante aporta al programa SimSEE, sin afectar sus funcionalidades previas a la inserción de esta nueva posibilidad. Basta con desactivar el checkbox de reserva rotante que se encuentra en el simulador para que el programa sea el mismo que antes del presente agregado.

Consideramos que el proyecto agrega eficazmente dicha funcionalidad y que será de utilidad para solucionar los problemas planteados. Además se pudo verificar la hipótesis de trabajo planteada.

Además se plantean algunos agregados a realizar sobre el presente proyecto, entre ellos el referido a la reserva demandada por los generadores eólicos, el cual será cada vez más necesario, a medida que la generación eólica siga ganando terreno en la potencia instalada del sistema eléctrico nacional.

Como era de suponer, agregar esta nueva funcionalidad, hace que los tiempos de procesamiento aumenten, ya que se están agregando al sistema por cada generador térmico 1 variable, 2 restricciones y una restricción de caja. De todas formas, el cálculo no deja de ser factible a pesar del aumento de tiempo requerido.