

## **Evaluación de impactos sobre la operación de diferentes representaciones del estado hidrológico.**

*Eduard Avogadro    Matias Lens    Ignacio Lussich*

*Instituto de Ingeniería Eléctrica – FIng – Udelar*

*Julio 2014*

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.



## Tabla de contenido

<b>TABLA DE CONTENIDO</b> .....	<b>3</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>4</b>
1.1 FUNDAMENTOS SOBRE CEGH .....	4
1.2 COSTO FUTURO Y REPRESENTACIÓN DEL ESTADO DEL SISTEMA .....	4
1.3 OBJETIVO .....	5
<b>2 HIPÓTESIS DE TRABAJO.</b> .....	<b>6</b>
<b>3 METODOLOGÍA.</b> .....	<b>7</b>
3.1 GENERACIÓN DEL SINTETIZADOR CEGH INICIAL, OPTIMIZACIÓN Y SIMULACIÓN .....	7
3.2 REDUCCIÓN DE LA DIMENSIÓN DEL ESPACIO DE ESTADOS.....	8
3.3 RESULTADOS EN SIMRES3 .....	9
3.4 ESTUDIO DE LA SENSIBILIDAD DE LOS RESULTADOS RESPECTO A LA SEMILLA ALEATORIA Y NÚMERO DE CRÓNICAS SIMULADAS .....	9
<b>4 RESULTADOS DEL ESTUDIO</b> .....	<b>10</b>
4.1 COSTO ESPERADO .....	10
4.1.1 <i>Influencia de la semilla aleatoria y crónicas simuladas.</i> .....	11
4.2 COTA BONETE .....	12
4.3 PROBABILIDAD DE FALLA (ACUMULADA) .....	14
4.4 COSTO MARGINAL.....	15
<b>5 CONCLUSIONES</b> .....	<b>16</b>
5.1 COSTO ESPERADO .....	16
5.2 COSTO MARGINAL .....	16
5.3 COTA BONETE .....	16
5.4 PROBABILIDAD DE FALLA ACUMULADA .....	16
5.5 COMPLEJIDAD DE LA SIMULACIÓN .....	16
5.6 CONCLUSIÓN FINAL .....	16
<b>6 ESTUDIO POSTERIOR A LA PRESENTACIÓN</b> .....	<b>17</b>
<b>7 POSIBLES FUTUROS TRABAJOS</b> .....	<b>17</b>
<b>8 BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>17</b>

# 1 Introducción

## 1.1 Fundamentos sobre CEGH

Los procesos que intervienen en la simulación de sistemas de energía eléctrica son dinámicos, y su evolución futura está condicionada tanto por sus entradas (controlables y no controlables) como por su historia previa (resumida en la información dada por su estado actual).

Particularmente, en el presente trabajo nos enfocamos en los aportes hidrológicos a las centrales hidroeléctricas del conjunto de generadores del sistema uruguayo. Las series de este tipo de aportes (así como también los valores de vientos, radiación solar, etc.) muestran cierta inercia y continuidad en el tiempo, es decir que los valores futuros esperables guardan correlación estadística con los valores que se observan en el pasado. Por ejemplo y pensando en el trabajo que aquí se presenta, sería posible representar los aportes hidrológicos en Rincón del Bonete, Palmar y Salto Grande a través de un vector de estado de dimensión 3, que almacene toda la referida información del pasado.

El análisis a partir del modelado CEGH (Correlaciones en Espacio Gaussiano con Histograma) aplicado al problema a tratar, permite capturar la información estadística contenida en la realización histórica de los aportes de caudales medios a las represas y crear un modelo (ver Figura 1) a partir del cual se generarán realizaciones (series sintéticas) tales que tengan la misma función de densidad de probabilidad para cualquier sub - conjunto de las series de realizaciones que se tome.

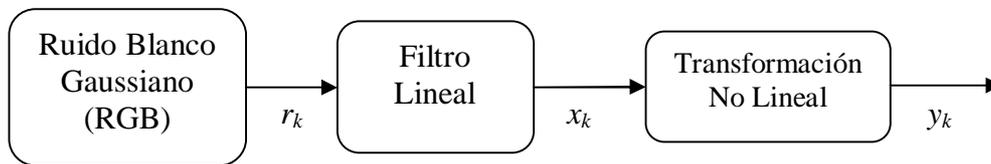


Figura 1 – Modelo CEGH

Es por esto que se torna necesario “*ergodizar*” el proceso a la hora de la creación de las series sintéticas.

Una vez obtenido el modelo CEGH, podemos representarlo como algo como lo que se muestra en la Figura 1: una fuente de ruido blanco gaussiano (serie  $\{r_k\}$ ) atacando un filtro lineal, el cual arroja a su salida la serie de vectores  $\{x_k\}$ . La serie de vectores  $\{x_k\}$  (sus componentes) tienen distribución gaussiana y el objetivo es lograr que tengan la misma estructura estadística que el proceso que se intenta modelar. Esta serie de vectores,  $\{x_k\}$ , se pasa desde el *espacio gaussiano* al *espacio real* mediante el último bloque (“Transformación No Lineal”), dando como resultado la serie  $\{y_k\}$ . Estos valores  $\{y_k\}$  pueden ser por ejemplo los valores históricos de los aportes medios de caudal a las represas: Bonete – Palmar – Salto.

## 1.2 Costo futuro y representación del estado del sistema

La política óptima de operación se obtiene al minimizar el costo total de operación. Para ello es necesario representar la función de Costo Futuro (CF) o *Función de Bellman*. El

número de puntos sobre los que se calcula  $CF(x)$  depende del número de variables de estado y del número de discretizaciones que se le haga a cada una de estas variables de estado. Por ejemplo, con un vector de estados de dimensión  $N$ , discretizando el rango de variación de cada una de estas variables en  $M$  partes, el número de puntos sobre los que hay que calcular  $CF(x)$  es de  $M^N$ . En particular, por ejemplo discretizando en 10 partes un vector de estados de 5 componentes, obtenemos una cantidad de  $10^5 = 100.000$  puntos.

Por esta razón, y para disminuir esta cantidad de puntos, muchas veces se opta por reducir la dimensión de las variables de estado en el espacio gaussiano.

Esta reducción del espacio de estados trae como consecuencia que la política de operación determinada en la etapa de optimización, se haya establecido contando con menos información, por lo que ya no se puede decir que sea la política óptima de operación.

### **1.3 Objetivo**

El objetivo de este trabajo es poder obtener una reducción de este estado de 3 dimensiones en uno de una sola y estudiar el cambio en la operación del sistema.

Este cambio se evaluará mediante la elección de determinados indicadores a través de los cuales se observará su sensibilidad a la reducción.

## 2 Hipótesis de trabajo.

Las hipótesis asumidas para el trabajo son las siguientes:

1. No se tomó en cuenta el intercambio de energía con Brasil, lo cual reduce la dimensión del problema de 5 variables a 3; esto, si bien representa una pérdida de información, provoca que las corridas de la optimización se hagan en un tiempo considerablemente inferior.
2. La optimización se hizo hasta el año 2030.
3. Se simuló del año 2020 al año 2025 para que en los resultados no influya entrada y salida de centrales térmicas y no introduzcan ruido en las variaciones debidas a las reducciones.
4. Como fecha de guarda se usó 30/12/1899.
5. El resto de las variables se dejaron tal cual estaban en la sala utilizada en el curso (ejemplo: tasa anual de actualización, aumento de demanda, mantenimientos, etc.).

### 3 Metodología.

La versión de SimSEE utilizada fue la v4.38.

A grandes rasgos, la metodología empleada consistió en:

1. Tomar los valores históricos de los aportes medios de caudales a las represas de Bonete, Palmar y Salto Grande para la generación de un sintetizador CEGH a partir del programa **AnalisisSerial**.
2. Armar una sala que contara entre sus fuentes a este sintetizador. Mediante esa sala (sin reductor) se representa el caso base contra el que se comparan los demás casos reducidos.
3. Uno de los parámetros —quizás el más significativo— a estudiar es el Costo Total de Operación. Este valor aparece como resultado en el archivo “**SimCosto\_SSxNN\_Esc**” (**SS** – Semilla, **NN** – Número de crónicas simuladas, **Esc** – Escenario), ubicado en “**C:\simsee\rundir\NOMBRE\_SALA**”. SimSEE genera este archivo para cada sala, cada semilla y cada número de crónicas que se utilicen en la optimización y la simulación. Para no tener que cambiar nombres y respaldar archivos, etc, se trabajó con una sala para cada reducción que se estudió. Cada una de estas salas tiene asociado un archivo “**SimCosto\_SSxNN\_Esc**”, un sintetizador CEGH y un archivo de resultados SimRes3.
4. A partir de estos archivos se analizan los resultados de las reducciones. En particular, se analizan las sensibilidades a los reductores de ciertas “figuras” elegidas como representativas del sistema, a saber: la altura de la cota de Bonete, la probabilidad de falla, el costo marginal de operación, y el costo total de operación.

#### 3.1 Generación del sintetizador CEGH inicial, optimización y simulación

A partir de la serie histórica de aportes en las represas de Bonete, Palmar y Salto se generó el sintetizador CEGH con el programa **AnalisisSerial**. Como se trata de aportes hidrológicos se usó un valor de 3 para el Overlapping y 0 para el Traslapping. El orden del filtro lo elegimos como 1, dando como varianza de lo no explicado 0,374 (no tiene demasiado sentido aumentar el orden del filtro, ya que para orden 100 la varianza de lo no explicado baja hasta apenas 0,343).

Este archivo por defecto para la optimización genera 3 variables de estado ( $nVE=3$ ), una por cada “dirección” de la serie de entrada. Esto es:

- Variable de estado 1 =  $1 \cdot \text{Bonete} + 0 \cdot \text{Palmar} + 0 \cdot \text{Salto}$ ,
- Variable de estado 2 =  $0 \cdot \text{Bonete} + 1 \cdot \text{Palmar} + 0 \cdot \text{Salto}$ ,
- Variable de estado 3 =  $0 \cdot \text{Bonete} + 0 \cdot \text{Palmar} + 1 \cdot \text{Salto}$ .

En el sintetizador esto se ve al final del archivo de texto como:

nVE	3						
nd1	5	Bonete	1.0000	0.0000	0.0000	Estadolnicial	0
probs	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000		
nd2	5	Palmar	0.0000	1.0000	0.0000	Estadolnicial	0
probs	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000		
nd3	5	Salto	0.0000	0.0000	1.0000	Estadolnicial	0
probs	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000		

**Cuadro 1 – Líneas finales del sintetizador CEGH generado a partir del programa AnalisisSerial.**

Este sintetizador, llamado “cegh-bps-completo” se agrega como fuente en la sala base.

Se optimizó y simuló en estas condiciones (además, con una semilla de 31 y un número de crónicas de 100) de manera de obtener el costo futuro con la mayor información posible.

### 3.2 Reducción de la dimensión del espacio de estados

El siguiente paso consiste en la reducción de la dimensión del espacio de estados desde tres dimensiones a una. Se decidió explorar lo que ocurre en cada dirección de las variables de estado independiente.

Para ello, se editaron las últimas líneas del sintetizador CEGH que se muestra en el Cuadro 1 del siguiente modo para cada caso a estudiar:

- Reductor 1-0-0 (sólo Bonete)

nVE	1						
nd1	5	H	1.0000	0.0000	0.0000	Estadolnicial	0
probs	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000		

- Reductor 0-1-0 (sólo Palmar)

nVE	1						
nd1	5	H	0.0000	1.0000	0.0000	Estadolnicial	0
probs	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000		

- Reductor 0-0-1 (sólo Salto Grande)

nVE	1						
nd1	5	H	0.0000	0.0000	1.0000	Estadolnicial	0
probs	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000		

Finalmente se estudió la opción de no guardar ninguna variable de estado. Para este caso el sintetizador quedó:

- Reductor 0

nVE	0						
-----	---	--	--	--	--	--	--

### **3.3 Resultados en SimRes3**

A partir del SimRes3 se obtuvieron los valores promedio y las probabilidades de exceso 10% y 90% para las variables

- Altura Bonete,
- Costo Total de Operación,
- Probabilidad de Falla y
- Costo Marginal.

Si bien el estudio se centró en la sensibilidad de los valores promedio de cada magnitud, también se analizó si alguna de las probabilidades era especialmente sensible.

### **3.4 Estudio de la sensibilidad de los resultados respecto a la semilla aleatoria y número de crónicas simuladas**

Una vez obtenidos los resultados, se varían tanto la semilla aleatoria (se eligen los valores 30, 31, 32 y 33) como el número de crónicas simuladas (de 100 se pasa a simular 200 crónicas).

De este modo, se obtiene una idea de qué tan representativo es el resultado que se obtiene con el análisis que se hace para el caso “por defecto”, donde se usa una semilla de 31 y un número de crónicas de 100.

## 4 Resultados del estudio

### 4.1 Costo esperado

La comparación más obvia que se puede hacer es la de comparar los costos esperados (costo total de la crónica más el costo futuro) de cada una de las reducciones.

Los resultados obtenidos se listan en la Tabla 1.

Reductor de Estado	Costo Esperado (MUSD)	Diferencia respecto al caso SIN REDUCTOR (%)
Sin Reductor	7632,56	-
1-0-0 (Bonete)	7327,89	-3,99%
0-1-0 (Palmar)	7480,08	-2,00%
0-0-1 (SG)	7295,15	-4,42%
0 VE	7477,42	-2,03%

Tabla 1 - Costos Esperados obtenidos para cada reductor.

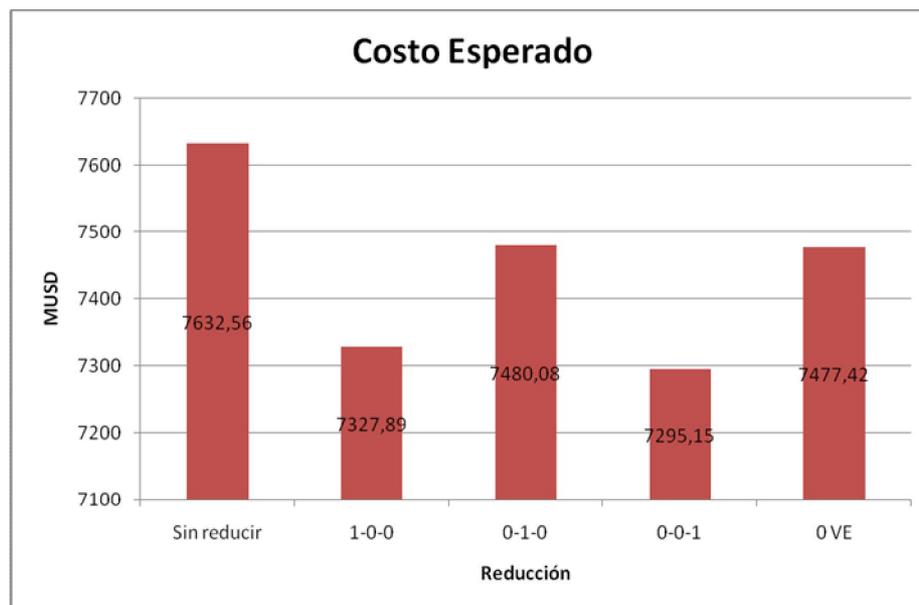


Figura 2 –Costo Esperado (semilla = 31, número de crónicas = 100). De izquierda a derecha: caso sin reductor, reducción considerando únicamente Bonete (1-0-0), reducción considerando únicamente Palmar (0-1-0), reducción considerando únicamente Salto Grande (0-0-1), y el caso sin variables de estado.

En la Figura 2, se puede apreciar que si bien hay poca diferencia entre los costos obtenidos, al no reducir se obtiene un costo mayor que con cualquiera de las reducciones, siendo la reducción que **solo toma en cuenta Salto Grande** la de menor costo (un **4.42% menor respecto al caso sin reductor**). Esto, a priori, resulta contrario a lo que podría intuirse, ya que es de esperar que al tener más información, se obtenga una política más eficiente.

Incluso si no se toma ninguna variable de estado se obtiene un costo menor al obtenido tomando las 3 variables de estado.

#### 4.1.1 Influencia de la semilla aleatoria y crónicas simuladas

Para probar la influencia de la semilla, probamos variar la semilla entre los valores 30, 31, 32 y 33, en el reductor que nos dio el costo mínimo (solo tomando en cuenta Salto Grande), en el caso sin reducir y en el caso sin ninguna variable de estado.

Los resultados obtenidos se listan en la Tabla 2, y se grafican en la figuras Figura 3 y Figura 4.

C. Esperado (MUSD) - 100 crónicas				C. Esperado (MUSD) - 200 crónicas		
Semilla	Sin Reductor	Sólo SG	Sin VE	Sin Reductor	Sólo SG	Sin VE
30	7785	7410	7536	7760	7397	7534
31	7633	7307	7478	7609	7296	7482
32	7720	7307	7520	7696	7295	7527
33	7595	7265	7431	7572	7252	7444
<i>Desviación Estándar</i>	<b>86</b>	<b>62</b>	<b>47</b>	<b>85</b>	<b>62</b>	<b>42</b>

Tabla 2 – Costos Esperados para 100 y 200 crónicas y las siguientes reducciones: Sin Reductor, Sólo Salto Grande y Sin Variables de Estado.

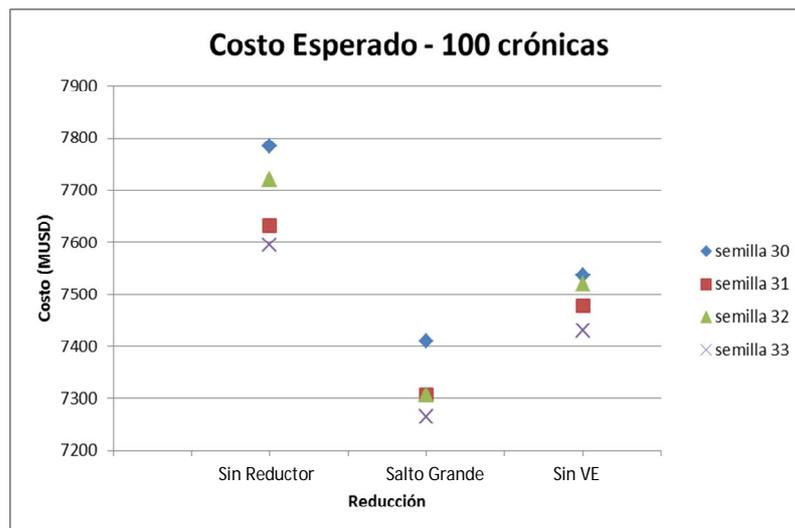
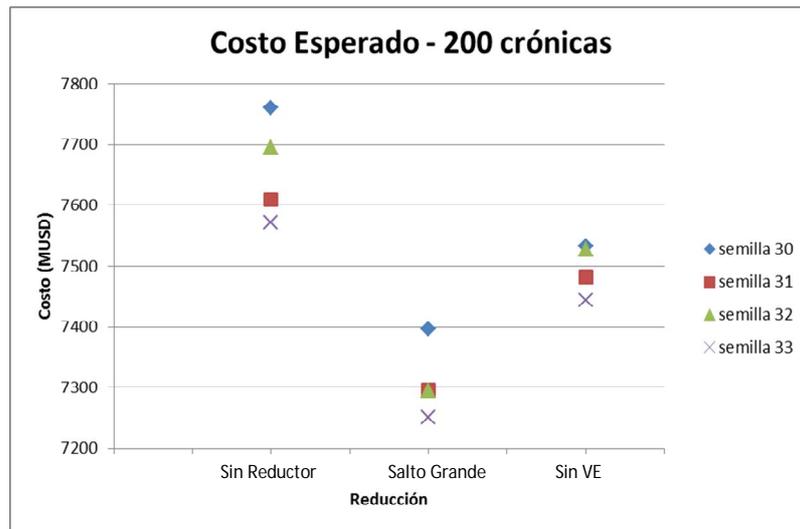


Figura 3 – Costos esperados obtenidos variando la semilla (100 crónicas), para los casos sin reductor, considerando únicamente Salto Grande, y sin variables de estado.



**Figura 4 - Costos esperados obtenidos variando la semilla (200 crónicas), para los casos sin reductor, considerando únicamente Salto Grande, y sin variables de estado.**

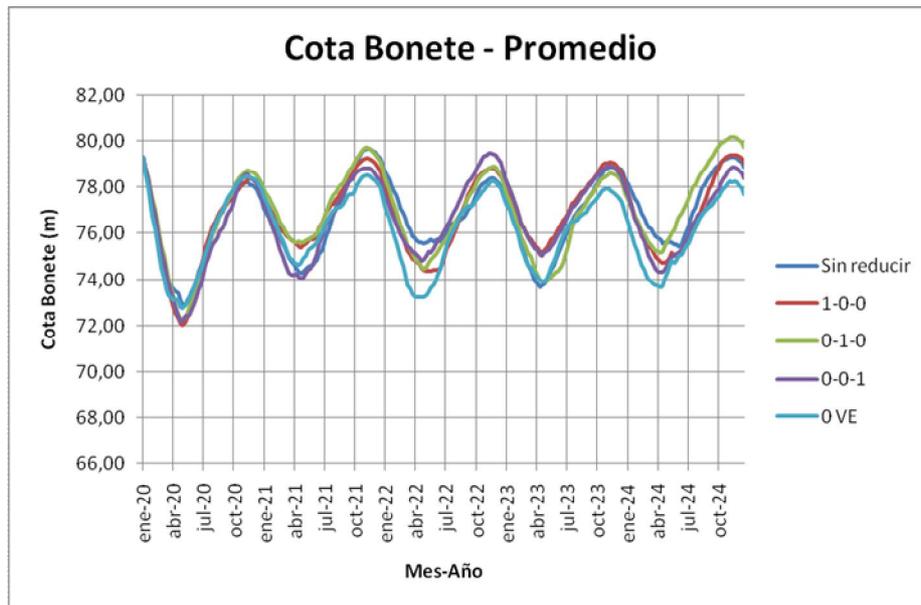
Las desviaciones estándar que se obtienen se listan en la Tabla 2. El reductor con menor dispersión respecto a la semilla es el caso sin variables de estado, siendo además el que más se reduce al pasar de 100 a 200 crónicas simuladas. De cualquier modo, el aumento de 100 a 200 crónicas no baja sensiblemente la dispersión en los costos esperados obtenidos.

## 4.2 Cota Bonete

En el costo esperado se vio que no hay mayores diferencias entre las reducciones.

Estudiamos la cota de Bonete promedio por cada reductor para analizar la política de operación este generador en cada caso.

El caso de promedio de histogramas se muestra en la Figura 5. En este caso se nota cierta diferencia entre los reductores, sobre todo cuando no se toma ninguna variable de estado.



**Figura 5 – Evolución de la cota de Bonete - Promedio**

En ese caso (sin variables de estado), se da algún pico mínimo notable cerca de Abril de 2022, si bien no se llega a la cota mínima. El resto del tiempo las curvas para los distintos reductores parecen evolucionar bastante acompasadas.

Realizando el mismo análisis, pero con probabilidad de excedencia 90% (ver Figura 6) se pueden sacar algunas otras conclusiones, como que cuanto más información se dispone para determinar la política, más lejos de la cota mínima se opera (los promedios de las cotas de Bonete con probabilidad de excedencia 90% se calculan en la Tabla 3).

Esta última observación podría hacer suponer que la falta de información también aumenta la probabilidad de falla.

Para analizar este efecto, se calcula la probabilidad de falla acumulada para cada uno de los reductores.

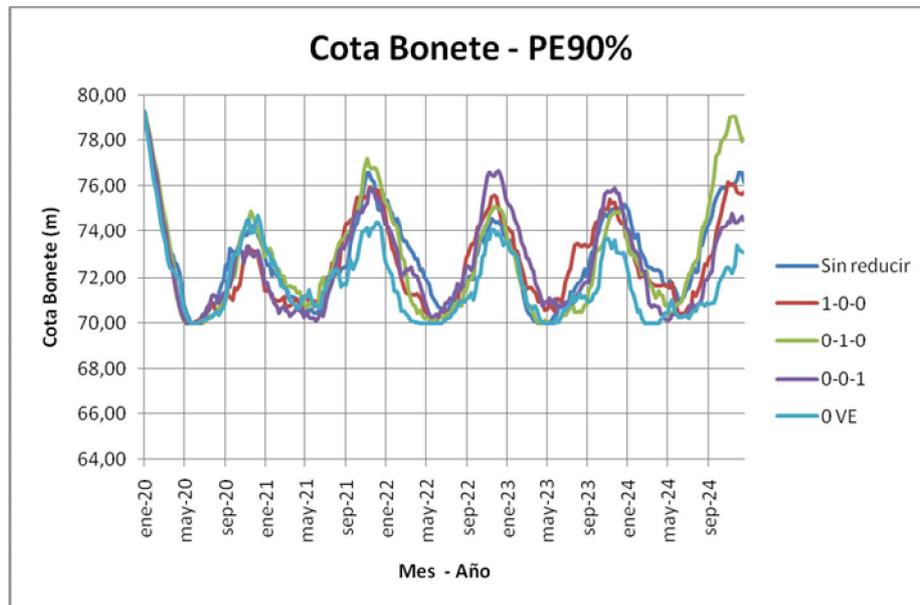


Figura 6 – Evolución de la cota de Bonete – Probabilidad de excedencia 90%

Reductor	Sin Reductor	1-0-0	0-1-0	0-0-1	0 VE
Promedio	72,83	72,61	72,79	72,55	71,77

Tabla 3 – Promedio de la cotas de Bonete para cada reductor.

### 4.3 Probabilidad de falla (acumulada)

Dado que el estudio de la probabilidad de falla arrojaba resultados difíciles de interpretar a partir del análisis gráfico, graficamos la probabilidad acumulada (promedios) del mejor reductor (0-0-1), con las tres variables de estado y sin ninguna. El resultado se muestra en la Figura 7.

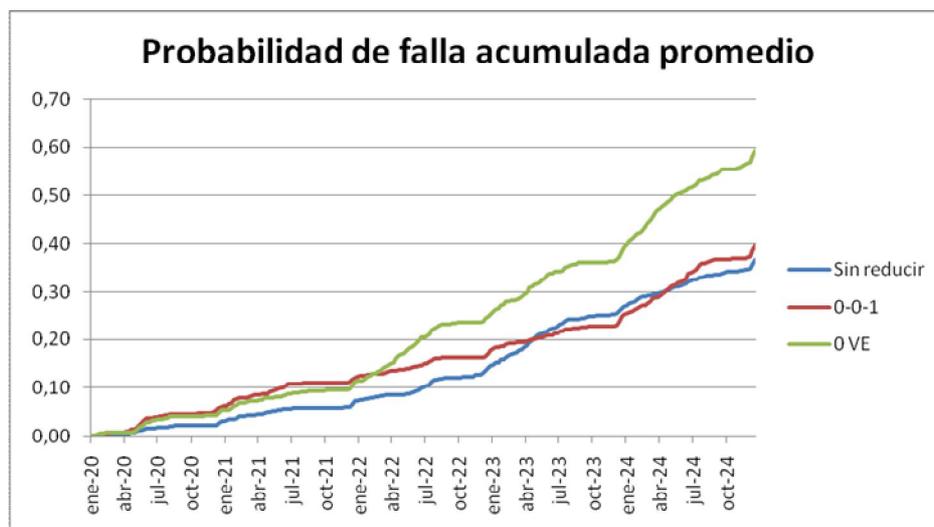


Figura 7 – Probabilidad de falla acumulada.

Si bien hasta cierto punto las curvas para los distintos reductores parecen ir acompasadas, a partir de aproximadamente Enero 2022, la probabilidad de falla del reductor sin variables de estado aumenta por encima de los otros dos casos analizados.

#### **4.4 Costo Marginal**

Analizando las gráficas de costo marginal promedio y con las probabilidades de 10 y 90 por ciento no se encontraron diferencias significativas entre los reductores.

## **5 Conclusiones**

### **5.1 Costo esperado**

Bajo las hipótesis que planteamos, el reductor 0-0-1 es el que obtiene el costo mínimo. Tal vez era esperable que de las 3 direcciones la de Salto sea la que más información da al sistema pues es la central que participa en mayor medida en el despacho, pero como se mencionó anteriormente uno intuye que cuanto menos información se tenga, peor serán las decisiones que se toman.

- Una posible interpretación de por qué esto no ocurre así es que como el reducir el estado lleva a introducir un ruido al optimizar, este puede estar modelando alguna otra fuente de ruido que no fue considerada inicialmente.
- Otra posibilidad es que el período de 5 años haya sido demasiado corto como para que sean apreciables las mejores decisiones.

### **5.2 Costo marginal**

En el costo marginal casi no se ven diferencias entre los reductores. A pesar de que es una buena herramienta para ver pequeñas diferencias en cortos plazos no es de utilidad para un análisis del tipo que nos proponemos realizar. Por esta razón fue que se utilizó el costo esperado como herramienta de análisis ya que acumula todas estas pequeñas variaciones y las traduce en un resultado final.

### **5.3 Cota Bonete**

En la política aplicada a Bonete se ve que la información ayuda a operar más lejos del fondo del lago y baja la probabilidad de fallar.

### **5.4 Probabilidad de falla acumulada**

La reducción en donde no se toma en cuenta ninguna variable de estado, conduce a una mayor probabilidad de falla acumulada, mientras que el reductor que solo toma en cuenta Salto Grande conduce a resultados similares a los que se obtienen si no se reducen los estados.

### **5.5 Complejidad de la simulación**

La complejidad de la simulación es el beneficio más notorio que se obtiene, ya que la reducción del estado implica menos variables que discretizar, menos puntos donde calcular valores de la función de costo, etc.

### **5.6 Conclusión final**

En base a los resultados enunciados en los puntos anteriores podemos concluir que si se prioriza el costo, la mejor opción entre las analizadas es el reductor que solo considera Salto Grande (no obstante, la opción de no considerar variables de estado reproduce resultados similares en cuanto al costo). Sería deseable ampliar el estudio para poder localizar las posibles fallas en el modelado que están generando que al tener menos información se obtengan menores costos.

En cualquiera de las reducciones estudiadas y por las razones comentadas en el punto anterior, se verifica una disminución de la complejidad de los cálculos.

## 6 Estudio posterior a la presentación

Luego de realizada la presentación del trabajo, surgió la idea de hacer las mismas pruebas pero cambiando los fechas las fechas de simulación, optimización y fecha de guarda de forma de ver si afectaba la condición inicial.

Las fechas elegidas fueron: 01/01/2015 para simulación y optimización y 01/01/2020 como fecha de guarda.

Al comparar los costos para los casos sin reducir, 0-0-1 y sin variables de estado se obtuvo:

Reductor de Estado	Costo Esperado (MUSD)	Diferencia respecto al caso SIN REDUCTOR (%)
Sin Reductor	7464	-
0-0-1 (SG)	7307	-2,1%
0 VE	7475	0,1%

Puede verse que el caso sin reducir y el 0-0-1 el costo baja pero sin VE prácticamente no varía. Las diferencias se entre los reductores se acortan bastante pero el 0-0-1 continua siendo el mejor.

## 7 Posibles futuros trabajos

- Incluir más influencia climática.
- Estudiar el costo esperado con probabilidad 5%.
- Explorar las reducciones en otras direcciones además de las direcciones estudiadas.
- Estudiar un periodo más largo que 5 años.
- Estudio de reducción de tiempos en función del grado de la reducción.
- Incluir el nodo Brasil en la simulación.
- Simular con las térmicas.
- Agregar generación de energía solar.

## 8 Bibliografía

- “Fundamentos de modelo CEGH de procesos estocásticos multivariados”, Ruben Chaer, Diciembre de 2011, rev. Junio 2013 - <http://goo.gl/4UuAKE>.
- “Identificación y síntesis de series temporales. Modelado CEGH. Correlaciones en Espacio Gaussiano con Histograma”, Ruben Chaer, Mayo 2011, <http://goo.gl/lp9oCR>.