

# **“PLANIFICACIÓN DE LA DESCARBONIZACIÓN DE LAS ISLAS GALÁPAGOS MEDIANTE HERRAMIENTAS DE OPTIMIZACIÓN”**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIERO ELECTROMECAÁNICO**

**AUTORES: BASANTES ROMERO, JORGE ALEJANDRO  
MACÍAS BERMÚDEZ, MANUEL ALEJANDRO**

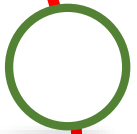
**DIRECTOR: ING. ORTIZ VILLALBA, DIEGO EDMUNDO MSC. PHD (c)  
LATACUNGA 2022**



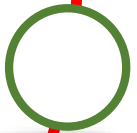
# AGENDA:



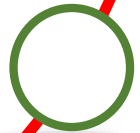
**INTRODUCCIÓN**



**METODOLOGÍA**



**CASOS DE ESTUDIO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**



**CONCLUSIONES**



## MOTIVACIÓN - ¿POR QUÉ LAS ISLAS GALÁPAGOS?

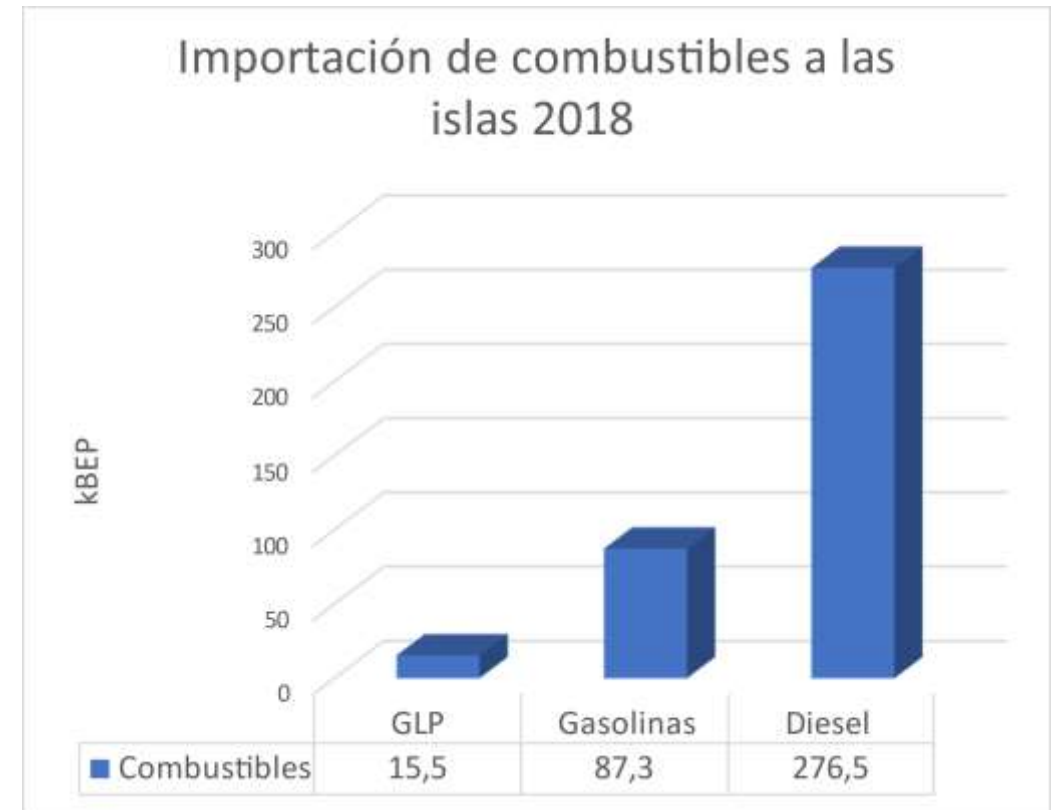
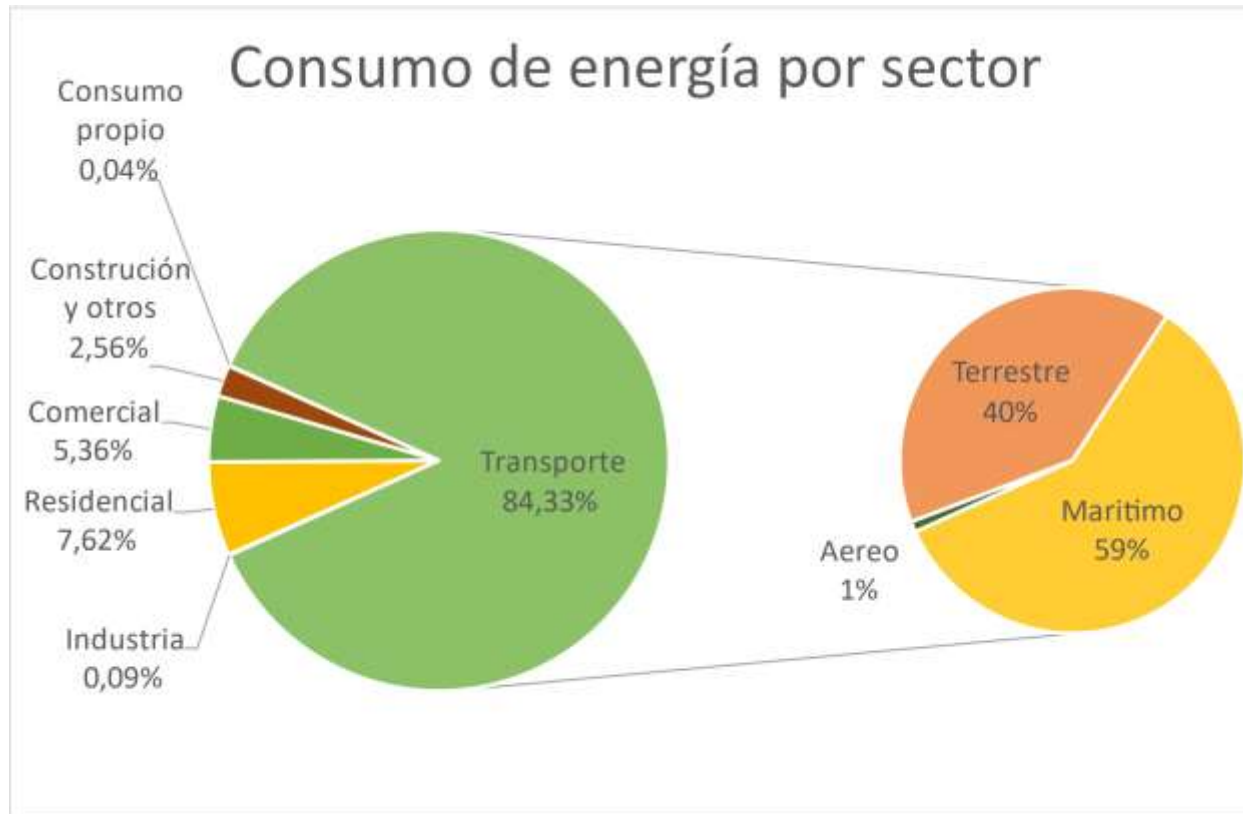
- Las Islas Galápagos son un destino turístico muy importante a nivel internacional, gracias al ecosistema único en el mundo que se puede encontrar en ellas.
- La huella de carbono que se genera en las islas por transporte terrestre y por generación eléctrica deterioran el ecosistema tan frágil de las Islas Galápagos.



La flora y fauna nativa endémica y única hacen de las Islas Galápagos uno de los lugares más excepcionales del mundo [1]

## MOTIVACIÓN – ESTADO ENERGÉTICO DE LAS ISLAS

Las islas Galápagos importaron desde el continente 379,3 kBEP de combustibles en el 2018, de lo cual se estima que se vertieron 160,9 kt de  $CO_2$  [2] al ecosistema de las islas.



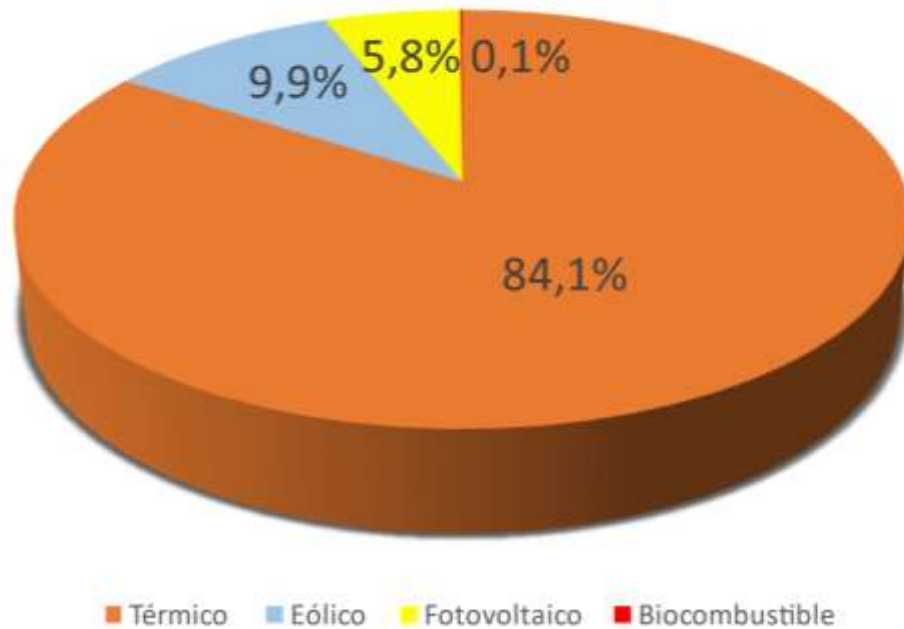
[2] IIGE, 2020. [En línea]. Available: [https://www.geoenergia.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2020/05/balance\\_energetico\\_de\\_galapagos\\_2018.pdf](https://www.geoenergia.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2020/05/balance_energetico_de_galapagos_2018.pdf)



## MOTIVACIÓN – ESTADO ELÉCTRICO ACTUAL DE LAS ISLAS.

Actualmente las islas Galápagos depende mucho de la generación Diesel que es la predominante, llegando a ser el 84,1% de la generación eléctrica de las islas, esto genera un gran impacto medioambiental, y degrada la imagen de las islas como destino turístico.

Matriz de Generación eléctrica Galápagos 2020



Habitantes	31600
Ciudadanos ELECGALAPAGOS	13386
Concesión	6638 km2
Cobertura	99,84%
Generación efectiva	30,65 MW



## Objetivo General

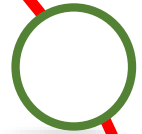
Desarrollar una propuesta metodológica para la planificación óptima de la descarbonización de las Islas Galápagos mediante el uso de la programación matemática considerando aspectos técnicos, políticos y económicos para reducir el consumo de combustibles fósiles y mejorar la sustentabilidad del archipiélago.

## Objetivos Específicos

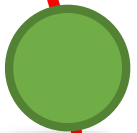
- Desarrollar el estado del arte con el propósito de llevar a cabo la planificación de la descarbonización de las islas Galápagos considerando una matriz energética limpia.
- Formular el problema de optimización utilizando programación matemática definiendo como objetivo la descarbonización de las islas Galápagos y considerando restricciones ambientales y políticas del archipiélago.
- Implementar el modelo matemático en un software de optimización utilizado en la industria para resolver el problema de planificación de la descarbonización de las islas Galápagos.
- Realizar un análisis de sensibilidad mediante la evaluación de escenarios plausibles con el propósito definir rutas óptimas de descarbonización para las Islas Galápagos.



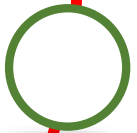
# AGENDA:



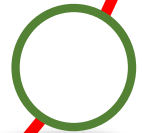
**INTRODUCCIÓN**



**METODOLOGÍA**



**CASOS DE ESTUDIO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**



**CONCLUSIONES**



## ETAPA 1.

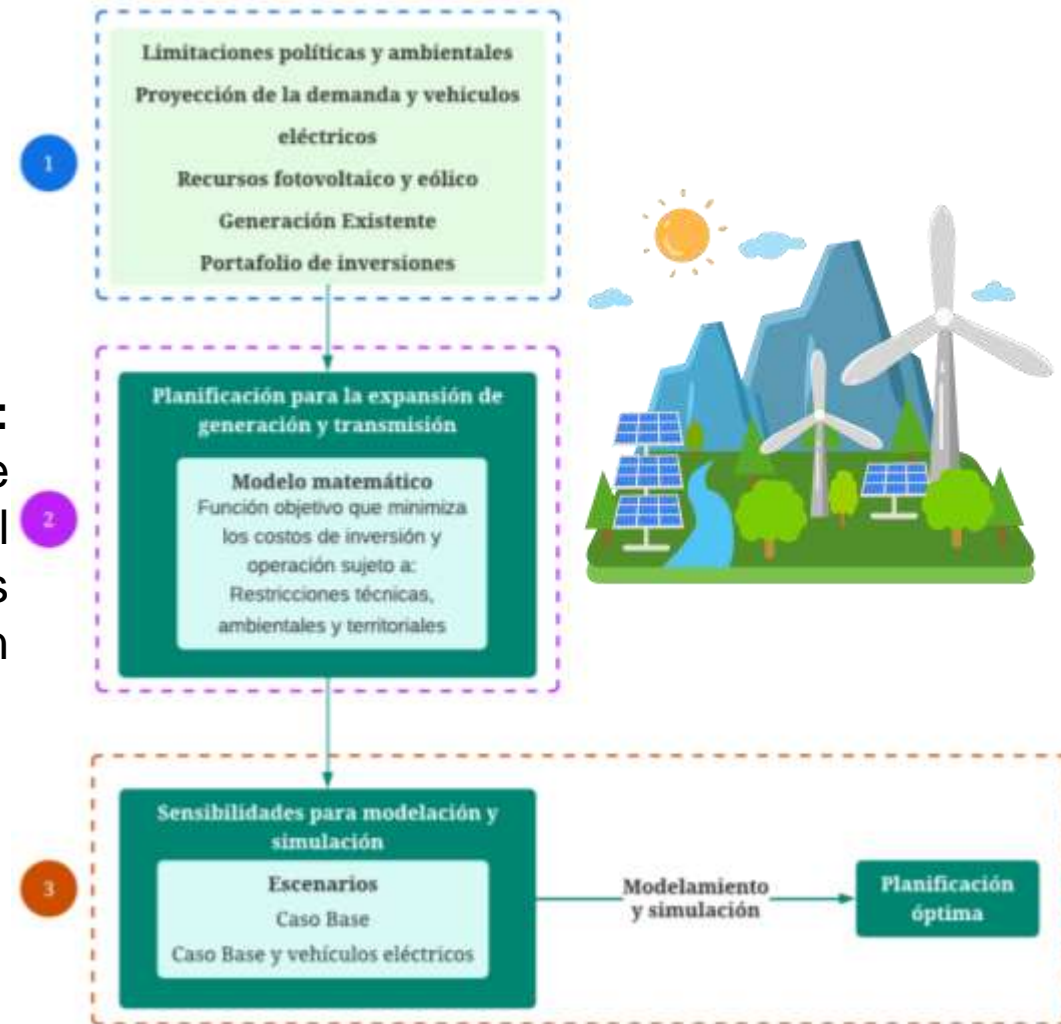
**Datos de entrada:** Las entradas requeridas para realizar una planificación óptima de la descarbonización de las islas y a su vez desarrollar e implementar el modelo de optimización.

## ETAPA 2.

**Planificación para la expansión de generación y transmisión:** Mediante el modelo matemático se evalúa los costos de operación e inversión tanto de generación y transmisión con el propósito de eliminar la generación basada en combustibles fósiles y reemplazar por nuevas unidades de generación renovable, además se evalúa la interconexión entre islas.

## ETAPA 3.

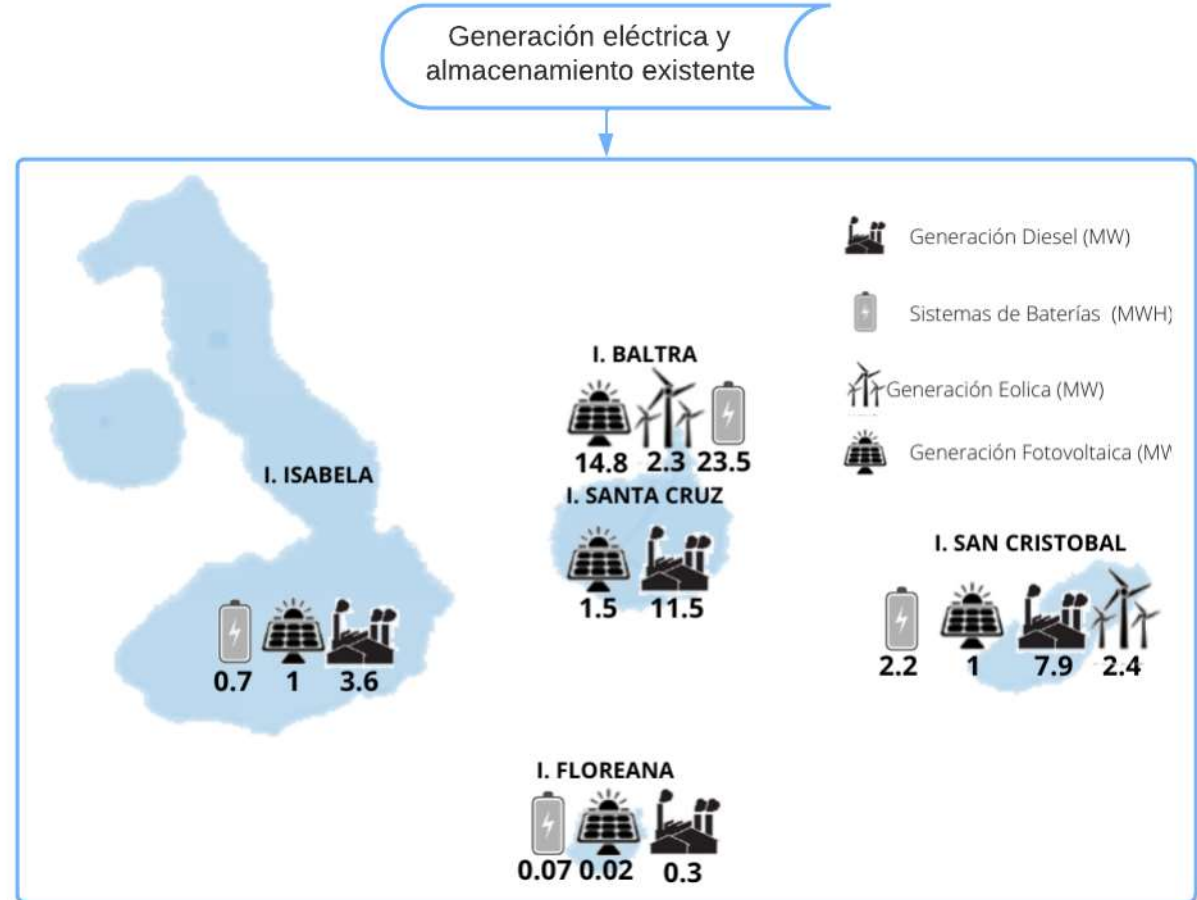
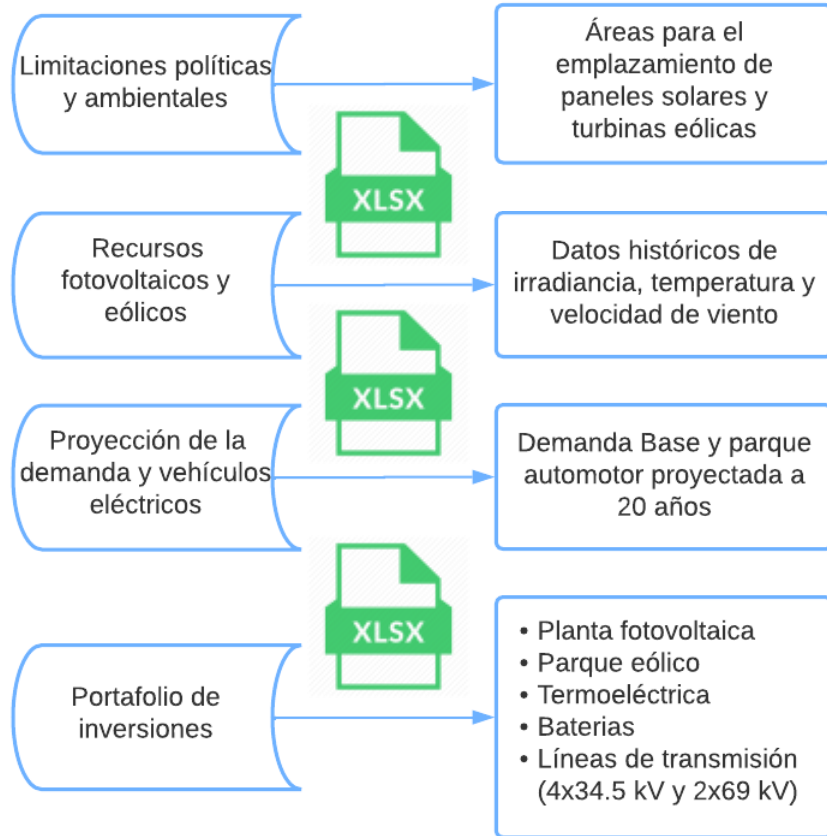
**Sensibilidades para la modelación y simulación:** Se realiza el modelamiento y la simulación para 2 escenarios, donde cada escenario tiene dos sensibilidades correspondientes a las líneas de interconexión entre islas (34.5 kV y 69 kV).





# METODOLOGÍA: Etapa 1

- En esta etapa se obtiene todos los datos de entrada requeridos para realizar el modelo de optimización.



**Función objetivo:**

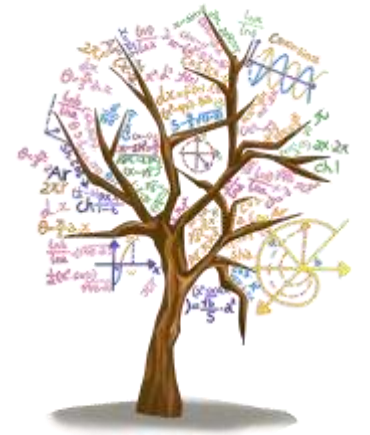
$$\text{Min OF} = \text{IC} + \text{OC}$$

$$\text{IC} = \sum_{a=1}^{NSC} n_{\text{paneles}_a} * C_{\text{paneles}} + \sum_{b=1}^{NGC} PDI_b * C_{\text{diesel}} + \sum_{c=1}^{NWC} n_{\text{turbinas}_c} * C_{\text{turbinas}} + \sum_{d=1}^{NBessC} Bess\_insta_d * CBess + \sum_{e=1}^{LTC} \sigma_e * C_{\text{Linea}_e}$$

$$\text{OC} = \sum_{t=1}^T \sum_{e=1}^{Es} \sum_{a=1}^{Nd} (ENS_{t,a} * CENS) * \pi_s + \sum_{t=1}^T \sum_{e=1}^{Es} \sum_{b=1}^{NGC} ((PDC_{t,e,b} * CPD) + (TCo2C_{t,e,b} * CCo2)) * \pi_s + \sum_{t=1}^T \sum_{e=1}^{Es} \sum_{c=1}^{NGE} ((PDE_{t,e,c} * CPD) + (TCo2E_{t,e,c} * CCo2)) * \pi_s +$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{e=1}^{Es} \sum_{d=1}^{NSC} (PVcurt_{t,e,d} * CPVcurt) * \pi_s + \sum_{t=1}^T \sum_{e=1}^{Es} \sum_{f=1}^{NSE} (PVcurtE_{t,e,f} * CPVcurt) * \pi_s + \sum_{t=1}^T \sum_{e=1}^{Es} \sum_{h=1}^{NWC} (PWcurt_{t,e,h} * CPWcurt) * \pi_s +$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{e=1}^{Es} \sum_{m=1}^{NWE} (PWcurtE_{t,e,m} * CPWcurt) * \pi_s + \sum_{t=1}^T \sum_{e=1}^{Es} \sum_{n=1}^{NBessC} (PDBess_{t,e,n} * CDBess) * \pi_s + \sum_{t=1}^T \sum_{e=1}^{Es} \sum_{o=1}^{NBessE} (PDBessx_{t,e,o} * CDBess) * \pi_s$$



**Sujeto a:**

## Restricciones generación fotovoltaica

$$PVC_{t,e,w} = PVI_w * \left( \frac{Irradiancia_h * 100}{[W / m^2]} \right) * [1 - nte * (Tp_h - 25[^\circ C])] * n^{inv}$$

$$Tp_h = Tam_{s,t} + \frac{Irradiancia_h}{800[W / m^2]} * (NOCT - 20[^\circ C]) \quad 0 \leq PVC_{t,e,w} \leq PVI_w$$

$$PVC_{t,e,w} \leq PV_{curt_w}$$

$$PVI_w = n\_paneles_w * Pnom\_PV$$

## Restricciones líneas candidatas

$$\frac{\sum_{i=1}^{Nb} (-AC_{l,i} * \theta_{t,e,i}) + M(1 - \sigma_l)}{XLTC_l} \geq FC_{t,e,l} \geq \frac{\sum_{i=1}^{Nb} (-AC_{l,i} * \theta_{t,e,i}) - M(1 - \sigma_l)}{XLTC_l}$$

$$-F \max C_l * \sigma_l \leq FC_{t,e,l} \leq F \max C_l * \sigma_l$$

## Restricciones generación eólica

$$0 \leq PWC_{t,e,w} \leq PWI_w$$

$$PWC_{t,e,w} \leq PW_{curt_w}$$

$$n\_turbinas_w = \frac{PWI_w}{Pnom\_WT}$$

## Restricciones líneas existentes

$$FE_{t,e,l} = \frac{\sum_{i=1}^{Nb} (-AE_{l,i} * \theta_{t,e,i})}{XLTE_l}$$

$$-F \max E_l \leq FE_{t,e,l} \leq F \max E_l$$



## Restricciones del Bess

$$E_{t,e,p} = E_{t-1,e,p} + PCBess_{t,e,p} * N^{inv} - \frac{PDBess_{t,e,p}}{N,inv} \quad t \geq 1$$

$$E_{t,e,p} = E_{0,e,p} + PCBess_{t,e,p} * N^{inv} - \frac{PDBess_{t,e,p}}{N^{inv}}$$

$$0 \leq PDBess_{t,e,p} \leq Bess\_insta_p * N^{inv}$$

$$0 \geq -PCBess_{t,e,p} \geq -\frac{Bess\_insta_p}{N^{inv}}$$

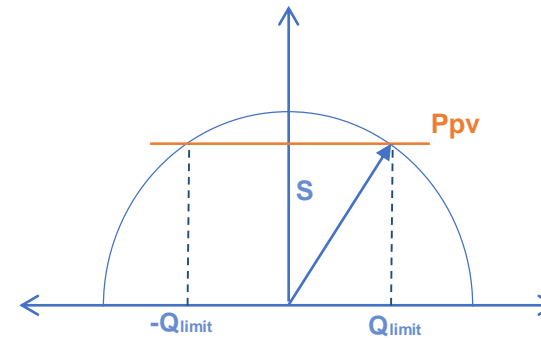
$$0.2 * Bess\_insta_p \leq E_{t,e,p} \leq 0.95 * Bess\_insta_p$$

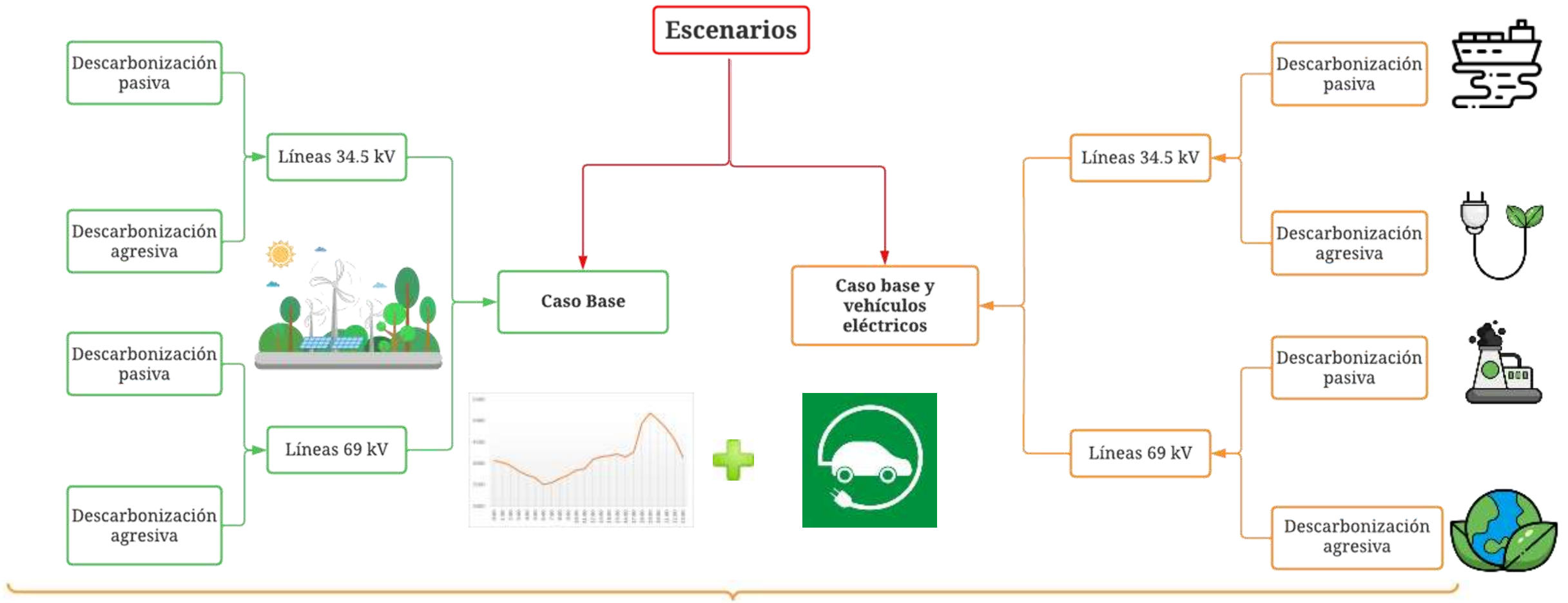
## Restricciones de Áreas

$$A\_total\_PV_w = A\_panel * n\_paneles_w$$

$$A\_total\_PW_w = (D\_rotor * 5 * (n\_turbinas_w)) * (D\_rotor * 10)$$

$$A\_total\_dispo_w = A\_total\_PV_w + A\_total\_PW_w$$





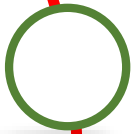
Planificación óptima



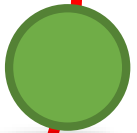
# AGENDA:



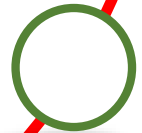
**INTRODUCCIÓN**



**METODOLOGÍA**



**CASO DE ESTUDIO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**



**CONCLUSIONES**



## Islas Galápagos

Para el desarrollo del proyecto se utiliza a las islas Galápagos como lugar de estudio, ya que las mismas poseen un ecosistema muy frágil y único en el mundo, sin embargo actualmente el sistema de generación eléctrica de las islas se compone de la siguiente manera:

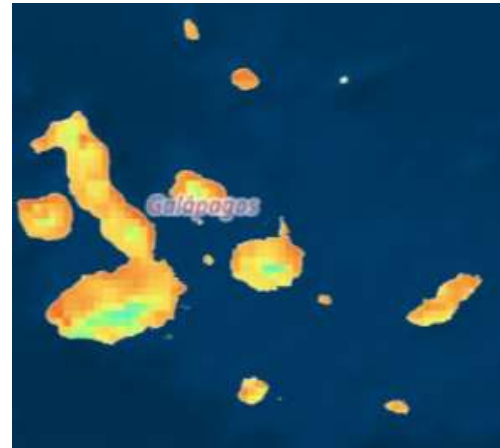
- 16,43 MW de energía termoeléctrica
- 17,4074 MWp de energía foto voltaica
- 3,4 MW de energía eólica
- 45,914 MWh de capacidad de almacenamiento en baterías

## Perfiles de irradiancia y viento

Se usan series de tiempo con resolución horaria. Los datos fueron obtenidos de las bases de datos de internet PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM y GLOBAL WIND ATLAS.

## Perfil de demanda

Los datos de demanda fueron proporcionados por ELECGALAPAGOS S.A. para construir el perfil de demanda mas preciso posible.



## Perfil de carga total de las islas Galápagos.





## Parque eólico

Turbina Eólica: SG 2.1-114			
Potencia [kW]	Precio [\$/kW]	Velocidad nominal [m/s]	Diámetro [m]
2100	1855	9	114



## Planta fotovoltaica

Panel fotovoltaico: CHASER-M6/120P 355-375W		
Potencia [W]	Precio [\$/kW]	Área [m <sup>2</sup> ]
355	992	1,86



## Líneas de transmisión

Líneas submarinas					
				34,5 kV 25 MVA	69 kV 50MVA
L/T	Barra A	Barra B	Distancia [KM]	Costo [MMUSD]	
1	Isabel	Santa Cruz	29	15,03	19,79
2	Santa Cruz	San Cristóbal	68	31,76	42,93
3	Santa Cruz	Floreana	50	24,04	32,25
4	Baltra	Santa Cruz	0,76	2,92	3,04

## Baterías

Bess: Li-ion
Precio [\$/kW]
1000



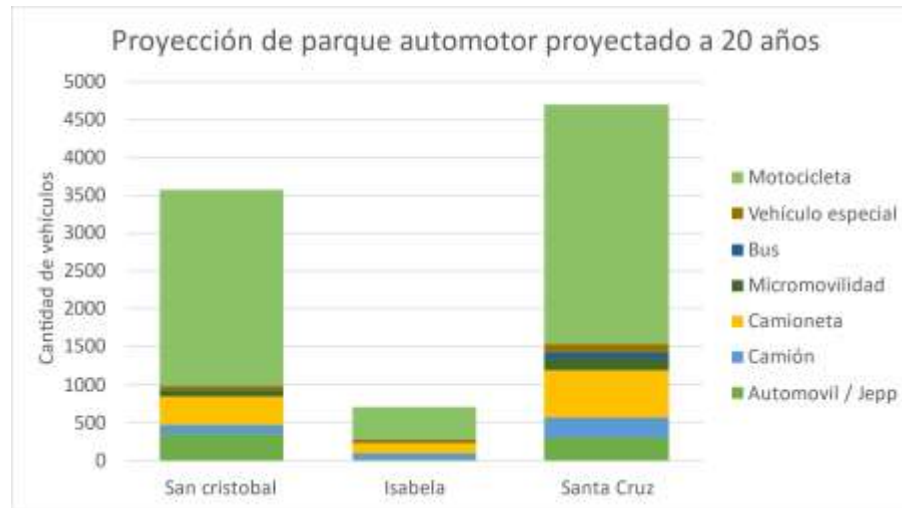
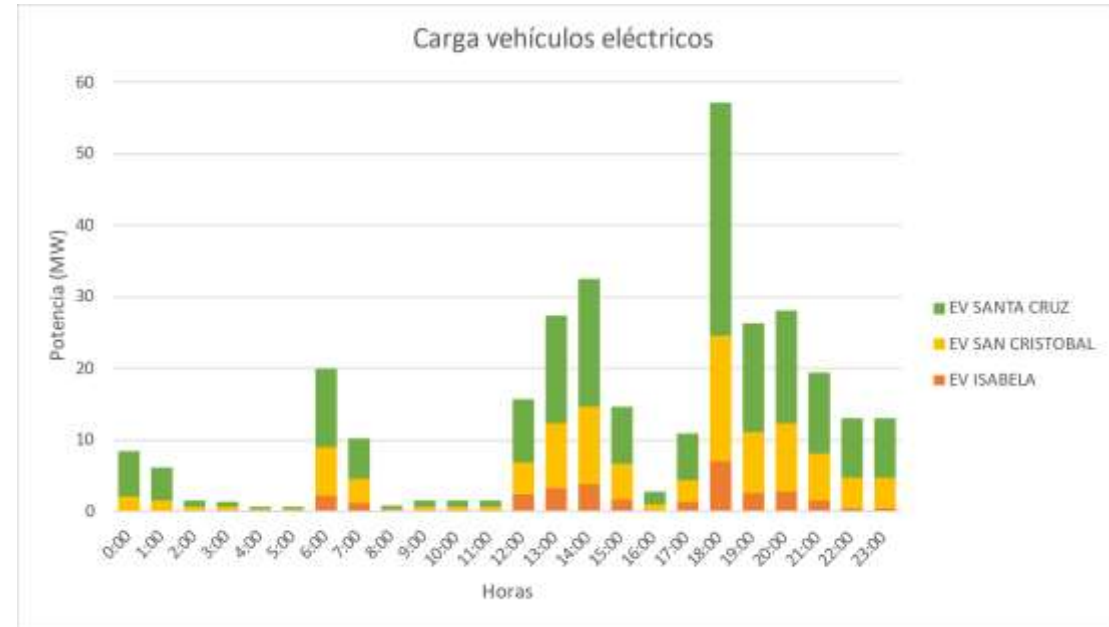
## Termo eléctrica

Térmica
Precio [\$/kW]
350

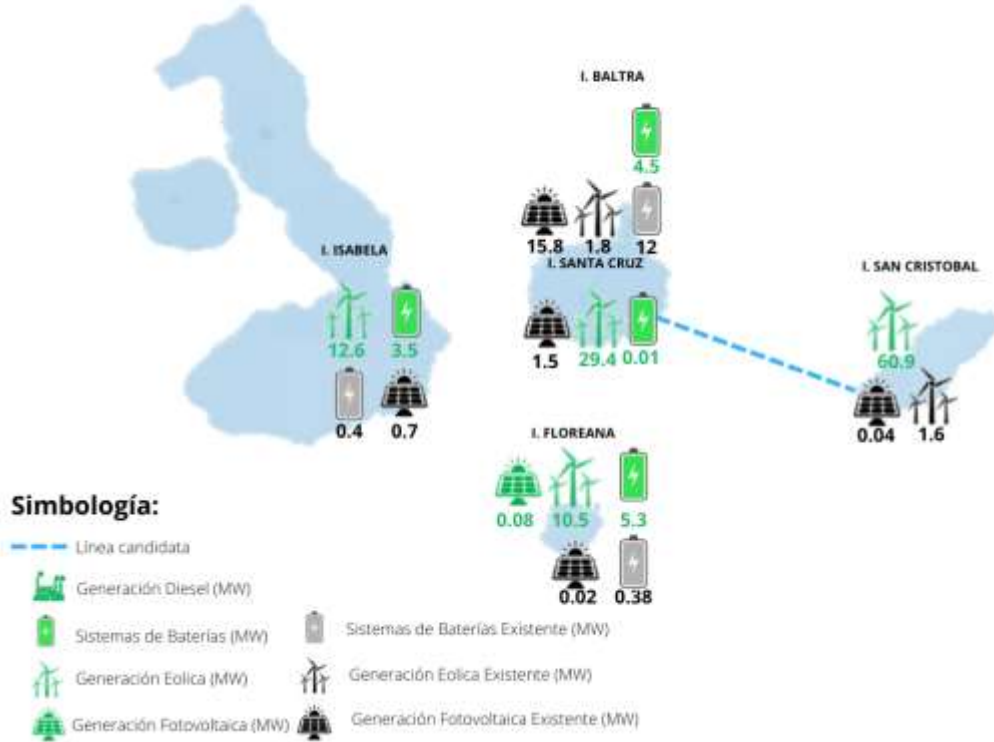


## Situación Vehicular en las Islas

Clase	Marca	Modelo	Autonomía	Batería	Cantidad
Automovil / Jepp	BYD	E2	305 Km	35,2 kWh	677
Camión	BYD	T5	200 Km	100 kWh	449
Camioneta	Dongfeng	Rich 6 EV	320 Km	68 kWh	1148
Bus	BYD	K9G	300 Km	324 kWh	121
Micromovilidad	Qingmai	H7	30 Km	0,27 kWh	230
Vehículo especial	Alke	ATX 340E	200 Km	14,4 kWh	169
Motocicleta	TEKNO	TK-M5	60 Km	2 kWh	6180
<b>TOTAL</b>					<b>8974</b>

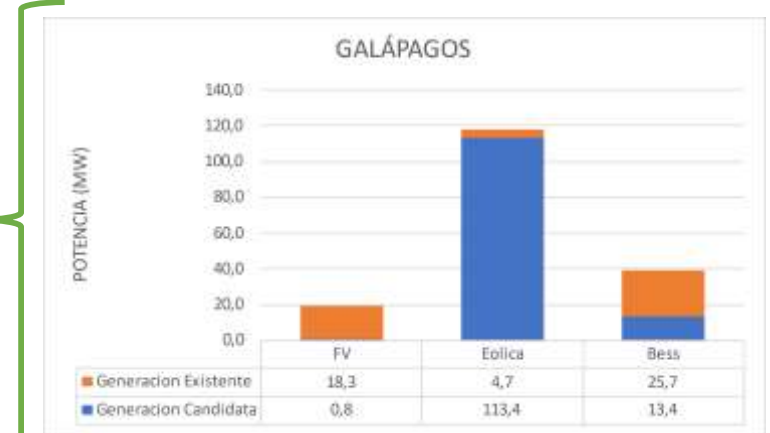


## Caso base, descarbonización agresiva y línea de 34,5kV

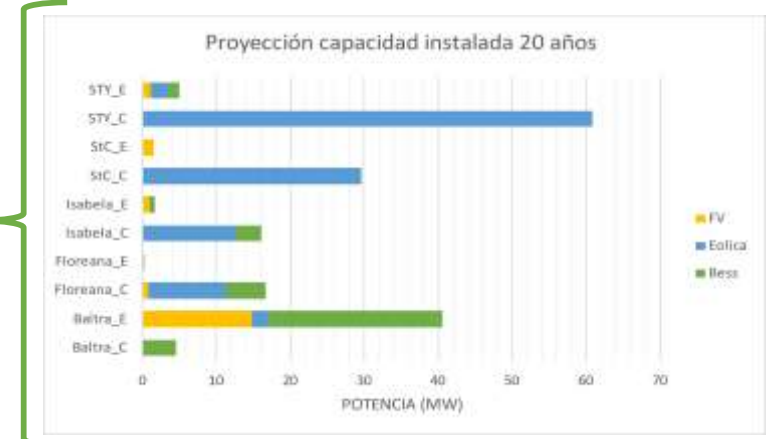


Conexiones potenciales entre islas y opciones de inversión en generación y almacenamiento

Resumen total de las tecnologías existentes y candidatas a instalarse.



Resumen total por isla de tecnologías existentes y candidatas a instalarse.



## Caso base, descarbonización agresiva y línea de 34,5kV

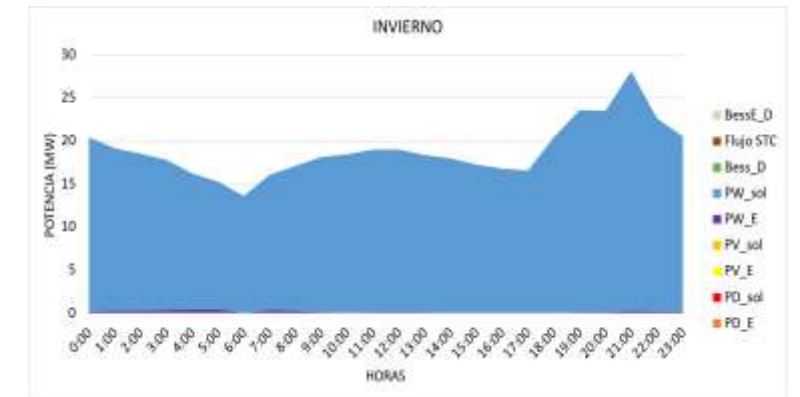
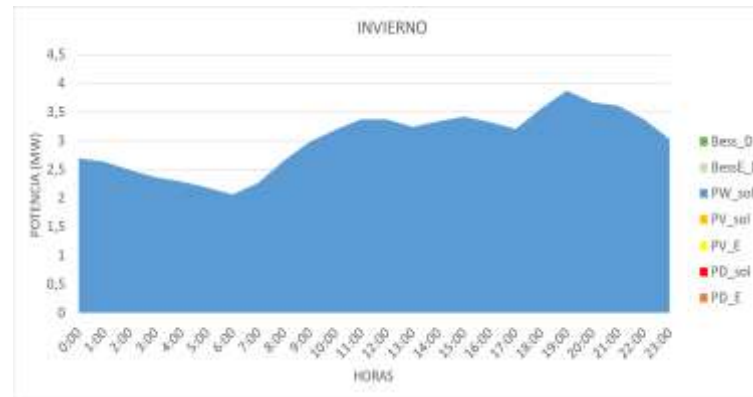
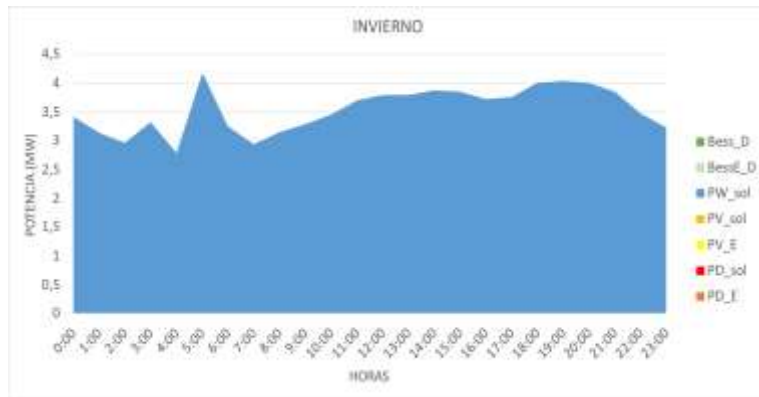
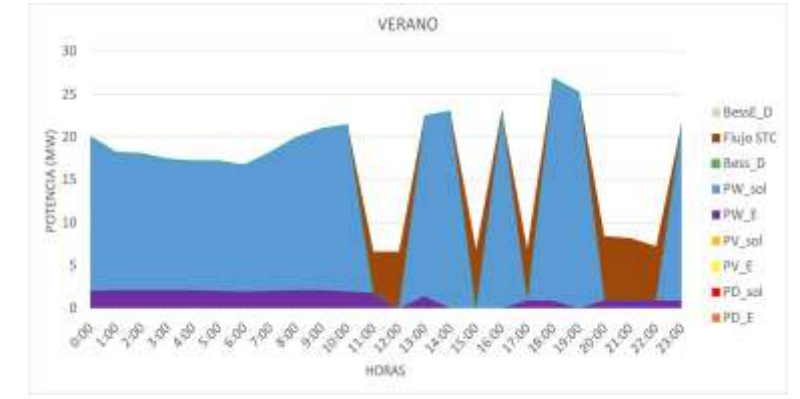
### Curva de operación Isabela



### Curva de operación Floreana



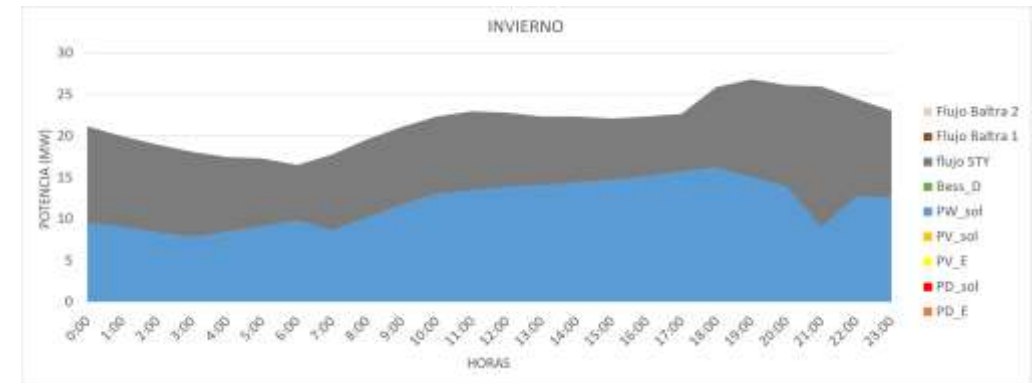
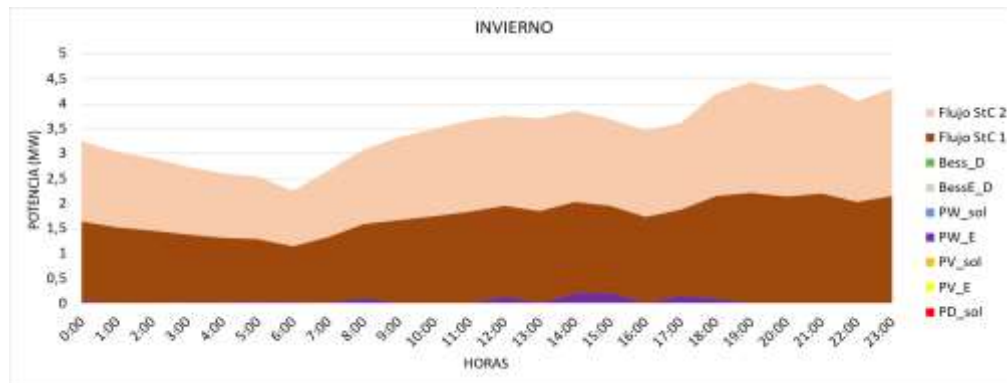
### Curva de operación San Cristóbal



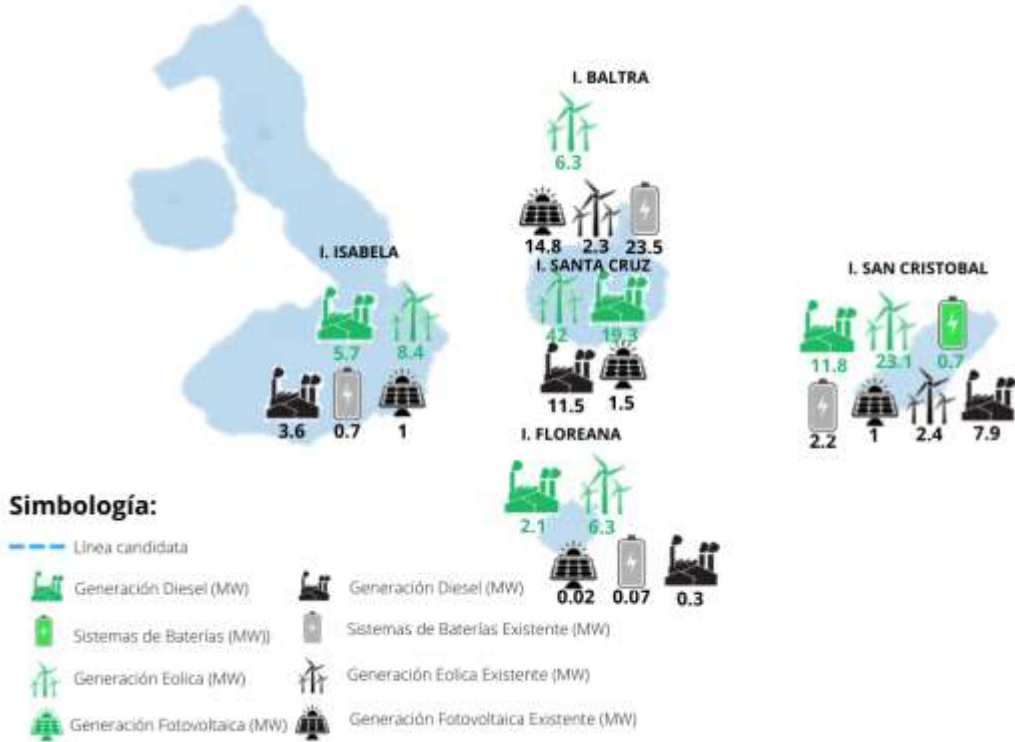
## Caso base, descarbonización agresiva y línea de 34,5kV

### Curva de operación Baltra

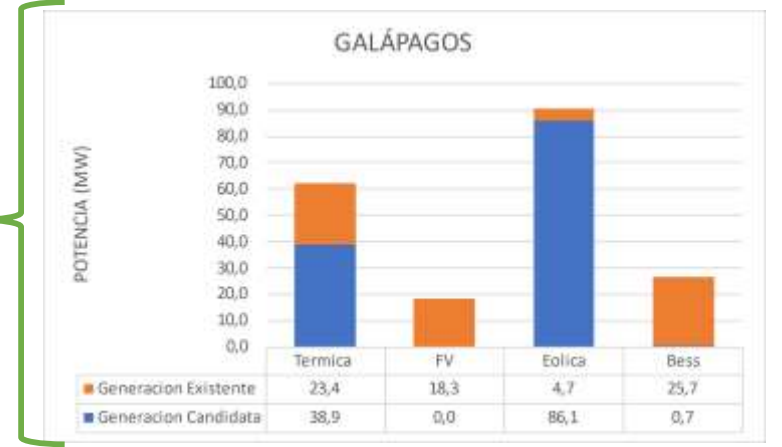
### Curva de operación Santa Cruz



## Caso base con vehículos eléctricos, descarbonización pasiva y línea de 34,5kV



Resumen total de las tecnologías existentes y candidatas a instalarse.



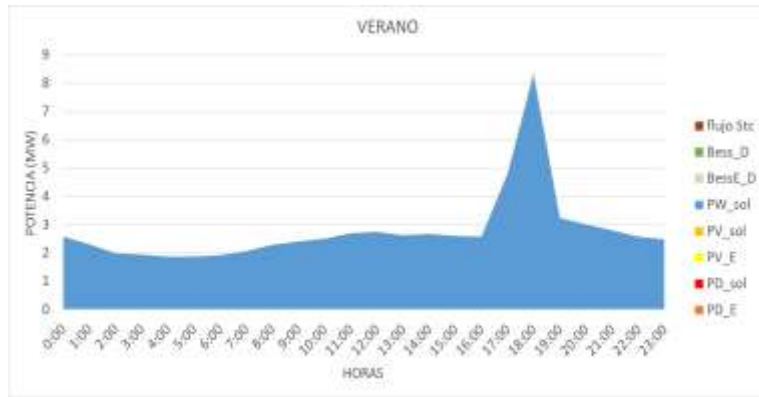
Resumen total por isla de tecnologías existentes y candidatas a instalarse.



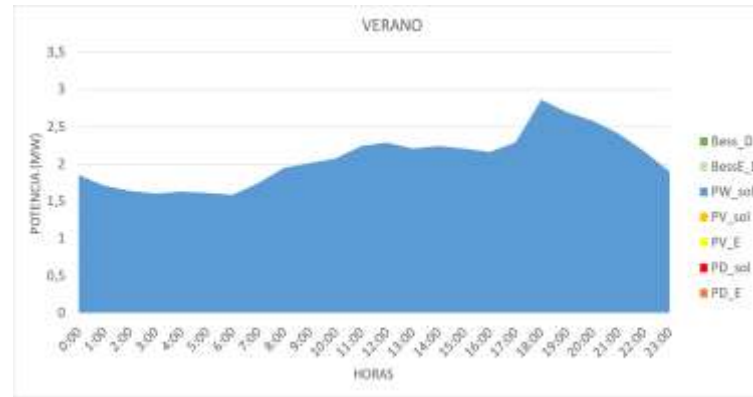
Conexiones potenciales entre islas y opciones de inversión en generación y almacenamiento

## Caso base con vehículos eléctricos, descarbonización pasiva y línea de 34,5kV

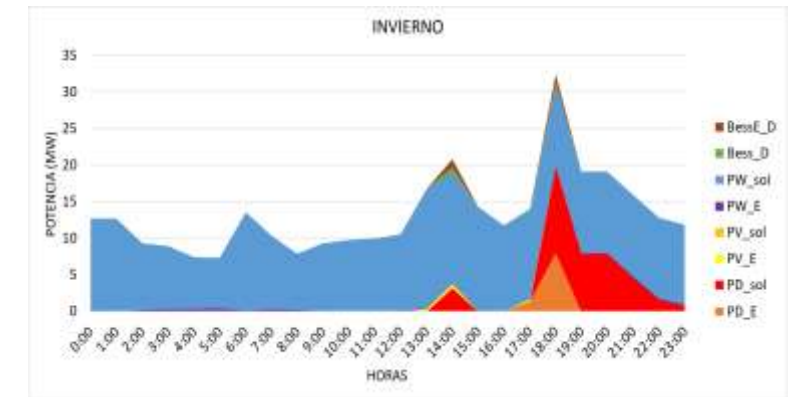
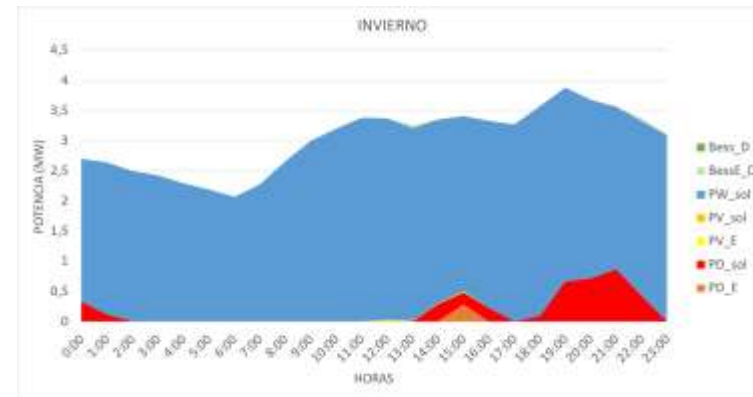
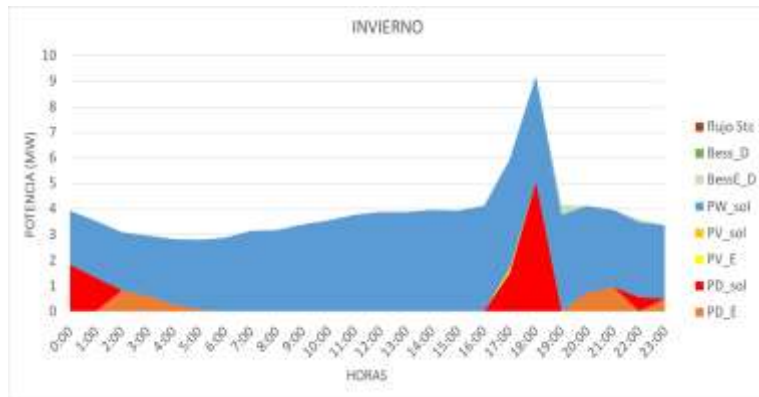
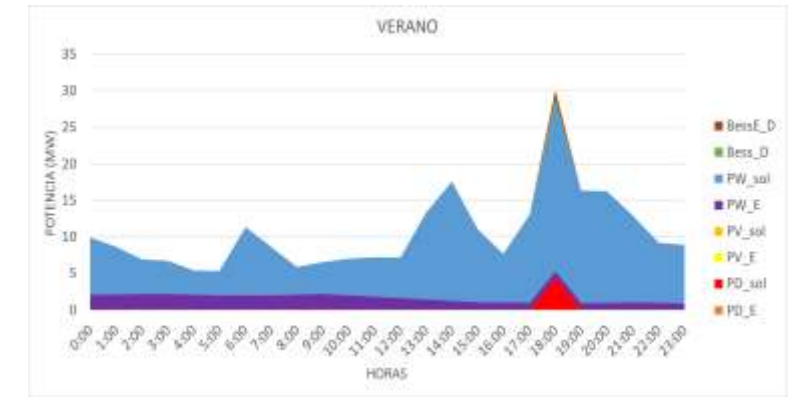
Curva de operación Isabela



Curva de operación Floreana



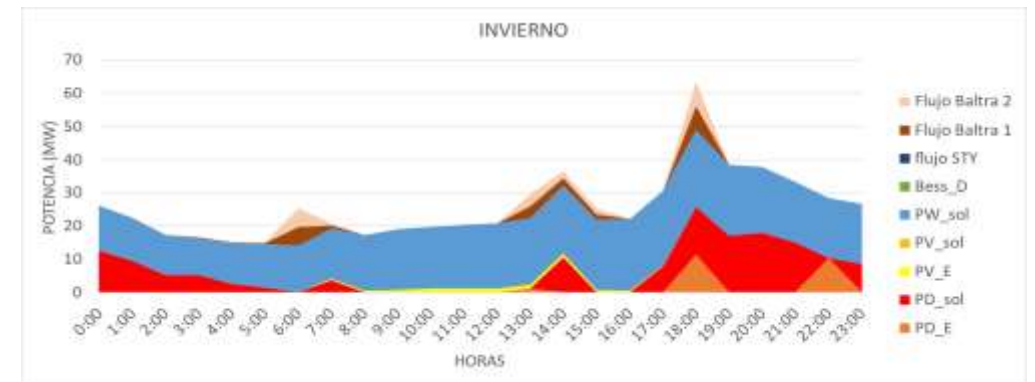
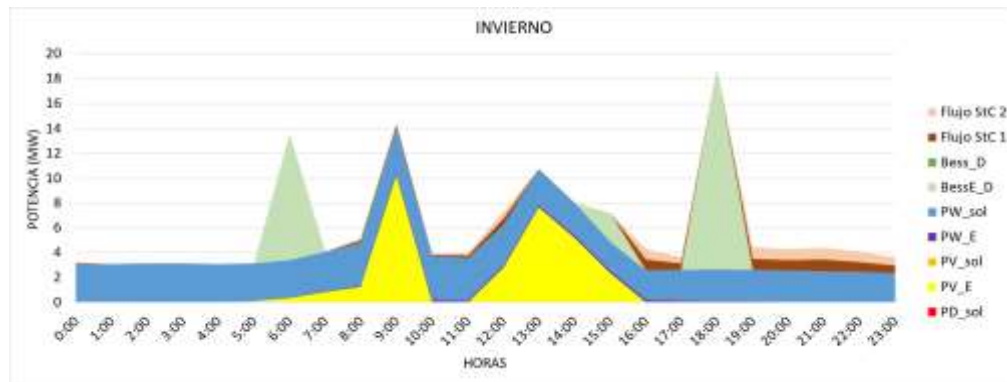
Curva de operación San Cristóbal



## Caso base con vehículos eléctricos, descarbonización pasiva y línea de 34,5kV

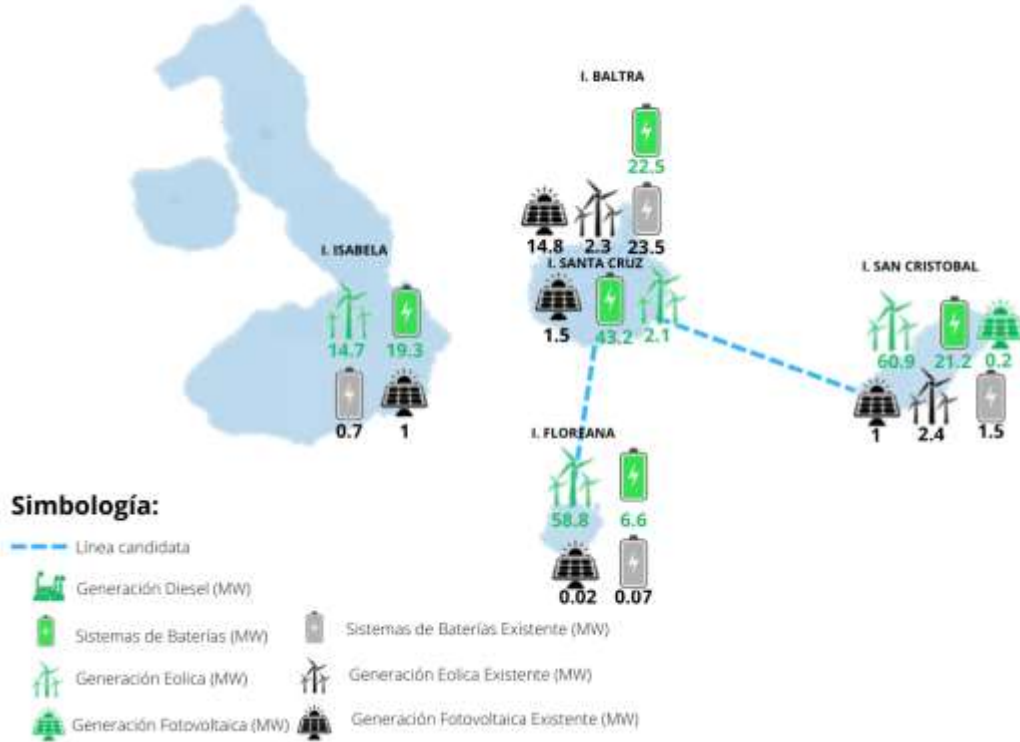
### Curva de operación Baltra

### Curva de operación Santa Cruz



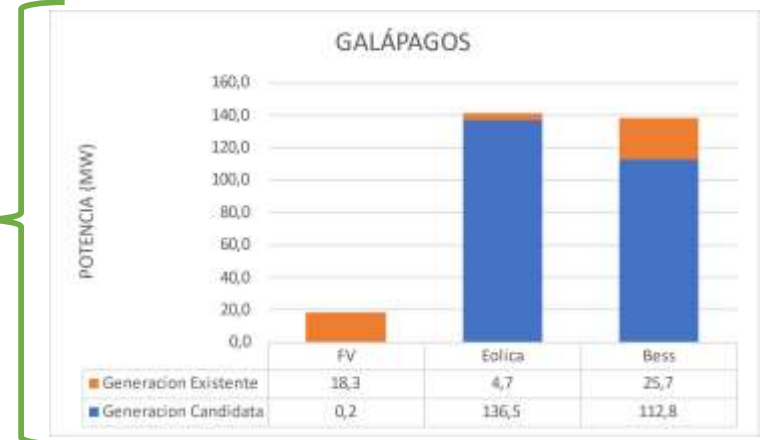


## Caso base con vehículos eléctricos, descarbonización agresiva y línea de 34,5kV



Conexiones potenciales entre islas y opciones de inversión en generación y almacenamiento

Resumen total de las tecnologías existentes y candidatas a instalarse.



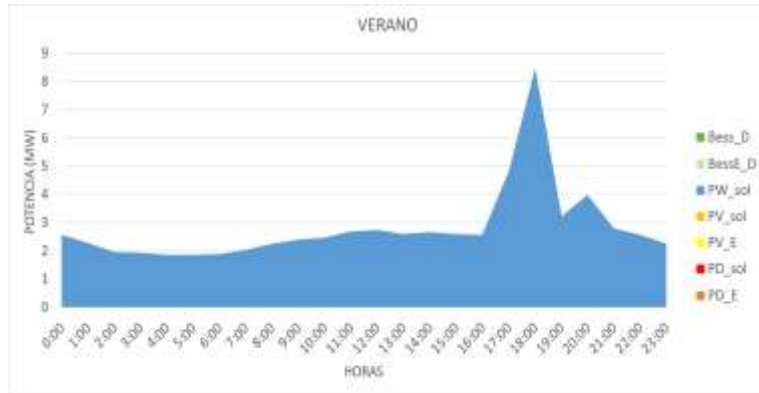
Resumen total por isla de tecnologías existentes y candidatas a instalarse.



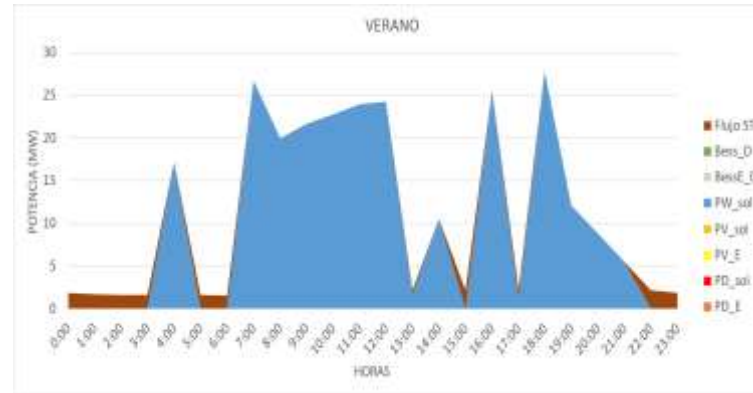
# ANÁLISIS DE RESULTADOS

## Caso base con vehículos eléctricos, descarbonización agresiva y línea de 34,5kv

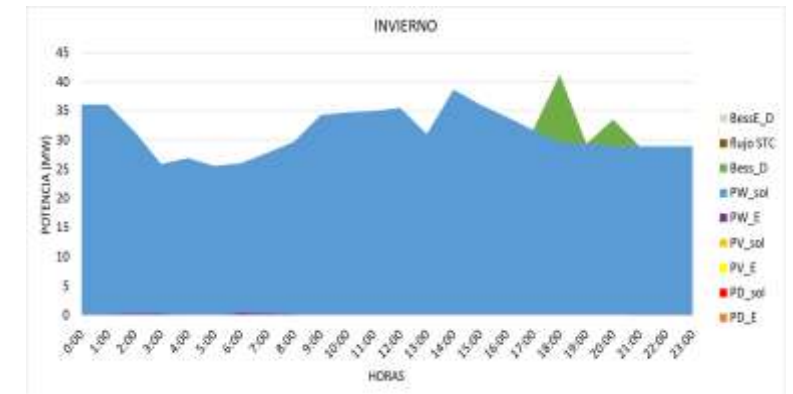
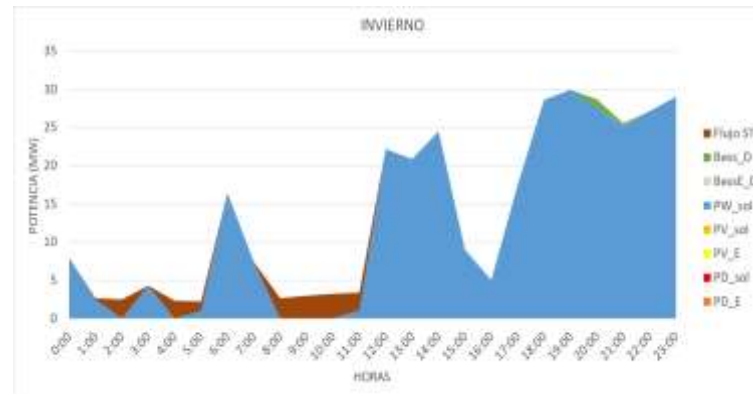
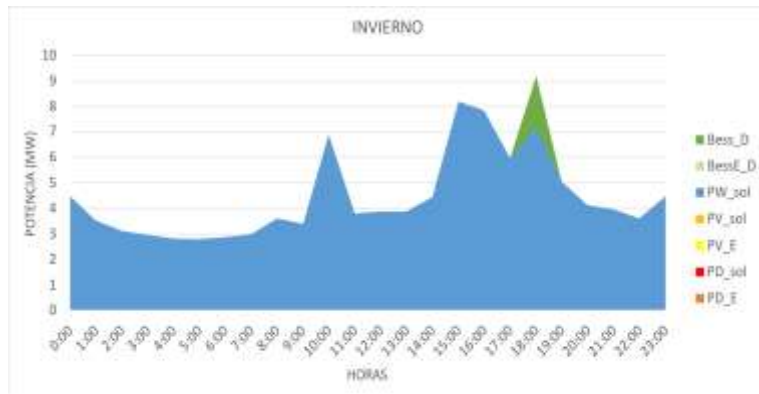
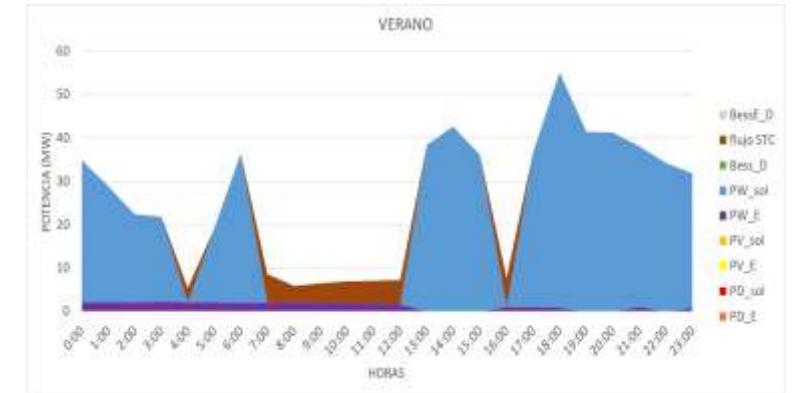
Curva de operación Isabela



Curva de operación Floreana

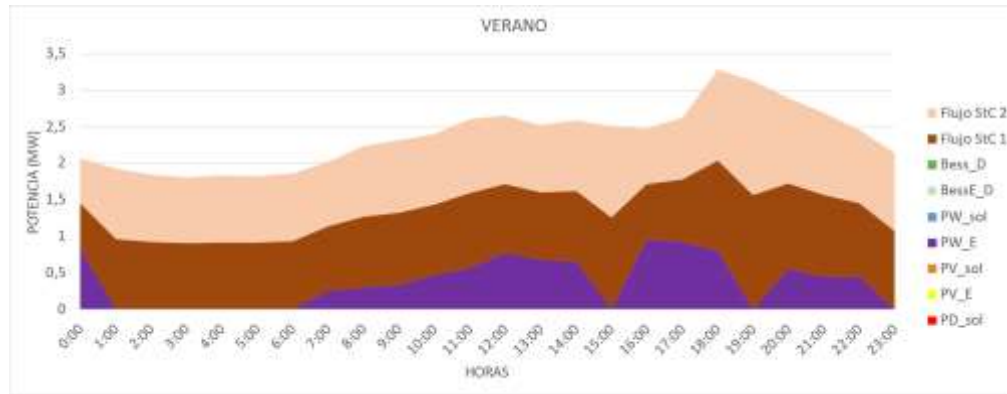


Curva de operación San Cristóbal

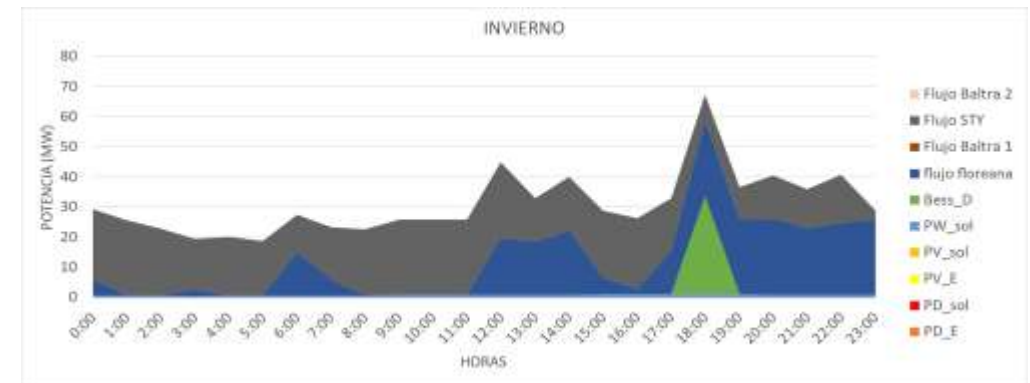
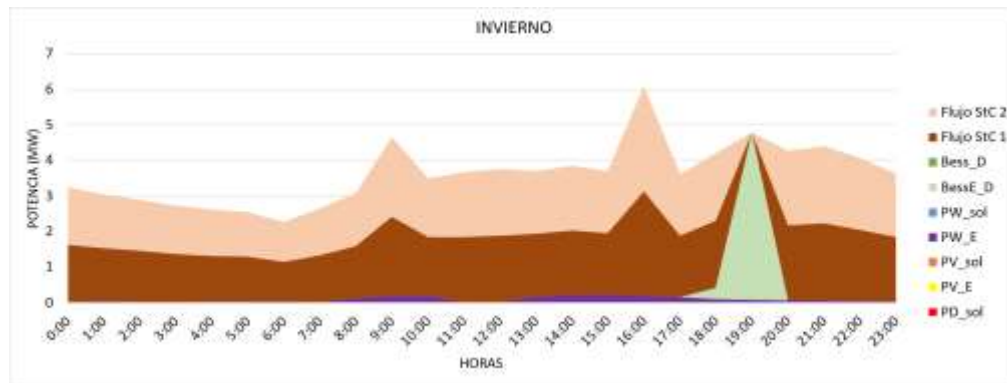
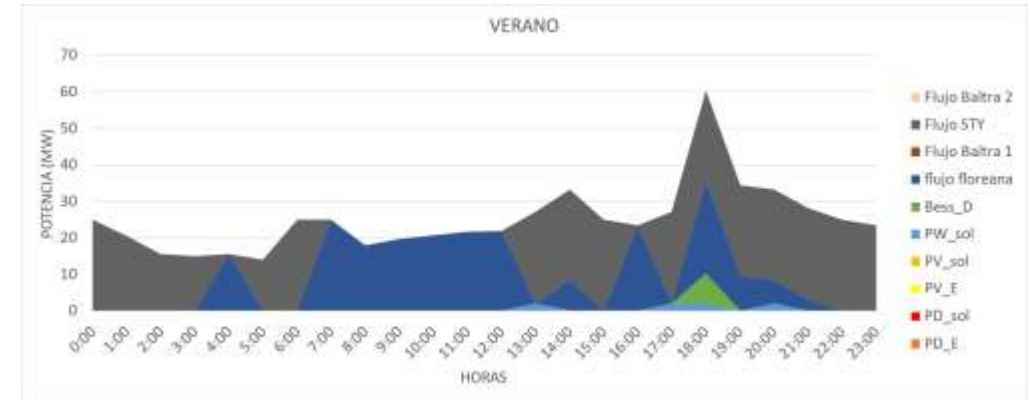


## Caso base con vehículos eléctricos, descarbonización agresiva y línea de 34,5kV

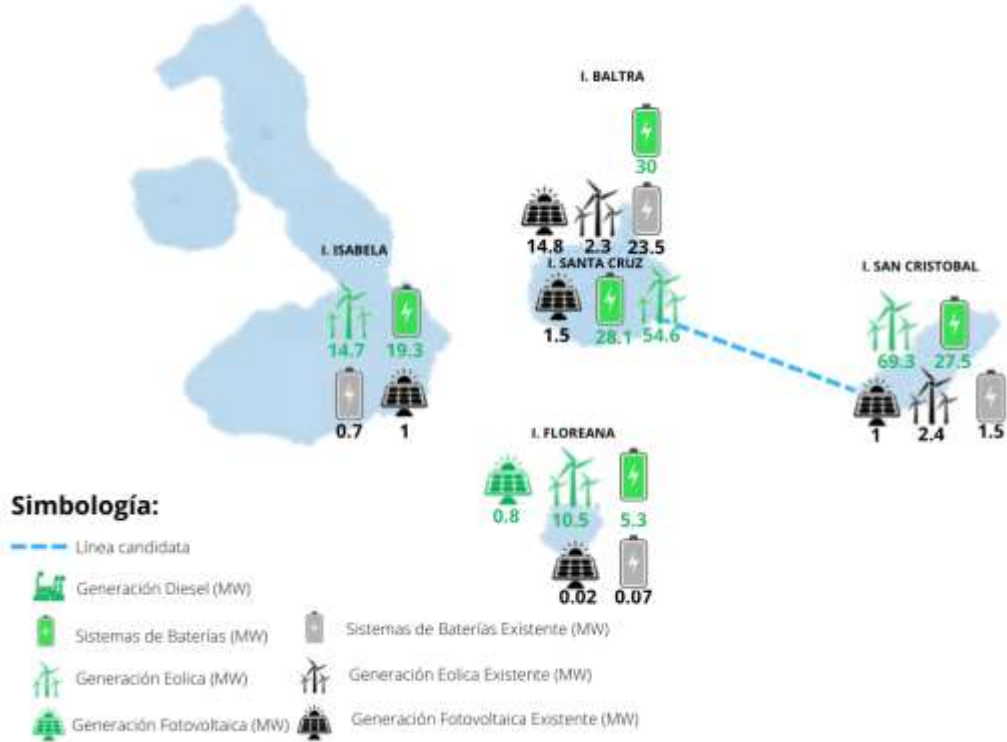
### Curva de operación Baltra



### Curva de operación Santa Cruz



## Caso base con vehículos eléctricos, descarbonización agresiva y línea de 69kV



Conexiones potenciales entre islas y opciones de inversión en generación y almacenamiento

Resumen total de las tecnologías existentes y candidatas a instalarse.



Resumen total por isla de tecnologías existentes y candidatas a instalarse.

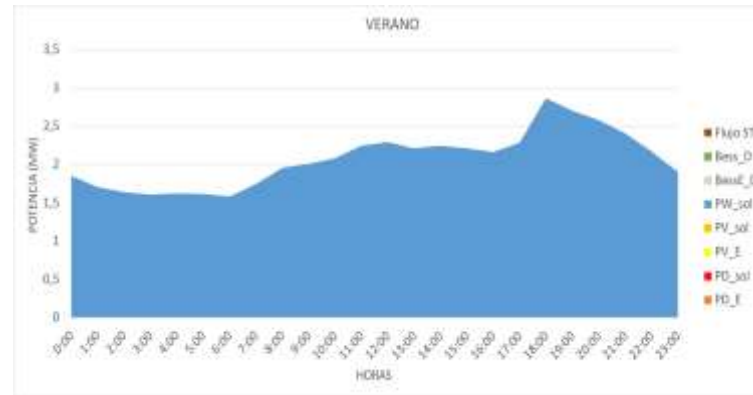


## Caso base con vehículos eléctricos, descarbonización agresiva y línea de 69kV

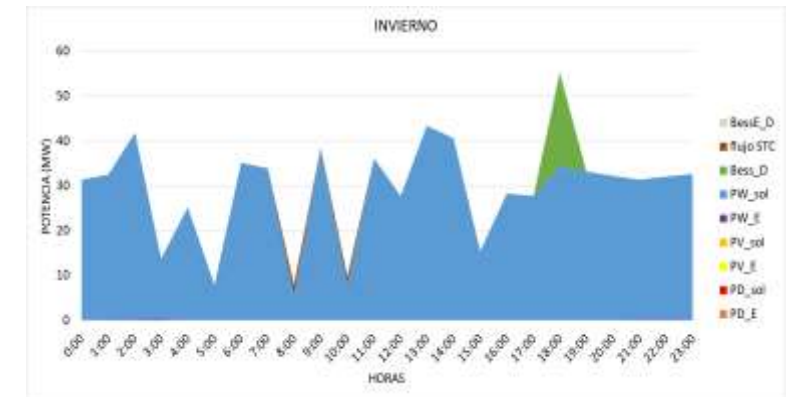
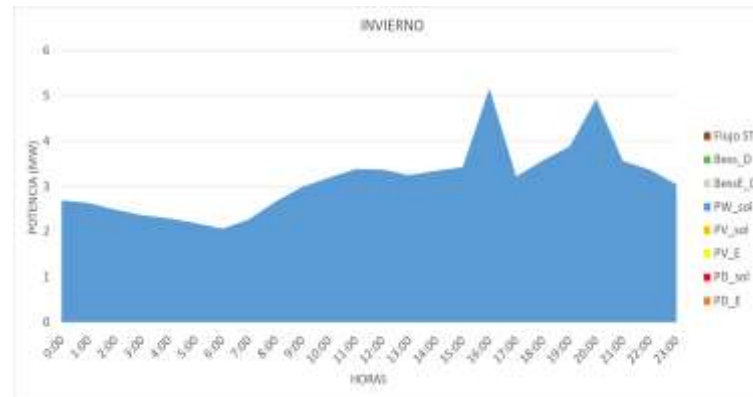
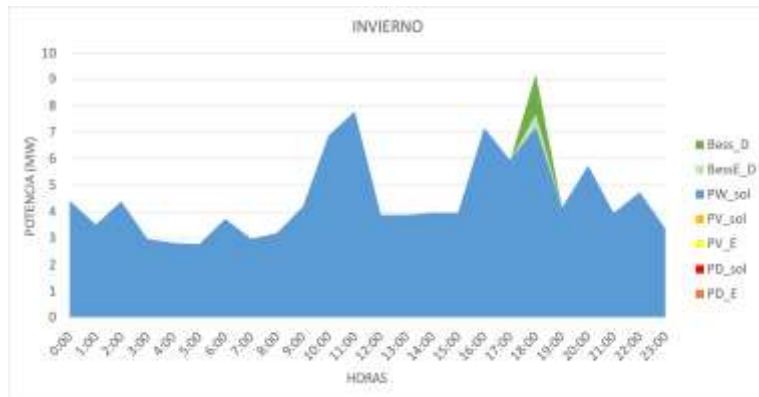
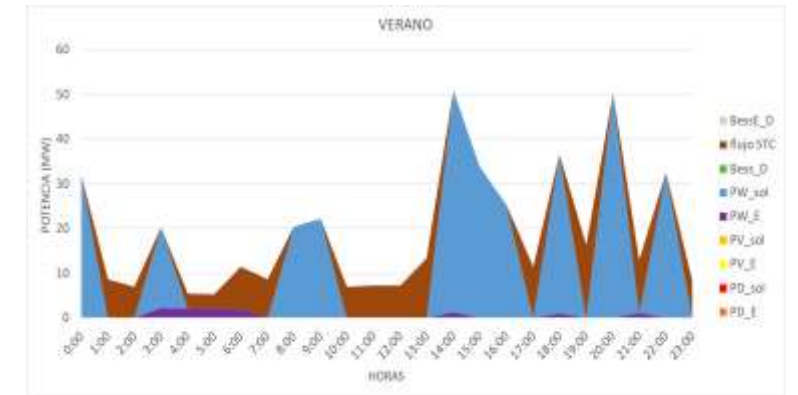
Curva de operación Isabela



Curva de operación Floreana

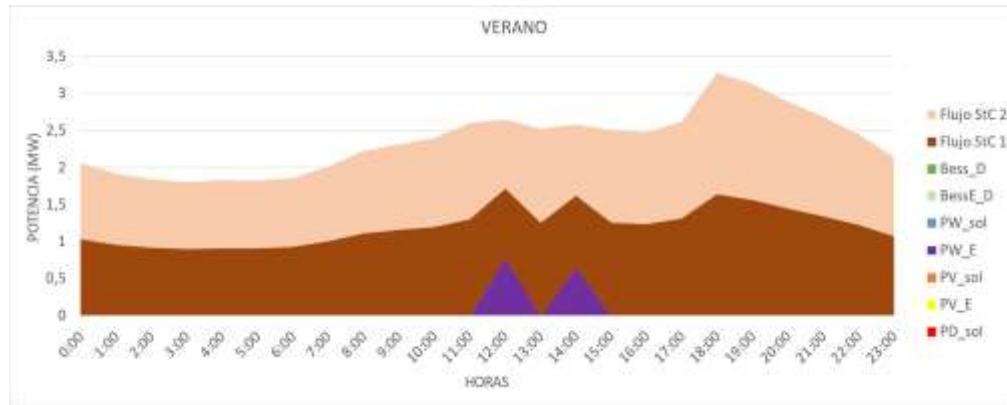


Curva de operación San Cristóbal

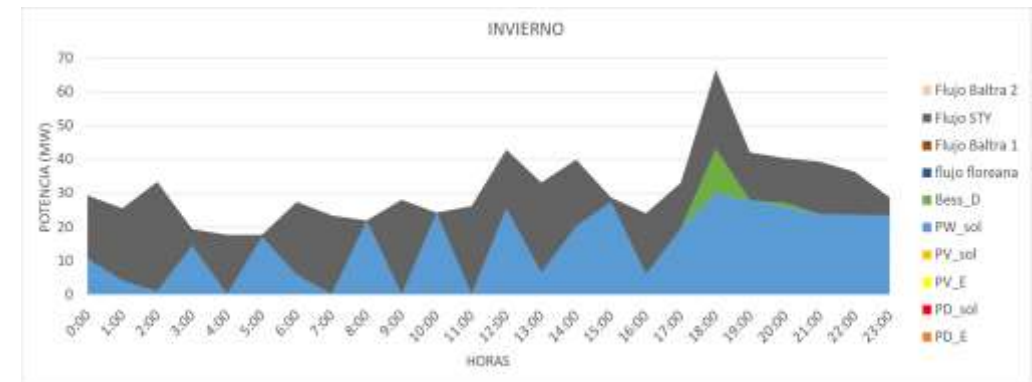
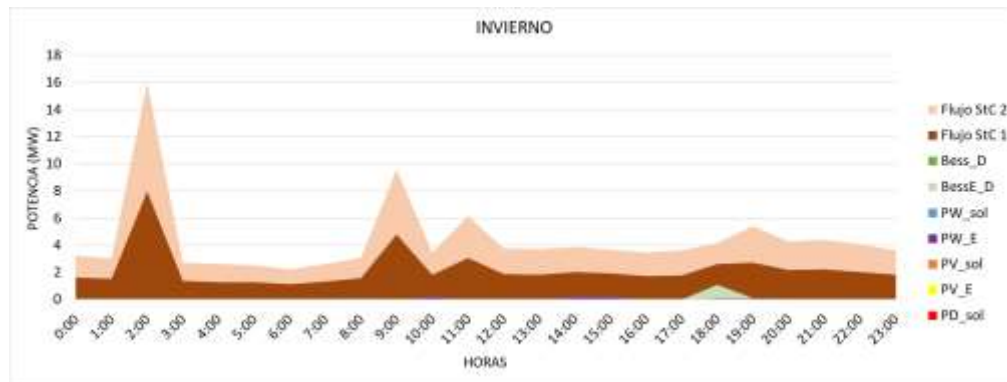


## Caso base con vehículos eléctricos, descarbonización agresiva y línea de 69kV

### Curva de operación Baltra



### Curva de operación Santa Cruz

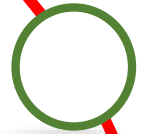


## Resumen total de resultados

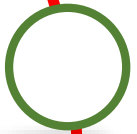
TECNOLOGÍA	CASO BASE (MW)				CASO BASE Y VEHÍCULOS ELÉCTRICOS (MW)			
	34,5 kV		69 kV		34,5 kV		69 kV	
	AGRESIVO	PASIVO	AGRESIVO	PASIVO	AGRESIVO	PASIVO	AGRESIVO	PASIVO
Térmica	0	4	0	4	0	38,9	0	38,9
FV	0,8	0	0,8	0	0,2	0	0,8	0
Eólica	113,4	67,2	113,4	67,2	136,5	86,1	149,1	86,1
BESS	13,4	0	13,4	0	112,8	0,7	110,2	0,7
LÍNEAS DE TRANSMISIÓN SUBMARINA								
Santa Cruz-Floreana	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✗	✗
Santa Cruz-San Cristobal	✓	✗	✓	✗	✓	✗	✓	✗
COSTO (MMUSD)								
Inversión	262,5	126,1	267,5	126,1	432,8	174,1	430,5	174,1



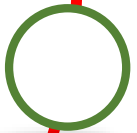
# AGENDA:



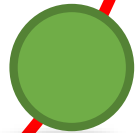
**INTRODUCCIÓN**



**METODOLOGÍA**



**CASOS DE ESTUDIO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**



**CONCLUSIONES**





- En base a la metodología desarrollada para el caso de estudio se logró encontrar un mix tecnológico óptimo para reducir el consumo de combustibles fósiles en las islas Galápagos considerando aspectos técnicos, políticos y económicos.
- Desarrollar el estado del arte permitió generar una correcta planificación para la descarbonización de las islas Galápagos mediante una matriz energéticamente limpia, considerando la demanda base mas los vehículos eléctricos proyectados a 20 años, reflejando un aumento en el perfil de carga de las islas.
- Se formuló el problema de optimización considerando tecnologías de generación existente, candidatas y la interconexión entre las 5 islas del archipiélago, dichas tecnologías compiten entre si a través de los C.I y C.O. El horizonte de tiempo tomado para el análisis fue de dos semanas correspondientes a la demanda de verano y invierno asociadas a la estocasticidad de los recursos de 4 escenarios respecto al mes de la demanda de cada estación, obteniendo un total de 1344 P.O. por cada isla, con lo cual se logra un modelo detallado para el análisis requerido.



- Se implementó el modelo matemático detallado del sistema permitiendo realizar simulaciones, logrando obtener el dimensionamiento y ubicación óptima de la generación ERNC y la interconexión entre islas. Además, se logra registrar la operación del sistema generando una base de datos que refleja el comportamiento del SEP con dichas tecnologías dimensionadas y ubicadas en cada región.
- Mediante el análisis de sensibilidades realizado, se obtuvo respuestas para la planificación de la descarbonización, sin embargo, el escenario mas relevante es el caso base con vehículos eléctricos e interconexión de 69kV, instalando 149,1 MW de energía eólica, 110,2 MW de baterías y líneas de interconexión entre las islas Santa Cruz - San Cristóbal.



- No se recomienda el uso de líneas de transmisión de 138 kV para la interconexión entre islas, ya que según la normativa ecuatoriana las empresas de distribución están facultadas a operar líneas de hasta 69 kV, además de requerir personal con una capacitación diferente para la realización de maniobras.
- En estudios posteriores se recomienda tomar en cuenta la inserción de navíos con tecnología eléctrica, ya que en la actualidad no existe la tecnología necesaria para reemplazar el parque marítimo actual que funciona mediante motores de combustión interna.
- Para estudios posteriores de dimensionamientos de ERNC para las islas Galápagos se recomienda añadir al portafolio de inversiones la tecnología eólica offshore respetando las políticas ambientales.
- Se recomienda realizar un estudio de estabilidad, ya que en los casos de descarbonización agresiva el parque es completamente no inercial.
- Debido a la gran inserción de electrolineras, se recomienda realizar un estudio de impacto de los vehículos eléctricos en el sistema de distribución, enfocado en la calidad de la energía.



- Hoyos Gallón, S. (2012). Tecnología modular multilevel converter (MMC) en sistemas HVDC.
- Zhao, X., Liu, Y., Wu, J., Xiao, J., Hou, J., Gao, J., & Zhong, L. (2020). Technical and economic demands of HVDC submarine cable technology for Global Energy Interconnection. *Global Energy Interconnection*, 3(2), 120-127.
- De Alegria, I. M., Martín, J. L., Kortabarria, I., Andreu, J., & Ereño, P. I. (2009). Transmission alternatives for offshore electrical power. *Renewable and sustainable energy reviews*, 13(5), 1027-1038.
- RODRÍGUEZ, J. P., RUIZ-OCHOA, M. A., & MENESES, A. (2020). Revisión de los factores de emisión en las metodologías de huella de carbono en Colombia. *ESPACIOS*, 41(47), 74-84.
- TOALA REYES, I. J. (2021). *ESTUDIO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA LA ALIMENTACIÓN DEL LABORATORIO DE ROBÓTICA DE LA CARRERA DE INGENIERÍA EN COMPUTACIÓN Y REDES* (Bachelor's thesis, Jipijapa. UNESUM).
- Ding, Y., Wen, Q., & Shen, B. (2014, July). Prediction on diesel price in China with an exponential smoothing method. In *2014 Seventh International Joint Conference on Computational Sciences and Optimization* (pp. 593-597). IEEE.
- Lundberg, S. (2003). *Configuration study of large wind parks*. Chalmers Tekniska Hogskola (Sweden).

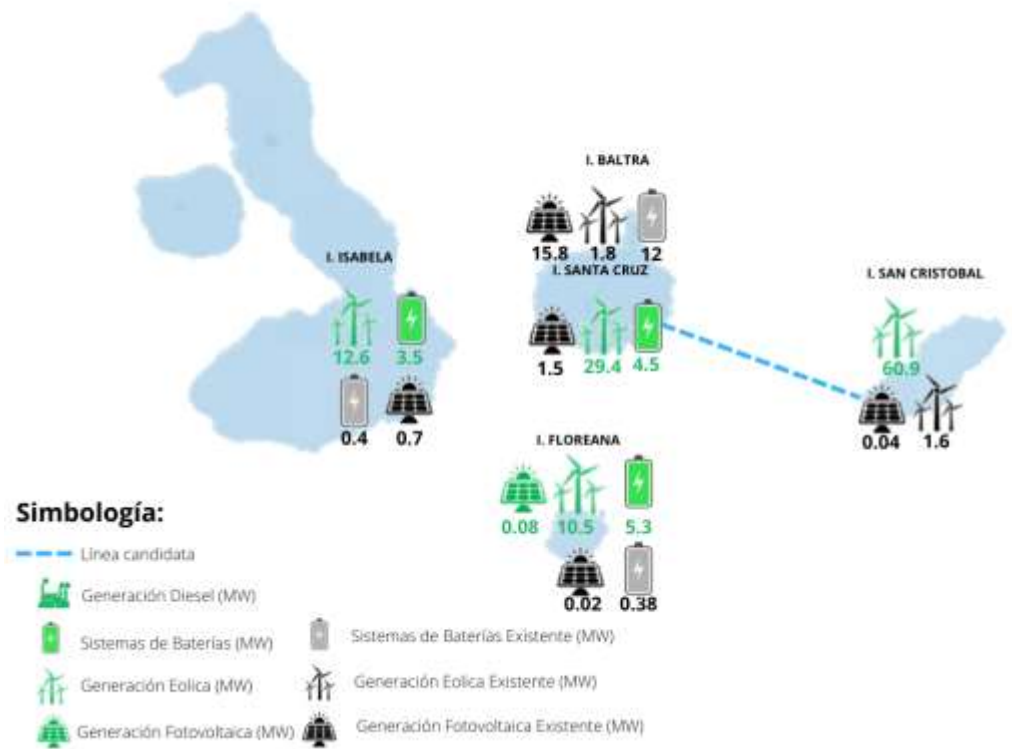


Gracias



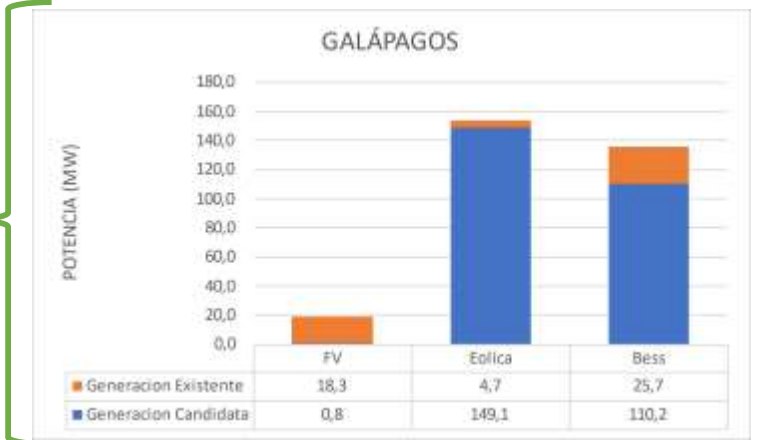
# ANÁLISIS DE RESULTADOS (RESPALDO)

## Caso base, descarbonización agresiva y línea de 69kV



Conexiones potenciales entre islas y opciones de inversión en generación y almacenamiento

Resumen total de las tecnologías existentes y candidatas a instalarse.



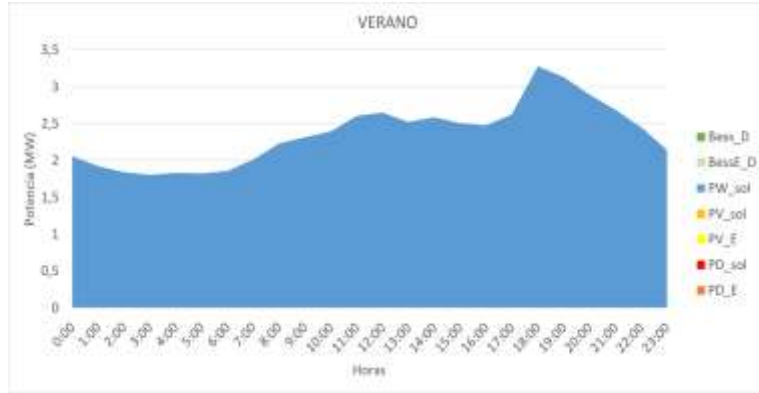
Resumen total por isla de tecnologías existentes y candidatas a instalarse.



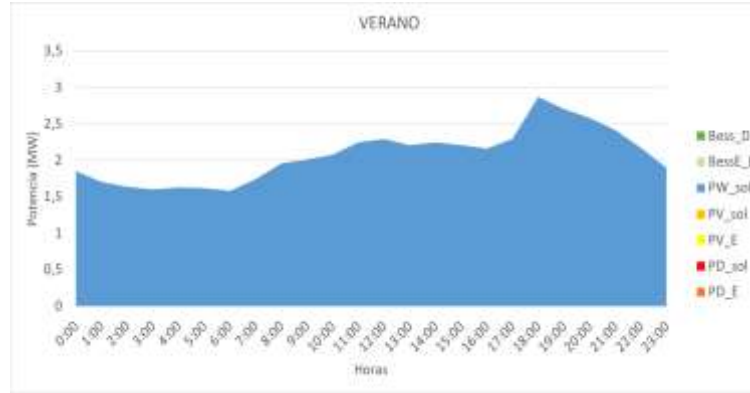
# ANÁLISIS DE RESULTADOS (RESPALDO)

## Caso base, descarbonización agresiva y línea de 69kV

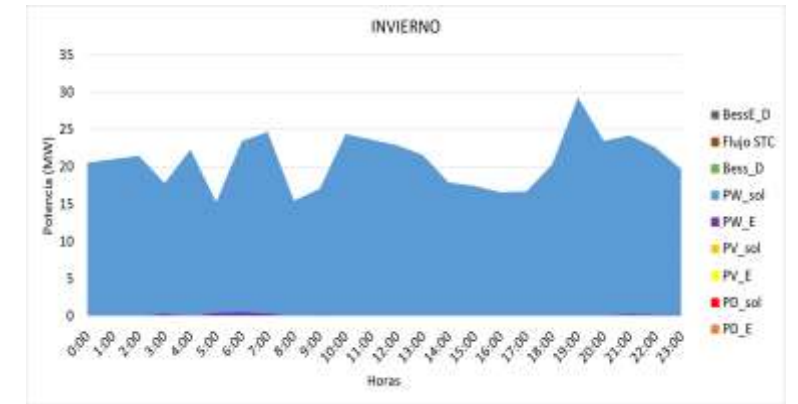
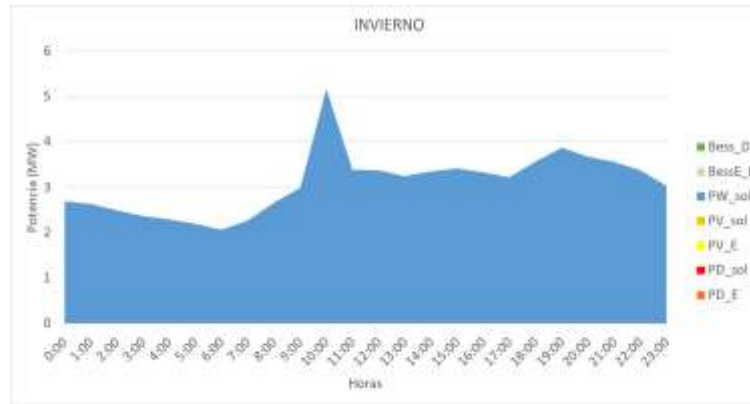
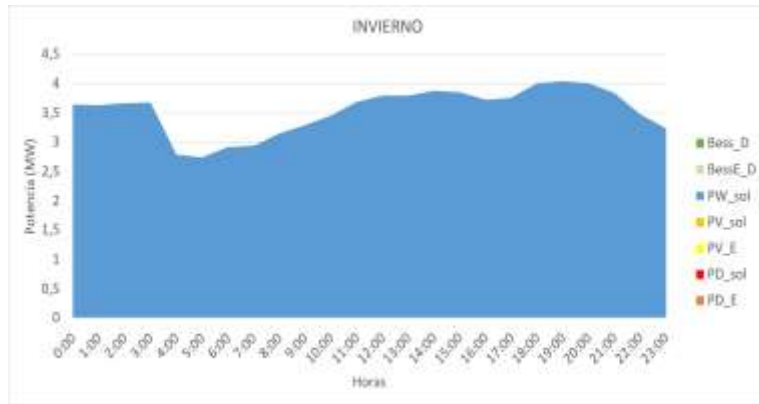
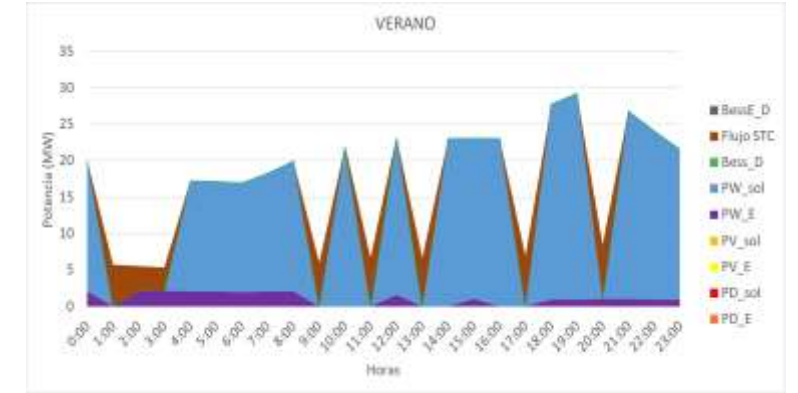
Curva de operación Isabela



Curva de operación Floreana



Curva de operación San Cristóbal



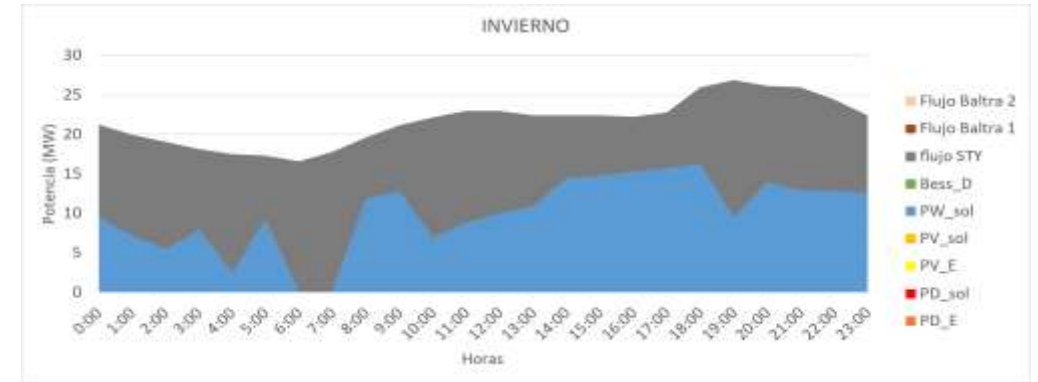
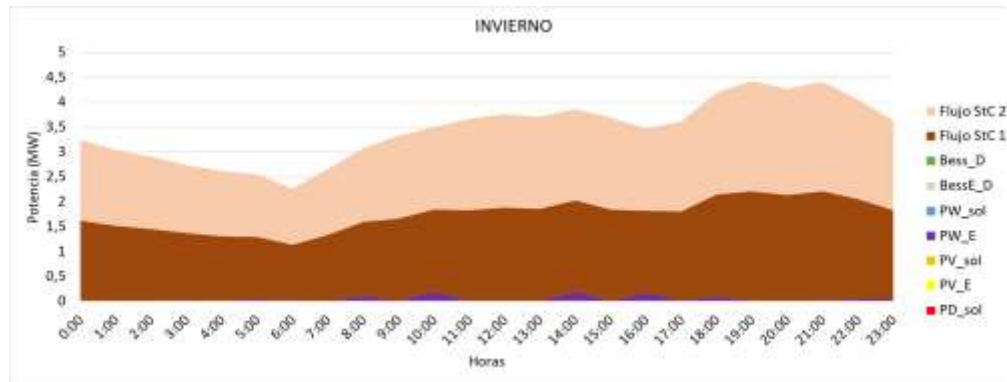
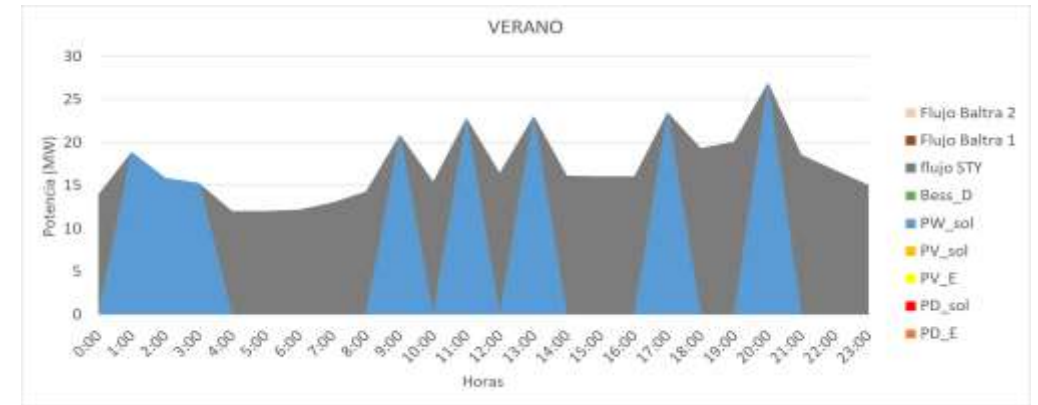
# ANÁLISIS DE RESULTADOS (RESPALDO)

## Caso base, descarbonización agresiva y línea de 69kV

### Curva de operación Baltra



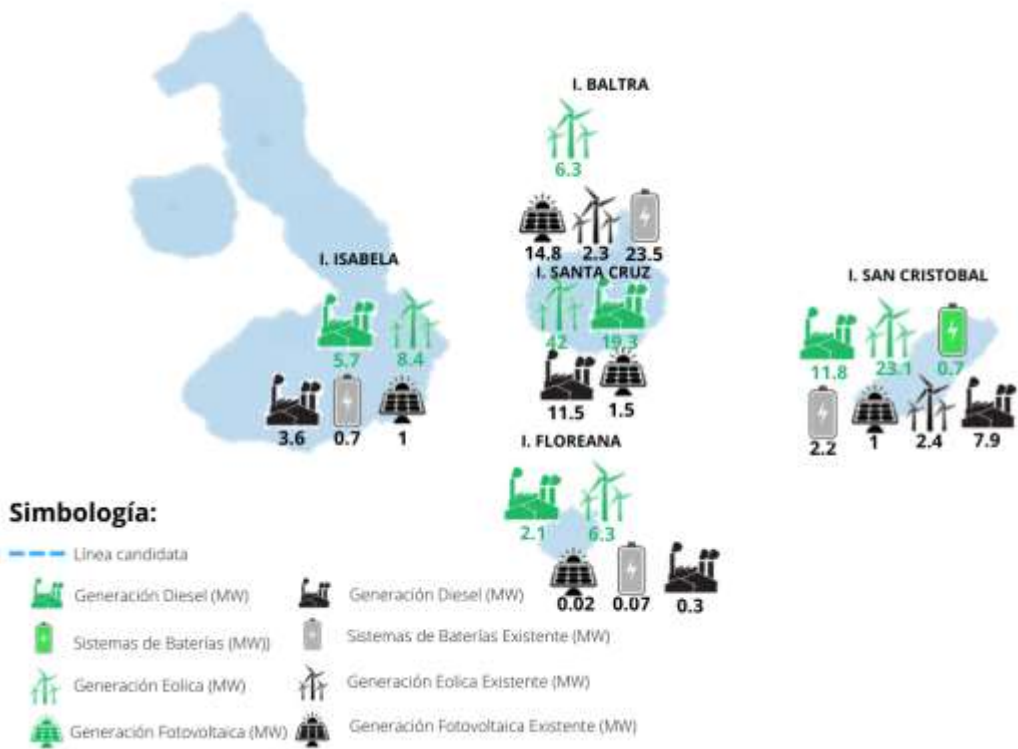
### Curva de operación Santa Cruz





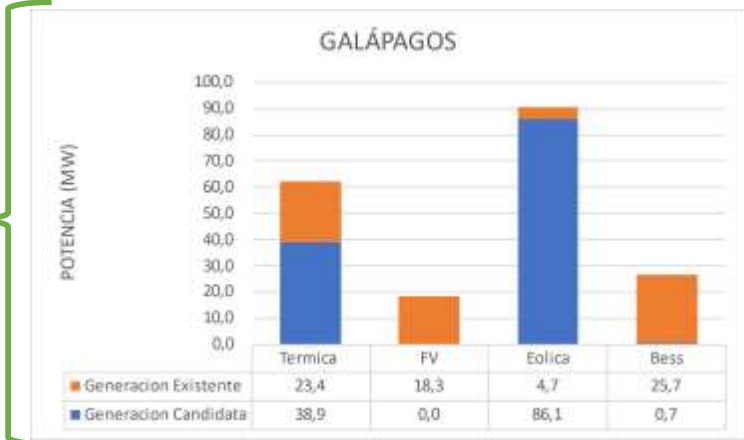
# ANÁLISIS DE RESULTADOS (RESPALDO)

## Caso base con vehículos eléctricos, descarbonización pasiva y línea de 69kV



Conexiones potenciales entre islas y opciones de inversión en generación y almacenamiento

Resumen total de las tecnologías existentes y candidatas a instalarse.



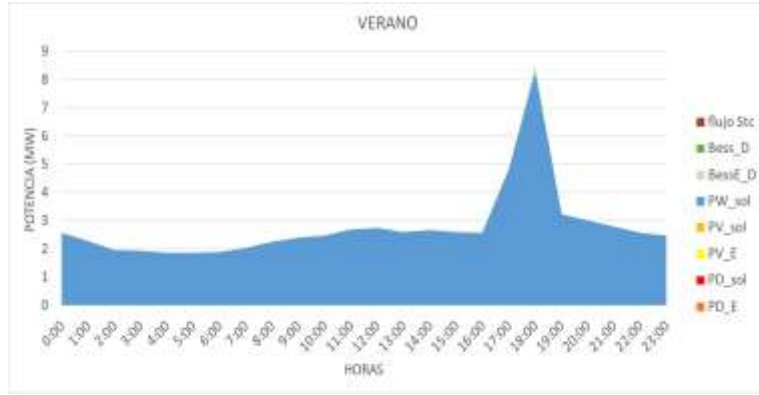
Resumen total por isla de tecnologías existentes y candidatas a instalarse.



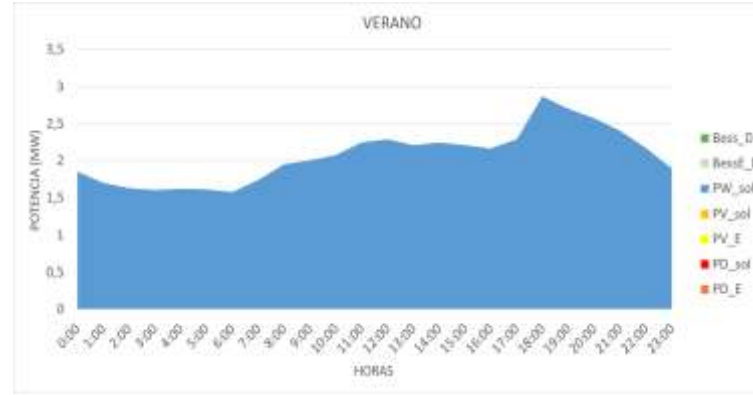
# ANÁLISIS DE RESULTADOS (RESPALDO)

## Caso base, descarbonización agresiva y línea de 69kV

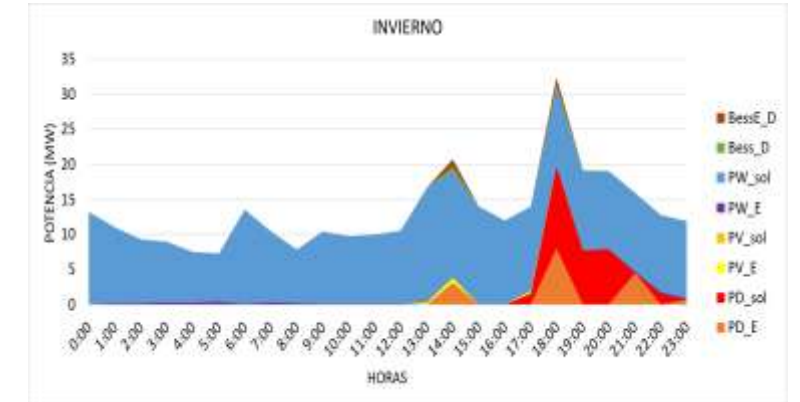
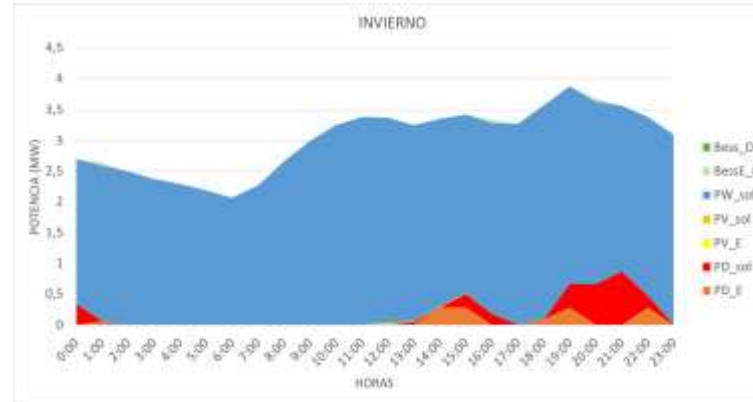
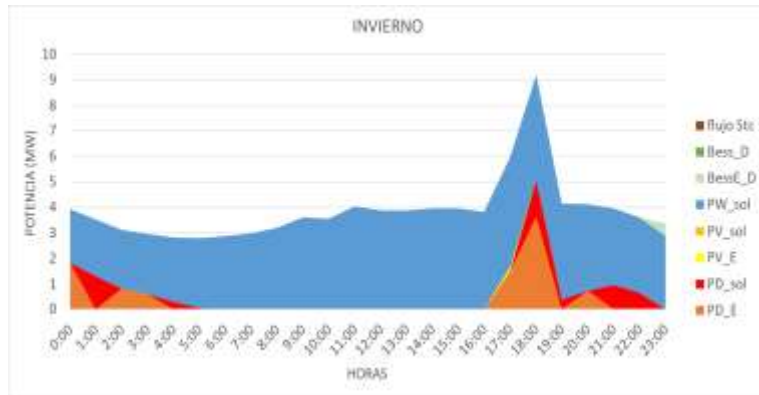
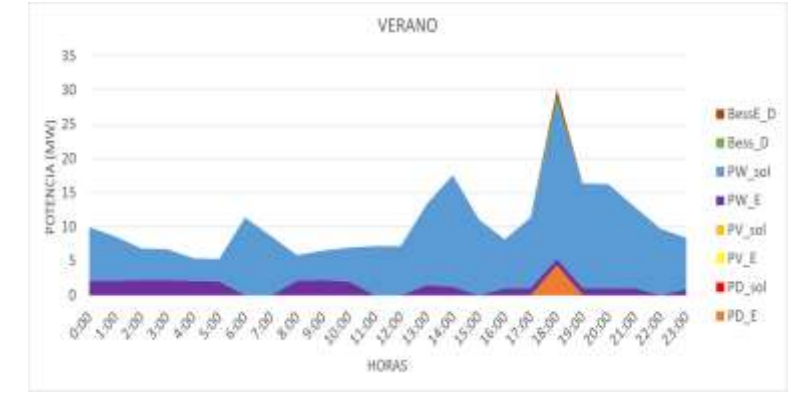
Curva de operación Isabela



Curva de operación Floreana



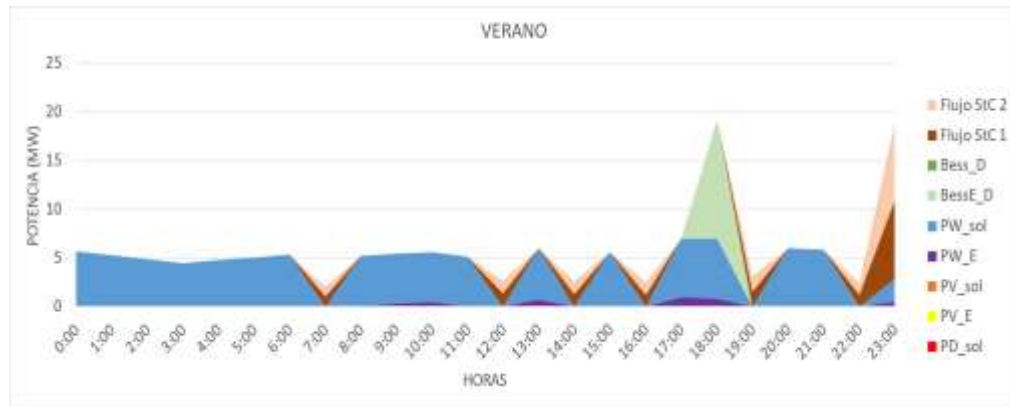
Curva de operación San Cristóbal



# ANÁLISIS DE RESULTADOS (RESPALDO)

## Caso base, descarbonización agresiva y línea de 69kV

Curva de operación Baltra



Curva de operación Santa Cruz

