

Evaluación de las compras y ventas de un proyecto de H2 al mercado eléctrico uruguayo

Grupo 2:

Autores: Ignacio Bentancur, Gonzalo Ermida y Natalia Wener

Instituto de Ingeniería Eléctrica - FING.
Trabajo final curso SimSEE edición 2024
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

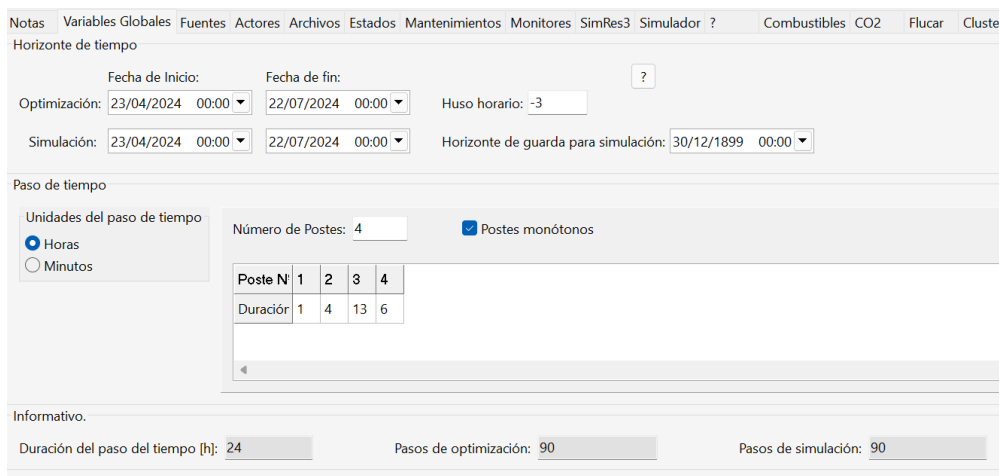
Este trabajo presenta el modelado en SimSEE de una planta de generación de hidrógeno (hidrolizador) con autogeneración renovable e interconexión con el sistema nacional de Montevideo. La carga de la planta debía ser modelada como una demanda asociada al nodo de la planta, y su generación, con un actor eólico y otro solar de 200 MW de potencia instalada cada uno. El análisis de lo anterior se debía realizar en seis etapas acumulativas y dependientes, y este trabajo detalla lo realizado en SimSEE y los resultados obtenidos en las seis partes.

2. Hipótesis de trabajo

En lo que refiere a la sala base para el análisis (Sala_VATES_MP_20240423), se tomó como punto de partida una sala de mediano plazo del sistema nacional interconectado (SIN) descargada de la página de ADME (<https://adme.com.uy/>) que fue simplificada (a nivel de actores) en el curso. Esta sala, a la que se denomina “sala MP simple”, es a la que se agregaron actores, fuentes, capas, escenarios y demás elementos necesarios en cada parte del estudio.

Conocidos los elementos constitutivos de la sala se definió setear en la pestaña “Variables Globales” de esta un horizonte de optimización y simulación de 3 meses cada uno (ver Figura 3.1). En este caso era correcto que los horizontes temporales fuesen coincidentes, ya que se utilizó un enganche para la sala. De no haberse utilizado habría sido necesario extender el fin del horizonte de optimización a fin de evitar que el costo de los recursos fuese nulo al fin del horizonte de simulación.

Para el horizonte de simulación propuesto se optó por un paso temporal diario de 4 postes horarios. Cada poste contiene un promedio de la demanda neta asociada al SIN (demanda real menos la generación renovable) ordenada de mayor a menor de la duración de su intervalo. Por ejemplo, el poste 1 siempre almacena las potencias medias y parámetros asociados a la hora de mayor demanda neta del día.



Notas Variables Globales Fuentes Actores Archivos Estados Mantenimientos Monitores SimRes3 Simulador ? Combustibles CO2 Flucar Cluste

Horizonte de tiempo

Fecha de Inicio: Fecha de fin: ?

Optimización: 23/04/2024 00:00 22/07/2024 00:00 Huso horario: -3

Simulación: 23/04/2024 00:00 22/07/2024 00:00 Horizonte de guarda para simulación: 30/12/1899 00:00

Paso de tiempo

Unidades del paso de tiempo

☒ Horas ☐ Minutos

Número de Postes: 4 ☒ Postes monótonos

Poste N°	1	2	3	4
Duración	1	4	13	6

Informativo.

Duración del paso del tiempo [h]: 24 Pasos de optimización: 90 Pasos de simulación: 90

Figura 3.1. Configuración de la pestaña Variables Globales de la sala modificada.

En la Figura 3.1 se observa que los 3 meses elegidos resultaron en 90 pasos de optimización y simulación (días) y que el paso temporal fue de 24 hs.

3. Metodología

A cada una de las 6 partes del estudio se le asoció una capa, una planilla SimRes3 y un escenario. Todos los escenarios contienen las capas de la sala base y todas las de las partes anteriores.

Para ejemplificar lo anterior, la parte 1 tiene asociada la capa 10, la planilla SimRes3 “Variables_parte_1” y el escenario “Parte_1”.

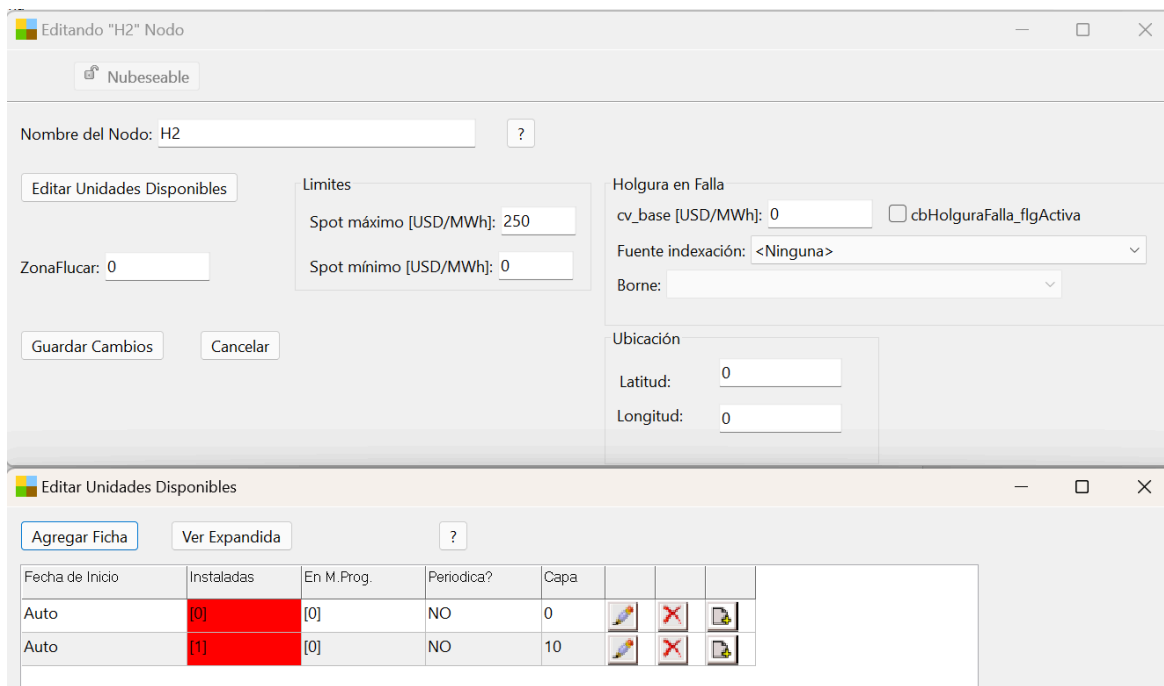
Las partes 1 a 5 fueron optimizadas y simuladas con la misma configuración: optimización con la semilla 40031 y 7 crónicas y simulación con la semilla 10031 y 100 crónicas.

4. Resultados del estudio

4.1. Parte 1

En esta parte se requería dimensionar la demanda del hidrolizador para que, siendo constante en todo el horizonte temporal, pudiese ser alimentada con una probabilidad del 70% por la potencia media diaria del conjunto del parque eólico y solar asociados al hidrolizador.

Primero se creó dentro de la sala MP simple el nodo asociado al hidrolizador, nodo “H2”. Este es un actor del grupo “Red Eléctrica” que permite representar el proyecto con todos sus elementos constitutivos y vínculos con la red de la sala base, y se le deben asociar características estáticas y dinámicas (unidades disponibles), tal y como se observa en la Figura 4.1.



Editando "H2" Nodo

Nubeseable

Nombre del Nodo: H2

Editar Unidades Disponibles

ZonaFlucar: 0

Guardar Cambios Cancelar

Límites

Spot máximo [USD/MWh]: 250

Spot mínimo [USD/MWh]: 0

Holgura en Falla

cv_base [USD/MWh]: 0 ☐ cbHolguraFalla_flgActiva

Fuente indexación: <Ninguna>

Borne:

Ubicación

Latitud: 0

Longitud: 0

Editar Unidades Disponibles

Agregar Ficha Ver Expandida

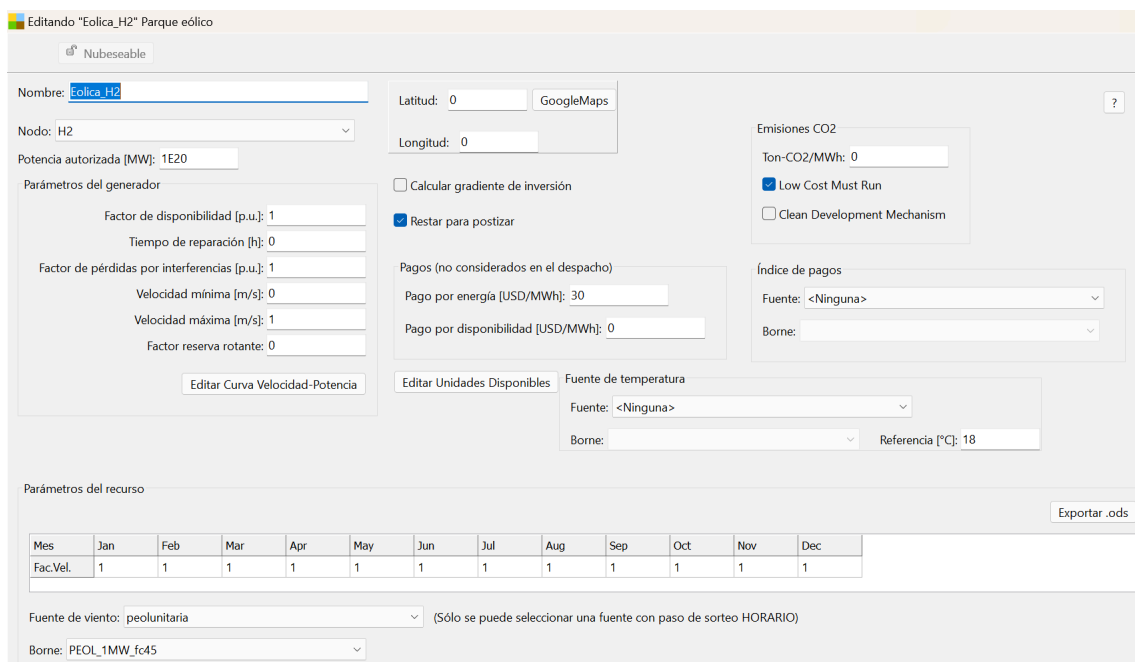
Fecha de Inicio	Instaladas	En M. Prog.	Periodica?	Capa			
Auto	[0]	[0]	NO	0			
Auto	[1]	[0]	NO	10			

Figura 4.1. Características estáticas (superior) y dinámicas (inferior) del nodo H2.

Como se adelantó en Metodología a este primer inciso del trabajo se le asoció la capa 10, por lo que dentro de las unidades disponibles del actor se seteó 1 unidad instalada en la capa 10 y 0 unidades en la capa 0 (capa base). De esta manera, tal y como se vio en el curso, los elementos asociados al nodo H2 en este inciso sólo se encuentran en servicio si se agrega a los escenarios la capa 10. Sin perder generalidad y por similitud con el nodo Montevideo de la sala en este nodo también se seteó un techo del spot de 250 USD/MWh, empero dicho índice nunca se utilizó en el trabajo.

Con el punto de conexión definido y configurado se procedió a vincularlo con los siguientes actores:

-Generador Eólico: Este actor era necesario para modelar los 200 MW de potencia eólica del proyecto. Para su creación se accedió a la pestaña “Eolicas” dentro de la pestaña “Actores” de la sala y se seleccionó un actor de tipo “Parque eólico”. Se le asignó el nombre “Eolica_H2”, se lo asoció al nodo H2 y se setearon las características estáticas y dinámicas de las Figuras 4.2 y 4.3, respectivamente.

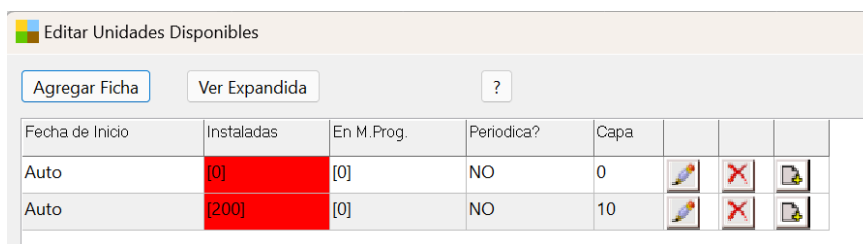


El formulario de configuración para el actor "Eolica_H2" (Parque eólico) incluye los siguientes campos:

- Nombre:** Eolica_H2
- Nodo:** H2
- Potencia autorizada [MW]:** 1E20
- Parámetros del generador:**
 - Factor de disponibilidad [p.u.]: 1
 - Tiempo de reparación [h]: 0
 - Factor de pérdidas por interferencias [p.u.]: 1
 - Velocidad mínima [m/s]: 0
 - Velocidad máxima [m/s]: 1
 - Factor reserva rotante: 0
- Emisiones CO2:**
 - Ton-CO2/MWh: 0
 - ☒ Low Cost Must Run
 - ☐ Clean Development Mechanism
- Pagos (no considerados en el despacho):**
 - Pago por energía [USD/MWh]: 30
 - Pago por disponibilidad [USD/MWh]: 0
- Índice de pagos:**
 - Fuente: <Ninguna>
 - Borne:
- Fuente de temperatura:**
 - Fuente: <Ninguna>
 - Borne:
 - Referencia [°C]: 18
- Parámetros del recurso:**

Mes	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Fac.Vel.	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
- Fuente de viento:** peolunitaria (Nota: Sólo se puede seleccionar una fuente con paso de sorteo HORARIO)
- Borne:** PEOL_1MW_fc45

Figura 4.2. Características estáticas del actor generador Eolica_H2.



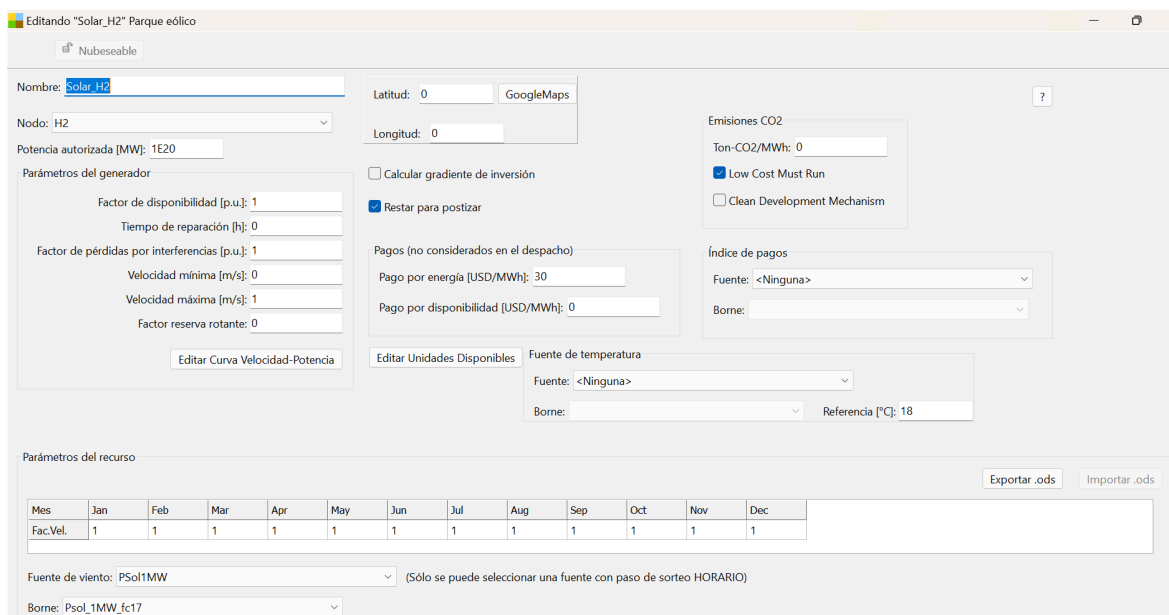
Fecha de Inicio	Instaladas	En M.Prog.	Periodica?	Capa			
Auto	[0]	[0]	NO	0			
Auto	[200]	[0]	NO	10			

Figura 4.3. Características dinámicas del actor generador Eolica_H2.

Para facilitar el análisis se simplificaron características estáticas del actor como el factor de disponibilidad, tiempo de reparación y factor de pérdidas, lo que llevó al mismo a ser “ideal” en dichas áreas. Siguiendo la línea de la simplificación, se utilizó un factor de velocidad idéntico mes a mes y una fuente de viento típica de 1 MW (“peolunitaria” en la Figura 4.2).

Como consecuencia de que la fuente del actor es de 1 MW además de que el mismo solo tuviera máquinas instaladas en la capa 10 (y 0 en la capa 0), se debió setear que las mismas fuesen 200 a fin de que se pudieran simular correctamente los 200 MW que debía dar el actor.

-Generador Solar: Este actor era necesario para modelar los 200 MW de potencia solar fotovoltaica del proyecto. El mismo se modeló como un actor eólico, en vez de solar, porque se utilizó una fuente de potencias solares en lugar de irradiancias solares. Teniendo en cuenta lo anterior y repitiendo el procedimiento para crear el actor Eolica_H2, se denominó al solar como “Solar_H2” y se le asociaron las características estáticas de la Figura 4.4. En lo que refiere a sus características dinámicas, las mismas también coincidieron en valor y consideraciones con las del actor eólico (Figura 4.3).



Nombre: Solar_H2

Nodo: H2

Potencia autorizada [MW]: 1E20

Parámetros del generador

Factor de disponibilidad [p.u.]: 1

Tiempo de reparación [h]: 0

Factor de pérdidas por interferencias [p.u.]: 1

Velocidad mínima [m/s]: 0

Velocidad máxima [m/s]: 1

Factor reserva rotante: 0

Emisiones CO2

Ton-CO2/MWh: 0

☒ Low Cost Must Run

☐ Clean Development Mechanism

Pagos (no considerados en el despacho)

Pago por energía [USD/MWh]: 30

Pago por disponibilidad [USD/MWh]: 0

Índice de pagos

Fuente: <Ninguna>

Borne: <Ninguna>

Fuente de temperatura

Fuente: <Ninguna>

Borne: <Ninguna>

Referencia [°C]: 18

Parámetros del recurso

Mes	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
FacVel	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Fuente de viento: PSol1MW (Sólo se puede seleccionar una fuente con paso de sorteo HORARIO)

Borne: Psol_1MW_fc17

Figura 4.4. Características estáticas del actor generador Solar_H2.

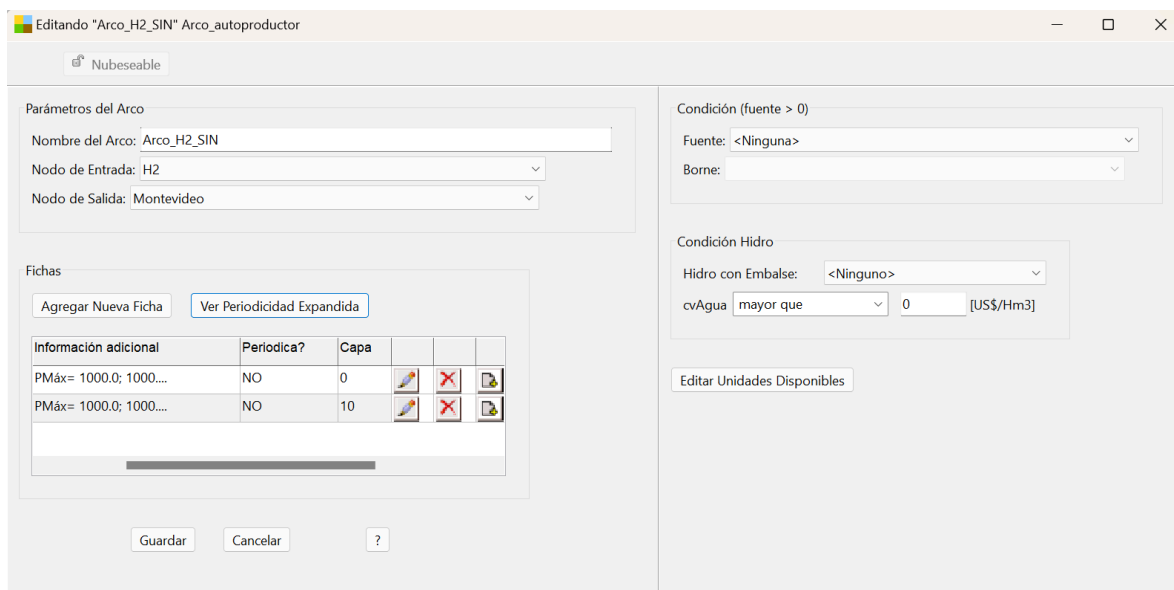
En la Figura 4.4 se aprecia que el actor solar también se asoció al nodo H2 (siguiendo la lógica del modelado planteado) y que se utilizó una fuente unitaria de potencias solares “PSol1MW” como curva típica de las mismas. Este tope de 1 MW fue lo que llevó a que en las características dinámicas del actor fueran seteadas 200 unidades instaladas en la capa 10 y 0 en la 0, para modelar los 200 MW de potencia que se necesitaban y para que el actor sólo estuviera operativo en los escenarios donde la capa 10 está presente.

A fin de facilitar la interpretación de los resultados, para el actor solar se mantuvieron las mismas simplificaciones de modelado que para el actor eólico.

Para integrar estos generadores a la red y cuantificar la potencia que eran capaces de entregar en cada paso de tiempo, se creó un arco de tipo autoprodutor desde el nodo H2 hacia el nodo Montevideo (SIN). El modelado del actor se detalla a continuación.

-Arco Autoprodutor H2-SIN: Este arco conecta al nodo H2 (origen) con el nodo Montevideo (destino), permitiendo el flujo de potencia desde los generadores del proyecto hacia la red eléctrica del SIN. Este arco hace las veces de línea de transmisión unidireccional y permite cerrar el balance del nodo H2.

Para su creación se utilizó un actor del tipo “Arco_autoprodutor”, dentro del grupo “Red Eléctrica” de la sala, al que se denominó “Arco_H2_SIN”. La elección del tipo autoprodutor no fue aleatoria y su relevancia recae en la parte 2 de este trabajo. Las características estáticas y dinámicas de este actor se presentan en la Figura 4.5.



Parámetros del Arco

Nombre del Arco: Arco_H2_SIN

Nodo de Entrada: H2

Nodo de Salida: Montevideo

Fichas

Agregar Nueva Ficha Ver Periodicidad Expandida

Información adicional	Periodica?	Capa			
PMáx= 1000.0; 1000...	NO	0			
PMáx= 1000.0; 1000...	NO	10			

Condición (fuente > 0)

Fuente: <Ninguna>

Borne: <Ninguna>

Condición Hidro

Hidro con Embalse: <Ninguno>

cvAgua mayor que 0 [US\$/Hm3]

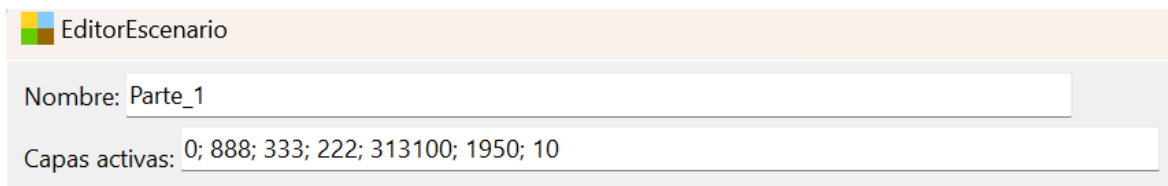
Editar Unidades Disponibles

Guardar Cancelar ?

Figura 4.5. Características estáticas y dinámicas del actor Arco_H2_SIN.

En la Figura 4.5 se aprecia la dirección del flujo a través del arco (entrada nodo H2 y salida nodo Montevideo), que se encuentra activo en la capa 10 y que su potencia máxima de intercambio es 1000MW. Este último valor fue escogido para no limitar la potencia máxima que en teoría podrían entregar el conjunto de generadores en cada paso temporal (400 MW).

Siguiendo la metodología descrita en la introducción del informe se procedió a crear un escenario autocontenido para esta parte del trabajo. En la Figura 4.6 se detalla el nombre del escenario, “Parte_1”, y sus capas activas.



EditorEscenario

Nombre:

Capas activas:

Figura 4.6. Configuración del escenario para la primera parte del estudio.

Las capas activas 0, 888, 222, 313100 y 1950 se encontraban configuradas en la sala MP simple y contienen toda la información necesaria para representar al SIN (el nodo Montevideo, sus generadores y demanda). Al dejarlas activas y agregar la capa 10 se logró dejar activo al escenario base y simular el impacto de los nuevos actores agregados.

Para visualizar la potencia de los generadores y obtener la demanda del hidrolizador se creó la planilla SimRes3 “Variables_parte_1”, asociada nuevamente a la capa 10.

Los índices considerados en la planilla fueron las potencias diarias (variable “P”) del generador eólico del nodo H2, del generador solar del nodo H2 y a través del arco del nodo H2 hasta el nodo Montevideo, la potencia horaria de los generadores eólico y solar del nodo H2 (variable “PHoraria”) y un índice asociado a la sala para pasar los resultados diarios a resultados horarios (obtenidos a través de los postizados). La variable “PHoraria” de los generadores se utilizó para visualizar el andamio horario “real” de los mismos, ya que las fuentes empleadas en el modelado de los actores ya estaban precargadas en la sala MP simple.

Con el fin de realizar operaciones crónicas con los índices se definieron variables crónicas para las potencias diarias, potencias horarias reales para los generadores y potencias horarias aproximadas por postes para los actores descritos. En esta parte se utilizaron las operaciones crónicas “promedioPonderadoPorDurpos” para obtener las potencias diarias a partir del promedio de las mismas (ponderado por la duración de cada poste) y “Pasar_indices_a_valores_horarios” para obtener las potencias horarias reales y por postes.

Para visualizar los resultados se utilizaron las impresiones de variables crónicas “CompararValoresMultiplesCronVars” e “HistogramaGlobal”. La primera permitió analizar el balance diario y horario en el nodo H2 y la segunda obtener la probabilidad acumulada por intervalos de la suma del actor solar y eólico del nodo H2 (cuantificada por la potencia que circula por el arco autoprodutor ya que no hay demanda asociada al nodo H2).

En la Figura 4.7 se detalla cómo se configuró el histograma global para la variable crónica “P_Arco_H2_SIN_d” (potencia diaria por el arco desde el nodo H2 al nodo del SIN), ya que a partir de esta herramienta se obtuvo la magnitud de la demanda del hidrolizador.

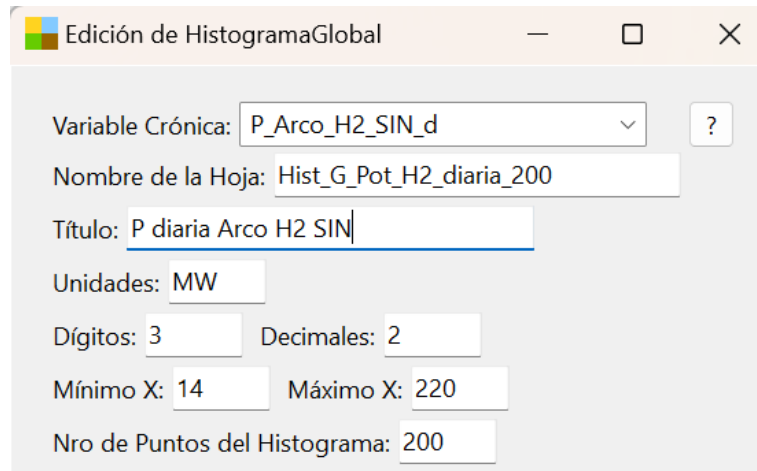


Figura 4.7. Configuración de la impresión “Histograma global” para la variable crónica P_Arco_H2_SIN_d.

Según la documentación de SimRes3 la herramienta “Histograma global” crea un excel con el histograma acumulado de todos los valores almacenados en la variable crónica seleccionada, en este caso P_Arco_H2_SIN_d. Al especificar el rango y cantidad de puntos del histograma, el excel obtenido presenta la discretización del intervalo seleccionado y la probabilidad acumulada de cada tramo.

Es relevante aclarar que los valores que forman parte del ordenamiento del histograma corresponden al análisis de cada crónica individual. El mínimo y el máximo de la Figura 4.7 (14 MW y 220 MW, respectivamente) no fueron escogidos arbitrariamente, sino a partir de simulaciones con las que se buscó setear correctamente el histograma. El elevado número de puntos del histograma (200) brindó precisión en los resultados, ya que se contaba con 200 valores de potencia diaria por el arco y su respectiva probabilidad acumulada.

Habiéndose configurado todo lo necesario para el escenario “Parte_1” se resolvió el mismo con un proceso de optimización de 7 crónicas (a partir de la semilla 40031) y uno de simulación de 100 crónicas (a partir de la semilla 10031), obteniéndose las planillas: “Balance_diario_P1”, “Potencias_horarias_reales_y_aprox” y “Hist_G_Pot_H2_diaria_200”.

En la Figura 4.8 se aprecia la potencia diaria esperada (promedio de la potencia diaria de las 100 crónicas simuladas) para la generación eólica y solar en los 90 días que simulados (resultados de la planilla “Balance_diario_P1”). Se aprecia como la potencia por el arco coincide con la suma de la de los generadores, lo que cierra el balance de potencia del nodo H2 y verifica el correcto modelado de los actores.

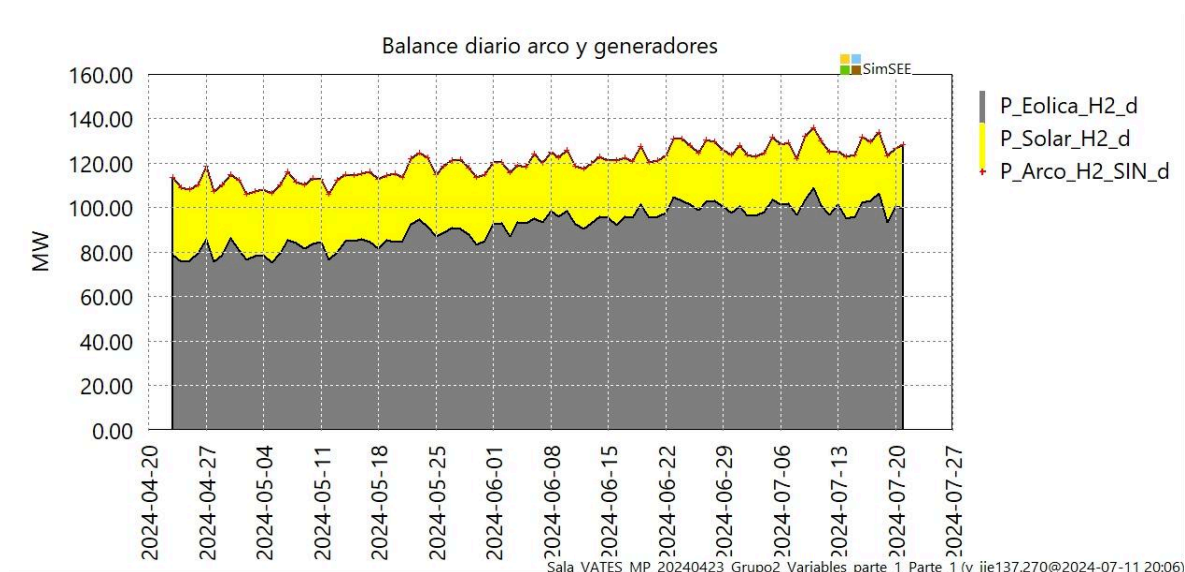


Figura 4.8. Balance diario del nodo H2. Se visualizan las potencias diarias (promedio de las 100 crónicas simuladas) de los generadores asociados al nodo y la potencia a través del arco autoprodutor para verificar el balance.

Las salidas del archivo “Potencias_horarias_reales_y_aprox” en general no son requeridas debido a su extensión, pero se destaca que resultaron fundamentales para la verificación de los balances, verificación de los modelos e interpretación de los resultados, sobretodo al simular una única crónica.

En la Figura 4.9 se presenta la sección de interés del histograma global (archivo “Hist_G_Pot_H2_diaria_200”) con la que se determinó la carga del hidrolizador.

P diaria Arco H2 SIN	Probabilidad Acumulada
91.64	21.86%
92.67	22.79%
93.71	23.71%
94.74	24.86%
95.78	25.96%
96.81	26.98%
97.85	27.99%
98.88	29.01%
99.92	30.03%
100.95	31.11%
101.99	32.24%
103.03	33.52%
104.06	34.64%
105.10	35.86%
106.13	37.12%

Figura 4.9. Tramo de interés del histograma global de la variable crónica P_Arco_H2_SIN_d. Se destaca como valor de interés la potencia de 99.92 MW correspondiente a una probabilidad acumulada de 30.03%.



Según las pautas del trabajo la potencia demandada por el hidrolizador debía lograr ser alimentada por el promedio diario de la generación eólica y solar de su proyecto en un 70% de los escenarios, es decir, que los generadores debían producir en un 70% de los escenarios una potencia superior a la demanda del nodo H2. En el histograma global obtenido para la potencia por el arco-autoprodutor, esto implica que la potencia objetivo es aproximadamente 99.91 MW, ya que solo en un 30% de los casos los generadores no podrían producir esta magnitud.

4.2. Parte 2

En esta parte se debía calcular el ingreso por ventas de excedentes al SIN que tendría el proyecto de hidrógeno con la demanda plana de 99.91 MW determinada en el inciso anterior. Los ingresos se debían valorar al precio SPOT, considerándose este último como el marginal con tope de 250 USD/MWh. Se destaca que en SimSEE el índice spot existe como tal y sólo es necesario setear su tope en las características estáticas del nodo de interés.

La capa que se asoció a este apartado fue la 11 y el escenario que modela esta parte se denominó “Parte_2”.

En la capa 11 se agregó un actor del tipo “Demanda detallada” para modelar la demanda plana del hidrolizador “DemH2” asociada al nodo H2. En la Figura 4.10 se observan las características estáticas que se asociaron al actor DemH2.

Nombre: DemH2

Nodo: H2

Demanda horaria

Archivo de demanda horaria: DemH2_sim10031y100cr_opt40031y7cr_HGlobal.bir

Crear/Exportar Nubeseat Archi

Componente aleatoria

Fuente [p.u. de la demanda]: <Ninguna> ☐ Sumar ruido

Borne:

Escalones de falla

Número de escalones: 1

Escalón	
Profundidad[p.u.]	1
Costo[USD/MWh]	133.9

Editar Unidades Disponibles

Latitud: 0

Longitud: 0

Factor de reserva [pu]: 0

Prioridad Spot: 0

☒ Sumar para postizar

Índice multiplicador de costos de falla

Fuente: <Ninguna>

Borne:

Figura 4.10. Características estáticas del actor DemH2.

Dentro del archivo de demanda horaria que figura en la Figura 4.10 como “DemH2_sim10031y100cr_opt40031y7cr.bin” se modeló la demanda plana de 99.91 MW asociada al hidrolizador. El nombre del archivo alude a la optimización y simulación del inciso 1. Adicionalmente se destaca que a la demanda DemH2 se le definió, por simplicidad, un único escalón de falla con un costo de 133.9 USD/MWh.

Dicho costo se tendrá en cuenta en la tercera parte del trabajo, pero se definió en esta parte ya que el actor demanda no cambiará en el resto del trabajo.

En la Figura 4.11 se presentan las características dinámicas escogidas para el actor DemH2. Para asociar el actor solo a la capa 11, y de forma análoga que en el apartado anterior, se le asignó 1 unidad disponible en dicha capa y 0 en la capa 0.

Editar Unidades Disponibles							
Agregar Ficha		Ver Expandida		?			
Fecha de Inicio	Instaladas	En M.Prog.	Periodica?	Capa			
Auto	[0]	[0]	NO	0			
Auto	[1]	[0]	NO	11			

Figura 4.11. Características dinámicas del actor DemH2.

Para cuantificar los excedentes de generación que se pueden vender al SIN se utilizó la energía que fluyó por el arco autoprodutor creado en la parte anterior. Esto es consecuencia directa de la propia naturaleza del tipo de arco, ya que la generación asociada al nodo H2 solo puede ser transmitida por este cuando excede la demanda del hidrolizador.

Definidos todos los actores necesarios se creó en SimRes3 la planilla “Variables_parte_2” asociada a la capa 11. En esta planilla se seleccionaron los mismos índices de potencia que en la parte 1 (potencia diaria de los generadores eólico y solar, potencia a través del arco autoprodutor e índice de la sala para pasar los resultados diarios a horarios) y se agregaron el índice de potencia “PD” de la demanda, el de la potencia de falla “PF1” (para cuantificar cuándo y cuánta falla se despacha) y el del precio spot de Montevideo (para cuantificar los ingresos por excedentes).

En lo que refiere a las variables crónicas, se crearon para las potencias diarias y horarias de todos los actores mencionados, para el spot diario y horario de Montevideo y para el ingreso por excedentes diario y total (acumulado al final del horizonte de simulación). Cabe destacar que el spot horario se obtuvo a partir de la operación crónica “Pasar_indices_a_valores_horarios”. Esto último se debe a que, si bien existe el valor spot horario real de Montevideo, interesa que se calcule el valor horario obtenido por el promedio de cada poste para que esté en concordancia con las demás variables crónicas horarias aproximadas de dicha forma.

Para la carga de las variables crónicas asociadas a potencias diarias se utilizó la operación crónica “promedioPonderadoPorDurpos” y para la obtención de las variables horarias se utilizó la operación crónica “Pasar_indices_a_valores_horarios”.



Antes de obtenerse el ingreso por ventas de excedentes, y buscando verificar nuevamente el correcto modelado de todos los actores, se simuló una única crónica y se imprimieron los valores horarios de potencia eólica, potencia solar, potencia de falla, potencia a través del arco y precio SPOT. En la Figura 4.12 se presentan parte de estos resultados.

	fecha	P_DemH2_h	P_Eolica_H2_h	P_Solar_H2_h	P_Arco_H2_SIN_h	spot_SIN_h	P_Falla_Der
1	03/05/2024 00:00	99.91	76.47534924	46.90105457	23.46640396	63.30147208	0
2	03/05/2024 01:00	99.91	105.9593922	0	6.049392223	9.861116002	0
3	03/05/2024 02:00	99.91	105.9593922	0	6.049392223	9.861116002	0
4	03/05/2024 03:00	99.91	105.9593922	0	6.049392223	9.861116002	0
5	03/05/2024 04:00	99.91	105.9593922	0	6.049392223	9.861116002	0
6	03/05/2024 05:00	99.91	105.9593922	0	6.049392223	9.861116002	0
7	03/05/2024 06:00	99.91	105.9593922	0	6.049392223	9.861116002	0
8	03/05/2024 07:00	99.91	76.47534924	46.90105457	23.46640396	63.30147208	0
9	03/05/2024 08:00	99.91	76.47534924	46.90105457	23.46640396	63.30147208	0
0	03/05/2024 09:00	99.91	76.47534924	46.90105457	23.46640396	63.30147208	0
1	03/05/2024 10:00	99.91	76.47534924	46.90105457	23.46640396	63.30147208	0
2	03/05/2024 11:00	99.91	76.47534924	46.90105457	23.46640396	63.30147208	0
3	03/05/2024 12:00	99.91	31.33169621	43.43353595	0	161.4012351	25.14477
4	03/05/2024 13:00	99.91	76.47534924	46.90105457	23.46640396	63.30147208	0
5	03/05/2024 14:00	99.91	76.47534924	46.90105457	23.46640396	63.30147208	0
6	03/05/2024 15:00	99.91	76.47534924	46.90105457	23.46640396	63.30147208	0
7	03/05/2024 16:00	99.91	31.33169621	43.43353595	0	161.4012351	25.14477
8	03/05/2024 17:00	99.91	31.33169621	43.43353595	0	161.4012351	25.14477
9	03/05/2024 18:00	99.91	26.62236646	0	0	161.4012351	73.28764

Figura 4.12. Sección de balance horario (a partir de postizado) para el nodo H2.

Realizando el balance de potencia de cada fila se verificó que sólo hubo flujo a través del arco en los casos en que la generación del nodo H2 superó su demanda, y que en dichos casos, el valor del flujo coincidía con el excedente de energía. Asimismo también se verificó que en los casos donde la generación no podía abastecer la demanda se despachó falla y no hubieron excedentes. Continuando con lo anterior, también se corroboró que en ningún momento la potencia a través del arco y la potencia de falla fueran diferentes de cero al mismo tiempo, lo que hubiese implicado que el modelo, de forma errónea, estaba exportando falla al SIN. En vista de todo lo comentado se concluyó que el modelado era correcto y coherente, por lo que se podía proceder a trabajar con seguridad con los balances diarios de varias crónicas.

El cálculo de los excedentes diarios se realizó con la operación crónica “sumaDobleProductoConDurposTopeado”, tal y como se muestra en la Figura 15. En esta operación se definen los excedentes diarios “Ing_exc_H2_spotSIN” (ingresos por excedentes generados en el nodo H2 valorados al spot del SIN) como el producto entre el índice asociado a la potencia diaria por el arco autoproducido “idx_Arco_H2_SIN_P” y el índice asociado al precio spot de Montevideo “idx_Montevideo_spot” con un tope de 10000 (tope que no afecta, pues el máximo del spot de Montevideo es 250 USD/MWh). Tiene sentido no modificar el techo del

spot, ya que la sala simulada es de mediano plazo y se puede suponer que el tope no cambia.

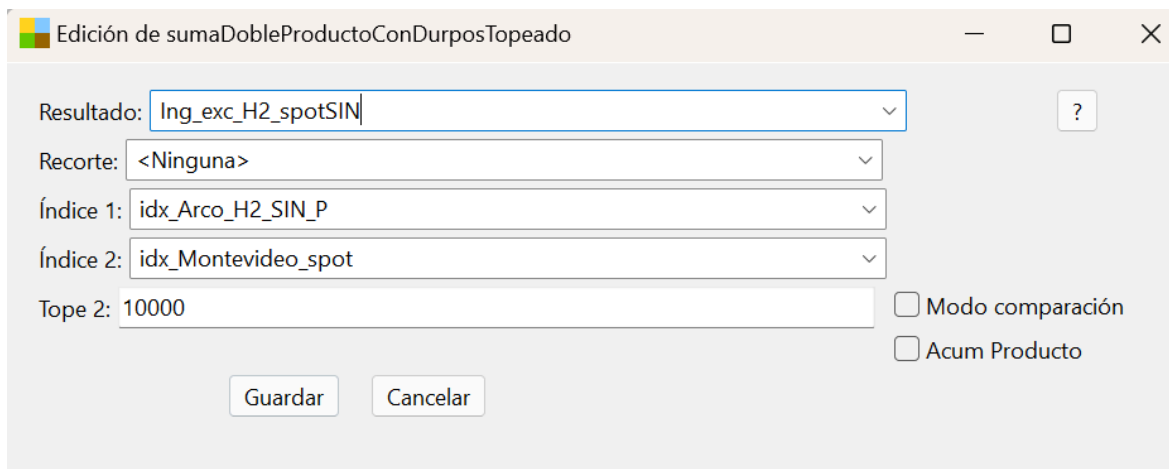


Figura 4.13. Configuración de la herramienta “sumaDobleProductoConDurposTopeado” para el cálculo de los ingresos por ventas de excedentes al spot de Montevideo.

En Post Operaciones se utilizó la operación “acumularCronVar” para acumular la variable crónica que almacenó los ingresos diarios valorados al spot. Lo anterior dio como resultado, para cada paso temporal (en este caso días), la suma del paso actual con todos los pasos previos. A partir de lo anterior se desprende que el ingreso por ventas de excedentes al SIN que tendría el proyecto de hidrógeno corresponde al último valor de esta post operación. En la Figura 4.14 se presenta la impresión de los últimos ingresos diarios (Ing_exc_H2_spotSIN) y acumulados (Ing_exc_H2_spotSIN_total) obtenidos con la misma configuración de optimización y simulación de la parte 1.

paso	fecha	Ing_exc_H2_spotSIN	Ing_exc_H2_spotSIN_total
73	04/07/2024 00:00	58881.50772	3011242.168
74	05/07/2024 00:00	66989.60871	3078231.777
75	06/07/2024 00:00	46379.44986	3124611.227
76	07/07/2024 00:00	29506.90915	3154118.136
77	08/07/2024 00:00	63569.59425	3217687.73
78	09/07/2024 00:00	67347.10302	3285034.833
79	10/07/2024 00:00	72555.06351	3357589.897
80	11/07/2024 00:00	70220.0457	3427809.942
81	12/07/2024 00:00	71518.05609	3499327.998
82	13/07/2024 00:00	47463.8617	3546791.86
83	14/07/2024 00:00	47413.48321	3594205.343
84	15/07/2024 00:00	73032.928	3667238.271
85	16/07/2024 00:00	76149.48301	3743387.754
86	17/07/2024 00:00	80422.61403	3823810.368
87	18/07/2024 00:00	42566.15765	3866376.526
88	19/07/2024 00:00	63447.69258	3929824.219
89	20/07/2024 00:00	61753.99104	3991578.21
90	21/07/2024 00:00	54736.63361	4046314.843

Figura 4.14. Configuración de la herramienta “sumaDobleProductoConDurposTopeado” para el cálculo de los ingresos por ventas de excedentes al spot de Montevideo.

Mirando el último valor de la columna $Ing_exc_H2_spotSIN_total$ de la Figura 4.14 se concluye que el ingreso por ventas de excedentes al SIN que tendría el proyecto de hidrógeno sería 4.046.314 USD.

4.3. Parte 3

En este apartado se calculó el costo de abastecimiento de energía del proyecto. Se utilizó la siguiente fórmula:

$$CAD = E_F \times 133,9 \frac{USD}{MWh} + (E_E + E_S) \times 30 \frac{USD}{MWh} - E_{ARCO\ H2-SIN} \times SPOT \quad (1)$$

donde CAD es el costo de abastecimiento de la energía en USD, E_F es la energía despachada como falla en MWh, $E_E + E_S$ es la suma de la generación eólica y solar en MWh y $E_{ARCO\ H2-SIN}$ es la energía que circula desde el nodo H2 hacia el SIN en MWh.

Para el valor del costo de falla se pedía utilizar el 90% del costo variable de los motores de la central Batlle. Tal y como se ve en la Figura 4.15, obtenida a partir de la página de ADME, este valor correspondió a 133,9 USD/MWh, ya que el costo de los motores es de 148,8 USD/MWh.

Costos variables de los recursos

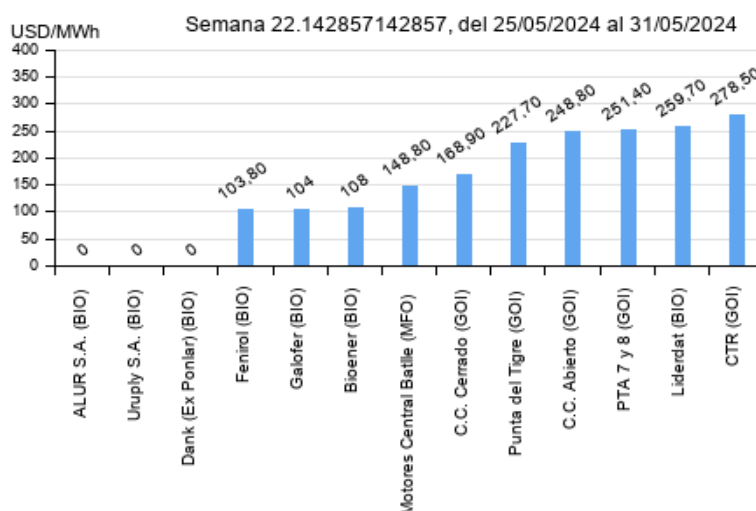


Figura 4.15. Costo variable de recursos obtenido de la página de ADME. Es de interés para este trabajo el costo variable de los motores de Central Batlle.



Para calcular cada uno de los tres sumandos del CAD presentes en la Ecuación (1) se utilizó la planilla SimRes3 “Variables_parte_3”. A continuación se desglosa el proceder con cada uno de los sumandos.

$$\rightarrow (E_E + E_S) \times 30 \frac{USD}{MWh}$$

Se le asignó a los actores Eolica_H2 y Solar_H2 un pago por energía de 30 USD/MWh. Para el actor eólico esto se observa en la Figura 4.2 correspondiente a sus características estáticas.

En la plantilla SimRes3 correspondiente a esta parte del trabajo se agregaron dos índices (idx_Eolica_H2_Ingreso_PorEnergia e idx_Solar_H2_Ingreso_PorEnergia) asociados a las variables “Ingreso_PorEnergia” de los actores eólico y solar del nodo H2. Asociados a estos índices, se generaron las variables crónicas “Costo_diario_eolica” y “Costo_diario_solar”, en las que se guardó el resultado de la operación crónica “suma” sobre los índices mencionados (esta operación permite copiar el valor de la variable seleccionada por el índice a una variable crónica, al no tener la variable del índice valores por poste). De esta manera, se cargó en estas variables el costo promedio asociado a la generación de energía eólica y solar para cada día del período simulado.

$$\rightarrow E_F \times 133,9 \frac{USD}{MWh}$$

Para obtener el costo asociado al despacho de falla se procedió de manera análoga a la del costo de generación previamente descrito.

Se le asignó a la demanda del nodo H2 un costo de falla de 133,9 USD/MWh. Esto se visualiza en la Figura 4.10 correspondiente a las características estáticas del actor DemH2.

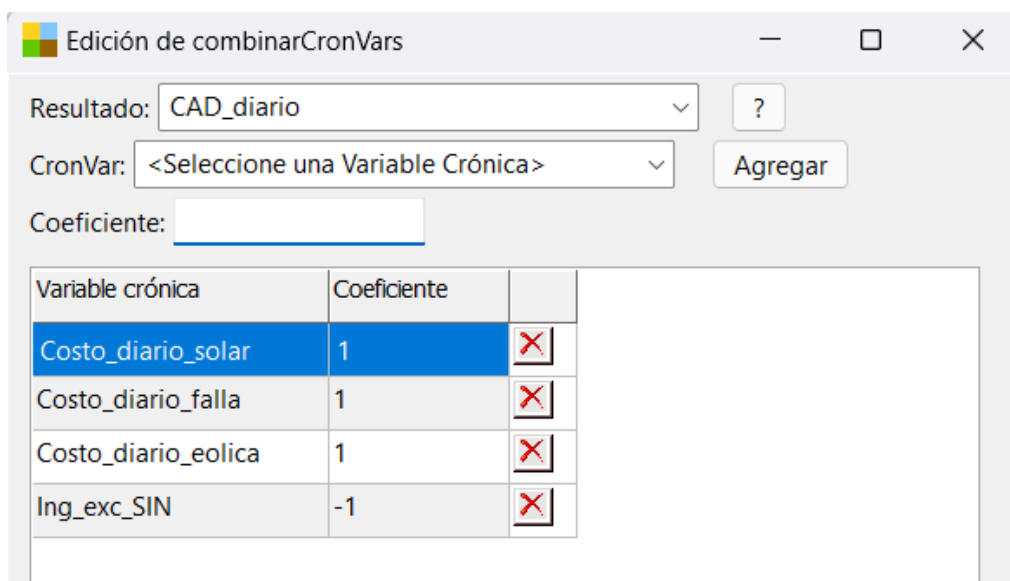
En la plantilla de SimRes3 se agregó el índice “idx_DemH2_H2_Costo1” asociado a la variable “Costo1” del actor DemH2, con el fin de obtener el costo asociado al despacho de falla para cada poste temporal. Se generó también la variable crónica “Costo_diario_falla”, en la que se guardó el resultado de la operación crónica “suma” sobre el índice mencionado (en este caso el índice selecciona una variable (Costo1) con valores por poste por lo que se guarda en la variable crónica la suma de los mismos), cargándose así en esta variable el costo asociado al despacho de falla para cada día del período simulado.

$$\rightarrow E_{ARCO\ H2-SIN} \times SPOT:$$

Se procedió de igual manera que en la parte 2, esto es, agregándose el índice “idx_Montevideo_spot” asociado a la variable “spot” del actor Montevideo (nodo) y el índice “idx_Arco_H2_SIN_P” vinculado a la variable “P” del actor Arco_H2_SIN (arco autoproducción). Se creó la variable crónica “Ing_exc_SIN”, en la que se cargó el resultado de la operación crónica “sumaDobleProductoConDurposTopeado” sobre

los índices mencionados. De esta manera, dicha variable pasó a contener el ingreso asociado a la exportación de energía para cada día simulado.

Teniendo todos los términos para el cálculo del CAD, se generaron las variables crónicas CAD_diario y CAD_total. En la primera se cargó el resultado de la post operación crónica “combinarCronVars”, en la que se combinaron las variables crónicas Costo_diario_falla, Costo_diario_eolica, Costo_diario_solar e Ing_exc_SIN, como se muestra en la Figura 4.16. Considerando la Ecuación (1), en la operación crónica se asoció a las variables crónicas mencionadas los coeficientes 1, 1, 1 y -1, respectivamente, con el fin de que la variable CAD_diario almacenara el valor del costo de abastecimiento de la energía para cada día del período simulado.



Edición de combinarCronVars

Resultado:

CronVar:

Coeficiente:

Variable crónica	Coeficiente	
Costo_diario_solar	1	
Costo_diario_falla	1	
Costo_diario_eolica	1	
Ing_exc_SIN	-1	

Figura 4.16. Configuración de la post operación crónica “combinarCronVars” con la que se obtuvo el CAD diario.

Dado que se buscaba obtener el costo de abastecimiento de la energía en los 90 días simulados, se definió la variable CAD_total, en la que se almacenó el resultado de la post operación “acumularCronVar” sobre la variable CAD_diario, como se observa en la Figura 4.17.

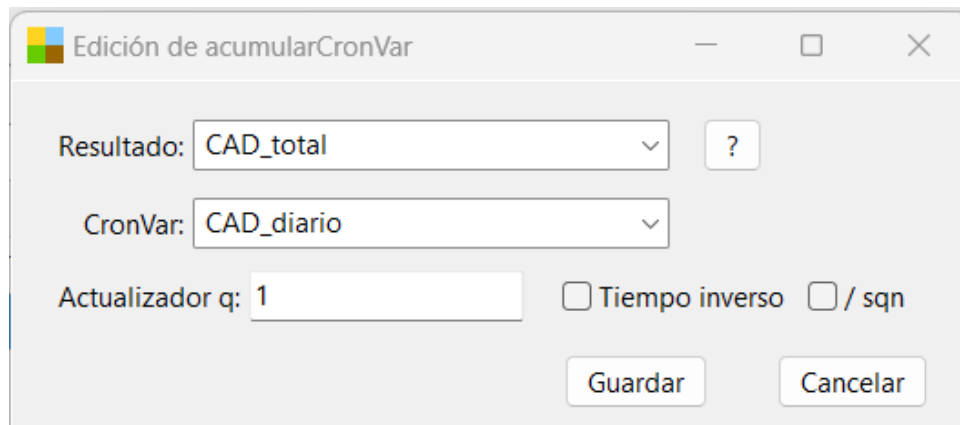


Figura 4.17. Configuración de la post operación crónica “acumularCronVars” con la que se obtuvo el CAD total.

Utilizando la post operación acumularCronVar, tal y como se comentó en la parte 2, el último valor será el costo de abastecimiento de la energía acumulado en todo el período. En la Figura 4.18 se aprecian los últimos 11 días (de los 90 simulados) con los mismos parámetros de optimización y simulación que las partes anteriores.

paso	fecha	Costo_diario_eolica	Costo_diario_solar	Costo_diario_falla	Ing_exc_SIN	CAD_diario	CAD_total
80	11-Jul-24	72633.77379	21191.66834	26495.98402	70248.29804	50073.1281	6273031.989
81	12-Jul-24	69847.52704	20225.48713	29331.65727	71049.22455	48355.44688	6321387.436
82	13-Jul-24	72992.05401	17213.8006	32511.50987	47477.44362	75239.92086	6396627.357
83	14-Jul-24	68494.79151	20167.82208	32010.59598	47318.97311	73354.23646	6469981.593
84	15-Jul-24	69216.93247	19868.14607	33201.29943	72790.94703	49495.43094	6519477.024
85	16-Jul-24	73594.94038	21271.17282	24082.70098	75766.69606	43182.11813	6562659.142
86	17-Jul-24	74285.33238	19200.81541	22803.49009	80287.01844	36002.61944	6598661.761
87	18-Jul-24	76600.17977	19693.68418	24186.61908	42590.70158	77889.78145	6676551.543
88	19-Jul-24	67155.74928	21617.28702	28442.474	63545.30778	53670.20251	6730221.745
89	20-Jul-24	72458.0022	18865.50932	28149.07988	61897.71918	57574.87222	6787796.618
90	21-Jul-24	71715.54091	20886.23967	28227.19513	54692.58136	66136.39435	6853933.012

Figura 4.18. Captura de planilla obtenida a partir de la impresión de las variables asociadas a la Ecuación (1). Se observa resaltado el costo de abastecimiento de la energía al final de la simulación.

Tal y como se aprecia en el último valor de la columna CAD_total de la Figura 4.18, el costo de abastecimiento de la energía en todo el período simulado sería 6.853.933 USD.

Junto con el cálculo del CAD también se graficó el balance de las potencias promedio diarias, tal y como se aprecia en la Figura 4.19.

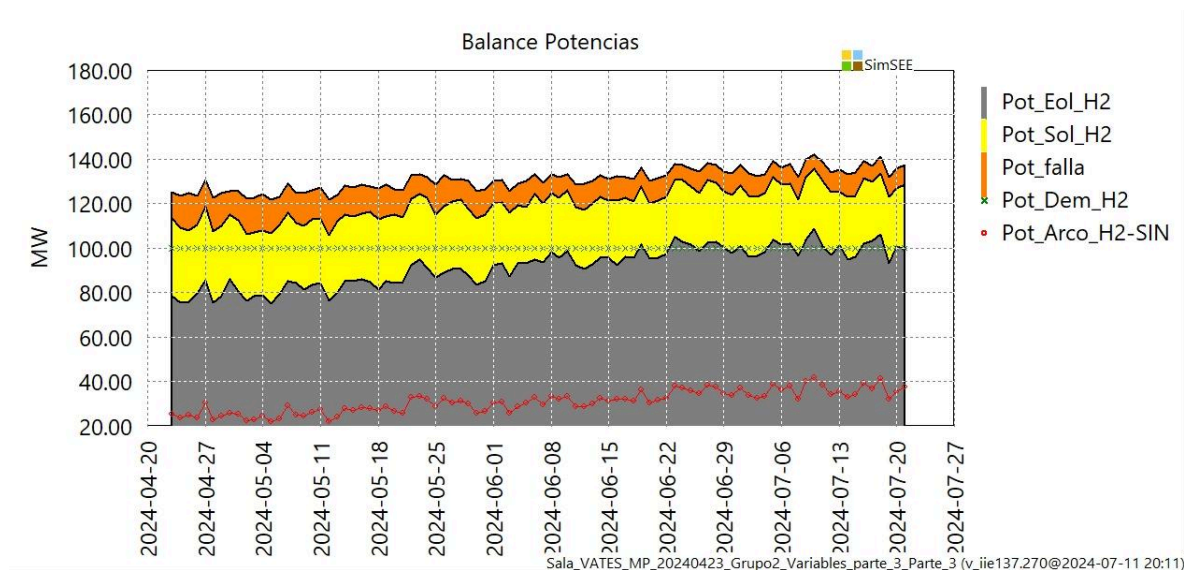


Figura 4.19. Balance de potencias en nodo H2.

Lo primero que puede llamar la atención de la Figura 4.19 es que a pesar de que la suma de las potencias generadas por los actores solar y eólico (áreas amarilla y gris) supere la demanda (puntos verdes) igual haya despacho de falla (área naranja). Esto se debe a que se observan potencias promedio diarias, en donde basta que solo un poste despache falla para que el promedio a lo largo del día sea diferente de cero. Al mismo tiempo, por más de que puede haber postes en que se despachó falla (lo cual implica que la potencia generada en ese poste fue menor a la demandada), existe la posibilidad de que en el resto de los postes del día la generación haya excedido la demanda y esto provoque que el promedio diario de la generación sea mayor a la demanda (de ahí que se pueda ver falla y exceso de generación al mismo tiempo). Por último, también se debe considerar que no solo se está haciendo un promedio diario, sino que también se están promediando las 100 crónicas simuladas. Lo anterior conlleva a la coexistencia de despachos de falla y exceso de generación en un mismo día.

El razonamiento previo se aplicó a casos donde se vió exportación a través del arco en instantes en que la potencia de falla fue distinta de cero, cosa que en el balance de un poste en específico no puede suceder, pero al observar promedios diarios y de crónicas sí.

Para confirmar que la razón por la que se observaron estos fenómenos fue la planteada anteriormente se simuló una única crónica y se vió que para cada poste el balance cerró correctamente. Lo anterior se traduce en que solo se despachó falla cuando la generación fue menor a la demanda y que solo se exportó a través del arco cuando los actores solar y eólico generaron una potencia mayor a la demandada.

Adicionalmente (y con el fin de verificar que el CAD se calculó de manera correcta) se simuló una única crónica y se calculó el CAD asociado a un día específico (a

través de los balances poste a poste), lo que finalmente se comparó con los valores de las variables crónicas del CAD. En las Figuras 4.20, 4.21 y 4.22 se presentan capturas de los resultados.

paso	fecha	Pot_Eol_H2_horaria	Pot_Sol_H2_horaria	Pot_falla_horaria	Pot_Dem_H2_horaria	Pot_Arco_H2-SIN_horaria	Precio_spot_SIN_horaria
1	23-Apr-24	70.46361176	64.70750651	0	99.91	35.26111984	1.39E-17
2	23-Apr-24	70.46361176	64.70750651	0	99.91	35.26111984	1.39E-17
3	23-Apr-24	70.46361176	64.70750651	0	99.91	35.26111984	1.39E-17
4	23-Apr-24	147.4992008	19.11598974	0	99.91	66.70519257	0
5	23-Apr-24	147.4992008	19.11598974	0	99.91	66.70519257	0
6	23-Apr-24	147.4992008	19.11598974	0	99.91	66.70519257	0
7	23-Apr-24	147.4992008	19.11598974	0	99.91	66.70519257	0
8	23-Apr-24	147.4992008	19.11598974	0	99.91	66.70519257	0
9	23-Apr-24	147.4992008	19.11598974	0	99.91	66.70519257	0
10	23-Apr-24	70.46361176	64.70750651	0	99.91	35.26111984	1.39E-17
11	23-Apr-24	70.46361176	64.70750651	0	99.91	35.26111984	1.39E-17
12	23-Apr-24	70.46361176	64.70750651	0	99.91	35.26111984	1.39E-17
13	23-Apr-24	70.46361176	64.70750651	0	99.91	35.26111984	1.39E-17
14	23-Apr-24	70.46361176	64.70750651	0	99.91	35.26111984	1.39E-17
15	23-Apr-24	70.46361176	64.70750651	0	99.91	35.26111984	1.39E-17
16	23-Apr-24	70.46361176	64.70750651	0	99.91	35.26111984	1.39E-17
17	23-Apr-24	70.46361176	64.70750651	0	99.91	35.26111984	1.39E-17
18	23-Apr-24	70.46361176	64.70750651	0	99.91	35.26111984	1.39E-17
19	23-Apr-24	19.24798788	0	80.66201019	99.91	0	26.96230638
20	23-Apr-24	19.24798788	0	80.66201019	99.91	0	26.96230638
21	23-Apr-24	12.29166641	0	87.61833191	99.91	0	26.96230638
22	23-Apr-24	19.24798788	0	80.66201019	99.91	0	26.96230638
23	23-Apr-24	19.24798788	0	80.66201019	99.91	0	26.96230638
24	23-Apr-24	70.46361176	64.70750651	0	99.91	35.26111984	1.39E-17

Figura 4.20. Balance horario en nodo H2 y spot horario del nodo Montevideo. Se resaltaron las horas asociadas a los 4 postes diarios.

En la Figura 4.21 se presentan los cálculos realizados para verificar el CAD con una sola crónica.



	Ecol (MMWh)	Ecol x 30USD/MMWh	Ecol (MMWh)	Ecol x 30USD/MMWh	Efalla (MMWh)	Efalla x 133.9USD/MMWh	Earco (MMWh)	SPOT (USD/MMWh)	Earco x SPOT
Poste 1	12.2916641	368.749924	0	0	87.6183191	11732.09464	0	26.96230638	0
Poste 2	76.99195153	2309.758546	0	0	322.6480408	43202.57266	0	26.96230638	0
Poste 4	916.0269528	27480.80859	841.1975846	25235.92754	0	0	458.394558	1.39E-17	6.3615E-15
Poste 3	884.9952045	26549.85614	114.6959384	3440.878153	0	0	400.2311554	0	0
Costo diario eólica (USD)									
		56709.17326							
Costo diario solar (USD)									
				28676.80569					
Ine_exc_SIN (USD)									
						54934.6673			
CAE (USD)									
	140320.6463								6.3615E-15

Figura 4.21.Cálculos manuales de los términos del CAD para una sola crónica.

En la Figura 4.22 se presenta el resultado obtenido para el CAD utilizando las operaciones y post operaciones crónicas descritas previamente.



paso	fecha	Costo_diario_eolica	Costo_diario_solar	Costo_diario_falla	Ing_exc_SIN	CAD_diario
1	23-Apr-24	56709.17326	28676.80569	54934.6673	6.36E-15	140320.6463
2	24-Apr-24	32514.21317	22198.39082	76870.18505	0	131582.789
3	25-Apr-24	52431.60399	15247.99791	48205.71261	0	115885.3145
4	26-Apr-24	83980.97922	25088.327	9433.485212	0	118502.7914
5	27-Apr-24	65473.21706	6451.40704	33059.24873	0	104983.8728
6	28-Apr-24	33839.5589	20125.85228	80205.1576	0	134170.5688
7	29-Apr-24	41298.8416	21885.63702	39057.3871	0	102241.8657
8	30-Apr-24	74382.93996	39180.5502	14776.89786	0.147284891	128340.2407
9	1-May-24	41889.58845	15785.7235	63646.63348	0	121321.9454
10	2-May-24	16436.27563	8032.419869	211858.8342	0	236327.5297
11	3-May-24	53456.55133	23503.4356	23280.75205	19674.79587	80565.94311
12	4-May-24	55184.45888	22164.0621	10547.41033	7781.573729	80114.35758
13	5-May-24	53143.01434	13313.82804	78319.7386	40.23002014	144736.351
14	6-May-24	72120.17179	26077.03106	53316.65959	15377.27014	136136.5923
15	7-May-24	17274.33652	14848.36482	177696.4479	0	209819.1493
16	8-May-24	44419.40378	29415.60342	33718.76743	7534.148575	100019.6261
17	9-May-24	35300.51149	25751.09026	59018.62547	9874.785057	110195.4422
18	10-May-24	56116.80838	19639.71095	50922.99094	50.76834412	126628.7419
19	11-May-24	42860.68116	16130.30215	75162.35337	12.98581009	134140.3509

Figura 4.22. Resultados obtenidos para el CAD a partir de utilizar la planilla SimRes3 “Variables_parte_3” para una sola crónica.

Se observa que efectivamente la variable CAD_diario almacenó el mismo valor que se obtuvo realizando los cálculos manualmente (Figura 4.21).

4.4. Parte 4

En esta sección se debía analizar el impacto de que el proyecto importara energía desde el SIN. Esto se debía cuantificar calculando nuevamente el CAD, valorizando la energía del SIN al precio SPOT.

Para implementar la capacidad de importación desde el SIN se agregó un arco con origen en el nodo Montevideo y destino en el nodo H2. Conceptualmente, resulta evidente que esto va a repercutir en el despacho, dado que para casos en que la generación de los actores eólicos y solar no era suficiente para cubrir la demanda del nodo H2, ahora se pasa a tener otra opción respecto a despachar falla (si el nodo H2 ve que la importación de energía tiene un costo por MWh menor a 133.9 USD, la tomará del nodo Montevideo y no despachará falla).

Para que el cálculo del CAD fuese correcto se debía agregar a la Ecuación (1) un sumando que representara el costo de la importación a través del nuevo arco: $E_{ARCO\ SIN-H2} \times SPOT$. En este escenario el CAD se calcula como:

$$CAD = E_F \times 133,9 \frac{USD}{MWh} + (E_E + E_S) \times 30 \frac{USD}{MWh} + \quad (2)$$

$$+ E_{ARCO\ SIN-H2} \times SPOT - E_{ARCO\ H2-SIN} \times SPOT$$

Dado que ahora el sistema cuenta con una fuente más para abastecer la demanda del nodo H2, se espera tener un CAD menor (si se despacha importación será a menor costo que la falla).

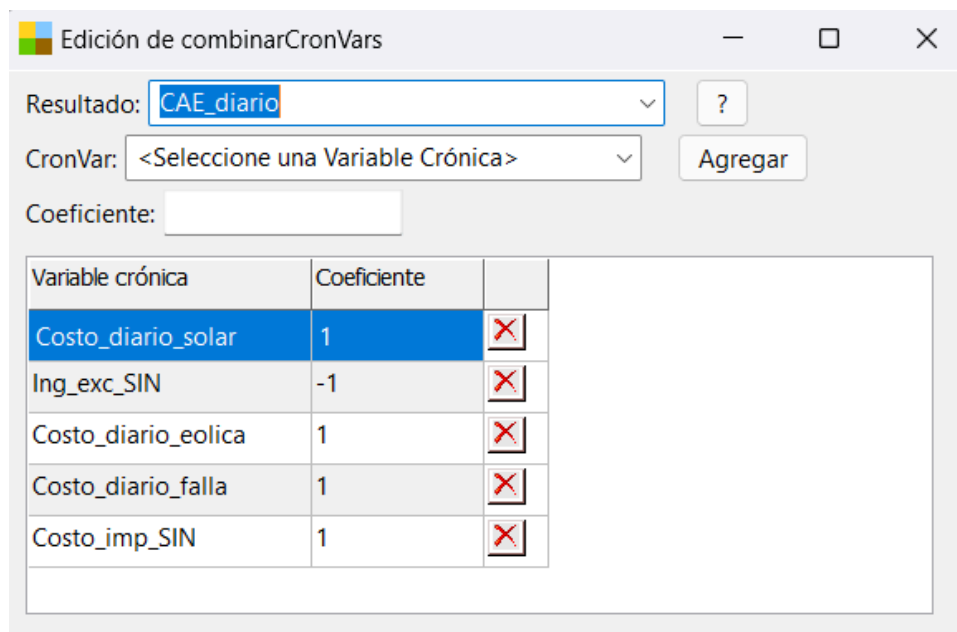
Para calcular cada uno de los tres sumandos del CAD se utilizó SimRes3 y se creó la planilla “Variables_parte_4”. Se procedió de igual manera que en la parte 3, con la salvedad de que ahora se agregó un sumando. El cálculo del nuevo sumando se explica a continuación.

$$\rightarrow E_{ARCO\ SIN-H2} \times SPOT$$

Para agregar este término se procedió de manera análoga a la del término asociado a la venta de excedentes al SIN. Primero se agregó el índice “idx_Montevideo_spot” asociado a la variable “spot” del actor Montevideo (nodo) y el índice “idx_Arco_SIN_H2_P” vinculado a la variable “P” del actor Arco_SIN_H2.

Se definió la variable crónica “Costo_imp_SIN”, en la que se cargó el resultado de la operación crónica “sumaDobleProductoConDurposTopeado” sobre los índices mencionados previamente. Con esto la variable pasó a almacenar el costo debido a la importación de energía a través del arco desde el SIN al nodo H2 para cada día simulado.

Para el cálculo del CAD se repitió el procedimiento de la parte 3, agregando la variable Costo_imp_SIN con coeficiente 1 para el cálculo de la variable CAD_diario con la post operación combinarCronVars, como se presenta en la Figura 4.23.



Variable crónica	Coeficiente	
Costo_diario_solar	1	
Ing_exc_SIN	-1	
Costo_diario_eolica	1	
Costo_diario_falla	1	
Costo_imp_SIN	1	

Figura 4.23. Cálculo del CAD diario a partir de la operación combinarCronVars. Se utiliza de forma indiferente CAE y CAD para referirse al costo de abastecimiento de la energía.

En la Figura 4.24 se aprecian los resultados de los últimos 11 días, de los 90 simulados, con los mismos parámetros de optimización y simulación de las partes anteriores.

paso	fecha	Costo_diario_eolica	Costo_diario_solar	Costo_diario_falla	Costo_imp_SIN	Ing_exc_SIN	CAE_diario	CAE_total
80	11-Jul-24	72633.77379	21191.66834	15135.72149	5177.679884	71176.05062	42962.7929	5568738
81	12-Jul-24	69847.52704	20225.48713	14089.23687	5089.966504	72284.1755	36968.042	5605706
82	13-Jul-24	72992.05401	17213.8006	15496.06612	6411.154314	47638.7961	64474.2789	5670180
83	14-Jul-24	68494.79151	20167.82208	15542.00911	5858.256719	48545.01695	61517.8625	5731698
84	15-Jul-24	69216.93247	19868.14607	16863.46699	6386.56651	72462.59224	39872.5198	5771570
85	16-Jul-24	73594.94038	21271.17282	14026.73997	3454.622023	76574.23563	35773.2396	5807343
86	17-Jul-24	74285.33238	19200.81541	15692.79489	3121.027142	80633.53914	31666.4307	5839010
87	18-Jul-24	76600.17977	19693.68418	13394.42027	3912.213583	42821.44502	70779.0528	5909789
88	19-Jul-24	67155.74928	21617.28702	17005.81666	4737.981268	64006.28987	46510.5443	5956299
89	20-Jul-24	72458.0022	18865.50932	16582.92376	3873.27262	62046.06392	49733.644	6006033
90	21-Jul-24	71715.54091	20886.23967	13308.52608	6728.962287	54999.13282	57640.1361	6063673

Figura 4.24. Resultados obtenidos para el CAD a partir de utilizar la planilla SimRes3 "Variables_parte_4" y la misma configuración de optimización y simulación que en apartados anteriores.

Agregando la posibilidad de importar energía desde el SIN el costo de abastecimiento de la energía del hidrolizador sería 6.063.673 USD.

Tal y como se esperaba el CAD se redujo en unos 800.000 USD, ya que en este escenario el SIN puede despachar generadores más económicos que los motores de la central Batlle.

Para ver en mayor detalle el impacto de la importación se graficó nuevamente el balance de las potencias promedio diarias. Este se muestra en la Figura 4.25.

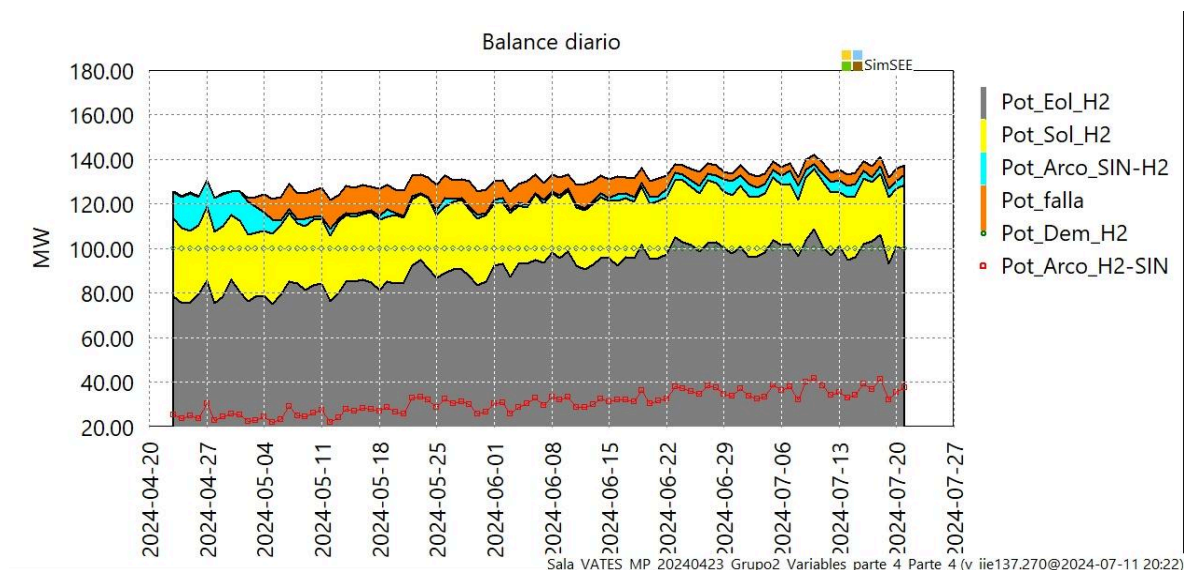


Figura 4.25. Balance de potencias en nodo H2.

Al comparar con la Figura 4.19, se observa que la importación desde el SIN suplantaría el despacho de falla mayoritariamente al comienzo y al final del intervalo de simulación.

Cabe destacar que en esta parte también se simuló una única crónica para verificar con el balance poste a poste que el sistema estaba funcionando como era esperado. Especialmente se verificó que solo se exportara a través del arco en los casos en que la generación renovable del proyecto superara su demanda y que sólo se importara energía del SIN cuando había déficit de generación y el precio el SPOT fuese menor al costo de falla asociado a la demanda.

4.5. Parte 5

Continuando con la tendencia incremental del trabajo, en esta parte se buscaba determinar el impacto del comercio internacional en la magnitud del CAE total del proyecto de Hidrógeno. La fórmula para el cálculo del CAE presentada en la sección anterior, Ecuación (2), no cambia (ya que los actores necesarios para el comercio internacional no se conectan en el nodo de hidrógeno), pero los resultados que deriven de su aplicación es esperable que sí, puesto que en función de la capacidad de intercambio y precio que se le asocie a estos nuevos actores, se afectará en mayor o menor medida el precio de la energía en el mercado spot y la cantidad de escenarios de falla en el proyecto del hidrolizador.

En lo que refiere a los actores para representar el comercio internacional, se agregó a la sala uno exportador (Exp) y uno importador (Imp), ambos del tipo Spot de mercado (dentro de los que figuran en la pestaña Internacional y Otros, Figura 4.26).

Exp	Spot de mercado
Imp	Spot de mercado

Figura 4.26. Actores utilizados para representar el comercio internacional.

En ambos casos se configuró que estos actores estuvieran siempre disponibles (en una nueva capa) y con una capacidad de intercambio de 100 MW cada uno, tal y como se aprecia en las Figuras 4.27a y 4.27b.

PMín[MW](Negativo):	-100
PMáx[MW]:	0
FD [p.u.]	1
TMR [h]:	0

(a)

PMín[MW](Negativo):	0
PMáx[MW]:	100
FD [p.u.]	1
TMR [h]:	0

(b)

Figura 4.27. (a) Características dinámicas del actor Exp. (b) Características dinámicas del actor Imp.

En lo que refiere al precio de la energía de estos actores, al importador se le asoció una fuente constante de 80 USD el MWh y al exportador una de 75 USD el MWh (Figura 4.28).

Imp_precio	Fuente constante	0, 0, Auto,V:80
Exp_precio	Fuente constante	0, 0, Auto,V:75

Figura 4.28. Fuentes constantes para los actores Exp e Imp.

Cabe destacar en este punto del análisis que la capacidad de intercambio se topeó en 100 MW para no distorsionar significativamente la sala, efecto opuesto al que se buscaba con la elección de los precios de estos actores, con los que se quería reducir la cantidad de escenarios de falla del proyecto de Hidrógeno, y de esta manera, modificar la magnitud del CAE total.

Antes de presentar el valor del CAE total que se obtuvo para esta parte, se analiza el cambio en los escenarios de falla y los ingresos por exportación e importación, a fin de corroborar conceptualmente si los resultados obtenidos están dentro de lo esperado.

Para un correcto análisis de los escenarios de falla se grafica primero el promedio de los intercambios internacionales (Figura 4.29). De esta manera pudimos ver cómo fue la participación de los nuevos actores y si estos fueron modelados correctamente.

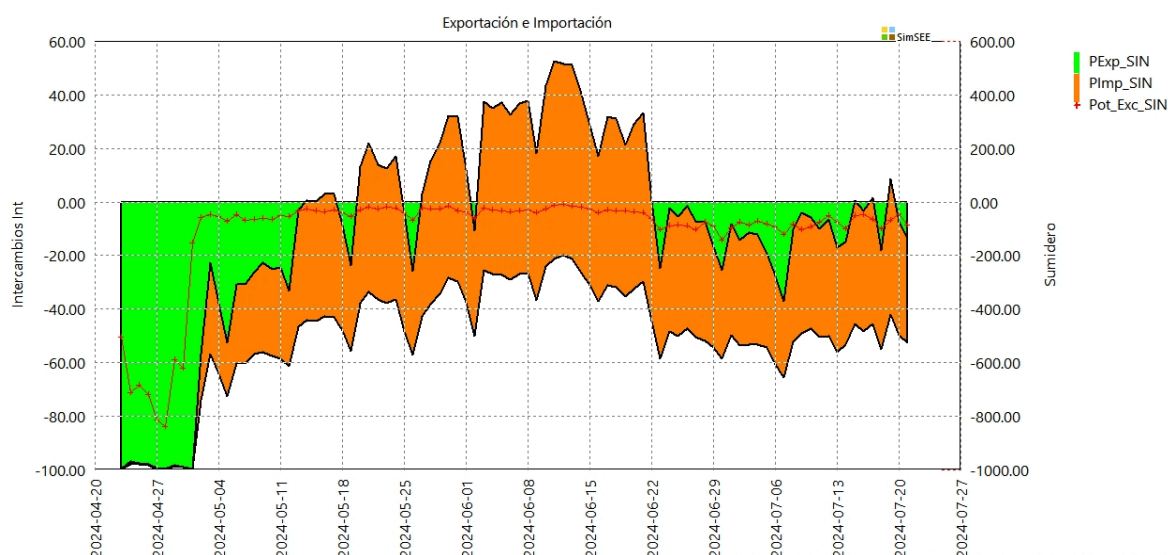


Figura 4.29. Potencias diarias promedio de los actores internacionales Exp e Imp. Se agrega en rojo el sumidero del SIN.

Tomando como referencia el eje izquierdo (primario) de la Figura 4.29 se verificó que la combinación de las exportaciones e importaciones nunca superó los 200 MW (límite teórico del conjunto modelado) y que su precio hizo que el sistema los despachara (en promedio) todo el tiempo (lo que tiene que influir en la cantidad de escenarios de falla del proyecto). Lo anterior también se comprobó en el análisis de los postes de una crónica, verificándose que estos actores nunca superaron los 100 MW. En la misma gráfica, tomando como referencia el eje derecho (secundario), se graficó con una línea roja el índice excedentes del nodo Montevideo (Sumidero). Lo anterior permitió verificar también que el sistema (SIN) se comportaba de forma coherente, ya que cuando presentaba valores muy elevados, el sistema solo exportaba.

Dado que la participación de estos actores fue la esperada, se procedió a graficar una vez más el balance de potencias promedio del nodo de hidrógeno (Figura 4.30).

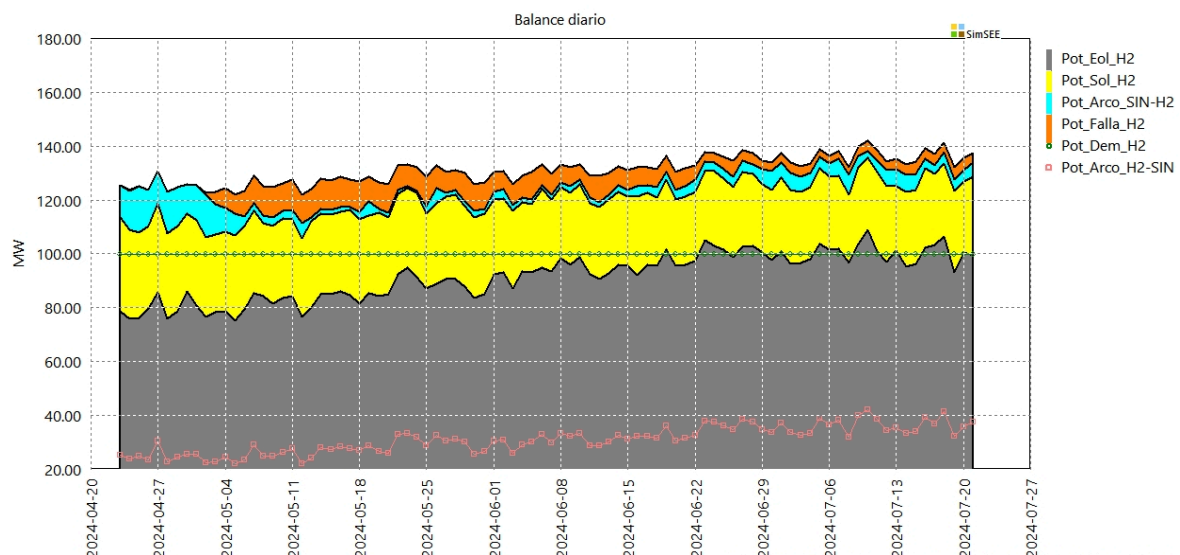


Figura 4.30. Balance de potencias en nodo H2.

En la Figura 4.30 se aprecia que la capacidad de importar que ganó el SIN redujo levemente la potencia de falla esperada en el nodo del proyecto (respecto a lo visto en la parte 4). Para ver la disminución con mayor detalle, se procedió a comparar directamente las potencias de falla de ambas partes (Figura 4.31).

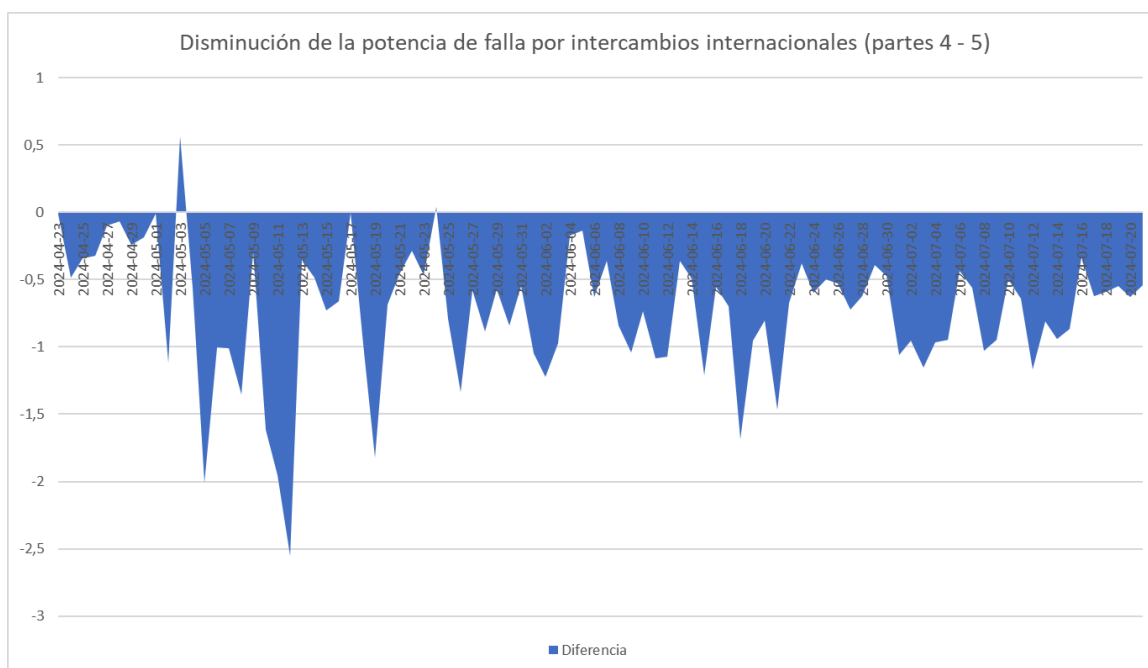


Figura 4.31. Comparación de potencia diaria promedio de falla entre la parte 4 y la parte 5.

Teniéndose presente que la energía asociada a falla disminuyó, se procedió a analizar el impacto del intercambio internacional en el precio spot. Para esto se graficaron los costos de importación e ingresos de exportación del nodo del proyecto en las partes 4 y 5 (Figuras 4.32 y 4.33, respectivamente).

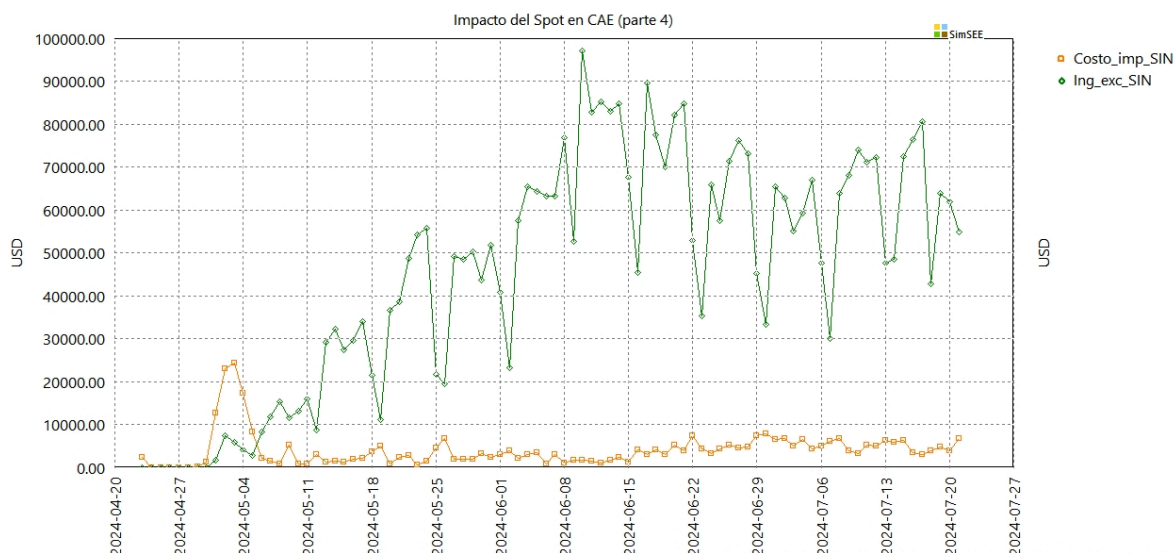


Figura 4.32. Costos de importación de energía desde el SIN e ingresos por venta de excedentes al SIN para la parte 4.

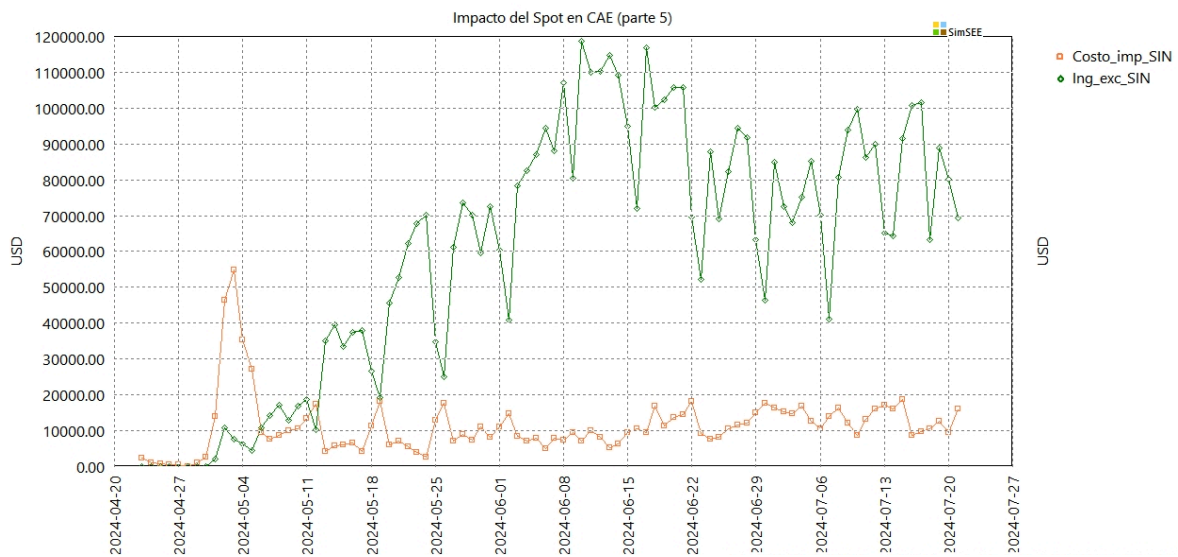


Figura 4.33. Costos de importación de energía desde el SIN e ingresos por venta de excedentes al SIN para la parte 5.

Al comparar las gráficas resulta evidente que el precio spot aumentó, puesto que la magnitud de la energía que se exportaba en ambas partes era la misma y los ingresos (valorados al precio spot) aumentaron considerablemente con el actor exportación. La importación también aumentó, pero no se puede utilizar como ejemplo afirmativo de lo anterior, puesto que la disminución de los escenarios de falla pudo también aumentar su magnitud. Para ver con mayor detalle el incremento del precio spot diario del promedio de las 100 crónicas, se procedió a graficar la diferencia entre las partes 5 y 4, tal y como se aprecia en la Figura 4.34.

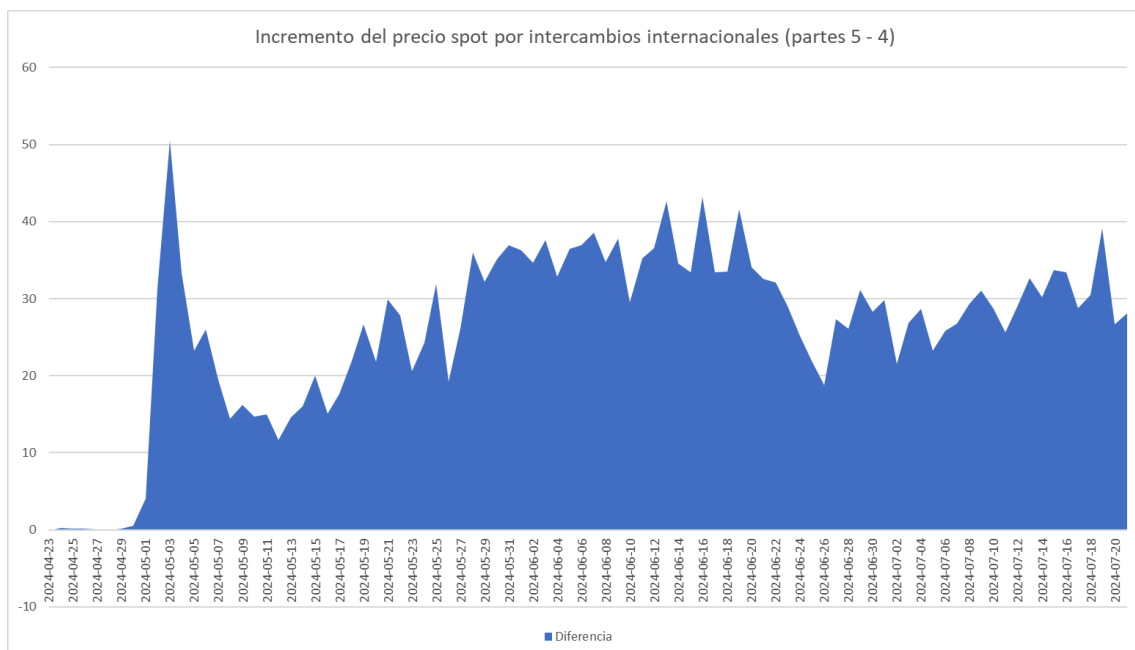


Figura 4.34. Diferencia entre el precio SPOT entre la parte 5 y la 4.

Dado que en el nodo del proyecto hubo un aumento de los ingresos por venta de excedentes (mayor al de los costos de importación) y una disminución de la energía asociada a falla, era de esperarse que el CAE total del proyecto disminuyera, tal y como se confirmó con los 5.203.976 USD que entregó la salida CAE total (Figura 4.35).

paso	fecha	Costo_diario_eolica	Costo_diario_solar	Costo_diario_falla	Costo_imp_SIN	Ing_exc_SIN	CAE_diario	CAE_total
90	2024-07-21	71715,5	20886,2	11577,4	16153,6	69296,5	51036,3	5203975,7

Figura 4.35. CAD total al final de la simulación para la parte 5.

En base a lo expuesto, se concluye que los intercambios internacionales modelados resultarían beneficiosos para reducir el costo del abastecimiento de la energía del proyecto de hidrógeno.

4.6. Parte 6

Para terminar de estudiar el proyecto se pedía realizar una evaluación del método por variación de las semillas y estimar la cantidad de crónicas necesarias para obtener una precisión en el valor esperado de interés (en este caso el CAE total de la parte 5) de 3% del rango y confianza 90%.

Para la evaluación del método por variación de las semillas se realizaron 15 simulaciones de 200 crónicas cada una, en las que la semilla de simulación también se incrementaba de a 200, desde un valor inicial de 10031. En lo que refiere a los parámetros de la optimización, los mismos no se modificaron respecto a los de las otras partes del trabajo. En la siguiente gráfica se aprecian los CAE totales obtenidos en cada simulación.

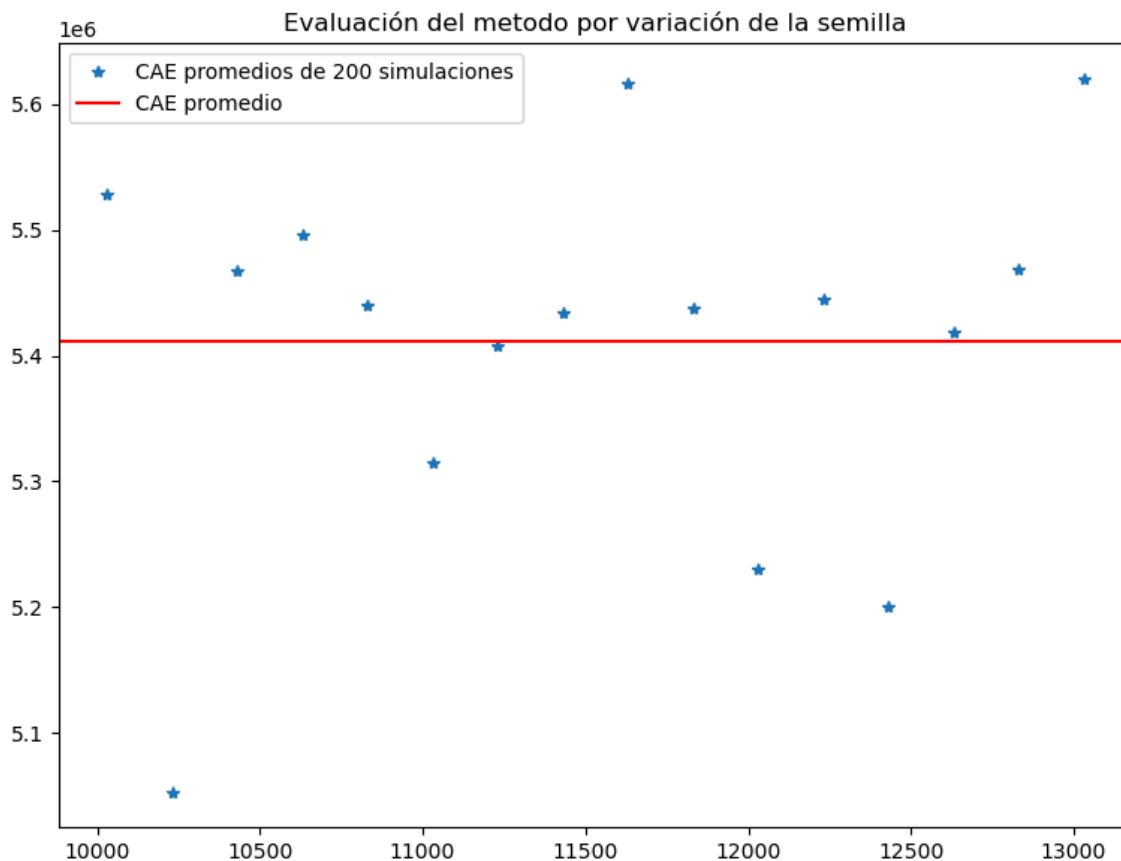


Figura 4.36. Evaluación del método por variación de la semilla de simulación.

Los resultados de la Figura 4.36 indican que el costo de abastecimiento de la energía total del proyecto oscilaría entre 5 y 5,6 millones de dólares. Teniéndose en cuenta que el valor más grande resultó un 12% mayor que el más chico, que no hay divergencia o tendencia (creciente o decreciente), se concluye que las variables modeladas son adecuadas para estos cálculos y que se puede tener confianza en los resultados.

En lo que refiere a la elección de uno de los valores obtenidos como referencia del CAE total del proyecto (para el cálculo de precisión), se consideró que si se tomara el mínimo como valor representativo, se estaría siendo optimista en la toma de decisiones de un proyecto, por lo que se descartó su uso. De entre los valores promedio y máximo, lo mejor sería tomar el máximo, puesto que si el proyecto es viable para este monto, entonces el promedio implicaría un beneficio. Dado que no se tiene una referencia de cuánto se desea invertir en el proyecto, se continua el análisis con aquella simulación para la cual su CAE total (esperado) fue más cercano al promedio de todas las simulaciones (5,41 millones USD - semilla 11231).

En busca de la cantidad de crónicas necesarias para la obtención de una precisión en la determinación del valor esperado del 3% del rango con confianza 90%, se realizó un proceso iterativo fijando la semilla de simulación en el valor 11231, aumentando la cantidad de crónicas de a 150 (desde la 150). A continuación se



presentan las gráficas con los resultados del procedimiento expuesto (Figuras 4.37 a 4.40).

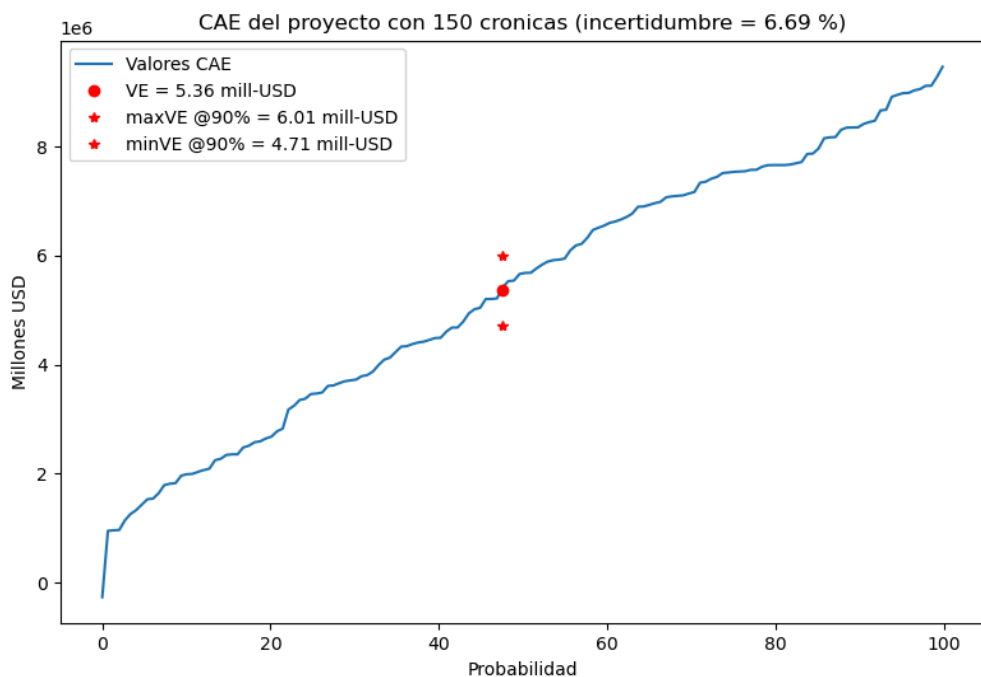


Figura 4.37. Resultados del procedimiento utilizando 150 crónicas.

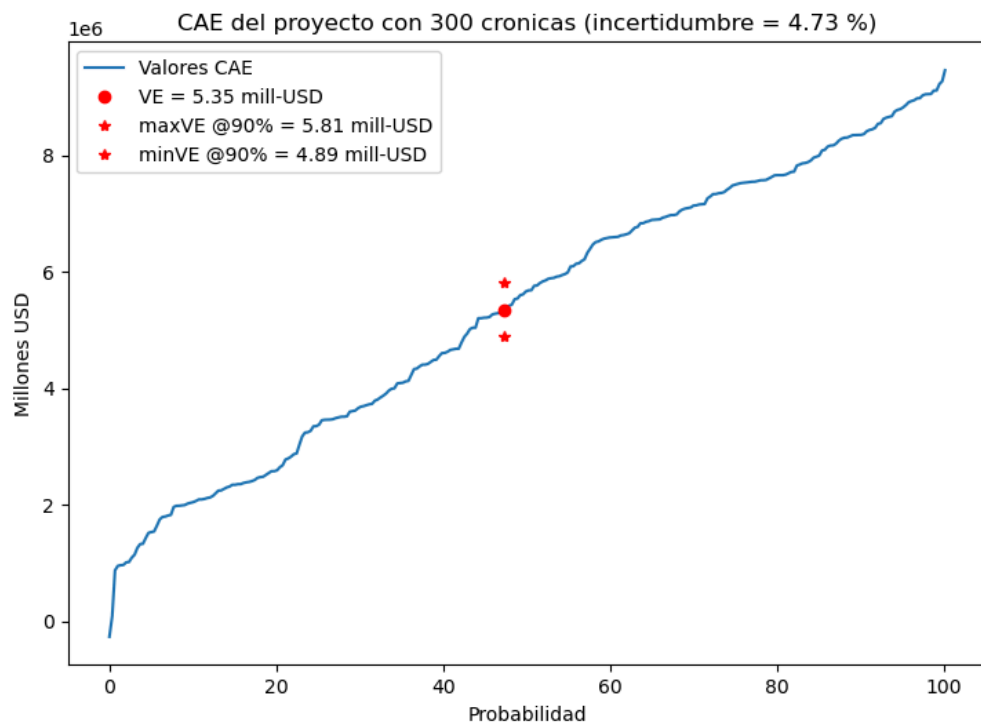


Figura 4.38. Resultados del procedimiento utilizando 300 crónicas.

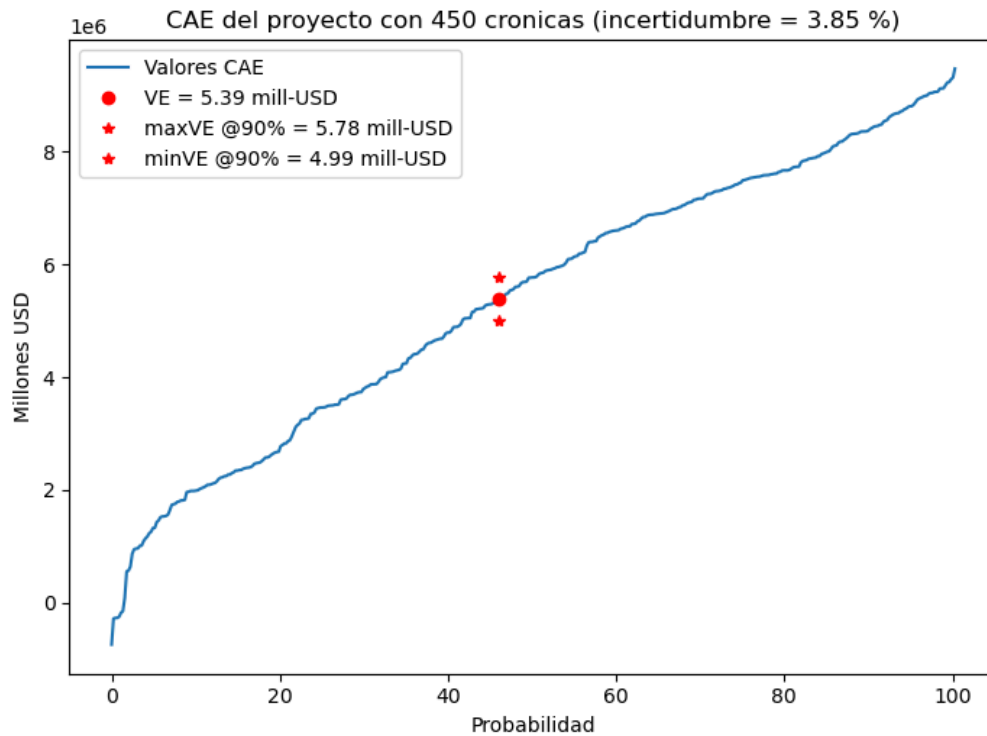


Figura 4.39. Resultados del procedimiento utilizando 450 crónicas.

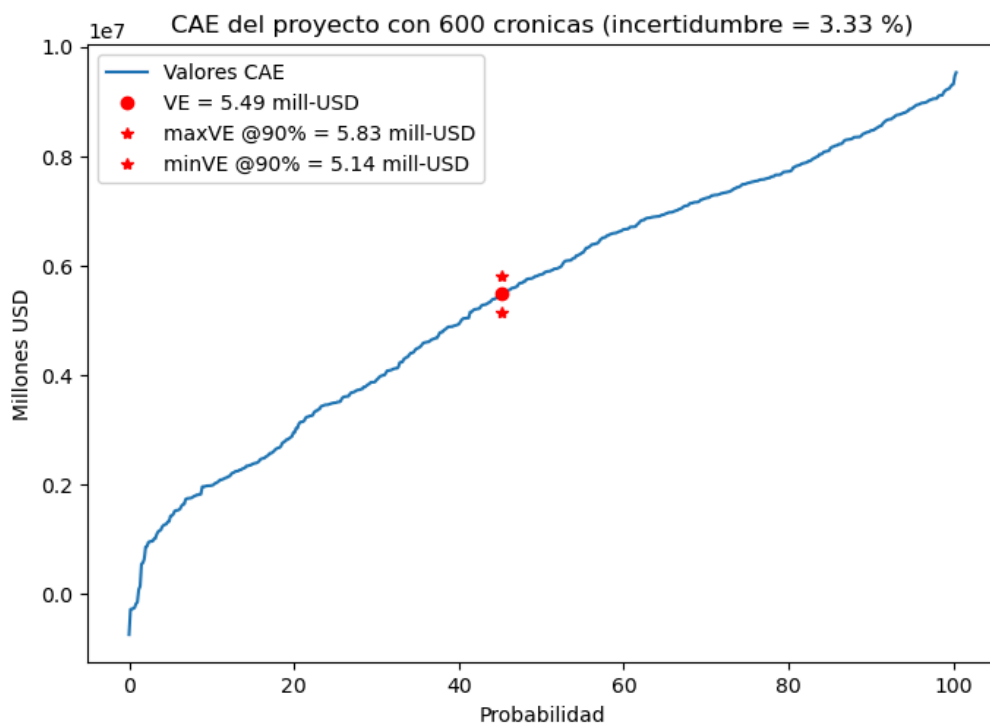


Figura 4.39. Resultados del procedimiento utilizando 600 crónicas.

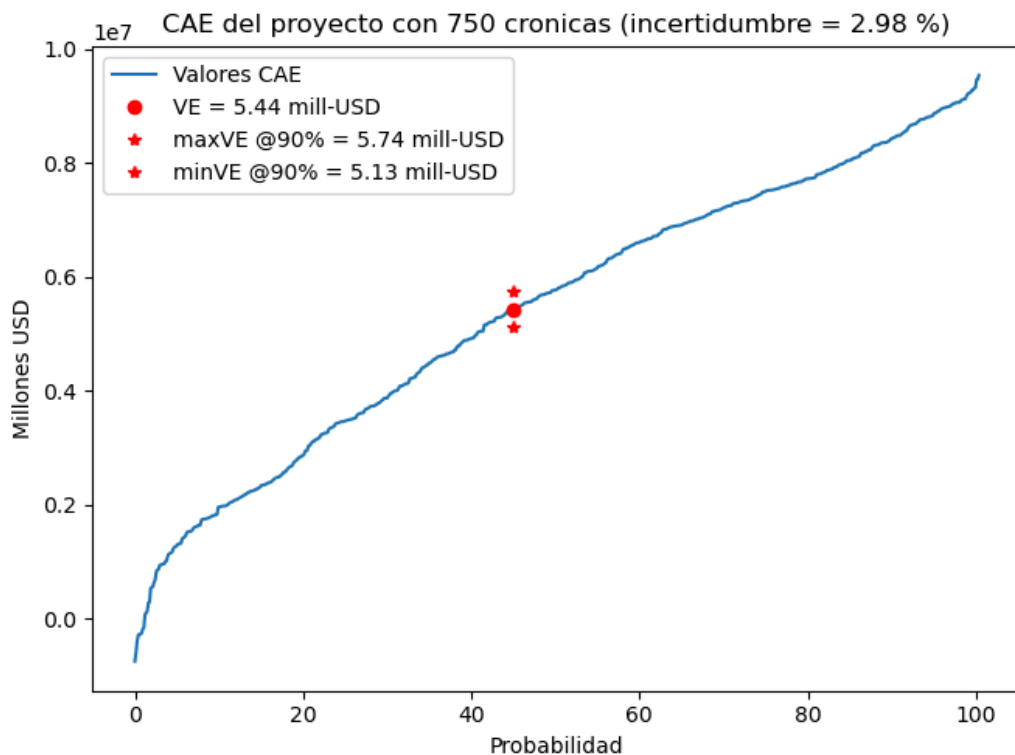


Figura 4.40. Resultados del procedimiento utilizando 750 crónicas.

Los resultados de interés de las gráficas anteriores se resumen en la siguiente tabla.

Valores	150 muestras	300 muestras	450 muestras	600 muestras	750 muestras
Mínimo (Mill-USD)	-0,27	-0,27	-0,74	-0,74	-0,74
Máximo (Mill-USD)	9,47	9,47	9,47	9,54	9,54
Rango (Mill-USD)	9,74	9,74	10,21	10,28	10,28
p (%)	48	47	46	45	45
Error (Mill-USD)	0,65	0,46	0,39	0,34	0,31
VE (Mill-USD)	5,36	5,35	5,39	5,49	5,44
Max VE@90% (Mill-USD)	6,01	5,81	5,78	5,83	5,74
Min VE@90% (Mill-USD)	4,71	4,89	4,99	5,14	5,13
Incetidumbre (%)	6,69	4,73	3,85	3,33	2,98

Tal y como se ve en la Figura 4.40 y en el valor resaltado en verde de la tabla anterior, para que la incertidumbre alcance un 3% se necesitan 750 muestras.

Cabe destacar también, tal cual se anticipó en el teórico del curso, que en la medida que se incrementó el número de simulaciones también lo hizo el módulo de los máximos y mínimos, por la aparición de peores “suertes” o escenarios más extremos, lo que produjo que el rango fuese aumentando y cambiara la magnitud y posición (p) del valor esperado del CAE total.