



**Universidad**  
Zaragoza

## Trabajo Fin de Grado

Simulación de la red eléctrica de la isla Santiago  
(Cabo Verde) considerando un 100% de  
generación renovable.

*Simulation of the electricity network of the island of  
Santiago (Cape Verde) considering 100% renewable  
generation.*

Autor

Adrián López Fanlo

Director

José Luis Bernal Agustín

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2020

# **Simulación de la red eléctrica de la isla Santiago (Cabo Verde) considerando un 100% de generación renovable.**

## **RESUMEN**

La producción de energía a partir de fuentes renovables ha cobrado especial importancia en todo el mundo. Entre los países con mayor interés, se encuentra Cabo Verde. El gobierno ha impulsado un ambicioso proyecto con el objetivo de alcanzar un 100% de generación de energía a partir de fuentes renovables para el año 2030. La integración de estas fuentes como medio de generación energético conlleva la eliminación de emisiones contaminantes y la no dependencia de combustibles fósiles.

Cabo Verde es, probablemente, uno de los países del mundo con mayor potencial de aprovechamiento de las fuentes renovables. Con un gran potencial de generación eólica, tratará de disponer ya en 2025 de, al menos, un 50% de generación renovable. Con este paso, Cabo Verde dejará de ser uno de los países con mayor dependencia del mercado internacional del petróleo, ya que actualmente, su generación energética depende en gran medida de los países exportadores del mismo.

La finalidad de este trabajo es analizar la viabilidad del proyecto cabo verdiano, haciendo especial hincapié en el análisis de las condiciones meteorológicas que permitirán o no llevar a cabo el proyecto. Tras obtener los datos y parámetros que permiten representar fielmente la red eléctrica actual de Santiago, se han propuesto diversos modelos de la misma, inyectando distintos porcentajes de generación a partir de energías renovables, observando así el comportamiento de la red.

Se propone la unión del sistema eléctrico de la isla de Santiago con la isla Maio, la más cercana por el noroeste, estudiando así los efectos de disponer de un sistema eléctrico de mayor tamaño. Finalmente, se aborda la falta de agua dulce presente en el país, mediante la caracterización del consumo eléctrico que una planta desalinizadora suponga para abastecer la isla de Santiago.

Utilizando el software PowerWorld v20, se ha comparado el caso base con los casos con generación renovable, obteniendo como resultado que sí es posible alcanzar una generación dependiente únicamente de energías renovables. Finalmente, se ha considerado Net Metering como un posible complemento que asegure la generación de energía para aminorar las consecuencias del fallo en la red o posibles desabastecimientos por falta de generación en centrales.

**Palabras clave:** Energía renovable, Cabo Verde.

# ÍNCIDE

1. INTRODUCCIÓN .....	4
2. OBJETIVOS Y ALCANCE .....	8
3. HERRAMIENTAS Y METODOLOGÍA .....	10
3.1. INTRODUCCIÓN A LA INTERFAZ POWERWORLD .....	10
3.2. DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA, GENERACION Y PARAMETROS DE LAS LINEAS .....	12
4. CASOS DE ESTUDIO .....	19
4.1. AUMENTO DE LA GENERACIÓN MEDIANTE FUENTES DE ENERGÍA RENOVABLES .....	22
4.1.1. PRIMER CASO DE ESTUDIO (20%).....	23
4.1.2. SEGUNDO CASO DE ESTUDIO (40%) .....	25
4.1.3. TERCER CASO DE ESTUDIO (60%) .....	27
4.1.4. CUARTO CASO DE ESTUDIO (80%).....	29
4.1.5. QUINTO CASO DE ESTUDIO (100%) .....	31
4.2. UTILIDAD Y ESTADO DE “NET METERING” .....	38
5. CONCLUSIONES .....	39
6. BIBLIOGRAFÍA .....	41
ANEXO I: PARÁMETROS DE LAS REDES .....	44
ANEXO 2: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS GENERADORES EÓLICOS .....	47

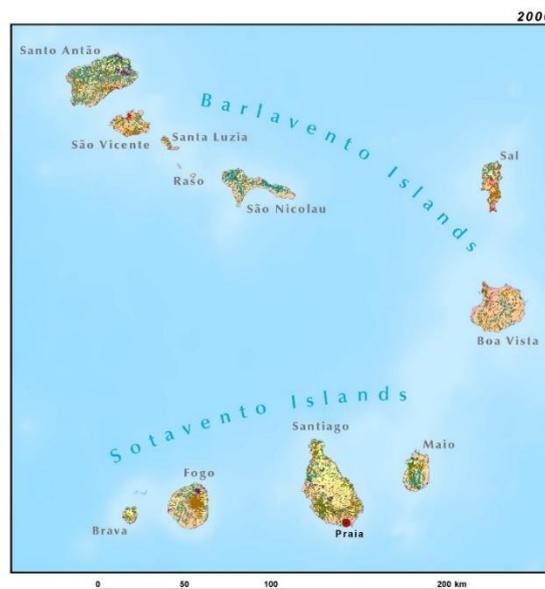
# 1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se enmarca en el desarrollo del Trabajo de Fin de Grado para optar al Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales de la Escuela de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de Zaragoza.

El desarrollo del mismo surge de la aparición e integración de la generación de energía mediante tecnologías de aprovechamiento de recurso renovable. Dicha integración acentúa su importancia en sistemas energéticos de potencia aislados donde, habitualmente, la producción de energía se realiza mediante la quema de combustibles fósiles, con el impacto medioambiental que conlleva.

Cabo Verde es un claro ejemplo de sistema aislado dependiente de los combustibles fósiles. Situado en el continente africano, el archipiélago cuenta con 10 islas, de las cuales 9 están habitadas y cuentan con sistemas energéticos independientes. Estos sistemas eléctricos pequeños e independientes cargan con los siguientes inconvenientes:

- El hecho de estar aislados obliga al sistema a tener una elevada capacidad de generación energética que asegure el suministro y evite cortes en el mismo.
- Las islas, de origen volcánico, no disponen de recursos fósiles. Esto crea una fuerte dependencia de los países exportadores de petróleo. Dicha dependencia se traduce directamente al coste de producción de la energía eléctrica.



*Ilustración 1. Archipiélago de Cabo Verde. Fuente: West Africa*

El archipiélago está formado por dos grandes agrupaciones de islas:

- Las islas Barlovento: Santo Antão, São Vicente, Santa Luzia, São Nicolau, Sal, Boa Vista.
- Las islas Sotavento: Maio, Santiago, Fogo, Brava.

De éstas, el estudio se centra en las islas Santiago y Maio. La isla de Santiago es la mayor del archipiélago, tanto en extensión, 991 km<sup>2</sup>, como en población, 309.633 habitantes frente a los 550.483 habitantes que representan el total de la población del país [2] [3]. La isla Maio presenta una extensión de 274.5 km<sup>2</sup> y una población de 6.980 habitantes [3].

Seguendo a Pereira (2019) las contrariedades que se presentan son la carencia de recursos, la oscilación del precio del petróleo, la infructuosa eficacia del sistema y arduo acceso a las nuevas formas de producción de energía. Además, en países insulares y en vías de desarrollo, estos inconvenientes se acentúan. Las compañías eléctricas afrontan el requerimiento de cumplir con todos los parámetros técnicos solicitados y de disminuir las interrupciones del suministro [4].

Este autor, plantea la aplicación de la integración de generación de energía eléctrica mediante fuentes de energías renovables con el objetivo de enriquecer el funcionamiento del sistema eléctrico.

El sistema eléctrico del archipiélago de Cabo Verde muestra sobresalientes características comparado con la mayor parte de los países del África subsahariana. No obstante, se aleja de lo que se podría considerar un óptimo funcionamiento, especialmente en lo que respecta a las pérdidas eléctricas, la eficacia de gestión de los recursos y la calidad ofrecidos y la tasa de inclusión de energías renovables.

En Cabo Verde se ha ideado que en el año 2025, por lo menos el 50% de la energía eléctrica se produzca con centrales de gran tamaño que trabajen con fuentes renovables, buscando alcanzar el 100% en 2030. Para lograr este objetivo es esencial establecer un sistema eléctrico capaz de dar respuesta a estas variaciones, avalando no solo la seguridad energética sino certificando igualmente una calidad adecuada en los índices de funcionamiento técnico, económico y ambiental.

En Cabo Verde, debido a una deficiente gestión del sistema eléctrico y de la dependencia energética del exterior, la energía supone uno de los costes más elevados del mundo para los consumidores. En contraposición, considerando las excelentes condiciones climáticas para la producción de energía a partir de la irradiación solar y del viento y sirviéndose de éstos, se permitiría aminorar los elevados costes actuales. Del mismo modo se posibilitaría la reducción de la dependencia exterior para obtener los combustibles fósiles que suponen un inconveniente para el sector energético de Cabo Verde, como justifica el Plan de Energías Renovables del año 2011 realizado por Gesto Energía.

Respecto a la gestión del sistema eléctrico, los consumidores suelen presentar quejas ante la insuficiencia de calidad y continuidad del suministro eléctrico, viéndose perjudicados económicamente. Se descubre, por tanto, una situación en la que el sistema escasea en cuanto a medios para responder a la demanda de energía eléctrica.

A esta situación, se le añaden impedimentos como la conexión ilegal o el robo de energía, prácticas habituales de los últimos años debido a que no se establecen medidas técnicas y sociales que lo obstaculicen o imposibiliten.

En la red no consta un sistema de comunicación ni un centro de control que monitorice el sistema eléctrico, por lo tanto, se obstaculiza la actividad cuando se producen anomalías, siendo imposible obtener información a tiempo real para solucionarlas.

Dentro de este contexto, no debería dejarse de lado la problemática de obtención de recursos. Uno de los ejes estratégicos se articula en cuanto a la gestión integrada de los recursos hídricos, garantizando un suministro estable y adecuado de agua como respuesta a su déficit. La idea es intentar asegurar que en 2030 cada ciudadano tenga acceso seguro a un mínimo de 40 litros de agua potable al día, que todos los hogares urbanos estén conectados a la red de abastecimiento de agua y que el sistema de recogida de aguas residuales y la eliminación se amplíen. De ahí que surja el requerimiento de construir varias unidades de desalinización y bombeo de agua. Con esto se espera que los costos generales de energía y de suministro de agua potable disminuyan.

Teniendo en cuenta las necesidades e inconvenientes descritos surge la motivación central de este trabajo, siendo el objetivo principal comprobar la viabilidad de la red

eléctrica de la isla de Santiago considerando un 100% de generación renovable, contribuyendo así a la regeneración del sistema eléctrico del archipiélago [5] [6].

## 2. OBJETIVOS Y ALCANCE

El hecho de que los combustibles fósiles, también conocidos como fuentes de energía no renovables, no sean ilimitadas ha provocado la necesidad de encontrar nuevas fuentes de energía. Estas nuevas fuentes se conocen como energías renovables y, además de suponer una fuente ‘inagotable’ de energía, son fuentes limpias que no emiten gases contaminantes o cuyo ciclo de vida total tiene un sumatorio de emisiones cero. Todo esto permite reducir el impacto generado a la hora de obtener la energía eléctrica necesaria para satisfacer los requerimientos eléctricos de regiones enteras.

El objetivo del presente trabajo es determinar la viabilidad de establecer una generación energética basada en su totalidad en las energías renovables en el país Cabo Verde, más concretamente en la isla de Santiago y la Isla de Maio. El proyecto surge tras la iniciativa del propio país de conseguir el ambicioso objetivo de tener una generación eléctrica basada únicamente en renovables para el año 2030.

Para determinar la viabilidad del proyecto se han planteado una serie de objetivos dentro del trabajo de fin de grado con la intención de desarrollar un trabajo lo más fiable y cercano a la realidad posible.

- Obtener los datos que permitan caracterizar la red actual de las islas de estudio, siendo éstos: los valores de generación, los valores de consumo y los parámetros que caracterizan las líneas de distribución.
- Modelizar el caso base, reflejando la situación actual de la red y simularlo en el software PowerWorld.
- Plantear nuevos casos, aumentando progresivamente la generación basada en fuentes de energía renovables. Estudiar la posibilidad de incluir una planta desalinizadora de agua.
- Comparar los casos planteados con respecto al caso base. Determinar la viabilidad del proyecto del gobierno de Cabo Verde (generación 100% renovable).
- Obtener conclusiones.

Para realizar las simulaciones, tanto del caso base como de los casos con generación renovable, se va a utilizar el software PowerWorld, en su versión Powerworld Simulator v20. Permite plantear redes de hasta 50 nudos, por lo que las redes planteadas se limitarán

a representar las líneas de distribución, tomando en los nudos las cargas pertinentes como cargas agregadas. La misma consideración se tendrá con las generaciones.

El alcance de este trabajo puede estar relacionado con objetivos académicos, ya que en él se aplican los conocimientos obtenidos principalmente en asignaturas como Sistemas Eléctricos de Potencia o Tecnologías Eléctricas, pudiendo servir entonces como modelo para ejercicios relacionados con estudios de pérdidas en líneas de media tensión, la importancia de minimizar la distancia generación-consumo y los efectos positivos de la transición hacia las energías renovables.

Por otro lado, puede servir como punto de partida para futuros proyectos relacionados con Cabo Verde o sistemas aislados con características similares.

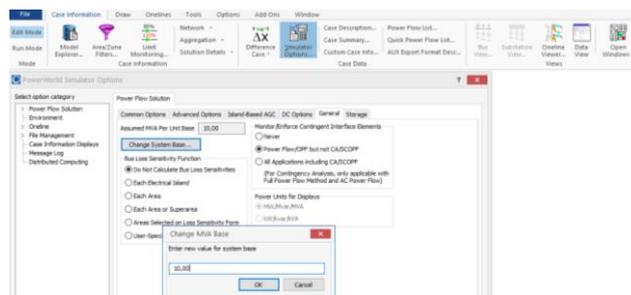
### 3. HERRAMIENTAS Y METODOLOGÍA

#### 3.1. INTRODUCCIÓN A LA INTERFAZ POWERWORLD

El desarrollo de todos los casos de estudio se realiza mediante el software PowerWorld v20. Este software es ampliamente utilizado en América del Norte y, en menor medida, en Europa. Está orientado a un perfil técnico, ingenieril, con cierto perfil educativo que facilita la comprensión de los términos que refieren a la ingeniería eléctrica. Permite trazar redes eléctricas, caracterizar todos los elementos necesarios para definir la red y, finalmente, realizar la simulación del caso planteado, obteniendo así los flujos de cargas, porcentajes de saturación de líneas y transformadores y determinar los valores de generación necesarios para satisfacer las cargas impuestas. Adicionalmente, permite realizar estudios de estabilidad y estudios de comportamiento frente a cortocircuitos.

La versión utilizada permite diseñar redes de hasta 50 nudos, limitando así la precisión que pueda alcanzarse.

Una vez iniciado el simulador, deben indicarse las primeras condiciones de nuestra red. En primer lugar se trabaja en 'Edit Mode'. En el mismo menú abierto por defecto, 'Case Information', se abre la ventana 'Simulator options', donde puede definirse la potencia base del sistema dentro de la sub-ventana 'General'.



*Ilustración 2. Definición potencia base del sistema.*

El programa permite dibujar redes sobre imágenes, lo cual se ha aprovechado para tener el mapa de Cabo Verde y desarrollar el trabajo sobre él, pudiendo plasmar la red con una fisionomía similar a la real. Esto puede realizarse desde el menú 'Draw', en la ventana 'Background' y seleccionando la opción 'Picture'.



*Ilustración 3. Selección del fondo.*

También en el menú 'Draw' se encuentra la opción de dibujar los elementos que definen la red. Desplegando la opción 'Network' aparecen entre otros, los elementos 'Bus', 'Generator', 'Load', 'Transmission Line' y 'Transformer'. Estos son los elementos utilizados para la definición de la red, tanto del caso base como de los casos con generación renovable.



*Ilustración 4. Colocación de los elementos del sistema.*

En cuanto al diseño y conformado de la red, el orden de trabajo recomendado comienza con la colocación del total de los 'Buses' en un primer momento. Seguidamente, se colocan las líneas de transmisión y transformadores, quedando definida la forma y estructura de la red. Por último, se añaden las generaciones y cargas en los nudos o buses correspondientes.

En este punto la red está configurada y se procede a la simulación de la misma. Se selecciona el modo 'Run mode' y dentro del menú 'Tools' se ejecuta la simulación a través del botón verde 'Play' [7].



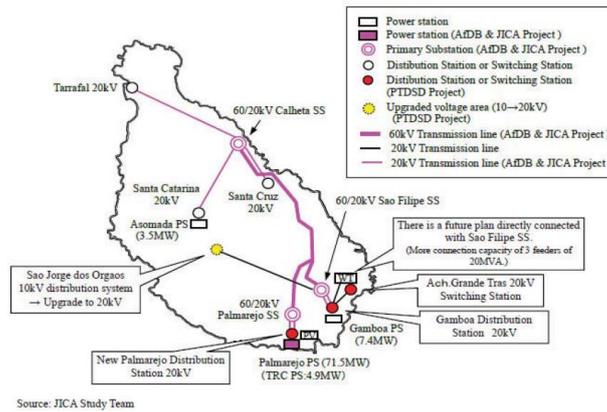
*Ilustración 5. Simulación del sistema.*

### 3.2. DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA, GENERACION Y PARAMETROS DE LAS LINEAS

En primer lugar, se realizó una búsqueda exhaustiva de la red de Cabo Verde. La red de Cabo Verde está gestionada en su mayoría por Electra, una empresa dedicada a la gestión y mantenimiento de redes. Da servicio a todas las islas, con la excepción de la isla de Boa Vista, la cual está gestionada por 'Águas e Energia de Boavista'. La obtención de datos es complicada debido a la falta de transparencia por parte de Electra.

Cabe destacar que ambas islas de estudio poseen redes de media tensión, cuyo tamaño y complejidad distan en gran medida de los países europeos, cuyas redes están mucho más desarrolladas y con demandas mucho más exigentes.

La isla de Santiago posee una red de distribución ramificada donde predominan las líneas de 20kV, pero posee también sendos tramos de distribución con líneas de 60kV. Éstas están situadas a lo largo de la parte central de la isla, donde disminuye la concentración de ciudades y por tanto la distribución de 60kV favorece la disminución de las pérdidas. Los principales nodos de la red se encuentran en el sur-este de la isla, donde se encuentran las ciudades más habitadas. Con una población estimada de 160.000 habitantes, la capital del país, Praia, se convierte en el mayor nodo de la red y en el centro de la misma. En ella se tiene la mayor generación actual del país y es donde se produce una mayor demanda energética. Junto a Praia, existen diversas ciudades y subestaciones también representadas en la red, como son Gamboa, Sao Felipe y Sao Jorge dos Orgaos. El centro de la isla es un terreno bastante escarpado, ya que la isla es de origen volcánico. El centro montañoso de Santiago alcanza los 1394 metros, con el pico conocido como 'Pico da Antonia'. Debido al carácter del terreno, el centro de la isla se encuentra prácticamente deshabitado y no cuenta con demandas o generaciones significativas. El resto de la instalación eléctrica de la isla se encuentra en el noroeste, volviendo nuevamente a las líneas de 20kV. En esta parte de la isla se encuentra la subestación de Calheta do Sao Miguel. Los principales puntos de generación y/o consumo son Tarrafal, Santa Cruz y Santa Catarina [4].



*Ilustración 6. Vista general red eléctrica de Santiago [4].*

El parque generador de la isla de Santiago está compuesto por la Central Térmica de Palmarejo, situada en Praia, la Central Térmica de Gamboa, próxima a Praia, la Central Térmica Asomada PS, situada en Santa Catarina y el parque Eólico situado próximo a la subestación de Sao Filipe.

De las citadas fuentes de generación, la más importante por razones de capacidad instalada y generación es la central térmica de Palmarejo. Situada en Praia, capital y ciudad más importante del país, la central debe ser capaz de satisfacer dicha demanda y responder frente a variaciones en la demanda que puedan surgir en puntos más alejados de la red. La central de Palmarejo está constituida por 8 motores diésel, para una capacidad instalada total de 81,02 MW. Palmarejo cuenta también con un parque de generación fotovoltaica de 5 MW, que junto con la capacidad diésel dotan a la central de una capacidad instalada de 86,02 MW.

La central térmica de Gamboa cuenta con 3 motores diésel, para un total de 7,32 MW. Finalizando con la generación de la parte sureste de la isla, el parque eólico de Sao Filipe tiene una capacidad instalada de 9,35 MW.

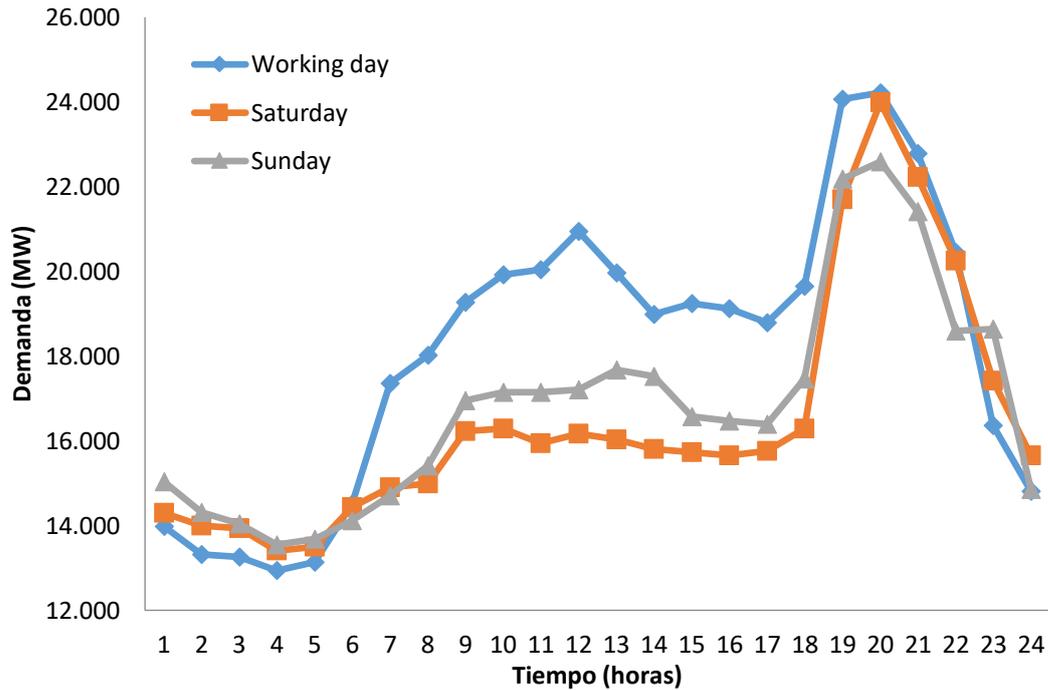
La central térmica de Santa Catarina, situada en el noroeste de la isla, cuenta con 4 motores diésel, que la dotan de una potencia instalada de 3,92 MW.

En lo que respecta a la isla de Maio, cuenta con un único punto de generación eléctrica, situado en Vila do Maio, capital de la isla. La generación se realiza a través de 3 grupos electrógenos de 1,976 MW, para una potencia instalada total de 5,928 MW

<b>Nodo</b>	<b>Generador</b>	<b>Sn [MVA]</b>	<b>Pmin [MW]</b>	<b>Pmax [MW]</b>	<b>Qmin [MVar]</b>	<b>Qmax [MVar]</b>
Palmarejo	CAT1	6,98	2,23	5,58	-4,19	4,19
	CAT2	6,98	2,23	5,58	-4,19	4,19
	CAT3	9,29	2,97	7,43	-5,57	5,57
	CAT4	9,29	2,97	7,43	-5,57	5,57
	WART5	13,75	4,4	11	-8,25	8,25
	WART6	13,75	4,4	11	-8,25	8,25
	WART7	13,75	4,4	11	-8,25	8,25
	WART8	13,75	4,4	11	-8,25	8,25
	PARQUE PV	4,4	0	5	-3,75	3,75
	DEUTZ5	2,95	0,94	2,36	-1,77	1,77
Gamboa	MAK6	3,1	0,99	2,48	-1,86	1,86
	MAK7	3,1	0,99	2,48	-1,86	1,86
Sao Filipe	Parque Eol	9,35	3,74	9,35	-0,96	0,96
Santa Catarina	CAT1	1,6	0,51	1,28	-0,96	0,96
	CAT2	1,6	0,51	1,28	-0,96	0,96
	CUMMINS	1	0,32	0,8	-0,6	0,6
	PERKINS	0,7	0,22	0,56	-0,42	0,42

*Tabla 1. Generación isla Santiago*

La dificultad de obtención de datos para determinar la demanda es manifiesta en el caso de Cabo Verde. La falta de transparencia en la gestión eléctrica por parte de Electra y el gobierno de Cabo Verde dificultan la obtención de datos oficiales que permitan representar de forma fiel las cargas de la red real. Debido a esta dificultad, y siguiendo la tesis doctoral realizada por Pereira (2019) se han tomado como datos representativos de la demanda real los propuestos en ésta.



Gráfica 1. Curva característica de la demanda de Santiago [4]

Atendiendo a la curva de demanda generada con los datos de demanda horaria en días laborables, sábados y festivos, se toma el mayor de estas demandas como el caso base de nuestra simulación, ya que será el punto donde se produzcan mayores pérdidas en la red de distribución. El valor en este punto son 24'220 MW, valor casi idéntico en días laborables y sábados. El valor de la demanda los domingos en el punto máximo es de 22'592MW, es decir, un 6,7% menor comparada con un día laborable. Esto es sin duda consecuencia del bajo nivel de industrialización del país. En 2013, la industria representó únicamente el 7,5% del volumen de negocios generados a nivel nacional. Según el Instituto Nacional de Estadística de Cabo Verde, la industria registraba 6.856 empleados, lo cual representa el 13% del total de los empleados en el país. [8]

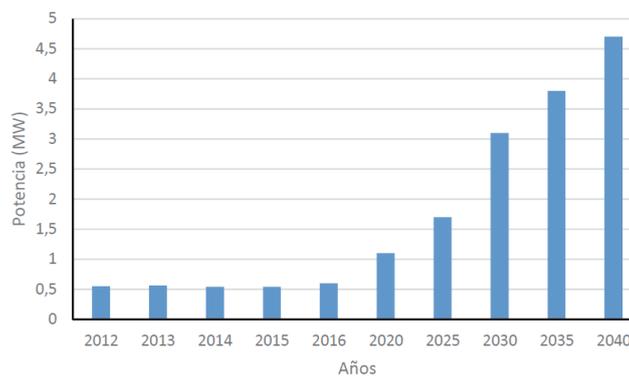
Se puede concluir entonces que el mayor gasto energético de la isla se corresponde con uso doméstico de la energía, pudiendo diferenciar dos consumos. El gasto del ciudadano cabo verdiano y el gasto derivado del turismo.

En cuanto a la localización de la demanda, se ha desagregado la demanda en función a la importancia de los nodos representados. Debido a la dificultad de obtener datos oficiales del consumo en cada nodo, se desagrega la demanda en función de población y cercanía al núcleo importante de la población, siendo Praia la ciudad más importante de la isla.

<b>Nodo</b>	<b>P[MW]</b>	<b>Q[MVAr]</b>
Palmarejo	11,44	8,575
Gamboa	4,54	3,44
Sao Filipe SS 20kV	2,664	1,998
Sao Jorge dos Orgaos	0,623	0,448
Santa Cruz	0,957	0,718
Santa Catarina	2,506	1,901
Calheta SS 20kV	0,654	0,49
Tarrafal	0,76	0,57

*Tabla 2. Demanda desagregada isla Santiago*

En lo que respecta a la demanda eléctrica de la isla de Maio, se obtiene nuevamente siguiendo la previsión de demanda anual propuesta en la tesis doctoral realizar por Pereira (2019).



*Gráfica 2. Estimación de la demanda de la isla de Maio [4].*

De esta previsión, podemos tomar una demanda agregada de la producción de 1,2 MW aproximadamente. Nuevamente, la distribución desagregada de la demanda se ha realizado atendiendo a criterios de mayor o menos población de las ciudades, tomando como principal nodo de la isla Vila do Maio, capital de Maio.

<b>Nodo</b>	<b>P[MW]</b>	<b>Q[MVAr]</b>
Vila do Maio	0,65	0,47
Barreiro	0,07	0,053
F. da Horta	0,049	0,036
F. Seca	0,05	0,033
R <sup>a</sup> Dom Joao	0,064	0,042
Alcatraz	0,05	0,033
St. Antonio	0,034	0,01
Cascabulho	0,023	0,01
Morrinho	0,086	0,065
Calheta M.	0,1	0,072
Morro	0,1	0,075

*Tabla 3. Demanda isla Maio.*

Por último, es necesario parametrizar las líneas de distribución y los transformadores utilizados. Se ha optado por utilizar los parámetros obtenidos por Gracia (2015) en el trabajo de fin de grado mediante el cual parametriza las líneas de 20kV con los siguientes valores numéricos.

<b>Nodo inicial</b>	<b>Nodo Final</b>	<b>R [p.u.]</b>	<b>X [p.u.]</b>	<b>G [p.u.]</b>	<b>Bc[p.u.]</b>
Palmarejo	Palmarejo SS 20kV	0,0013	0,00188	8,00E-07	2,44E-05
Palmarejo	Gamboa	0,04589	0,066364	2,82E-05	8,61E-04
Gamboa	Ach. Grande	0,0009555	0,0013818	5,88E-07	1,79E-05
Gamboa	Sao Filipe SS 20kV	0,00195	0,00282	1,20E-06	3,66E-05
Sao Filipe SS 20kV	Sao Jorge dos Orgaos	0,1105	0,1598	6,80E-05	2,07E-03
Calheta SS 20kV	Santa Catarina	0,089089	0,1288364	5,48E-05	1,67E-03
Calheta SS 20kV	Santa Cruz	0,0814905	0,1178478	5,01E-05	1,53E-03
Calheta SS 20kV	Tarrafal	0,12233	0,176908	7,53E-05	2,30E-03

*Tabla 4. Parámetros en p.u. de las líneas de 20kV en la isla de Santiago.*

<b>Nodo inicial</b>	<b>Nodo Final</b>	<b>R [p.u.]</b>	<b>X [p.u.]</b>	<b>G [p.u.]</b>	<b>Bc[p.u.]</b>
Vila do Maio	Morro	0,043095	0,062322	2,65E-05	8,09E-04
Morro	Calheta M.	0,041405	0,059878	2,55E-05	7,77E-04
Calheta M.	Morrinho	0,04225	0,0611	2,60E-05	7,93E-04
Morrinho	Cascabulho	0,039	0,0564	2,40E-05	7,32E-04
Cascabulho	Pedro Vaz	0,0455	0,0658	2,80E-05	8,54E-04
Pedro Paz	St. Antonio	0,011336	0,0163936	6,98E-06	2,13E-04
Pedro Paz	Alcatraz	0,026	0,0376	1,60E-05	4,88E-04
Alcatraz	Intersección '	0,0442	0,06392	2,72E-05	8,30E-04
Interseccion '	F. Seca	0,00975	0,0141	6,00E-06	1,83E-04
F. Seca	R <sup>a</sup> Dom Joao	0,03055	0,04418	1,88E-05	5,73E-04
Interseccion '	F. da Horta	0,00975	0,0141	6,00E-06	1,83E-04
F. da Hosta	Interseccion "	0,025675	0,03713	1,58E-05	4,82E-04
Interseccion "	Barreiro	0,027105	0,039198	1,67E-05	5,09E-04
Interseccion "	Vila do Maio	0,028275	0,04089	1,74E-05	5,31E-04

Tabla 5. Parámetros en p.u. de las líneas de 20kV en la isla de Maio.

Se han obtenido los datos para las líneas de distribución utilizadas en la red de Santiago y los transformadores utilizados en ambas redes mediante el estudio de los casos ejemplificados en el libro 'Power Systems Analysis and Design'.

<b>Nodo inicial</b>	<b>Nodo Final</b>	<b>R [p.u.]</b>	<b>X [p.u.]</b>	<b>G [p.u.]</b>	<b>Bc[p.u.]</b>
Palmarejo SS 60kV	Interseccion	0,004327	0,010181	0	0,012827
Sao Filipe SS 60kV	Interseccion	0,00233	0,005482	0	0,00691
Interseccion	Calheta SS 60kV	0,00832	0,019578	0	0,024665

Tabla 6. Parámetros en p.u. de las líneas de 60kV en la isla de Santiago.

<b>Nodo Inicial</b>	<b>Nodo Final</b>	<b>Tensión Inicial (kV)</b>	<b>Tension Final (kV)</b>	<b>R [p.u.]</b>	<b>X [p.u.]</b>	<b>B [p.u.]</b>
Palmarejo SS 20kV	Palmarejo SS 60kV	20	60	0,000101	0,003925	-0,035
Sao Felipe SS 20kV	Sao Felipe SS 60kV	20	60	0,000101	0,003925	-0,035
Calheta SS 60kV	Calheta SS 20kV	60	20	0,000101	0,003925	-0,035
Vila do Maio'	Vila do Maio	0,4	20	0,000101	0,003925	-0,035

Tabla 7. Parámetros en p.u. de los transformadores de las redes de Santiago y Maio.

## 4. CASOS DE ESTUDIO

Comenzando con el estudio del caso, se desarrolló la red en PowerWorld Simulator v20, comenzando con la simulación del caso base.

Con la base del mapa de ambas islas, Santiago y Maio, se procede a dibujar sobre él las redes de distribución independientes, tratando de reflejar estructura real de dichas redes [9]. Dibujar la estructura sobre el mapa permite reflejar de forma más precisa la estructura deseada, facilitando así la identificación de los elementos que dan forma a la red.

Inicialmente se han colocado los 29 nodos que conforman ambas redes, asignando a cada nodo el valor de tensión que previamente se ha identificado. Tras esto, se han trazado las líneas de distribución y los transformadores, asignando los valores anteriormente indicados. Por último, se han asignado las generaciones y demandas identificadas en los nodos correspondientes.

Para realizar el estudio, es importante comprobar el nivel de saturación en las líneas una vez se ha realizado la simulación. Debido a esto, se ha calculado la potencia máxima admisible en cada línea, siendo ésta directamente proporcional a la tensión nominal y a la intensidad máxima permitida.

$$S = \sqrt{3} * U_{nominal} * I_{Máxima\ Admisible}$$

La Intensidad máxima admisible está directamente relacionada con el grosor del conductor y el material del conductor. Se han identificado las líneas como conductores de Aluminio 120 o Aluminio 240. Atendiendo a los valores de Intensidad máximos medidos en  $[A/mm^2]$  normalizados en el reglamento español de alta tensión, se determina la máxima potencia que podrá transportar cada línea.

Una vez realizado, queda definido el sistema de estudio para el caso base. Para identificar fácilmente las líneas de distinta tensión, se han representado las líneas de 20kV y de 60kV con distinto grosor, siendo las de mayor grosor las líneas de 60kV.

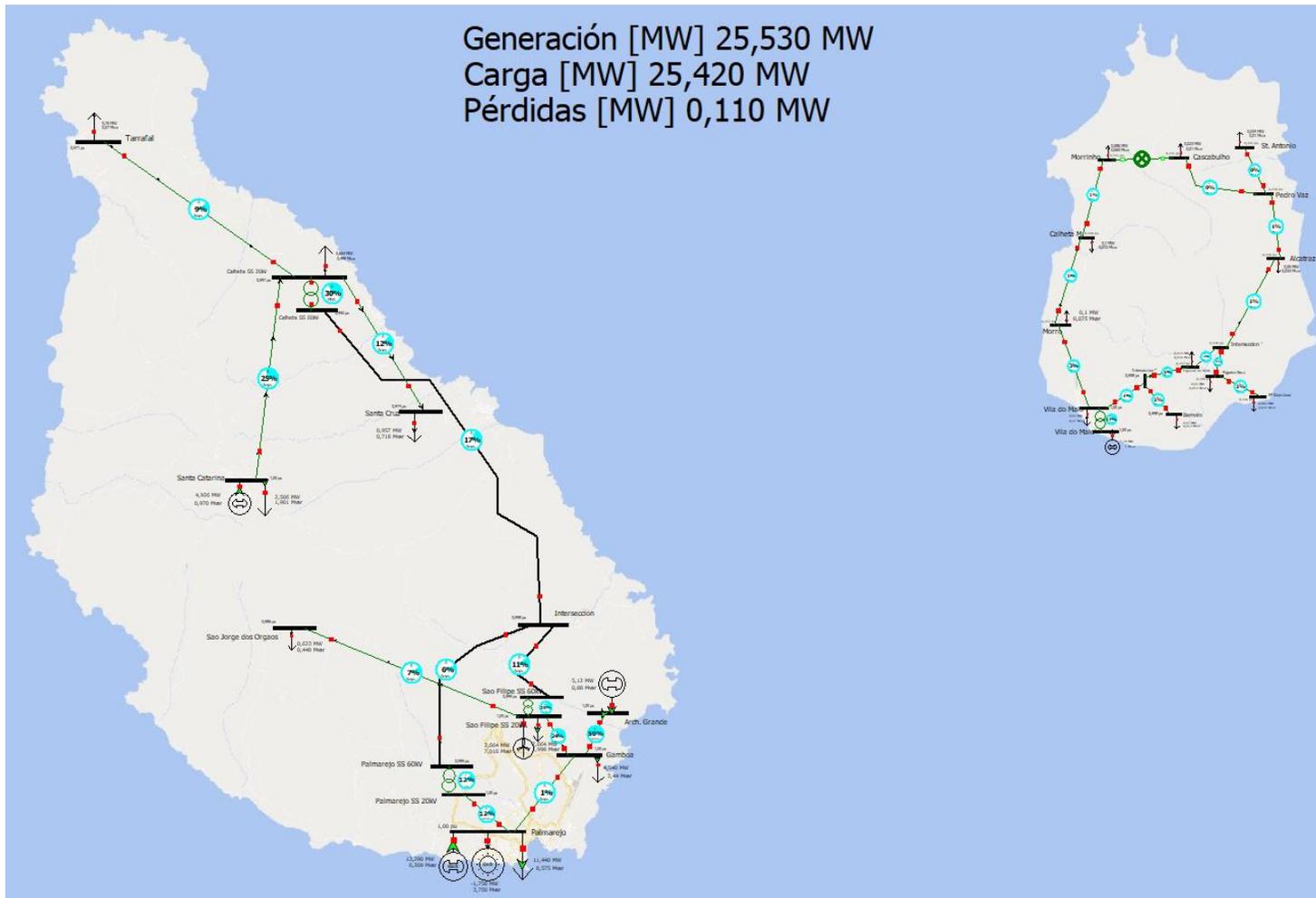
Tras la simulación del sistema utilizando el modo 'Run mode', puede observarse que no se produce ninguna situación de mal funcionamiento de la red. No se produce fallo en el sistema, ni aparecen líneas con sobrecargas. Las sobrecargas ocurren cuando un

sistema alimenta demasiada potencia por una línea, superando así el valor límite que el conductor admite y para el que está diseñado para trabajar sin fallos. En el caso de Cabo Verde, y en esta situación en la que se tiene en cuenta solo las cargas registradas del sistema, la capacidad de las líneas supera ampliamente la potencia que están transportando. Esto es indicativo de que la red está preparada para acoger mayor demanda, siempre y cuando la generación pueda responder a esa futura demanda.

Para facilitar la comprensión del funcionamiento de la red, se ha mostrado en pantalla el valor de la generación, la demanda y las pérdidas. El valor de la demanda está fijado por el diseñador de la red, y la generación viene determinada por la suma de las generaciones. Las pérdidas de la red eléctrica son directamente la diferencia entre la generación y la demanda. Son las conocidas como pérdidas eléctricas técnicas. Estas pérdidas ocurren en las líneas de distribución. Son inherentes al transporte de electricidad y se asocian a las características de las infraestructuras del sistema. Se dividen en fijas y variables [10].

- Pérdidas técnicas fijas: Causadas por deficiencias físicas, como histéresis, pérdidas en el núcleo de los transformadores y el efecto corona de las líneas de transmisión. Proporcionales al voltaje e independientes del flujo de intensidad. Puesto que el voltaje apenas varía de su valor nominal, estas pérdidas suelen considerarse como constantes que dependen de la calidad de la línea. Suponen entre un 20 y un 40% de las pérdidas técnicas totales.  $P \propto V$ ;
- Pérdidas técnicas variables: Causadas por el flujo de las intensidades por las líneas y transformadores de la red. Relacionadas directamente con el transporte de la energía y son directamente proporcionales a la resistencia de los conductores y al cuadrado de la intensidad.  $P \propto I^2, R$ ;

Esta definición justifica el hecho de que sean inherentes al transporte de energía, siendo entonces consideradas como un efecto colateral no deseado consecuencia del transporte de energía de un nodo a otro.



*Ilustración 7. Redes actuales de Santiago y Maio.*

#### 4.1. AUMENTO DE LA GENERACIÓN MEDIANTE FUENTES DE ENERGÍA RENOVABLES

El objetivo final del presente trabajo es determinar si es posible el funcionamiento de la red abasteciendo al sistema únicamente con energías renovables. Dicho proyecto nace de la ambición del gobierno de tener una generación libre de emisiones, que además permita al país no depender de países productores de combustibles fósiles. En este sentido, Cabo Verde, es un país fuertemente dependiente del International Oil Market, ya que como se ha detallado anteriormente, la gran mayoría de la potencia de generación instalada en las islas depende de la quema de combustibles diésel. [11]

La intención del estudio es poder asegurar si las condiciones climatológicas de Cabo Verde son suficientes para satisfacer las necesidades de los parques de generación a través de energías renovables. Para ello, se proponen distintos casos de estudios en los cuales se aumenta paulatinamente la generación de energía proveniente de fuentes renovables, disminuyendo al mismo tiempo la generación proveniente de la quema de combustibles fósiles. Se añaden nuevos puntos de generación, debido a la necesidad de disponer de nuevos parques de generación.

Se estudia el efecto que tiene la nueva generación comparando las pérdidas debidas a los flujos de energía.

Para estos nuevos casos de estudio, se añade un nuevo elemento a la simulación. Se propone terminar con los sistemas aislados de energía, incurriendo así en un sistema de mayor tamaño, que a su vez, resulte en un sistema más robusto capaz de asumir las variaciones en la demanda propias de un sistema eléctrico complejo. La posibilidad de tener una mayor potencia instalada es lo que permitirá al sistema responder de forma efectiva frente a las variaciones de la demanda. Del mismo modo, la unificación de ambos sistemas aislados permitirá en un futuro aumentar la demanda, posibilitando así al país continuar con su crecimiento sin que el sistema eléctrico lo bloquee.

<b>Nodo Inicial</b>	<b>Nodo Final</b>	<b>Tensión Inicial (kV)</b>	<b>Tension Final (kV)</b>	<b>R [p.u.]</b>	<b>X [p.u.]</b>	<b>B [p.u.]</b>
Conexión I	Conexión I'	20	138	0,1	0,8	-
Conexión II'	Conexión II	138	20	0,1	0,8	-

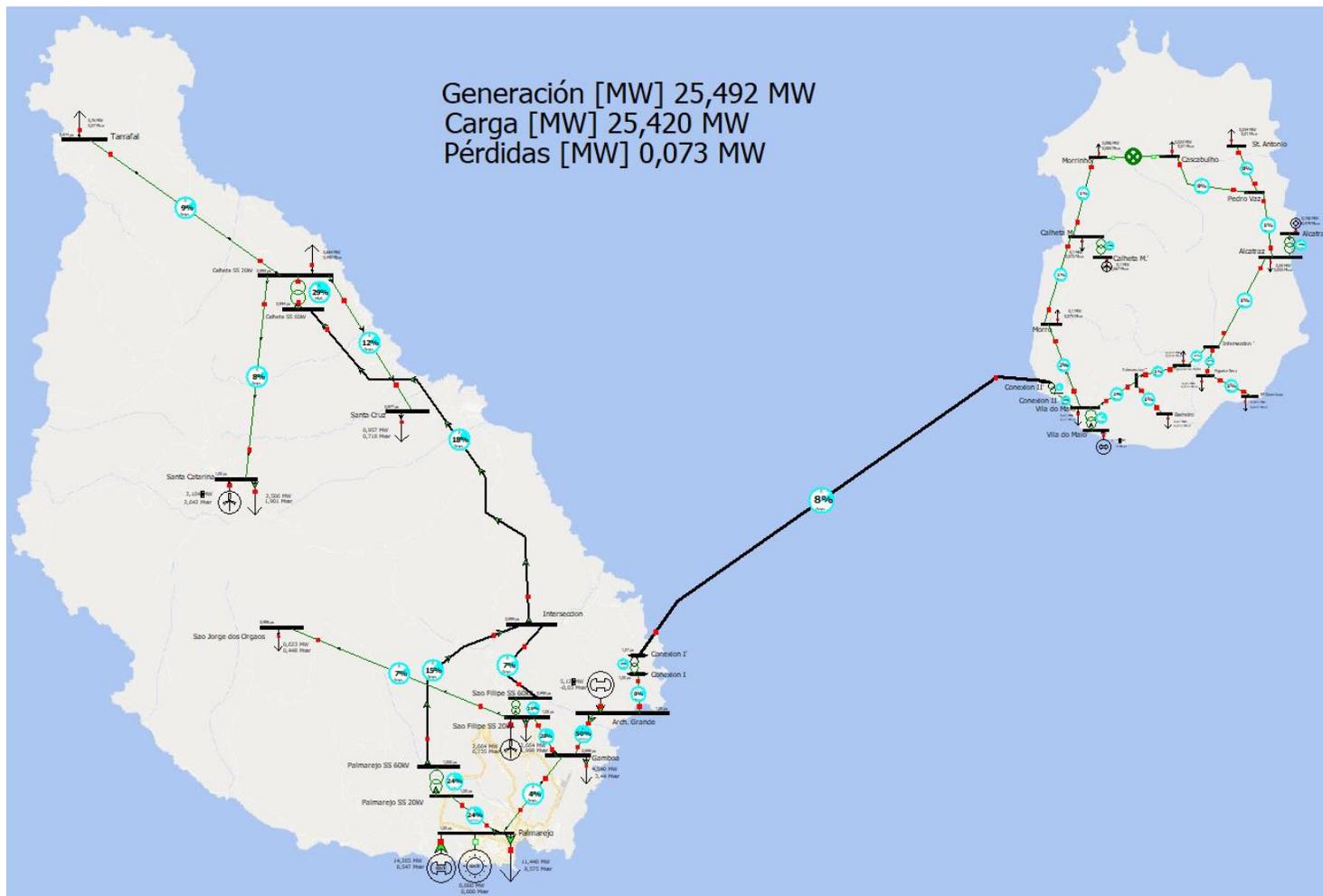
*Tabla 8. Parámetros de los transformadores que conectan las islas a través de la línea de 138kV*

#### 4.1.1. PRIMER CASO DE ESTUDIO (20%)

La primera simulación se realiza proponiendo una generación a través de fuentes renovables del 20% de la generación total del caso base. Para ello, se propone la creación de un parque eólico en el nodo Santa Catarina, con una producción de 2,164 MW, además del ya existente parque eólico del nodo Sao Filipe, que necesitaría inyectar 2,664 MW para satisfacer este supuesto.

También se propone instalar generación a través de energías renovables en la isla de Maio. En esta isla, la demanda es muy inferior, por lo que los parques de generación propuestos podrán satisfacer sin problema la generación propuesta. El sistema propuesto consta de un parque de generación fotovoltaica de 0,156MW en Alcatraz y un parque de generación Eólica en Calheta, que inyecte a la red 0,1 MW.

Se observa una disminución en las pérdidas del sistema. En este caso, el aumento de energía renovable no es demasiado notable, sino que la verdadera razón de esta disminución es que se ha aumentado la generación en el nodo de Palmarejo, consecuencia de disminuir la generación en Santa Catarina. La proximidad de la central de Palmarejo con el principal consumo de la red, situado en Praia, es la razón de que disminuyan las pérdidas intrínsecas al transporte de energía eléctrica.



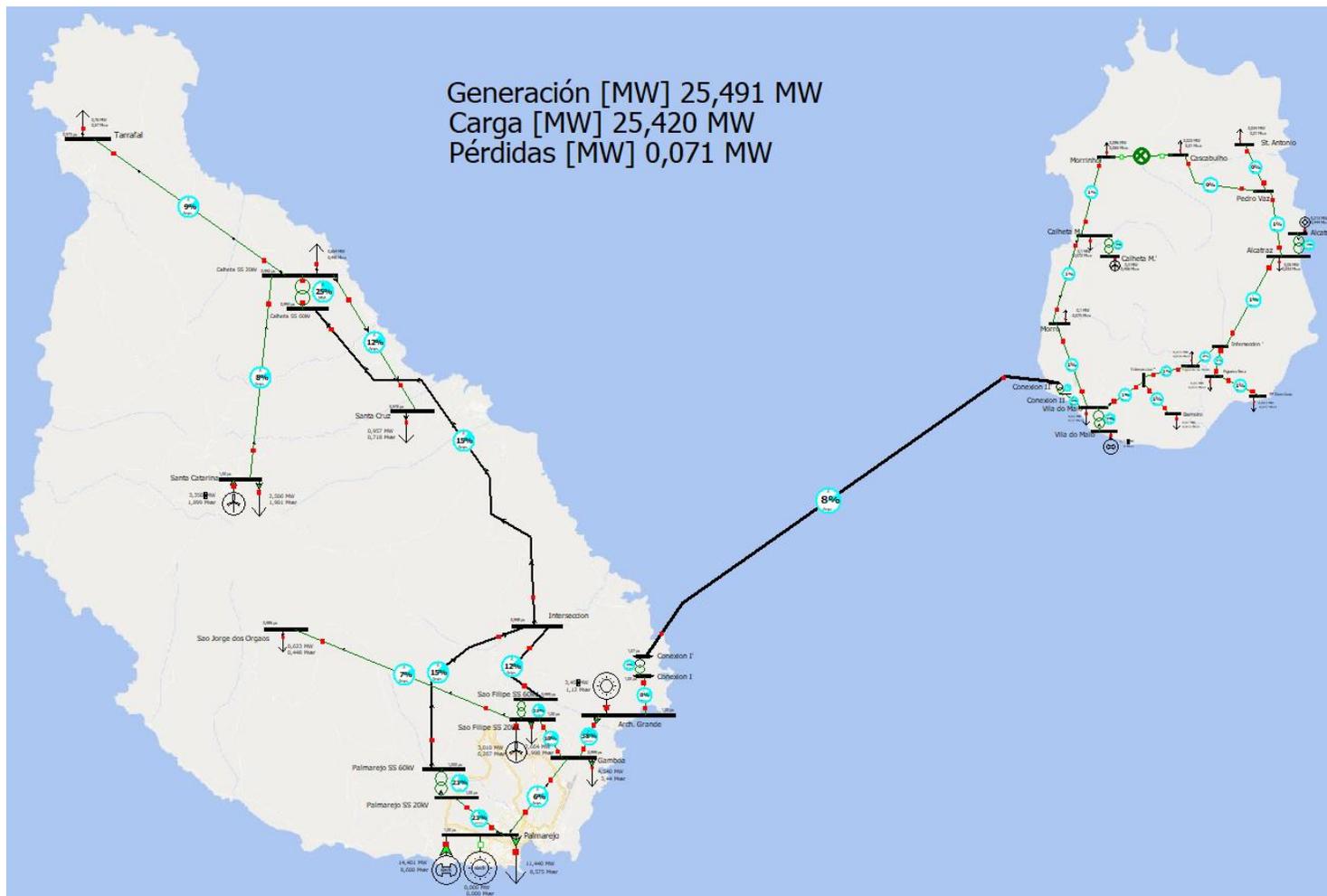
*Ilustración 8. Red unificada. Generación renovable cubre el 20% de la demanda.*

#### 4.1.2. SEGUNDO CASO DE ESTUDIO (40%)

El segundo caso de estudio en el que se introducen las energías renovables propone aumentar dicha generación hasta un 40% de la demanda del caso base. Manteniendo los mismos parques eólicos que en el caso anterior, se aumenta la generación requerida en cada parque hasta disponer de 3,35 MW en el caso de Santa Catarina y 3,01 MW en el caso de Sao Filipe. Adicionalmente, se propone un nuevo parque de generación fotovoltaica, situado en el nodo Achada Grande, que sea capaz de inyectar 3,45 MW a la red.

La red de Maio aumenta su generación en los nodos anteriormente propuestos como nodos generadores. Así, la nueva situación requiere 0,212MW al parque fotovoltaico de Alcatraz y 0,3MW al parque eólico de Calheta. En consecuencia, disminuye la potencia inyectada por los grupos alógenos, siendo esta 0,77MW.

Las pérdidas para este caso disminuyen sensiblemente, consecuencia del aumento de la generación en el nodo de Santa Catarina. Esto provoca que el flujo de carga por las líneas de 60kV sea menor. Atendiendo a la definición de pérdidas de potencia técnicas variables detallada con anterioridad, disminuir el flujo de carga en una línea larga conlleva la disminución de las pérdidas en dicha línea.



*Ilustración 9. Red unificada. Generación renovable cubre el 40% de la demanda.*

#### 4.1.3. TERCER CASO DE ESTUDIO (60%)

Se aumenta la generación proveniente de fuentes renovables de energía hasta el 60% de la demanda del caso base. En este caso, se mantiene prácticamente constante la generación en el nodo de Santa Catarina, pues se ha visto con anterioridad que, por el momento, es un buen valor de generación que minimiza las pérdidas en distribución. Para este caso, se disminuye la generación requerida en el parque fotovoltaico de Achada Grande hasta 2,5MW. Por otro lado, se aumenta considerablemente la generación requerida en el parque eólico del nodo de Sao Filipe hasta 7,68MW. Esto se realiza porque al disminuir la energía generada en el nodo de Achada Grande, se disminuye la saturación de la línea que une los nodos Ach. Grande con Gamboa. También se considera más realista proponer una mayor generación en un parque de generación eólico que en un parque de generación fotovoltaico. El único nodo con generación de energía no renovable es Palmarejo, cuya central ha disminuido ya en gran medida la inyección de energía a la red.

La situación ficticia de la red en este caso supone una descentralización de la generación energética. Como consecuencia de ello, disminuyen las pérdidas ya que la energía se está produciendo en puntos más cercanos a los nodos de mayor consumo.

La red de Maio no presenta grandes pérdidas pues la carga total de la red es baja. Igual que con la red de Santiago, se aumenta la generación en los nodos propuestos anteriormente, permitiendo que la generación de los grupos alógenos disminuya hasta 0,512 MW.



#### 4.1.4. CUARTO CASO DE ESTUDIO (80%)

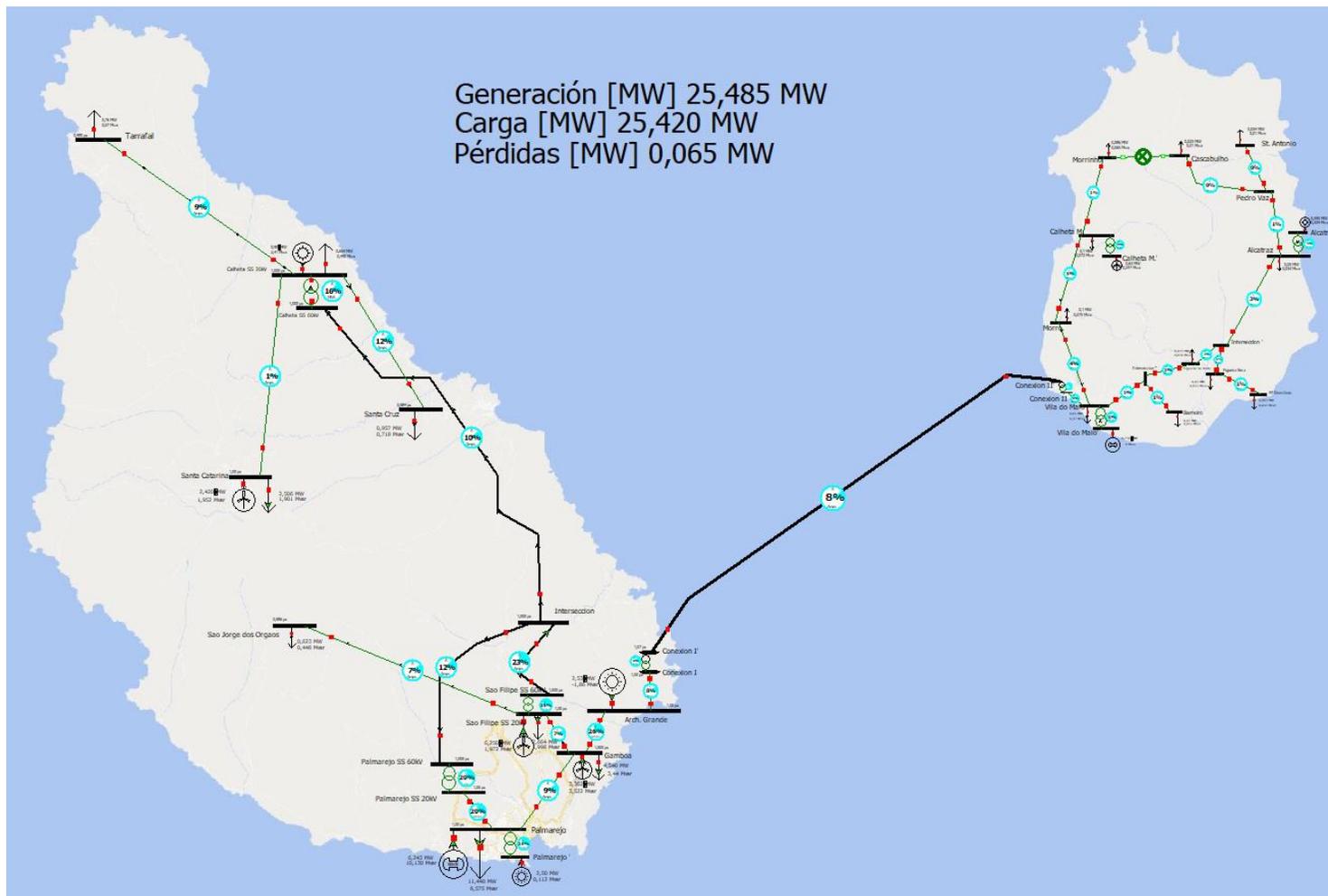
Continuando con el aumento de la generación de energía a través de fuentes renovables, se alcanza un porcentaje bastante considerable. Con el 80% de generación, se logra holgadamente satisfacer la demanda de todos los nodos ajenos a Praia, la capital. Incluso parte de la potencia requerida por Praia proviene ya del recurso renovable.

Para justificar este caso, se proponen las siguientes generaciones. Continuando con la descentralización de la generación, se proponen nuevos parques de generación de menor capacidad que disminuyan aún más los flujos de carga.

<b>Nodo</b>	<b>Fuente</b>	<b>P[MW]</b>	<b>Q[MVAr]</b>
Palmarejo '	Solar	2,5	0,112
Palmarejo	Diésel	6,243	10,13
Gamboa	Eólica	3,362	3,522
Sao Filipe SS 20kV	Eólica	6,25	1,972
Ach. Grande	Solar	2,53	-1,86
Santa Catarina	Eólica	2,42	1,952
Calheta SS 20kV	Solar	0,654	0,49
Vila do Maio'	Diésel	0,256	0
Calheta M.	Eólica	0,63	0,247
Alcatraz '	Solar	0,395	0,329

*Tabla 9. Generación renovable del sistema cubre el 80% de la demanda. Valores de generación y fuente de energía.*

Este modelo reduce todavía más la capacidad utilizada de las líneas. Las pérdidas disminuyen en consecuencia. La generación por combustión de diésel disminuye hasta 6,243MW.



*Ilustración 11. Red unificada. Generación renovable cubre el 80% de la demanda.*

#### 4.1.5. QUINTO CASO DE ESTUDIO (100%)

Finalmente, se simula la red de las islas de Santiago y Maio con un modelo basado en su totalidad en generación utilizando únicamente fuentes de energía renovable.

<b>Nodo</b>	<b>Fuente</b>	<b>P[MW]</b>	<b>Q[MVAr]</b>
Palmarejo	Eólica	11,847	8,668
Gamboa	Eólica	0	0
Sao Filipe SS 20kV	Eólica	6,25	3,111
Ach. Grande	Solar	2,53	1,76
Santa Catarina	Eólica	2,67	1,78
Calheta SS 20kV	Solar	0,9	2,54
Vila do Maio'	Solar	0,256	0
Calheta M.	Eólica	0,63	0,247
Alcatraz '	Solar	0,395	0,329

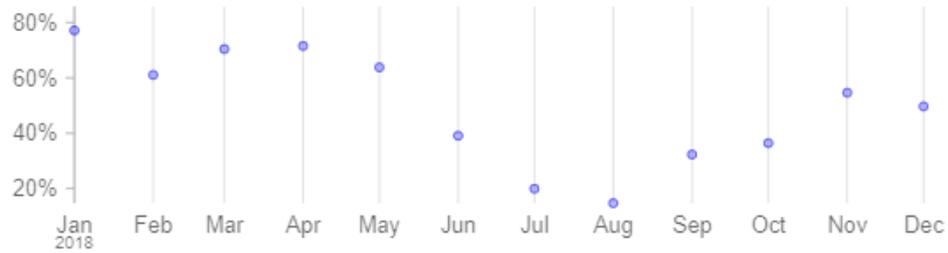
*Tabla 10. Generación renovable del sistema cubre por completo la demanda. Valores de generación y fuente de energía.*

Para este caso, se ha retornado parte de la generación al nudo de Palmarejo. Se propone disponer en Palmarejo un parque eólico que permita generar, al menos, la totalidad de la carga demandada en Praia, disminuyendo considerablemente el flujo de cargas de la red.

En efecto, se observa una disminución considerable de las pérdidas en la red.

Las condiciones climáticas de Cabo Verde permiten llevar a cabo tan ambicioso proyecto. El avance y mejora de las tecnologías aplicadas a la obtención de energía mediante el aprovechamiento de fuentes renovables permiten llevar a cabo los parques propuestos, como se puede comprobar gracias a la información meteorológica y los datos de posibilidad de generación ofrecidos por [ninjarenewables.com](http://ninjarenewables.com) [12].

### Monthly capacity factor

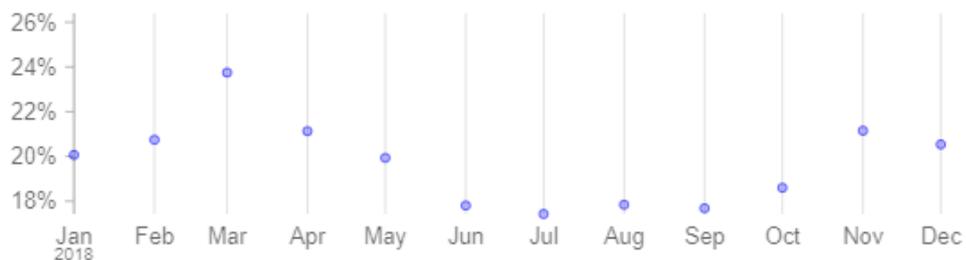


Total mean capacity factor: 49.1%

*Ilustración 12. Capacidad de generación de energía eólica respecto a potencia instalada. Fuente: Ninjas Renewable.*

La simulación en Ninjas renewable muestra como el clima ventoso en Santiago permitiría a los parques eólicos propuestos generar a una media anual de casi el 50% de la capacidad instalada.

### Monthly capacity factor



Total mean capacity factor: 19.7%

*Ilustración 13. Capacidad de generación de energía fotovoltaica respecto a potencia instalada. Fuente: Ninjas Renewable.*

Para el caso de la generación fotovoltaica, la capacidad de generación respecto a la potencia instalada es mucho menor, sin embargo es una buena capacidad para tratarse de generación fotovoltaica.

Estudios como ‘Cape Verde and it’s Bold Renewable Target’ sitúan a Cabo Verde como un lugar excepcional para generación de energía mediante la instalación de parques eólicos [11]. Esto es debido a que el viento puede soplar en cabo verde durante periodos largos de tiempo, de incluso 24 horas al día. El ‘Island Studies Journal’ refuerza la

posibilidad de apostar por la energía eólica como gran alternativa a los combustibles fósiles aportando datos que confirman el viento como una constante en las islas [2].

Island	Installed wind capacity (MW)	Electricity produced (MWh)	Wind speed (m/s)
Santiago	9.35	31,383	8.2
São Vicente	5.95	19,507	9.6
Sal	7.65	16,541	8.8
Boa Vista	2.55	7,959	8.9
<b>Total</b>	<b>25.50</b>	<b>75,291</b>	<b>8.9 (average)</b>

*Ilustración 14. Velocidades medias del viento en Cabo Verde*

Las altas y constantes rachas de viento posibilitan la construcción de nuevos parques eólicos, no solo en la isla de Santiago.

Además, la isla está constantemente expuesta al sol, con una gran cantidad de horas diarias aprovechables para la generación de energía fotovoltaica. Esto sitúa a la energía fotovoltaica como un buen soporte a la energía eólica. El potencia de la energía fotovoltaica estimado es  $6\text{kWh}/\text{m}^2/\text{día}$  [13].

Los parques propuestos en estos casos de estudio no existen en la actualidad en Cabo Verde. Sin embargo, existe la posibilidad de llevar a cabo la construcción de dichos parques de generación con las últimas tecnologías en materia de energías renovables.

La red propuesta permite además tener un aumento considerable de la demanda, gracias en parte a la baja generación de los parques propuestos en la isla de Maio.

La generación de energía partiendo de fuentes renovables conlleva la existencia de baterías que permitan el almacenamiento de la energía, asegurando así el suministro de energía cuando no se disponga de las fuentes necesarias para producirla. De no disponer de estas baterías, si se dan periodos prolongados con baja producción energética, la red podría incurrir en el fallo conocido como ‘blackout’. Éste ocurre cuando la generación en un sistema de energía es incapaz de satisfacer la demanda, o el sistema no es capaz de transportar esta energía desde los puntos de generación hasta los puntos de consumo debido a ineficiencias o fallos en la red. Estas baterías permiten al sistema funcionar en isla, aislando y protegiendo al sistema en caso de ocurrir un fallo en la red. Aseguran el funcionamiento correcto del sistema durante unas horas desde que ocurra un fallo, disminuyendo así el número de horas de apagón o servicio deficiente [14].

El almacenamiento energético se erige como clave para la transición energética. Permiten mejorar la calidad del suministro eléctrico, asegurar la estabilidad y fiabilidad del sistema aprovechando la energía generada por fuentes renovables. Éste último punto, que refiere a estabilidad y fiabilidad, cobra especial importancia en un país como Cabo Verde. Las conexiones ilegales a la red son una de las principales causas de ‘blackouts’ y, aunque han disminuido en los últimos años, es de vital importancia para el futuro mejorar la estabilidad de la red. Por tanto, la implantación de sistemas inteligentes como el almacenamiento en baterías puede ser clave para identificar estas conexiones ilegales.

Las redes de distribución son un pilar base para la descarbonización de la economía. Como se ha demostrado, la demanda de Cabo Verde puede satisfacerse desde una generación totalmente renovable. Es cierto que la implantación de la energía renovable puede suponer una inversión elevada, teniendo en cuenta además que se ha propuesto un modelo de energía donde la generación no se concentra en un único punto.

Sin embargo, el beneficio quizás más importante del modelo propuesto, más allá de la disminución de las pérdidas de distribución de la energía, es la reducción del impacto medioambiental provocado al abandonar la generación de energía por grupos alógenos o motores diésel. Tomando la energía total generada en 2015, que según recoge el informe del perfil energético de Cabo Verde fue de 31kToe y de las cuales el 87% fue generada mediante la quema de combustibles fósiles, puede determinarse las toneladas de CO<sub>2</sub> vertidas a la atmosfera durante el transcurso del año. El gasto energético equivale a 313661.1MWh, de los cuales aproximadamente 225658MWh fueron consumidos en la isla de Santiago. El propio informe cifra este consumo de fuel-diésel en un vertido a la atmosfera de 0,42 toneladas de CO<sub>2</sub> [13].

Desvincular la generación de energía del diésel-fuel trae consigo otro efecto colateral. Hasta la fecha, el coste de producción del kWh en Cabo Verde asciende hasta los 0.3€, resultando en uno de los diez países donde resulta más caro, del orden de tres veces mayor que el precio en la Unión Europea. Este precio tan elevado es consecuencia, entre otros factores, de la imposibilidad de obtención de recursos naturales como petróleo. Esto convierte a Cabo Verde en un país fuertemente dependiente del ‘International Oil Market’, siendo vulnerable a fluctuaciones en el precio del combustible. Otros factores como las elevadas pérdidas causadas por las conexiones ilegales y la obligación de

transportar el combustible por tener sistemas eléctricos aislados terminan por definir este coste energético tan elevado.

Finalmente, se ha estudiado la posibilidad de añadir mayor capacidad de desalinización de agua salada, ya que Cabo Verde no dispone prácticamente de agua dulce. El carácter volcánico de las islas, unido a la desertificación, agravada por las arenas del desierto africano traídas por los fuertes vientos, no permiten la acumulación de agua dulce en las islas de forma natural. Surge entonces la necesidad de disponer de cierta generación de agua apta para el consumo humano.

Se consideró la población actual de Santiago, estimada en 309.633 habitantes y el consumo medio de agua, que puede estimarse alrededor de 100 litros por habitante y día atendiendo a datos del instituto nacional de estadística [15]. El gasto energético de las plantas desalinizadoras depende de la tecnología escogida, pero es razonable tomar  $3,4 \text{ kWh/m}^3$  como un valor representativo del consumo real. [16]

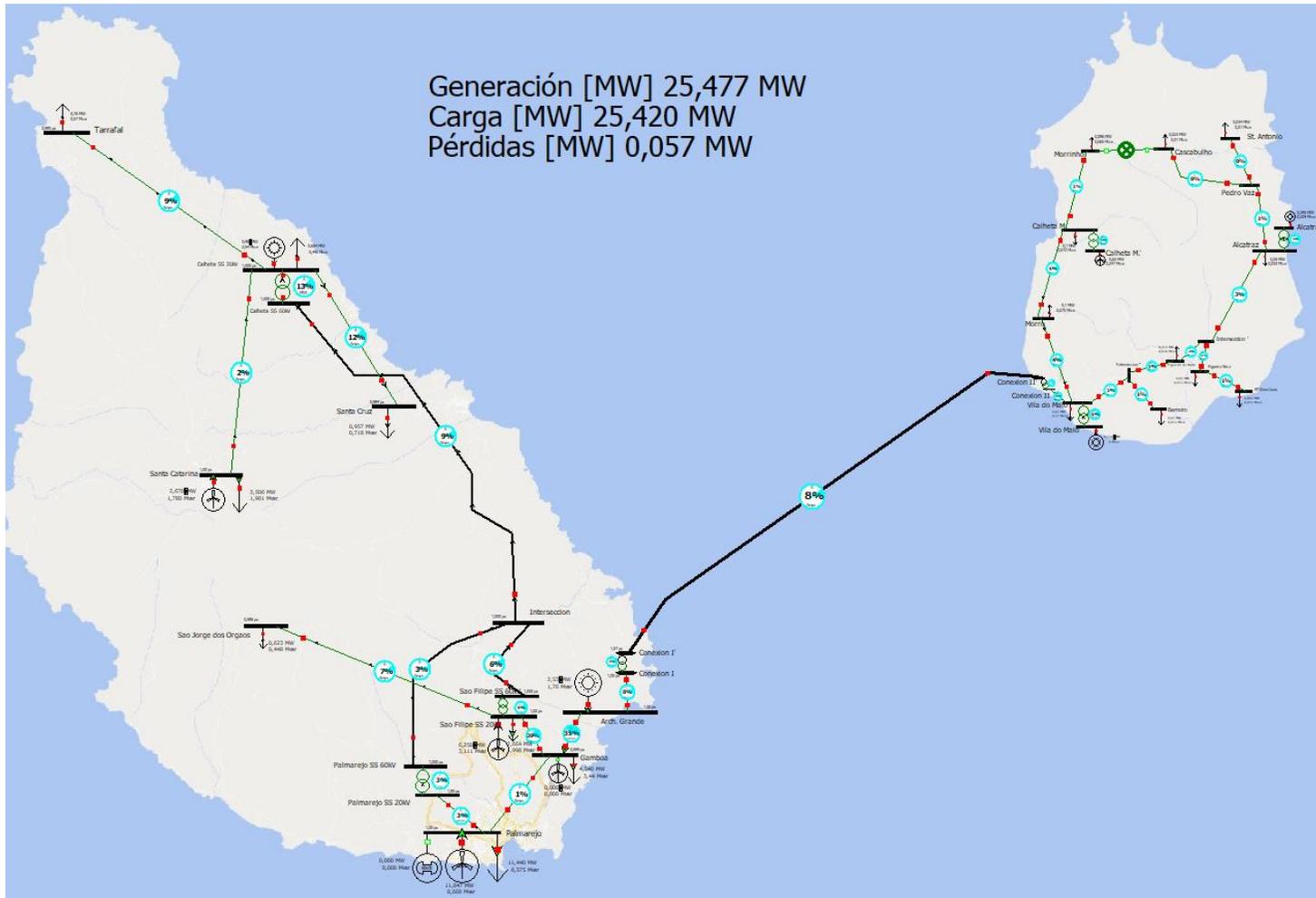
$$E = 309633 \text{ habitantes} * 0,1 \text{ m}^3 / \text{habitante} * 3,4 \text{ kWh/m}^3;$$

Esto da un gasto energético igual a 105275,22 kWh.

Considerando que la planta desalinizadora funcione durante las 24 horas del día, esto nos deja una potencia necesaria igual 4,39 MW.

<b>Nodo</b>	<b>Fuente</b>	<b>P[MW]</b>	<b>Q[MVAr]</b>
Palmarejo	Eólica	11,853	13,383
Gamboa	Eólica	4,4	2,809
Sao Filipe SS 20kV	Eólica	6,25	2,264
Ach. Grande	Solar	2,53	-1,86
Santa Catarina	Eólica	2,67	1,78
Calheta SS 20kV	Solar	0,9	2,48
Vila do Maio'	Solar	0,256	0
Calheta M.	Eólica	0,63	0,247
Alcatraz '	Solar	0,395	0,329

*Tabla 11. Generación del sistema a partir de energías renovables considerando la planta desalinizadora. Valores de generación y fuentes de energía.*



*Ilustración 15. Red unificada. La generación renovable cubre por completo la demanda.*



## 4.2. UTILIDAD Y ESTADO DE “NET METERING”

“Net Metering” es una forma de comercio que involucra al propio consumidor y su distribuidor. En este caso, el consumidor es al mismo tiempo consumidor y generador. Esto puede suceder cuando el consumidor disponga en su vivienda un pequeño sistema generador, como puedan ser placas solares. Mediante este contrato, el consumidor consume energía de la red, mientras que si está produciendo un sobrante de energía en su vivienda, la vierte a la red. Gracias a esto, el consumidor adquiere una ventaja, como pueda ser una rebaja en la factura eléctrica o una compensación en kWh gratuitos por cada Kwh vertido a la red. Además, el consumidor está consumiendo menos energía de la red pues tiene su propia generación.

Cabo Verde contempla el ‘Net Metering’ en un decreto lanzado en 2011. En él, se permite la autogeneración hasta 100kW. Sin embargo, la ley finalmente no fue implementada, principalmente por dos motivos:

- El límite permitido es demasiado bajo (100 kW).
- Electra, empresa encargada de la distribución de la energía, parece temer pérdidas debido al autoconsumo y a pagos por compensación.

Este sistema parece representar el futuro de las redes eléctricas. Al igual que las anteriormente citadas baterías, la autoproducción de energía controlada tendrá un efecto positivo en cuanto a la estabilidad y fiabilidad de las redes. Al estar produciendo la energía que se está consumiendo en el mismo punto, es previsible que la vivienda se vea mucho menos afectada antes fallos imprevisibles en la distribución o cortes en la generación de energía. Es decir, al generar la energía que consume, la vivienda puede funcionar como un sistema aislado frente a la totalidad del sistema eléctrico cuando se produzcan fallos que impidan el correcto funcionamiento, asegurando así la continuidad en el funcionamiento del sistema para el consumidor final.

Del mismo modo, al estar generando parte o la totalidad de la energía demandada, provoca una disminución en los flujos de carga de las líneas de distribución. Como se ha comentado y demostrado anteriormente, disminuir el flujo de carga en las líneas de distribución disminuye las pérdidas eléctricas variables [17].

## 5. CONCLUSIONES

Volviendo a los objetivos planteados previamente al desarrollo del presente trabajo, se puede concluir que se han cubierto en su totalidad.

Tras realizar el estudio, ciertas conclusiones se pueden tomar como resultados del mismo. En primer lugar, las redes de Santiago y Maio reales presentan elevadas pérdidas debidos al incontrolable número de conexiones ilegales existentes.

La falta de transparencia de Electra, empresa encargada de la distribución de la energía, y del gobierno, dificulta la obtención de datos precisos relacionados con la red, así como perjudica el desarrollo de la red.

Las líneas de distribución de la red eléctrica están preparadas para asumir una demanda mucho mayor, lo cual podría darse en el futuro, con la llegada de nuevas tecnologías e industrias a un país sustentado principalmente por el turismo en la actualidad.

A través de los casos estudiados, se puede asegurar que la red actual de Cabo Verde puede asumir la transición energética hacia una generación 100% renovable, basada principalmente en la energía eólica, y en menor medida, la energía fotovoltaica. También queda en evidencia la necesidad de disponer de baterías que permitan paliar la no gestionabilidad de las fuentes necesarias para la generación, es decir, el viento y la energía solar. De este modo, es posible disponer de energía almacenada incluso cuando las fuentes renovables no están disponibles durante unas horas.

La simulación de los distintos casos permite identificar la mejor distribución de los nodos de generación para lograr minimizar las pérdidas para la distribución de cargas representada.

Acabar con el sistema de islas como sistemas aislados de energía repercute positivamente en aspectos como la estabilidad y la fiabilidad de las redes, pues el sistema eléctrico de mayor tamaño puede reaccionar mejor frente a variaciones de la demanda, evitando así fallos por desabastecimiento.

La integración de las fuentes de energía renovables como pilar de la generación del sistema implica la reducción de emisiones contaminantes a la atmósfera, tanto de CO<sub>2</sub> como de otros contaminantes peligrosos (óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno o la contaminación por partículas o materia particulada).

La red propuesta permite integrar en el sistema nuevas plantas desalinizadoras que ayuden a paliar la falta de agua dulce. Estimando la cantidad de agua consumida por habitante, los habitantes actuales de la isla de Santiago y el coste energético de llevar a cabo el proceso de desalinización, se ha estimado la potencia necesaria para abastecer de agua a la población de la isla. Integrando esa demanda en la red previamente diseñada, se observa que la red puede satisfacer la demanda.

Finalmente, se identifica al Net Metering como un posible modelo de futuro que asegure la generación de energía y otorgue la robustez necesaria al sistema eléctrico para minimizar las consecuencias del fallo en la red o posibles desabastecimientos por falta de generación en centrales.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] West Africa. Land User And Land Cover Dynamics. [En línea]. Disponible en: [https://eros.usgs.gov/westafrica/sites/default/files/201912/160422\\_CapeVerde\\_c2000\\_1ulc\\_english\\_0.jpg](https://eros.usgs.gov/westafrica/sites/default/files/201912/160422_CapeVerde_c2000_1ulc_english_0.jpg). Consultado en: 23-nov-2019.
- [2] Options for achieving Cape Verde’s 100% renewable electricity goal: a review, Island Studies Journal, 2019. [En línea] Disponible en: <https://doi.org/10.24043/isj.73>. Consultado en: 13-dic-2019.
- [3]. Oficina de información diplomática. Ficha País Republica de Cabo Verde. [En línea]. Disponible en: [http://www.exteriores.gob.es/Documents/FichasPais/CABOVERDE\\_FICHA%20PAIS.pdf](http://www.exteriores.gob.es/Documents/FichasPais/CABOVERDE_FICHA%20PAIS.pdf). Consultado en: 13-dic-2019.
- [4] Pereira, Claudio Franklim, Análisis de la Integración de Tecnologías Smart Grid en Sistemas Insulares con Elevada Penetración de Energías Renovables, EINA 2019. Disponible en: <http://zaguan.unizar.es>.
- [5] Intended Nationally Determined Contribution: Low – Carbon Development Strategy for Cabo Verde. Mnisterio de Ambiente, Habitação e Odenamento do Território. [En línea]. Disponible en: [https://www4.unfccc.int/sites/ndcstaging/PublishedDocuments/Cabo%20Verde%20First/Cabo\\_Verde\\_INDC\\_.pdf](https://www4.unfccc.int/sites/ndcstaging/PublishedDocuments/Cabo%20Verde%20First/Cabo_Verde_INDC_.pdf). Consultado en: 26-dic-2019.
- [6] Gómez Jordán, Almudena. Análisis de Abastecimiento Energético en un Sistema Aislado, UPM. [En línea]. Disponible en: [http://oa.upm.es/36518/1/TFG\\_Almudena\\_Gomez\\_Jordan.pdf](http://oa.upm.es/36518/1/TFG_Almudena_Gomez_Jordan.pdf). Consultado en: 06-ene-2020.
- [7] PowerWorld Corporation. “PowerWorld Simulator educational 2020”.
- [8] El Escenario del Sector de la Industria en Cabo Verde, PROEXCA, Gobierno de Canarias. [En línea] Disponible en: <https://www.proexca.es/publicaciones/post/13329/el-escenario-del-sector-de-la-industria-en-cabo-verde>. Consultado en: 05-ene-2020
- [9] © Bing, Mapas Bing.

- [10] Arias, Lusverlyn, Programa de Rehabilitación de Redes Eléctricas. [En línea]. Disponible en: <https://redeselectricasrd.cdeee.gob.do/que-y-como-son-las-perdidas-electricas-se-esta-haciendo-para-reducirlas/>. Consultado en: 15-ene-2020
- [11] CAPE VERDE and its Bold Renewable Energy, Africa Spotlight. Alternative Energy Africa Magazine, 2018.
- [12] Ninja Renewable. Disponible en: <https://www.renewables.ninja/>
- [13] Energy Profile of Cape Verde, 2016. [En línea]. Disponible en: [https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/20498/Energy\\_profile\\_Cape%20Verde.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/20498/Energy_profile_Cape%20Verde.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Consultado en: 15-ene-2019.
- [14] i-DE Pone en marcha el primer Sistema de Almacenamiento con Baterías para Redes en España, Iberdrola 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.iberdrola.com/sala-comunicacion/noticias/detalle/i-de-pone-marcha-primer-sistema-almacenamiento-baterias-para-redes-espana>. Consultado en: 15-ene-2019
- [15] Estadística sobre el Suministro y Saneamiento del Agua., Instituto Nacional de Estadística, 2018. [En línea] Disponible en: [https://www.ine.es/prensa/essa\\_2016.pdf](https://www.ine.es/prensa/essa_2016.pdf). Consultado en: 05-ene-2020.
- [16] El consumo de energía en la desalación de agua de mar por ósmosis inversa: situación actual y perspectivas, Hispagua. [En línea]. Disponible en: [http://hispagua.cedex.es/sites/default/files/hispagua\\_articulo//Ingcivil/2007\\_148\\_113.pdf](http://hispagua.cedex.es/sites/default/files/hispagua_articulo//Ingcivil/2007_148_113.pdf). Consultado en: 05-ene-2020.
- [17] ROUX, Andréanne, SHANKER, Anjali, Net Metering and PV Self-Consumption in Emerging Countries, International Energy Agency, 2018.
- [18] Siemens Gamesa RENEWABLE ENERGY- SG 2.1-114. [En línea]. Disponible en: <https://www.siemensgamesa.com/es-es/-/media/siemensgamesa/downloads/es/products-and-services/onshore/brochures/siemens-gamesa-onshore-wind-turbine-sg-2-1-114-es.pdf>. Consultado en: 17-ene-2020.

[19] Siemens Gamesa RENEWABLE ENERGY- SG 3.4-132. [En línea]. Disponible en: <https://www.siemensgamesa.com/es-es/-/media/siemensgamesa/downloads/es/products-and-services/onshore/brochures/siemens-gamesa-onshore-wind-turbine-sg-3-4-132-es.pdf>. Consultado en: 17-ene-2020.

[20] Siemens Gamesa RENEWABLE ENERGY- SG 5.0-145. [En línea]. Disponible en: <https://www.siemensgamesa.com/es-es/-/media/siemensgamesa/downloads/es/products-and-services/onshore/brochures/siemens-gamesa-wind-turbine-4-x-platform-brochure-es.pdf>. Consultado en: 17-ene-2020.

## ANEXO I: PARÁMETROS DE LAS REDES

### *Santiago 20 kV*

Nudo inicial	Nudo final	Distancia [Km]	R/km [p.u./km]	R [p.u.]	X/km [p.u./km]	X [p.u.]	G [p.u./km]	G [p.u.]	Bc [p.u./km]	Bc [p.u.]
Palmarejo	Palmarejo SS 20kV	0,2	0,0065	0,0013	0,0094	0,00188	4,00E-06	8,00E-07	1,22E-04	2,44E-05
Palmarejo	Gamboa	7,06	0,0065	0,04589	0,0094	0,066364	4,00E-06	2,82E-05	1,22E-04	8,61E-04
Gamboa	Ach. Grande	0,147	0,0065	0,0009555	0,0094	0,0013818	4,00E-06	5,88E-07	1,22E-04	1,79E-05
Gamboa	Sao Filipe SS 20kV	0,3	0,0065	0,00195	0,0094	0,00282	4,00E-06	1,20E-06	1,22E-04	3,66E-05
Sao Filipe SS 20kV	Sao Jorge dos Orgaos	17	0,0065	0,1105	0,0094	0,1598	4,00E-06	6,80E-05	1,22E-04	2,07E-03
Calheta SS 20kV	Santa Catarina	13,706	0,0065	0,089089	0,0094	0,1288364	4,00E-06	5,48E-05	1,22E-04	1,67E-03
Calheta SS 20kV	Santa Cruz	12,537	0,0065	0,0814905	0,0094	0,1178478	4,00E-06	5,01E-05	1,22E-04	1,53E-03
Calheta SS 20kV	Tarrafal	18,82	0,0065	0,12233	0,0094	0,176908	4,00E-06	7,53E-05	1,22E-04	2,30E-03

### *Santiago 60 kV*

Nudo inicial	Nudo final	Distancia [Km]	R/km [ohm/km]	R [p.u.]	X/km [Ohm/km]	X [p.u.]	G [mho/km]	G [p.u.]	Bc [mho/km]	Bc [p.u.]
Palmarejo SS 60kV	Interseccion	13	0,119821	0,004327	0,281938	0,010181	2,74E-06	0	-1,90E-11	0,012827
Sao Filipe SS 60kV	Interseccion	7	0,119821	0,00233	0,281938	0,005482	2,74E-06	0	-1,90E-11	0,00691
Interseccion	Calheta SS 60kV	25	0,119821	0,00832	0,281938	0,019578	2,74E-06	0	-1,90E-11	0,024665

*Redes de distribución isla de Maio 20kV*

<b>Nudo inicial</b>	<b>Nudo final</b>	<b>Distancia [Km]</b>	<b>R/km [p.u./km]</b>	<b>R [p.u.]</b>	<b>X/km [Ohm/km]</b>	<b>X [p.u.]</b>	<b>G [p.u./km]</b>	<b>G [p.u.]</b>	<b>Bc [p.u./km]</b>	<b>Bc [p.u.]</b>
Vila do Maio	Morro	6,63	0,0065	0,043095	0,0094	0,062322	4,00E-06	2,65E-05	1,22E-04	8,09E-04
Morro	Calheta M.	6,37	0,0065	0,041405	0,0094	0,059878	4,00E-06	2,55E-05	1,22E-04	7,77E-04
Calheta M.	Morrinho	6,5	0,0065	0,04225	0,0094	0,0611	4,00E-06	2,60E-05	1,22E-04	7,93E-04
Morrinho	Cascabulho	6	0,0065	0,039	0,0094	0,0564	4,00E-06	2,40E-05	1,22E-04	7,32E-04
Cascabulho	Pedro Vaz	7	0,0065	0,0455	0,0094	0,0658	4,00E-06	2,80E-05	1,22E-04	8,54E-04
Pedro Paz	St. Antonio	1,744	0,0065	0,011336	0,0094	0,0163936	4,00E-06	6,98E-06	1,22E-04	2,13E-04
Pedro Paz	Alcatraz	4	0,0065	0,026	0,0094	0,0376	4,00E-06	1,60E-05	1,22E-04	4,88E-04
Alcatraz	Intersección '	6,8	0,0065	0,0442	0,0094	0,06392	4,00E-06	2,72E-05	1,22E-04	8,30E-04
Interseccion '	F. Seca	1,5	0,0065	0,00975	0,0094	0,0141	4,00E-06	6,00E-06	1,22E-04	1,83E-04
F. Seca	R <sup>a</sup> Dom Joao	4,7	0,0065	0,03055	0,0094	0,04418	4,00E-06	1,88E-05	1,22E-04	5,73E-04
Interseccion '	F. da Horta	1,5	0,0065	0,00975	0,0094	0,0141	4,00E-06	6,00E-06	1,22E-04	1,83E-04
F. da Hosta	Interseccion ''	3,95	0,0065	0,025675	0,0094	0,03713	4,00E-06	1,58E-05	1,22E-04	4,82E-04
Interseccion ''	Barreiro	4,17	0,0065	0,027105	0,0094	0,039198	4,00E-06	1,67E-05	1,22E-04	5,09E-04
Interseccion ''	Vila do Maio	4,35	0,0065	0,028275	0,0094	0,04089	4,00E-06	1,74E-05	1,22E-04	5,31E-04

*Parámetros línea interconexión 20kV.*

<b>Nudo inicial</b>	<b>Nudo final</b>	<b>Distancia [Km]</b>	<b>R/km [p.u./km]</b>	<b>R [p.u.]</b>	<b>X/km [p.u./km]</b>	<b>X [p.u.]</b>	<b>G [p.u./km]</b>	<b>G [p.u.]</b>	<b>Bc [p.u./km]</b>	<b>Bc [p.u.]</b>
Ach. Grande	Conexión 1	0,2	0,0065	0,0013	0,0094	0,00188	4,00E-06	8,00E-07	1,22E-04	2,44E-05
Vila do Maio	Conexión II	0,2	0,0065	0,0013	0,0094	0,00188	4,00E-06	8,00E-07	1,22E-04	2,44E-05

*Parámetros línea interconexión 138kV*

<b>Nudo inicial</b>	<b>Nudo final</b>	<b>Distancia [Km]</b>	<b>R/km [ohm/km]</b>	<b>R [p.u.]</b>	<b>X/km [Ohm/km]</b>	<b>X [p.u.]</b>	<b>G [mho/km]</b>	<b>G [p.u.]</b>	<b>Bc [mho/km]</b>	<b>Bc [p.u.]</b>
Conexión I'	Conexión II'	28,78	0,106765	0,0025	0,675771	0,037	-4,50E-11	0,000005	4,40E-06	0,16

## ANEXO 2: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS GENERADORES EÓLICOS

### Especificaciones técnicas

Datos generales	
Potencia nominal	2.1 MW
Clase de viento	IEC IIA/IIIA/S
Control	Pitch y velocidad variable
Temperatura operativa estándar	Rango desde -20°C hasta 40°C <sup>(2)</sup>

Rotor	
Diámetro	114 m
Área de barrido	10.207 m <sup>2</sup>
Densidad de potencia	205,74 W/m <sup>2</sup>

Palas	
Longitud	56 m
Perfil	Siemens Gamesa
Material	Fibra de vidrio reforzada con resina de epoxi o poliéster

Torre	
Tipo	Diferentes tecnologías disponibles
Altura	68, 80, 93, 106, 125, 127, 153 m y según emplazamiento

Multiplicadora	
Tipo	3 etapas

Generador	
Tipo	Doblemente alimentado
Tensión	690 V AC
Frecuencia	50 Hz/60 Hz
Clase de protección	IP 54
Factor de potencia	0,95 CAP-0,95 IND en todo el rango de potencias <sup>(2)</sup>

<sup>(2)</sup> Diferentes versiones y kits opcionales para adaptar la máquina a altas o bajas temperaturas y ambientes salino y polvoriento.

<sup>(2)</sup> Factor de potencia en bornas de salida del generador en el lado de baja tensión antes de la entrada del transformador.

# Especificaciones técnicas



Datos generales	
Potencia nominal	3.465 MW
Clase de viento	IEC IA/IIA
Potencia flexible	3.3-3.75 MW
Control	Pitch y velocidad variable
Temperatura operativa estándar	Rango desde -20°C hasta 30°C <sup>(2)</sup>

Rotor	
Diámetro	132 m
Área de barrido	13.685 m <sup>2</sup>
Densidad de potencia	253,20 W/m <sup>2</sup>

Palas	
Longitud	64,5 m
Perfil	Siemens Gamesa
Material	Fibra de vidrio reforzada con resina de epoxi o poliéster

Torre	
Tipo	Diferentes tecnologías disponibles
Altura	84, 97, 101.5, 108, 114, 134, 154, 165 m y según emplazamiento

Multiplicadora	
Tipo	3 etapas

Generador	
Tipo	Doblemente alimentado
Tensión	690 V AC
Frecuencia	50 Hz/60 Hz
Clase de protección	IP 54
Factor de potencia	0,925 CAP-0,925 IND en todo el rango de potencias <sup>(2)</sup>

# Especificaciones técnicas



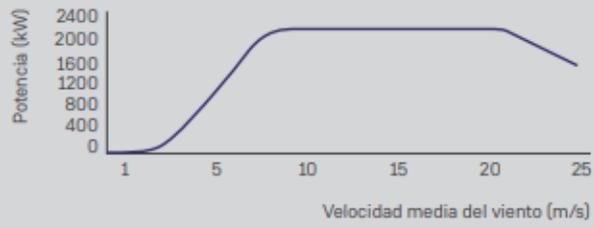
	SG 5.0-132	SG 5.0-145
<b>Datos generales</b>		
Potencia nominal	5.0 MW <sup>(1)</sup>	
Clase de viento	IEC IA	IEC IIB
Control	Pitch y velocidad variable	
Temperatura operativa estándar	Rango desde -20°C hasta 45°C (con de-rating) <sup>(2)</sup>	
<b>Rotor</b>		
Diámetro	132 m	145 m
Área de barrido	13.685 m <sup>2</sup>	16.513 m <sup>2</sup>
<b>Palas</b>		
Longitud	64,5 m	71 m
Perfil	Siemens Gamesa	
Material	Fibra de vidrio reforzada con resina de epoxi	
<b>Torre</b>		
Tipo	Diferentes tecnologías disponibles	
Altura	84 m y según emplazamiento	90, 102.5, 127.5 m y según emplazamiento
<b>Multiplicadora</b>		
Tipo	3 etapas	
<b>Generador</b>		
Tipo	Doblemente alimentado	
Tensión	690 V AC	
Frecuencia	50 Hz/60 Hz	
Clase de protección	IP 54	
Factor de potencia	0,9 CAP-0,9 IND en todo el rango de potencias <sup>(3)</sup>	

<sup>(1)</sup> Potencia flexible entre 4.5 y 5.0 MW.

<sup>(2)</sup> Diferentes versiones y kits opcionales para adaptar la máquina a altas o bajas temperaturas y ambientes salino y polvoriento.

<sup>(3)</sup> Factor de potencia en bornas de salida del generador en el lado de baja

### Curva de potencia SG 2.1-114



### Catálogo de alturas de torre

