

Impacto de la reducción de estado del CEGH de aportes hidráulicos

Autores:

Francisco Martinez

Trabajo final, curso SimSEE

IIE – FING – UDELAR

27/07/2025

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.

Esquema de Presentación

- Introducción
 - Objetivos
 - Hipótesis del Trabajo
- Metodología
 - Modelado Energético
 - CEGH
- Resultados
- Conclusiones
- Trabajos Futuros

Objetivos

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.

Hipótesis de trabajo

- 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.

¿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 (e.g. caudales, precios, indicadores climáticos).

Permite representar múltiples variables originales usando pocos ejes sintéticos (e.g. CEGH_1, CEGH_2, CEGH_3).

¿Cómo funciona?

1. Transformación gaussiana:

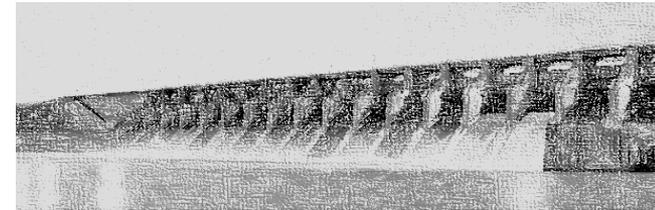
1. Las variables originales se transforman a un **espacio gaussiano estándar** (con media 0, varianza 1).
2. Se eliminan asimetrías o escalas heterogéneas.

2. Análisis de correlación:

1. Se aplica un análisis para encontrar **combinaciones principales** que explican la varianza conjunta.

3. Proyección en hiperesfera:

1. Los estados se proyectan en una **hiperesfera unitaria** (norma = 1), conservando relaciones angulares (correlaciones).
2. Esto permite definir una malla discreta con **baja cantidad de nodos** pero representativa.



SIMULATION

During simulation, all series variables are available

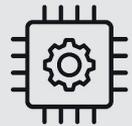
- iN34
- Bonete
- Palmar
- Salto
- cmgAR_Mer
- cmgBR_S

H_{RN} H_S H_S

Projection to reduced state

POLICY (SimSEE)

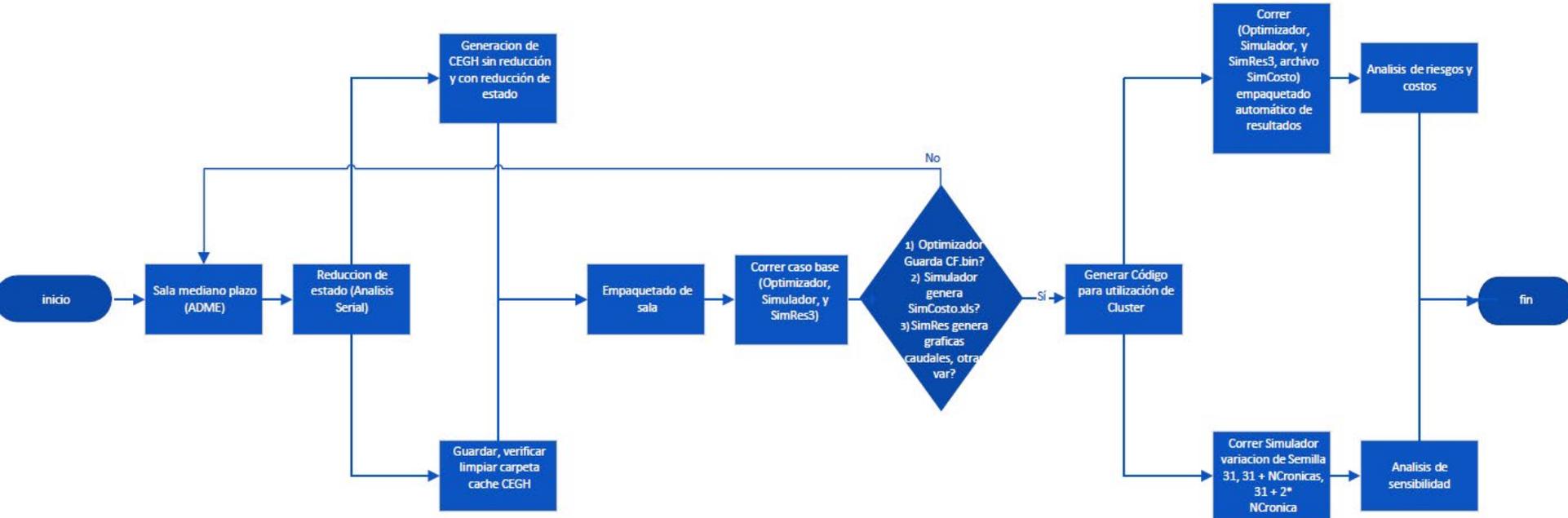
Decision-making policy is based only on reduced state projection



Metodología

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



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

Simulación: 06/25/2025 00:00 09/23/2025 00:00

Paso de tiempo: 24 Horas Minutos

Pasos de optimización: 90 Pasos de simulación: 90

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

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: 06/25/2025 00:00 09/23/2025 00:00

Horizonte de guarda para simulación: 12/30/1899 00:00

Paso de tiempo: 24 Horas Minutos

Pasos de optimización: 120 Pasos de simulación: 90

Parámetros del Modelamiento Hidroeléctricas Embalse

B

Fecha: (M/d/yyyy h:nn AMPM) Auto Capa: 0

Periódica?

Parámetros 1 Parámetros 2 Parámetros 3

Cota mínima operación[m]	70
Cota máxima operación[m]	81
Puntos cota-volumen h[m]	70.00; 75.50; 81.00
Puntos cota-volumen V[Hm3]	0.00; 2828.00; 8208.00
Área de la cuenca[ha]	0
Cota de la descarga para cálculo del salto[m]	53.8
Coefficientes de afectación del salto por caudal erogado(caQE)	0.00221
Coefficientes de afectación del salto por caudal erogado(cbQE)	-3.6E-7
Rendimiento[p.u.]	0.87
Potencia máxima generable[MW]	38.8
Potencia mínima por unidad [MW]	0
Caudal máximo turbinable[m3/s]	170
Factor de disponibilidad[p.u.]	0.99
Tiempo de reparación[horas]	48
Ca filtración[m3/s]	6.296
Cb filtración[m2/s]	0.255
Qa muy seco[m3/s]	140
Cota mínima para vertimiento[m]	77.52
Cota máxima para vertimiento[m]	86
Caudal vertido con la cota máxima[m3/s]	7630

Control de crecida

Activar Cota [m] Erogado [m3/s]

Inicio: 80.7 0

Medio: 82 1990

Fin: 83 4510

$h >= h_inf$ [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: <Ninguna>

P

36
42
36.00; 38.50; 41.00
0.00; 620.00; 1370.00
0
5.5
0.00474
-4.94E-7
0.896
111
0
460
0.99
48
2.997
1.846
200
36
44
21499

EditarCentralCoeficiente

Central: THidroDePasada, Baygorria

Coefficiente: 0.99

Modo de conector:

Turbinado Vertido Bombeo

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

30
35.5
30.00; 32.50; 35.50
0.00; 532.50; 1403.50
0
4.5
0.00181
-9.2E-8
0.858
67.5
0
315
0.99
48
0
0
0
30
36.5
23500

Parámetros del erogado

- Imponer QErogadoMín por Poste
- QErogado mínimo[m3/s]: 450

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

Analisis Serial - Archivo CEGH

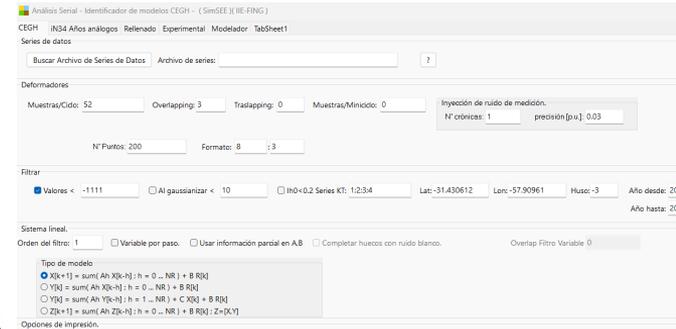
Reducción de estado

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	0.0000	EstadoInicial	0
probs		0.2000	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000				
nd2	5	H_RN	0.0000	0.4000	0.0000	0.0000	0.3000	0.3000	EstadoInicial	0
probs		0.2000	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000				
nd3	5	H_S	0.0000	0.0000	0.0000	0.4000	0.3000	0.3000	EstadoInicial	0
probs		0.2000	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000				

Se implementa la metodología planteada:

- Variación de parámetros y construcción de casos infieren:
 - 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



Matriz de Casos

- Los datos de entrada de anomalía de temp. del Pacífico tienen un estado preferencial
- Variaciones específicas en caudales de entrada a hidroeléctricas

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

- Tabla no incluye casos sin reducción de estado $n_{VE}=6$

Optimización – Simulación – Post Proceso utilizando HPC Cluster

➤ Códigos desarrollados para optimización *cmdopt* en cluster HPC

➤ También, se realizó el proceso de manera Local para verificación de resultados utilizando interfaz gráfica SimSEE

```
# ----- Configuración de rutas -----
bindir="██████████/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 -----
"${bindir}/simsee_sfdb" setestadocorrída "${ejecutor}" 5
echo "✅ Proceso finalizado correctamente."

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

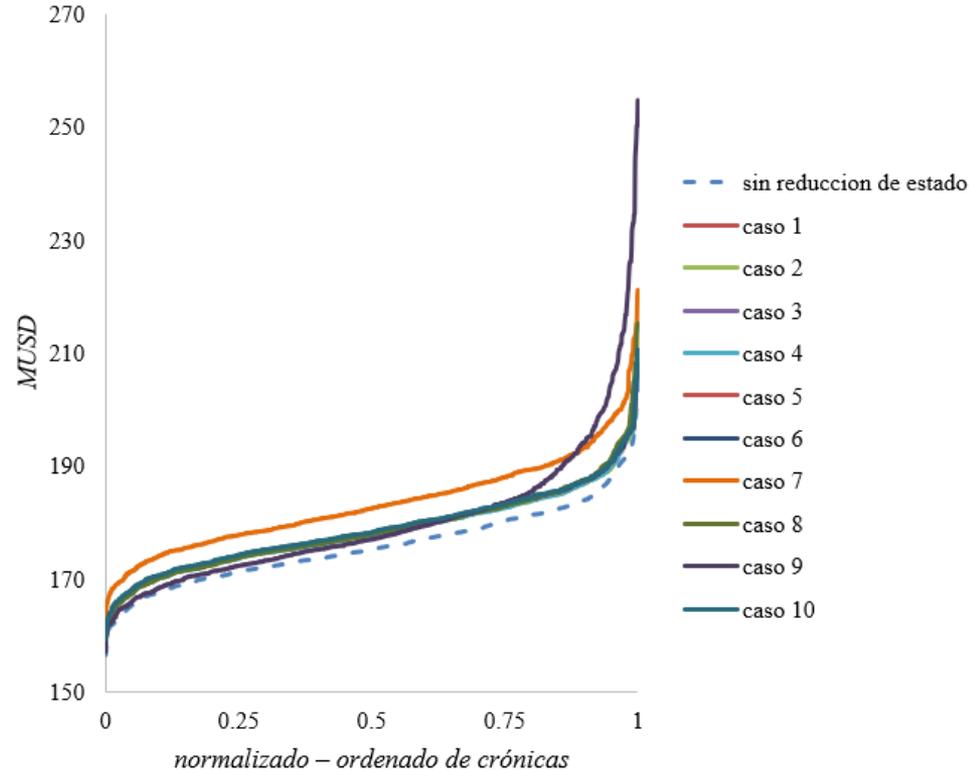
# ----- Limpieza -----
rm -f "${archizip}"
rm -rf "${tmprundir:?}/${ejecutor:?}"/*
rm -rf "${tmpdirsala:?}"/*
```

Resultados del estudio

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

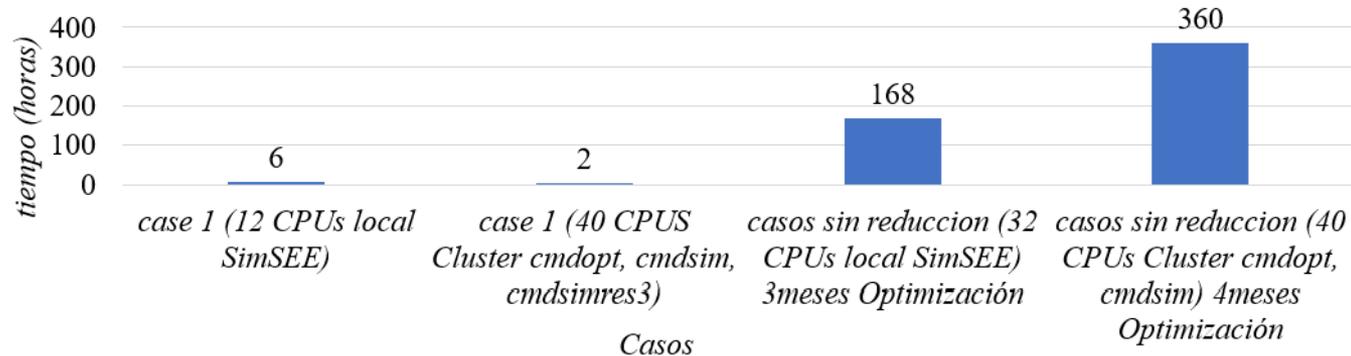
- Notable inflación del valor esperado del costo en el CVar5% (peor 5% de 1000 escenarios) en casos con cmgAr y Br
- Caso sin reducción indica valores MUSD menores comparados

Reducción de Estado CEGH



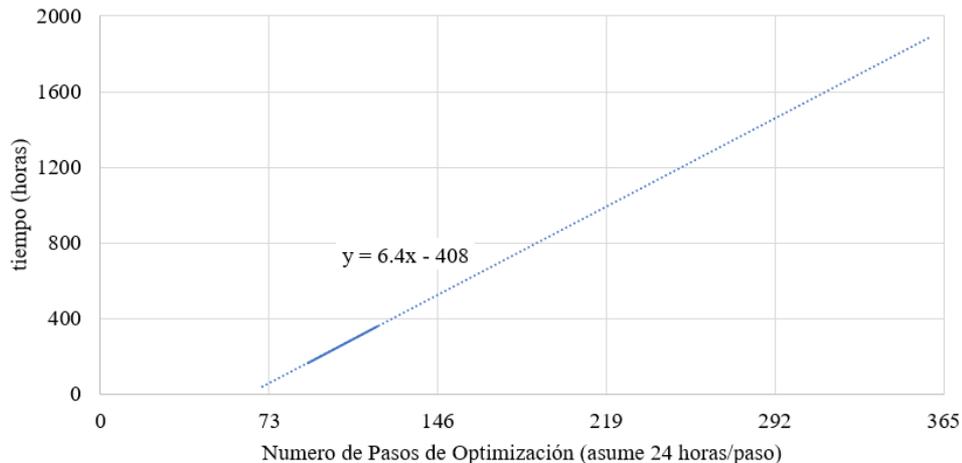
Resultados del estudio

Análisis de tiempo 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

Extrapolación Lineal de tiempo de Optimización



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

Resultados del estudio

- Sistema ponderado por código desarrollado en Python para categorizar los casos

```
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.")
```

Resultados del estudio

➤ Sistema ponderado por código desarrollado en Python para categorizar los casos

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)

$$VE_j = \frac{1}{1000} \sum_{i=1}^{1000} C_{i,j} \quad \text{CVaR}_{\text{mejor},j} = \frac{1}{50} \sum_{C \in S_j^{\text{asc}}} C \quad \text{CVaR}_{\text{peor},j} = \frac{1}{50} \sum_{C \in S_j^{\text{desc}}} C$$

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

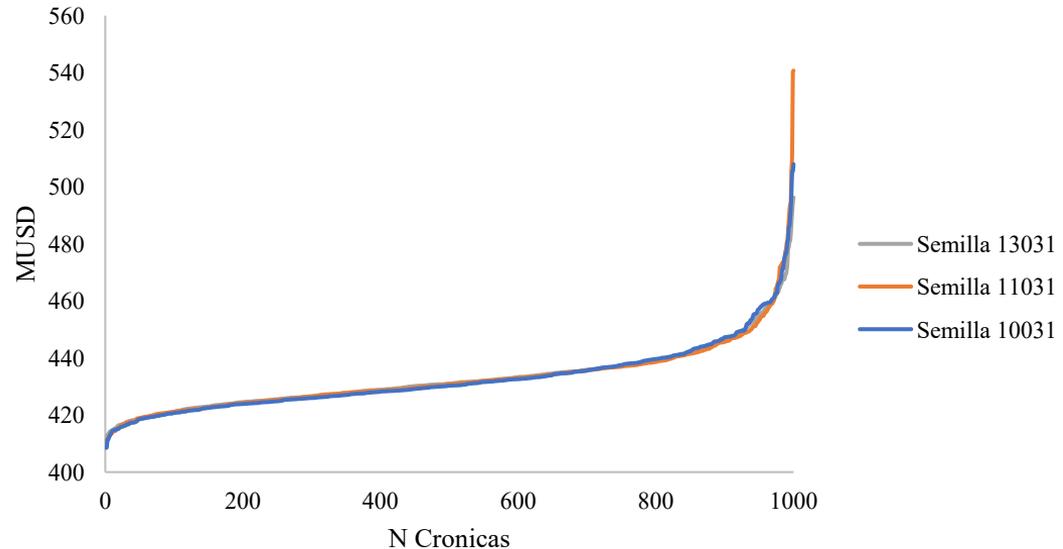
Casos	Rank Valor Esperado	Rank mejor 5%	Rank CVaR peor	Peso Total	Rank	Lugar
caso 1	6	7	5	33	5	5th Lugar
caso 2	3	5	2	16	2	2nd Lugar
caso 3	4	6	4	26	4	4th Lugar
caso 4	2	4	3	18	3	3rd Lugar
caso 5	7	8	7	43	7	7th Lugar
caso 6	8	9	6	41	6	6th Lugar
caso 7	5	3	9	44	8	8th Lugar
caso 8	10	2	10	52	10	10th Lugar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

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]

- Resultados estables al cambio de semilla
- Variaciones en costos esperados son menores a 0.2 MUSD

Análisis de Sensibilidad f(Semilla aleatoria)



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.

Posibles trabajos futuros

- 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.

FIN

- Gracias por vuestra atención.