

# **Implementación y evaluación en SimSEE de control de cota por curva de remanso para centrales hidroeléctricas con embalse**

*Hermida, Gonzalo*

*Palacio, Juan Felipe*

*Instituto de Ingeniería Eléctrica – FING.*

*Junio 2015*

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. 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.

## **1 Objetivo**

El objetivo del presente trabajo es la implementación y evaluación del control de cota por curva de remanso para centrales hidroeléctricas con embalse en SimSEE.

Una vez implementado el control se verifica el correcto funcionamiento del mismo mediante pruebas sencillas.

Luego, se estudia un caso de prueba que corresponde a una sala de corto plazo utilizada para la programación semanal, y se evalúan resultados con la aplicación del control implementado.

A su vez, se documenta la implementación del control y los resultados.

## **2 Implementación**

### *2.1 Marco Teórico*

La implementación se justifica considerando el caso de la central hidroeléctrica Salto Grande que establece una cota máxima admisible en función del aporte total a la represa:

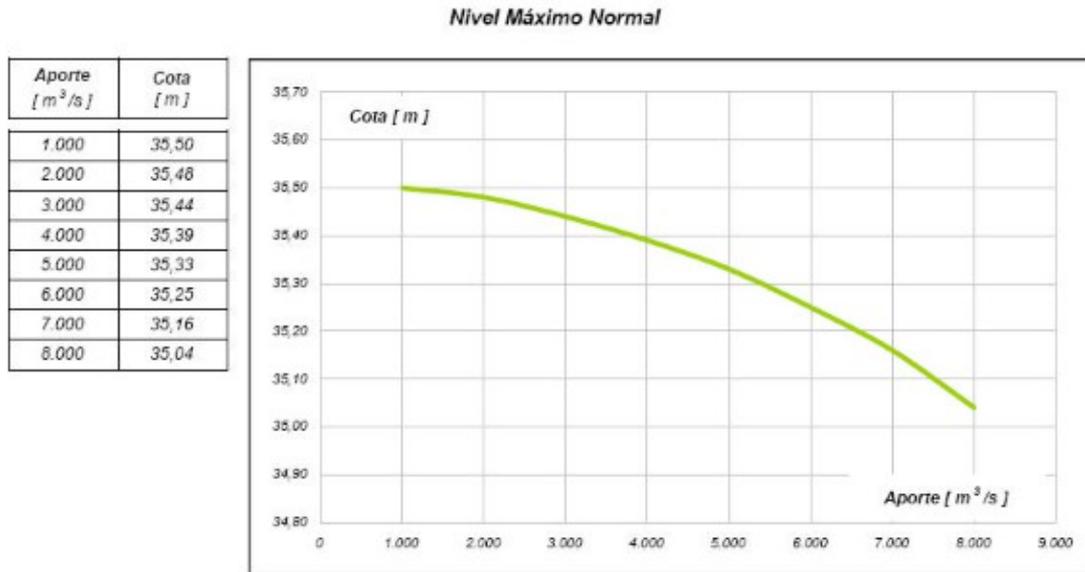


Figura 1 - Gráfica de nivel máximo en operación normal (Curva de Remanso).

El control es válido en operación normal de la central, no aplica por ejemplo en el caso de crecidas extraordinarias.

Para este trabajo se consideró que la cota máxima admisible por encima de 8000 m<sup>3</sup>/s y por debajo de 1000 m<sup>3</sup>/s se mantiene en 35.04 m y 35.5 m respectivamente.

Como Salto Grande es una represa compartida entre Argentina y Uruguay, se debe modificar la curva considerando que los aportes a la central se dividen entre dos. En la siguiente figura se puede observar lo antedicho.

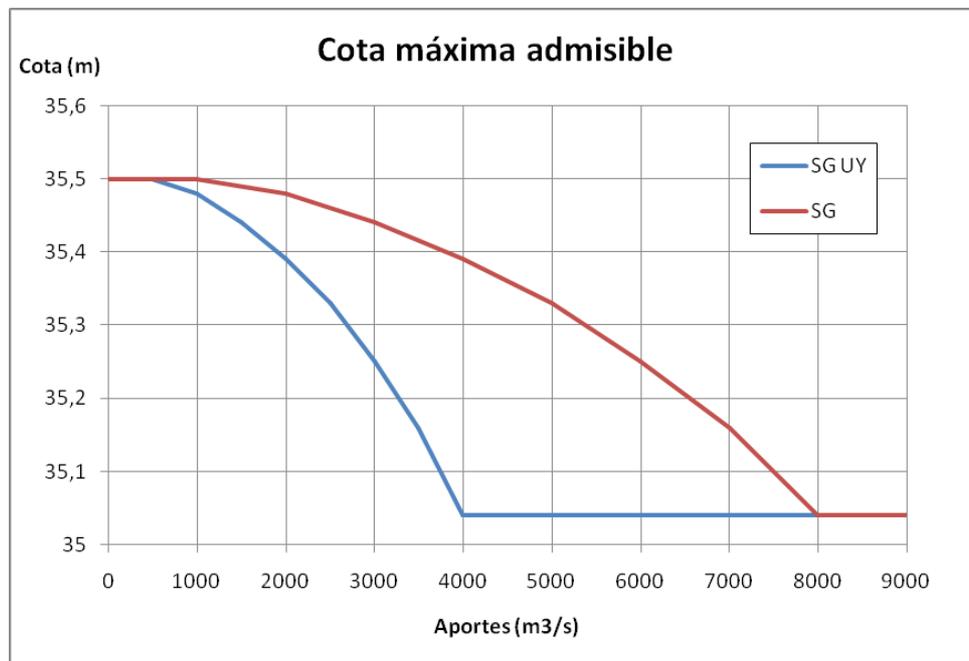


Figura 2 - Gráfica de nivel máximo en operación normal (Curva de Remanso para SG y SG UY).

En la implementación actual en SimSEE del actor hidráulico con embalse, se establece un erogado mínimo como máximo entre:

- *Erogado mínimo (ingresado por el usuario en cada ficha)*
- *Control de crecida según cota por ISME (control de crecidas decamilenarias)*

Lo anterior sin sobrepasar:

- *Volumen erogable máximo según cota*
- *Caudal máximo erogable*

Por lo tanto, para incluir el control de cota por curva de remanso se calcula el volumen mínimo a erogar en cada paso de tiempo para estar por debajo de la curva, y se lo agregará a la lista de restricciones.

Dicho volumen mínimo a erogar se calcula como:

En cada paso de tiempo, conocido el caudal de aporte  $Q_A$ , el volumen inicial  $V_i$  y las pérdidas por filtración y evaporación  $Q_P$  se calcula el volumen proyectado  $X_S$  como al que se llegaría si la central no erogara agua:

$$X_S = V_i + \frac{(Q_A - Q_P) * \text{segundosDelPaso}}{1e6} [hm^3]$$

Luego, mediante una función que devuelva la cota del embalse según el volumen, se obtiene la cota proyectada al final del paso:

$$h_S = \text{VolumenToCota}(X_S)$$

Por otro lado, se calcula la cota máxima admisible  $h_C$  según la curva de remanso para el caudal de aporte  $Q_A$ :

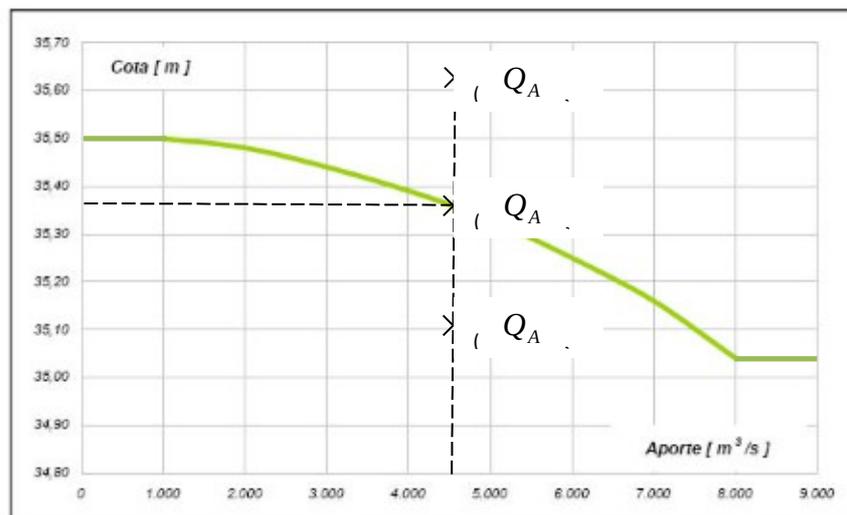


Figura 3 - Comparación de cotas proyectadas con cota máxima admisible según curva de remanso.

Si  $h_s > h_c$  (por encima de la curva,  $h_{s1}$  en la figura):

Utilizando una función que devuelva el volumen para cada cota del embalse, se calcula el volumen a erogar por control por curva de remanso  $V_{CCR}$  :

$$V_{CCR} = [CotaToVolumen(h_s) - CotaToVolumen(h_c)] [hm^3]$$

Una vez obtenido  $V_{CCR}$  , se calcula el caudal correspondiente a erogar dicho volumen en un paso de tiempo,  $Q_{CCR}$  :

$$Q_{CCR} = \frac{V_{CCR} * 1e6}{segundosDelPaso} [m^3/s]$$

Dicho erogado asegura que al inicio del siguiente paso de tiempo la cota no se encuentre por encima de la cota máxima admisible por la curva de remanso.

Si  $h_s \leq h_c$  (por debajo de la curva,  $h_{s2}$  en la figura):

En este caso se cumple que la cota proyectada sin erogado es menor a la cota impuesta por la curva de remanso, por lo que no se aplica el control:

$$V_{CCR} = 0 hm^3$$

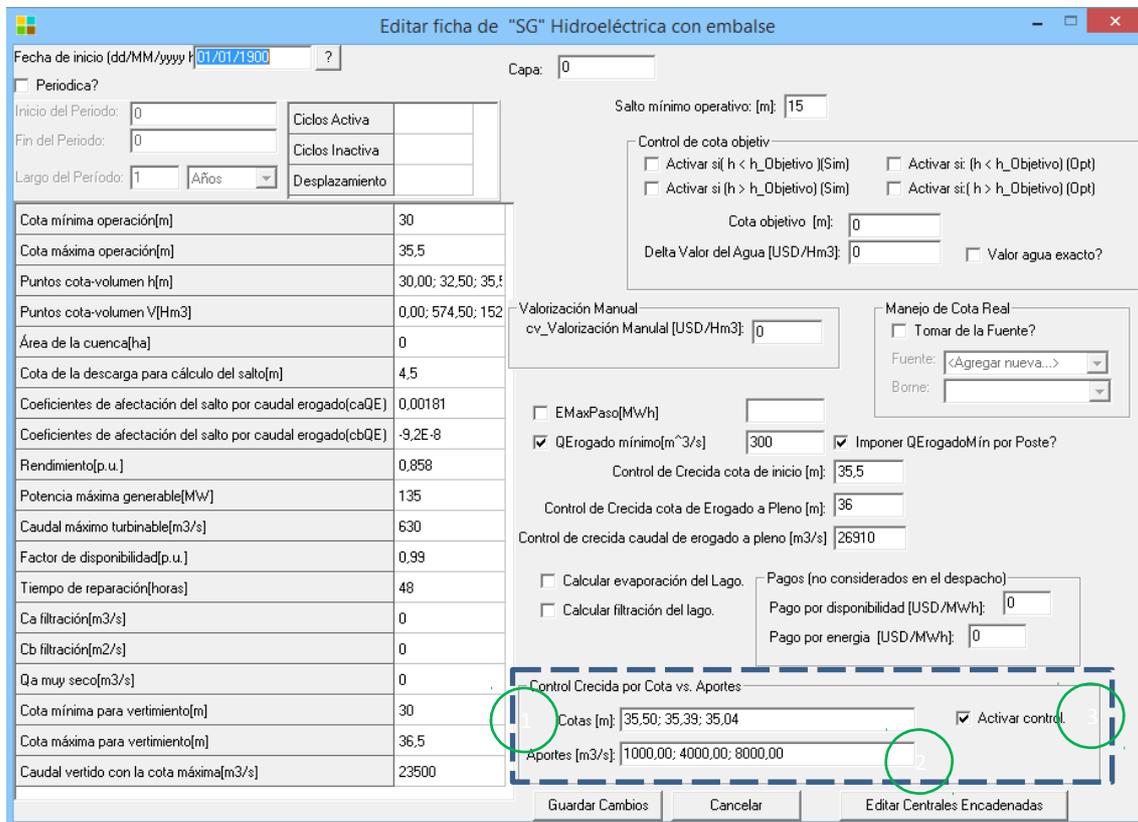
$$Q_{CCR} = 0 m^3/s$$

## 2.2 Implementación en SimSEE

Para la implementación en SimSEE del control de crecida por cota y aportes se debió modificar el actor ThidroConEmbalse agregándole el control por curva de remanso mencionado anteriormente. Este nuevo control aplica también a ThidroConBombeo por heredar deThidroConEmbalse.

Se agregaron a la ficha del actor los siguientes atributos:

- *PuntosControlCrecidaPorCotaYAportes\_h*: TDAOfnReal // Arreglo con ordenadas de los 3 puntos que definen la curva. (Ver 1 en figura)
- *PuntosControlCrecidaPorCotaYAportes\_QA*: TDAOfnReal // Arreglo con abscisas de los 3 puntos que definen la curva. (Ver 2 en figura)
- *flg\_ControlCrecidaPOrCotaYAportes*: boolean // Bandera para indicar si el control está activo. (Ver 3 en figura)



Cota mínima operación[m]	30
Cota máxima operación[m]	35,5
Puntos cota-volumen h[m]	30,00; 32,50; 35,50
Puntos cota-volumen V[Hm3]	0,00; 574,50; 1520,00
Área de la cuenca[ha]	0
Cota de la descarga para cálculo del salto[m]	4,5
Coefficientes de afectación del salto por caudal erogado(caQE)	0,00181
Coefficientes de afectación del salto por caudal erogado(cbQE)	-9,2E-8
Rendimiento[p.u.]	0,858
Potencia máxima generable[MW]	135
Caudal máximo turbinable[m3/s]	630
Factor de disponibilidad[p.u.]	0,99
Tiempo de reparación[horas]	48
Ca filtración[m3/s]	0
Cb filtración[m2/s]	0
Qa muy seco[m3/s]	0
Cota mínima para vertimiento[m]	30
Cota máxima para vertimiento[m]	36,5
Caudal vertido con la cota máxima[m3/s]	23500

Figura 4 - Ficha del actor hidroeléctrica con embalse

Luego, en el actor se agregan los siguientes atributos o variables auxiliares:

- *polinomioCotaMaxAporte*: TpoliR // Polinomio de 2do grado definido a partir de los 3 puntos de la ficha.
- *h\_max\_segun\_Aportes*: Nreal // Cota (m) de toma máxima según aportes del paso ( $h_C$ )
- *VTmin\_segun\_Aportes*: Nreal // Volumen (hm3) erogado mínimo en el paso para cumplir  $h_{actual} \leq h_{max\_segun\_Aportes}$  ( $V_{CCR}$ )

- $QT_{min\_segun\_Aportes}$ :  $NReal$  // Erogado (m<sup>3</sup>/s) mínimo en el paso para cumplir  $h_{actual} < h_{max\_segun\_Aportes}$  (  $Q_{CCR}$  )

Por último se agrega la siguiente función:

- $VT_{minPorCurvaAportes}(Aportes, cota\_actual: NReal): NReal$  // Volumen mínimo a erogar según aportes y cota de toma actual (hm<sup>3</sup>) ( devuelve  $V_{CCR}$  )

La función anterior es llamada en el procedimiento *PrepararPaso\_ps* del actor en el caso que se haya activado el control por cota y aportes ( $flg\_ControlCrecidaPOrCotaYAportes=TRUE$ ). Esta función calcula el valor del volumen mínimo a erogar para cumplir con la curva de remanso. El valor arrojado por la función, es maximizado juntos con las otras restricciones de erogado mínimo para luego ser minimizado con las restricciones de erogado máximo.

## 2.3 Pruebas de la implementación

### 2.3.1 Metodología

Para probar la implementación se realizó una sala muy sencilla que permite observar los cambios y compararlos con los que se obtendrían sin el control.

Se busca que Salto Grande sólo erogue agua por los controles de crecida y no por despacho económico.

Se compara como se comportaría SG si sólo se mantuviera el control por crecida (CC) y si se considerara también el control por curva de remanso (CC+CR) para los siguientes 2 casos:

- 1) Salto Grande inicialmente con cota de 33 m, para observar como evolucionaría el despacho de la central al aproximarse a la curva por debajo de la misma.
- 2) Salto Grande inicialmente con cota de 37 m, para observar como evolucionaría el despacho de la central al aproximarse a la curva por encima de la misma.

Se compara la evolución de los puntos (aporte, cota) y para el caso con curva de remanso la evolución de aportes, erogados y cotas en el tiempo.

### 2.3.2 Hipótesis de trabajo

#### **Características de la sala:**

-Paso de tiempo horario

-Demanda detallada correspondiente a la demanda prevista del SIN desde el 7/2/15 al 14/2/15.

-Costo de falla de 1 escalón de profundidad 100 %, y CV de 50 USD/MWh.

#### **Actor hidráulico con embalse (Salto Grande):**

-Se valoriza manualmente Salto Grande a 10.000.000 USD/hm<sup>3</sup> de forma de asegurar que el orden de mérito para el despacho sea primero la falla y segundo SG que solo se despacha para controlar su cota.

-Potencia Máxima: 7 unidades de 135 MW cada una (aprox. 945 MW disponibles, cuota parte uruguaya)

-Caudal Máximo Erogable @ 30 m: 4410 m<sup>3</sup>/s (solo turbinado, sin posibilidad de verter)

-Caudal Máximo Erogable @ 36.5 m: 4410+23500=27910 m<sup>3</sup>/s (turbinado + vertido máximo)

Control de Crecida (CC):

-Cota de inicio: 35.5 m

-Cota de erogado a pleno: 36 m

-Caudal de erogado a pleno: 26910 m<sup>3</sup>/s

### 2.3.3 Resultados y análisis

#### Caso 1: Cota de inicio por debajo de la curva

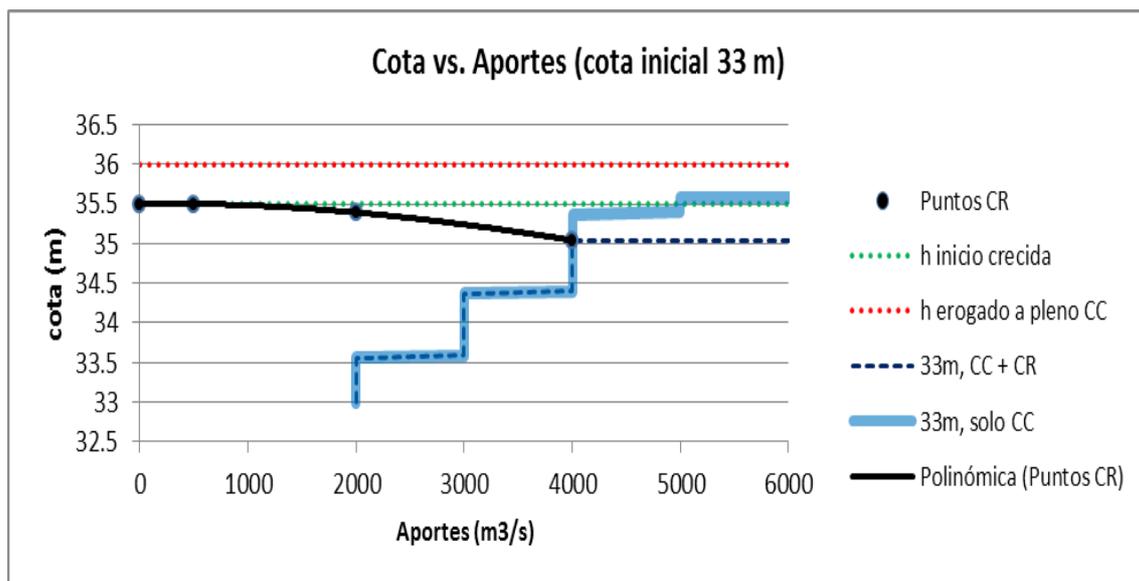


Figura 5: Gráfica Cota vs Aportes para Prueba 1.

Se observa que inicialmente en ambos casos SG sube la cota sin erogar. Sin embargo, a medida que aumentan los aportes, cuando se llega al límite de la curva de remanso, en el caso con sólo CC la cota sigue subiendo mientras que en CC+CR se mantiene en la cota máxima de 35.04 m. En el caso con sólo CC se controla la cota al llegar a la cota de inicio del control de crecida CC de 35.5 m.

En la figura 6 se muestra la cota, aportes y erogado en función del tiempo para el caso CC+CR:

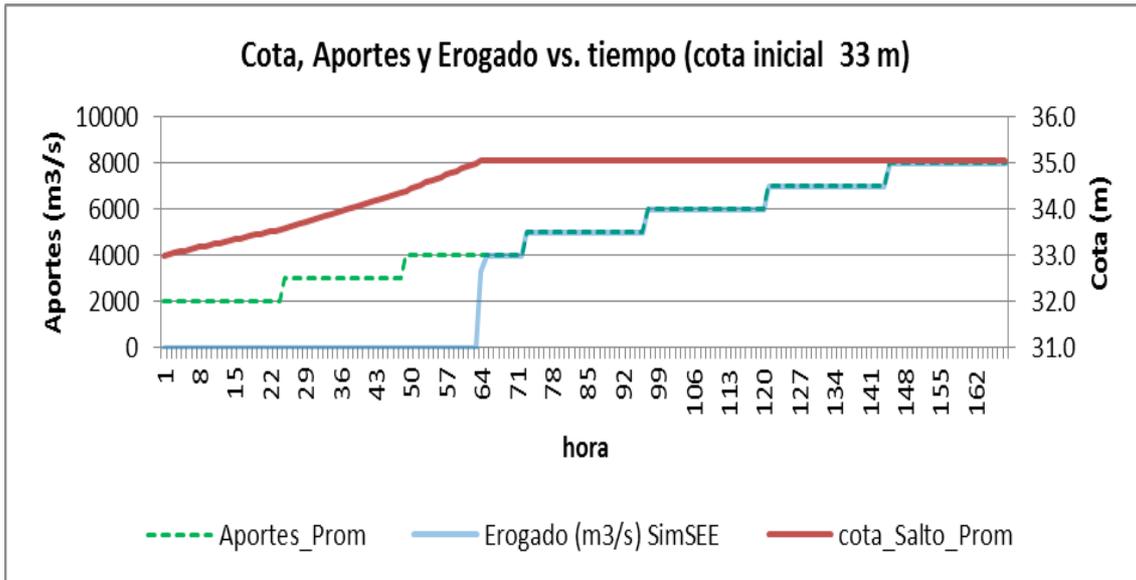


Figura 6 - Evolución de Cota, Aportes y Erogado en el tiempo para Prueba 1

Se observa que la cota sube a medida que suben los aportes, pero la central no eroga hasta llegar al límite de 35.04 m. A partir de ese instante, la cota se mantiene en dicho valor erogando exactamente lo que le llega de aportes.

### Caso 2: Cota de inicio por encima de la curva

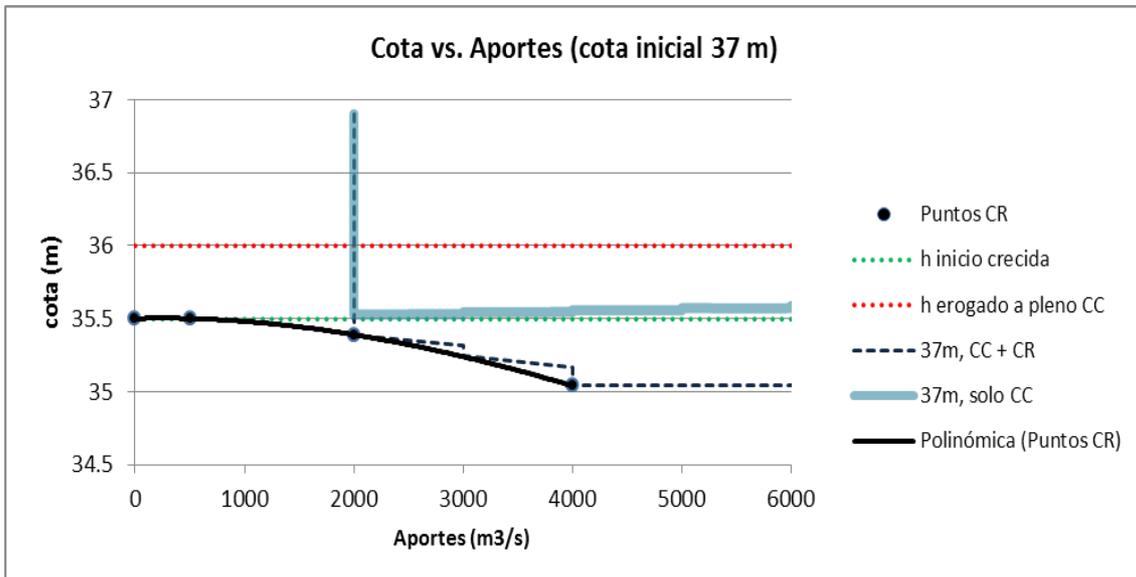


Figura 7: Gráfica Cota vs Aportes para Prueba 2.

Se observa que inicialmente en ambos casos SG baja la cota. En el caso CC, al llegar a la cota de inicio de crecida la cota permanece prácticamente en dicho valor. En el caso CC+CR, la cota sigue bajando sobre la curva de remanso a medida que suben los aportes.

En la siguiente figura se muestra la cota, aportes y erogado en función del tiempo para el caso CC+CR:

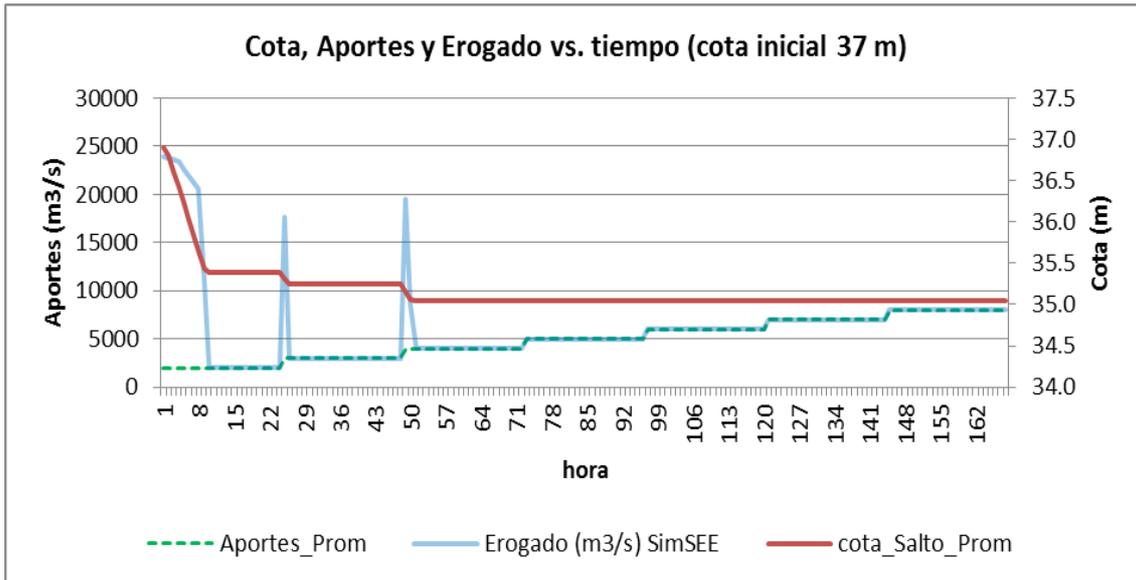


Figura 8 - Evolución de Cota, Aportes y Erogado en el tiempo para Prueba 2.

En la figura 8 se puede observar como SG eroga lo máximo posible para llegar a la cota máxima por CR según los aportes (35.39 m para 2000 m<sup>3</sup>/s). Luego, se mantiene en dicho valor erogando los aportes a la central. Cuando los aportes suben y la cota máxima admisible por CR baja, se observan “picos” de erogado suficientes para llegar a ese nuevo límite, para luego mantenerlo erogando los aportes. Por encima de los 8000 m<sup>3</sup>/s la cota máxima admisible por CR permanece en 35.04 m y por tanto no se producen dichos “picos” de erogado.

### 3 Hipótesis de trabajo

Las hipótesis de trabajo se corresponden con las consideradas para la sala de la programación semanal de la semana 38:

- Paso de tiempo horario
- Aportes, previsiones de generación eólica y roturas de máquinas determinísticos. Solo se considera una aleatoriedad en la demanda de  $\pm 3\%$ .
- Centrales hidroeléctricas con embalse: Salto Grande, Palmar, Bonete.
- Centrales hidroeléctricas de pasada: Baygorria
- Generadores térmicos básicos: APR 1 y 2, CTR, Eólica, GenDis, Motores CB, PTI, UPM.
- Exportación hacia Argentina “Spot de Mercado” con  $P_{\text{máx}} = -2000$  MW y 0.01 USD/MWh.
- Importación de Brasil “Spot de Mercado con detalle horario” con  $P_{\text{máx}} = 70$  MW y 410 USD/MWh.
- Se inicializa el Costo Futuro a partir del archivo CF.bin que contiene los valores de Bellman calculados en la corrida de mediano plazo (MP).
- Horizonte de simulación y optimización de 1 semana y con paso horario.
- Demanda detallada horaria.
- Falla 1: 0.02 p.u a 309 USD/MWh; Falla 2: 0.05 p.u a 600 USD/MWh; Falla 3: 0.075 p.u a 2400 USD/MWh; Falla 4: 0.855 p.u a 4000 USD/MWh.

## 4 Metodología

Se eligió una semana del año y agregó el control por Curva de Remanso (CCR) a la sala SimSEE de corto plazo a partir de la cual se programa la operación del SIN para las 168 horas de la semana siguiente.

En la siguiente gráfica se muestra la curva de remanso junto con los 365 pares de puntos (Aportes UY, Cota) registrados en Salto Grande durante el 2014.

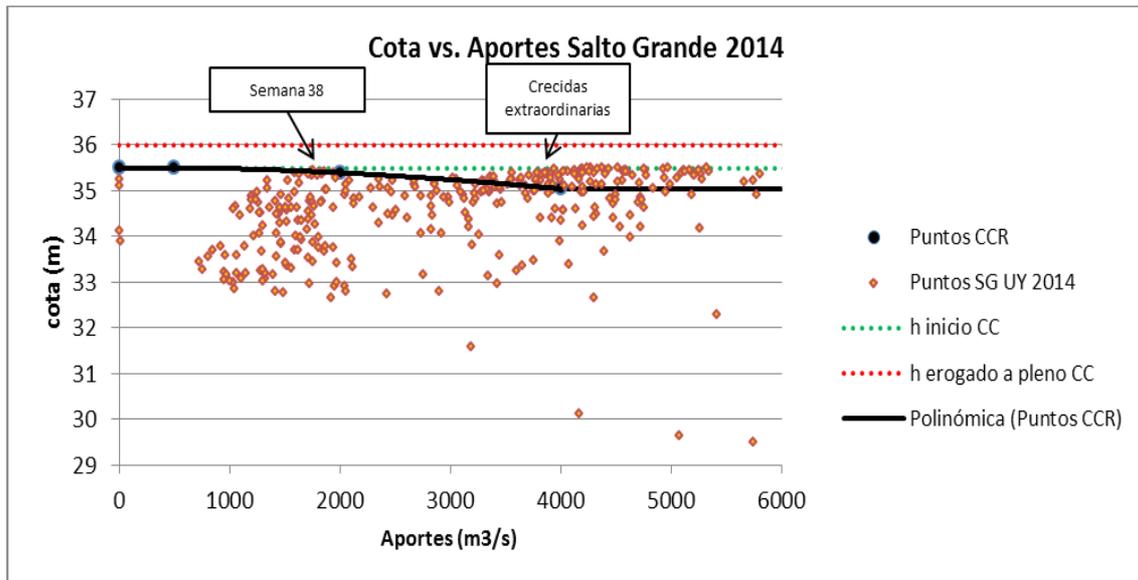


Figura 9 - Curva de remanso y puntos de operación registrados en el 2014.

Se eligió convenientemente la semana 38 del 2014 que presenta valores por encima de la curva pero con aportes no muy altos. En las semanas en que los aportes superan los aprox. 8000 m³/s, SG opera con controles por crecidas extraordinarias que se apartan del objetivo de la implementación realizada.

Se busca evaluar la operación del sistema a partir del agregado del control (caso con CCR) realizado a la corrida semanal, y compararla con la operación programada a partir de la sala original que tiene en cuenta solo el control por crecidas ISME (caso sin CCR).

Se comparan los datos hidráulicos, costos directos, futuros y marginales obtenidos a partir de la planilla SimRes3 realizada, y la valorización del agua embalsada en Salto Grande para cada estado del sistema a partir del archivo optSG\_31x20\_Base.xls.

## 5 Resultados y análisis

### Generación por fuente y Costo Marginal

En las figuras 10 y 11 se muestra el despacho horario por fuente y el costo marginal:

*Caso sin CCR*

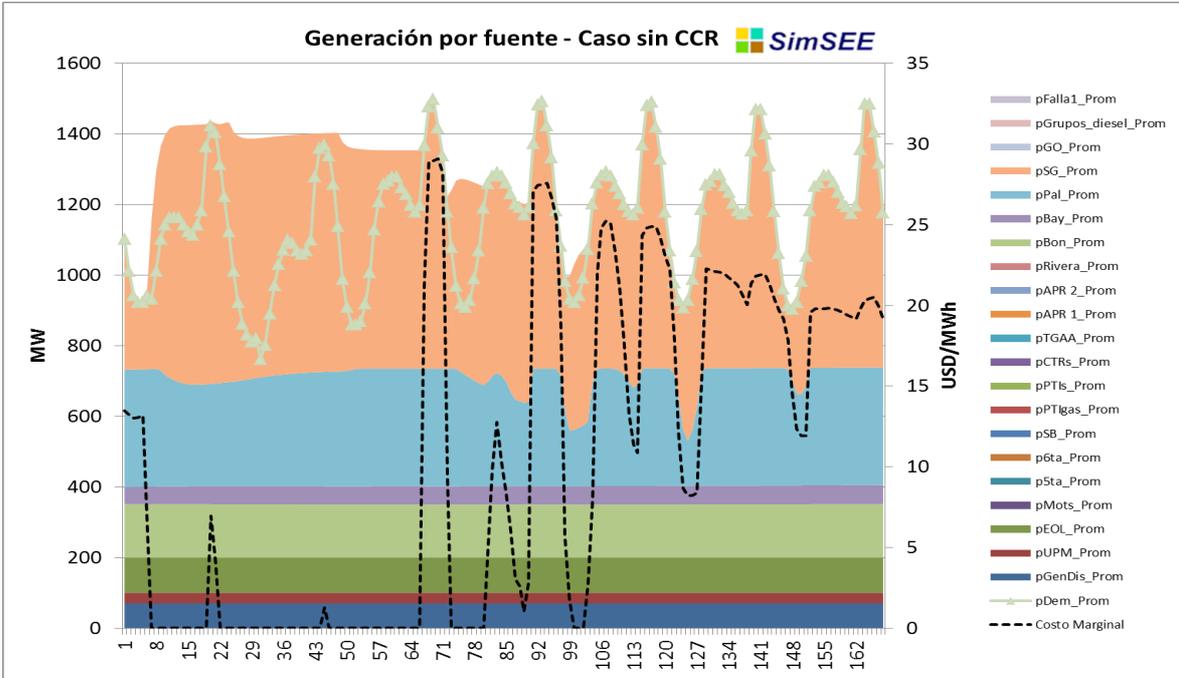


Figura 10 - Despacho Semana y CMg Semana 38 sin CCR

*Caso con CCR*

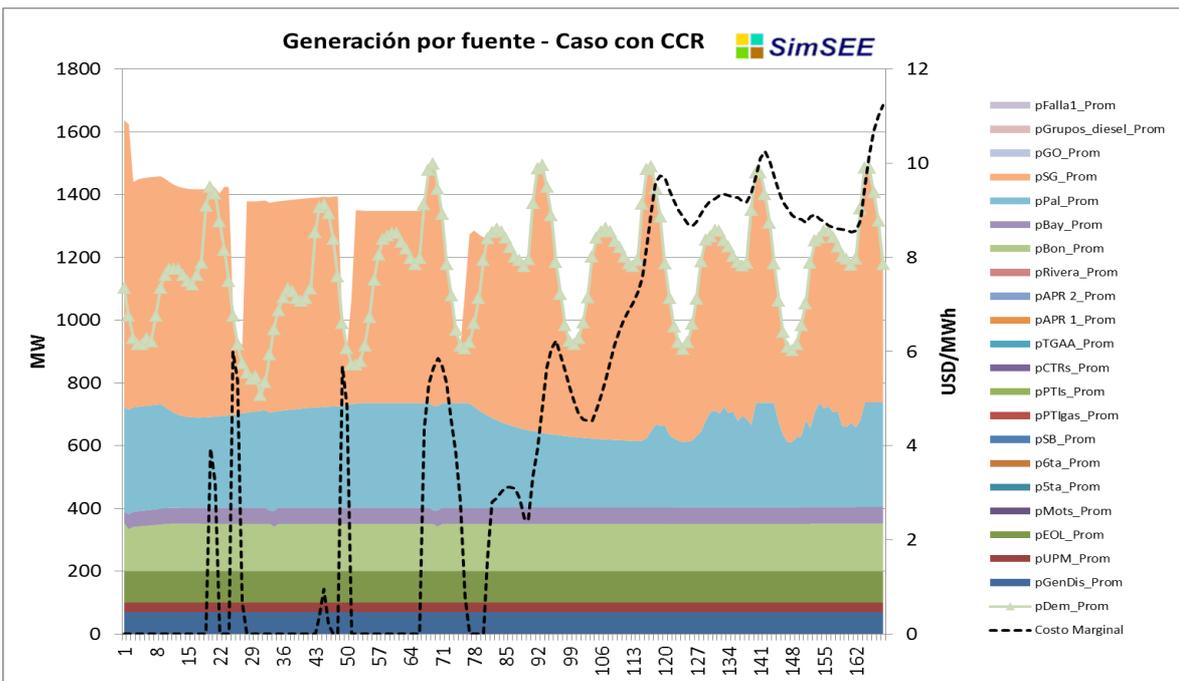


Figura 11 - Despacho y CMg Semana 38 con CCR

Se observa que el despacho es prácticamente idéntico para el caso de los autodespachados (Eólicos, UPM y Generación distribuida), Bonete y Baygorria.

En la tabla 1 se muestra la generación media semanal por fuente para los dos casos:

	Gen Media sin CCR (MW)	Gen Media con CCR (MW)
Salto Grande	564.2	583.0
Bonete	150.7	150.4
Baygorria	52.1	51.8
Palmar	309.3	288.0
Gen. Dis + UPM	200.0	200.0
Exportación	116.5	113.5
Demanda media	1159.7	1159.7

Tabla 1 - Comparación generación por fuente.

En el caso con CCR Salto Grande presenta una generación media 19 MW superior que en el caso sin CCR. Esta diferencia es compensada con una generación 21 MW inferior en Palmar respecto al caso sin CCR.

A su vez, se observa una mayor generación de SG al comienzo de la semana para el caso con CCR. En dicho caso, al comienzo ocurre que el costo marginal es de 0.01 USD/MWh que coincide con el ingreso modelado por exportar hacia Argentina, ya que debido al CCR es necesario erogar para bajar la cota inicial de SG de 35.37m. En el caso sin CCR el marginal es de 0.01 USD/MWh solo cuando la cota se encuentra cercana a la cota mínima por control de crecida ISME, y debe erogar para controlarla.

### Valorización de SG

En las figuras 12 y 13 se muestra la valorización de SG en cada estado del sistema (cotas SG, Palmar y Bonete) para el paso de tiempo inicial y final respectivamente:

#### *Paso de tiempo inicial*

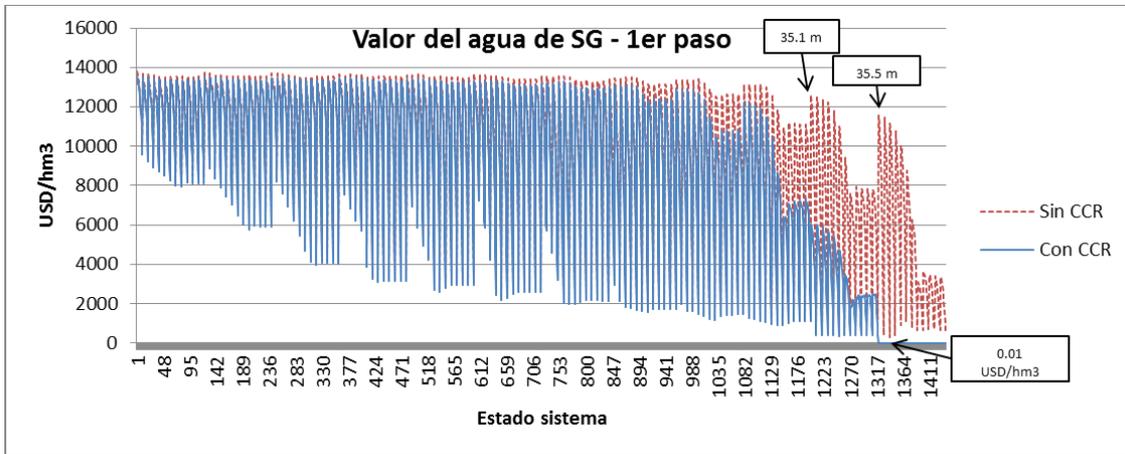


Figura 12 - Valor del agua de Salto Grande en el primer paso.

En la figura 12 se observa que para el caso con CCR, para cotas en SG por encima de 35.1 m y por debajo de 35.5 m, se valoriza el agua aprox. a la mitad que sin CCR. Para cotas por encima de 35.5 m, el agua de SG se valoriza en 0.01 USD/MWh. Lo anterior implica que sin importar el estado del sistema, para cotas altas en SG y con una demanda de aprox. 1100 MW (en el valle), es casi inevitable exportar a 0.01 USD/MWh para llegar en SG a una cota admisible según la Curva de Remanso.

En la figura 13 se muestra la valorización de SG en el último paso, que se obtiene a partir de la valorización de SG en la corrida de mediano plazo (MP):

#### *Paso de tiempo final*

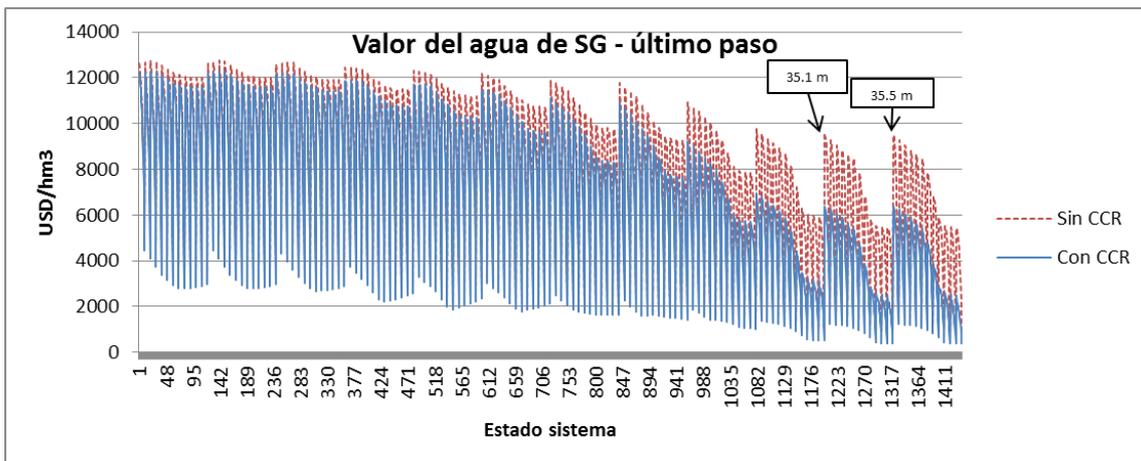


Figura 13 - Valor del agua de Salto Grande en el último paso.

Se puede observar que en el último paso se mantiene la diferencia de valorización para cotas de SG altas, pero nunca llega a 0.01 USD/MWh. Esto último puede deberse a que los aportes de la

corrida de MP son estocásticos (en la prog. semanal son determinísticos), y además a que en la corrida de MP al ser el paso de tiempo diario, las demandas en los valles son mayores (se filtran los valores bajos debido al postizado de la demanda) y existe menos riesgo de exportar.

Datos hidráulicos Salto Grande

*Caso Sin CCR*

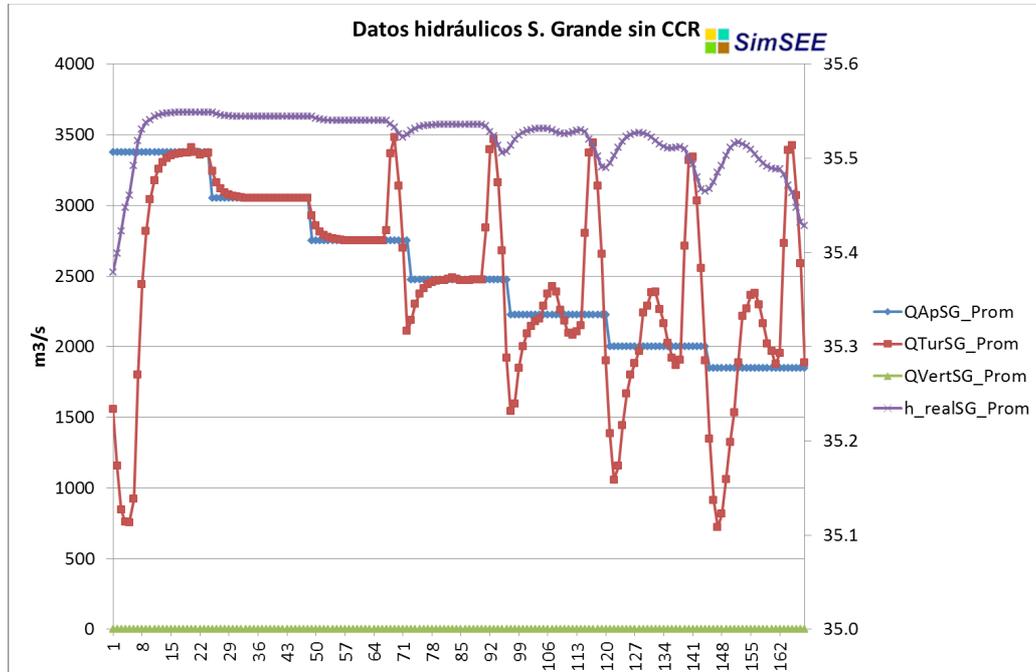


Figura 14 - Evolución de los datos hidráulicos de Salto (Caso sin CCR).

*Caso con CCR*

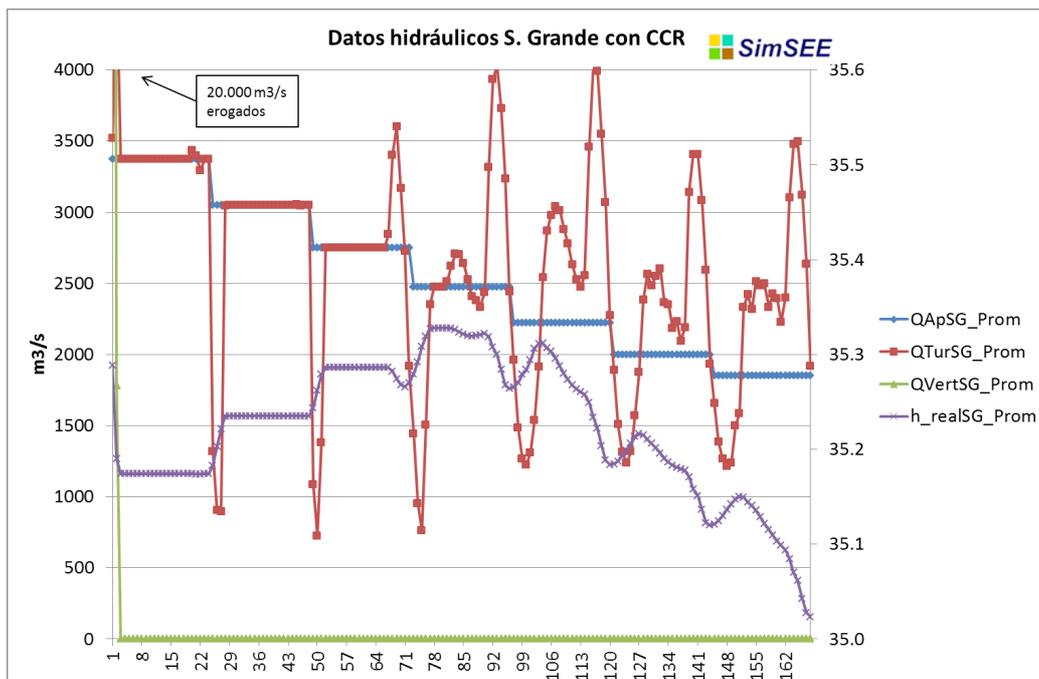


Figura 15 - Evolución de los datos hidráulicos de Salto (Caso con CCR).

En las figuras anteriores se observa que en el caso sin CCR inicialmente se sube la cota de SG hasta aprox. 35.5 m (cota inicio de crecida). Luego SG cierra demanda en casi todas las horas salvo en los valles en los que se baja la generación de Palmar que ya se encuentra sin verter por control de crecida (40.1 m).

Comparación curva Cota vs. Aportes

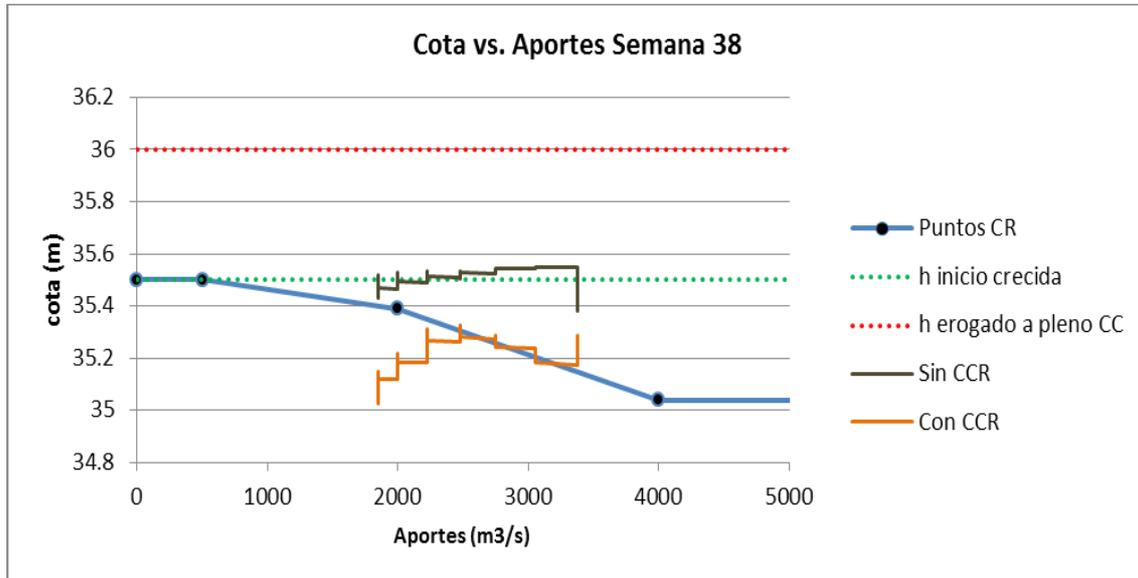


Figura 16 - Comparación Cota vs Aportes.

En el caso con CCR SG baja inicialmente su cota para respetar la Curva de Remanso, y a medida que aumentan los aportes se permite aumentar la cota para permanecer sobre la curva. Dicho comportamiento se mantiene hasta aprox. la mitad de la semana cuando comienza a bajar la cota por debajo de la curva dado que la generación se mantiene (igual turbinado) pero los aportes disminuyen.

En el caso sin CCR se mantiene inicialmente la cota en aprox. el valor de cota de inicio de crecida, para luego descender de forma similar que en el caso con CCR.

Cotas finales y Costos

En las siguientes tablas se muestran los costos directos, futuros y totales, junto con las cotas finales de las 3 centrales con embalse.

*Caso sin CCR*

Cotas finales (m)						
Salto Grande	Palmar	Bonete	Futu			
35.4	39.8	81.3	6.77E			

Tabla 2 - Costos para el caso sin CCR

*Caso con CCR*

Cotas finales (m)					
Salto Grande	Palmar	Bonete	Futu		
35.0	40.0	81.3	6.82E		

Tabla 3 - Costos para el caso con CCR

En concordancia con la generación por fuente, Salto Grande queda en el caso con CCR 40 cm por debajo que sin CCR, y Palmar 20 cm por encima. Si se toma la aproximación de considerar que la energía que se puede obtener de 1 cm de Palmar equivale a la de 1 cm de Salto Grande, y considerando que los costos directos son despreciables frente a los costos futuros, se puede concluir que el despacho es más costoso al agregar el CCR. SimSEE estima dicho sobrecosto en 5 MUSD en aproximadamente 3 años (período optimización prog. Estacional o largo plazo), lo cual corresponde a un 0.7 % de diferencia.

Al aplicar el CCR, el simulador termina la semana con SG en 35 m mientras que sin CCR, el simulador lleva SG a 35.4m, valorizando los aportes afluentes futuros con un coeficiente energético algo mayor.

## 6 Conclusiones

### Implementación

A partir de las pruebas realizadas para testear la implementación del control de cota por Curva de Remanso, se concluye que se cumple satisfactoriamente lo esperado conceptualmente. Se verifica que al agregar el control por CR y habiendo valorizado SG por encima de la falla, SG eroga exactamente lo exigido por el control, manteniéndose sobre la curva.

### Caso de estudio: Programación Semanal

A partir de la activación del control implementado, SG presenta cotas inferiores a las que se obtendrían sin la activación del mismo. Lo anterior implica que se logra respetar las cotas máximas exigidas por la central y así obtener una mejor representación de la central y una programación semanal acorde a la realidad.

Para la programación semanal en cuestión (Semana 38 del 2014), se concluye que no existen diferencias significativas en los costos totales esperados al agregar el control implementado. Se obtuvo un sobre costo de 0.7 % que es despreciable frente a las incertidumbres en los costos esperados ocasionados por las incertidumbre en las entradas al modelo (cotas, disponibilidades, aportes, etc).

## 7 Posibles futuros trabajos

Se plantea como trabajo futuro la implementación del control de cota por curva de remanso en el modelado de la central hidroeléctrica con embalse binacional. La implementación es necesaria dado que la clase que modela esta última no hereda de la clase que modela la central hidroeléctrica con embalse.