

IMPACTO DEL TRANSPORTE FERROVIARIO EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS AISLADOS



Consejería Insular de Industria, Comercio,
Sector Primario y Bienestar Animal
Consejería de Industria



Alberto González
Director de Internacional



BLOQUE 1: INTRODUCCIÓN

1. Sistemas eléctricos aislados
2. Tipo de carga de un Ferrocarril
3. La interacción ferrocarril–red eléctrica

BLOQUE 2 — Metodología de Análisis

4. Elementos a Analizar
5. Metodología de Análisis
6. Variable y Criterios de Evaluación

BLOQUE 3 — Tenerife como caso de estudio

7. Tenerife: un sistema eléctrico aislado en transformación
8. El sistema eléctrico de Tenerife: situación actual y horizonte 2035–2036
9. Escenario ferroviario de referencia
10. Modelo eléctrico simplificado

BLOQUE 4 — Análisis de alternativas

11. Tenerife: un sistema eléctrico aislado en transformación
12. El sistema eléctrico de Tenerife: situación actual y horizonte 2035–2036
13. Escenario ferroviario de referencia
14. Modelo eléctrico simplificado

BLOQUE 5 — Conclusiones

Características de un sistema eléctrico aislado

1 MENOR CAPACIDAD DE RESPUESTA

Sin una interconexión eléctrica significativa, el sistema debe mantener localmente el equilibrio entre generación y demanda.



2 MAYOR SENSIBILIDAD

Las variaciones de potencia y los cambios en la localización de las cargas pueden tener una mayor repercusión sobre la operación de la red.



3 SISTEMA EN TRANSFORMACIÓN

La incorporación de renovables y electrónica de potencia modifica progresivamente las condiciones de operación del sistema.

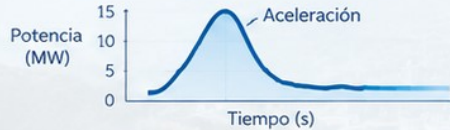


Por ello, la incorporación de una nueva carga de elevada potencia requiere analizar no solo la energía consumida, sino también su impacto sobre la operación de la red.

La carga ferroviaria: una demanda eléctrica singular

1 ELEVADA POTENCIA

Los trenes requieren potencias elevadas, especialmente durante la aceleración.



2 DEMANDA VARIABLE

La potencia varía rápidamente según el ciclo de conducción y el número de trenes en circulación.



3 CARGA MÓVIL

La demanda se desplaza a lo largo de la línea, modificando el punto desde el que se alimenta la red.



4 ALIMENTACIÓN MONOFÁSICA

En sistemas AC, la alimentación de tracción introduce una carga monofásica sobre una red trifásica, pudiendo generar desequilibrios entre fases.



5 POTENCIA BIDIRECCIONAL

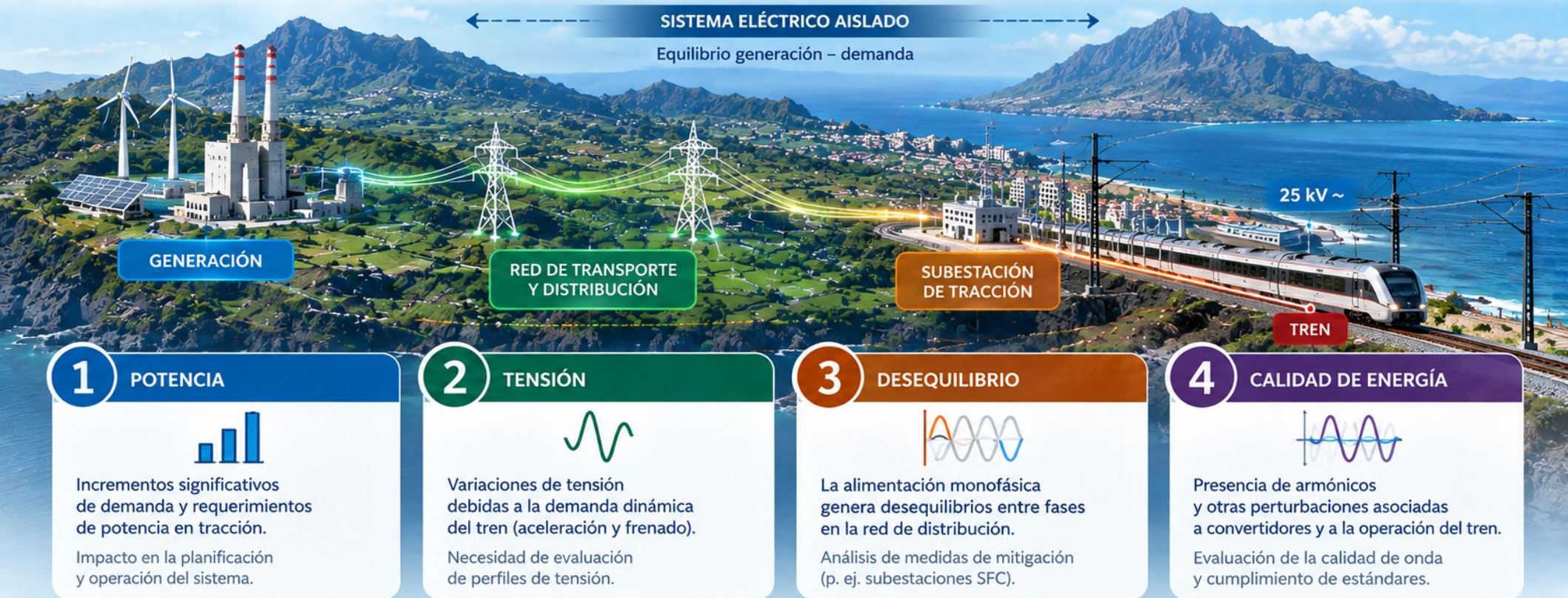
Durante el frenado regenerativo, la potencia puede circular en ambos sentidos entre el tren y la red.



Esta combinación de elevada potencia, variabilidad, movilidad y alimentación monofásica hace que el ferrocarril tenga un impacto específico en un sistema eléctrico aislado.



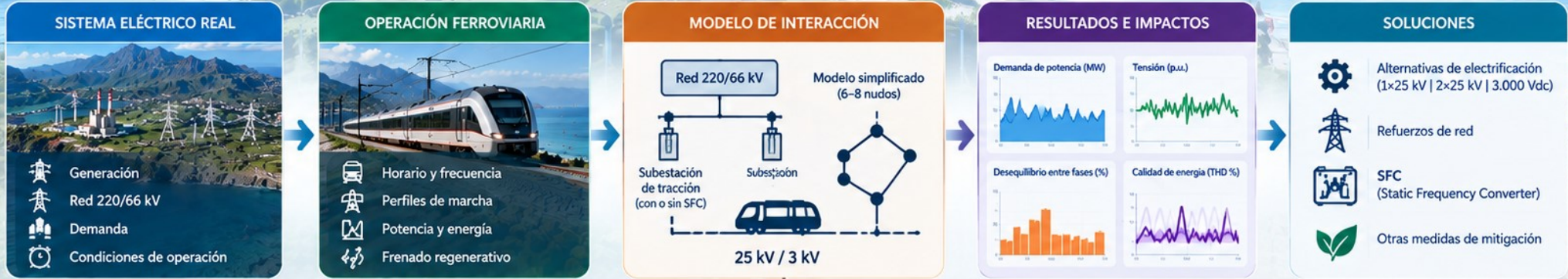
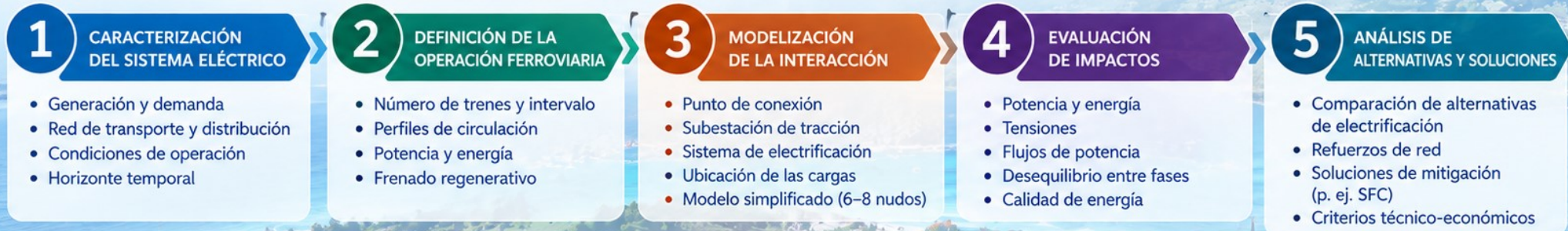
Interacción de la Carga Ferroviaria con la Red Eléctrica



La incorporación del ferrocarril requiere analizar de forma integral su impacto sobre la red para garantizar una operación segura, estable y eficiente.



Metodología de Análisis. Del Sistema Real al Modelo



METODOLOGÍA APLICABLE

Válida para cualquier sistema eléctrico aislado



APLICACIÓN AL CASO DE TENERIFE

Validación del método con un caso real



Una metodología estructurada permite evaluar de forma integral la integración ferroviaria y comparar alternativas de manera objetiva.



Variable y Criterios de Evaluación



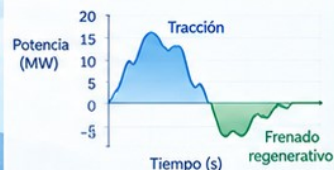
La integración ferroviaria debe evaluarse desde múltiples perspectivas para garantizar la seguridad, la estabilidad y la eficiencia del sistema.

1

POTENCIA Y ENERGÍA

- Demanda de potencia (punta y media)
- Energía anual
- Perfiles de demanda (tracción y regeneración)

Perfil de potencia de un tren



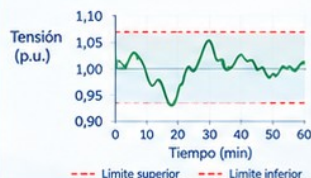
Dimensionamiento de generación y red

2

TENSIÓN

- Variaciones de tensión en la red (transitoria y permanente)
- Cumplimiento de límites normativos
- Impacto en nudos críticos

Variación de tensión en un nudo



Calidad y estabilidad de la tensión

3

FLUJOS DE POTENCIA

- Distribución de flujos en la red 220/66 kV
- Cargas en líneas y transformadores
- Identificación de posibles refuerzos



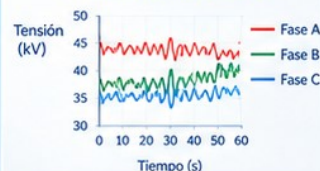
Operación segura de la red

4

DESEQUILIBRIO ENTRE FASES

- Impacto de la alimentación monofásica (AC)
- Niveles de desequilibrio de tensión y corriente
- Evaluación de medidas de mitigación (p. ej. SFC)

Tensiones en barras de 66 kV



Limitación de desequilibrios y calidad de suministro

5

CALIDAD DE ENERGÍA

- Armónicos y distorsión de forma de onda
- Flicker
- Cumplimiento de estándares (IEC, ENTSO-E, etc.)

Espectro armónico (ejemplo)



Compatibilidad con otros usuarios de la red

6

CRITERIOS DE OPERACIÓN Y PLANIFICACIÓN

- Márgenes de seguridad
- Capacidad de generación
- Reserva y servicios complementarios
- Criterios económicos



Operación fiable, eficiente y sostenible

Los criterios de evaluación se adaptan a las características de cada sistema eléctrico aislado y al marco normativo aplicable.



Un análisis completo permite identificar los impactos reales y definir soluciones adecuadas para una integración segura y eficiente del ferrocarril.

Tenerife: Aplicación de la Metodología

Un caso real para analizar la integración ferroviaria en un sistema eléctrico aislado



Superficie
2.034 km²



Población
~ 1,1 millones



Demanda eléctrica
(punta, 2024)
~ 1.000 MW



Renovables
(sobre generación, 2024)
~ 20 %



Interconexión
con La Gomera
Cable submarino 66 kV
(~ 60 MW)

La Gomera

Interconexión
La Gomera – Tenerife
66 kV
(~ 60 MW)

Tenerife

Santa Cruz
de Tenerife

Adeje



0 10 20 30 km

¿Por qué Tenerife?



Sistema eléctrico aislado

Sin interconexiones con la península, con la interconexión existente con La Gomera.



En transición energética

Alto potencial renovable y necesidad de garantizar la seguridad y estabilidad del sistema.



Nuevo vector de demanda

El Tren del Sur como oportunidad y reto para el sistema eléctrico.



Caso representativo

Resultados y lecciones aplicables a otras islas y sistemas eléctricos aislados.



SITUACIÓN
ACTUAL



EVOLUCIÓN
2035–2036



ESCENARIO
FERROVIARIO



APLICACIÓN
DE LA METODOLOGÍA



RESULTADOS
Y CONCLUSIONES



Tenerife, con su interconexión con La Gomera, ofrece un contexto real y actual para evaluar la integración ferroviaria en un sistema eléctrico aislado y extraer conclusiones transferibles.

Situación actual y horizonte 2035 – 2036

2026 · SITUACIÓN DE REFERENCIA

Red actual en operación



2035 – 2036 · HORIZONTE DE ESTUDIO

Red reforzada y mayor integración de renovables



CLAVES DEL ANÁLISIS



Red 220/66 kV
Elemento vertebrador del sistema eléctrico de Tenerife.



Interconexión
Tenerife – La Gomera · 66 kV
Enlace submarino existente (~ 60 MW).



Integración creciente de renovables
Mayor penetración de energía eólica y fotovoltaica.



Evolución de demanda y refuerzos de red
Nuevas demandas (incluido el ferrocarril) y necesidad de refuerzos para garantizar la seguridad del sistema.



El modelo de estudio utilizará la topología y condiciones operativas correspondientes al horizonte analizado.



El impacto ferroviario debe evaluarse **sobre el sistema que realmente existirá en el horizonte de operación**, no sobre la red histórica.



Escenario ferroviario de referencia



Objetivo

Definir un escenario de explotación realista que permita evaluar la interacción del ferrocarril con el sistema eléctrico de Tenerife.

ESQUEMA DEL SERVICIO (REFERENCIA)



FRECUENCIA DE SERVICIO

ESCENARIO BASE

15 min

4 trenes/h
dirección

ESCENARIO SENSIBILIDAD

10 min

6 trenes/h
dirección



Los intervalos considerados son representativos de una explotación en hora punta y permiten evaluar la sensibilidad del sistema a distintos niveles de demanda.

PERFIL DE POTENCIA DE UN TREN (ESQUEMÁTICO)



— Potencia demandada
— Potencia regenerada (frenado)

PARÁMETROS PRINCIPALES DEL ESCENARIO

	Horizonte de estudio 2035 – 2036		Nº de trenes por dirección 4 – 6 trenes/h		Ubicación de subestaciones de tracción (según alternativa de electrificación)
	Intervalo base 15 min		Potencia de tracción por tren (variable del modelo)		Frenado regenerativo incluido en el análisis
	Intervalo sensibilidad 10 min		Perfil de circulación (velocidad, pendientes, paradas)		

CONSIDERACIONES

- Escenario representativo, no un horario comercial definitivo
- Permite analizar el impacto del ferrocarril en distintas condiciones de demanda
- Aplicable a las diferentes alternativas de electrificación (1x25 kV, 2x25 kV, 3.000 Vdc)
- La metodología es transferible a otros sistemas eléctricos aislados



El **escenario ferroviario de referencia** proporciona la base para evaluar el impacto sobre el sistema eléctrico en el **horizonte de 2035–2036**.

De la Operación Ferroviaria al Sistema eléctrico

1 ESCENARIO DE EXPLOTACIÓN DEL FERROCARRIL

Definición del servicio a simular



Material rodante

- Características de los trenes
- Curvas de tracción y frenado
- Consumos auxiliares



Infraestructura

- Trazado y pendientes
- Estaciones y velocidades
- Túneles y curvas



Plan de operación

- Frecuencia de trenes (headway)
- Tiempos de parada
- Perfiles de velocidad

Un escenario realista de operación como punto de partida

2 SIMULACIÓN CON RAILPOWER

Cálculo del comportamiento dinámico y eléctrico del ferrocarril

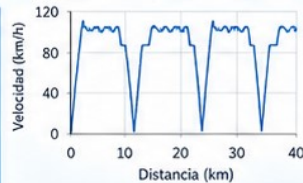
Ardanuy RAILPOWER
Simulation tool for power consumption assessment on electrified railway lines

Cálculos dinámicos de la circulación

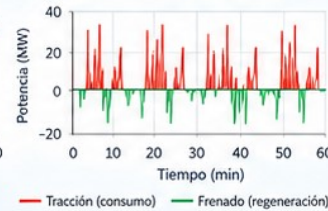
Potencia de los trenes

Cálculo eléctrico (circuito equivalente y flujo de cargas)

Perfil de velocidad y posición de los trenes



Potencia demandada por los trenes



Resultados principales de RailPower

- ✓ Velocidad, aceleración y posición de los trenes
- ✓ Potencia instantánea (tracción y frenado)
- ✓ Corrientes y tensiones en la catenaria
- ✓ Energía consumida y energía regenerada

RailPower transforma la operación ferroviaria en una demanda eléctrica detallada

3 INTEGRACIÓN EN EL MODELO DEL SISTEMA ELÉCTRICO

La demanda ferroviaria se introduce en la red de Tenerife en los puntos de conexión



La demanda ferroviaria se conecta a la red en los puntos de enlace definidos

4 ANÁLISIS DEL IMPACTO EN TENERIFE

Evaluación del efecto del ferrocarril en el sistema eléctrico aislado



Demanda y generación

- Incremento de la demanda
- Cobertura con mix de generación
- Energía regenerada



Niveles de tensión

- Perfil de tensiones en 220/66 kV
- Caídas de tensión
- Estabilidad del sistema



Flujos de potencia

- Carga en líneas y transformadores
- Identificación de posibles congestiones



Desequilibrio de fases

- Análisis de desequilibrios
- Soluciones (p. ej. SFC)



Necesidades de refuerzo

- Nuevas infraestructuras
- Medidas de operación
- Recomendaciones

Una visión global del impacto y de las necesidades del sistema



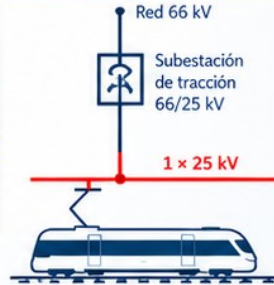
La simulación ferroviaria proporciona la **demanda eléctrica**; el modelo del sistema de Tenerife permite **evaluar su impacto** y definir las soluciones más adecuadas.

Alternativas de Electrificación del tren

1 1 × 25 kV AC

Sistema convencional, ampliamente probado

Referencia histórica
en el estudio del proyecto



- ▶ Un único hilo de contacto a 25 kV
- ▶ Subestaciones de tracción cada 30–40 km (según perfil y demanda)

Principales ventajas

- ✓ Solución madura y probada
- ✓ Menor coste de inversión
- ✓ Simplicidad de diseño y operación
- ✓ Amplia experiencia internacional

Principales desventajas

- Mayores corrientes en la catenaria
- Mayores caídas de tensión
- Limitaciones en líneas largas y con alta demanda
- Puede requerir más subestaciones

2 2 × 25 kV AC

Sistema con autotransformadores

Adecuado para líneas largas
y alta demanda



- ▶ Dos conductores a ± 25 kV con autotransformadores
- ▶ Mayor distancia entre subestaciones de tracción (hasta 50–60 km)

Principales ventajas

- ✓ Menores corrientes y menores pérdidas
- ✓ Mejor comportamiento de tensión
- ✓ Menor número de subestaciones
- ✓ Adecuado para líneas de alta demanda
- ✓ Solución extendida en alta velocidad y líneas largas

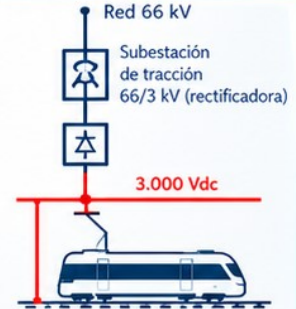
Principales desventajas

- Mayor coste de inversión
- Mayor complejidad de diseño y operación
- Requiere autotransformadores a lo largo de la línea
- Menor flexibilidad ante cambios en la explotación

3 3.000 Vdc

Sistema de corriente continua

Alternativa a considerar
en sistemas insulares



- ▶ Sistema de corriente continua a 3.000 V
- ▶ Subestaciones con rectificadores
- ▶ Experiencia reciente en líneas de altas prestaciones

Principales ventajas

- ✓ Menores secciones de catenaria
- ✓ Menor distancia entre subestaciones
- ✓ Buena integración en entornos urbanos
- ✓ Adecuado para líneas con frecuentes aceleraciones y frenadas
- ✓ Tecnología contrastada en metros y cercanías

Principales desventajas

- Mayores pérdidas en largas distancias
- Necesidad de subestaciones rectificadoras
- Mayor consumo de energía (en general)
- No permite conexión directa con la red AC



CRITERIOS DE EVALUACIÓN

- ✓ Demanda eléctrica y capacidad de integración en la red de Tenerife
- ✓ Impacto en tensiones, flujos y desequilibrios
- ✓ Coste de inversión y explotación
- ✓ Robustez operativa y mantenimiento
- ✓ Experiencia internacional y madurez tecnológica



HERRAMIENTA DE ANÁLISIS

- ✓ Simulación de la explotación ferroviaria con RailPower
- ✓ Modelo eléctrico de la red 220/66 kV de Tenerife
- ✓ Comparación consistente de las tres alternativas
- ✓ Evaluación en escenarios de demanda (base y sensibilidad)



OBJETIVO

Identificar la solución más adecuada de electrificación para el Tren del Sur de Tenerife, considerando tanto los requisitos ferroviarios como su integración óptima en el sistema eléctrico aislado.



La evaluación comparativa de las alternativas permite seleccionar la solución de electrificación más adecuada, minimizando su impacto en el sistema eléctrico de Tenerife.

Impacto sobre la red: potencia, tensión y flujos

1 POTENCIA Y DEMANDA

Perfil de potencia del ferrocarril obtenido con RailPower

Perfil de potencia en el punto de conexión (subestación de tracción) – Perfil conceptual



Perfil conceptual – Resultado de RailPower

La simulación determina la potencia instantánea de los trenes, considerando aceleración, frenado y regeneración a lo largo de la línea.

2 TENSIÓN

Evaluación de las variaciones de tensión en la red 66 kV

Respuesta de tensión en barras 66 kV por efecto de la demanda ferroviaria (esquema)



Evaluar variaciones de tensión

Se analiza el efecto de la conexión del ferrocarril en las barras de 66 kV relevantes, comprobando el cumplimiento de los rangos de tensión admisibles.

3 FLUJOS DE POTENCIA

Análisis de los cambios en los flujos de la red 220/66 kV

Red 220/66 kV de Tenerife
Comparación de flujos con y sin demanda ferroviaria (esquema)



Comparar con y sin demanda ferroviaria

Se evalúa cómo la demanda del ferrocarril modifica los flujos de potencia en la red 220/66 kV, identificando posibles sobrecargas y cambios en los patrones de operación.

INDICADORES A OBTENER

- Demanda punta y media del ferrocarril
- Variación de tensión en barras de 66 kV
- Carga de líneas y transformadores (220/66 kV)
- Desequilibrio entre fases
- Necesidad de refuerzos en la red
- Energía regenerada y su aprovechamiento

COMPARACIÓN DE ALTERNATIVAS

Todas las alternativas se evaluarán bajo los mismos escenarios de explotación ferroviaria y condiciones de operación de la red.

1 × 25 kV AC

2 × 25 kV AC

3.000 Vdc

SECUENCIA DE EVALUACIÓN DEL IMPACTO

Escenario ferroviario (explotación, horarios, material)

Ardanuy
RAILPOWER
Simulación del comportamiento eléctrico del ferrocarril

Puntos de conexión a la red 66 kV (subestaciones de tracción)

Modelo de la red de Tenerife (220/66 kV)

Cálculo de indicadores y análisis de resultados



El objetivo es cuantificar el impacto de cada alternativa sobre la red y detectar dónde pueden aparecer restricciones o necesidades de refuerzo.

Causa del Desequilibrio



1×25 kV AC

La tracción monofásica introduce una carga asimétrica

RED TRIFÁSICA

L1

L2

L3

TRAFO

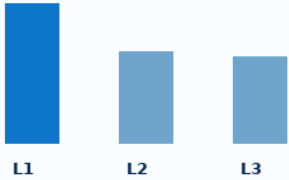
66 / 25 kV

CATENARIA

25 kV AC

1 fase

¿QUÉ OCURRE EN LA RED?



La corriente de las tres fases deja de ser igual.

→ aparece componente de secuencia inversa

→ puede producir desequilibrio de tensión en la red



3.000 Vdc

La subestación convierte AC trifásica en CC

RED TRIFÁSICA

L1

L2

L3

RECT.

AC → DC

3 fases

CATENARIA

3.000 Vdc

corriente continua

¿QUÉ CAMBIA?

- **No existe una carga monofásica AC directa**

La red de suministro de la subestación sigue siendo trifásica.

- **El desequilibrio no desaparece por definición**

Debe comprobarse el comportamiento real del convertidor y de la instalación.

- **Cambian los problemas dominantes**

En CC cobran especial relevancia armónicos, potencia reactiva, calidad de energía y pérdidas.



IDEA CLAVE →

En AC, la alimentación monofásica de tracción es una fuente directa de desequilibrio; en CC, la red ve una subestación de conversión trifásica.

Consecuencia del Desequilibrio y límites admisibles

1 PRINCIPALES CONSECUENCIAS



Sobrecalentamiento de equipos
Mayor corriente en la fase más cargada (líneas, transformadores, generadores)



Mayor caída de tensión
Empeora el perfil de tensiones y la estabilidad del sistema



Reducción de la capacidad de transmisión
Necesidad de limitar cargas o reforzar infraestructuras



Afectación a la operación de generadores
Aumento de pérdidas, vibraciones y esfuerzos mecánicos



Riesgo para la calidad y continuidad del servicio
Puede provocar disparos de protecciones y restricciones de explotación

2 MAYOR RELEVANCIA EN UN SISTEMA AISLADO

Menor inercia y sin capacidad de intercambio



Menor tamaño del sistema
Una misma perturbación tiene un mayor impacto relativo.



Menor inercia y menos recursos
Menor capacidad de respuesta ante desequilibrios.



Sin posibilidad de intercambio
No se puede exportar/importar potencia para compensar desequilibrios.



Mayor sensibilidad operativa
La operación del sistema es más exigente para mantener la calidad de suministro.

3 LÍMITES DE DESEQUILIBRIO

Criterios para instalaciones conectadas a la red de transporte

Límites de emisión del consumidor

(instalaciones que pueden no conectarse equilibradamente, como el ferrocarril)

Evaluación	Límite (μ)
Corta duración (rango de minutos)	$\leq 0,7 \%$
Muy corta duración (rango de segundos)	$\leq 1,0 \%$

Niveles de compatibilidad en la red

(calidad de suministro)

Evaluación	Límite (μ)
Desequilibrios > 10 min	$\leq 1 \%$
Desequilibrios ≤ 10 min	$\leq 2 \%$

4 MENSAJES CLAVE



El desequilibrio es inherente a la tracción en AC y puede ser significativo si no se gestiona adecuadamente.



En sistemas DC (3.000 Vdc) el desequilibrio en la red AC es muy limitado, aunque deben evaluarse otros efectos (armónicos, etc.).



En un sistema aislado como Tenerife, las consecuencias del desequilibrio pueden ser mayores por la menor inercia y la falta de interconexiones.



IMPORTANTE

El cumplimiento de los límites de desequilibrio debe verificarse para cada alternativa de electrificación y escenario de operación.



El desequilibrio entre fases es una cuestión crítica en la integración ferroviaria, especialmente en sistemas eléctricos aislados como Tenerife.

SFC: Herramienta para mitigar el desequilibrio

1

¿QUÉ ES UN SFC?

Convertidor estático de frecuencia

El SFC (Static Frequency Converter) es un **convertidor electrónico** que genera un sistema monofásico de 25 kV, 50 Hz a partir de una red trifásica, normalmente a 66 o 220 kV.



Tecnología basada en electrónica de potencia



Permite controlar la potencia activa y reactiva



Desacopla la carga de tracción de las fases de la red

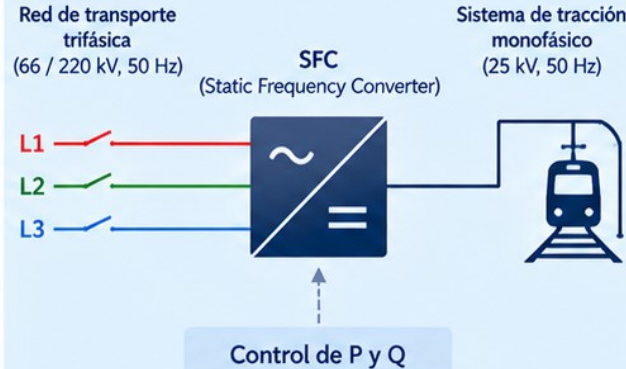


Solución ya aplicada en algunos países y en crecimiento

2

ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO

De la red trifásica a la tracción de 25 kV AC



3

VENTAJAS Y DESVENTAJAS

Una solución prometedora, que requiere análisis



PRINCIPALES VENTAJAS

- Reduce significativamente el desequilibrio en la red.
- Permite el control de potencia activa y reactiva.
- Mayor flexibilidad en el punto y nivel de conexión.
- Puede mejorar la calidad de tensión y la estabilidad local.
- Facilita la integración en sistemas aislados.



PRINCIPALES DESVENTAJAS

- Sobrecoste de inversión frente a una subestación convencional.
- Pérdidas adicionales en la conversión.
- Tecnología relativamente nueva, con menor experiencia de operación a largo plazo.
- Mayor complejidad técnica y de mantenimiento.
- Es necesario validar su aplicación en el contexto específico del sistema de Tenerife.

4

ASPECTOS A EVALUAR EN EL ESTUDIO



Reducción esperada del desequilibrio en la red de transporte.



Potencia y esquema de conexión (66 o 220 kV).



Pérdidas y eficiencia global del sistema.



Impacto en la calidad de tensión y armónicos en la red.



Coste de inversión y mantenimiento.



Comparación con otras alternativas de integración desde el punto de vista técnico y económico.



El SFC puede ser una herramienta eficaz para integrar la tracción ferroviaria en un sistema eléctrico aislado, pero su aplicación debe justificarse mediante un análisis técnico-económico específico para Tenerife.

Resultados del Estudio realizado en 2013

1 ESCENARIOS ANALIZADOS

24 escenarios combinando los principales condicionantes



Punto de conexión

- Granadilla
- Caletillas



Nivel de conexión

- 66 kV
- 220 kV



Escenario de demanda

- Punta
- Valle



Penetración de renovables

- 0% – 20% – 40% (y casos adicionales)

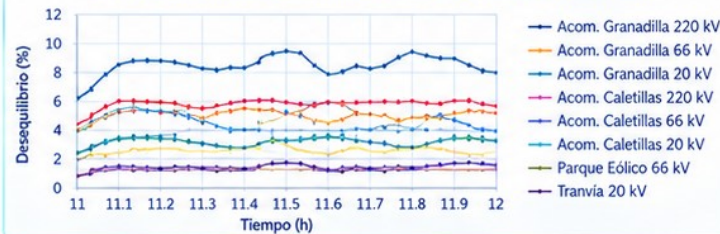


2 RESULTADOS: DESEQUILIBRIO EN LA RED INSULAR

Valores máximos en los nudos más representativos (ejemplo)

Escenario	Punto de conexión	Nivel	Demanda	Renovables	Desequilibrio máximo (%)
	Granadilla	220 kV	Punta	40%	4,8
	Granadilla	66 kV	Punta	40%	7,1
	Caletillas	220 kV	Punta	40%	6,2
	Caletillas	66 kV	Punta	40%	9,3
	Granadilla	220 kV	Valle	40%	3,1
	Granadilla	66 kV	Valle	40%	5,0
	Caletillas	220 kV	Valle	40%	4,4
	Caletillas	66 kV	Valle	40%	6,8

Desequilibrios en la red del Tren – Escenario de punta (40% renovables)



3 PRINCIPALES LECCIONES

Factores que condicionan el impacto en un sistema aislado



1 El punto de conexión es clave

La ubicación (Granadilla o Caletillas) y el nivel de tensión (66 o 220 kV) influyen significativamente en el nivel de desequilibrio y en su propagación por la red.



2 El impacto depende del escenario eléctrico

Los mayores desequilibrios se producen en condiciones de mayor demanda (punta) y con alta penetración de renovables.



3 La tecnología de electrificación influye

Las características del sistema de tracción (1×25 kV, 2×25 kV o 3.000 Vdc) generan distintos niveles de desequilibrio, potencia y flujos de energía en la red.



Conclusión

El impacto debe evaluarse de forma conjunta, considerando todos los condicionantes del sistema eléctrico y ferroviario.

4 MENSAJES CLAVE



Se analizaron 24 escenarios combinando punto de conexión, nivel de tensión, demanda y renovables.



Los desequilibrios pueden superar el 8–10% en determinados nudos y escenarios (punta, 66 kV).



La mayor penetración de renovables tiende a aumentar la sensibilidad del sistema a las perturbaciones del tren.



Es necesario analizar de forma integrada red – tracción – renovables para identificar la mejor solución de integración en el sistema insular.



La experiencia del estudio de 2013 demuestra la importancia de analizar de forma integral los condicionantes de red, operación y tecnología en un sistema eléctrico aislado como Tenerife.

Conclusiones

1 EL SISTEMA AISLADO

cambia la forma de analizar la demanda



Capacidad de intercambio

La red tiene menos capacidad para apoyarse en otros sistemas.



Equilibrio local

La nueva demanda debe analizarse junto a la generación y la demanda existentes.

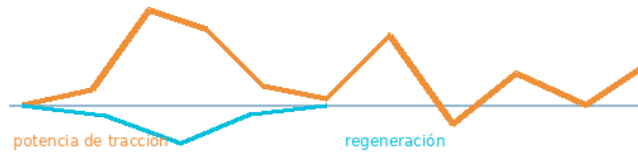


Ubicación de la carga

El punto y nivel de conexión pueden modificar el impacto sobre la red.

2 EL FERROCARRIL ES UNA CARGA SINGULAR

Potencia elevada · variabilidad · movilidad · monofásica · regeneración



01

Demanda variable

02

Carga móvil

03

Alimentación monofásica

Su comportamiento eléctrico no puede representarse únicamente mediante energía anual o potencia media.

3 LA INTEGRACIÓN DEBE SER CONJUNTA

Operación ferroviaria + red + electrificación + mitigación

1

La operación se convierte en electricidad

La simulación ferroviaria permite obtener la demanda que se incorpora al modelo de red.

2

El impacto se mide de forma integral

Potencia, tensión, flujos y desequilibrio permiten identificar las restricciones relevantes.

3

La solución se define comparando alternativas

1x25 kV, 2x25 kV y 3.000 Vdc deben evaluarse sobre una misma base de red y operación.

CONCLUSIÓN La integración ferroviaria debe diseñarse conjuntamente con el sistema eléctrico.

4 MENSAJES CLAVE

1

CARACTERIZAR

Red, generación, demanda y horizonte antes de introducir el ferrocarril.

2

MODELAR

Convertir la operación ferroviaria en demanda eléctrica mediante simulación.

3

EVALUAR

Potencia, tensión, flujos y desequilibrio en los escenarios relevantes.

4

TRANSFERIR

La metodología puede aplicarse a otros sistemas eléctricos aislados.

CONCLUSIÓN

La experiencia de Tenerife demuestra que la integración ferroviaria **debe analizarse como una integración de sistemas.**



Conclusiones

EL FERROCARRIL NO SE INCORPORA A LA RED: SE INTEGRA CON EL SISTEMA ELÉCTRICO

01 CARACTERIZAR

Entender primero el sistema eléctrico

- Red y capacidad disponible
- Generación y demanda
- Horizonte de planificación
- Punto y nivel de conexión

02 MODELAR

Traducir la operación ferroviaria a electricidad

- Número de trenes e intervalo
- Potencia y perfil de demanda
- Alternativa de electrificación
- Escenarios de operación

03 EVALUAR

Medir el impacto y definir la respuesta

- Potencia y flujos
- Tensiones
- Desequilibrio entre fases
- Medidas de mitigación

4

MENSAJE FINAL

La metodología es transferible a otros sistemas eléctricos aislados.

Canarias

Baleares

Madeira

Azores



Tenerife es el caso de aplicación.

La metodología es el resultado que puede trasladarse a otros sistemas aislados.

Alberto González · SYSTRA Ardanuy

MUCHAS GRACIAS