Programación estacional considerando exportaciones.

Caballero, Caporale, Scopelli, Vallejo

Instituto de Ingeniería Eléctrica – FING
Trabajo final curso SimSEE edición 2017
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 de este estudio es evaluar una programación estacional considerando exportaciones, analizar los cambios en la valorización del agua de Bonete por permitir exportar energía embalsada y determinar los cambios en los niveles de riesgo de abastecimiento.

Se pretende evaluar el efecto de permitir exportaciones hasta que el valor del agua llegue a los 30 US$/MWh y comparar este escenario con el caso de no permitir exportaciones.

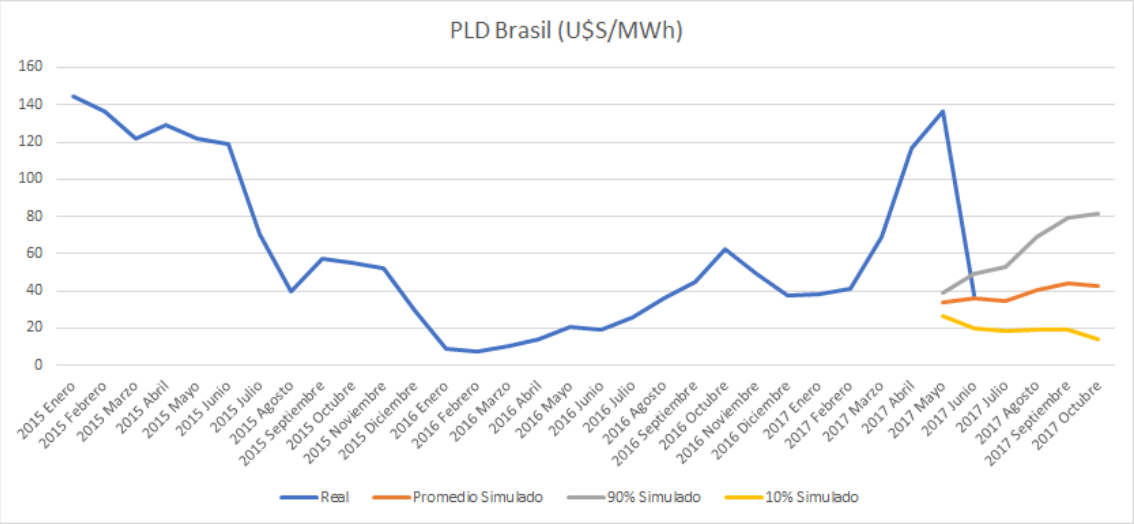
Para la simulación del Sistema Eléctrico se utiliza la herramienta SimSEE, versión 153 y el programa SimRes3 para visualizar los resultados de las simulaciones.

2 Hipótesis de trabajo.

Se utilizó la misma variable hidrológica para modelar los aportes en Salto Grande y en el Río Negro, esto redujo considerablemente los tiempos de simulación. Se tomó esta consideración tras ver que los valores hidrológicos difieren muy poco en el período de análisis.

Se utilizó una tasa de descuento de 10% anual por parecer razonable y no ser tan relevante en una sala de mediano plazo.

Para estimar los parámetros que simularán coherentemente el PLD de Brasil, se utilizaron los reportes históricos obtenibles en https://www.ccee.org.br. Además, los precios fueron pasados a dólares americanos con el tipo de cambio presentado por https://es.investing.com. En la siguiente curva se puede ver el PLD real y simulado:



Se deja a Argentina fuera del sistema, ya que queremos ver directamente la interacción con Brasil.

Por consigna, se tomó una sala estacional con duración de 6 meses, unidad de paso de tiempo horario y un solo poste de duración 1 hora. El horizonte de optimización va del 01/05/2017 al 01/11/2017 y el de simulación del 01/05/2017 al 31/10/2017.

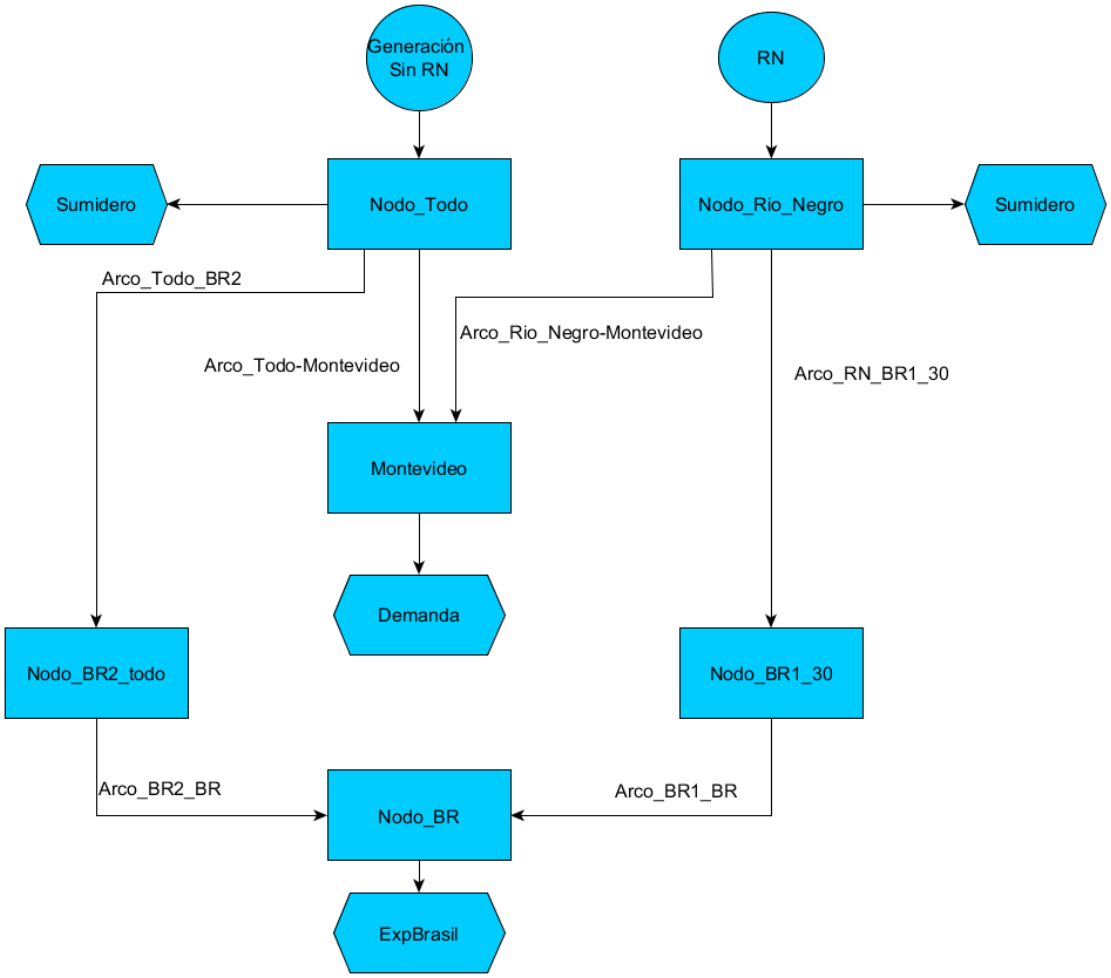
Se utilizaron 5 crónicas en la optimización y 100 crónicas en la simulación con un máximo número de iteraciones de 1 en ambos casos. En todos los casos se utilizó la misma semilla, realizando un análisis de sensibilidad con varias semillas.

Se le asignó una cota inicial a Bonete de 77 m. Se eligió este valor para no holgar ni restringir mucho al sistema.

3 Metodología.

Para modelar correctamente el sistema y lograr una limitación de exportación dependiente del valor del agua del Río Negro, se rediseñó el esquema de la red eléctrica uruguaya, desacoplando las represas del Río Negro del resto de las fuentes generadoras de energía eléctrica.

A continuación se muestra el diagrama general del sistema implementado para el estudio del presente trabajo:



Se implementa la exportación a Brasil mediante dos arcos (*Arco_BR1_BR* y *Arco_BR2_BR*), los cuales se unifican en uno, mediante un nodo (*Nodo_BR*).Esto se hizo para no caer en el error de tener dos mercados distintos que representan el mismo. Uno de ellos exporta la energía generada por las represas presentes en el Río Negro (Bonete, Palmar y Baygorria) hasta que el valor del agua llegue a los 30 US$/MWh, mientras que el segundo arco exporta libremente energía proveniente de toda la generación del Sistema Eléctrico Uruguayo a excepción de las represas del Río Negro, dependiendo de las necesidades del mercado Brasileño.

Además de los dos arcos que representan la exportación a Brasil y sus respectivos nodos, se implementa el nodo *Montevideo* para representar la demanda Uruguaya. A dicho nodo se conectan dos arcos (*Arco_Rio_Negro_Montevideo* y *Arco_Todo_Montevideo*) , los cuales en sus otros extremos se conectan, uno, al nodo Nodo_Rio_Negro (donde se inyecta la energía proveniente de las represas del Río Negro), y el otro al nodo *Nodo_Todo* (donde se inyecta el resto de la generación Uruguaya). Ambos nodos poseen un Sumidero al cual van todos los excedentes de energía no gestionable de cada nodo que no se pudo ubicar en demanda o exportación.

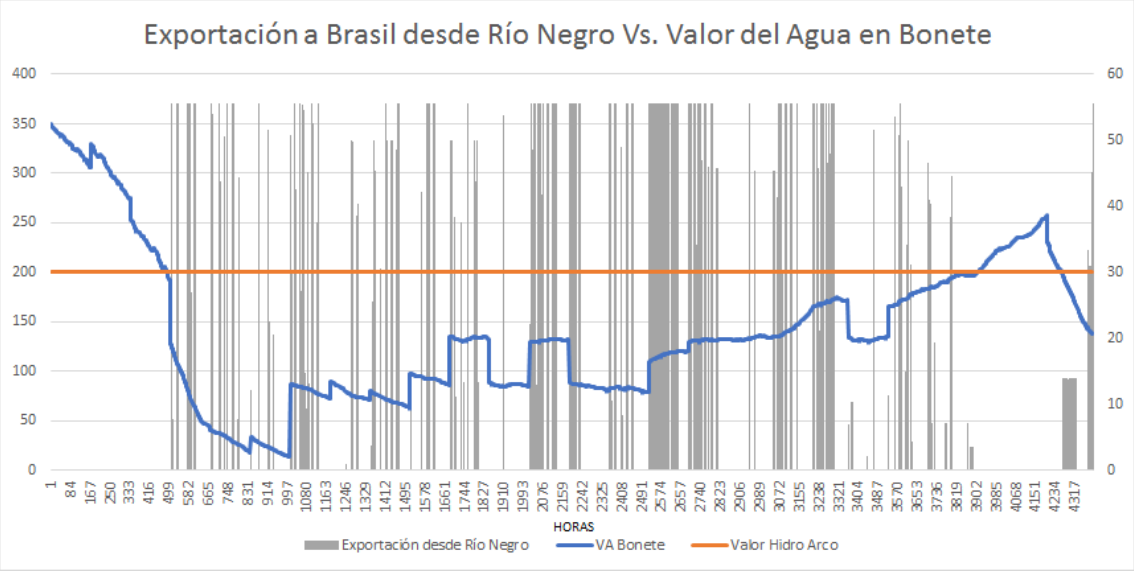
Dado que la interconexión con Brasil presenta una limitante en potencia de actualmente 370 MW (300 MW por la Conversora de Melo por restricciones del lado Brasileño en el sistema de transmisión y 70 MW por la Conversora de Rivera), se implementó en

SimSEE la opción de asignarle a cada arco un "*Arco Gemelo"*, de manera de limitar la potencia conjunta de ambos arcos. Cabe destacar que la restricción de 300 MW por la conversora de Melo se estima que se eliminará en el correr del 2018 pasando a ser de 500 MW (capacidad máxima de la conversora de Melo) y 570 MW la restricción de arco gemelo.

Otra opción que se implementó fue la posibilidad de indisponer el arco cuando el valor del agua de algún embalse llegara a cierto valor, se le llamó *"Condición Hidro"*. El arco *Arco_BR2_BR* tiene dada esa condición con el valor del agua de Bonete en 30UDS/MWh.

La exportación a Brasil se implementó a partir de un actor Internacional, Spot de mercado postizado en donde en la ficha dinámica se le indicó una fuente aleatoria selectora de horario, para poder indicarle las franjas horarias en que Brasil no nos demanda energía (fines de semana) y diferenciar dos costos marginales de Brasil, dependiendo la hora en que se encuentra (valle y punta).

La siguiente curva correspondiente a una sola corrida con semilla 31 y cota inicial de Bonete 72, muestra el correcto funcionamiento del modelo:



Como se puede ver, la exportación máxima satura en 370 MWh y se corta cuando el valor del agua llegue a los 30 UDS/MWh.

A continuación se encuentra la explicación de las nuevas implementaciones en SimSEE que hicieron posible nuestro modelo:

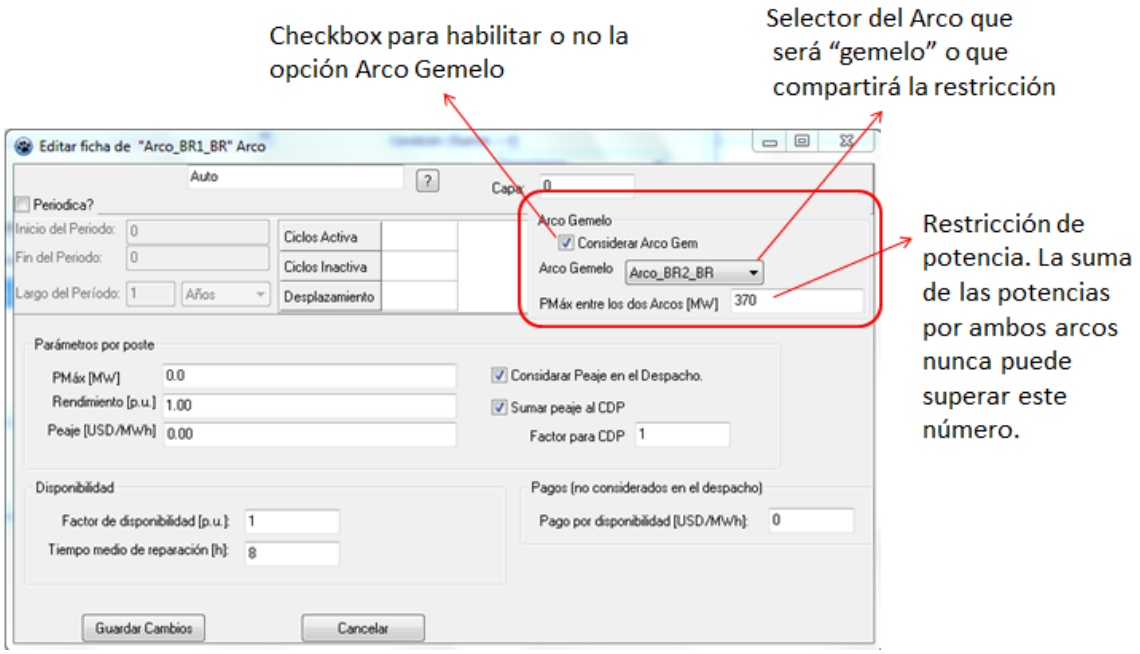
Arco gemelo:

Para implementar el arco gemelo se agrega la siguiente restricción al Simplex:

$$P_{arco_1}+P_{arco_2} < P_{tot}$$

Dicha restricción se agrega a las restricción de arco ya existentes.

En nuestros caso, se usó esta opción para limitar la potencia de los dos arcos que exportan a Brasil en 370 MW. Como se puede ver en la siguiente imagen, se hicieron gemelos los arcos *Arco_BR1_BR* y *Arco_BR2_BR*, los cuales sumados conforman todo el vínculo de exportación con Brasil.



Condición Hidro:

Para evaluar el costo variable de Bonete se utiliza la siguiente expresión para el factor energético:

$$ce = \rho * g * (hBon - 7.05) * \eta$$

Es decir es el factor que dado un volumen turbinado V nos permite calcular la energía generada y entregada por la central a la red eléctrica.

$$\delta E = \delta V * ce$$

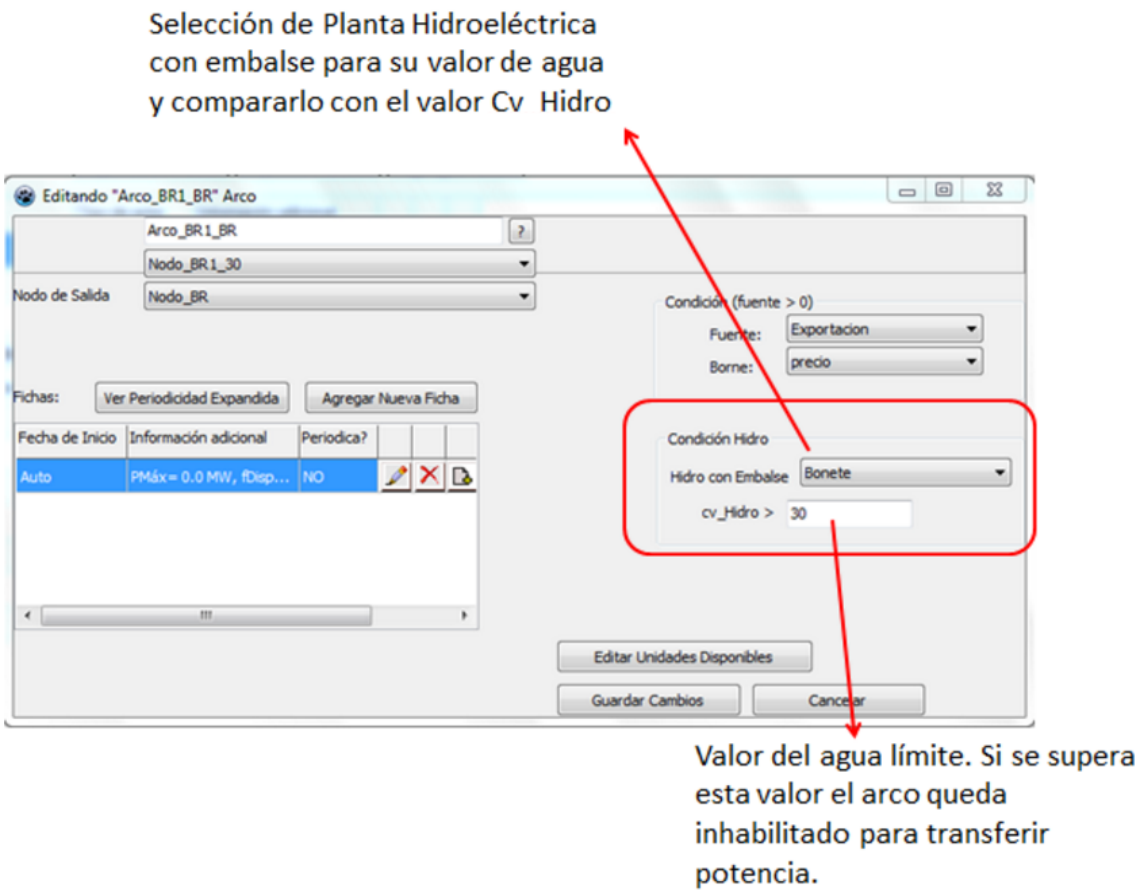
Donde:

- ρ Es la densidad del agua (1000 kg/m^3)
- g Es la constante gravitatoria (9.8 m/s^2)
- η Es el rendimiento complexivo de la turbina y del generador eléctrico.
- h La altura desde el nivel de salida de la turbina hidráulica hasta la superficie del lago.

Luego en términos de costo variable del agua, queda:

$$cvE = cvV/ce$$

Con esa información se implementó en SimSEE la opción de cortar la energía que fluye por un arco, cuando el costo variable de algunas de las represas con embalse supera un valor seteado por el usuario.
En la imagen siguiente se puede ver cómo se implementó la opción. Se puede elegir una planta hidroeléctrica con embalse y hacer que SimSEE compare el valor del agua de esta planta con el que se ingresa en el campo cv_Hidro, en este caso Bonete con 30 UDS/MWh en el arco *Arco_BR1_BR*.



Se realizaron 3 distintos escenarios con el sistema antes descrito:

- 7 simulaciones con semillas (31, 131, 231, 331, 431, 531, 631), con una ganancia de exportación de 30 US$/MWh, cortando la exportación desde Río Negro cuando el valor del agua llegaba a 30 US$.
- Otra sin exportación en las mismas condiciones anteriores para comparar resultados.
- Por último una con una crónica sola en las mismas condiciones de la primera a excepción de que se cambió la cota de Bonete de 77 m a 72 m, para forzar una elevación en el valor del agua. Con esta corrida se pudo verificar el correcto modelado y funcionamiento del sistema.

En cada una de las corridas anteriores se graficaron y calcularon los siguientes parámetros utilizando la herramienta SimRes3:

- **Histograma** del **promedio** del **costo marginal** de Brasil.

- **Histograma** del **promedio** del **costo marginal** de Montevideo (Uruguay).
- **Histograma** del **promedio** del **costo marginal** del nodo *Nodo_Río_Negro*.
- **Histograma** del **promedio** del **costo marginal** del nodo *Nodo_Todo*.
- **Histograma** de la **suma** de **potencia** por el arco *Arco_BR1_BR*.
- **Histograma** de la **suma** de **potencia** por el arco *Arco_BR2_BR*.
- **Histograma** de la **suma múltiple** de las **potencias** de los dos arcos anteriores.
- **Histograma** de la **división** entre el **costo variable** en Bonete y su **eficiencia**, dando el valor del agua.
- **Histograma** de la **suma** de la **altura del agua** en Bonete.
- **Histograma** de la **suma múltiple** de las **potencias** totales generadas.
- **Histograma** de la **multiplicación por un real** de la **energía** total generada.
- **Histograma** de la **multiplicación por un real** de la **energía** total exportada.
- **Histograma** de la **multiplicación por un real** de la **energía de** falla.
- **Histograma** de la **suma** del **caudal vertido** en Bonete.
- **Histograma** de la **suma** del **caudal vertido** en Palmar.
- **Histograma** de la **suma** del **caudal vertido** en Salto Grande.
- **Histograma** de la **multiplicación por un real** del **costo total** de abastecimiento.
- **Comparar Valores Múltiples de Crónicas Variables** de **energía** del sumidero **apilado** con la **energía** total exportada.
- **Comparar Valores Múltiples de Crónicas Variables** de **energía** demandada.
- **Comparar Valores Múltiples de Crónicas Variables** de **energía** total de falla.

4 Resultados del estudio.

Se comparó el desempeño del sistema exportando con la condición limitante del valor del agua y no exportando.
A continuación se pueden ver los resultados más relevantes:

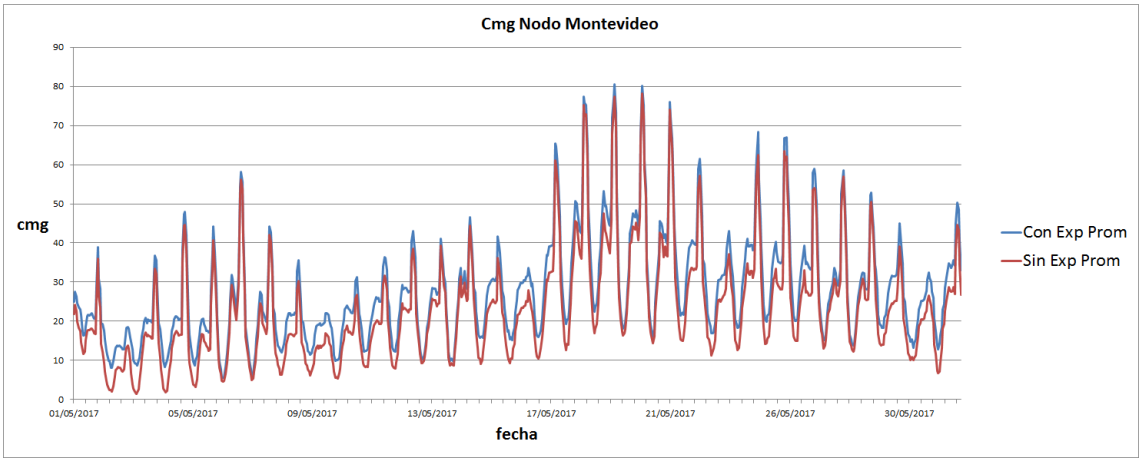
COSTO TOTAL:

El la siguiente imagen se muestra el costo total de operación para el período de tiempo de 6 meses, acumulado, para ambos casos de estudio.

La diferencia entre el costo total para las simulaciones con exportaciones y sin exportaciones da un total de **18,9 MUSD**, que equivale aproximadamente a un 6 % de reducción en el costo, siendo beneficioso el escenario en donde se considera la exportación para las simulaciones.

COSTO MARGINAL:

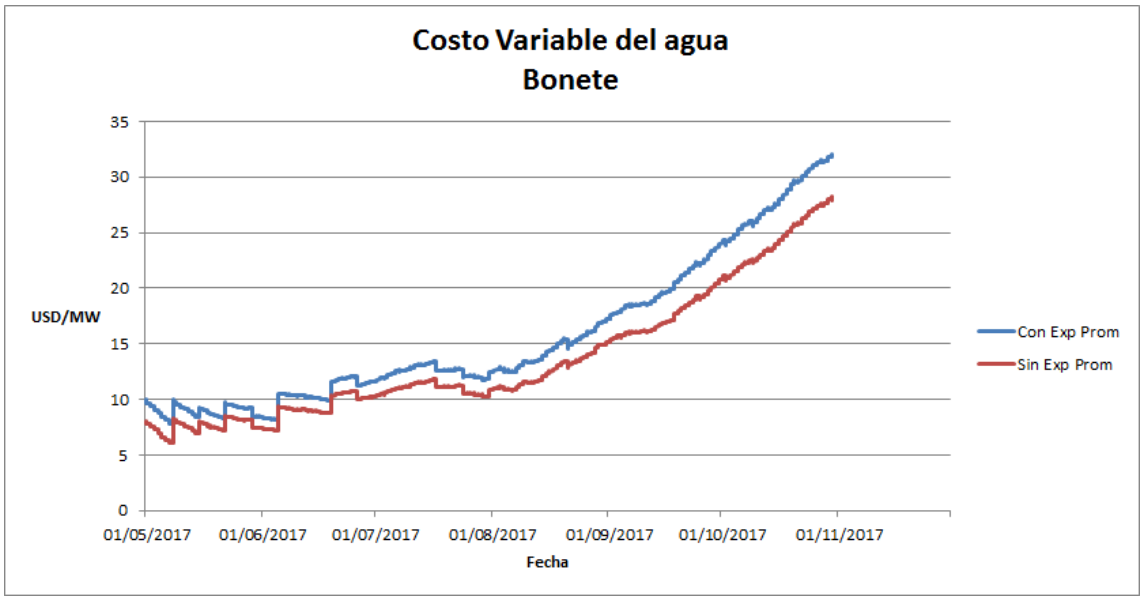
A continuación se muestra el costo marginal del nodo Montevideo en los dos casos de estudio:



Se muestra solo un mes del período de tiempo de estudio, ya que al realizar las corridas en SimSEE con un paso horario provoca que la visualización no sea buena por la cantidad de muestras y variación de la serie.
Para el caso de exportación, el cmg es mayor, a excepción de los fines de semana, cuando Brasil no compra.
Este aumento en el cmg se debe a que tenemos un consumidor extra. El cambio afecta directamente al mercado spot, beneficiando a los que venden en el mercado con esta modalidad.

COSTO VARIABLE DEL AGUA DE BONETE:

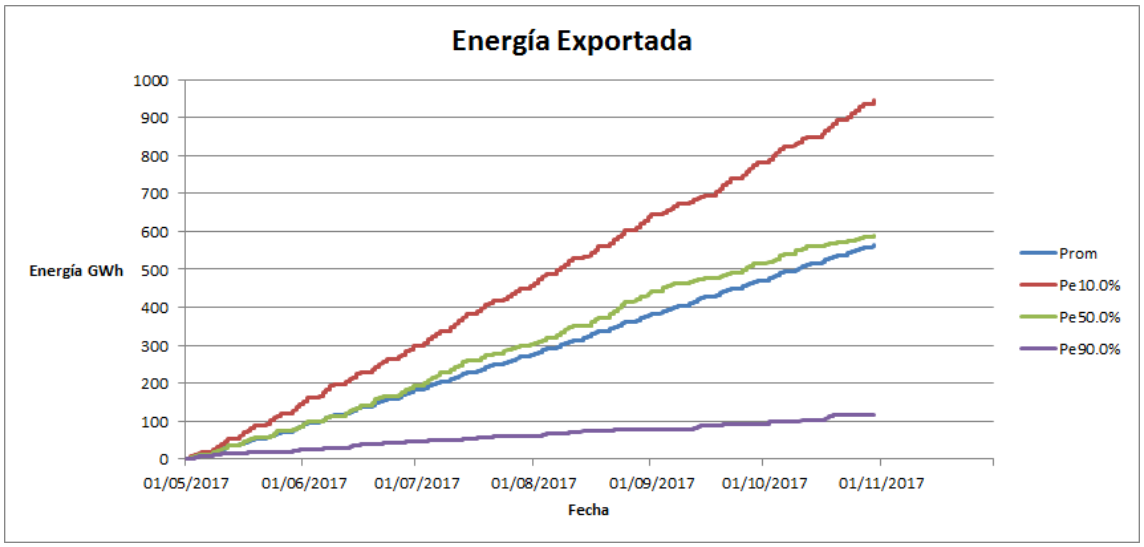
En la imagen siguiente se muestra el costo variable del agua, en donde se puede ver que, por motivo de considerar las exportaciones, la valorización del agua es mayor en todo el período de tiempo de simulación. Se observa que la diferencia se va haciendo más significativa con el precio y el tiempo.



Al igual que con el caso del cmg, al haber un demandante extra, la ley de oferta y demanda actúa incrementando el precio del producto demandado. Este es otro resultado bastante esperable y más que nada nos permite ver que los números obedecen en parte a la intuición.

ENERGÍA EXPORTADA:

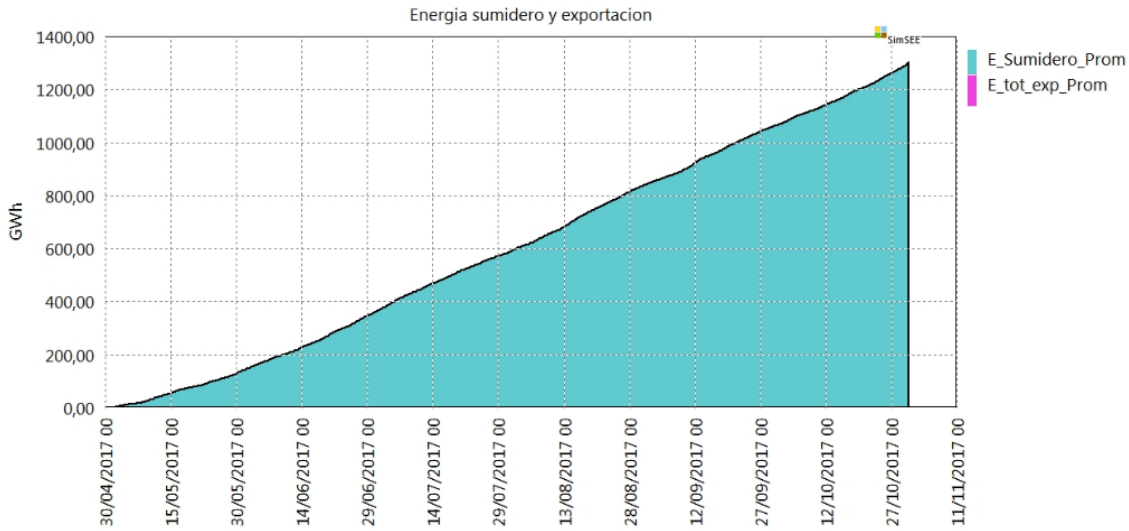
La energía exportada a Brasil es de **564 GWh**, que corresponde a una ganancia de **16.9 MUSD** considerando un delta de **30 USD/MWh**.
Este resultado se puede ver a continuación:



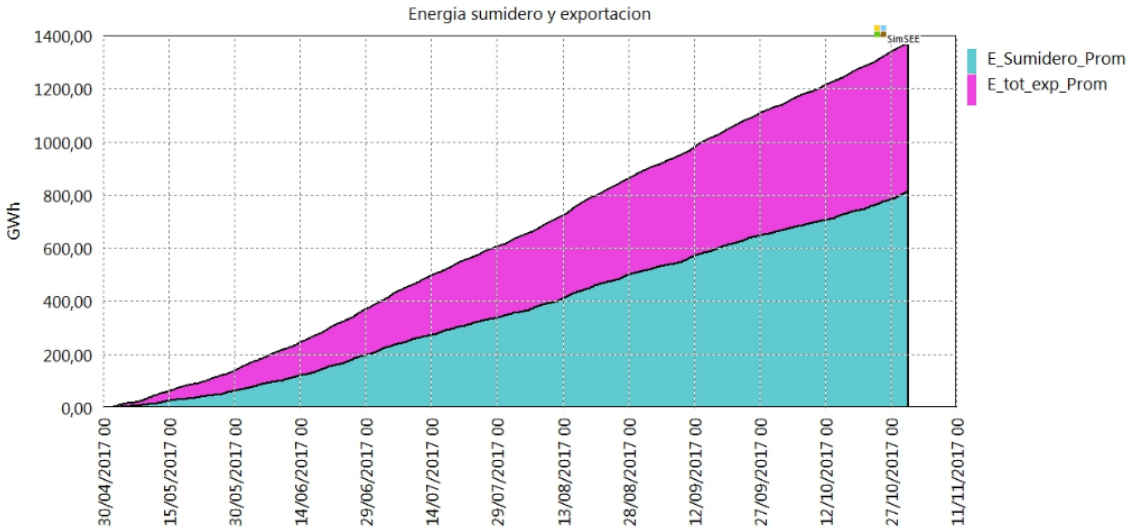
La energía exportada corresponde a un **8 %** de la energía total generada en el Sistema Eléctrico Uruguayo.

SUMIDERO:

En la siguiente imagen se muestra la energía acumulada volcada al sumidero (en los dos nodos de generación existentes), dando un total de **1300 GWh**



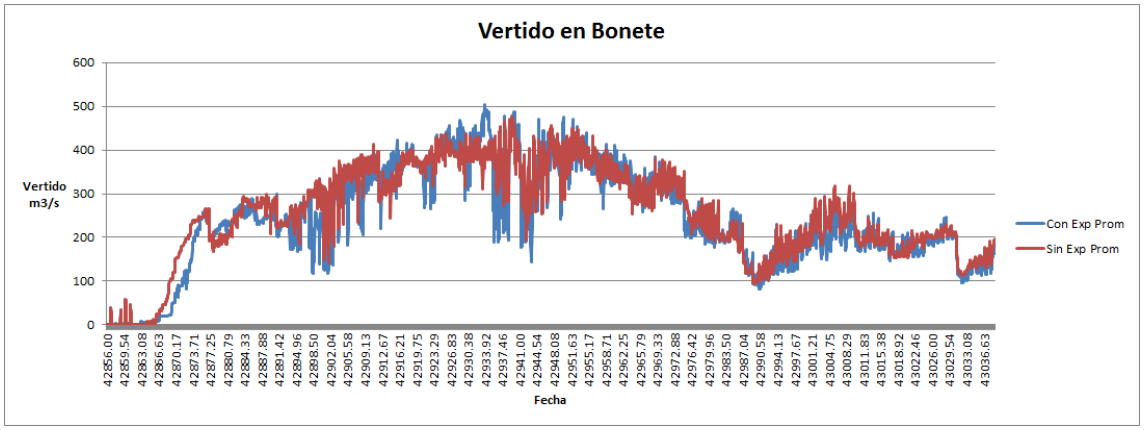
Considerando la exportación, la energía volcada al sumidero disminuye a **812 GWh**, esto es un gran indicio de los beneficios que tiene considerar la exportación, ya que tenemos menos excedentes en el sistema.
Ahora la energía excedente se exporta, recibiendo ganancias por esto.



Es importante destacar que la suma de los excedentes y la exportación es aproximadamente igual a los excedentes para el caso en que no se exporta. Esto significa que efectivamente la energía exportada no implicó abastecerse con generación de costo variable alto.

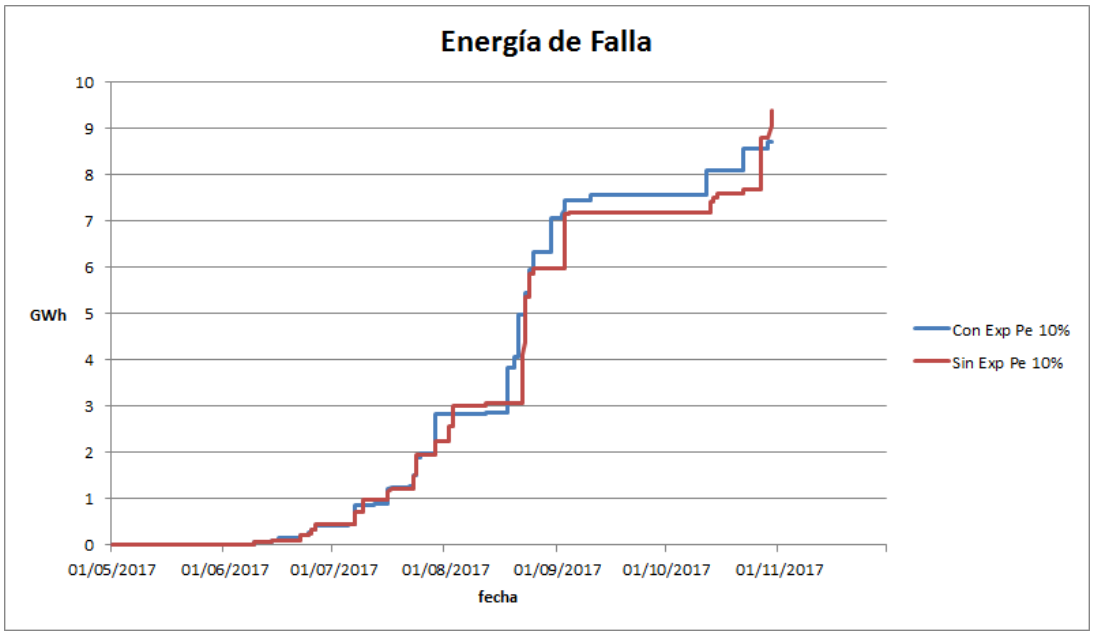
VERTIDO EN BONETE:

Si se compara el vertido que presenta la represa Bonete se puede ver que no hay diferencia significativa. Esto se puede explicar debido a que la energía exportada provino de los excedentes y no de la generación de la represa Bonete.



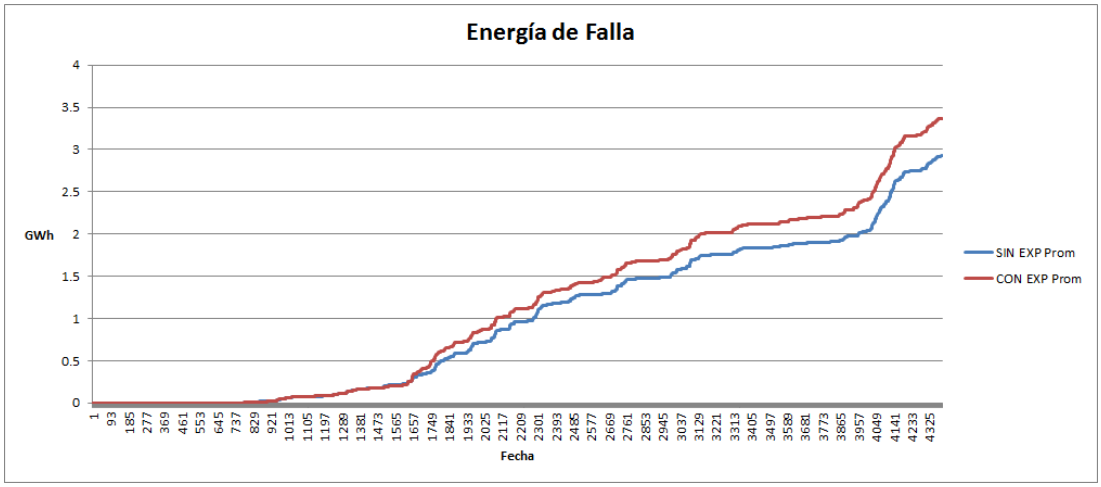
ENERGÍA DE FALLA:

Se muestra la energía de falla para ambos casos con probabilidad de excedencia del 10% (para considerar los peores escenarios).



Se puede ver que el nivel de falla es aproximadamente el mismo para cualquier escenario. Exportar en las hipótesis de este trabajo no altera considerablemente las probabilidades de falla.

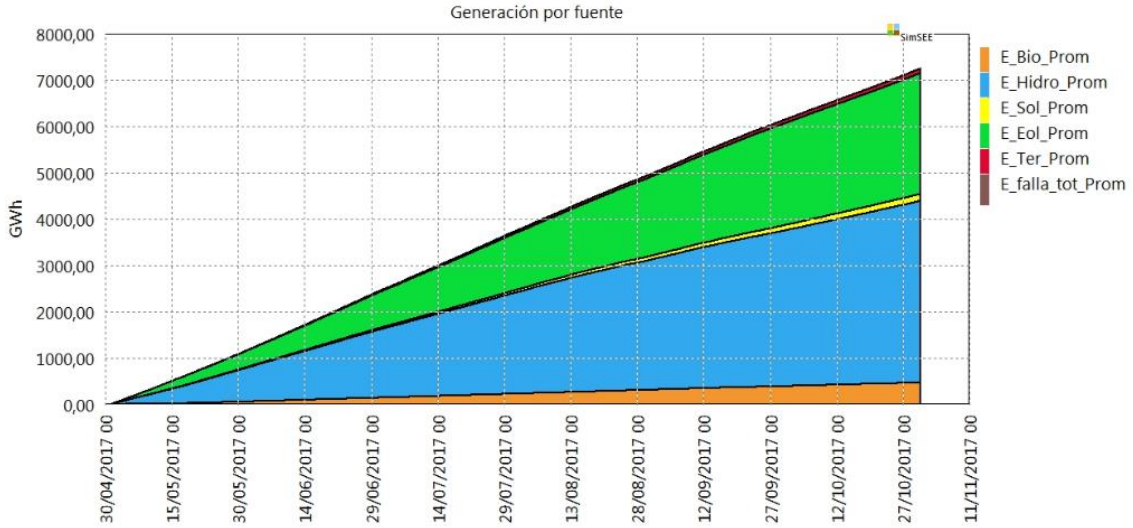
Considerando los valores promedios, se observa que en todo el período de tiempo, la falla, considerando exportación, se encuentra apenas por arriba de la energía de falla no considerando exportación. Esto se puede ver en la siguiente imagen.



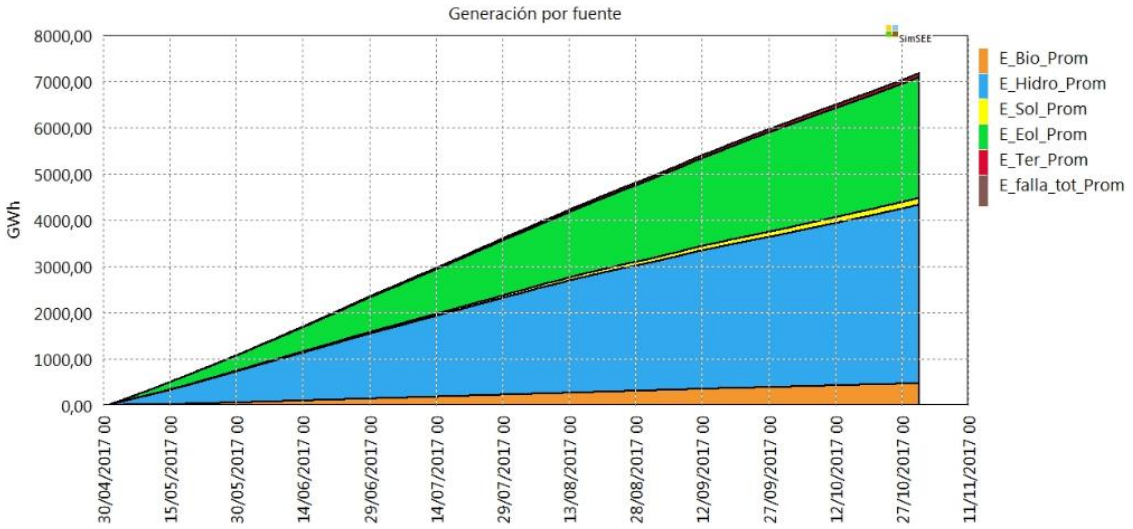
GENERACIÓN POR FUENTE:

A continuación se muestran los gráficos de generación por fuente para ambos casos de estudio.

Con Exportación



Sin Exportación



En la siguiente tabla se muestra el detalle de los valores de energía para cada recurso

	Energía con Expo (GWh)	**Energía sin Expo (GWh)**
Biomasa	475	475
Hidráulica	3921	3861
Solar	148	148
Eólica	2610	2610
Térmico	98	83
Falla	3,4	2,9

Hubo un aumento de la generación Hidráulica y Térmica debido a la exportación. Se puede concluir nuevamente que la energía exportada proviene de la energía volcada al sumidero en el caso de no exportación.

SENSIBILIDAD:

El análisis realizado fue en base a corridas en SimSEE con una semilla de 31. Se realizó un análisis de los resultados al modificar esta semilla, para ver la dispersión que presenta.
En la siguiente tabla se muestra los resultados obtenidos para la energía exportada al variar el valor de la semilla.

Semilla	**Energía Exportada (GWh)**	**Variación respecto a semilla 31 (%)**

31	564,0	0
131	589,6	4,5
231	558,6	-0,96
331	631,0	11,9
431	617,6	9,5
531	503,5	-10,7
631	585,9	3,9

Los resultados obtenidos estuvieron en lo esperado, con una variación de menos del **12%.** Estos resultados no parecen tener un sesgo marcado hacia el aumento o la disminución, ya que se obtuvieron errores de ± 12%.

ESTIMACIÓN DE UNA COTA INFERIOR DE LA CANTIDAD DE SIMULACIONES:

Para estimar la cota inferior de la cantidad de simulaciones que se realizaron para lograr una confianza del 95% nos basamos en el Technical Report *"Estimación de una cota inferior de la cantidad de simulaciones para lograr con una confianza dada, que el error en la determinación del valor esperado de una variable sea inferior a un valor dado."* de Ruben Chaer.
A partir de la siguiente expresión y considerando *p* igual a 0,5 que es el valor que maximiza la expresión *p(1-p)*, siendo *p(1-p)* la estimación para una cota máxima de la desviación estándar y *p* una estimación del valor que se quiere calcular.

$$N > p(1-p)\left(\frac{1.9599639845}{\varepsilon}\right)^2$$

Para Ɛ=10% se tiene que N>96.03, por lo que se utilizó **N=100** para las simulaciones.

5 Posibles futuros trabajos.

Como trabajos a futuros sería interesante analizar qué sucede con la potencia instante a instante, ya que podría haber momentos del día en que sería necesario “prender falla” para abastecer la exportación y esto no sería un beneficio para el caso exportación.

Se podría también correr varias simulaciones para distintos valores de límites de costos variables de agua distintos de 30 y ver que beneficios más trae, como se falla en los distintos escenarios etc.
También se pueden hacer las corridas levantando la restricción de 370 MW por ambos arcos a 570 MW y también ver que beneficio trae esto.

Pudimos ver como la energía de falla no se incrementa sustancialmente, pero su crecimiento era evidente en el tiempo. Sería bueno hacer esta simulación pero con un periodo de tiempo mucho más largo, para ver que la energía de falla no se incremente mucho.

Sería excelente tener un mejor pronóstico del precio spot de Brasil, ya que mejoraría sustancialmente el modelo. Además, es importante ver que pasa si Brasil compra mucho, ya que pondría en riesgo nuestro sistema.

También se podrían realizar las mismas simulaciones pero con distintas cotas en Bonete, hasta podríamos graficar la energía exportada, el costo y las fallas en función de la cota para evaluar el riesgo-beneficio de exportar en ciertas circunstancias de cotas.

6 Conclusiones.

El actor Sumidero permite la exportación, a un precio de 0,01 USD/MWh, de toda la energía que se genere a través de fuentes no gestionables excediendo a la demanda total, esto se ve reflejado principalmente como las restricciones operativas impuestas a los Parques Eólicos y Solares. Se logra un beneficio adicional considerando exportación, ya que parte de la energía volcada al Sumidero, se transforma a energía exportada, la cual presenta ganancia.

Como no hay diferencias en el vertimiento, se puede concluir que la energía exportada no proviene de la generación hidráulica de la represa de Bonete, si no que de energía no gestionable.

Otra observación es que el nivel de falla no se ve alterado, es coherente con los antes mencionado, donde se exporta energía proveniente del sumidero.

En el siguiente cuadro comparativo se muestra los valores de energía, para los distintos actores, para el caso con exportación y para el caso sin exportación. Los valores porcentuales son referidos a la energía total de cada caso.

	Con Exp (GWh)	**Sin Exp (GWh)**	**Con Exp (%)**	**Sin Exp (%)**
Sumidero	812	1300	11	18
Exportación	564	0	8	0
Demanda	5879	5879	81	82
Falla	3,4	2,9	0	0
Total	7255	7179	100	100

Con la curva histórica del spot brasileño fuimos conservadores, la realidad debería ser más favorable para la exportación. Además, no fue agregada Argentina que aumentaría el nivel de exportación aún más.
Sin embargo, esto podría aumentar la falla significativamente.

Si el excedente del Sistema Eléctrico Uruguayo destinado a sumidero sigue siendo alto podría ser interesante evaluar alguna forma de almacenar energía.