

Modelación de la Microrred Baltra – Santa Cruz de las Islas Galápagos con Restricciones Energéticas y Eléctricas

Grupo 5

Autores: Sebastián Salazar, Jaime Cepeda, Isaac Rojas

Instituto de Ingeniería Eléctrica - FING.
Trabajo final curso SimSEE edición 2023
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

Modelar una microrred considerando restricciones energéticas y eléctricas (de seguridad), que afecten directamente el despacho de las unidades de generación.

2. Introducción

El constante avance a nivel global de las diversas tecnologías de generación de energía renovable no convencional ha impulsado la transición de la matriz energética hacia sistemas de potencia con una alta penetración de fuentes renovables [1], [2], [3]. En el contexto de Ecuador, este fenómeno ha generado un notable aumento en los proyectos de generación renovable, aprovechando las condiciones climáticas favorables del país.

En este escenario, resulta pertinente abordar la optimización del despacho energético en un Sistema Eléctrico de Potencia, específicamente en el contexto de una microrred [4], [5]. Este enfoque cobra especial relevancia debido a la existencia de un proyecto significativo en curso en Ecuador, específicamente en el archipiélago de Galápagos.

En esta situación particular, se plantea la implementación de una microrred en las islas Santa Cruz y Baltra de Galápagos. Dado que estas islas se encuentran aisladas del sistema eléctrico continental, se requiere adoptar alternativas de generación de energía basadas en diversas fuentes disponibles. Es crucial tener en cuenta que Galápagos posee un valor medioambiental notable y que, en línea con el plan de eficiencia energética establecido para el archipiélago, se han definido objetivos a corto, mediano y largo plazo para reducir el uso de combustibles fósiles en la generación de energía, favoreciendo en su lugar el empleo de fuentes renovables [6].

El proyecto propuesto para las islas, contempla la instalación de una extensa planta fotovoltaica junto con sistemas de almacenamiento basados en baterías que funcionen como formadores de red, con el objetivo de minimizar, en la medida de lo posible, la necesidad de generación térmica. En este sentido, resulta fundamental diseñar el banco de baterías de manera que maximice su aprovechamiento, tanto en términos de carga como de descarga, para asegurar una sincronización óptima con la disponibilidad de recursos solares generados por los paneles fotovoltaicos, así como garantizar la utilización eficiente de la energía durante la noche [7]. No obstante, es importante considerar siempre la necesidad de contar con fuentes capaces de controlar la red, ya sea mediante una batería con capacidad de formador de red o mediante un porcentaje de generación térmica [8].

La evaluación de los resultados de este proyecto propuesto en las Islas Galápagos adquiere una importancia trascendental, dado que representa la primera implementación y evaluación de una microrred en Ecuador. Esta iniciativa pionera en el campo de la ingeniería eléctrica y la eficiencia energética genera un valor

incalculable tanto para los actores del sector eléctrico público como privado.

La implementación y el análisis exhaustivo de este proyecto proporcionarán información valiosa sobre la viabilidad y la eficiencia de las tecnologías de generación basada en fuentes renovables en un sistema aislado como el de las Islas Galápagos. Los resultados obtenidos se convertirán en un referente fundamental para futuros desarrollos en el ámbito de las energías renovables y la planificación energética sostenible en Ecuador. Además, este proyecto posee un potencial significativo en términos de su aplicabilidad en la docencia y la investigación innovadora, contribuyendo al avance tecnológico y al desarrollo de profesionales altamente capacitados en el campo de la ingeniería eléctrica y las energías renovables.

En este documento, se presenta detalladamente la metodología utilizada para modelar la microrred, así como todas las consideraciones tomadas en cuenta para lograr un despacho energético óptimo. Además, se llevará a cabo una evaluación exhaustiva de los resultados obtenidos, que permitirá plantear posibles líneas de investigación futuras, extraer conclusiones relevantes y ofrecer recomendaciones prácticas en el campo de estudio.

3. Hipótesis de trabajo

La factibilidad de implementar restricciones adicionales en el actor banco de baterías permite preservar la seguridad estacionaria y dinámica de la microrred.

Para esto, se define como necesaria la modificación de las fuentes del actor banco de baterías implementado en la actualidad.

4. Metodología

Para barrer el objetivo propuesto se dividió al trabajo en varias etapas, estas etapas son descritas en detalle a continuación.

Levantamiento del estado actual

Como punto de partida, es importante destacar que un sistema eléctrico está compuesto por dos elementos fundamentales: las cargas o demandas eléctricas y las unidades de generación encargadas de abastecer dicha demanda.

Con este antecedente, en esta fase se hizo un levantamiento de información, el cual permita recopilar la información necesaria para modelar la red eléctrica que se encuentra instalada en la actualidad en las islas Baltra y Santa Cruz, interconectadas entre si mediante un enlace híbrido (submarino y aéreo). Dicha red eléctrica está compuesta por cinco alimentadores de la isla Santa Cruz y tres alimentadores de la isla Baltra, que sumados dan la demanda total de las islas. Y, para abastecer la generación, actualmente, se tienen unidades térmicas, un parque

eólico y dos parques fotovoltaicos. Se aclara, además, que las islas Baltra y Santa Cruz se encuentran separadas por un angosto canal (canal de Itabaca) de apenas 400 m, por lo que es factible estructurar una sola microrred para estas dos islas. Esto no ocurre con las otras islas, las cuales están separadas varias decenas de kilómetros entre sí, por lo que cada una de las restantes islas pobladas se autoabastecen sin interconexiones mediante microrredes propias.

A continuación, se procede a resumir los hallazgos más relevantes que se obtuvieron al momento de levantar la información.

- **Demanda**

Como ya se mencionó, se dispone la data de cinco alimentadores de la isla Santa Cruz, con un total de 35444,10 MWh de demanda y tres alimentadores de la isla Baltra, con un total de 1060,75 MWh de demanda. Además, en la Tabla 1 y Tabla 2 se presentan las proyecciones de la demanda de potencia y energía en las cuatro islas pobladas que conforman el archipiélago de Galápagos: Santa Cruz-Baltra (SCX), San Cristóbal (SCY), Isabela (ISB) y Floreana (FLO).

Tabla 1. Proyección de Demanda (MW)

<i>Año</i>	<i>SCX</i>	<i>SCY</i>	<i>ISB</i>	<i>FLO</i>
2019	6,7	3,4	1,4	0,052
2025	7,5	3,9	1,7	0,059
2030	8,5	4,5	1,9	0,066
2045	9,4	5,0	2,1	0,069

Tabla 2. Proyección de Energía (GWh)

<i>Año</i>	<i>SCX</i>	<i>SCY</i>	<i>ISB</i>	<i>FLO</i>
2019	37,7	17,4	6,6	0,227
2025	42,0	20,0	8,1	0,258
2030	47,6	23,0	9,1	0,287
2045	52,4	25,5	10,0	0,300

Sin embargo, antes de obtener los datos de la demanda a lo largo de todo el año se realizó un proceso de análisis y depuración de datos mediante el uso de herramientas computacionales como: Matlab y Excel, más o menos el 1 – 2 % de la totalidad estaba fuera de tendencia, lo que hacía que la demanda tenga valores muy atípicos, afectando considerablemente el valor esperado. Luego de esta depuración se obtuvo una demanda promedio como la que se muestra la **Figura 1**.

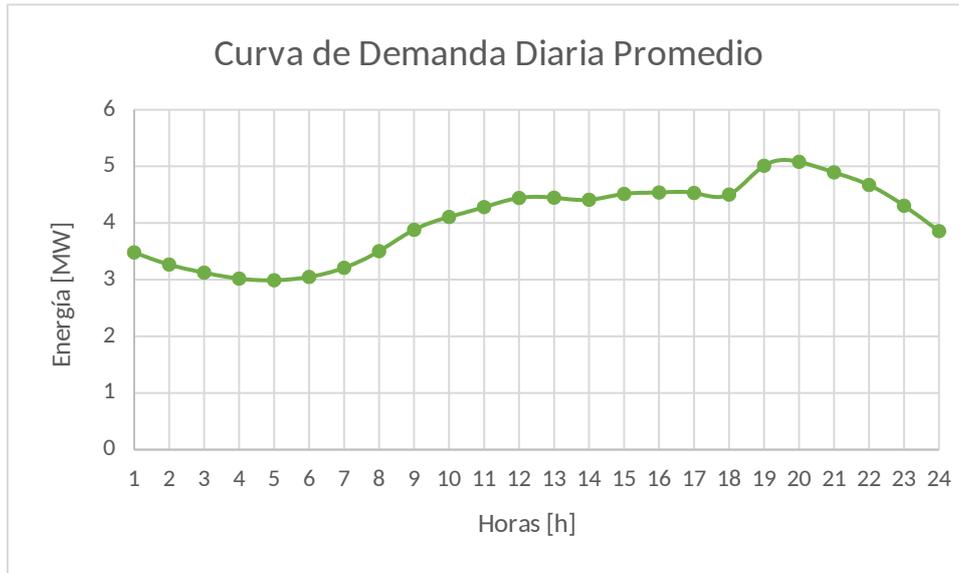
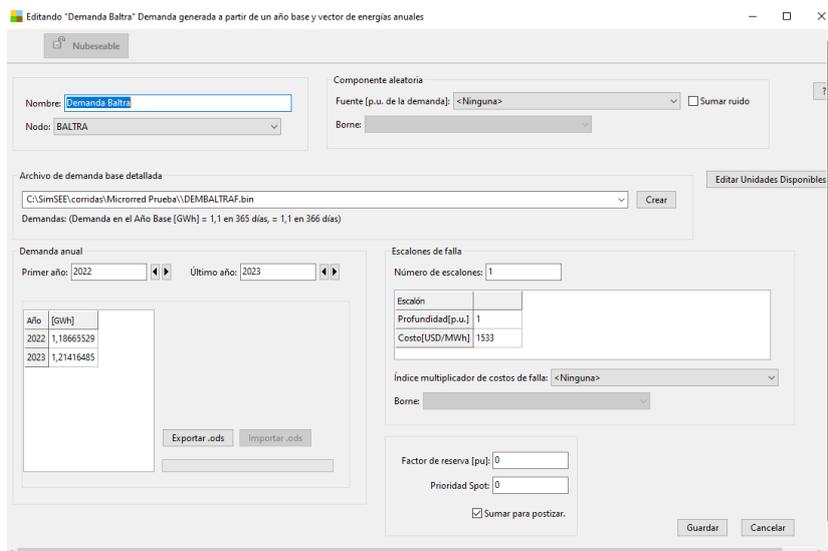


Figura 1. Curva de Demanda Diaria sin Outliers.

Finalmente, todos los datos de demanda deben estar en formato compatible con SimSEE, en donde las filas son los días del año y las columnas son las 24 horas del día. En la **Figura 2** se muestran los archivos que contienen la demanda de las Islas Baltra y Santa Cruz, y en la **Figura 3** y **Figura 4** se puede ver los actores de demanda de las dos islas, ya implementados en SimSEE.

ArchiRef, C:\SimSEE\corridas\Microrred Prueba\DEMSEXF.bin	
ArchiRef, C:\SimSEE\corridas\Microrred Prueba\DEMBALTRAF.bin	

Figura 2. Archivos de Demanda



Nombre:

Node:

Archivo de demanda base detallada:

Demanda anual

Año	[GWh]
2022	1,18665529
2023	1,21416485

Escalones de falla

Número de escalones:

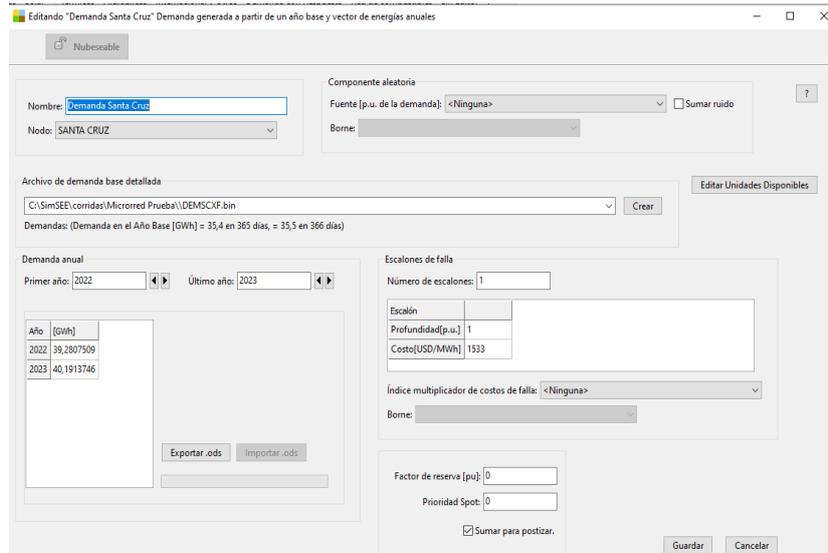
Escalón	Profundidad [p.u.]	Costo [USD/MWh]
1	1	1533

Factor de reserva [pu]:

Prioridad Spot:

Sumar para postizar.

Figura 3. Actor Demanda - Isla Baltra



Nombre: Fuente [p.u. de la demanda]: Sumar ruido:

Nodo: Borne:

Archivo de demanda base detallada: Crear

Demanda anual

Año	[GWh]
2022	39,2807509
2023	40,1913746

Escalones de falla

Número de escalones:

Escalón	Profundidad [p.u.]	Costo [USD/MWh]
1	1	1533

Índice multiplicador de costos de falla:

Borne:

Factor de reserva [pu]:

Prioridad Spot:

Sumar para postizar.

Guardar Cancelar

Figura 4. Actor Demanda - Isla Santa Cruz

- **Generadores Térmicos**

Hay que tomar en cuenta que la mayor parte de la demanda de las Islas Santa Cruz y Baltra es actualmente abastecida con la energía producida por las unidades térmicas. Dichas unidades térmicas se dividen en cuatro grupos de generadores 3 grupos CATERPILLAR y un grupo HYUNDAI. En la **Tabla 1** se detallan las principales características de cada grupo.

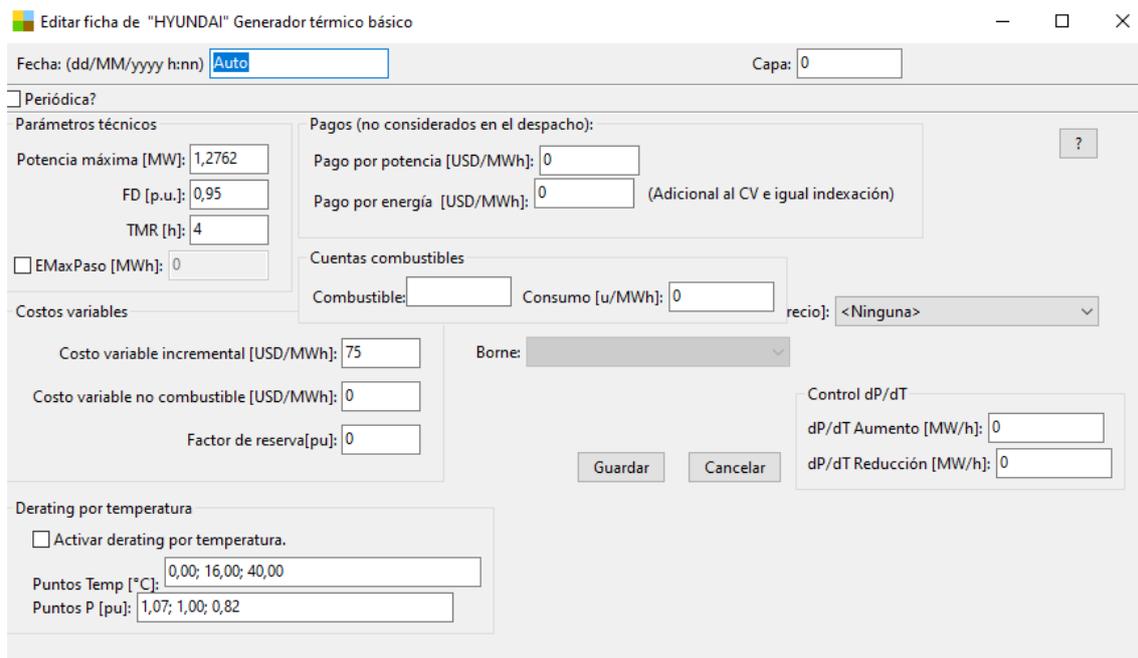
Tabla 1. Características Técnicas de los Grupos Térmicos

Nombre	Nro unidades	Potencia Instalada MVA	Voltaje Nominal kV	fp	Potencia máxima	FD	ICP	TMR	CVI
CAT C32	1	1,137	0,48	0,8	0,6822	0,95%	0,05	4	121,20
CAT PM3516	1	1,375	0,48	0,8	0,825	0,95%	0,05	4	121,20
CAT 3512	4	0,812	0,48	0,8	0,4872	0,95%	0,05	4	121,20
HYUNDAI	6	2,127	4,16	0,8	1,2762	0,95%	0,05	4	75,00

La potencia aprovechable (máxima despachable), corresponde al 60% de la potencia instalada, dicho valor fue levantado en una visita de campo que se realizó a las salas de control de dichas unidades en el año 2021. Al igual que en el caso de la demanda, se modelaron todos los grupos térmicos en el SimSEE como se muestra en la **Figura 5** y siguiendo el ejemplo de la **Figura 6**.

Actor	Tipo de actor	Información adicional				
CAT 3512	Generador térmico básico					
CAT C32	Generador térmico básico					
CAT PM3516	Generador térmico básico					
HYUNDAI	Generador térmico básico					

Figura 5. Generadores Térmicos Básicos



Editar ficha de "HYUNDAI" Generador térmico básico

Fecha: (dd/MM/yyyy h:nn) Capa:

Periódica?

Parámetros técnicos

Potencia máxima [MW]:

FD [p.u.]:

TMR [h]:

EMaxPaso [MWh]:

Pagos (no considerados en el despacho):

Pago por potencia [USD/MWh]:

Pago por energía [USD/MWh]: (Adicional al CV e igual indexación)

Cuentas combustibles

Combustible: Consumo [u/MWh]: recio:

Costos variables

Costo variable incremental [USD/MWh]:

Costo variable no combustible [USD/MWh]:

Factor de reserva[pu]:

Borne:

Control dP/dT

dP/dT Aumento [MW/h]:

dP/dT Reducción [MW/h]:

Derating por temperatura

Activar derating por temperatura.

Puntos Temp [°C]:

Puntos P [pu]:

Figura 6. Ficha del Actor Térmico Básico HYUNDAI

- **Generador Eólico**

En la Isla Baltra se encuentra instalado el parque eólico compuesto por tres aerogeneradores UNISON de 750 kW cada uno. Para evaluar la potencia generada por el parque es necesario conocer la curva "Potencia – Velocidad viento" de los aerogeneradores y el histórico de velocidad del viento a lo largo de la hora transcurrida en ese instante de tiempo.

En la **Figura 7** se muestra la curva potencia - velocidad de viento, por otra parte, para la velocidad del viento se utilizó la data de la estación meteorológica, la cual fue utilizada para generar el CEGH irradiación solar, temperatura y velocidad del viento con paso horario en la Isla Baltra.

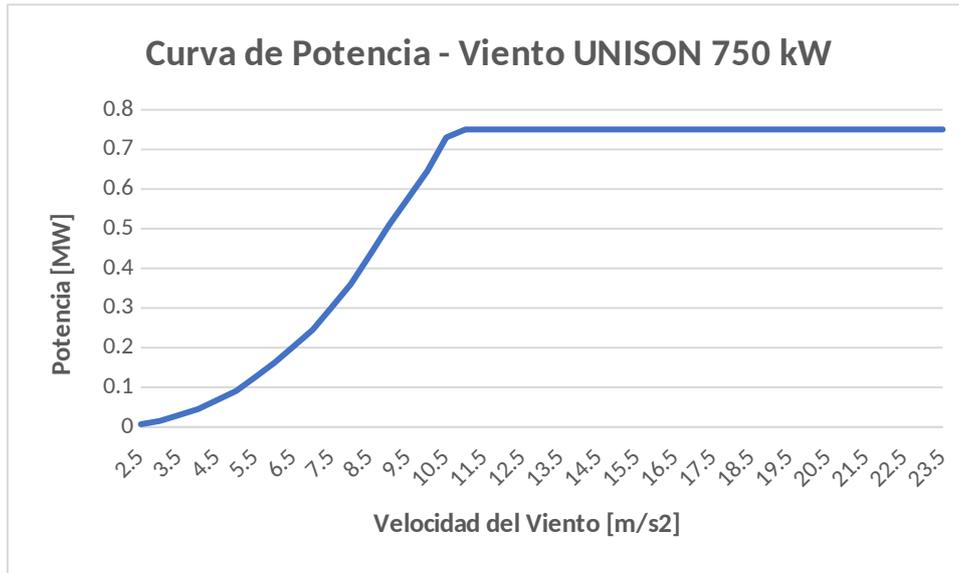


Figura 7. Curva “Potencia - Velocidad del Viento” - UNISON 750 kW

Al igual que con los otros actores, se modeló el aerogenerador y se indicó que existen 3 unidades idénticas disponibles, en la **Figura 8** se muestra el Actor Parque Eólico modelado en SimSEE.

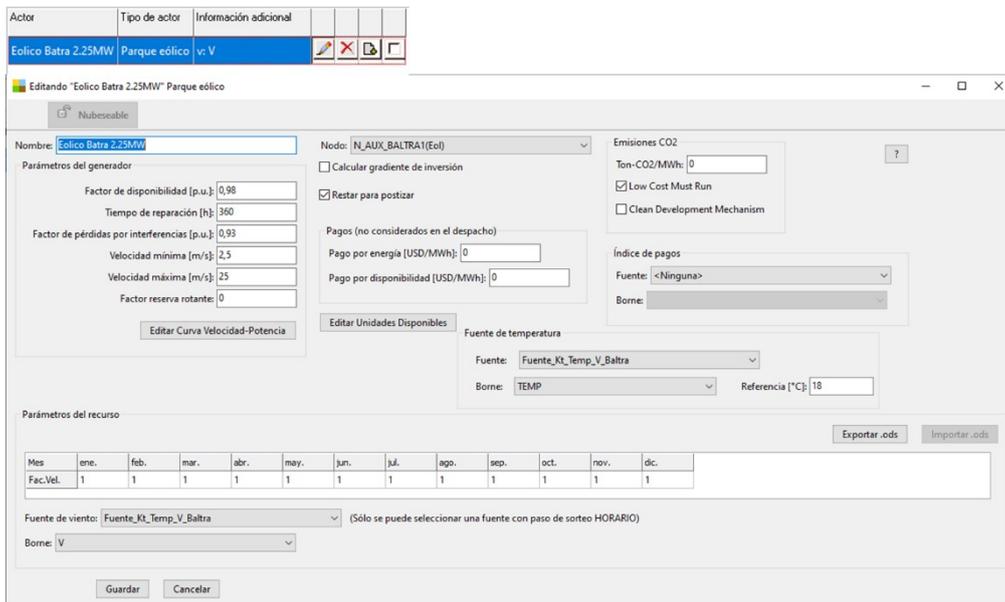


Figura 8. Actor Parque Eólico

- **Generadores Fotovoltaicos**

Para el caso de los parques fotovoltaicos se tienen dos parques en la actualidad y un gran parque propuesto que conforma la microrred Baltra – Santa Cruz. En la **Tabla 2** se presentan las principales características de dichos parques. Por otra parte, para el cálculo de la potencia generada por cada arreglo, es necesario tener una fuente de irradiación solar. Dichas fuentes fueron obtenidas de los dos CEGH

utilizados en esta sala, uno para la Isla Baltra y otro para Santa Cruz.

Tabla 2. Datos de los Parques Fotovoltaicos

Nombre PFV	Potencia DC [MWp]	Potencia AC [MW]	Latitud [grados]	Longitud [grados]	Inclinación [grados]	Acimut [grados]
Baltra	0,06678	0,06678	-0,443156	-90,2679	11	0
Puerto Ayora	1,5015	1,547	-0,743701	-90,3209	8	-6
SCX	14,80	13,06	-0,44356	-90,2691	7	113

De forma similar, se modela los actores en SimSEE, en la **Figura 9** se muestra un ejemplo de como fue modelado cada Actor Parque Solar.

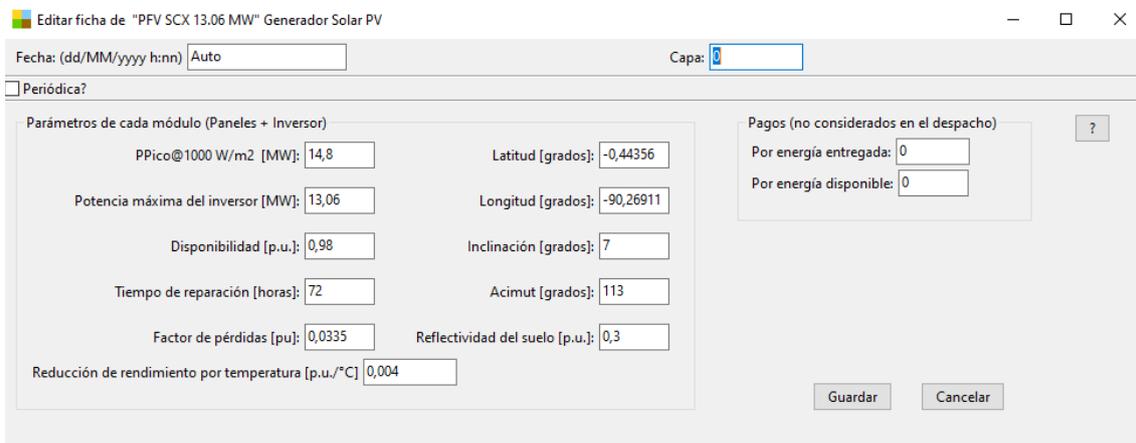


Figura 9. Actor Parque Solar - Microrred SCX

Propuesta de microrred

- Banco de Baterías

El banco de baterías en la microrred desempeña una función esencial al gestionar eficientemente los excedentes de energía provenientes de fuentes renovables como la solar y la eólica. En períodos de fuertes vientos o alta irradiación solar, el banco de baterías se encarga de almacenar el exceso de energía generada. Luego, en momentos de escasez de recursos renovables, libera la energía almacenada a la red, asegurando un suministro continuo y estable. De esta manera, el banco de baterías contribuye significativamente a la optimización de los recursos renovables y a la fiabilidad del suministro energético en la microrred.

En la **Tabla 3** se muestran las características del banco de baterías implementado y en la **Figura 10** se muestra el banco de baterías modelado en SimSEE. La microrred propuesta está conformada por el banco de baterías y un parque fotovoltaico de 14,80 MWp.

Tabla 3. Variables Características de la Batería

Variable	Valor
Capacidad Máxima (CapMax)	3,0804
Carga Inicial	0,7701
Capacidad máxima [MWh]	3,0804
Potencia máxima de carga [MW]	0,7701
Rendimiento de carga	0,9
Potencia máxima de descarga [MW]	0,7701
Rendimiento de descarga	0,9
Disponibilidad fortuita	0,99
TMR	2,18
Valor de la energía almacenada	0

Figura 10. Actor Banco de Baterías

Con todos los actores expuestos anteriormente ya se encuentra armada la red eléctrica, pero hace falta tomar en cuenta otras restricciones operativas y eléctricas que puede tener la microrred. Por esta razón es importante dar una breve introducción a la seguridad del sistema en las microrredes.

Seguridad en Microrredes

La seguridad en un sistema eléctrico de potencia reviste un papel fundamental para preservar la estabilidad y confiabilidad de una microrred. Su importancia recae en la salvaguarda de una regulación precisa de la frecuencia y el voltaje, junto con el aseguramiento de la calidad de la energía suministrada.

En una microrred, donde la generación se origina a partir de fuentes renovables intermitentes, como paneles solares y turbinas eólicas, la preservación de la regulación de frecuencia resulta de vital importancia para evitar oscilaciones bruscas que podrían comprometer la integridad de los equipos y afectar adversamente a los dispositivos sensibles. Asimismo, la regulación del voltaje se convierte en un aspecto crucial para garantizar que la tensión se mantenga dentro de los límites establecidos, evitando tanto sobretensiones como subtensiones que podrían afectar el rendimiento óptimo del conjunto de la red.

Además, la seguridad en el sistema eléctrico se enfoca en abordar minuciosamente cuestiones como la presencia de armónicos y otros problemas vinculados a la calidad de la energía, los cuales podrían afectar adversamente a los dispositivos electrónicos y generar interrupciones indeseadas en el suministro. La correcta implementación de medidas de seguridad pertinentes permite minimizar los riesgos asociados a cortocircuitos y sobrecargas, lo que, en última instancia, potencia la confiabilidad del sistema y asegura una disponibilidad óptima de energía dentro de la microrred.

Con este antecedente, se apreció la oportunidad de agregar estas condiciones de seguridad, que a la larga van a ser condiciones de reserva de generación, en el actor banco de baterías, por lo cual nos encontramos en la necesidad de modificar el actor banco de baterías, creando una réplica a la cual se le dio el nombre de Banco de Baterías 1.

A continuación, se explica, de manera detallada, cómo modificamos el actor para lograr el objetivo de añadir un factor de reserva que guarde la seguridad en la microrred.

Programación en las Fuentes del SimSEE

Lo primero que hicimos fue descargarnos el entorno de desarrollo para programación orientada a objetos PASCAL llamado Lazarus, después configuramos la interfaz para que sea amigable para el programador y procedimos a descargar las fuentes más actualizadas del SimSEE y pegar el Trunk en el lugar que corresponde. La interfaz tipo utilizada y la ruta de las fuentes del SimSEE utilizadas en el ordenador de Sebastián, se muestran en la **Figura 11**.

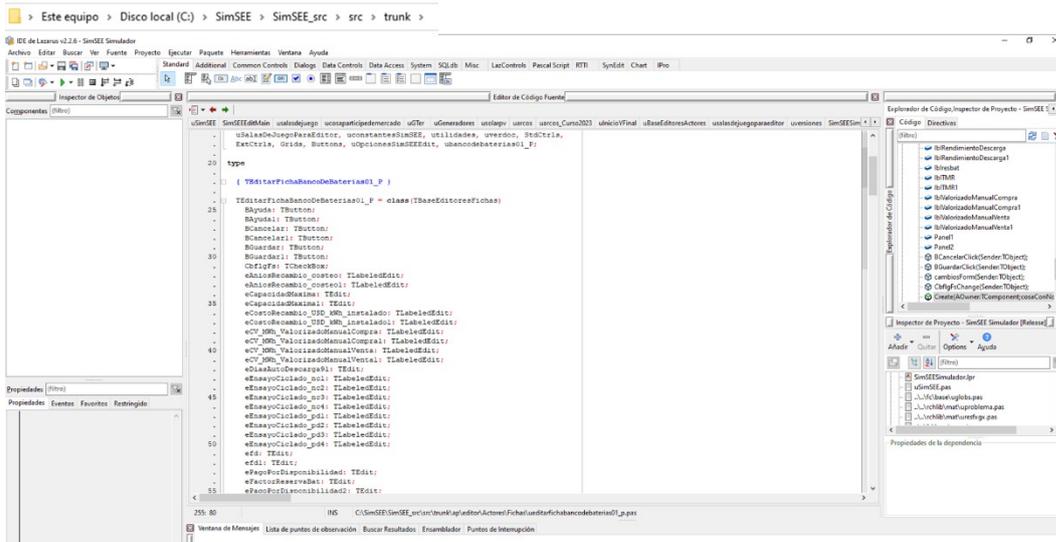


Figura 11. Interfaz de Lazarus y Fuentes del SimSEE

Una vez ya familiarizados con el entorno de programación lo que sigue es modificar el actor que nos interesa, en nuestro caso el actor a modificar y su fuente se llama “ubancodebaterias01”, una vez en el actor, lo que hicimos es modificar su ficha.

La idea de implementar las restricciones de seguridad en el actor radica en dos cosas:

- Limitar la potencia generada por la Batería.
- Limitar el estado de carga de la Batería.

Con estas dos consideraciones aseguramos que un porcentaje de la energía de la batería va a ser destinada exclusivamente a suplir los servicios complementarios que requiera la microrred.

Primero afrontamos el limitador de potencia generada por la batería, incluyendo un cuadro de estado y una variable que limite la potencia generada máxima por el actor banco de baterías.

Limitador de Potencia Generada

En la fuente de ubancodebaterias01, guardamos una copia llamada ubancodebaterias01_P y renombramos las fichas y tipos de esa fuente, después y ya en el actor auxiliar, y dentro de su ficha vamos a crear dos nuevas variables fReservaBat: NReal y flg_ReservaRotBat: boolean, la variable real nos permitirá dar

un porcentaje de reserva a una variable del actor y la bandera tipo booleana nos ayudará a identificar si la reserva se encuentra habilitada o no. De la misma forma, en el constructor y en implementación Create (...) declaramos e inicializamos las variables, como se muestra en la **Figura 12**.

```
fReservaBat: NReal; //SSJC //REVISADO
flg_ReservaRotBat: boolean; //SSJC
// factor de reserva. Porcentaje de la potencia total del generador que se puede usar como reserva SSJC
(*****)

constructor Create(capa: integer; fecha: TFecha; periodicidad: TPeriodicidad;
    FMax_Gen, FMax_Dem: NReal; ren_Gen, ren_Dem: NReal;
    CapacidadMaxima_MWh: NReal; fd, TMR, DiasAutoDescarga90,
    cv_MWh_ValorizadoManual_Compra, cv_MWh_ValorizadoManual_Venta,
    pagoPorDisponibilidad_USDxMWh, EnsayoCiclado_pd1: NReal;
    EnsayoCiclado_nc1: integer; EnsayoCiclado_pd2: NReal;
    EnsayoCiclado_nc2: integer; CostoRecambio_USD_KWh_instalado: NReal;
    AniosRecambio_costeo: integer; TasaDescuento_costeo: NReal; fReservaBat: double = 0; flg_ReservaRotBat: boolean = False); //SSJC //RE

implementation

constructor TBancoDeBaterias01_P.Create(capa: integer; nombre: string;
    nacimiento, muerte: TFecha; lpdUnidades, lpd: TFichasLPD; nodo: TNodo;
    flg_CalcularGradienteDeInversion: boolean; Carga_ini: NReal;
    NDisc : integer; flg_ValorizadoManual,
    flg_AplicarRestriccionesHorariasIterando: boolean;
    TonCO2xMWh: NReal; LowCostMustRun, CleanDevelopmentMechanism: boolean;
    xFuenteIdxP: TFuenteAleatoria; xBorneIdxP: string; xFuenteIdxCVE: TFuenteAleatoria;
    xBorneIdxCVE: string;
    fReservaBat: double = 0; flg_ReservaRotBat : boolean = false); //revisado //SSJC
```

Figura 12. Declaración de Variables para Reserva

Seguido, en la función Rec cosa declaramos las nuevas variables como dos campos que sean vigentes desde la versión 247 del programa, para esto es necesario declarar el cambio que vamos a realizar y cambiar el número de la versión a las fuentes del SimSEE, esto se hace en el archivo uversiones, estos dos cambios se muestran en la **Figura 12**.

```
function TBancoDeBaterias01_P.Rec: TCosa_RecLnk;
begin
    Result := inherited Rec;
    Result.addCampoDef('Carga_ini', Carga_Ini);
    Result.addCampoDef('NDisc', NDisc);
    Result.addCampoDef('flg_ValorizadoManual', flg_ValorizadoManual, 121);
    Result.addCampoDef('flg_AplicarRestriccionesHorariasIterando',
        flg_AplicarRestriccionesHorariasIterando, 198, 0, 'T');
    Result.addCampoDef('lpd', TCosa(lpd));

    Result.addCampoDef_ref('fuente_idx_cve', TCosa(fuente_idx_cve), Self, 213);
    Result.addCampoDef('nombreBorne_idx_cve', nombreBorne_idx_cve, 213);
    Result.addCampoDef('fReservaBat', fReservaBat, 247); //SSJC //REVISADO 7
    Result.addCampoDef('flg_ReservaRotBat', flg_ReservaRotBat, 247, 0, 'F'); //SSJC 2
end;

VERSION_Simulador_str = '105'; // Incrementar para nueva versión de SimSEE
VERSION_ArchiTexto_str = '247'; // Incrementar para nueva versión de archivo de Sala

(*****Documentación local temporal del cambio:
PORFAVOR SI INTRODUCE CAMBIOS DE VERSION PREOCUPESE DE DOCUMENTARLOS
CON EL SIGUIENTE FORMATO:
AñoMesDiaHoraMinuto.VersionSimSEE.VersionArchivo.USUARIO: Motivo del cambio

Documente a continuación el cambio realizado:
-----ESCRIBA DEBAJO------(inicio cambios)-

202305091141.105.245.rchaer: Se agrega TArco_Curso2023
202305142033.105.246.ssalazar: Se agrega TBancodebaterias01_Curso2023
202305142033.105.247.ssalazar: Se agrega TBancodebaterias01_P
```

Figura 13. Declaración de cambios y aumento de versión

De manera similar, en el constructor TFichaBancoDeBaterias01_P.Create() declaramos las dos variables y en TFichaBancoDeBaterias01_P.Rec: TCosa_RecLnk;, agregamos los dos campos correspondientes. Ya con esto identificamos la variable a la cual vamos a limitar y esta variable dentro de las fuentes se llama PMax_Gen, esta variable limita la potencia máxima generada por el banco de baterías. Para lograr este objetivo, al preparar el paso y al realizar los sorteos se debe verificar la condición de la bandera y si esta habilitada se debe restringir en el porcentaje que se le de a la variable freservabat, la codificación de esta restricción se muestra en la **Figura 14**.

```
procedure TBancoDeBaterias01_P.SorteosDelPaso(sortear: boolean);
begin
    CapacidadInstalada_MWh := paUnidades.nUnidades_Instaladas[0] * pa.CapacidadMaxima_MWh;

    if globs.ObligarDisponibilidad_l_or (not sortear) then
        NMaquinasDisponibles := paUnidades.nUnidades_Operativas[0]
    else
    begin
        ActualizarProbabilidadesReparacionYRotura(pa.fd, pa.tmr);
        NMaquinasDisponibles := Sorteos_RepRotUnidades;
    end;
    PMax_Gen := pa.PMax_Gen * NMaquinasDisponibles;
    PMax_Dem := pa.PMax_Dem * NMaquinasDisponibles;
    //writeln('PMax Gen 1 ', PMax_Gen);
    if pa.flg_ReservaRotBat then
    begin
        PMax_Gen := PMax_Gen - PMax_Gen * pa.fReservaBat;    //SSJJCCCCC
        //writeln('entro')
    end;
    //writeln('PMax_Gen 2 ', PMax_Gen);
end;
```

Figura 14. Restricción de Generación

Ahora tenemos que modificar la Ficha dinámica en donde se van a registrar los valores del porcentaje de reserva, para lo cual vamos a la unidad “ueditarfichabancodebaterias01_P”, en donde tenemos que modificar el formulario, agregando un cuadro de texto, un cuadro de estado y dos cuadros de etiquetas, como se muestra en la **Figura 15** . El valor de la variable del cuadro de texto es freservabat y el estado del cuadro de estado es el valor de la bandera.

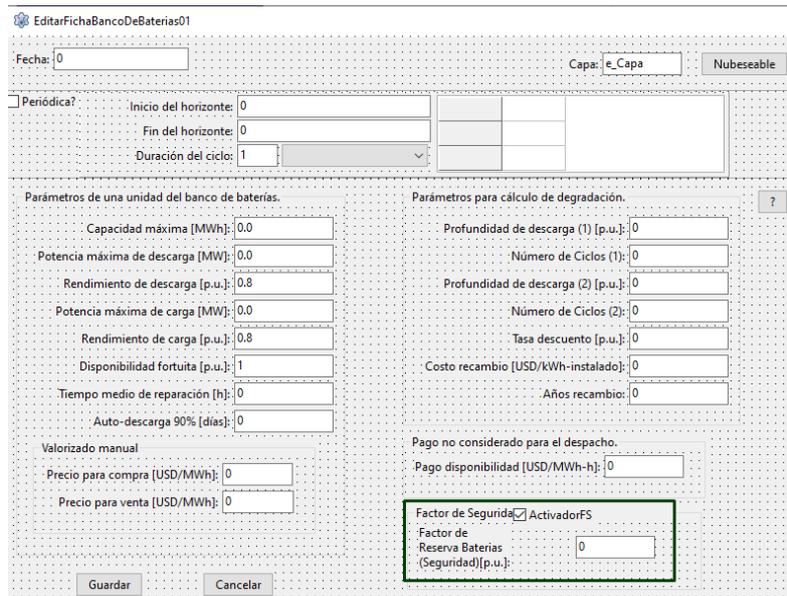


Figura 15. Ficha Banco de Baterías 1

Finalmente hay que editar la programación de la ficha de parámetros dinámicos para que al crear una nueva ficha el parámetro este desactivado y el cuadro este en cero y cuando se guarden los cambios, estos se mantengan correctamente.

Limitador del Estado de Carga de la Batería

Para este caso se intentó emular al generador térmico básico en donde, dependiendo del estado de una bandera que se llama reserva rotante, se manipule el estado de carga X_{Carga} de la batería. También se intentó tratando de añadir una cota inferior y superior a las restricciones del Simplex, pero ambas propuestas hacían que el problema de optimización no converja al tratarse de una de las variables de estado del actor. Finalmente, y luego de varios intentos se llegó a la conclusión de que la mejor forma de garantizar esta reserva, haciendo que esta participe en el problema de optimización y garantizando que el Simplex converja sin ningún problema es generar un actor de reserva, con la reserva correspondiente y activar el valorizado manual, haciendo que esta reserva actúe únicamente en caso de falla. A continuación, en la **Figura 16**, se presenta el actor de reserva que se utilizó en la sala.

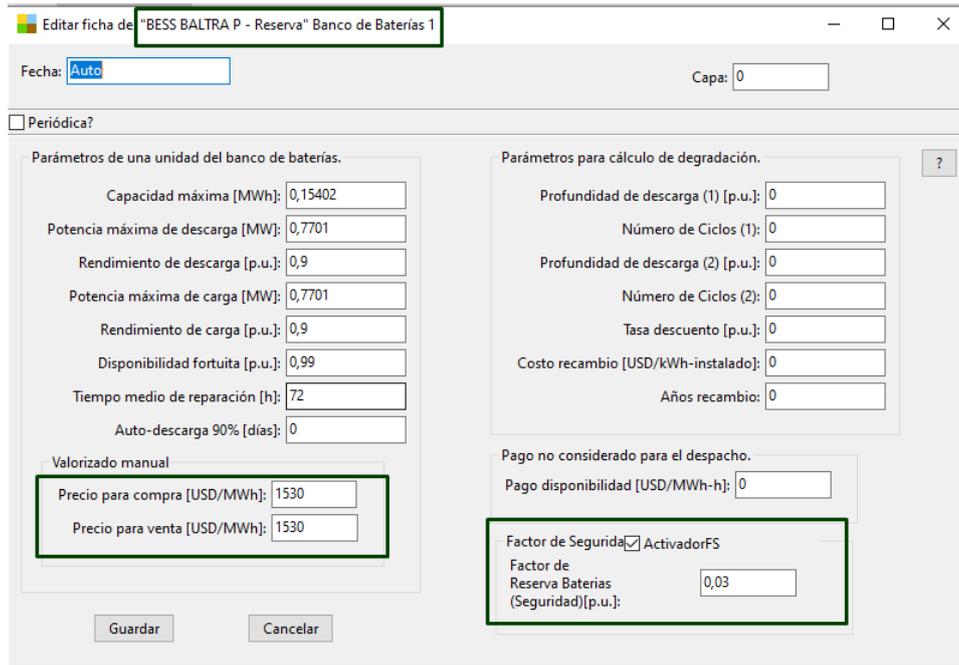


Figura 16. Actor de Reserva por Seguridad

Cabe mencionar que en algunas de las unidades del simulador y editor hay que llamar al nuevo actor `ubancodebaterias01_P` para que todo converja sin ningún inconveniente. A continuación, presentamos el listado de unidades que fueron modificadas para lograr nuestro objetivo.

- `uSimSEE`.
- `SimSEEEditMain`.
- `Usalasjejuego`.
- `uGeneradores`.
- `ulnicioYFinal` (declaración de nuevo actor).
- `uBaseEditoresActores`.
- `uversiones`.
- `SimSEESimulador`.
- `uestados`.
- `ubancodebaterias01`.
- `ueditarfichabancodebaterias01`.
- `uActores`.
- `uglobs`.

Finalmente, para emular las restricciones operativas de la red eléctrica se usaron nodos y arcos auxiliares con peajes (emulando orden de prelación para las fuentes de generación renovables) y rendimientos (emulando las pérdidas en la Línea de Transmisión).

A lo largo del estudio se cumplieron con el objetivo general del curso que era conocer y manejar el potencial del simulador SimSEE, y con no menos importancia, se cumplió el objetivo de nuestro trabajo, el cual nos permite evaluar la seguridad de una microrred añadiendo restricciones al modelo de simulación. En el siguiente apartado se presentan los resultados obtenidos en el presente trabajo.

5. Resultados del estudio.

En la **Tabla 4** se detallan los actores que participan en la sala, con los cuales se creó una plantilla de SimRes3 para poder ver el comportamiento de cada una de las variables de interés.

Tabla 4. Actores que Intervienen en la Sala

Red Eléctrica	Térmicas
Nodo Baltra	CAT 3512
Nodo Santa Cruz	CAT C32
Nodos Auxiliares (Orden de Praelación)	CAT PB3516
Arco_Baltra_Santa Cruz	HYUNDAI
Arco_Santa Cruz_Baltra	Internacional y Otros
Arcos Auxiliares (Orden de Praelación)	BESS Baltra
Demandas	BESS Baltra Res
Demanda Baltra	BESS Santa Cruz
Demanda Santa Cruz	BESS Santa Cruz Res
Eólicas	
Eólico Baltra	
Solar	
PFV Baltra	
PFV Puerto Ayora	
PFV SCX	

Plantilla SimRes 3

En la *Figura 17* se presentan los índices y nombres de las variables que fueron utilizados para visualizar las variables de interés como la Potencia de Generación, la Potencia Demandada, el cmg y el Estado de Carga de las Baterías.

Tipo de operación	Resultados	Parámetros índice	Parámetros adicionales					
promedioPonderadoPorDurpos	PG_PFV_Baltra	Idx_P_PFV Baltra 0.06678 MW	-					
promedioPonderadoPorDurpos	PG_PFV_Puerto Ayora	Idx_P_PFV Puerto Ayora 1.547 MW	-					
promedioPonderadoPorDurpos	PG_PFV_SCX	Idx_P_PFV SCX 13.06 MW	-					
promedioPonderadoPorDurpos	PD_Baltra	Idx_PD_Demanda Baltra	-					
promedioPonderadoPorDurpos	PD_Santa Cruz	Idx_PD_Demanda Santa Cruz	-					
promedioPonderadoPorDurpos	PF_Baltra	Idx_PF1_Demanda Baltra	-					
promedioPonderadoPorDurpos	PF_Santa Cruz	Idx_PF1_Demanda Santa Cruz	-					
promedioPonderadoPorDurpos	P_Arco_Baltra-SCX	Idx_P_Arco_Baltra_SantaC	-					
promedioPonderadoPorDurpos	P_Arco_SCX-Baltra	Idx_P_Arco_SantaC_Baltra	-					
promedioPonderadoPorDurpos	PG_Peol_Baltra	Idx_P_Eolico Baltra 2.25MW	-					
promedioPonderadoPorDurpos	PG_TERM_CATC32	Idx_P_CAT C32	-					
promedioPonderadoPorDurpos	PG_TERM_CATPM3516	Idx_P_CAT PM3516	-					
promedioPonderadoPorDurpos	PG_TERM_CAT3512	Idx_P_CAT 3512	-					
promedioPonderadoPorDurpos	PG_TERM_HYUNDAI	Idx_P_HYUNDAI	-					
suma	PG_BESS Baltra	Idx_PGen_BESS BALTRA P	-					
suma	PG_BESS Santa Cruz	Idx_PGen_BESS Santa Cruz P	-					
suma	cmg_Baltra	Idx_cmg_BALTRA	-					
suma	cmg_Santa Cruz	Idx_cmg_SANTA CRUZ	-					
suma	xCarga_BESS BALTRA	Idx_X_Carga_BESS BALTRA P	-					
suma	xCarga_BESS Santa Cruz	Idx_X_Carga_BESS Santa Cruz P	-					
suma_m	PD TOTAL	Idx_PD_Demanda Baltra, Idx_PD_Demanda...	-					
suma_m	PF TOTAL	Idx_PF1_Demanda Baltra, Idx_PF1_Deman...	-					
suma	PD_BESS BALTRA	Idx_PDem_BESS BALTRA P	-					
suma	PD_BESS SANTA CRUZ	Idx_PDem_BESS Santa Cruz P	-					
suma	KT_BALTRA	Idx_Y_KT_Fuente_Kt_Temp_V_Baltra	-					
suma	KT_SANTA CRUZ	Idx_Y_KT_Fuente_Kt_Temp_SantaC	-					
promedioPonderadoPorDurpos	PG_PFV_BALTRA	Idx_P_Arco_AuxB2_Baltra	-					
promedioPonderadoPorDurpos	PG_EOL_BALTRA	Idx_P_Arco_AuxB1_Baltra	-					
promedioPonderadoPorDurpos	PG_PFV_MGRD	Idx_P_Arco_AuxB3_Baltra	-					

Figura 17. Plantilla SimRes3

Con estas variables se pudieron validar nuestros resultados, primero, se comprobó que al poner un valor de 1,0 en la reserva la batería nunca entrega energía a la red y simplemente se descarga como se puede ver en la siguiente imagen.

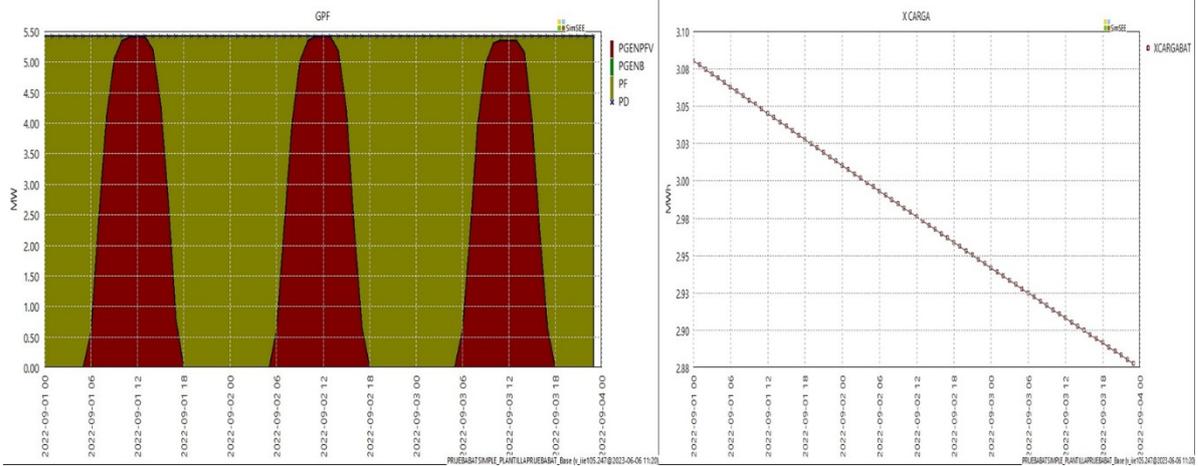


Figura 18. Restricción de Reserva de las Baterías

También se hicieron pruebas para varios porcentajes de reserva, como se muestra en la **Figura 19**

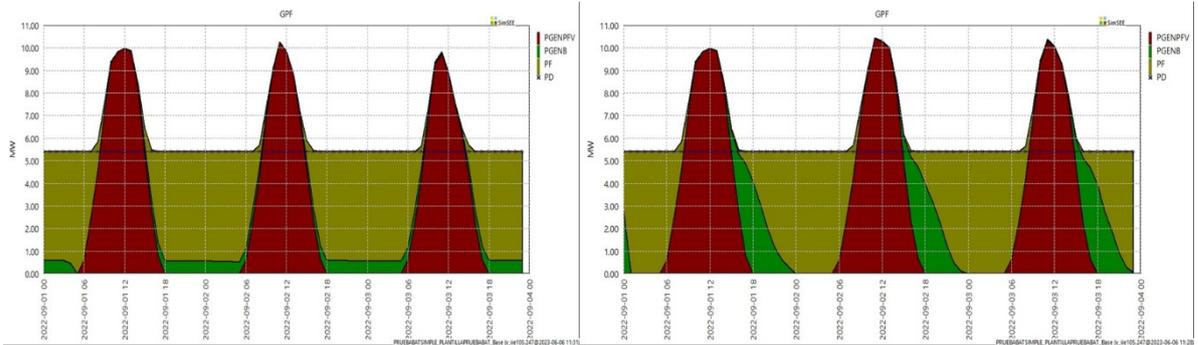


Figura 19. Prueba del % de Reserva del Banco de Baterías

Finalmente se obtuvo el cmg en los nodos Baltra y Santa Cruz y la Generación por Fuente de todas las unidades de Generación Renovable y No Renovable, esto se muestra en la **Figura 20** y **Figura 21** respectivamente.

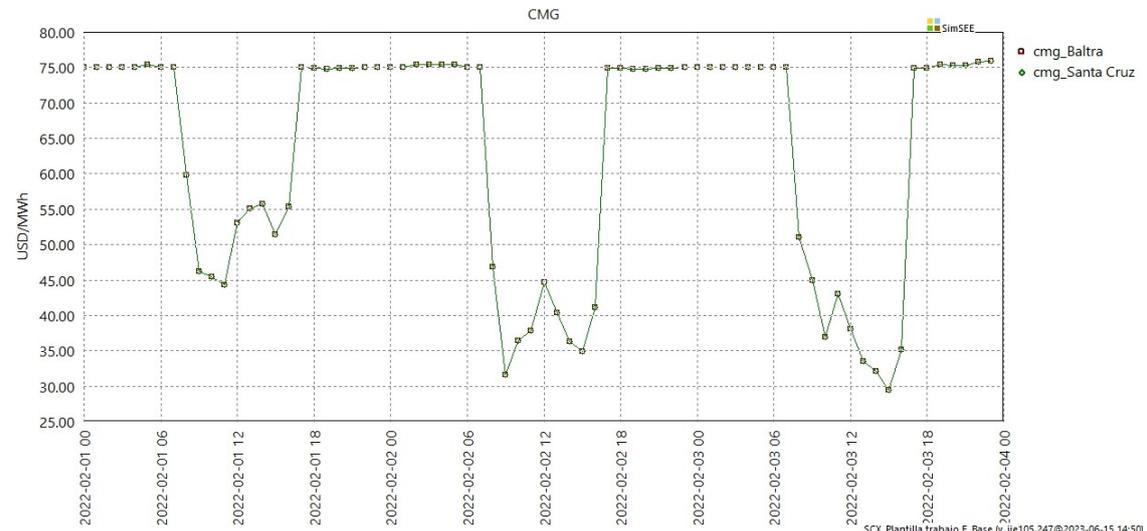


Figura 20. cmg en los Nodos Baltra y Santa Cruz

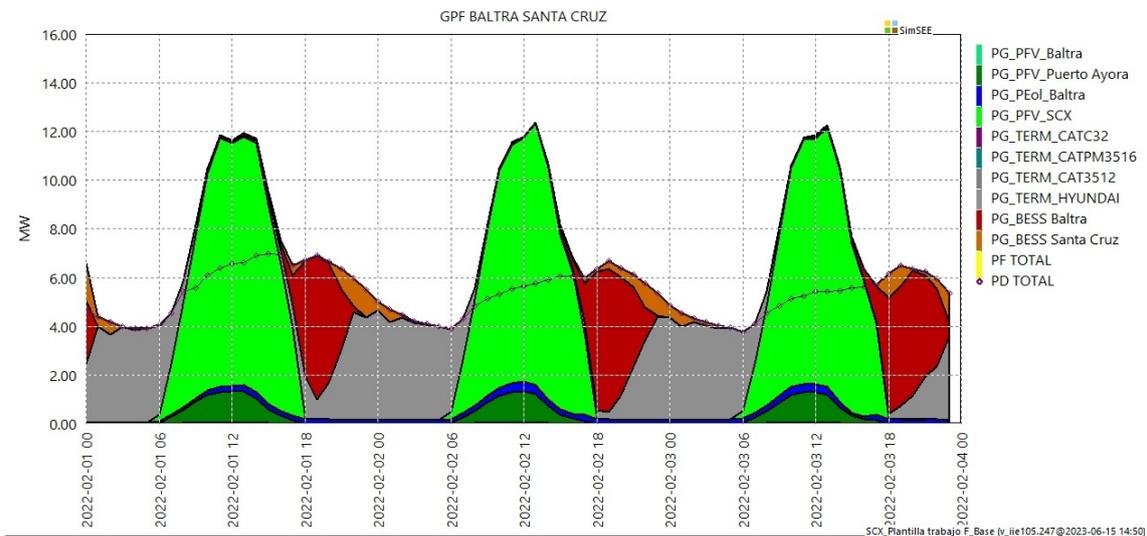


Figura 21. GPF Baltra - Santa Cruz

6. Posibles futuros trabajos.

- Incorporación de variaciones en la demanda a corto plazo.
- Incorporación de variaciones en los CEGH dependiendo de la temperatura horaria (corto plazo).
- Disminución de la ventana de tiempo del CEGH a 10 – 15 minutos.
- Valoración de futuros esquemas de generación incluyendo nuevos sistemas basados en fuentes renovables según la madurez tecnológica, por ejemplo: mareomotriz, olas o corrientes marinas.

7. Conclusiones

Considerar tanto las restricciones eléctricas, que se refieren a los márgenes de reserva de energía para cumplir servicios como la regulación de voltaje y frecuencia, como las restricciones energéticas, es fundamental para asegurar el óptimo funcionamiento de la microrred. Estas consideraciones garantizan el suministro de energía eléctrica con calidad y confiabilidad, asegurando así un servicio eficiente y confiable para los usuarios.

La manipulación de las fuentes del SimSEE permiten realizar cambios a los actores y su manera de participar en el despacho, en el presente trabajo se cambió en actor banco de baterías con el objetivo de añadir un margen de reserva de potencia y energía, alterando la potencia máxima que puede entregar, así como su estado de carga respectivamente.

Los resultados de este trabajo son de vital importancia para el Ecuador, y más aún

para su región insular, ya que, al tratarse de una zona protegida, y para poder cumplir con los objetivos especificados en el Plan de Eficiencia energética, es indispensable evaluar diferentes escenarios de penetración de energías renovables a gran escala.

Los sistemas de almacenamiento (BESS por sus siglas en inglés) juegan un papel fundamental en los sistemas aislados, ya que ayudan a mejorar la inercia del sistema y ayudan a generar formadores de red, ayudando ante posibles contingencias o ante la necesidad de salida de funcionamiento de alguna de las centrales de generación renovable o no renovable. Modelar de la mejor manera posible el comportamiento de carga y descarga de estos sistemas de almacenamiento es de vital importancia ya que obviar alguno de sus propósitos puede traer consecuencias al sistema.

Las microrredes cada vez van cobrando cada vez más importancia, no solo en situaciones de isla como la que se estudió en este proyecto, sino que en otros países a nivel regulatorio se están abriendo las posibilidades de crear algún tipo de asociación entre consumidores/generadores/almacenadores, para definir sistemas de este tipo conectados a una red de distribución.

8. Referencias

- [1] I. P. SERVICE, «ipsnoticias,» 2023. [En línea]. Available: <https://ipsnoticias.net/2021/02/proyecto-solar-aromo-reto-las-renovables-ecuador/>.
- [2] L. Ini, «pv magazine,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.pv-magazine-latam.com/2023/03/09/inauguran-en-ecuador-el-primer-proyecto-fotovoltaico-privado/>.
- [3] S. Salazar, «Análisis Técnico y Económico de la Implementación del Net Metering para diferentes tipos de Consumidores de Electricidad en el Ecuador,» *Revista Técnica "Energía"*, vol. 18, pp. 86-94, 2021.
- [4] N. Nnamdi I, «Optimal dispatch for a microgrid incorporating renewables and demand response,» *Renewable Energy*, vol. 101, n° 1, pp. 16-28, 2017.
- [5] S. Yuwei, «Stochastic dispatch of energy storage in microgrids: An augmented reinforcement learning approach,» *Applied Energy*, vol. 261, 2020.
- [6] P. Corella y H. Juan, « Propuesta de un plan de eficiencia energética eléctrica en las islas San Cristóbal, Isabela y Santa Cruz del Archipiélago de Galápagos,» vol. 1, 2022.
- [7] S. Salazar y J. Cepeda, «Evaluación de la Prospectiva Energética de la microrred Baltra – Santa Cruz usando Flujos de Potencia Probabilísticos,» *2022 IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON)*, vol. 1, 2022.
- [8] J. Cepeda y C. Santiago, «Determinación del Modelo Estocástico del Estado de Carga de Baterías para el cómputo de Flujo de Potencia Probabilístico de Microrredes,» *Revista Técnica "Energía"*, vol. 16, pp. 41-50, 2019.

