Estudio de abastecimiento de la demanda de una planta industrial con parques eólico y solar incorporando bancos de baterías

Grupo: 2
Autores: Luis Cat, Magdalena Irurtia

Instituto de Ingeniería Eléctrica - FING.
Trabajo final curso SimSEE edición 2022
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.

Índice

1. Objetivo 3

2. Hipótesis de trabajo 3

3. Metodología. 5
- 3.1 Planteo del problema 5
  - 3.1.1 Sistema eléctrico 1 5
  - 3.1.2 Sistema eléctrico 2 6
- 3.2 Aplicación en SimSEE 7
  - 3.2.1 Descarga sala de programación estacional 7
  - 3.2.2 Alivianar la sala 7
  - 3.2.3 Variables globales 7
  - 3.2.4 Definición del enganche 7
  - 3.2.5 Actores 8
  - 3.2.6 Capas y escenarios 17
  - 3.2.6 Plantillas SimRes3 21

4. Resultados del estudio. 22
- 4.1 Gráficas Escenario 0_S0_E0_B0 22
- 4.2 Gráficas Escenario 1_S6_E4_B16 23
- 4.3 Gráficas Escenario 2_S4_E2_B24 26
- 4.4 Gráficas Escenario 3_S6_E4_B0 28
- 4.5 Gráficas Escenario 4_S6_E4_B16 29
- 4.6 Gráficas Escenario 5_S6_E4_B16_Manual 30
- 4.7 Resultados costo total anual y ganancia del banco de baterías anual 32
- 4.8 Resultados energía excedente acumulada anual 32
- 4.9 Resultados costo marginal 33

5. Análisis de resultados. 33
- 5.1 Abastecimiento de la demanda y comportamiento del banco de baterías 33
- 5.2 Costo total y ganancia del banco de baterías 35
- 5.3 Estudio ahorro vs. inversión 37

6. Conclusiones 38

7. Futuros trabajos 39

8. Bibliografía 39

9. Anexo 40

1. Objetivo

En el presente trabajo se estudia el efecto de la incorporación de autogeneración renovable así como de un banco de baterías en una planta industrial de fabricación de helados, cuya demanda será también cubierta por la red eléctrica uruguaya.

Para este estudio se modelan distintos escenarios de autogeneración y se observa el efecto que estos tienen sobre las variables más importantes. El objetivo final es entender cuál escenario traería el mayor beneficio para la industria.

De este modo se ponen en práctica los conocimientos adquiridos en el curso sobre el uso de la plataforma SimSEE y su potencial para simular la operación futura de un sistema eléctrico.

2. Hipótesis de trabajo

Se parte de una demanda conocida de una fábrica de helados y se concluye sobre el beneficio de incorporación de un banco de baterías y generación propia con parques eólico y solar. Para esto se calcula cuál sería el costo total de abastecimiento si toda la demanda fuera tomada por la red y se compara con los diferentes escenarios de autogeneración.

Se modelaron dos sistemas eléctricos distintos (que se detallarán más adelante) y dentro de estos sistemas se variaron parámetros tales como el tamaño de los parques eólicos y solar y/o el tamaño de la batería.

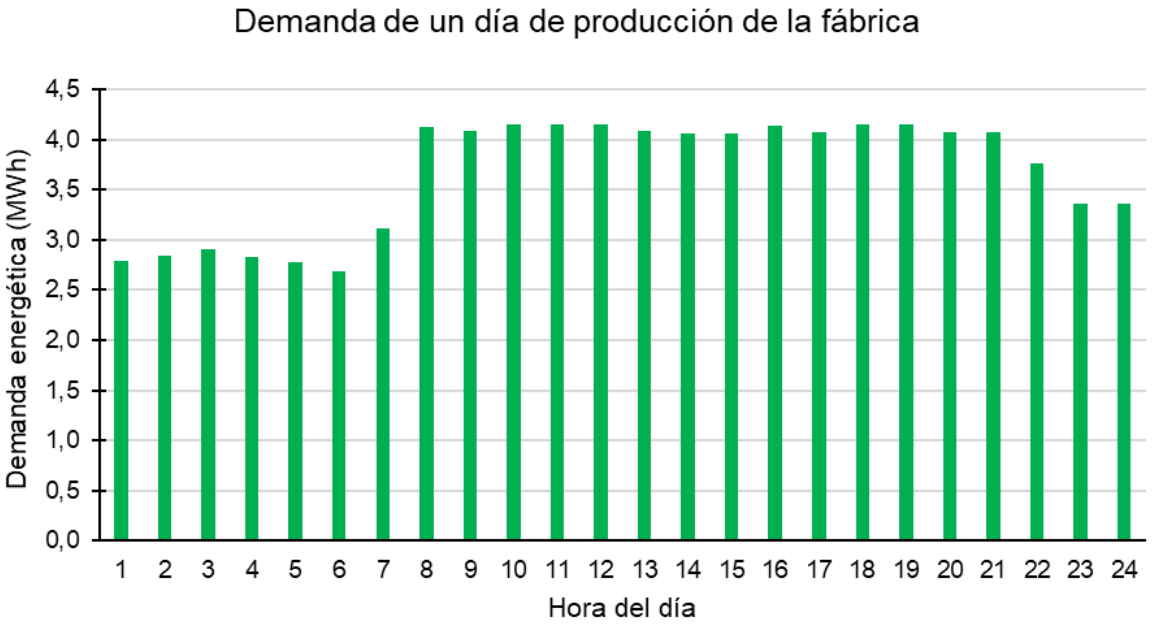
Demanda

La fábrica produce helados de lunes a viernes en el período enero-julio y de lunes a sábado en el período agosto-diciembre. El régimen de producción está regido por la remisión anual de leche a planta junto con la mayor demanda del producto en verano. El comportamiento de la demanda base se puede visualizar en las gráficas 1, 2 y 3.

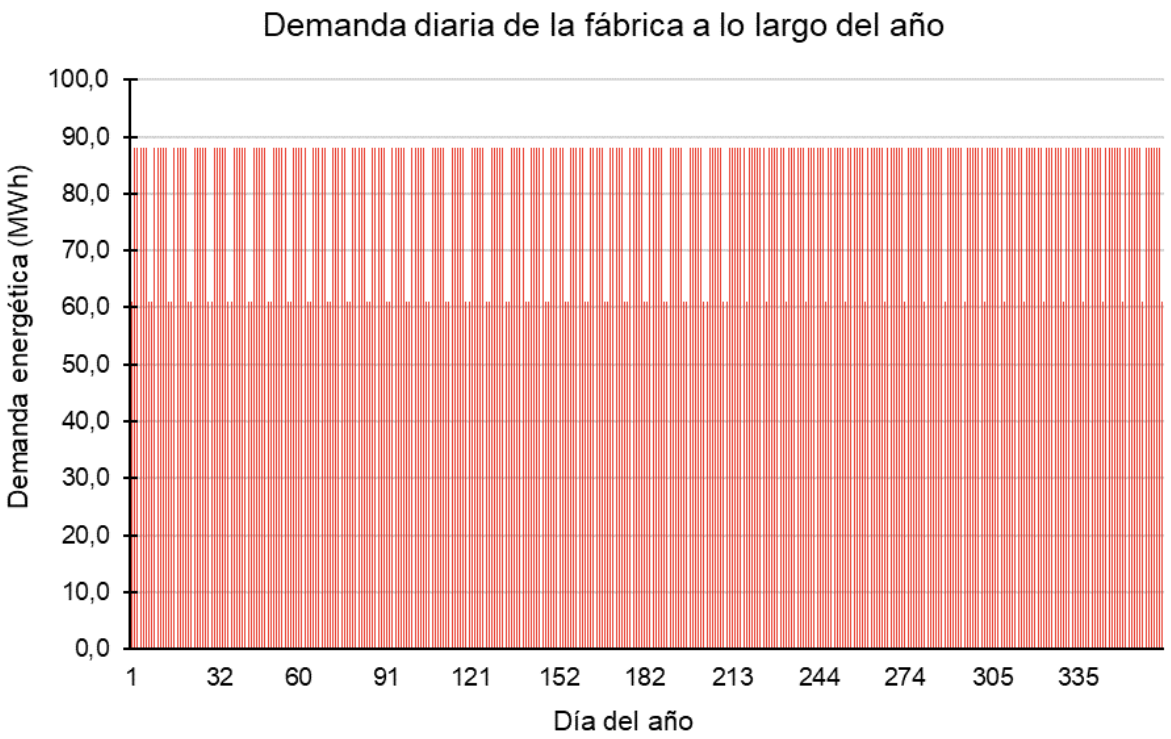
Como se observa en las gráficas, los datos de la demanda no tienen una dependencia con la temperatura ambiente, sino que son valores nominales que surgen de la utilización de los distintos equipos que conforman la planta (equipos de fuerza motriz e iluminación).

La dependencia de la demanda con la temperatura es algo que en la práctica existe e influye de manera significativa en el consumo de energía de la planta industrial. Este efecto se modeló en el SimSEE y se explicará más adelante.

Gráfica 1: *Demanda de un día de no producción de la fábrica*



Gráfica 2: *Demanda de un día de producción de la fábrica*



Gráfica 3: *Demanda diaria de la fábrica a lo largo del año.*

3. Metodología.

Para la realización de las simulaciones de los sistemas eléctricos, se utilizó la plataforma SimSEE.

3.1 Planteo del problema

Se modelan dos sistemas eléctricos, que se detallan en 3.1.1 y 3.1.2. En ambos casos se utiliza la sala de ADME para programación estacional con paso de tiempo diario, haciendo las modificaciones necesarias para la incorporación de los elementos que constituyen el sistema que se quiere estudiar, así como para “alivianar” la sala, buscando que las simulaciones sean más rápidas.

3.1.1 Sistema eléctrico 1

El ***Nodo MVD*** representa el ***Sistema Eléctrico Uruguayo*** con su demanda que es la ***Demanda Uruguaya***.

Se crea el ***Nodo FH***, donde se conecta la demanda de la fábrica de helados ***Demanda FH***, un parque solar ***SolarFH***, un parque eólico ***EolicoFH*** y un banco de baterías ***BancoBaterías***.

La ***Demanda FH*** puede consumir energía de cualquiera de los dos parques generadores, del banco de baterías (si este dispone de energía) o del Sistema Eléctrico Uruguayo a través del arco ***Arco_MVD_FH***.

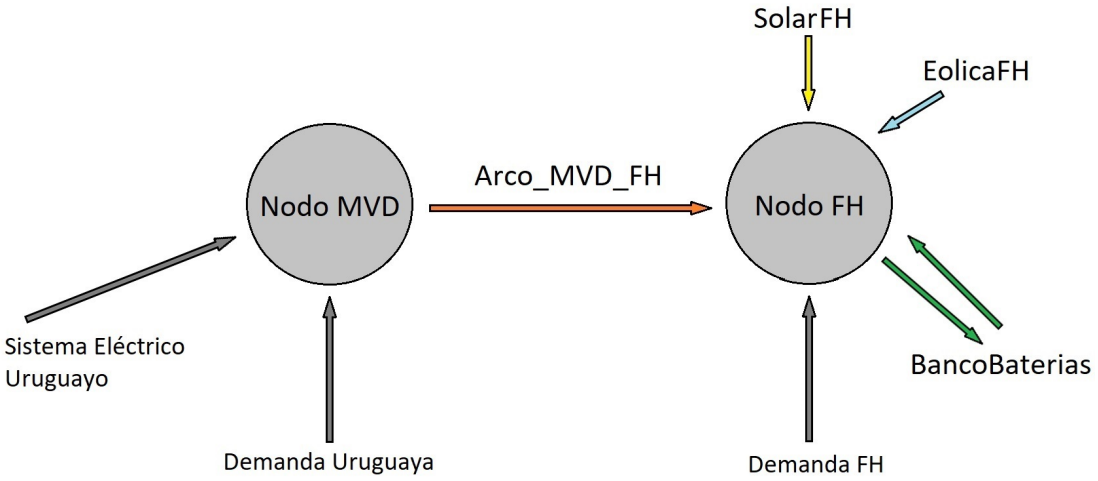


Figura 1: *Modelado sistema eléctrico 1.*

3.1.2 Sistema eléctrico 2

El ***Nodo MVD*** representa el ***Sistema Eléctrico Uruguayo*** con su demanda que es la ***Demanda Uruguaya***.

Se mantiene el ***Nodo FH*** donde se conecta la demanda de la fábrica de helados pero se apagan los parques ***SolarFH***, ***EolicoFH*** y el ***BancoBaterías***. Se agrega el ***Nodo FH2,*** donde se conectan un parque solar ***SolarFH2***, un parque eólico ***EolicoFH2*** y un banco de baterías ***BancoBaterías2***.

En este modelo la ***Demanda FH*** puede consumir energía del ***Nodo FH2*** a través del arco ***Arco_MVD_FH_1*** o del ***Nodo MVD*** a través del arco ***Arco_MVD_FH_1***. Además, el ***BancoBaterías2*** no puede tomar energía del ***Sistema Eléctrico Uruguayo***, a diferencia de lo que ocurre en el sistema eléctrico 1.

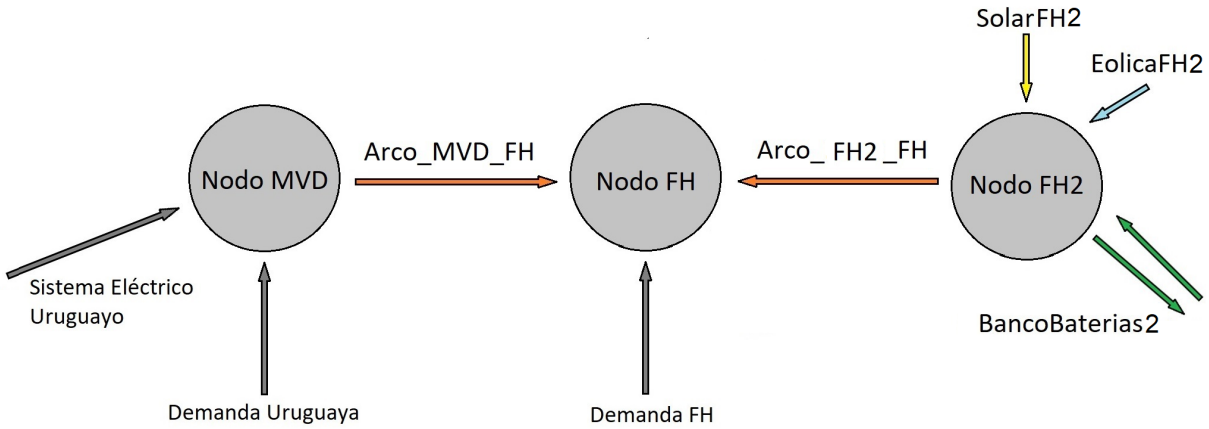


Figura 2: *Modelado sistema eléctrico 2.*

3.2 Aplicación en SimSEE

A continuación se describe cómo se modelaron estos sistemas en la plataforma SimSEE.

3.2.1 Descarga sala de programación estacional

Se descarga la sala oficial de paso diario correspondiente a la Programación Estacional Noviembre 2021 - Abril 2022 de la página de ADME.

3.2.2 Alivianar la sala

Se procede a alivianar la sala para obtener corridas del programa más rápidas e igualmente válidas, para lo cual:

- Se eliminan las fichas de parámetros dinámicos de los embalses, limpiando fpd anteriores.
- Se eliminan todas las fuentes que no están en uso
- En el caso de los actores hidroeléctricos con embalse, se disminuye el número de discretizaciones de 10 a 5 para el caso de Bonete y SG y de 5 a 3 para el caso de Palmar.
- En parámetros de optimización, se cambia el número de crónicas de la optimización de 5 a 1
- En parámetros de simulación, se cambia el número de crónicas de la simulación de 1000 a 100
- En el CEGH correspondiente a los aportes de embalses, se eliminan las variables de estado para SG y Río Negro.

A pesar de todas estas acciones, cada optimización de la sala llevó entre tres y ocho horas para correr.

3.2.3 Variables globales

Se tiene una sala de tipo diaria que optimiza 545 días y simula 365 días. Tanto la simulación como la optimización comienzan el 01/01/2022. La optimización se estableció para un año y medio (545 días, hasta el 30/06/2023), mientras que la simulación para un año (365 días, hasta el 31/12/2022).

3.2.4 Definición del enganche

Al ser una sala de corto plazo deberá tener un valor de “enganche” futuro con una sala de mediano plazo. Para la inicialización del costo futuro se llena el último frame desde un archivo CF.bin, lo cual implica que la sala actual “enganchará” en otra corrida de más largo plazo cuya optimización ya fue realizada.

Además, debido a la eliminación de las variables de estado, se debió dar un valor inicial para estas dos variables, de manera que la sala de paso diario se pudiera enganchar con la de paso semanal.

3.2.5 Actores

Red eléctrica

Se crean los nodos y arcos que permitirán modelar los sistemas eléctricos 1 y 2 antes descritos. En la tabla 1 se listan los actores que existen en la sala modelada para este trabajo.

Actor	Tipo de actor	Detalle
Montevideo	Nodo	Activo en capa 0 Predeterminado por la sala de programación estacional
FH	Nodo	Activo en capa 0
FH2	Nodo	Activo en capa 0
Arco_MVD_FH	Arco	Activo en capa 0 Nodo de entrada: FH Nodo de salida: Montevideo Sin limitación de potencia
Arco_FH2_FH	Arco	Activo en capa 0 Nodo de entrada: FH Nodo de salida: FH2 Sin limitación de potencia

Tabla 1: *Resumen de nodos y arcos utilizados con sus detalles.*

Demanda

Se crea la demanda detallada ***DFH*** conectada al nodo ***FH,*** que se crea a partir de la demanda base en cada hora de la fábrica de helados, datos que abarcan un período de tiempo de un año y medio, que es el período de optimización (la optimización comienza el 01/01/2022 y finaliza el 30/06/2023). El actor demanda detallada ***DFH*** estará activo en la capa 0.

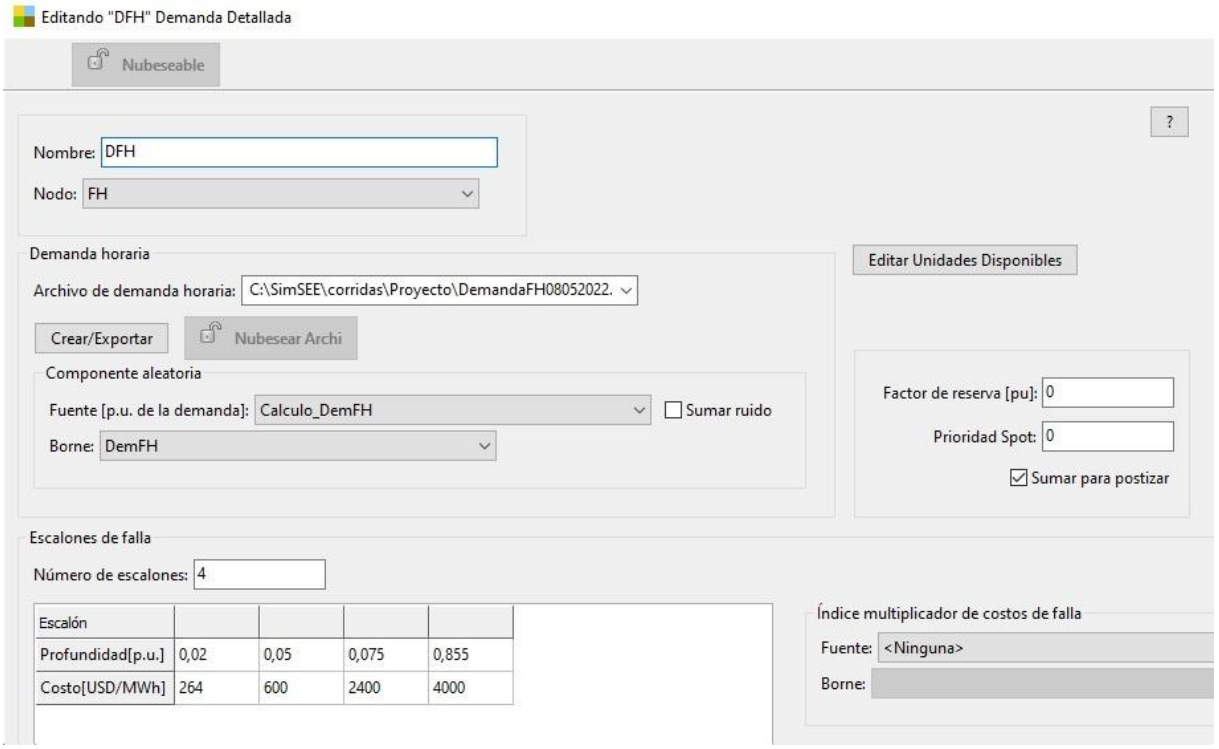


Figura 3: *Parámetros en la creación de la demanda detallada.*

Fuente de ajuste para DFH

En la Solapa Fuentes se creó la fuente ***Calculo_DemFH***, que se utiliza para generar una variación en la demanda a partir de la temperatura.

Se considera que la demanda antes cargada corresponde a una temperatura de $15\,°C$ con una variación del 5% por cada $1\,°C$ de variación de la temperatura, basados en un estudio del Grupo de Planificación y Operación Óptimas de los Sistemas Eléctricos de Energía del Instituto de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de la República [2]. Si bien el artículo sugiere considerar una temperatura de $18\,°C$ para la demanda nominal, la misma se estableció $15\,°C$ con el fin de aumentar un poco más la demanda.

La fuente es del tipo Operación Multi-Fuente y se crea con la fuente CEGH para la demanda y los bornes ***DEM_X3.Tmax*** y ***DEM_X3.Tmin***. La fuente creada tiene un borne llamado ***DemFH*** que define cómo es el ajuste con la temperatura, a través de la multiplicación de la demanda base por ruido. Si el ruido es "r", el valor de la demanda base se multiplica por $(1 + r)$.

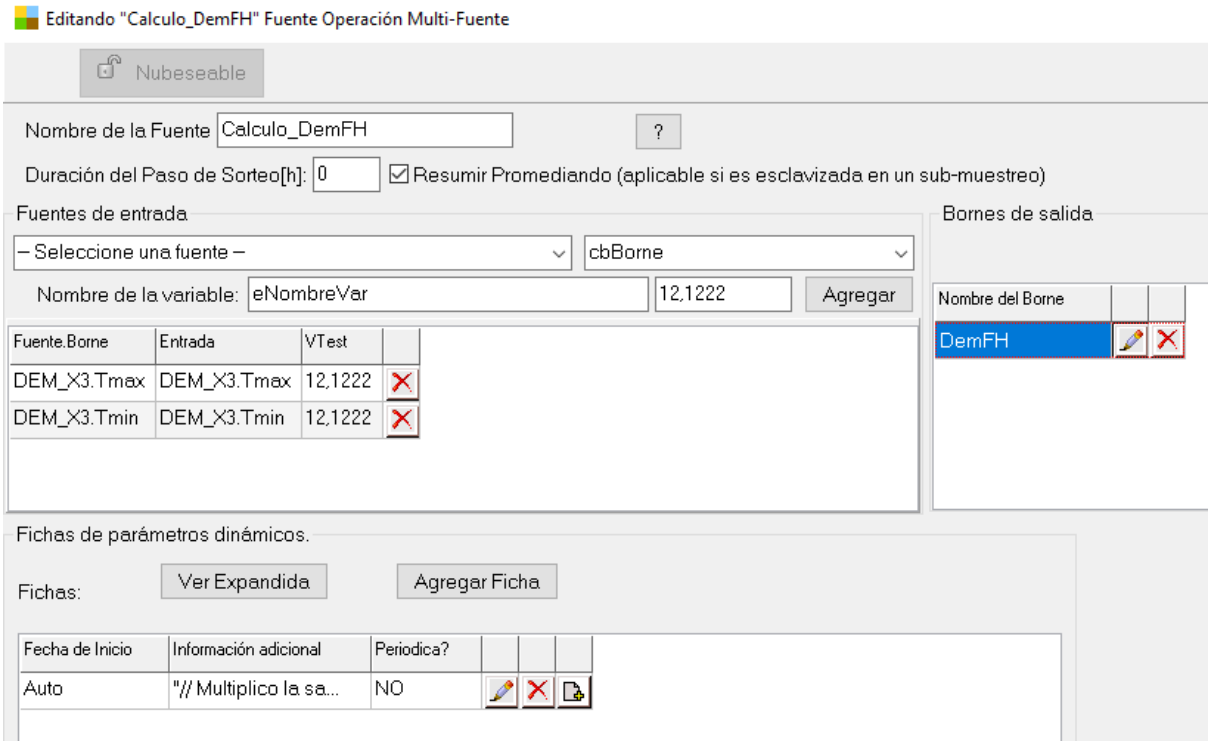


Figura 4: *Creación de la fuente con Operación Multi-Fuente para modelar la variación de la demanda de la fábrica con la temperatura.*

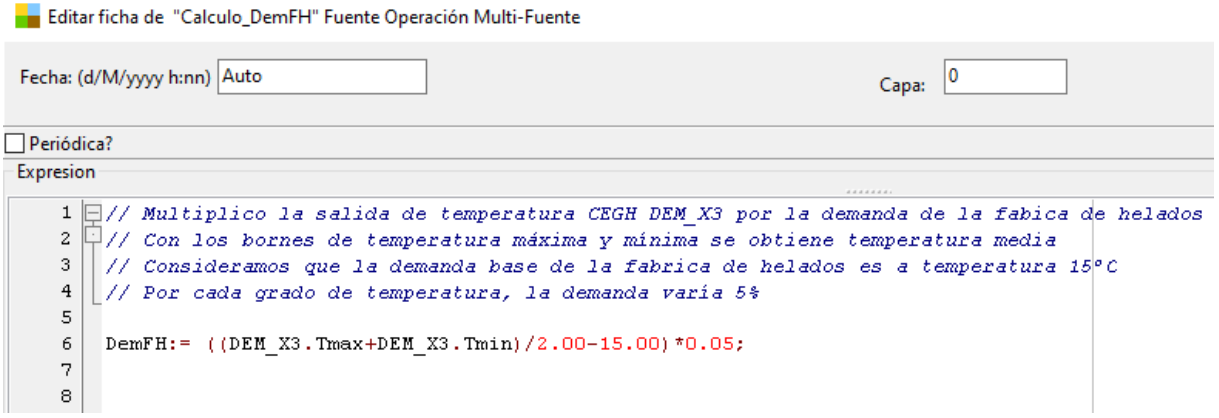


Figura 5: *Definición de los parámetros dinámicos de la fuente.*

Parque eólico

Se crean los parques eólicos ***EolicoFH*** y ***EolicoFH2*** conectados a los nodos ***FH*** y ***FH2*** respectivamente. Para cada caso se duplica y modifica el parque eólico Libertad debido a que el mismo está situado en la misma localidad que la fábrica de helados. Se mantienen las características fundamentales del parque (aerogeneradores de $1,8\ MW$) pero se varían las unidades disponibles.

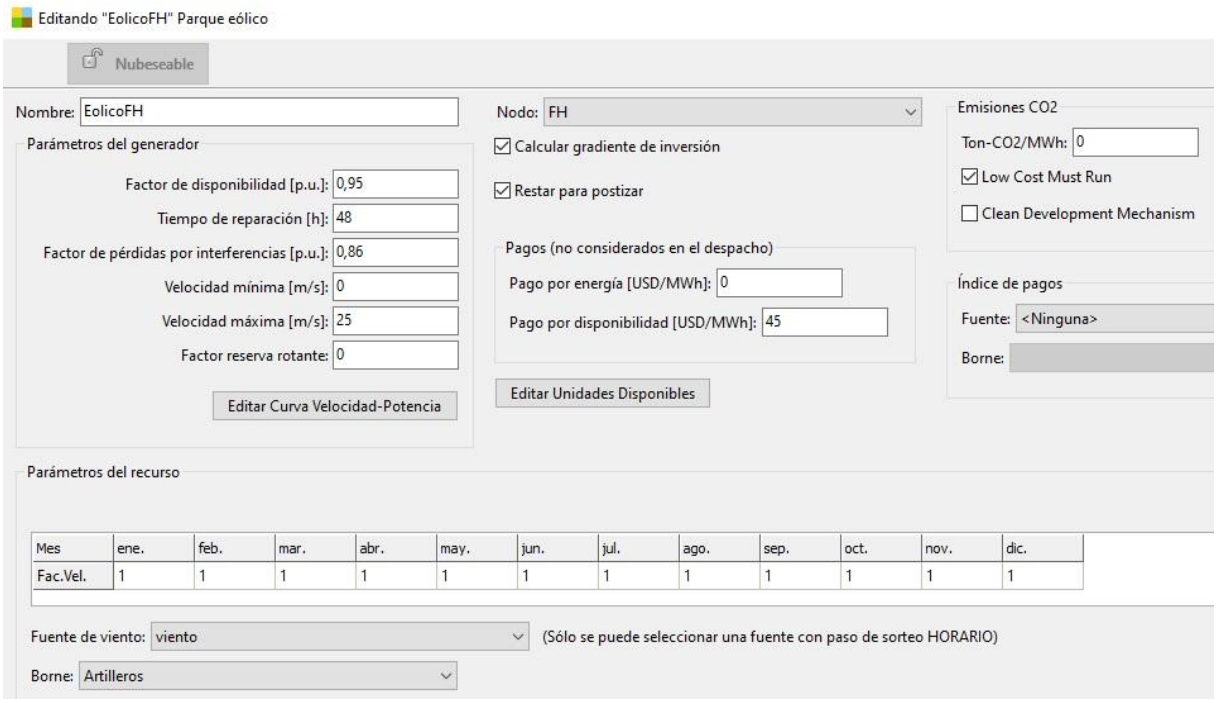


Figura 6: *Parámetros en la creación del parque eólico* ***EolicoFH****.*

Figura 7: *Unidades disponibles del parque eólico* ***EolicoFH****.*

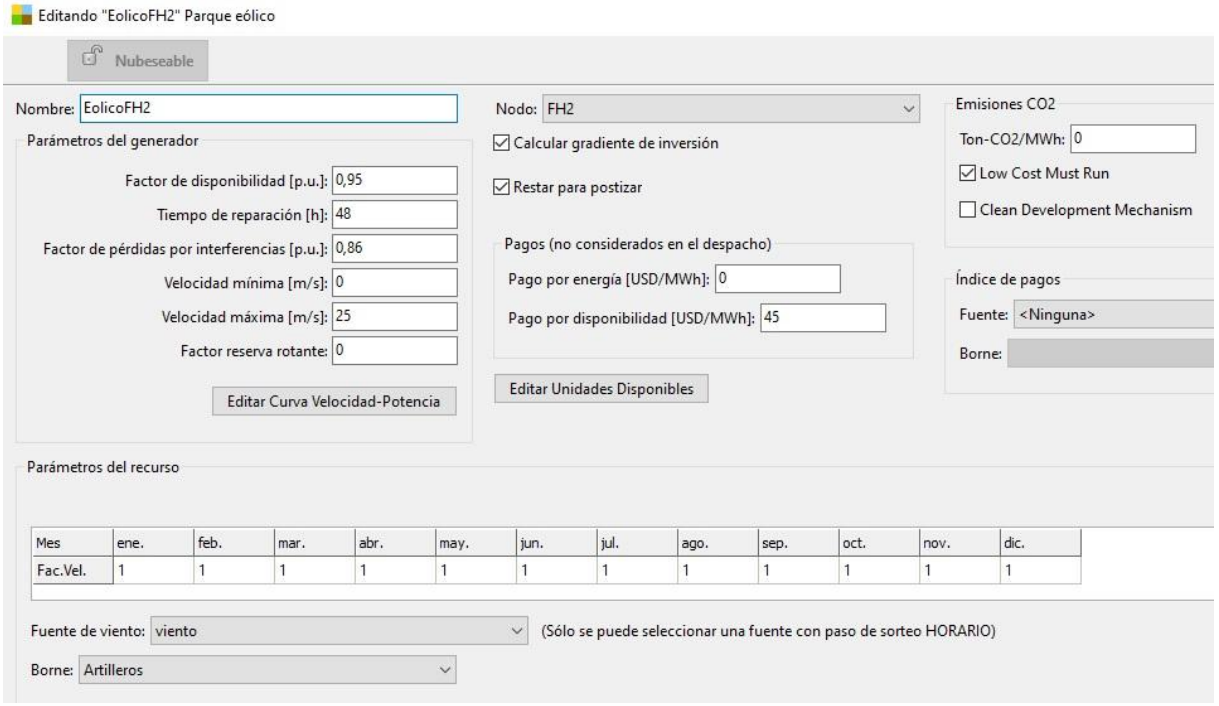


Figura 8: *Parámetros en la creación del parque eólico* ***EolicoFH2****.*

Figura 9: *Unidades disponibles del parque eólico* ***EolicoFH2****.*

Parque solar

Se crean los parques solares ***SolarFH*** y ***SolarFH2*** conectados a los nodos ***FH*** y ***FH2*** respectivamente. Para cada caso se duplica y modifica la planta solar Yarnel situada en la localidad de Mercedes (departamento de Soriano, Uruguay) por ser la más cercana a la fábrica de helados ubicada en la localidad de Libertad. A pesar de esto, se modifica el borne de la fuente de claridad por uno de una localidad más cercana. Además, se decide modificar la potencia máxima de cada inversor (unidad instalada) a $0,10\ MW$ y la potencia pico a $0,11\ MW$.

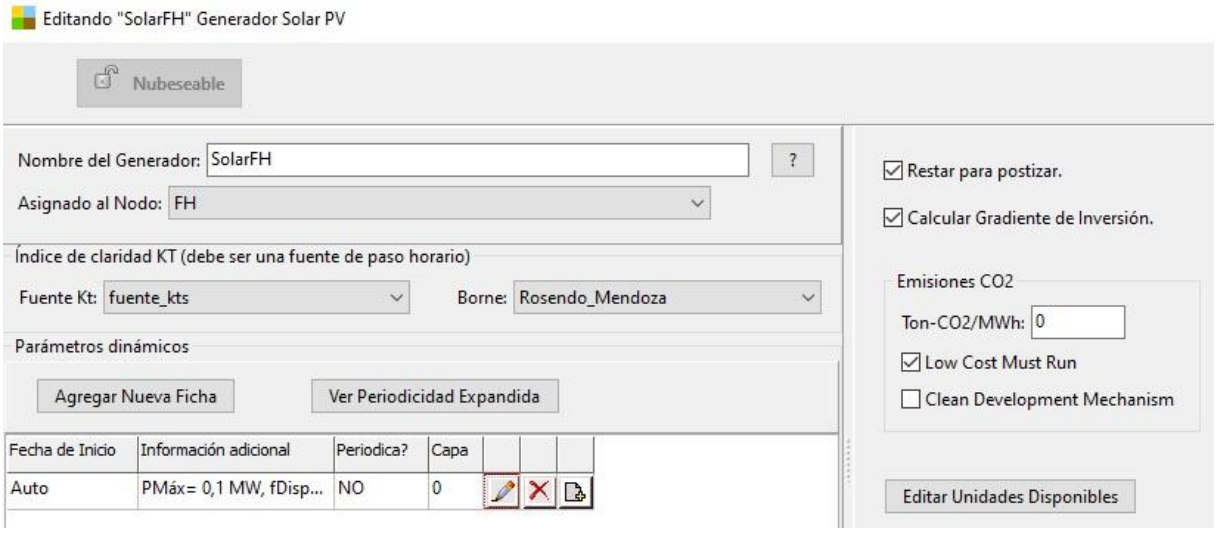


Figura 10: *Parámetros en la creación del parque solar* ***SolarFH****.*

Figura 11: *Unidades disponibles del parque solar* ***SolarFH****.*

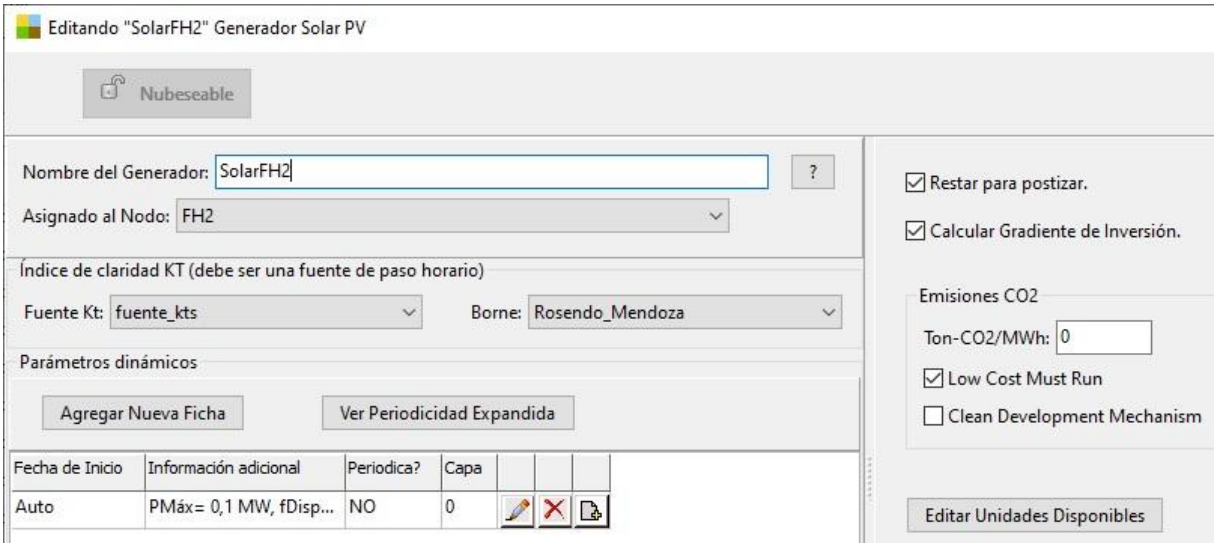


Figura 12: *Parámetros en la creación del parque solar* ***SolarFH2****.*

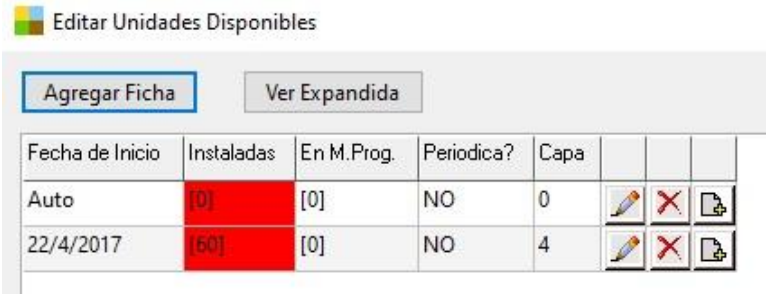


Figura 13: *Unidades disponibles del parque solar* ***SolarFH2****.*

Se detallan los parámetros de cada unidad generadora en la siguiente figura:

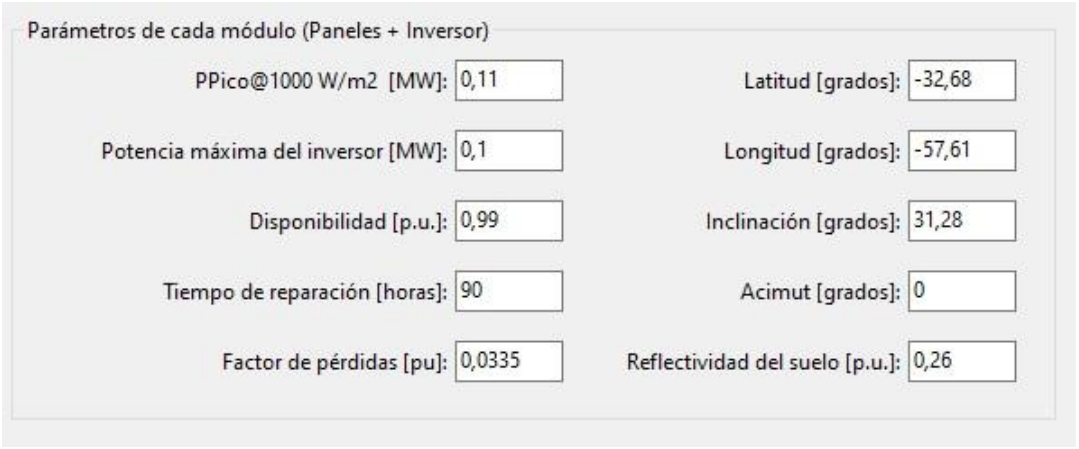


Figura 14: *Parámetros de cada módulo de generación solar (paneles + inversor).*

Banco de baterías

Se crean los bancos de baterías ***BancoBaterias*** y ***BancoBaterias_FH2*** y conectados a los nodos ***FH*** y ***FH2*** respectivamente. Además se crea el banco de baterías ***BancoBaterias_Manual*** que suplantará al ***BancoBaterias*** en lo que corresponde al Escenario 5.

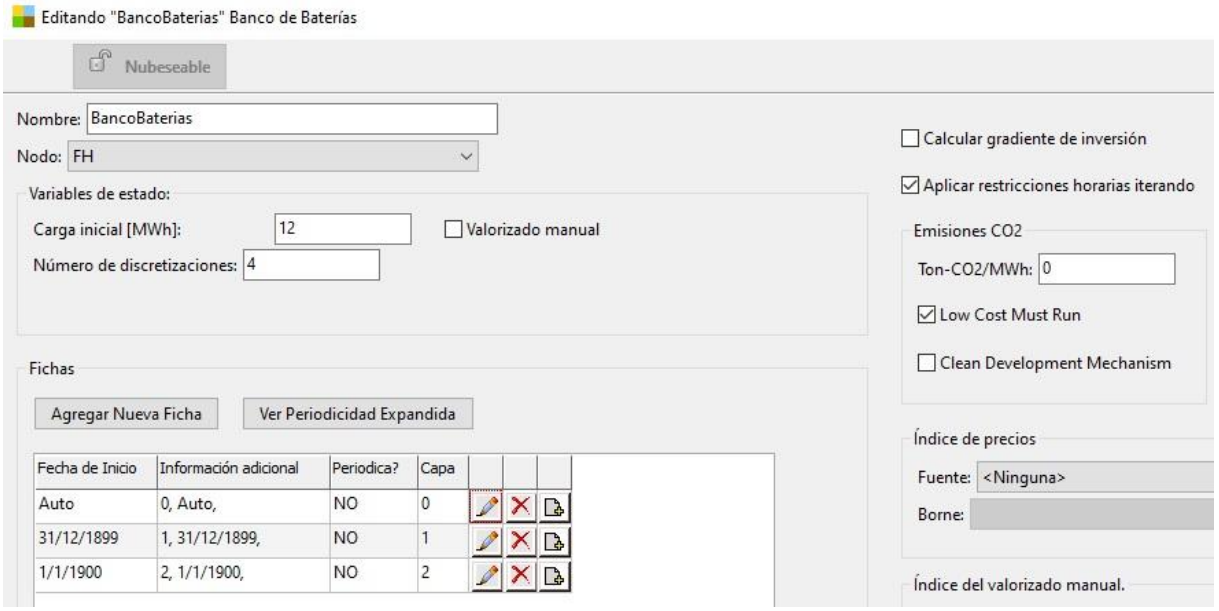


Figura 15: *Parámetros en la creación del* banco de baterías ***BancoBaterias****.*

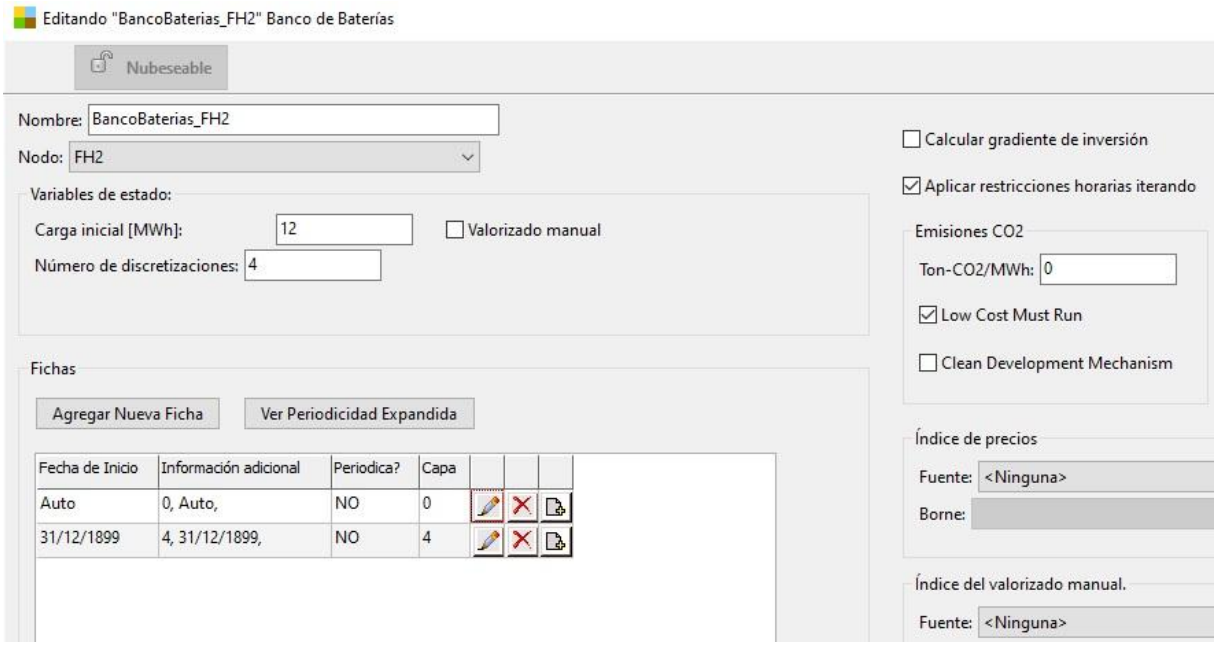


Figura 16: *Parámetros en la creación del* banco de baterías ***BancoBaterias2****.*

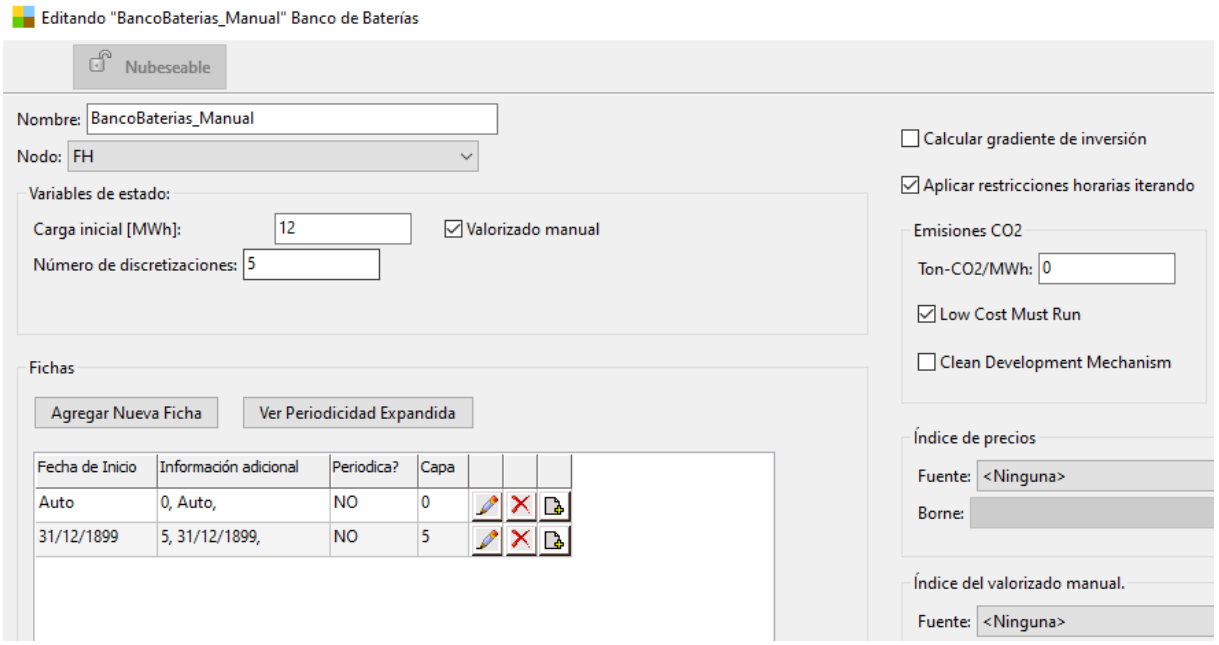


Figura 17: *Parámetros en la creación del* banco de baterías ***BancoBaterias_Manual****.*

El actor ***BancoBaterias*** tendrá una ficha en la capa 0 con disponibilidad fortuita nula, lo que significa que en esta capa el banco de baterías no estará disponible. Además, tendrá fichas en las capas 1 con $16\ MWh$ y $4\ MW$ y en la capa 2 con $24\ MWh$ y $4\ MW$.

El actor ***BancoBaterias2*** también tendrá una ficha en la capa 0 con disponibilidad fortuita nula y una ficha en la capa 4 con $16\ MWh$ y $4\ MW$.

El actor ***BancoBaterias_Manual*** también tendrá una ficha en la capa 0 con disponibilidad fortuita nula y una ficha en la capa 5 con $16\ MWh$ y $4\ MW$. Además, a diferencia de los otros bancos de baterías, en este se considera un valorizado manual y se definen $30\ USD/MWh$ para la compra de energía y $50\ USD/MWh$ para la venta. Estos valores se toman viendo previamente los costos marginales de los nodos.

Sumidero

Se crea el actor ***Excedentes_FH*** conectado al nodo ***FH*** y que forma parte del modelado de los sistemas eléctricos 1 y 2 y permitirá cuantificar el excedente de energía. Como fuente de precios se seleccionó la fuente ***Excedentes_precio***, una fuente constante a la cual se le asignó un precio muy bajo para que su efecto fuera despreciable en el análisis de los costos.

Figura 18: *Parámetros del Spot de mercado* ***Excedentes_FH****.*

Dado que el sumidero “consume” los sobrantes de energía se modela con un valor de $PMín[MW]$ negativo, y dado que no inyecta energía al nodo el valor de $PMáx[MW]$ es nulo.

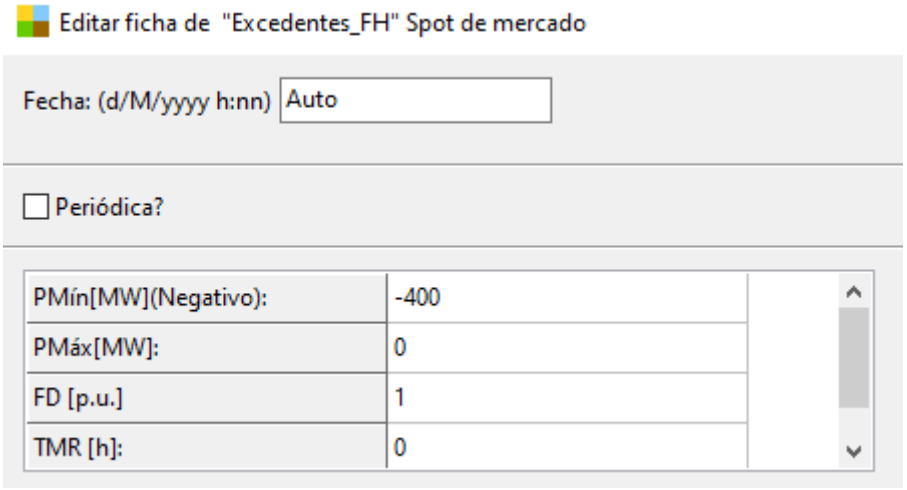


Figura 19: *Parámetros del Spot de mercado* ***Excedentes_FH****.*

3.2.6 Capas y escenarios

En la sala utilizada para llevar adelante el trabajo, se crearon seis escenarios diferentes utilizando las capas. Los escenarios permiten analizar las diferentes situaciones en una misma sala.

Capas

La capa 0 se utiliza para el escenario base, en que la fábrica toma toda su demanda desde la red eléctrica uruguaya. Todos los generadores creados tienen una ficha en la capa 0, en la que se encuentran apagados. Las capas 1, 2, 3, 4 y 5 permitirán armar los escenarios 1, 2, 3, 4 y 5 respectivamente. Contendrán las fichas que modelen los parques eólicos y solares así como los bancos de baterías aplicables en cada escenario.

Escenarios

A continuación se describen los escenarios utilizados para modelar los casos de interés para realizar el presente trabajo.

Escenario	Capas activas	Potencia Solar instalada (MW)	Potencia instalada Eólica (MW)	Capacidad máxima de la batería (MWh)	Potencia máxima descarga de la batería (MW)
N° 0	0	0	0	0	0
N° 1	0, 1	6	7,2	16	4
N° 2	0, 2	4	3,6	24	4
N° 3	0, 3	6	7,2	0	0
N° 4	0, 4	6	7,2	16	4
N° 5	0, 5	6	7,2	16*	4

Tabla 2: *Resumen de escenarios utilizados con sus características.*

El escenario 0 permitirá estudiar el comportamiento de la demanda de la fábrica sin energías alternativas ni banco de batería, lo que servirá de base para comparar el comportamiento de los demás escenarios.

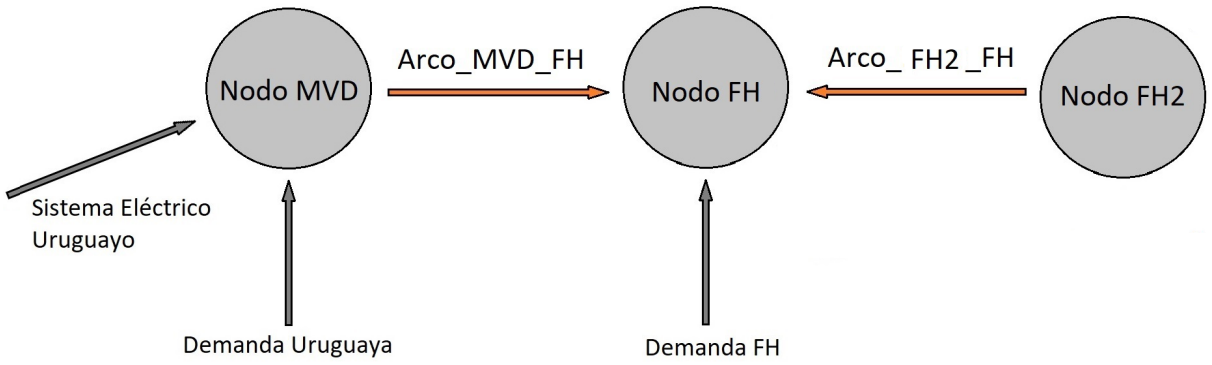


Figura 20: *Modelo del escenario 0.*

* Banco de baterías con valorizado manual

El escenario 1 modela el sistema eléctrico 1 que se describió anteriormente en 3.1.1 con $6\ MW$ de potencia solar instalada, $7,2\ MW$ de potencia eólica instalada y una batería con una capacidad de $16\ MWh$ y una potencia máxima de descarga de $4\ MW$.

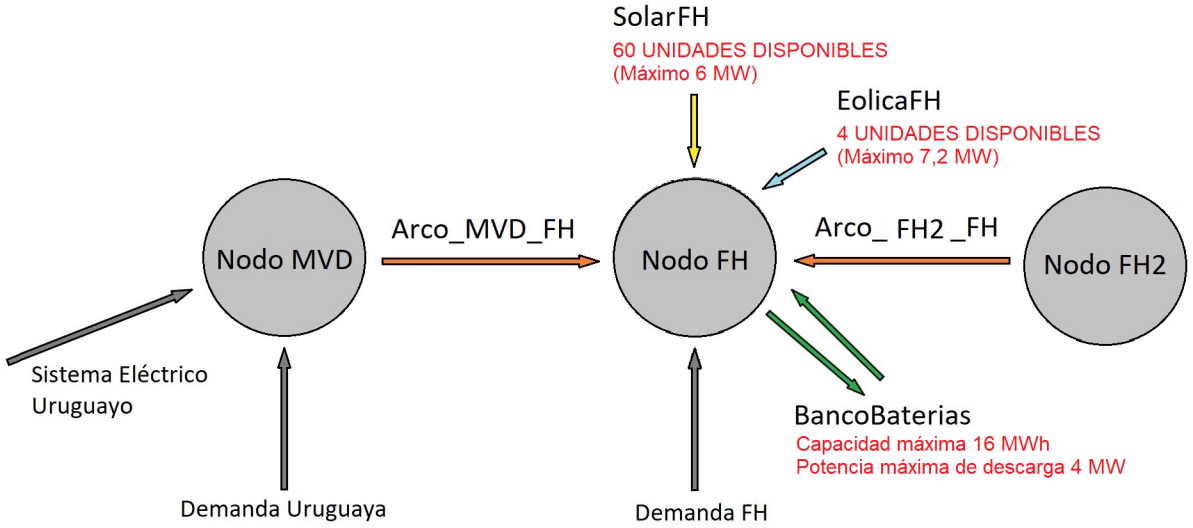


Figura 21: *Modelo del escenario 1.*

El escenario 2 modela el sistema eléctrico 1 que se describió anteriormente en 3.1.1 con $4\ MW$ de potencia solar instalada y $3,6\ MW$ de potencia eólica instalada y una batería con una capacidad de $24\ MWh$ y una potencia máxima de descarga de $4\ MW$.

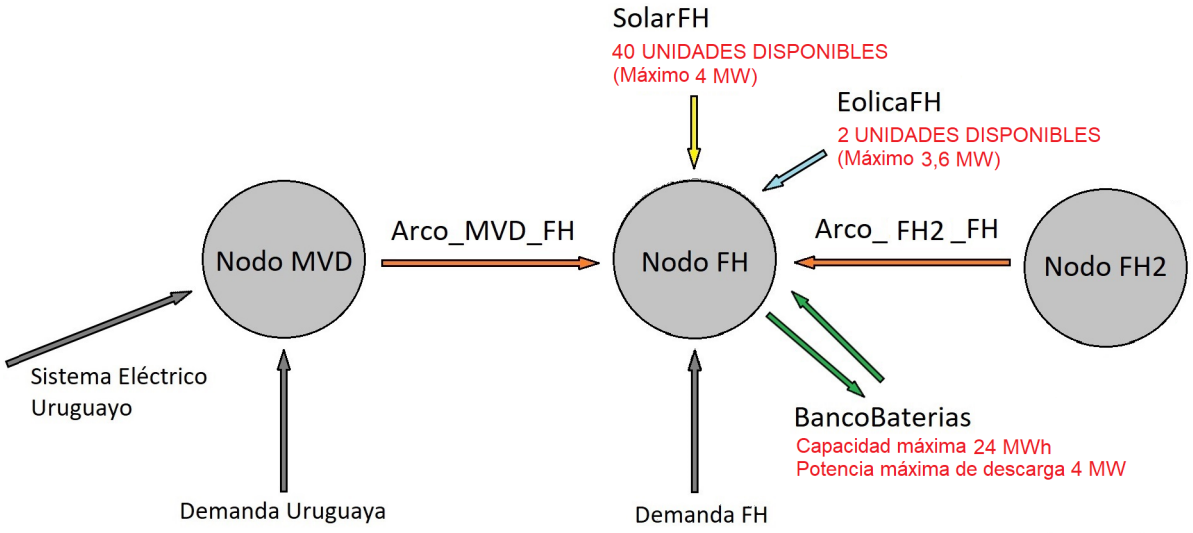


Figura 22: *Modelo del escenario 2.*

El escenario 3 modela el sistema eléctrico 1 que se describió anteriormente en 3.1.1 con las mismas unidades disponibles de solar y de eólica que en el escenario 1 pero sin batería.

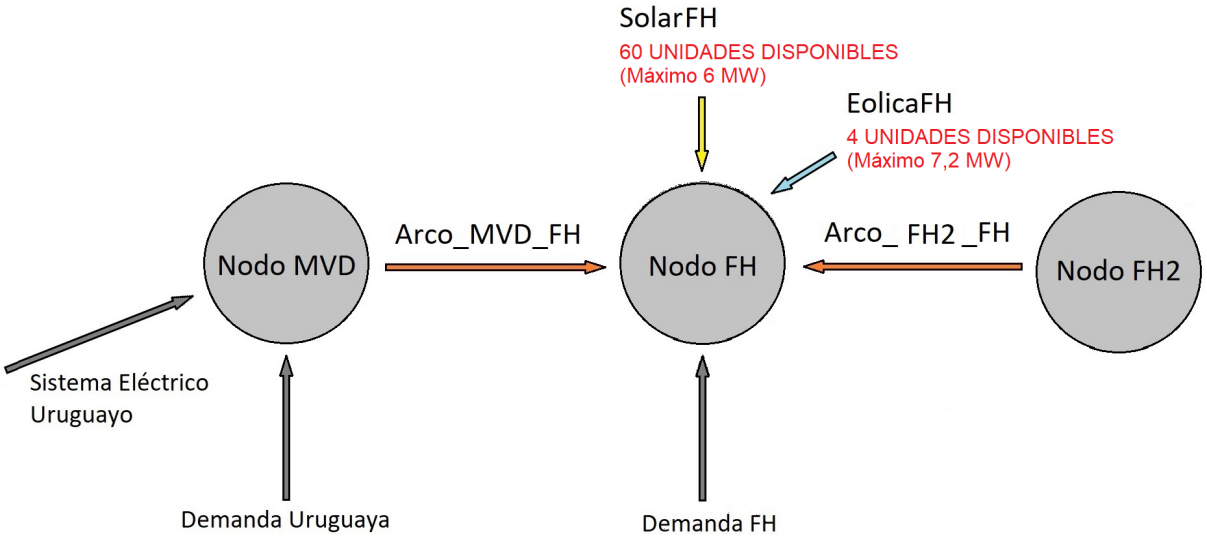


Figura 23: *Modelo del escenario 3.*

El escenario 4 modela el sistema eléctrico 2 que se describió anteriormente en 3.1.2 con $6\ MW$ potencia solar instalada, $7,2\ MW$ de potencia eólica instalada y una batería con una capacidad de $16\ MWh$ y una potencia máxima de descarga de $4\ MW$.

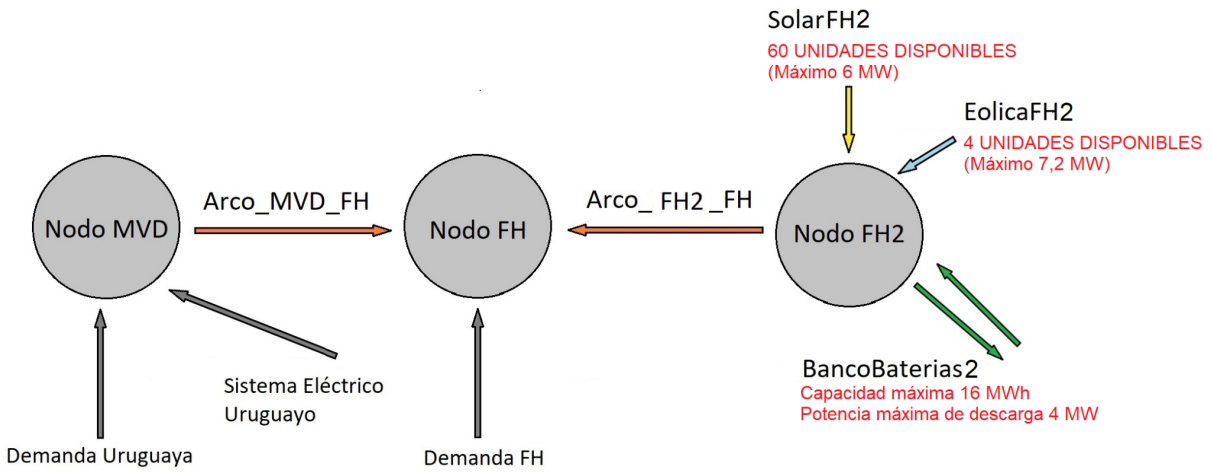
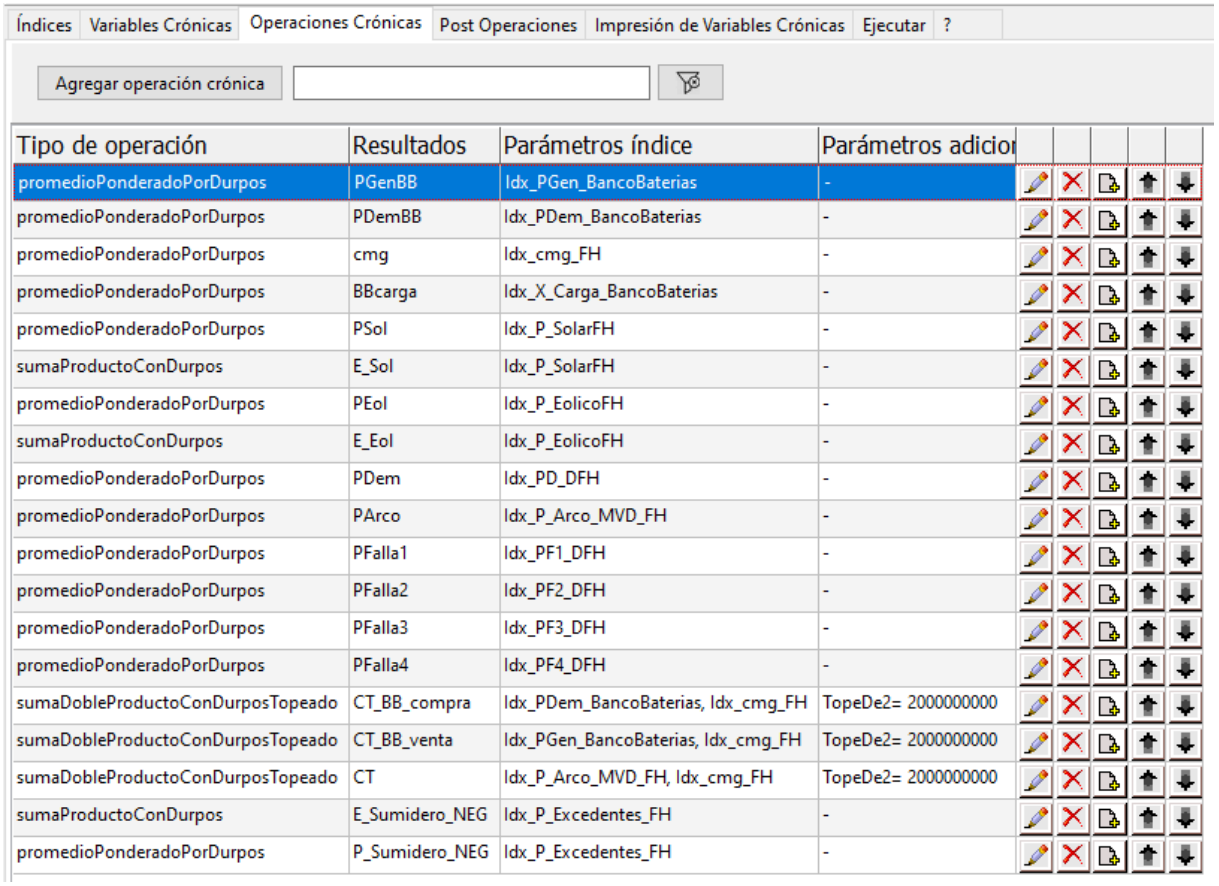


Figura 24: *Modelo del escenario 4.*

El escenario 5 es idéntico al escenario 1 con la única diferencia, que el banco de baterías no forma parte de la optimización, sino que se le da un valorizado manual, $30\ USD/MWh$ para compra y $50\ USD/MWh$ para la venta.

3.2.6 Plantillas SimRes3

Se crean tres plantillas diferentes, una plantilla para los escenarios 0, 1, 2 y 3, otra para el escenario 4 y una última para el escenario 5. Se realiza de esta manera, ya que los escenarios 4 y 5 tienen actores diferentes a los otros escenarios. En las figuras 25 y 26 se deja como ejemplo las operaciones crónicas y post operaciones de los escenarios 1 a 3.



Tipo de operación	Resultados	Parámetros índice	Parámetros adicior
promedioPonderadoPorDurpos	PGenBB	Idx_PGen_BancoBaterias	-
promedioPonderadoPorDurpos	PDemBB	Idx_PDem_BancoBaterias	-
promedioPonderadoPorDurpos	cmg	Idx_cmg_FH	-
promedioPonderadoPorDurpos	BBcarga	Idx_X_Carga_BancoBaterias	-
promedioPonderadoPorDurpos	PSol	Idx_P_SolarFH	-
sumaProductoConDurpos	E_Sol	Idx_P_SolarFH	-
promedioPonderadoPorDurpos	PEol	Idx_P_EolicoFH	-
sumaProductoConDurpos	E_Eol	Idx_P_EolicoFH	-
promedioPonderadoPorDurpos	PDem	Idx_PD_DFH	-
promedioPonderadoPorDurpos	PArco	Idx_P_Arco_MVD_FH	-
promedioPonderadoPorDurpos	PFalla1	Idx_PF1_DFH	-
promedioPonderadoPorDurpos	PFalla2	Idx_PF2_DFH	-
promedioPonderadoPorDurpos	PFalla3	Idx_PF3_DFH	-
promedioPonderadoPorDurpos	PFalla4	Idx_PF4_DFH	-
sumaDobleProductoConDurposTopeado	CT_BB_compra	Idx_PDem_BancoBaterias, Idx_cmg_FH	TopeDe2= 2000000000
sumaDobleProductoConDurposTopeado	CT_BB_venta	Idx_PGen_BancoBaterias, Idx_cmg_FH	TopeDe2= 2000000000
sumaDobleProductoConDurposTopeado	CT	Idx_P_Arco_MVD_FH, Idx_cmg_FH	TopeDe2= 2000000000
sumaProductoConDurpos	E_Sumidero_NEG	Idx_P_Excedentes_FH	-
promedioPonderadoPorDurpos	P_Sumidero_NEG	Idx_P_Excedentes_FH	-

Figura 25: *Editor SimRes3 - Operaciones crónicas.*

Índices | Variables Crónicas | Operaciones Crónicas | Post Operaciones | Impresión de Variables Crónicas | Ejecutar | ?

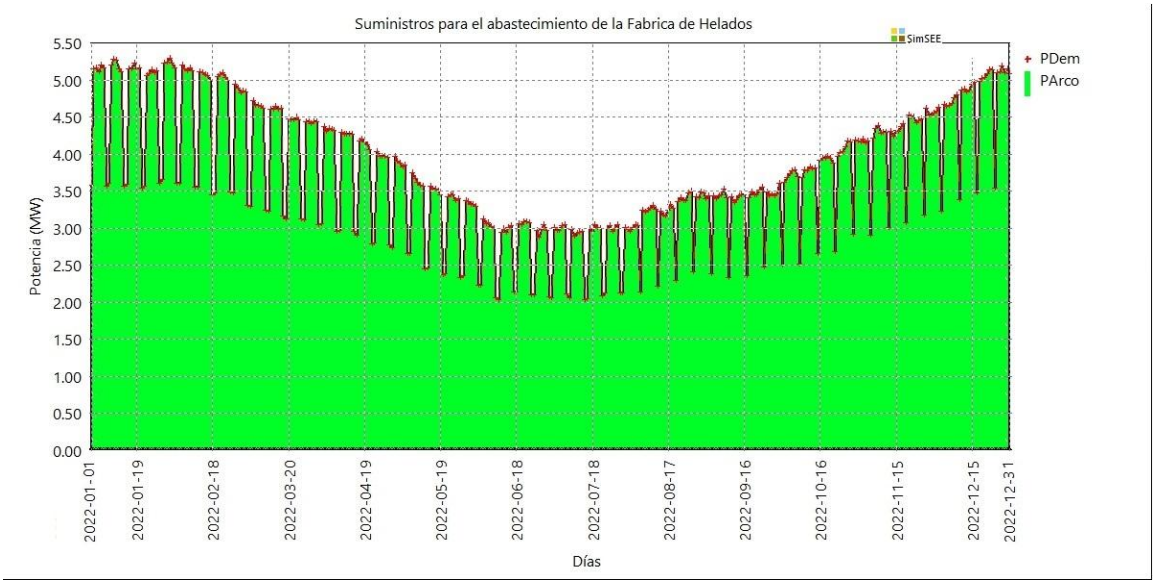
Agregar post operación

Tipo de opera	Resultados	Parámetros variables crónicas	Parámetros adicior
cronVarPorReal	PConsumidaBB	PDemBB	aReal= -1
acumularCronVar	CT_BB_compra_acum	CT_BB_compra	-
acumularCronVar	CT_BB_venta_acum	CT_BB_venta	-
acumularCronVar	CT_acum	CT	-
restaCronVars	Ganancia_BB	CT_BB_venta_acum, CT_BB_compra_acum	-
cronVarPorReal	E_Sumidero	E_Sumidero_NEG	aReal= -1
acumularCronVar	E_Sumidero_acum	E_Sumidero	-
cronVarPorReal	P_Sumidero	P_Sumidero_NEG	aReal= -1
acumularCronVar	E_Sol_acum	E_Sol	-
acumularCronVar	E_Eol_acum	E_Eol	-

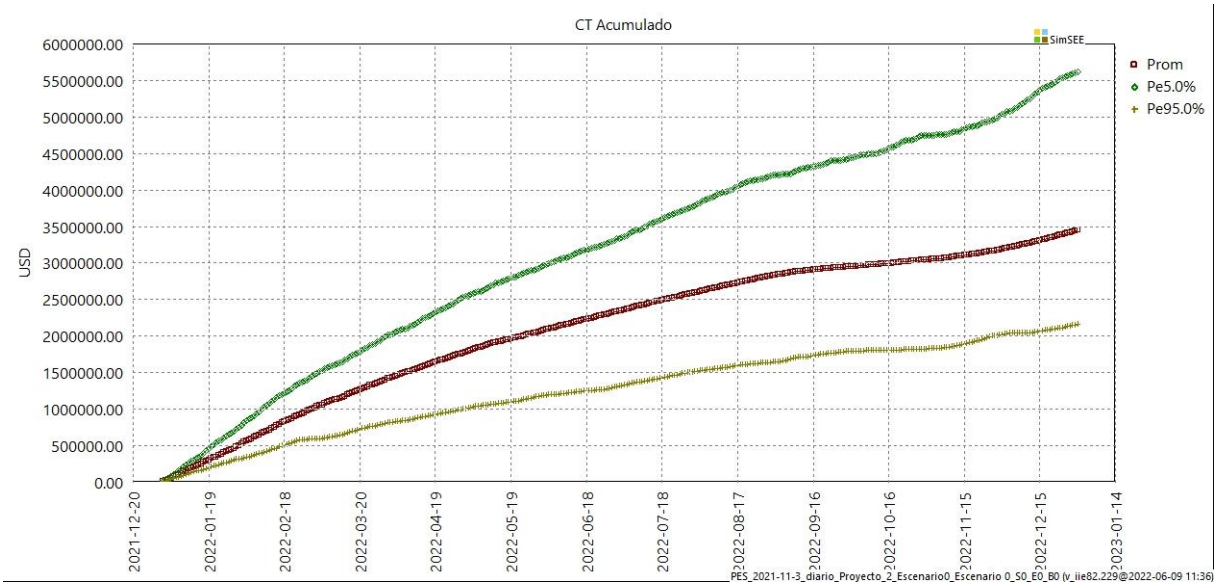
Figura 26: *Editor SimRes3 - Post Operaciones.*

4. Resultados del estudio.

4.1 Gráficas Escenario 0_S0_E0_B0

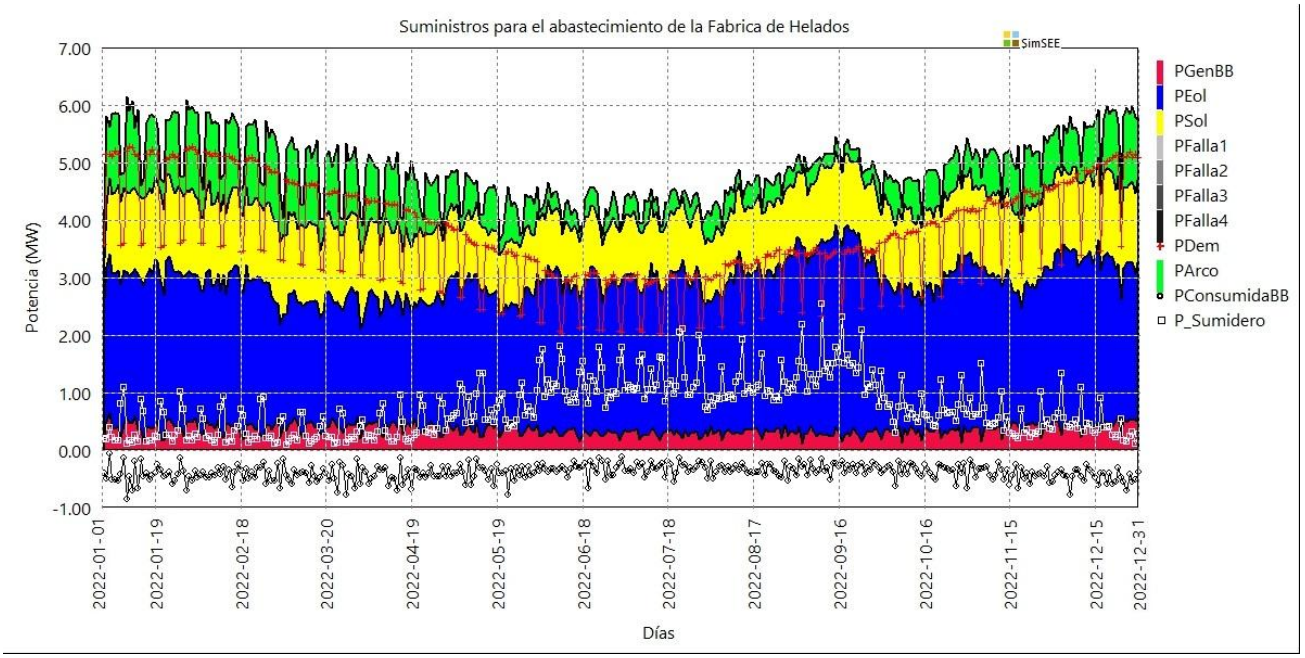


Gráfica 4: *Suministros para el abastecimiento de la fábrica de helados. Escenario 0*

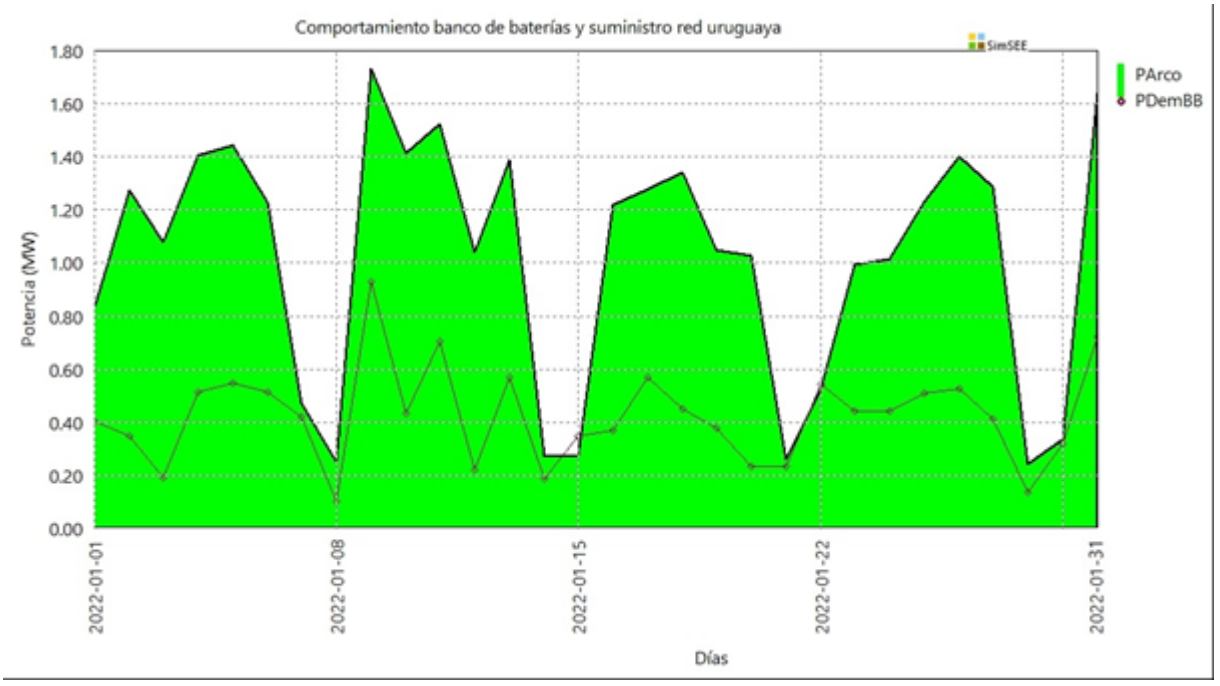


Gráfica 5: *Costo total acumulado.*
Escenario 0

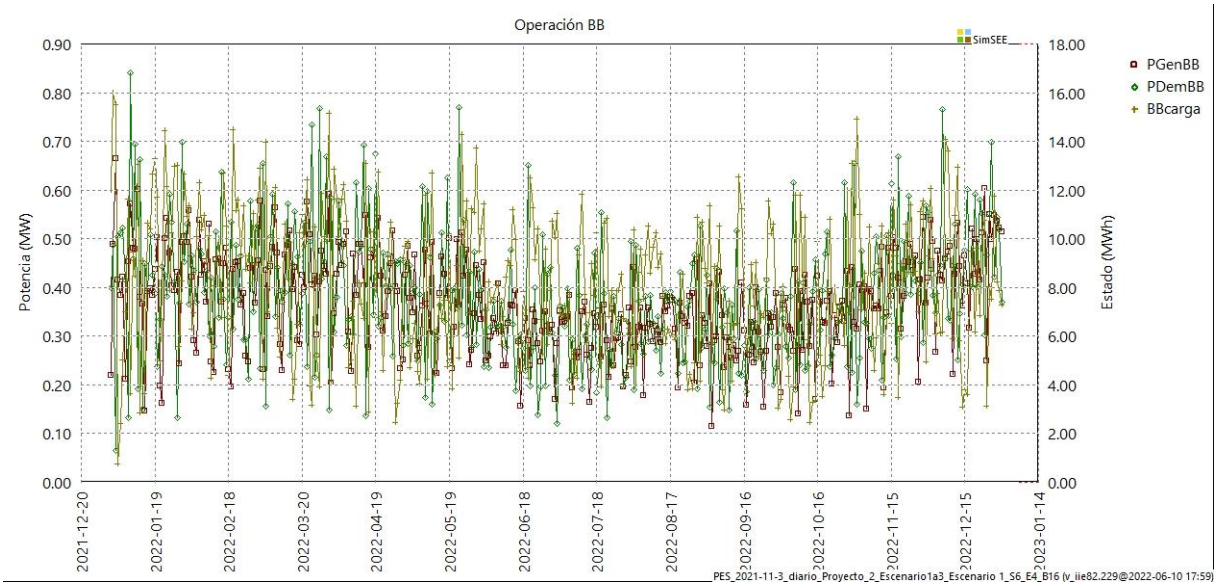
4.2 Gráficas Escenario 1_S6_E4_B16



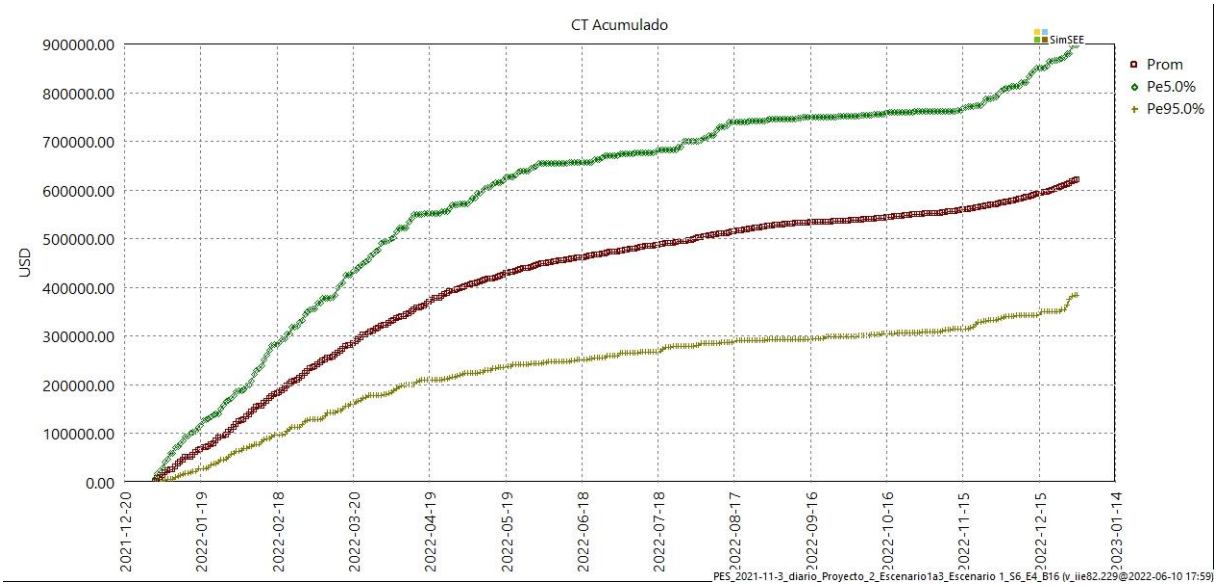
Gráfica 6: *Suministros para el abastecimiento de la fábrica de helados.*
Escenario 1



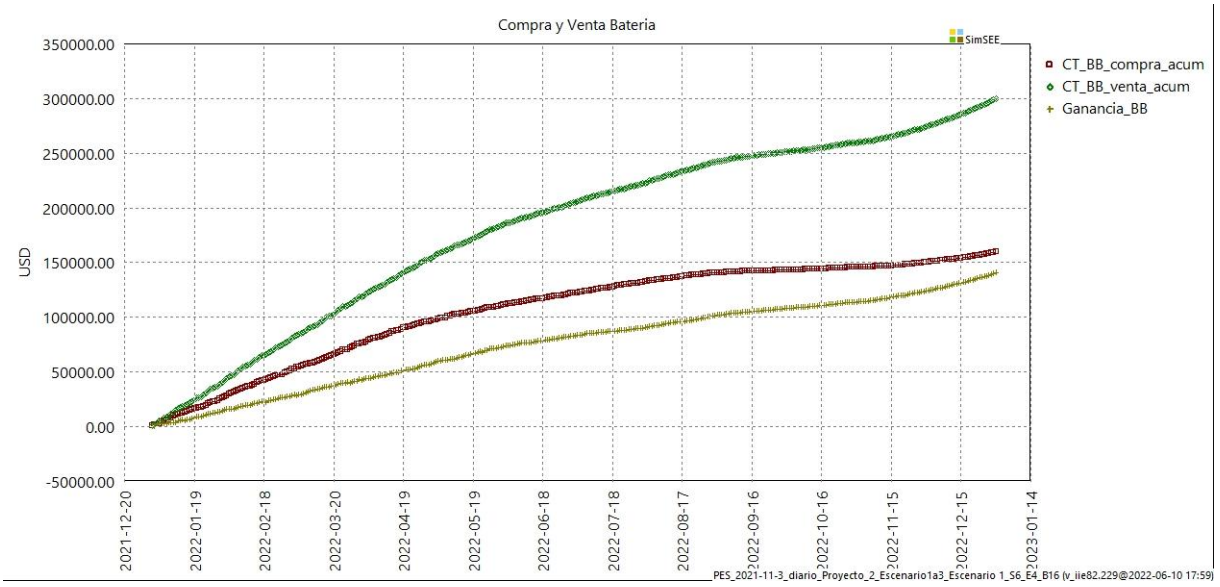
Gráfica 7: *Comportamiento banco de baterías y suministro de la red uruguaya. Escenario 1 del 01/01/2022 al 31/01/2022.*



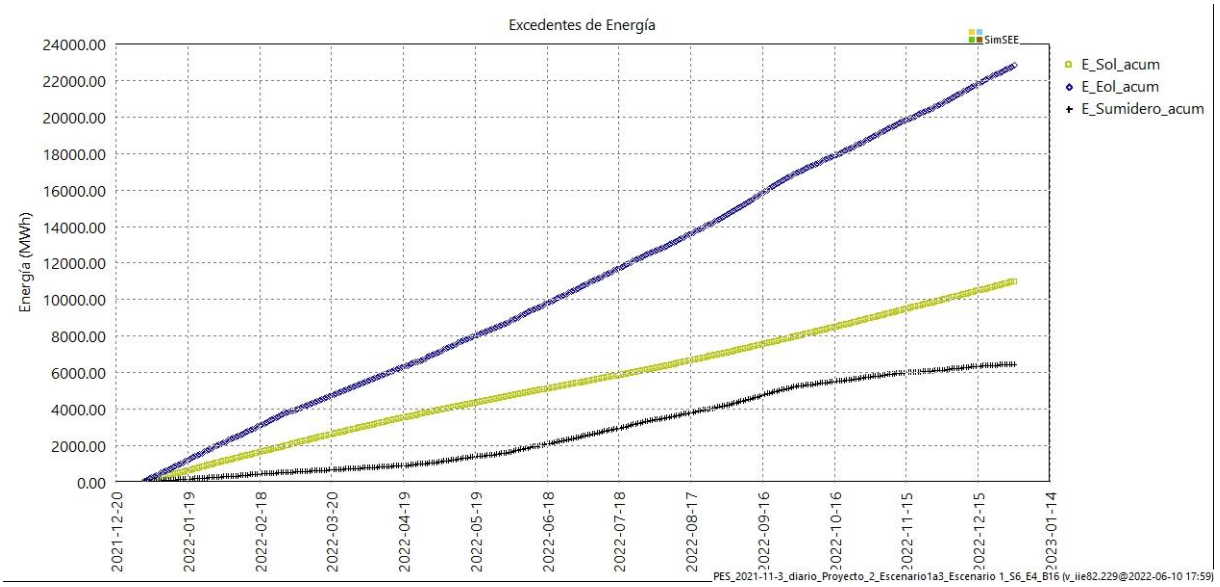
Gráfica 8: *Operación del banco de baterías a lo largo del año. Escenario 1*



Gráfica 9: *Costo total acumulado.*
Escenario 1

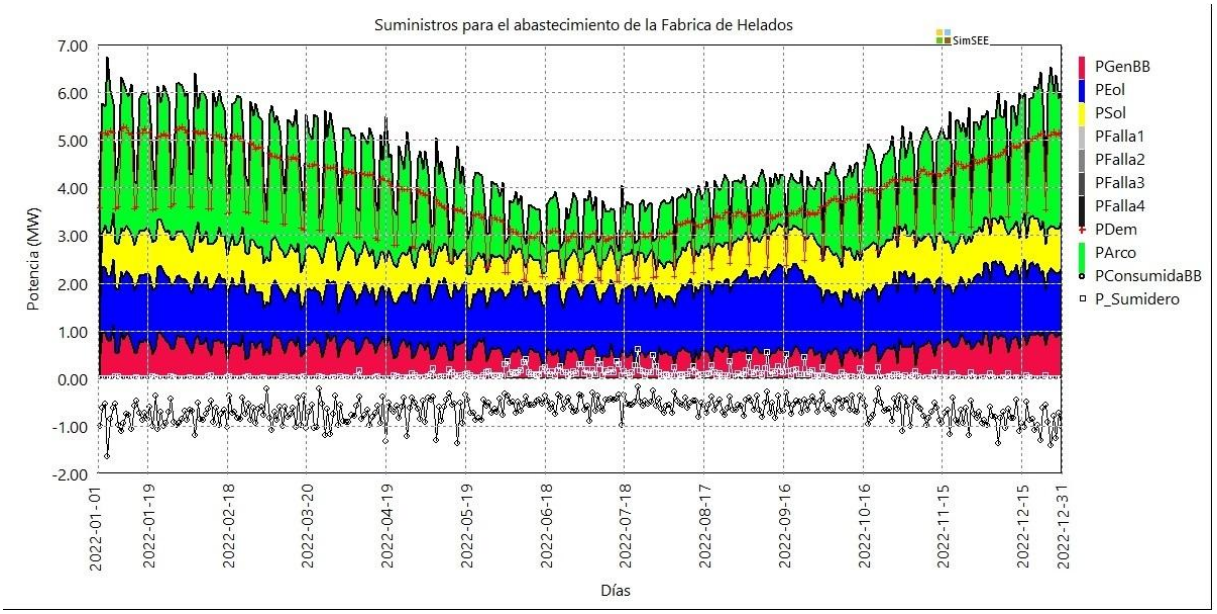


Gráfica 10: *Costo total acumulado compra y venta del banco de baterías y su ganancia.*
Escenario 1

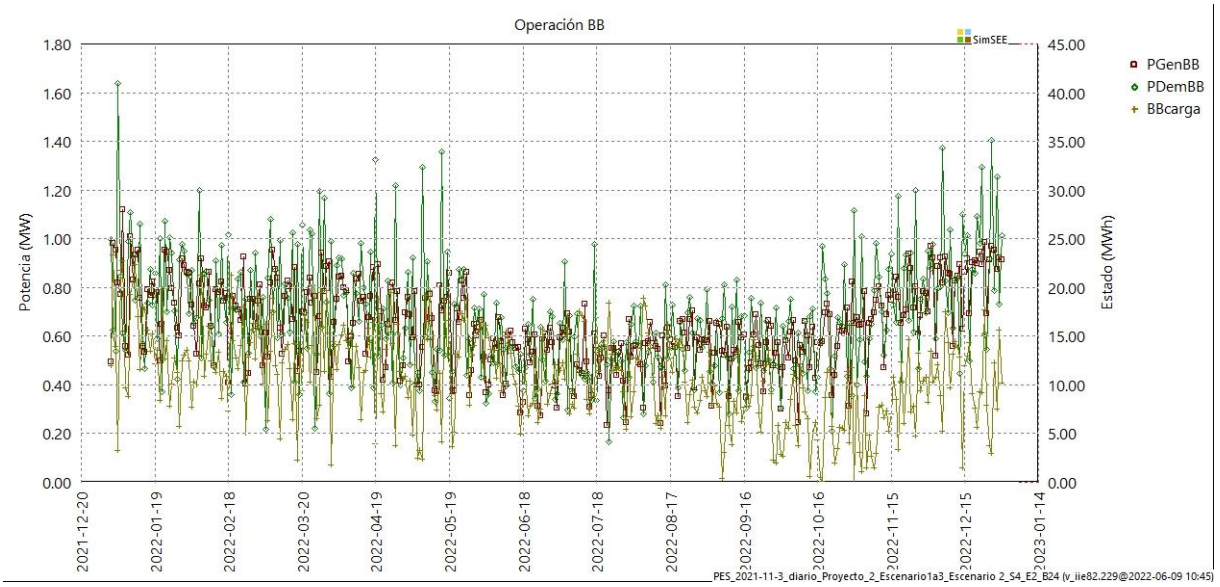


Gráfica 11: *Excedente de energía acumulada en comparación con la generación del tipo solar y eólica acumuladas. Escenario 1*

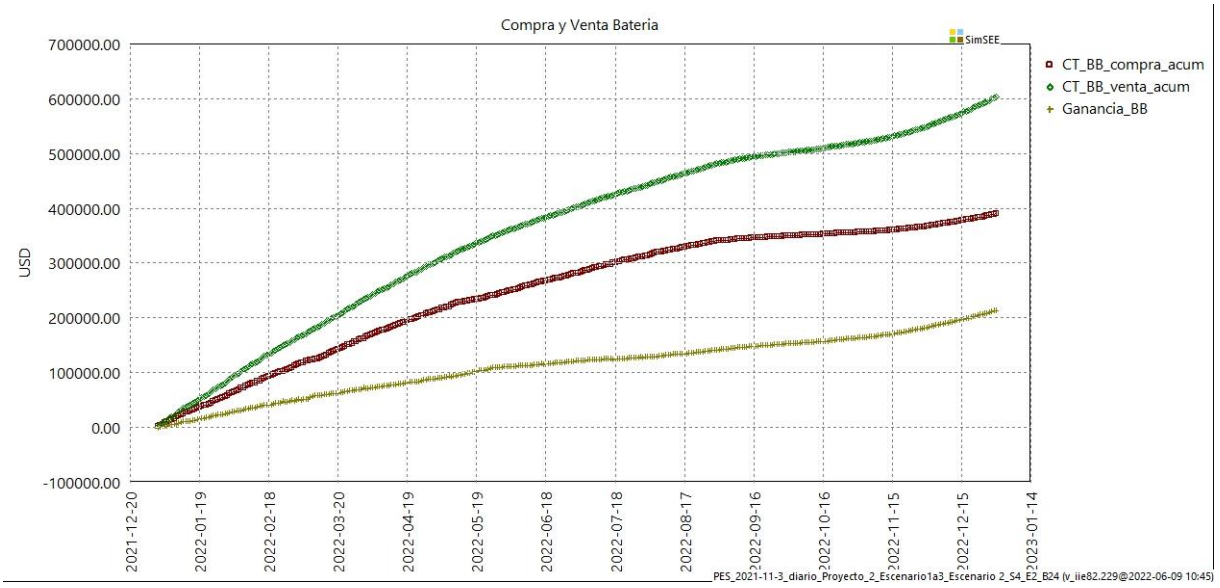
4.3 Gráficas Escenario 2_S4_E2_B24



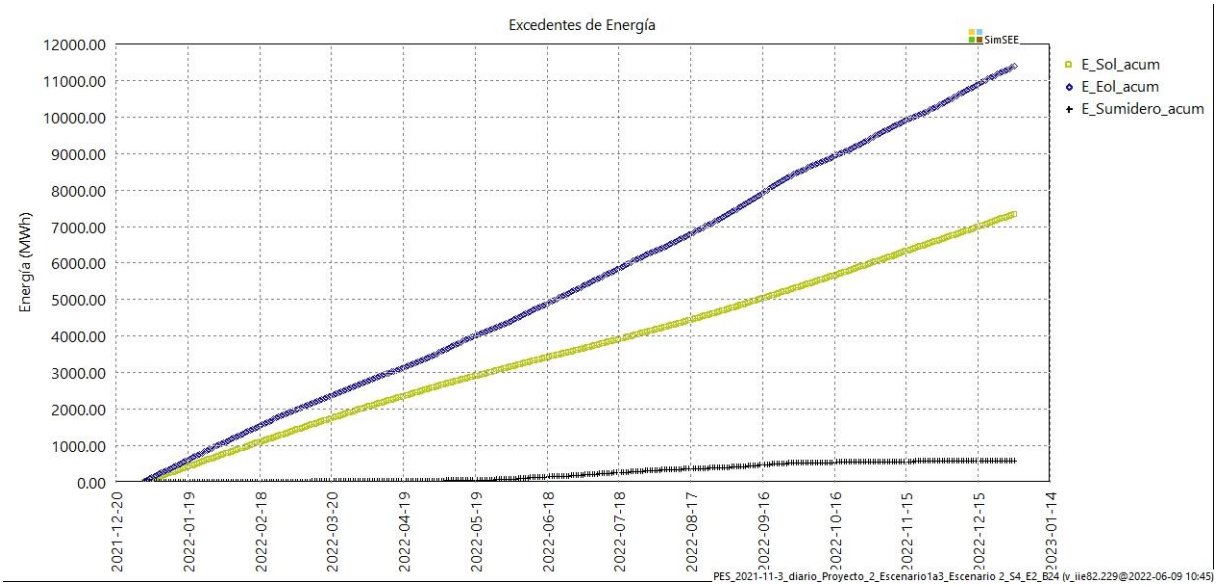
Gráfica 12: *Suministros para el abastecimiento de la fábrica de helados. Escenario 2*



Gráfica 13: *Operación del banco de baterías a lo largo del año. Escenario 2*

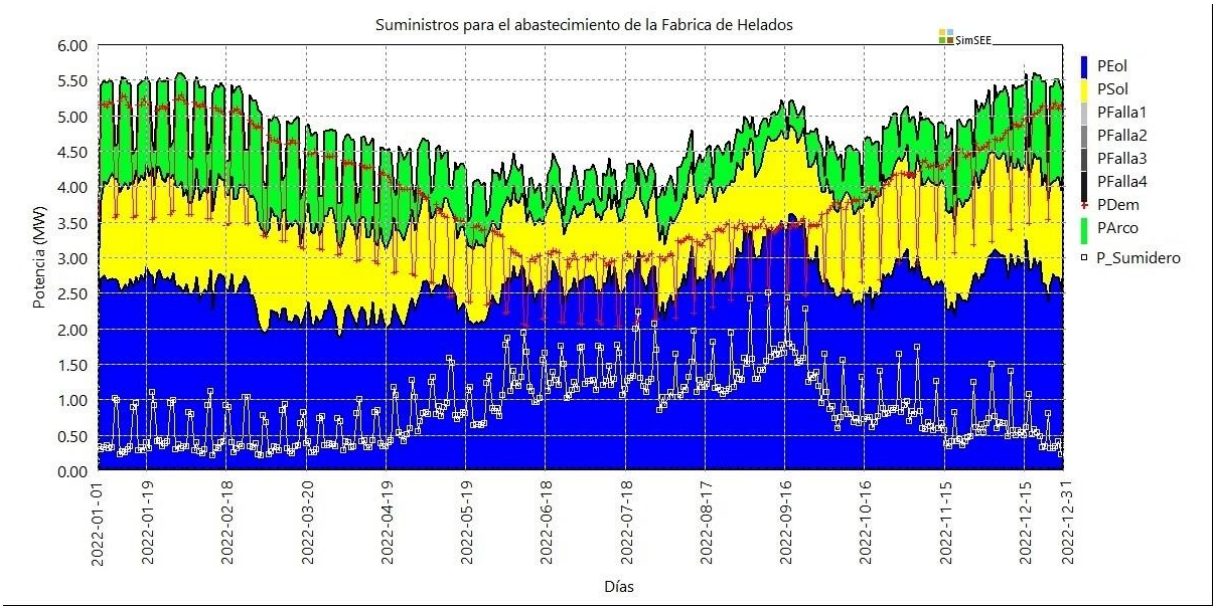


Gráfica 14: *Costo total acumulado compra y venta del banco de baterías y su ganancia. Escenario 2*



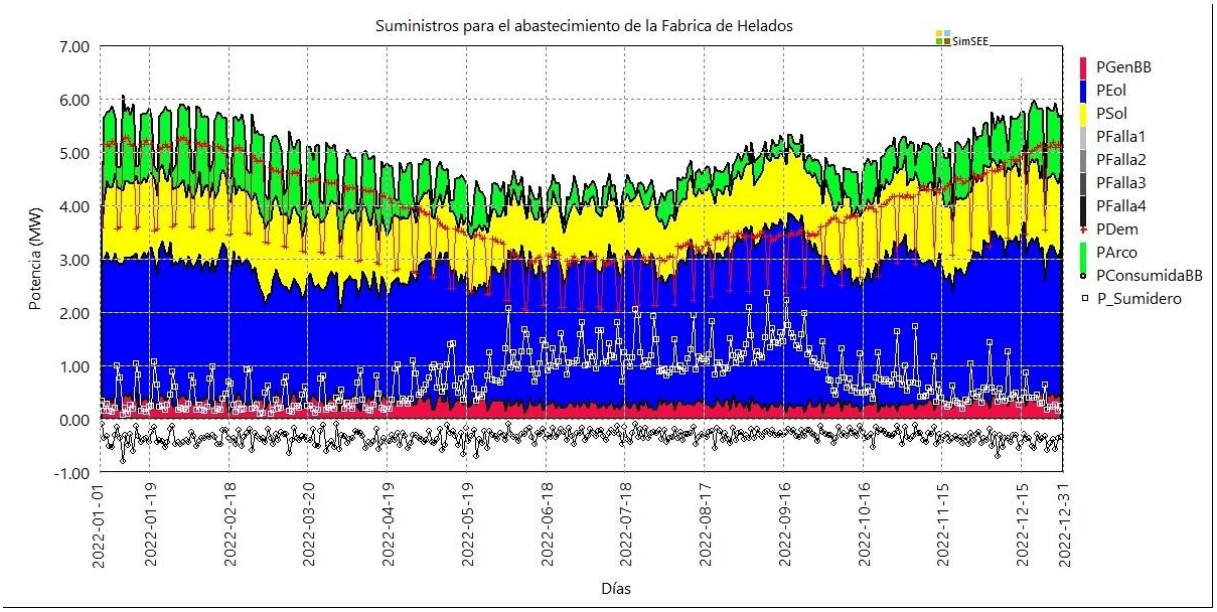
Gráfica 15: *Excedente de energía acumulada en comparación con la generación del tipo solar y eólica acumuladas. Escenario 2*

4.4 Gráficas Escenario 3_S6_E4_B0

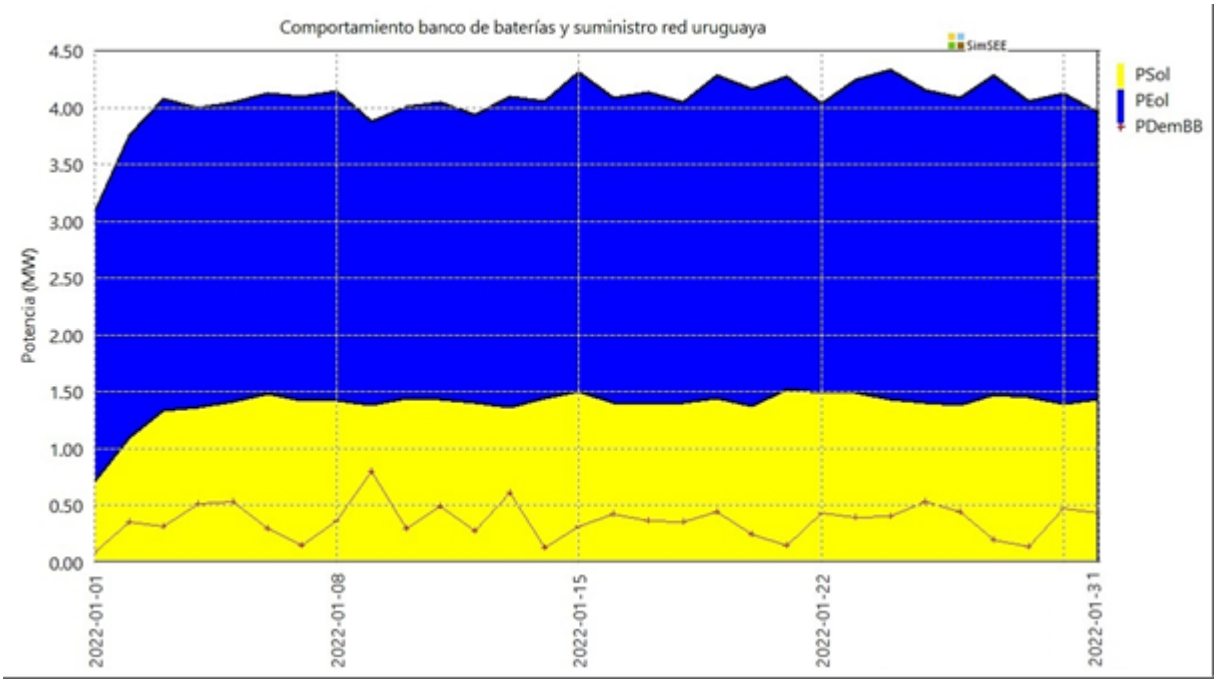


Gráfica 16: *Suministros para el abastecimiento de la fábrica de helados. Escenario 3*

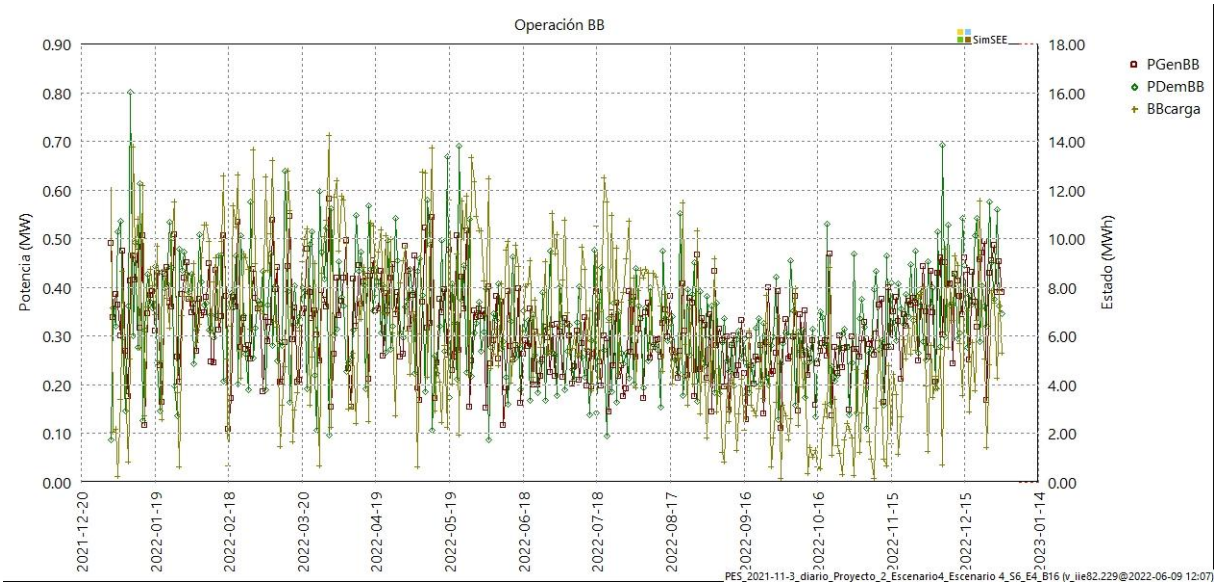
4.5 Gráficas Escenario 4_S6_E4_B16



Gráfica 17: *Suministros para el abastecimiento de la fábrica de helados. Escenario 4*

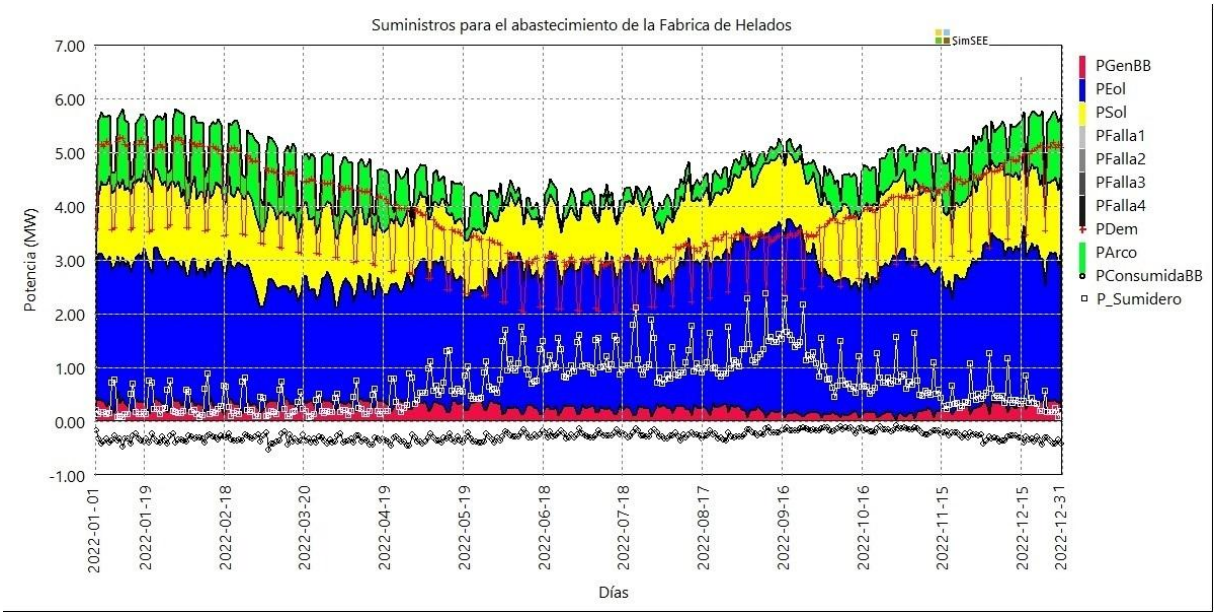


Gráfica 18: *Comportamiento banco de baterías y suministro generación propia. Escenario 4 del 01/01/2022 al 31/01/2022.*

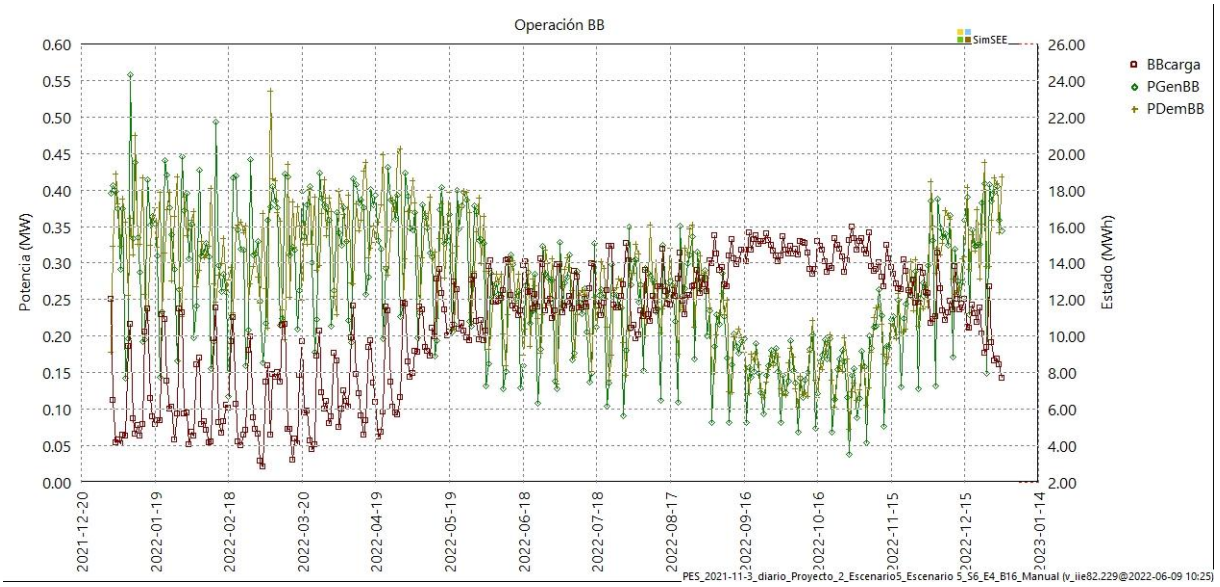


Gráfica 19: *Operación del banco de baterías a lo largo del año. Escenario 4*

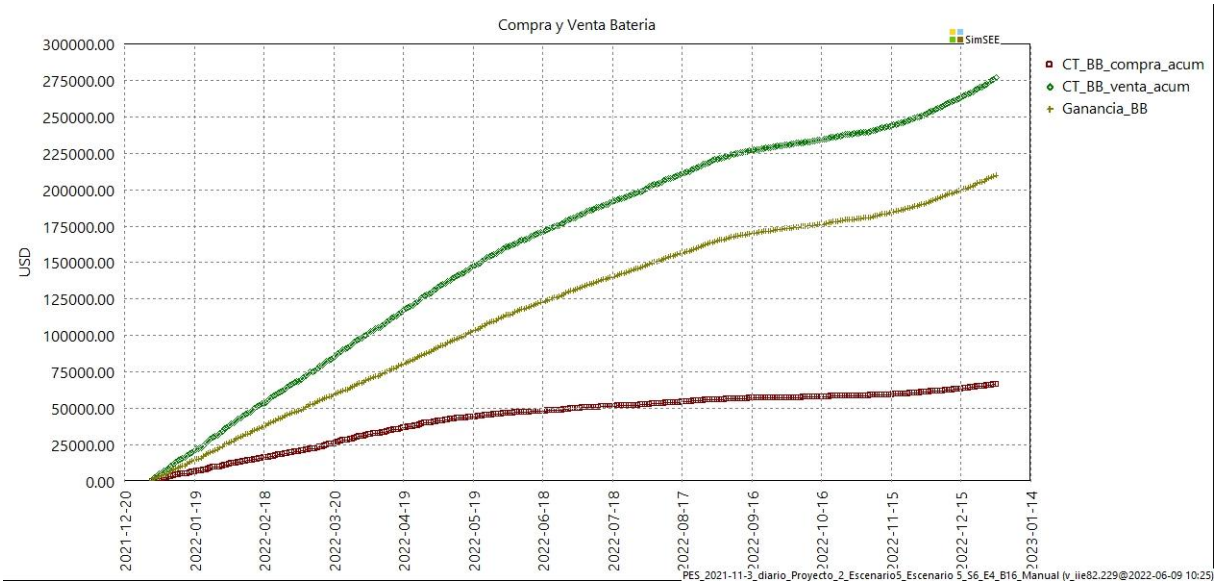
4.6 Gráficas Escenario 5_S6_E4_B16_Manual



Gráfica 20: *Suministros para el abastecimiento de la fábrica de helados. Escenario 5*



Gráfica 21: *Operación del banco de baterías a lo largo del año..*
Escenario 5



Gráfica 22: *Costo total acumulado compra y venta del banco de baterías y su ganancia.*
Escenario 5

4.7 Resultados costo total anual y ganancia del banco de baterías anual

Escenarios	CT Prom (USD)	Ahorro anual (USD)
Escenario 0	3.454.634	0
Escenario 1	620.888	2.833.746
Escenario 2	1.415.695	2.038.939
Escenario 3	856.659	2.597.975
Escenario 4	641.614	2.813.020
Escenario 5	569.625	2.885.009

Tabla 4: *Costo total anual acumulado en USD para los distintos escenarios.*

Escenarios	Ganancia BB (USD)
Escenario 1	140.357
Escenario 2	213.717
Escenario 4	104.774
Escenario 5	209.949

Tabla 5: *Ganancia anual promedio acumulada en USD del banco de baterías para los distintos escenarios.*

4.8 Resultados energía excedente acumulada anual

Escenarios	Energía Solar (MWh)	Energía Eólica (MWh)	Energía Excedente (MWh)	Energía Excedente (%)
Escenario 1	10.985	22.817	6.452	19,09
Escenario 2	7.325	11.390	583	3,11
Escenario 3	10.985	22.817	7.800	23,08
Escenario 4	10.989	22.831	6.598	19,51
Escenario 5	10.985	22.817	6.168	18,25

Tabla 6: *Energía excedente en comparación con la generación propia. Valores acumulados anuales.*

4.9 Resultados costo marginal

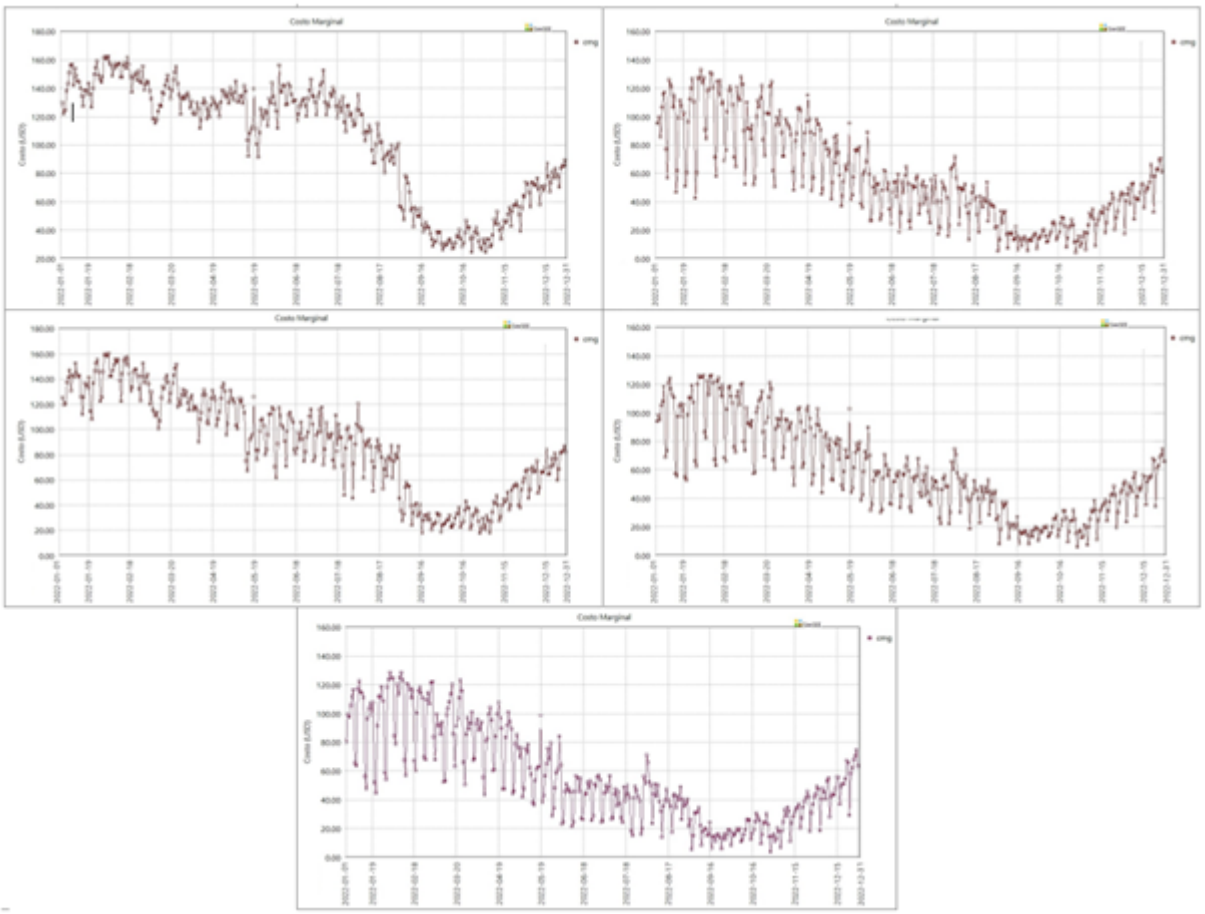


Figura 23: *Costo marginal a lo largo del año para el abastecimiento de la fábrica de helados. Escenarios 0 a 5.*

5. Análisis de resultados.

5.1 Abastecimiento de la demanda y comportamiento del banco de baterías

Escenario 0

En el escenario 0 la demanda es cubierta por la red eléctrica uruguaya. En la gráfica 4 se observa la variación de la demanda con el tiempo y el efecto de la fuente que incorpora la dependencia con la temperatura. Se visualiza que en invierno se da el mínimo de potencia requerida para el funcionamiento de la fábrica (temperatura ambiente más baja) mientras que en los meses más calurosos se da el efecto contrario. Esto nos da la idea, además, de que la fuente creada para la demanda, funciona de manera correcta.

Escenario 1

En este escenario la demanda es cubierta en su mayor parte por los parques solar y eólico, pero también hay una contribución de la red eléctrica uruguaya y del banco de baterías cargando y descargando según la optimización hallada por el programa SimSEE.

Se observa el rol del sistema eléctrico uruguayo no solo para abastecer la demanda sino que también para cargar el banco de baterías. En los picos de consumo de la fábrica se observa una fuerte relación con los picos de carga del banco de baterías. Sin embargo, cuando la demanda de la fábrica es menor, la generación propia pasa a aportar más energía para la carga del banco de baterías.

La disminución de la demanda de la fábrica en los meses fríos explica que el excedente de energía en esta época del año sea mayor, algo que se visualiza en la gráfica 6.

Escenario 2

El comportamiento observado en este escenario es similar al escenario 1, con la diferencia de que la demanda es cubierta en menor medida con generación propia. De los resultados obtenidos la observación más clara es que el banco de baterías al ser de mayor tamaño tiene una mayor participación en el abastecimiento de la demanda. Además, el excedente de energía es mucho menor en comparación con el escenario 1.

Escenario 3

En este escenario se observa la importancia de la generación propia por intermedio de eólica y solar para el abastecimiento de la demanda, en comparación con el escenario 0.

Se observa claramente, como debido a que no hay una batería para aprovechar los excedentes de energía, estos son mayores a los del escenario 1. Sobre todo en invierno y primavera.

Escenario 4

El comportamiento observado es en términos generales similar al escenario 1, con la diferencia de que el comportamiento de carga y descarga del banco de baterías está regido por el aporte de la generación propia, destacando que en este escenario la batería no se carga de la red.

El banco de baterías tiene una ganancia aproximadamente un 40% menor que en el escenario 1. De todas maneras, la diferencia en el costo total del suministro es prácticamente despreciable, se esperaba una diferencia mayor entre ambos escenarios.

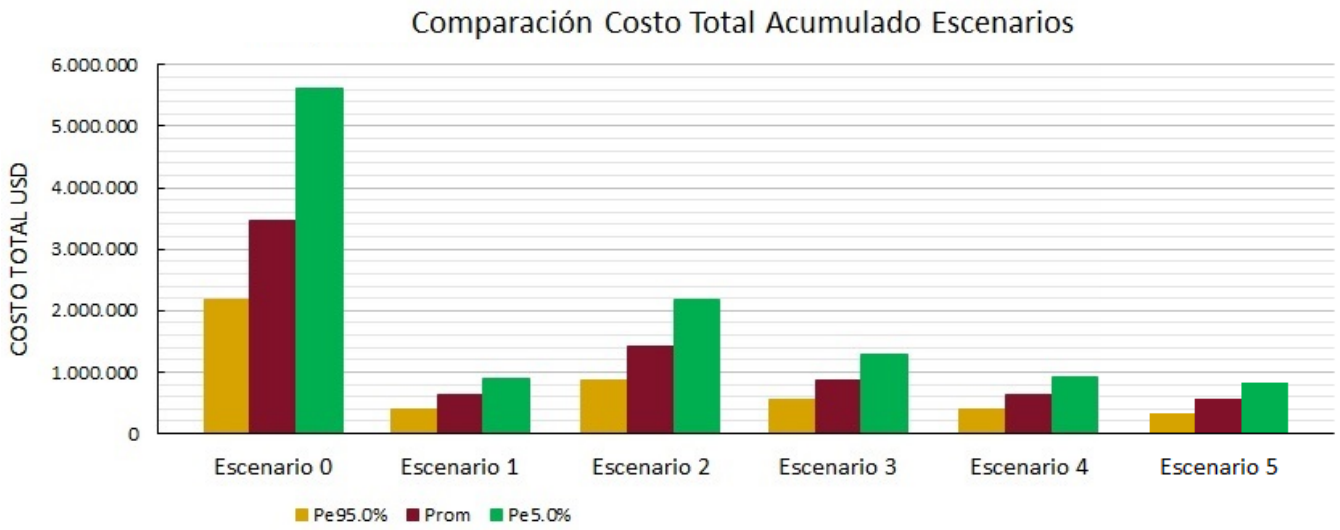
Escenario 5

En este escenario, se le da a la batería una valorización manual y se encuentra que no solo disminuye la energía excedente en comparación con el escenario 1, si no que la ganancia

de la batería aumenta considerablemente. La optimización debería dar el resultado óptimo, por lo que no se logra deducir el por qué de esta diferencia.

5.2 Costo total y ganancia del banco de baterías

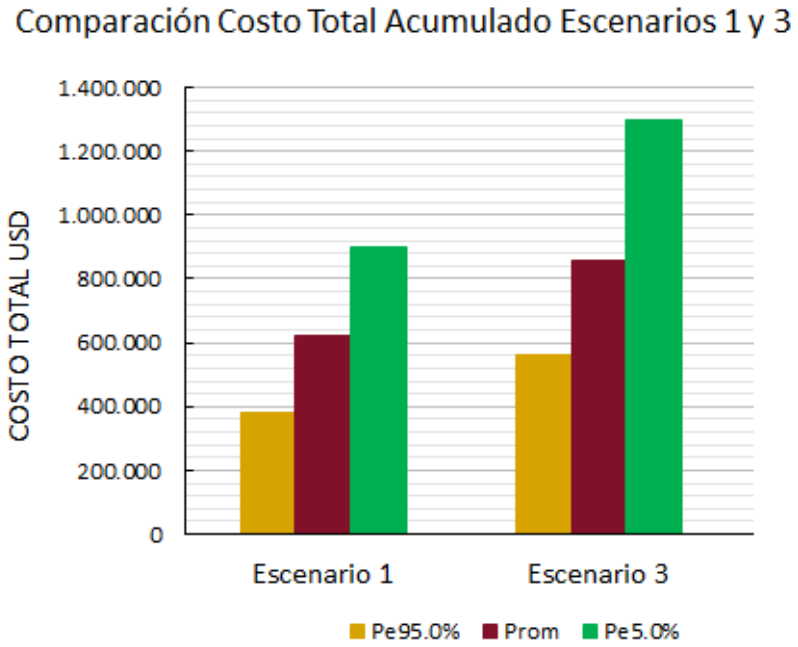
Se compara el costo total acumulado anual para los distintos escenarios estudiados. En primer lugar se concluye que el factor más influyente en lo que respecta a disminuir los costos totales del abastecimiento de la demanda eléctrica es la generación propia. Así, los escenarios 1 a 4 que cuentan con generación propia tienen un costo mucho menor que el escenario 0, en donde el abastecimiento de la demanda es totalmente realizado por la red eléctrica uruguaya (gráfica 24).



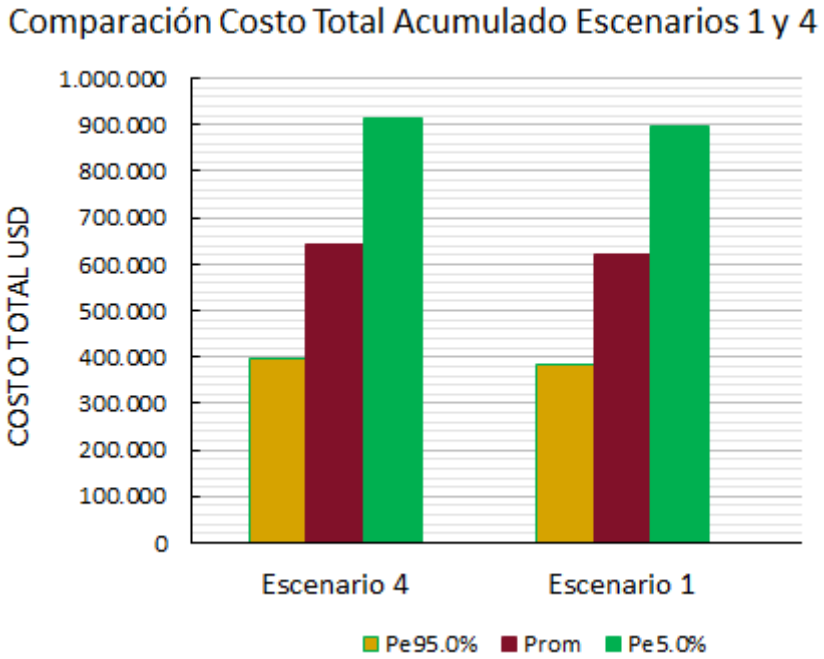
Gráfica 24: *Costo total acumulado anual para los distintos escenarios (año 2022).*

Para estudiar el efecto del banco de baterías sobre el costo total, se comparan los escenarios 1 (con banco de baterías) y 3 (sin banco de baterías), en la gráfica 25 resultante se observa el efecto positivo del banco de baterías sobre los costos totales. Aunque positivo, el efecto es mucho menor al esperado incialmente.

Para conocer el efecto sobre los costos de que el banco de baterías se pueda cargar de la red eléctrica uruguaya, se observa la gráfica 26. Si bien la diferencia de costos es mínima (equivalente a $USD\ 20.726$), se obtiene un costo menor en el escenario 1, esto es, con el banco de baterías pudiéndose cargar de la red eléctrica uruguaya.

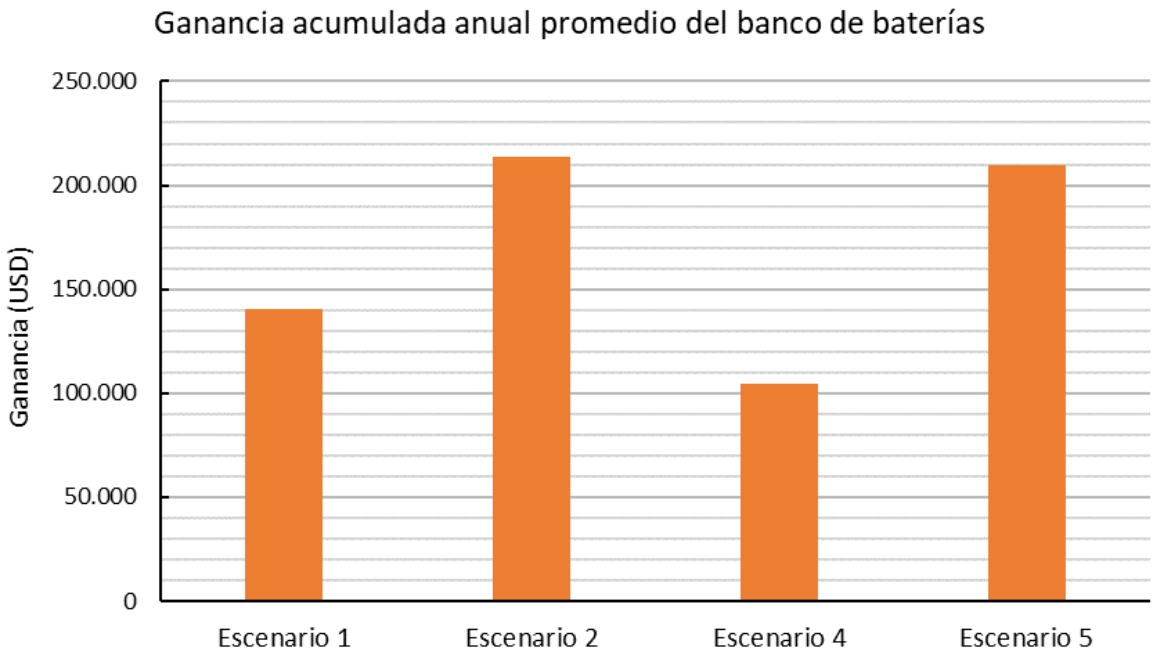


Gráfica 25: *Comparación costo total acumulado anual escenarios 1 y 3 (año 2022).*



Gráfica 26: *Comparación costo total acumulado anual escenarios 1 y 4 (año 2022).*

Finalmente se compara la ganancia acumulada anual del banco de baterías para los distintos escenarios estudiados que cuentan con banco de baterías: escenarios 1, 2 y 4.



Gráfica 27: *Ganancia acumulada anual promedio del banco de baterías en los distintos escenarios.*

Se comparan los escenarios 1 y 2 y se concluye que la mayor ganancia del banco de baterías en el escenario 2 puede explicarse por el mayor tamaño de la batería. Por otra parte, si se comparan los escenarios 1 y 4, nuevamente se observa el efecto positivo que tiene el hecho de permitirle al banco de baterías cargarse de la red eléctrica uruguaya. Por último, el escenario 5, en que la batería tiene un valorizado manual, presenta una ganancia mayor al escenario 1 en que existe una optimización con 4 discretizaciones.

5.3 Estudio ahorro vs. inversión

Para la comparación, se toman los costos estimados de instalación del informe de 2020 de IRENA para energía solar y eólica onshore y de un paper de NREL para el banco de baterías:

- Solar: $850\ USD/kW$
- Eólica: $1.350\ USD/kW$
- Baterías: $340\ USD/kWh$

Escenarios	Ahorro anual (USD)	Inversión Solar (USD)	Inversión Eólica (USD)	Inversión Batería (USD)	Ahorro / Inversión
Escenario 1	2.833.746	5.100.000	9.720.000	5.440.000	14%
Escenario 2	2.038.939	3.400.000	4.860.000	8.160.000	12%
Escenario 3	2.597.975	5.100.000	9.720.000	0	18%
Escenario 4	2.813.020	5.100.000	9.720.000	5.440.000	14%
Escenario 5	2.885.009	5.100.000	9.720.000	5.440.000	14%

Tabla 7: *Estudio de la inversión para los distintos escenarios.*

Se puede observar que el escenario 3 es el que tendría el mayor retorno sobre la inversión. Esto indicaría que la ganancia obtenida de la instalación de baterías no es suficiente como para justificar su instalación. Esto es, a pesar de que el escenario 3 es el que tiene un mayor excedente de energía. Por otro lado, el escenario 2, que tiene el menor excedente de energía presenta el menor retorno por el gran tamaño de la batería.

6. Conclusiones

- Para el caso en que la batería se podía cargar desde la red eléctrica uruguaya, se observó que en los meses en que la demanda es mayor, la carga de la batería se da más que nada desde la red. Por otro lado, cuando la demanda de la fábrica es menor y la generación propia resulta suficiente para abastecer la demanda, la batería toma energía de la generación propia.
- En los picos de generación de los parques solar y eólico, el banco de baterías inyecta muy poco al sistema y es allí cuando el mismo tiende a cargarse. Además, su mayor aporte al sistema ocurre en los momentos donde los parques solar y eólico tienen contribuciones mínimas.
- Se cree que la dimensión de los parques de autogeneración es demasiado grande, ya que se dan excedentes muy grandes de energía que el banco no llega a tomar. La dimensión de los parques solar y eólico en el escenario 2 es más acorde con la demanda que se tiene.
- Se puede ver que a pesar de tener parques de autogeneración sobre-dimensionados y una batería de tamaño correcto para la demanda de la fábrica, siempre va a ser

necesario contar con la energía proveniente de la red. En otras palabras, suplirse 100% con energía renovable de autogeneración implicaría un costo demasiado grande.

- Se logró modelar el efecto de la temperatura ambiente sobre la demanda de la fábrica por intermedio de una fuente en SimSEE. Tal como era de esperar, en invierno se da el mínimo de potencia requerida para el funcionamiento de la fábrica debido a que la temperatura ambiente es inferior, mientras que en verano la demanda tiene valores más altos que acompañan las elevadas temperaturas características de esta estación.
- Se observaron las fluctuaciones características que se dan durante el año en los parques eólico y solar, destacando la disminución del aporte del recurso solar en los meses de invierno.
- El factor más influyente en lo que respecta a disminuir los costos totales del abastecimiento de la demanda eléctrica de la fábrica de helados es la generación propia por intermedio de eólica y solar.
- Se concluye el efecto positivo del banco de baterías sobre los costos totales. Aunque existe este efecto positivo, es mucho menor al esperado previamente.
- Respecto del efecto sobre los costos totales de que el banco de baterías se pueda cargar de la red eléctrica uruguaya, si bien la diferencia de los costos es mínima, se tienen costos menores si el banco de baterías se puede cargar de la red eléctrica uruguaya.
- En el estudio de la batería con valorización manual se encontró una disminución de la energía excedente así como un considerable aumento de la ganancia de la batería si se lo compara con el caso sin valorizado manual, algo que no se logró explicar ya que la optimización debería dar el resultado óptimo.
- Se logró modelar un sistema en SimSEE para realizar un estudio basado en un problema que no sería poco común encontrarlo en la realidad.

7. Futuros trabajos

Sería interesante estudiar, sobre una demanda fija preestablecida, el efecto de la variación del tamaño del banco de baterías sobre el costo total acumulado en un período de operación.

8. Bibliografía

[1] Sala oficial de paso diario. Programación Estacional Noviembre 2021 - Abril 2022.
https://adme.com.uy/informes/progest.php
ADME - Administración del Mercado Eléctrico

[2] “Impacto del COVID19 en la Demanda de Energía Eléctrica de Uruguay - Parte 2”
https://iie.fing.edu.uy/investigacion/grupos/gee/2020/10/09/impacto-del-covid19-en-la-demanda-de-energia-electrica-de-uruguay-parte-2/
Reporte Técnico N° 3 - Grupo Energía Eléctrica - GEE - Octubre 2020
Grupo de Planificación y Operación Óptimas de los Sistemas Eléctricos de Energía del Instituto de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de la República

[3] “Manuales de Usuario de SimSEE”
https://simsee.org/index.html

9. Anexo

En el siguiente enlace se accede a la sala empaquetada, así como a los archivos correspondientes a los costos futuros de cada escenario y a los resultados de cada escenario:

https://drive.google.com/drive/folders/12jW_h9xwQm2VhfHDkSYaQZ4524M0gcMB?usp=sharing