

Impacto de la reducción de estado del CEGH de aportes hidráulicos

Autores: Francisco Martínez

Instituto de Ingeniería Eléctrica - FING.

Trabajo final curso SimSEE

Montevideo - Uruguay.

28/7/2025

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 del trabajo

Objetivo General

Analizar la influencia de la reducción de estado del CEGH (Correlaciones en Espacio Gaussiano con Histograma) de aportes hidráulicos en la política de operación, y simulación de despacho de SIN (Sistema Interconectado de Energía).

Objetivo Práctico y Experimental

Analizar los impactos económicos mediante una apropiada utilización del software SimSEE para modelamiento con herramientas Optimizador, Simulador, y Post-Procesador SimRes3, y utilización de herramienta análisis serial CEGH.

2. Hipótesis de modelado general

Efectos de riesgo en costos estimados de despacho energético conectados a la reducción de estado de caudales hidráulicos.

Variación, correlaciones, y agrupamiento hipotético de valores matriciales de reducciones de estado CEGH que involucren estimación de escenarios de costos favorables y desfavorables.

3. Metodología

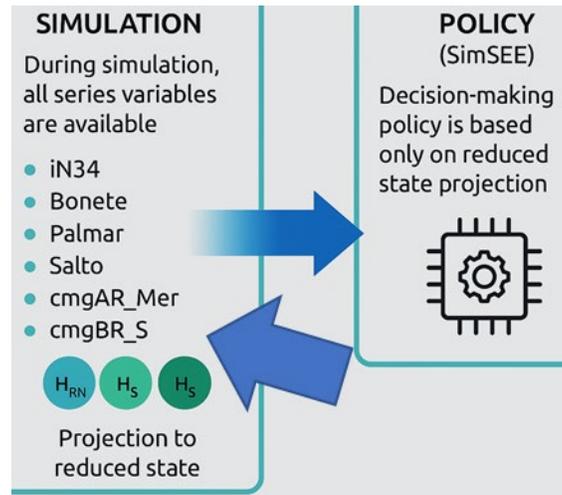
¿Qué es CEGH?

- Es un método de reducción de la dimensión del estado estocástico usado en modelos energéticos como SimSEE.
- Preserva la estructura de correlación entre variables aleatorias (ejm: caudales, precios, indicadores climáticos).
- Permite representar múltiples variables originales usando pocos ejes sintéticos (ejm: CEGH_1, CEGH_2, CEGH_3).



¿Cómo funciona?

- Transformación gaussiana:
 - Las variables originales se transforman a un espacio gaussiano estándar (con media 0, varianza 1).
 - Se eliminan asimetrías o escalas heterogéneas.
- Análisis de correlación:
 - Se aplica un análisis para encontrar combinaciones principales que explican la varianza conjunta.
- Proyección en hiperesfera:
 - Los estados se proyectan en una hiperesfera unitaria (norma = 1), conservando relaciones angulares (correlaciones).
 - Esto permite definir una malla discreta con baja cantidad de nodos, pero representativa.



- La metodología desarrollada se encuentra a continuación:
 - Permite el análisis de reducción y variación de parámetros de estado
 - Evalúa la sensibilidad en el proceso de simulación

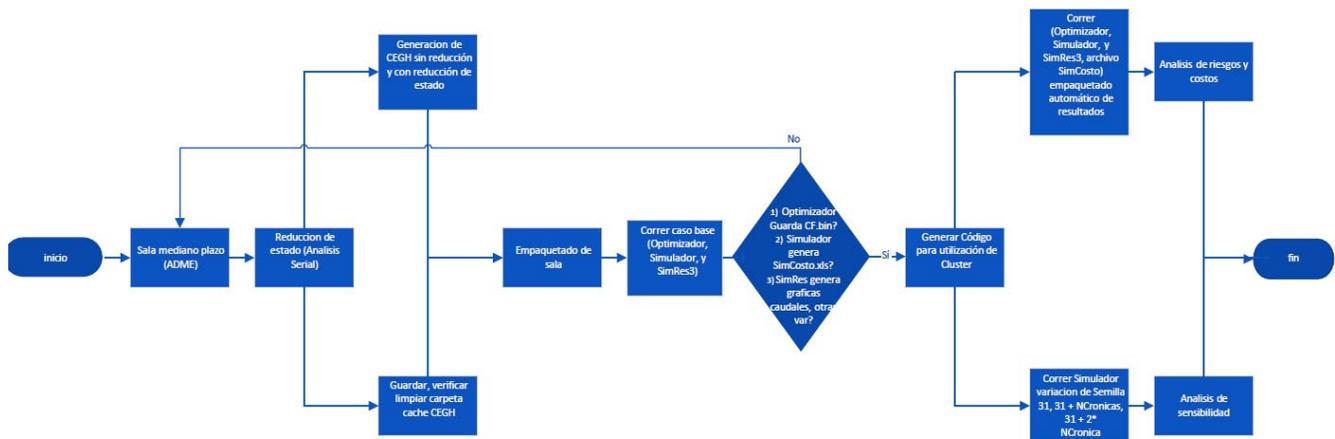


Figura 1. Metodología planteada para estudio de casos CEGH en aportes hidráulicos

A continuación, se describen parámetros relevantes para el modelamiento de energético del sistema interconectado de potencia:

Parámetros del Modelamiento

Casos con reducción de estado – enganche

Horizonte de tiempo

Optimización: Fecha de Inicio: 06/25/2025 00:00 Fecha de fin: 09/23/2025 00:00 Paso de tiempo: 24 Horas Pasos de optimización: 90 Pasos de simulación: 90

Simulación: Fecha de Inicio: 06/25/2025 00:00 Fecha de fin: 09/23/2025 00:00

Número de Postes: 4

Poste N°	1	2	3	4
Duración	1	4	13	6

Inicialización de Costo Futuro

Llenar último Frame con: Ceros Desde archivo CF.bin

Enganchar con: Sala CF.bin

CF_PES_2024_11_2_diaria_v3.bin Vaciar Definir Enganches

Caso sin reducción de estado

Horizonte de tiempo

Optimización: Fecha de Inicio: 06/25/2025 00:00 Fecha de fin: 10/23/2025 00:00 ?

Simulación: Fecha de Inicio: 06/25/2025 00:00 Fecha de fin: 09/23/2025 00:00 Horizonte de guarda para simulación: 12/30/1899 00:00

Paso de tiempo

24 Horas Pasos de optimización: 120 Pasos de simulación: 90

Parámetros del Modelamiento Hidroeléctricas Embalse

B

Fecha: (M/d/yyyy h:mn AM/PM) Auto	Capa: 0		
Periódica?	<input type="checkbox"/>		
Parámetros 1	Parámetros 2	Parámetros 3	
Cota mínima operación[m]	70	36	30
Cota máxima operación[m]	81	42	35.5
Puntos cota-volumen h[m]	70.00: 75.50: 81.00	36.00: 38.50: 41.00	30.00: 32.50: 35.50
Puntos cota-volumen V[Hm3]	0.00: 2828.00: 8208.00	0.00: 620.00: 1370.00	0.00: 532.50: 1403.50
Área de la cuenca[ha]	0	0	0
Cota de la descarga para cálculo del salto[m]	53.8	5.5	4.5
Coefficientes de afectación del salto por caudal erogado(caQE)	0.00221	0.00474	0.00181
Coefficientes de afectación del salto por caudal erogado(cbQE)	-3.6E-7	-4.94E-7	-9.2E-8
Rendimiento[p.u.]	0.87	0.896	0.858
Potencia máxima generable[MW]	38.8	111	67.5
Potencia mínima por unidad [MW]	0	0	0
Caudal máximo turbina[m3/s]	170	460	315
Factor de disponibilidad[p.u.]	0.99	0.99	0.99
Tiempo de reparación[horas]	48	48	48
Ca filtración[m3/s]	6.296	2.997	0
Cb filtración[m2/s]	0.255	1.846	0
Ca muy seco[m3/s]	140	200	0
Cota mínima para vertimiento[m]	77.52	36	30
Cota máxima para vertimiento[m]	86	44	36.5
Caudal vertido con la cota máxima[m3/s]	7630	21499	23500

Control de crecida

Activar Cota [m] Erogado [m3/s]

Inicio: 80.7 0

Medio: 82 1990

Fin: 83 4510

Controles de cota con Penalidad

h >= h_inf [m]: 72.3 Penalidad [MUSD/(m.día)]: 1 Activo

Índice control inferior: penalidades

Borne control inferior: Bonete

h <= h_sup [m]: 80 Penalidad [MUSD/(m.día)]: 0.5 Activo

Índice control superior: <Ninguna>

Borne control superior:

P

Fecha: (M/d/yyyy h:mn AM/PM) Auto	Capa: 0		
Periódica?	<input type="checkbox"/>		
Parámetros 1	Parámetros 2	Parámetros 3	
Cota mínima operación[m]	36	42	30
Cota máxima operación[m]	42	48	35.5
Puntos cota-volumen h[m]	36.00: 38.50: 41.00	0.00: 620.00: 1370.00	0.00: 532.50: 1403.50
Puntos cota-volumen V[Hm3]	0.00: 2828.00: 8208.00	0.00: 620.00: 1370.00	0.00: 532.50: 1403.50
Área de la cuenca[ha]	0	0	0
Cota de la descarga para cálculo del salto[m]	53.8	5.5	4.5
Coefficientes de afectación del salto por caudal erogado(caQE)	0.00221	0.00474	0.00181
Coefficientes de afectación del salto por caudal erogado(cbQE)	-3.6E-7	-4.94E-7	-9.2E-8
Rendimiento[p.u.]	0.87	0.896	0.858
Potencia máxima generable[MW]	38.8	111	67.5
Potencia mínima por unidad [MW]	0	0	0
Caudal máximo turbina[m3/s]	170	460	315
Factor de disponibilidad[p.u.]	0.99	0.99	0.99
Tiempo de reparación[horas]	48	48	48
Ca filtración[m3/s]	6.296	2.997	0
Cb filtración[m2/s]	0.255	1.846	0
Ca muy seco[m3/s]	140	200	0
Cota mínima para vertimiento[m]	77.52	36	30
Cota máxima para vertimiento[m]	86	44	36.5
Caudal vertido con la cota máxima[m3/s]	7630	21499	23500

Control de crecida

Activar Cota [m] Erogado [m3/s]

Inicio: 40.1 0

Medio: 41.18480009 10045.5

Fin: 42.2 20091

Controles de cota con Penalidad

h >= h_inf [m]: 37 Penalidad [MUSD/(m.día)]: 1 Activo

Índice control inferior: penalidades

Borne control inferior: Palmar

S

Fecha: (M/d/yyyy h:mn AM/PM) Auto	Capa: 0		
Periódica?	<input type="checkbox"/>		
Parámetros 1	Parámetros 2	Parámetros 3	
Cota mínima operación[m]	30	35.5	30
Cota máxima operación[m]	35.5	36.5	30
Puntos cota-volumen h[m]	30.00: 32.50: 35.50	0.00: 532.50: 1403.50	0.00: 532.50: 1403.50
Puntos cota-volumen V[Hm3]	0.00: 2828.00: 8208.00	0.00: 620.00: 1370.00	0.00: 532.50: 1403.50
Área de la cuenca[ha]	0	0	0
Cota de la descarga para cálculo del salto[m]	53.8	5.5	4.5
Coefficientes de afectación del salto por caudal erogado(caQE)	0.00221	0.00474	0.00181
Coefficientes de afectación del salto por caudal erogado(cbQE)	-3.6E-7	-4.94E-7	-9.2E-8
Rendimiento[p.u.]	0.87	0.896	0.858
Potencia máxima generable[MW]	38.8	111	67.5
Potencia mínima por unidad [MW]	0	0	0
Caudal máximo turbina[m3/s]	170	460	315
Factor de disponibilidad[p.u.]	0.99	0.99	0.99
Tiempo de reparación[horas]	48	48	48
Ca filtración[m3/s]	6.296	2.997	0
Cb filtración[m2/s]	0.255	1.846	0
Ca muy seco[m3/s]	140	200	0
Cota mínima para vertimiento[m]	77.52	36	30
Cota máxima para vertimiento[m]	86	44	36.5
Caudal vertido con la cota máxima[m3/s]	7630	21499	23500

Control de crecida

Activar Cota [m] Erogado [m3/s]

Inicio: 35.5 0

Medio: 35.75268331 13455

Fin: 36 26910

Controles de cota con Penalidad

h >= h_inf [m]: 32 Penalidad [MUSD/(m.día)]: 1 Activo

Índice control inferior: penalidades

Borne control inferior: SaltoGrande

Parámetros del erogado

Imponer QErogadoMin por Poste

QErogado mínimo[m3/s]: 450

Se implementa la metodología planteada:

- Variación de parámetros y construcción de casos inferen:
 - Mayor correlación entre Hidroeléctricas B y P
 - Impacto de agrupamientos Hidroeléctricas B, P, y S
 - Efectos de creación de CF Política de operación bajo inclusión de cmg ARG y BR

Analisis Serial - Archivo CEGH

				Variación de coeficientes					
		IN34	B	P	S	Cmg ARG	Cmg BR		
nVE	3								
nd1	5	in34	0.9993	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	EstadoInicial	0
probs		0.2000	0.2000	0.2000	0.2000	0.0000	0.0000		
nd2	5	H_RN	0.0000	0.4000	0.0000	0.0000	0.3000	EstadoInicial	0
probs		0.2000	0.2000	0.2000	0.2000	0.0000	0.3000		
nd3	5	H_S	0.0000	0.0000	0.0000	0.4000	0.3000	EstadoInicial	0
probs		0.2000	0.2000	0.2000	0.2000	0.0000	0.3000		

- Casos optimizados y simulados sin reducción de estado para comparación de influencia de CEGH
- Tiempo de modelamiento fue estimado en sistema local y clúster

				permanencia de coeficientes					
nVE	6								
nd1	5	in34	1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	EstadoInicial	0
probs		0.2000	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000	0.0000		
nd2	5	bonete	0.0000	1	0.0000	0.0000	0.0000	EstadoInicial	0
probs		0.2000	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000	0.0000		
nd3	5	palmar	0.0000	0.0000	1	0.0000	0.0000	EstadoInicial	0
probs		0.2000	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000	0.0000		
nd4	5	Salto50	0.0000	0.0000	0.0000	1	0.0000	EstadoInicial	0
probs		0.2000	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000	0.0000		
nd5	5	merc1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1	EstadoInicial	0
probs		0.2000	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000	0.0000		
nd6	5	merc2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	EstadoInicial	0
probs		0.2000	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000	1		

4. Casos simulados y resultados del estudio

Los datos de entrada de anomalía de temperatura del Pacífico tienen un estado preferencial. Variaciones específicas en caudales de entrada a hidroeléctricas son presentadas en la Tabla 1.

Tabla 1. Matriz de casos para evaluación de CEGH en aportes hidráulicos

CASOS	SERIE DE REDUCCIÓN DEFINIDA	Bonete	Palmar	Salto grande	precios marginales externos Argentina	precios marginales externos Brasil
1	HRN	0.7911	0.3092	0	0	0
2		0.3	0.7			
3		0.5	0.5			
4		0.1	0.9			
5		0.9	0.1			
6		1	0			
7	HRN	0.4	0.3	0.3	0	0
	HS	0	0	1	0.15	0.15
8	HRN	0.7	0.3	0	0	0
	HS	0	0	0.7	0.15	0.15
9	HRN	0.4	0	1	0.3	0.3
	HS	0	0	0.4	0.3	0.3
10	HRN	0	0	0	0.5	0.5
	HS	0.2	0.1	0.7	0	0

4.1. Análisis de casos planteados (1-6)

Se enfoca el análisis de los siguientes casos para evaluar la respuesta de variaciones consistentes a aportes hidráulicos de conocida correlación y se asumen las siguientes valorizaciones.

Table 2. Hipótesis particulares para definición de casos 1 - 6

Caso	Hipótesis de Reducción
1	Serie reducida con combinación de Bonete (79.11%) y Palmar (30.92%) . Sin inclusión de Salto Grande ni precios externos.
2	Serie HRN con pesos Bonete 30% y Palmar 70% . Se enfoca en capturar la variabilidad de Palmar.
3	Serie HRN balanceada: 50% Bonete – 50% Palmar . Supone igual importancia en ambas cuencas.
4	HRN orientada a Palmar: 10% Bonete – 90% Palmar . Captura dominancia de esta serie.
5	HRN centrada en Bonete: 90% Bonete – 10% Palmar . Captura comportamiento del embalse de Bonete.
6	HRN exclusiva de Bonete: 100% Bonete – 0% Palmar . Ignora correlaciones con otras series.

4.2. Análisis de casos planteado (7-10)

- **Caso 7:** Hipótesis de Reducción: HRN = Bonete (40%), Palmar (30%), HS = Salto Grande (100%), Se incorpora representación explícita de Salto Grande como embalse independiente. Precios externos no son considerados. En otras palabras, no se consideran precios marginales de los países vecinos. Este caso busca capturar la estructura hidrológica nacional sin interferencia de señales externas.
- **Caso 8:** HRN = Bonete (70%), Palmar (30%), HS = Salto Grande (70%). Se introduce efecto parcial de precios externos: $cmgAR$ y $cmgBR = 0.15$. Mayor peso a la serie de Bonete, lo cual puede reflejar una mayor influencia de esta cuenca en la hidrología nacional. HS incluye parcialmente a Salto Grande. Se introducen los precios externos con peso moderado (15%). Este caso evalúa cómo una señal moderada de precios regionales puede afectar decisiones de operación y costo esperado.
- **Caso 9:** HRN = Bonete (40%), Palmar (30%), HS = Salto Grande (40%). Precios externos incluidos con mayor peso: $cmgAR$ y $cmgBR = 0.3$. Las tres series hidrológicas (Bonete, Palmar y Salto) tienen presencia equilibrada pero no dominante. Precios externos de Argentina y Brasil ahora tienen un peso significativo (30%). Se explora cómo las condiciones del mercado regional pueden influir de manera más activa en la simulación y despacho. Este caso se acerca a una representación más regionalizada del sistema.
- **Caso 10:** HRN pone menos énfasis en Palmar (10%) y mantiene a Bonete (40%). HS sigue con fuerte representación de Salto Grande (70%). Los precios marginales externos tienen el mayor peso posible (50%), igualando o superando la importancia de las variables hidrológicas. Este caso representa una visión donde el comportamiento del sistema está fuertemente influenciado por los mercados regionales de energía.

4.3. Análisis de casos planteado Sin Reducción

En este estudio predomina la disminución de la dimensionalidad, por lo tanto, se plantea también considerar casos sin reducción con el objetivo de realizar comparaciones en valores esperados y riesgos de las políticas de operación y proceso de simulación.

4.4. Optimización – Simulación – Post Proceso utilizando HPC Clúster

Códigos fueron desarrollados utilizando Python para optimización cmdopt en clúster HPC. También, se realizó el proceso de manera Local para verificación de resultados utilizando interfaz gráfica SimSEE.

```

# ----- Configuración de rutas -----
bindir="/[redacted]/SimSEE/bin"
homedir="${HOME}"
salas="${homedir}/SimSEE/salas/nid${nidSala}"
resultados="${salas}/resultados"
tmprundir="${homedir}/SimSEE/tmp" # Ahora en home, más accesible
tmpdirsala="${tmprundir}/corridas/${ejecutor}"
FULL_ESE_PATH="${tmpdirsala}/${NombreSala}/${NombreSala}.ese"

# ----- Preparación -----
mkdir -p "${tmprundir}/corridas" "${tmpdirsala}" "${tmprundir}/${ejecutor}"
rm -rf "${tmprundir:?}/${ejecutor:?}"/ "*" "${tmpdirsala:?}"/ "*"

# ----- Desempaquetar sala -----
echo "🔍 Copiando ${NombreSala}.zip desde ${salas}..."
cp "${salas}/${NombreSala}.zip" "${tmpdirsala}/"
cd "${tmpdirsala}" || exit 1
unzip -o "${NombreSala}.zip" -d "${NombreSala}"
rm -f "${NombreSala}.zip"

echo "✅ Archivo usado: ${FULL_ESE_PATH}"

# ----- Ejecutar simulación -----
echo "👉 Iniciando simulación..."
"${bindir}/cmdsim" sala="${FULL_ESE_PATH}" ejecutor="${ejecutor}" cf="${CF_OUT}" nhilos="${nhilos}" nareas="${nareas}" tmp_base="${tmprundir}"

# ----- Comprimir y guardar resultados -----
cd "${tmprundir}/${ejecutor}" || exit 1
archizip="${ejecutor}_opt_${NombreSala}.zip"
zip -r "${archizip}" *
echo "🔍 Copiando resultados a: ${resultados}/"
cp "${archizip}" "${resultados}/"

# ----- Finalizar -----
"${bindir}/simsee_sfdb" setestadocorrida "${ejecutor}" 5
echo "✅ Proceso finalizado correctamente."

# ----- Tiempo final sim -----
end_time=$(date +%s)
echo "🔍 Tiempo total: $(( (end_time - start_time)/60 )) minutos"

# ----- Limpieza -----
rm -f "${archizip}"
rm -rf "${tmprundir:?}/${ejecutor:?}"/ "*"
rm -rf "${tmpdirsala:?}"/ "*"
    
```

Existe una notable inflación del valor esperado del costo en el CVar5% (peor 5% de 1000 escenarios) en casos con cmgAr y Br. El caso sin reducción indica valores MUSD menores comparados con el resto de casos planteado. Sin embargo, el rango en valores esperados es similar para todos los casos.

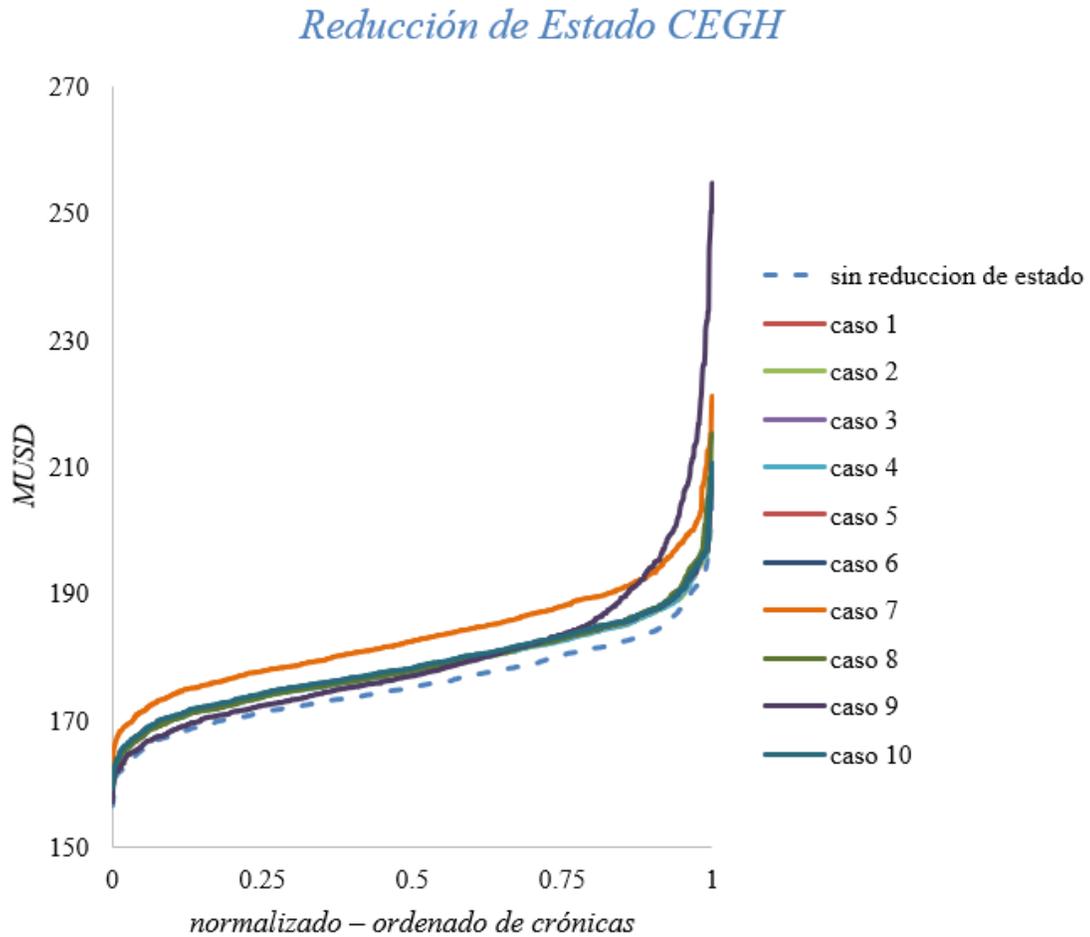


Figura 2. Resultados de matriz de casos Reducción de Estado CEGH

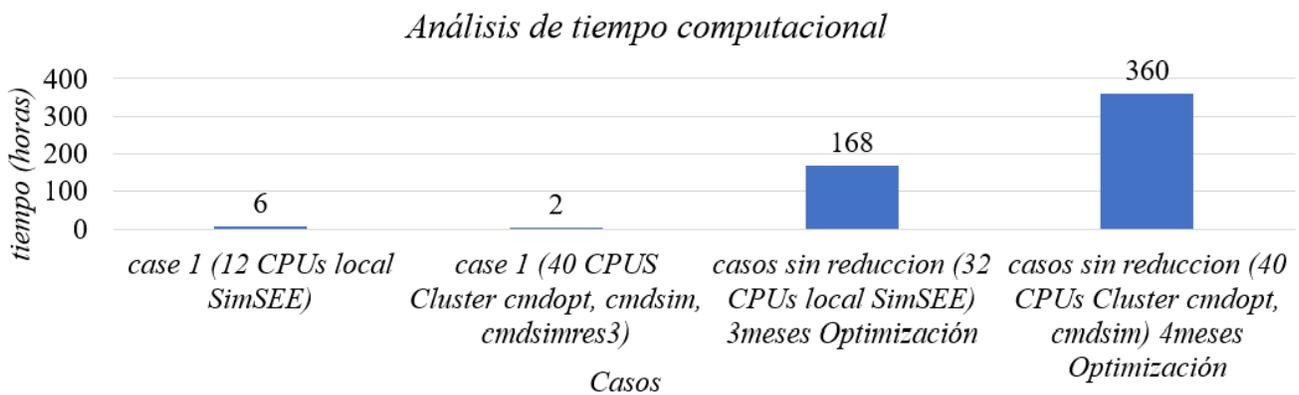
4.5. Análisis de Costo Computacional

Se realizó una estimación y extrapolación de tiempo en función a la cantidad de pasos aplicables para optimizaciones en Clúster HPC.

Tabla 3. Matriz de Casos representativos para análisis de costo computacional

Casos	tiempo estimado
case 1 (12 CPUs local SimSEE)	4 - 6 horas
case 1 (40 CPUS Cluster cmdopt, cmdsim, cmdsimres3)	40 - 120 minutos
casos sin reduccion (32 CPUs local SimSEE) 3meses Optimización	5 - 7 días
casos sin reduccion (40 CPUs Cluster cmdopt, cmdsim) 4meses Optimización	11 - 15 días

Se puede notar la tendencia en crecimiento exponencial del tiempo de optimización requerido para un modelamiento sin reducción de estado. A la vez, se considera la importancia de la reducción de estado hacia la disminución del costo computacional con respuesta de valor esperado estable y consistente a la tendencia operacional del sistema.


Figura 3. Resultados de tiempo en horas de optimización para diferentes capacidades computacionales definidas en N° CPUs

Además, tomando en cuenta los datos de simulaciones se realizó la interpretación numérica y proyección expandida con criterio de extrapolación lineal para obtener una ecuación. Esta ecuación desarrollada permite estimar el tiempo computacional para una estación de computación con capacidad sobre los 40 núcleos en base al número de pasos requeridos para la optimización (recursión de Bellman), como se muestra en Fig. 4.

Es importante mencionar que estas estimaciones son aplicables solo para este sistema interconectado en particular.

Extrapolación Lineal de tiempo de Optimización

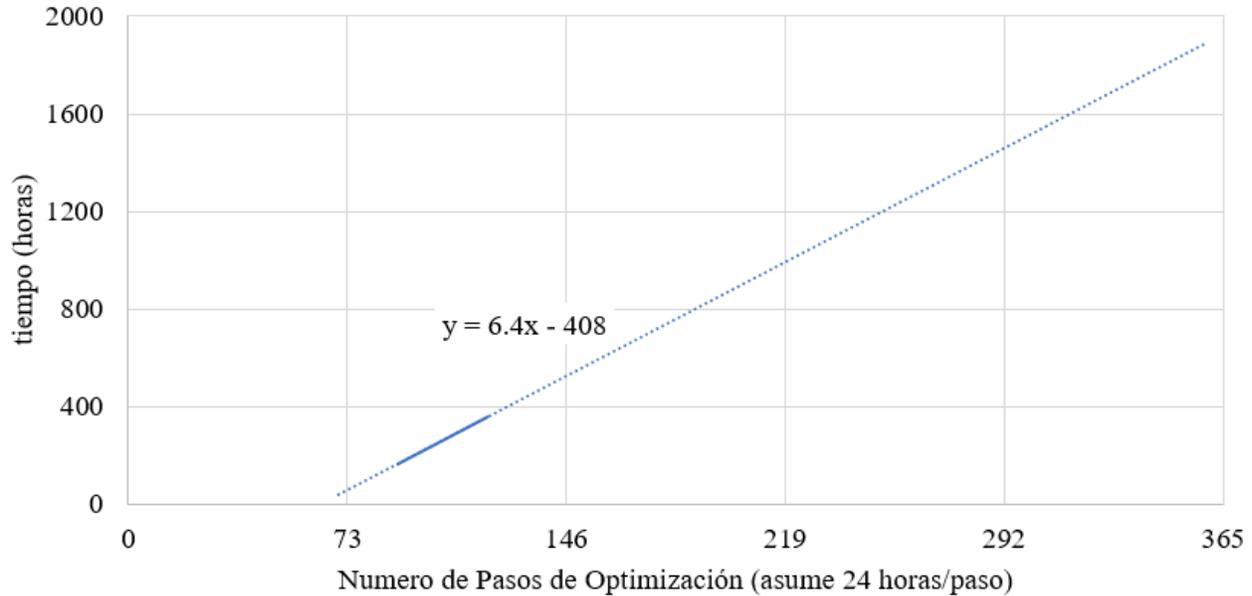


Fig. 4. Criterio de extrapolación lineal para casos de estimación de tiempo en función de numero de pasos

4.6. Análisis de ponderación de Casos

Se generó un sistema ponderado por código desarrollado en Python para categorizar los casos. Esto permite obtener una esquematización de los casos basados en sus costos y riesgos.

A continuación, se presentan los códigos desarrollados en Python para la aplicación de ponderaciones desde resultados SimSEE.

```
import pandas as pd

# Cargar archivo de crónicas
df = pd.read_excel("results2_5.xlsx", header=None)

# Definir nombres de casos
case_names = [f'case {i}' for i in range(1, 10)] + ['sin reduccion de estado']
df_chronicles = df.iloc[4:(4 + 1000), :len(case_names)].copy()
df_chronicles.columns = case_names
df_chronicles = df_chronicles.apply(pd.to_numeric, errors='coerce')
df_chronicles = df_chronicles[case_names]

# Calcular estadísticas
expected = df_chronicles.mean()
cvar_best = df_chronicles.apply(lambda x: x.nsmallest(int(0.05 * len(x))).mean())
cvar_worst = df_chronicles.apply(lambda x: x.nlargest(int(0.05 * len(x))).mean())

# Crear DataFrame
df_indicators = pd.DataFrame({
    'Expected Value': expected,
    'CVaR 5% Lowest Costs': cvar_best,
    'CVaR 5% Highest Costs': cvar_worst
})

# Rankings individuales
df_indicators['Rank Expected'] = df_indicators['Expected Value'].rank(ascending=True).astype(int)
df_indicators['Rank CVaR Best'] = df_indicators['CVaR 5% Lowest Costs'].rank(ascending=True).astype(int)
df_indicators['Rank CVaR Worst'] = df_indicators['CVaR 5% Highest Costs'].rank(ascending=True).astype(int)
```

```

# Ponderación
w_expected = 1
w_best = 1
w_worst = 4

# Ranking total ponderado
df_indicators['Weighted Total Rank'] = (
    w_expected * df_indicators['Rank Expected'] +
    w_best * df_indicators['Rank CVaR Best'] +
    w_worst * df_indicators['Rank CVaR Worst']
)

# Ranking final
df_indicators['Composite Rank'] = df_indicators['Weighted Total Rank'].rank(ascending=True).astype(int)

# Función ordinal
def ordinal(n):
    return f"{n}{'tsnrhtdd'[(n//10%10!=1)*(n%10<4)*n%10::4]} place"
df_indicators['Place'] = df_indicators['Composite Rank'].apply(ordinal)

# Reordenar columnas
df_export_full = df_indicators[[
    'Expected Value',
    'Rank Expected',
    'CVaR 5% Lowest Costs',
    'Rank CVaR Best',
    'CVaR 5% Highest Costs',
    'Rank CVaR Worst',
    'Weighted Total Rank',
    'Composite Rank',
    'Place'
]]

# Exportar Excel
df_export_full.to_excel("ranked_indicators_detailed_output.xlsx")
print("Archivo Excel generado con rankings detallados.")
    
```

Sea $C_{i,j}$ el costo observado en la crónica i del caso j , donde:

- $i = 1, 2, \dots, 1000$ (número de crónicas)
- $j = 1, 2, \dots, N$ (número de casos)

Valor Esperado (VE):

$$VE_j = \frac{1}{1000} \sum_{i=1}^{1000} C_{i,j}$$

CVaR Mejor 5% (Costos más bajos):

Sea S_j^{asc} el conjunto de los 5% menores costos del caso j , es decir los 50 valores más bajos:

$$\text{CVaR}_{\text{mejor},j} = \frac{1}{50} \sum_{C \in S_j^{\text{asc}}} C$$

CVaR Peor 5% (Costos más altos):

Sea S_j^{desc} el conjunto de los 5% mayores costos del caso j , es decir los 50 valores más altos:

$$\text{CVaR}_{\text{peor},j} = \frac{1}{50} \sum_{C \in S_j^{\text{desc}}} C$$

Ranking individual (ordinal)

Se calculan los rankings por orden ascendente de cada indicador:

- R_j^{VE} : Ranking de VE_j
 - R_j^{mejor} : Ranking de $\text{CVaR}_{\text{mejor},j}$
 - R_j^{peor} : Ranking de $\text{CVaR}_{\text{peor},j}$
-

Ranking Total Ponderado (RTP):

$$\text{RTP}_j = 1 \cdot R_j^{\text{VE}} + 1 \cdot R_j^{\text{mejor}} + 4 \cdot R_j^{\text{peor}}$$

Ranking Compuesto Final (RCF):

Se ordenan los valores RTP_j de menor a mayor, y se asigna un ranking final RCF_j .

Table 4. Ranking de casos con ponderaciones

Casos	Rank Valor Esperado	Rank mejor 5%	Rank CVaR peor	Peso Total	Rank	Lugar
caso 1	6	7	5	33	5	5th Lugar
caso 2	3	5	2	16	2	2nd Lugar
caso 3	4	6	4	26	4	4th Lugar
caso 4	2	4	3	18	3	3rd Lugar
caso 5	7	8	7	43	7	7th Lugar
caso 6	8	9	6	41	6	6th Lugar
caso 7	5	3	9	44	8	8th Lugar
caso 8	10	2	10	52	10	10th Lugar
caso 9	9	10	8	51	9	9th Lugar
sin reduccion de estado	1	1	1	6	1	1st Lugar

4.7. Análisis de Sensibilidad

Los resultados son estables al cambio de semilla. Variaciones en costos esperados son menores a 0.2 MUSD.

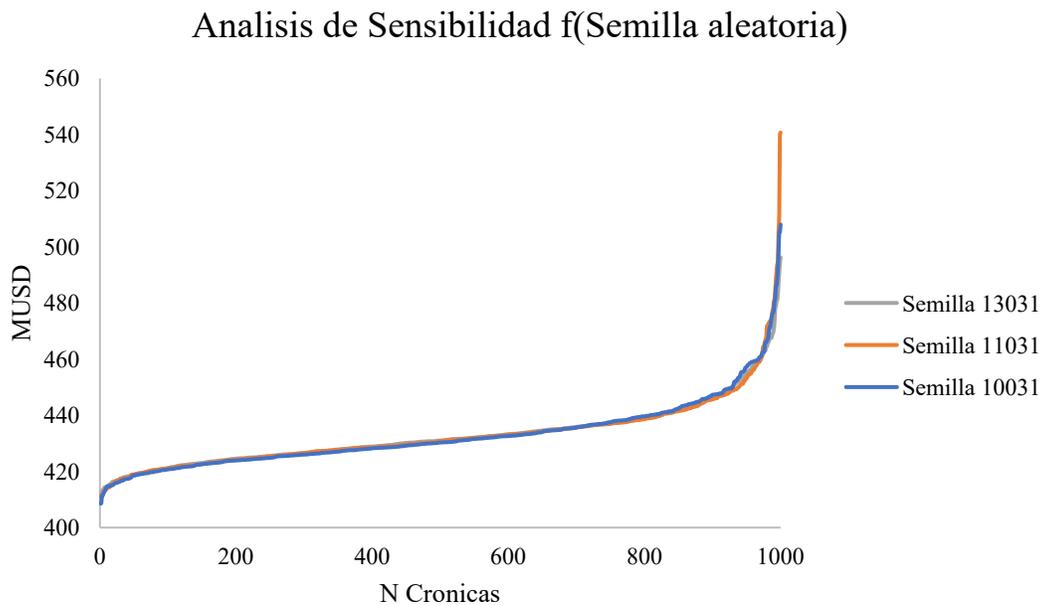


Figura 5. Análisis de sensibilidad en función de semilla aleatoria

A continuación, se muestra la Tabla 5 con resultados de costo esperado, riesgo de mejores casos y peores casos CVaR.

Tabla 5. Resultados de Análisis de Sensibilidad

	Semilla 13031	Semilla 11031	Semilla 10031	Unidad Monetaria
Costo esperado	432.90	432.85	432.76	[MUSD]
Costo con riesgo 5% de ser excedido.	455.22	453.32	457.24	[MUSD]
Costo CVaR(5%).	465.75	470.80	469.35	[MUSD]

5. Conclusiones

- Se logró mejorar la tendencia de riesgo en costo para el caso de la sala obtenida en ADME, caso 1 denominado en la matriz de casos de simulación
- Mayor cobertura de Salto: si Salto tiene gran influencia en la operación del sistema, incluirlo en más de un vector permite que sus variaciones se reflejen más finamente.
- Se puede mejorar la representación estadística de los estados del sistema en presencia de alta correlación espacial con Bonete/Palmar.
- Colinealidad innecesaria: si la información de Salto ya está bien capturada en H_S, repetirlo en H_RN puede introducir redundancia.
- Se puede diluir la variabilidad de otras cuencas al repartir demasiado peso a una misma serie.
- Cmg Ar y Br pueden interferir con la interpretación de los vectores: H_RN que ya no representan exclusivamente la zona Bonete–Palmar.

6. Posibles futuros trabajos

- Utilizar Aprendizaje Automático DL o Inteligencia Artificial AI para automatizar cambios en ponderaciones de valores dentro de la matriz de reducción de estado para encontrar mejores estimaciones de costos.
- Desarrollar casos que involucren expansión de hidrogenación por bombeo para analizar influencia de la reducción de la dimensionalidad.