

# Gestión de la demanda en la industria frigorífica

## Grupo 2

Juan Romero, Juan Silvera, Ana Urquiola

Instituto de Ingeniería Eléctrica - FING.  
Trabajo final curso SimSEE edición 2019  
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

Mediante el uso del software libre SimSEE, se realiza una evaluación del impacto de utilizar las cámaras frigoríficas de una industria cárnica para el almacenamiento de excedentes de energía. Las cámaras se utilizan como baterías de almacenamiento de frío, sobre enfriando al producto almacenado en momentos de menores costos de generación y desconectando las cámaras de la red eléctrica en momentos de precios altos de la energía.

La evaluación se enmarca dentro del problema de gestión de la demanda, ya que es una forma de “mover” los consumos de energía en el tiempo, en función de los costos del sistema.

En particular, en este trabajo se propone:

- Implementar las modificaciones necesarias en la sala diaria de mediano plazo (periodo de simulación de tres meses) obtenida de la página de ADME.
- Comparar el costo de abastecer la demanda energética del frigorífico en un caso base (sin acumulación), y en el caso con acumulación de energía en la cámaras.
- Comparar el resultado en escenarios sin y con exportación de energía, y al variar su precio.
- Estudiar la variabilidad con respecto a distintas crónicas de generación hidráulica
- Chequear la independencia de los resultados respecto al número semilla aleatoria utilizado.

## 2. Hipótesis

La evaluación se realiza en una sala de mediano plazo (MP), de paso diario y con cinco postes horarios; esta sala permite tener una buena representación de la variación diaria de la demanda y evaluar los resultados en un horizonte de tiempo apropiado (periodo de simulación de tres meses).

Se trabaja con 5 discretizaciones de la cota en Bonete, 3 en Palmar y 3 en Salto Grande. Con este ajuste se obtienen menores tiempos de optimización sin afectar el objetivo del estudio.

Se utiliza 1 crónica en la optimización y 100 crónicas en la simulación con un máximo número de iteraciones de 5 en todos los casos, salvo que se indique explícitamente lo contrario. En todos los casos se utilizó la misma semilla aleatoria (31), realizando al final un análisis de sensibilidad al cambiarla.

Se consideran tres escenarios de exportación:

- sin exportación,
- con exportación a partir de 12 USD y
- con exportación a partir de 25 USD.

## 3. Metodología

El almacenamiento de energía en las cámaras frigoríficas se modela mediante bancos de baterías, los cuales simulan la capacidad de acumular energía sobre-enfriando el producto almacenado (bajando la temperatura de la cámara). El sobre-frío puede utilizarse luego en momentos en que los costos de la energía son mayores, desconectando al frigorífico de la red eléctrica, y permitiendo que la temperatura se eleve sin llegar a valores que comprometan la calidad del producto.

### 3.1 Actores

#### 3.1.1 Red eléctrica

Para el modelado del frigorífico se define un nodo "Frig", cuya demanda energética incluye la demanda propia de la cámara frigorífica (D), y un banco de baterías que modela la acumulación de energía en forma del sobre-frío (BB). Este nodo se conecta al sistema mediante un arco que va del nodo "Mdeo", ya existente en la sala, hasta el nodo "Frig". Al arco se le asigna una potencia máxima de 10 MW (la cual es superior a la demanda de la cámara más la potencia máxima de carga del banco de baterías), un rendimiento 1 y un peaje con costo 0. El factor de disponibilidad de este arco se define con valor 1 y el tiempo medio de reparación en 0 (arco siempre disponible).

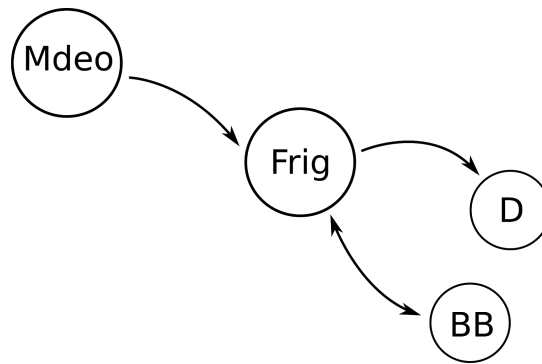


Figura 1

### 3.1.2 Demandas

La demanda propia de la cámara (D) se asume dada principalmente por los ingresos de potencia calorífica al ingresar producto, infiltraciones de aire durante la apertura de puertas y ganancias térmicas a través de paredes, piso y techo.

La demanda se define utilizando el actor demanda, asociada al nodo “Frig”, y se establece una demanda base ( $P_{D\ base}$ ) a la que se le agrega en forma de ruido una fuente aleatoria ( $\Delta P_D$ ), para contemplar el impacto de las variaciones de la temperatura exterior (ecuación 1).

$$P_D = P_{D\ base} + \Delta P_D \quad (1)$$

La variación de la carga con la temperatura exterior se modela utilizando una fuente aleatoria y se define a partir de la ecuación (2), como una constante  $C$  que multiplica la diferencia entre la temperatura exterior real y un valor medio de esta. Para tener la variación de la temperatura exterior se importa el actor “PEolSol” de la sala de largo plazo y se toma el borne correspondiente a la temperatura. Con esto se construye la fuente aleatoria “Delta\_DemFrig”, que luego se suma como ruido a la demanda base.

$$\Delta P_D = C (T_{ext} - T_{ext\ media}) \quad (2)$$

Los valores utilizados para la demanda base ( $P_{D\ base}$ ) se estiman a partir de consumos reales de una planta frigorífica. Asumiendo que la planta produce durante 11 hs al día, y que la carga aumenta significativamente durante estas horas debido al ingreso de producto, apertura de puertas, etc., se establece una demanda de 1MW de 8 a 19hs, que cae a 0,5 MW durante el resto del día.

Para determinar las fluctuaciones de carga térmica con la temperatura exterior ( $\Delta P_D$ ), se asume que estas variaciones impactan levemente sobre la carga total de la cámara y se fija la constante  $C$  para que esta carga sea del orden del 2% de la demanda base.

Para esta nueva demanda, se definen los mismos escalones de falla que en las demás demandas de la sala, y se la indexa también a la fuente “ipetroleo”.

### 3.1.3 Internacional y otros (Banco de baterías)

El almacenamiento de energía en las cámaras de congelado en forma de sobre-frío, se modela utilizando el actor “banco de baterías” (BB) ya existente en el SimSEE. La capacidad de almacenamiento de éstas se define a partir de la máxima fluctuación de temperatura admisible en la cámara, y estimando la cantidad de producto que se podría almacenar en esta.

$$E_{BB} = m_{\text{producto}} c_{p_{\text{producto}}} \cdot (T_{\text{max}} - T_{\text{min}}) \quad (3)$$

Asumiendo que se admite que el producto (carne) varíe entre  $-18^{\circ}\text{C}$  y  $-30^{\circ}\text{C}$ , se estima la capacidad de la batería en 2,3 MW.

La potencia de carga de la batería se limita por la capacidad máxima del sistema de refrigeración, asumiendo que los compresores se utilizan exclusivamente para extraer calor de la cámara, es decir cargar el banco de baterías. Para esto se estima un Coeficiente de Performance (COP) del sistema y la potencia máxima de los compresores. Con estas consideraciones, la potencia de carga de la batería toma el valor de 0,6 MW.

$$P_{BB_{\text{carga}}} = COP \cdot W_{\text{compresores}} \quad (3)$$

La potencia de descarga no está limitada por el sistema de refrigeración, ya que la misma se asocia a la desconexión de las cámaras de la red eléctrica (cuando el frigorífico usa energía del banco de baterías lo que se modela es el aprovechamiento del sobre-frío). Por lo tanto se fija un valor grande de potencia de descarga (100 MW) que implica no limitarla, para que ésta pueda igualar a la demanda de la cámara.

Los rendimientos de carga y descarga del banco de baterías deberían fijarse en 1. Sin embargo, con este valor se observa que ocurren cargas y descargas simultáneas, lo cual no tiene sentido físico. Por este motivo se modifica el rendimiento de descarga a 0,99.

El banco de baterías se define en la capa 20, de forma de poder activarlo o no en función del escenario que se quiera estudiar, habiendo verificado que la misma estaba libre.

### 3.2 Escenarios analizados

Una vez implementadas la modificaciones en la sala para modelar el frigorífico con demanda variable, se analizan y comparan varios escenarios. En primera instancia se considera la sala sin exportación de energía (precio de exportación fijado en 0,1) y se analizan los escenarios 1 y 2, sin acumulación y con acumulación de energía en la cámaras frigoríficas respectivamente (misma sala con la capa 20 apagada y encendida).

*Escenario 1* - Sala sin exportación de energía y sin acumulación de energía en el banco de baterías.

*Escenario 2* - Sala sin exportación de energía y con acumulación de energía en el banco de baterías.

Luego para analizar el impacto de acumular la energía en la cámara frigorífica cuando se tiene la posibilidad de exportarla, se analizan los escenarios 3, 4, 5 y 6 en los que se varía el precio de exportación a USD 12 y USD 25 en la fuente aleatoria 'Exportación'.

*Escenario 3* - Sala con exportación de energía a USD 12 y sin acumulación de energía en el banco de baterías.

*Escenario 4* - Sala con exportación de energía a USD 12 y con acumulación de energía en el banco de baterías.

*Escenario 5* - Sala con exportación de energía a USD 25 y sin acumulación de energía en el banco de baterías.

*Escenario 6* - Sala con exportación de energía a USD 25 y con acumulación de energía en el banco de baterías.

### **3.3 Costo futuro**

El costo futuro (CF) de esta sala se engancha con la política de operación "CF\_PES\_2018\_11\_3\_semanal\_FR.bin" correspondiente a una sala de largo plazo.

Para poder comparar los costos futuros en los escenarios sin y con banco de baterías se desmarca "Estabilizar frame inicial", de forma que las salas con distintas estructuras de estados tengan la misma visión de futuro.

### **3.4 SimRes3**

Se crean dos plantillas, una para los resultados de simular 1 crónica, donde se pretende analizar el correcto funcionamiento del modelo del frigorífico con su demanda y la conexión con el banco de baterías; y otra plantilla para mostrar los resultados de la simulación con 100 crónicas y hacer comparaciones entre los distintos escenarios.

## 4. Resultados

### 4.1 Validación del modelo

En primer lugar se analiza el funcionamiento de la sala con los nuevos actores, verificando los balances de potencia en el nodo “Frig”, y analizando el uso del banco de baterías por poste y la energía total intercambiada por el mismo. Para esto se simula una sola crónica.

#### 4.1.1 Balance de potencia en el nodo

A modo de visualizar el balance de potencia en el nodo “Frig” y validar los resultados, se presentan en un gráfico para cada poste (figuras 2 a 6) las curvas de:

- Potencia por el arco Mdeo-Frig
- Potencia del banco de baterías (BB), definida como la diferencia entre potencia generada y absorbida, que es positiva cuando la generada es mayor que la absorbida, y negativa en el caso contrario.
- Potencia demandada por el frigorífico
- Costo marginal del nodo “Mdeo”.

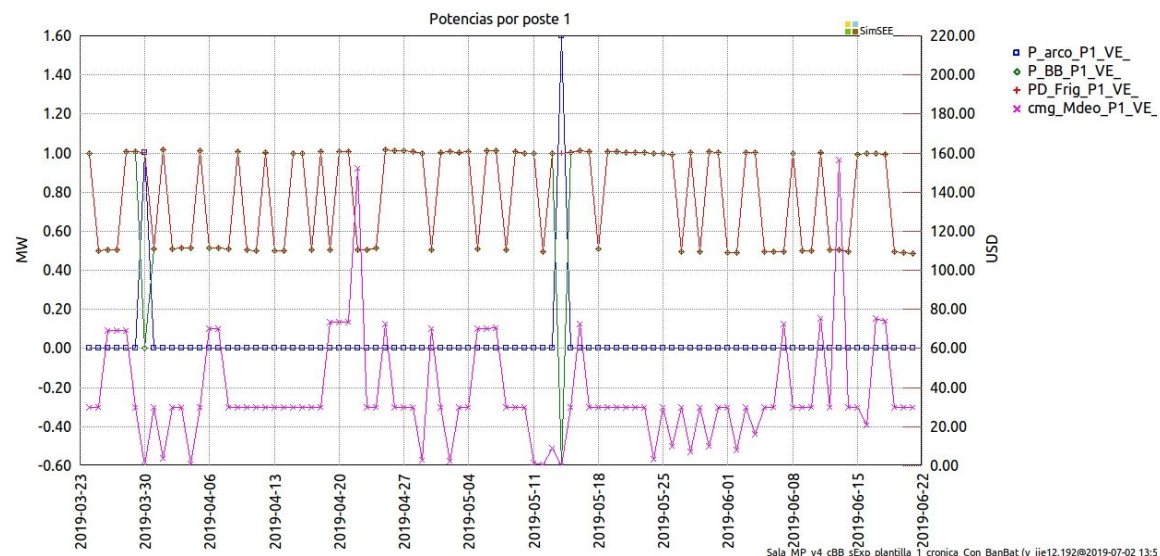


Figura 2

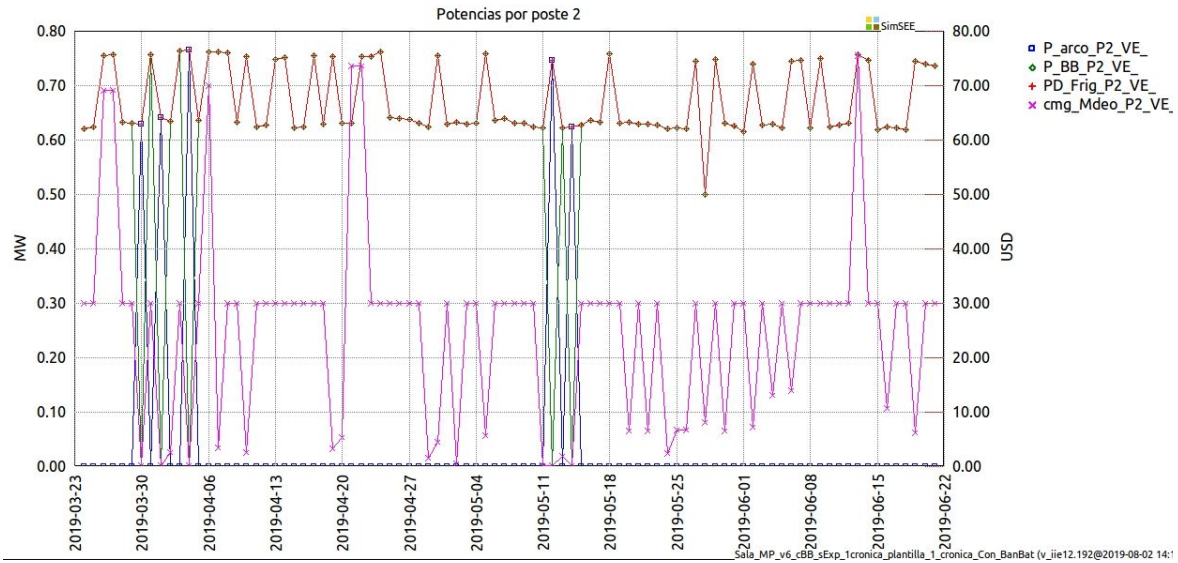


Figura 3

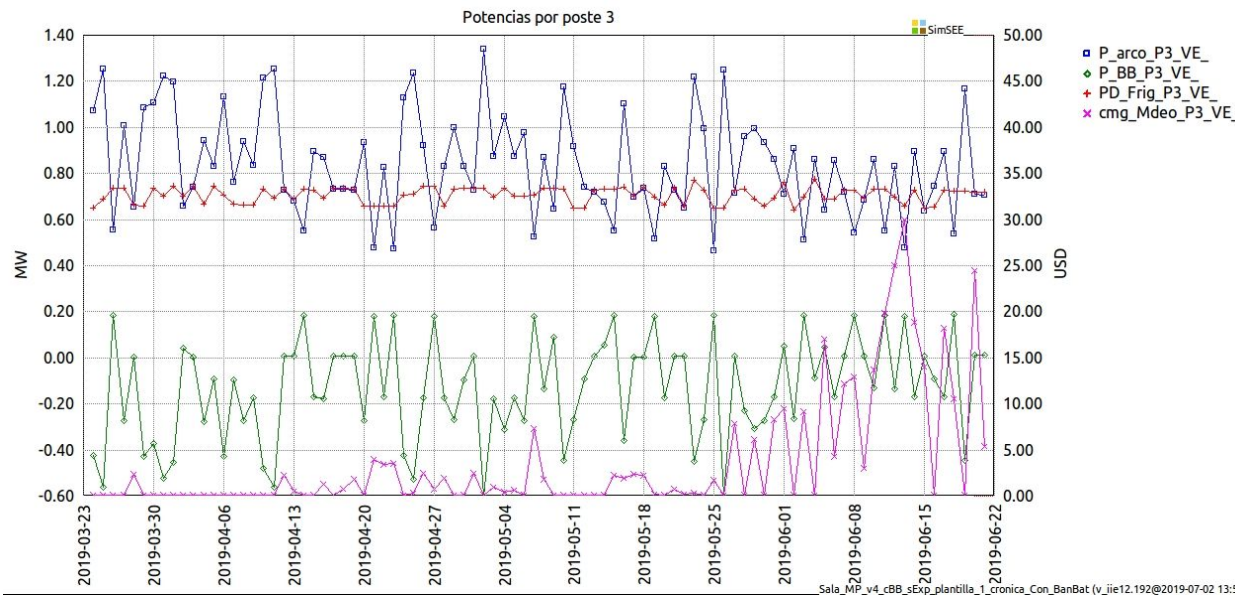


Figura 4

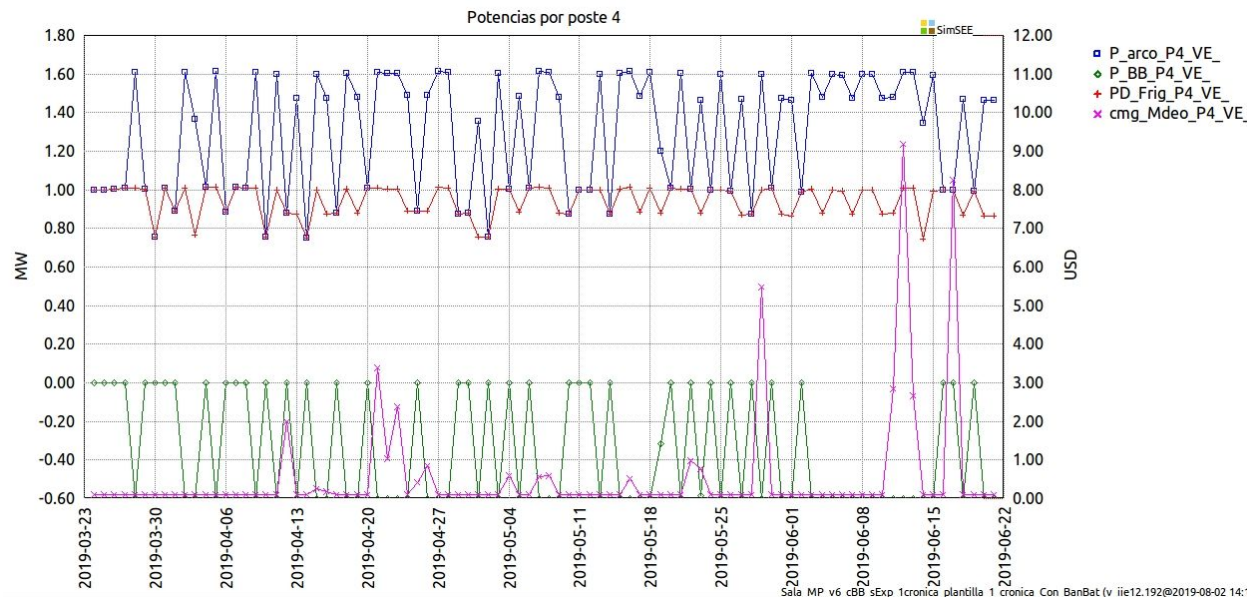


Figura 5

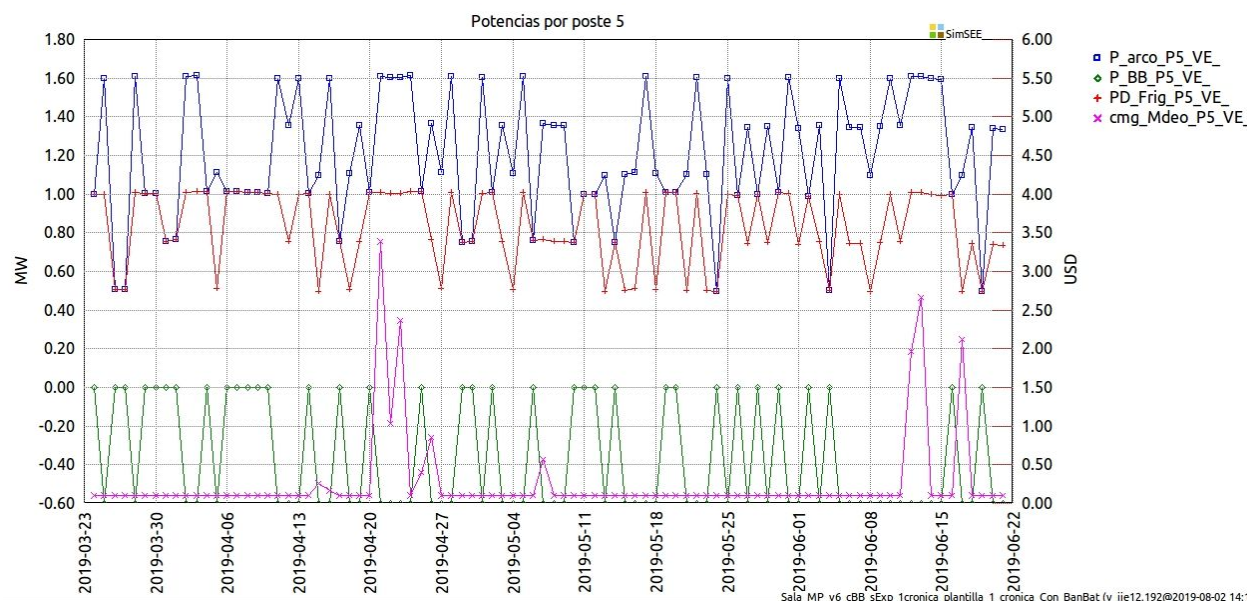


Figura 6

En primer lugar, se puede visualizar que para cada poste (figuras 2 a 6) se verifica el balance de potencias en el nodo “Frig”, es decir que la potencia por el arco Mdeo-Frig es igual a la suma de la potencia del banco de batería y la potencia demanda por el frigorífico. Esto coincide con el resultado esperado, ya que el modelo permite cargar la batería al mismo tiempo que abastece la demanda del frigorífico.

Al tener los valores diarios por poste, se puede observar que usualmente el comportamiento es el mismo en cada poste para los distintos días a lo largo del período de simulación. El costo marginal (eje derecho) varía en cada poste, pasando de valores del orden de USD 40 en el poste 1 a valores próximos a 0 en el poste 5. Esto se corresponde con el uso del banco de baterías. En los postes más caros, P1 y P2, usualmente es el banco de baterías quién abastece la demanda del frigorífico, y la potencia por el arco es nula. En el otro extremo el comportamiento en los postes más



baratos, P4 y P5, se invierte, por el arco circula la potencia necesaria para abastecer la demanda del frigorífico y para cargar la batería. En el poste 3, el comportamiento del banco de baterías es más variable, hay días en que se carga y días en que se descarga.

#### 4.1.2 Uso del banco de baterías

Para poder visualizar el comportamiento del banco de baterías por poste, se presenta la figura 7. Tal como se mencionó en la sección anterior, se visualiza que, salvo excepciones, el banco de baterías se carga en los postes donde la energía tiene menor costo marginal (postes 3 al poste 5) mientras que en los postes de mayor costo marginal (postes 1 y 2), abastece la demanda del frigorífico con el fin de disminuir el costo de operación.

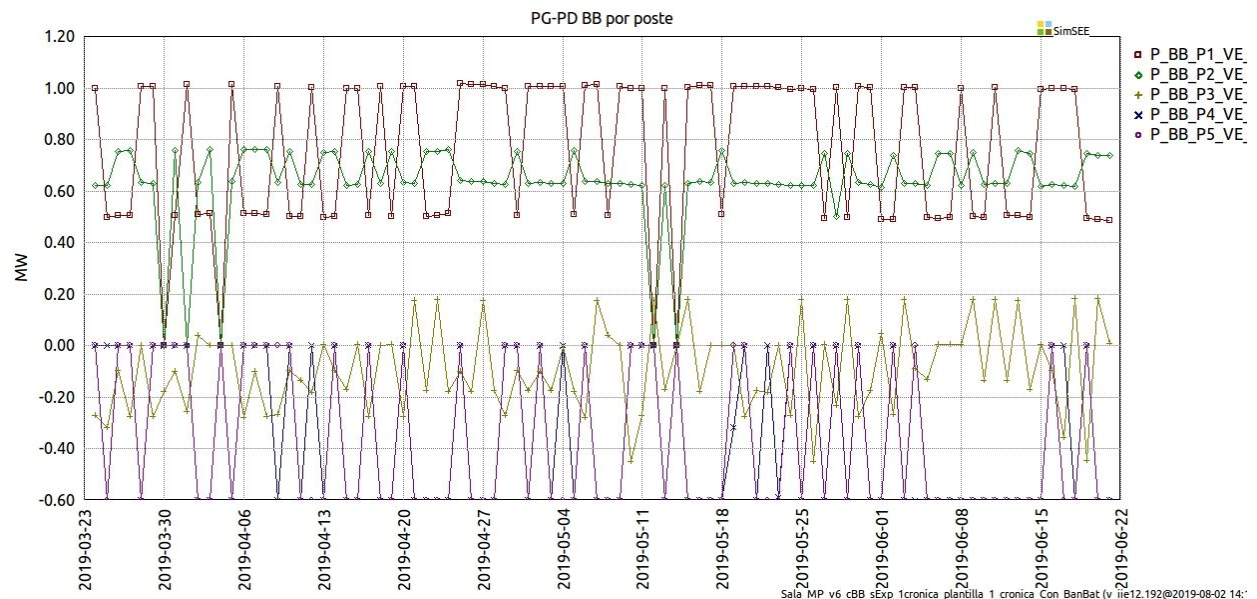


Figura 7

#### 4.1.3 Histograma global de energía intercambiada por la batería

Con el objetivo de analizar el uso diario del banco de baterías, se realiza un histograma global de la energía diaria intercambiada (almacenada y entregada) por el banco de baterías, calculada a partir de la potencia total del banco (de forma de que el valor sea siempre positivo), multiplicada por la duración de cada poste y sumada para obtener un valor diario, para los tres meses de simulación. El histograma se construye a partir de la matriz de energía diaria intercambiada por la batería para cada día y para cada una de las 100 crónicas, dividiendo el intervalo entre 0 y 9,6 MWh (máximo valor registrado) en 100 bandas, e identificando cuantos días el valor de la energía total que carga/descarga el banco está en cada banda.

Al observar el histograma (figura 8) se pueden extraer las siguientes conclusiones:

1. Se observan grandes incrementos en la probabilidad acumulada en valores próximos a múltiplos de la carga total del banco (2,3 MWh). Esto puede interpretarse como que la batería en cada poste tiende a cargarse o descargarse completamente. Sin embargo, en algunos puntos el escalón no se da exactamente en el valor múltiplo de 2,3 MWh, esto puede deberse a que en los postes más cortos la batería no termina de descargarse o cargarse completamente.
2. La probabilidad de que el banco no se utilice (energía diaria igual a 0) es de 0,05.
3. Nunca se llega a utilizar el banco lo máximo posible con un día dividido en 5 postes (energía total igual 2,3 MWh x 5 postes = 11,5 MWh). Esto se debe a la capacidad de la batería, la duración de los postes y la demanda del frigorífico.

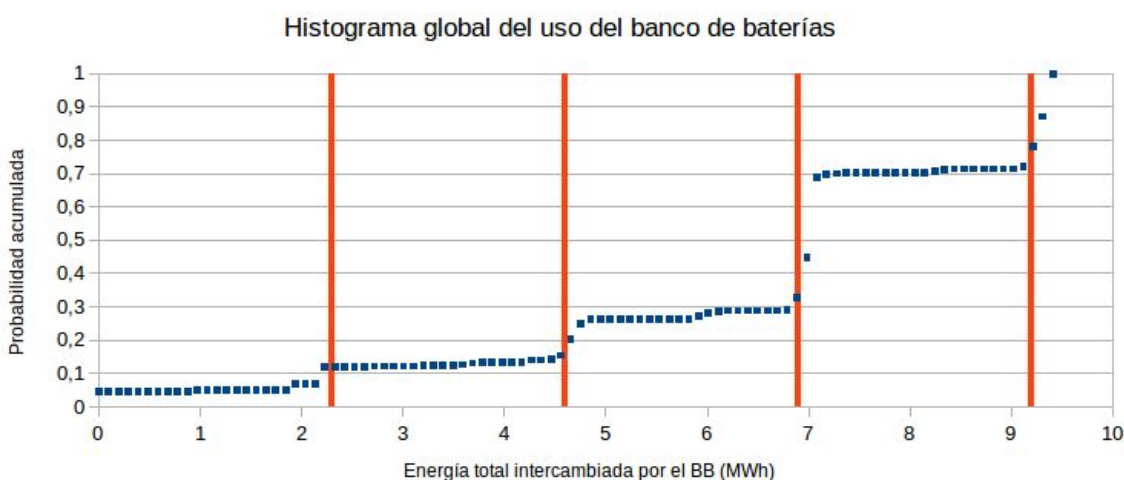


Figura 8

## 4.2 Beneficio de acumulación de energía

De aquí en más se analizan resultados simulando 100 crónicas.

### 4.2.1 Comparación de los escenarios 1 y 2

Para analizar el beneficio de acumular energía en la cámara, se comparan los escenarios 1 y 2, simulando 100 crónicas. En primer lugar se calcula el costo directo del paso para cada una de las salas, sin y con banco de baterías. En la figura 9 se muestra la diferencia en el costo del paso acumulado para los escenarios 1 y 2 (sin BB - con BB). Se observa que esta diferencia crece y decrece a lo largo del período de simulación. Esto no es lo que se esperaba, ya que contar con el banco de baterías debería reducir el costo del paso. Sin embargo, esta diferencia es del orden del 0,005% del costo del paso acumulado en los tres meses de simulación, lo que da a entender que se trata de un proyecto marginal, que no puede ser evaluado adecuadamente de esta forma. Por esta razón, de acá en adelante se analizarán los beneficios utilizando el costo marginal.



Figura 9

Para el análisis marginal, se compara el costo de operación del frigorífico al marginal, calculado como la potencia consumida por el arco que alimenta el nodo “Frig” multiplicado por el costo marginal del nodo “Mdeo”, multiplicados por la duración del poste y sumados para obtener un valor diario. En la figura 10 se muestran los costos de operación acumulados para los escenarios 1 y 2, donde se observa que al utilizar la cámara frigorífica como batería de almacenamiento de energía se reduce notoriamente el costo de operación del frigorífico. Al final de los tres meses simulados el ahorro es de USD 12.000, lo que representa un 80% del costo acumulado para el escenario 1. Esto se debe a que la batería se carga durante los periodos de tiempo en que el costo de la energía es bajo, para luego utilizarla cuando el costo es elevado, tal como fue visto en las secciones 4.1.1 y 4.1.2.

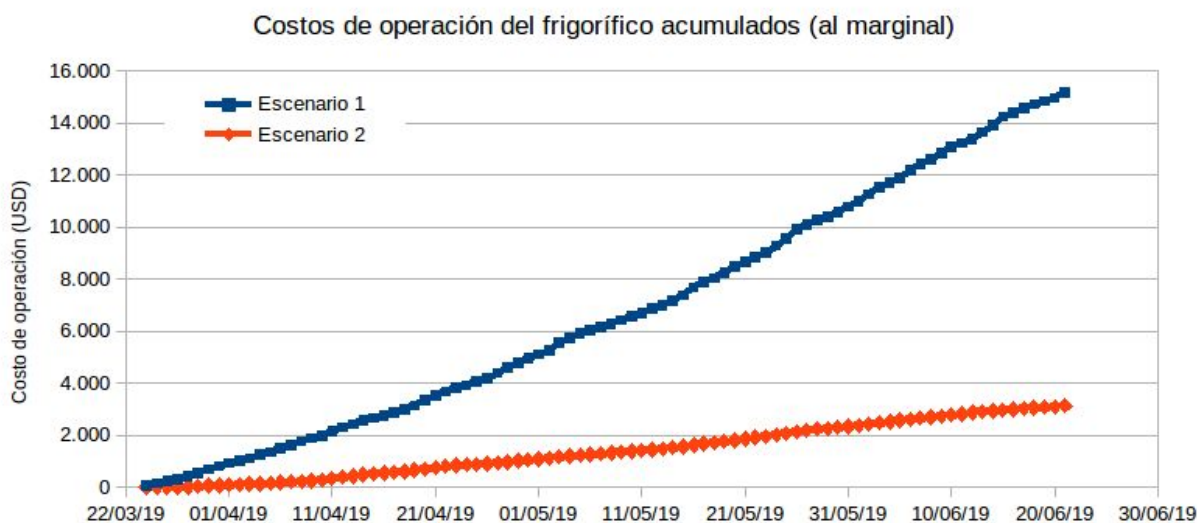


Figura 10

Asumiendo que el comportamiento de estos tres meses puede extrapolarse a todo el año, el ahorro anual sería de USD 48.000. Estudiando el proyecto a 5 años e imponiendo una tasa de descuento del 10%, se obtiene que la ganancia neta

actualizada de implementar esta modificación en el consumo de energía, sería de USD 200.000.

En la figura 11 se presenta un histograma de permanencia del ahorro acumulado, definido como la diferencia de los costos de operación al marginal en los escenarios 1 y 2. En este se muestra para las 100 crónicas el ahorro total al final del período de simulación. Se observa que con poca probabilidad se obtendrán ahorros superiores al valor esperado, pero de ser así el beneficio podría ser muy superior a este. Por otro lado, la probabilidad de tener ahorros menores al valor esperado es elevada, pero siempre se tiene un ahorro del orden de USD 10.000, cercana al valor esperado, lo que hace que la inversión implique poco riesgo.

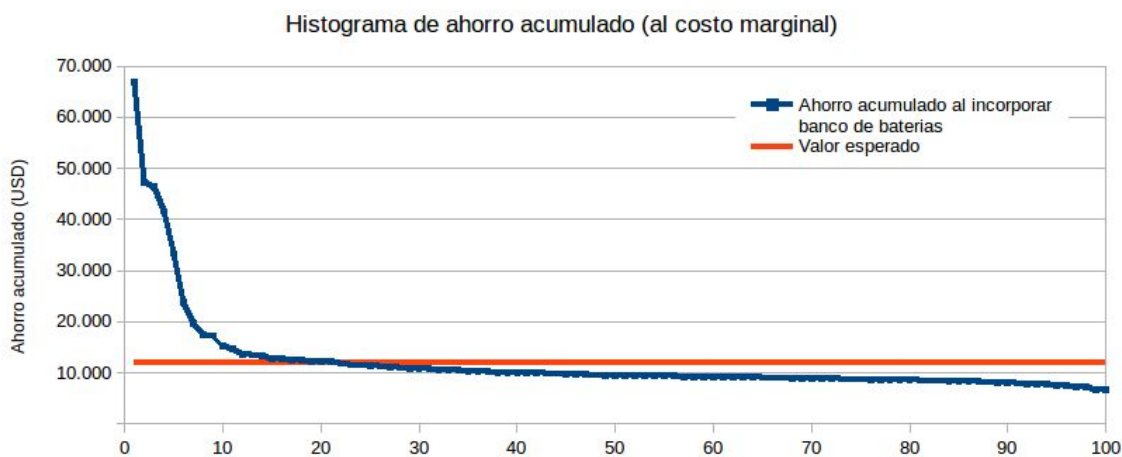


Figura 11

#### 4.2.2 Creación de valor

Por otro lado se analiza la ganancia que podría obtener un agente que operará el banco de baterías, si el mismo comprase la energía al costo marginal del nodo “Mdeo” y la vendiese al frigorífico a su costo marginal. Este resultado se puede interpretar como la creación de valor para el sistema de desplazar el consumo de energía entre distintos momentos, en función del costo de la misma.

En la figura 12 se presenta el resultado de la creación de valor a lo largo de los tres meses de simulación, calculado como la diferencia entre el producto potencia generada por el costo marginal del frigorífico y potencia demandada por el costo marginal de “Mdeo”, multiplicado según la duración de cada poste y sumado para obtener el valor diario. Como se puede observar en la gráfica este resultado siempre es positivo, por lo cual el banco obtiene siempre un beneficio por comprar la energía al costo marginal de “Mdeo” y venderla al costo marginal del frigorífico. Al cabo de los tres meses de simulación esta creación de valor sería de USD 760.

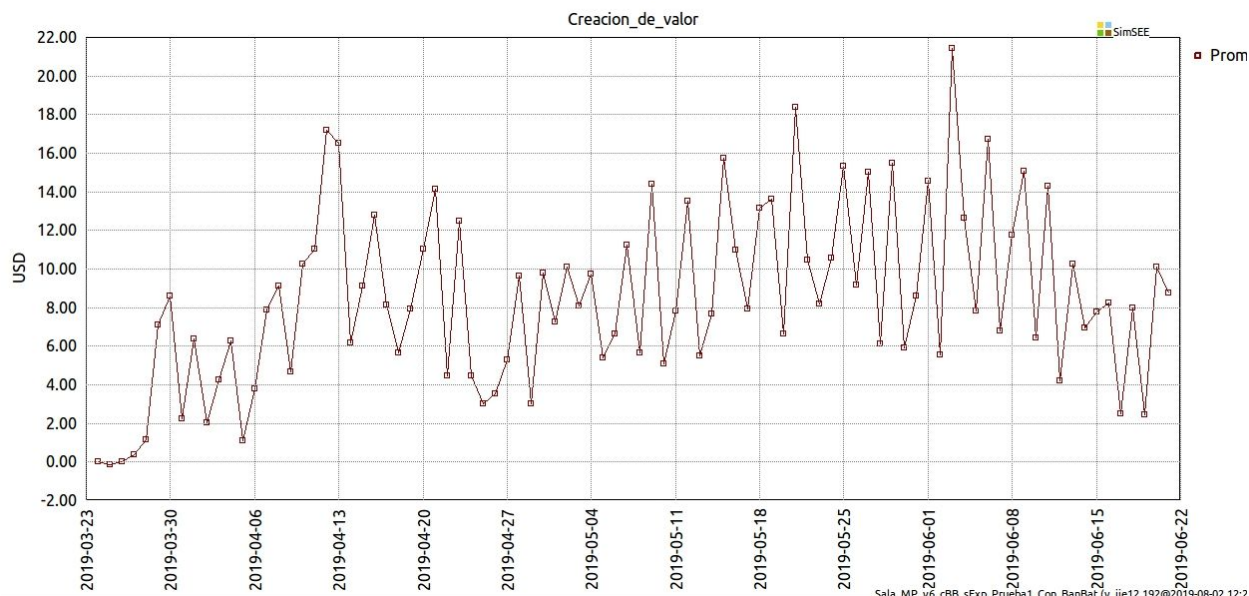


Figura 12

### 4.2.3 Hidraulicidad

Se analiza el ahorro resultante de la acumulación de energía en los escenarios 1 y 2, en función de los caudales de aporte hidráulicos acumulados en los tres meses de simulación a las represas de Bonete, Baygorria, Palmar y Saltos Grande. La suma de los aportes es un parámetro de la energía acumulable con la que cuenta el sistema eléctrico.

En la figura 13 se observa un histograma del ahorro del costo de operación del frigorífico en función de la suma de los aportes hidráulicos. Al observar el histograma se concluye que el ahorro aumenta al disminuir los aportes, obteniéndose crónicas con ahorros significativamente mayores en algunas de las crónicas de menores aportes. Este resultado es esperable, ya que la acumulación de energía en el banco de baterías compite con el almacenamiento de energía en los embalses hidráulicos. La gran variabilidad de ahorros en las crónicas de menores aportes se debe a que para evaluar el impacto del banco de baterías, además de los aportes hidráulicos, debe considerarse la generación con otras fuentes de energía, por ejemplo eólica.

Algo similar puede observarse en el histograma realizado con la generación hidráulica acumulada a lo largo de los tres meses (figura 14).



Figura 13

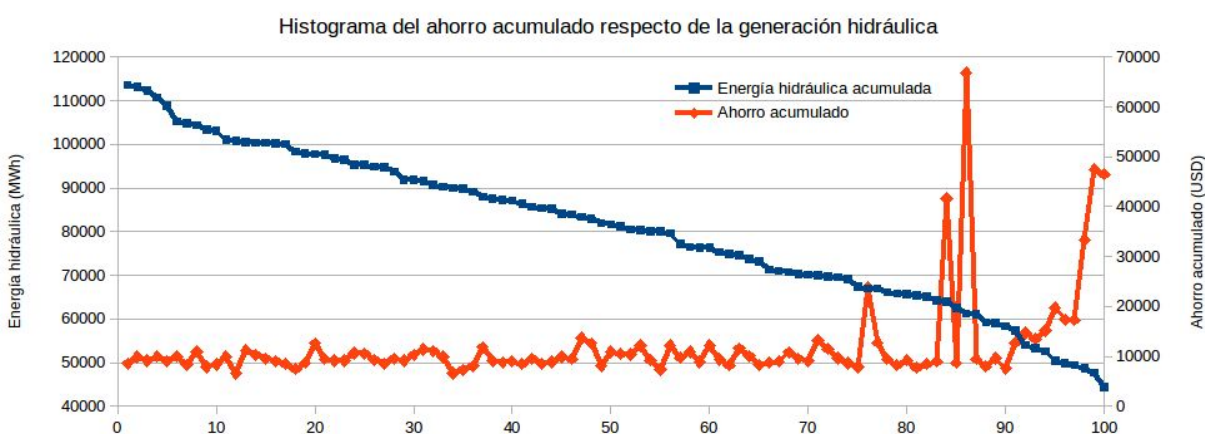


Figura 14

### 4.3 Efecto del precio de exportación en el beneficio de acumular energía

Se analiza el ahorro generado para el frigorífico por el uso del banco de baterías en distintos escenarios de exportación de energía. Como se mencionó, a la hora de evaluar el ahorro que se obtiene al acumular energía, se comparan los costos de abastecimiento del frigorífico, calculados a partir de los costos marginales para el nodo frigorífico y la potencia consumida.

En la figura 15 se observa el ahorro acumulado a lo largo de los tres meses de simulación, comparando el resultado entre los seis escenarios, sin exportación de energía y con exportación a 12 y 25 USD.

Observando la gráfica se concluye que el ahorro disminuye al aumentar el precio de exportación. Esto resulta razonable ya que al aumentar el precio incrementa la cantidad de energía que se exporta y resulta menos beneficioso mover los consumos utilizando el banco de baterías.

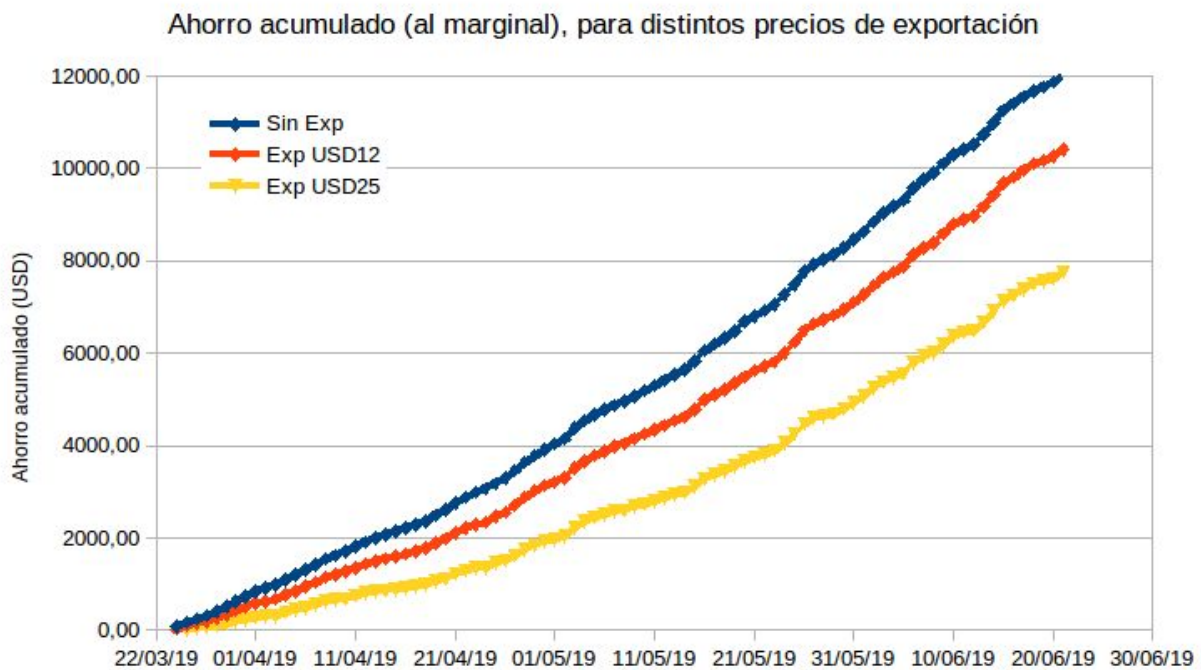


Figura 15

Si se quiere evaluar el ahorro para el sistema eléctrico, se debe comparar el costo del paso temporal entre los escenarios con y sin banco de batería. Este resultado se observa en la figura 16 para distintos escenarios de exportación.

Al analizar el gráfico, se observa que las conclusiones que pueden extraerse del mismo resultan poco razonables. Por un lado se tiene que para todos los escenarios de exportación la diferencia entre los costos del paso acumulado oscila a lo largo de los tres meses, lo que implica que en ese horizonte de tiempo no resulta conveniente el uso del banco. Por otro lado, al comparar los distintos escenarios de precios de exportación, no se puede extraer la misma conclusión que al comparar el ahorro obtenido a partir del costo marginal. La explicación para estos resultados puede estar en que el cambio resultante de introducir el banco de baterías asociado a una demanda muy pequeña, genera un impacto que es mejor evaluado a partir del costo marginal. Los ahorros del costo del paso obtenidos son del orden del 0,02% de este valor.

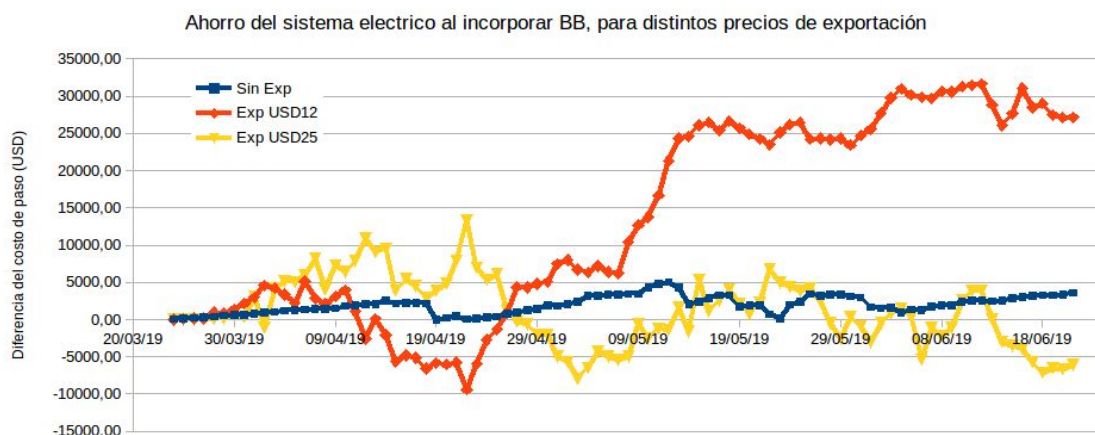


Figura 16

#### 4.4 Cambio de semilla

Para verificar la independencia de los resultados respecto a la semilla aleatoria, se simula la sala en los escenarios 1 y 2, con las semillas 1031 y 2031. En la figura 17 se presentan los ahorros acumulados calculados a partir del costo marginal del nodo “Mdeo” al incorporar la acumulación de energía en el banco de baterías. En el acumulado de los tres meses de simulación, los ahorros difieren en un 3,9% para la semilla aleatoria 1031 y 2,5% para 2031, respecto de los resultados para la semilla 31. Esto indica que la sensibilidad de los resultados obtenidos respecto del valor de semilla utilizado en la optimización y simulación es baja, y pueden considerarse independientes de esta.

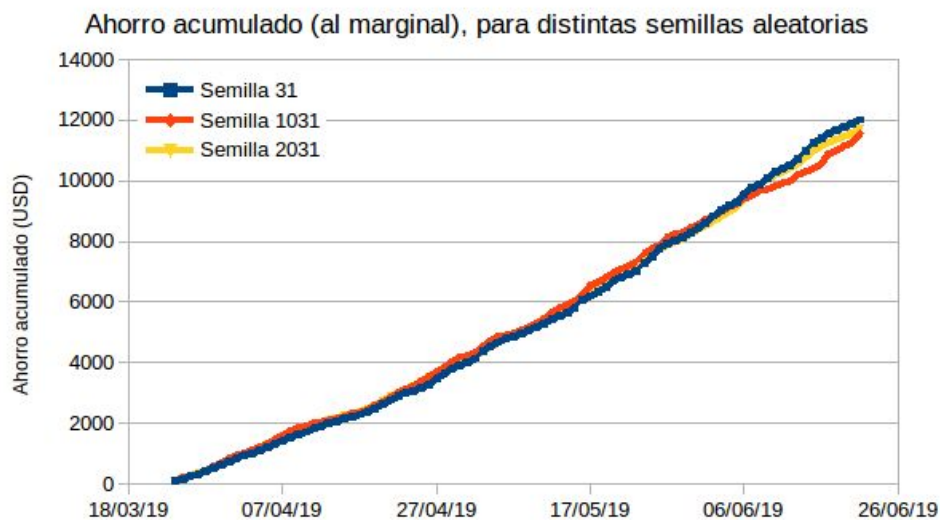


Figura 17

#### 5. Trabajos futuros

- Realizar un estudio similar en un horizonte temporal mayor, para observar y analizar la variaciones estacionales del sistema y el impacto del banco de baterías.
- Analizar la acumulación de energía en una sala de paso horario que permita un ajuste más fino de la carga y descarga de la batería a lo largo de un día.
- Analizar el impacto de una gestión de la demanda de mayor escala de consumo.
- Analizar el impacto de una gestión de la demanda en distintos sectores (por ejemplo sector residencial).