

Flexibilidad en la operación con incorporación de energías renovables variables



Incorporación de generación renovable variable

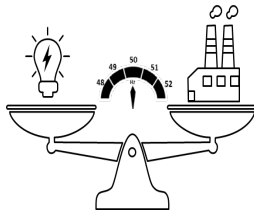
La incorporación de generación renovable variable en el sistema eléctrico, diversifica la matriz energética y promueve un sistema mas sostenible. Este aspecto plantea nuevos desafíos técnicos y operativos debido a:

- Mayor variabilidad, incertidumbre en la oferta de generación
- El cambio en los flujos de potencia (uso de la red)
- Rampas de generación

Efectos de la incorporación de generación variable



Inercia

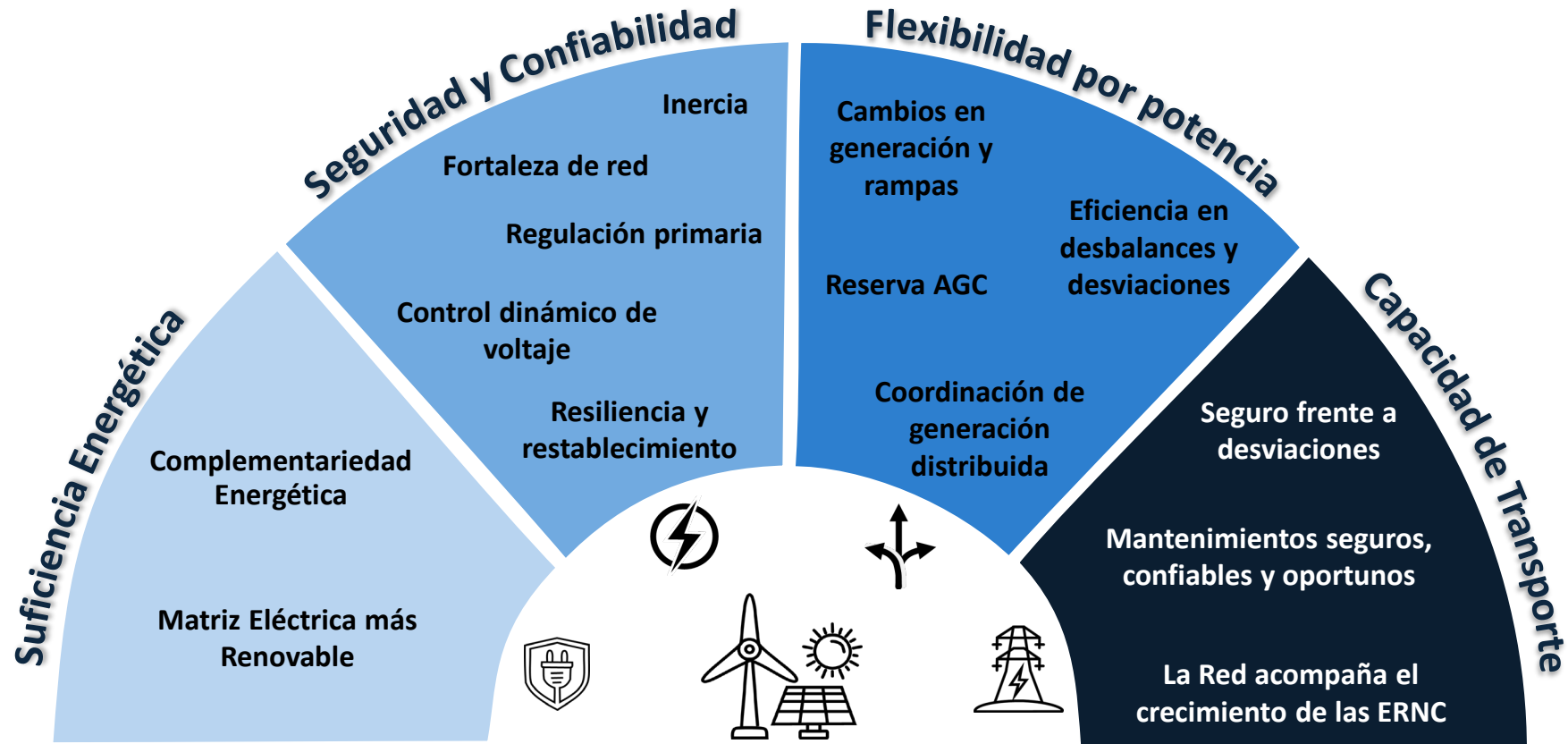


Regulación de frecuencia



Fortaleza de la red

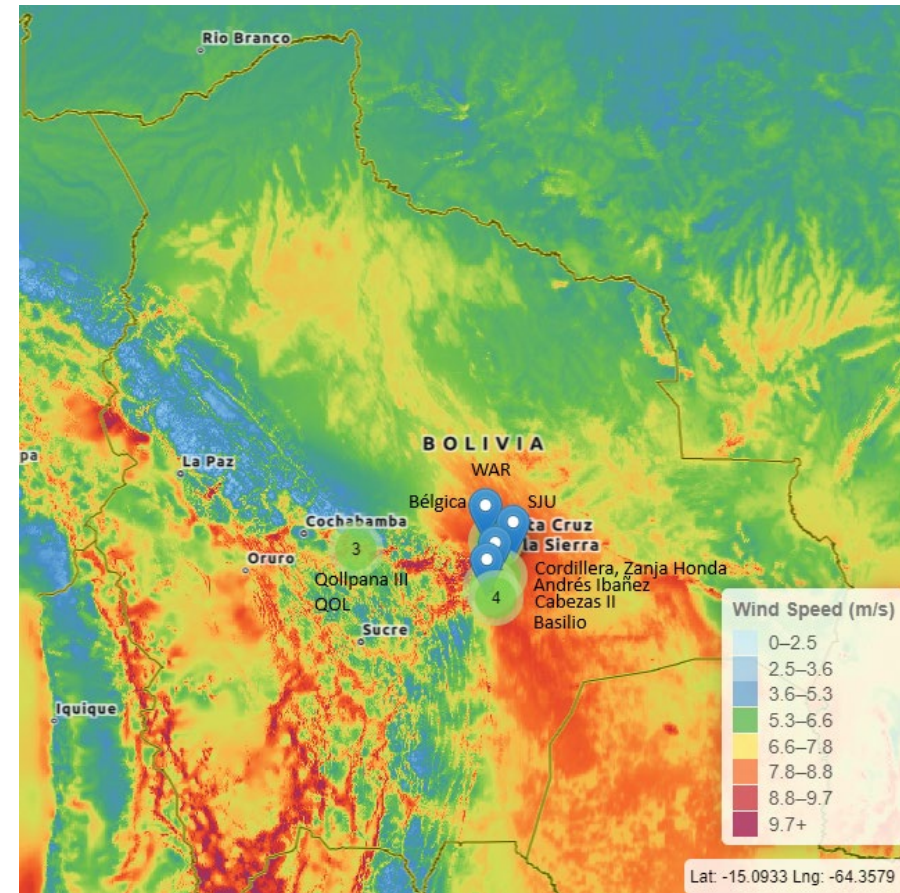
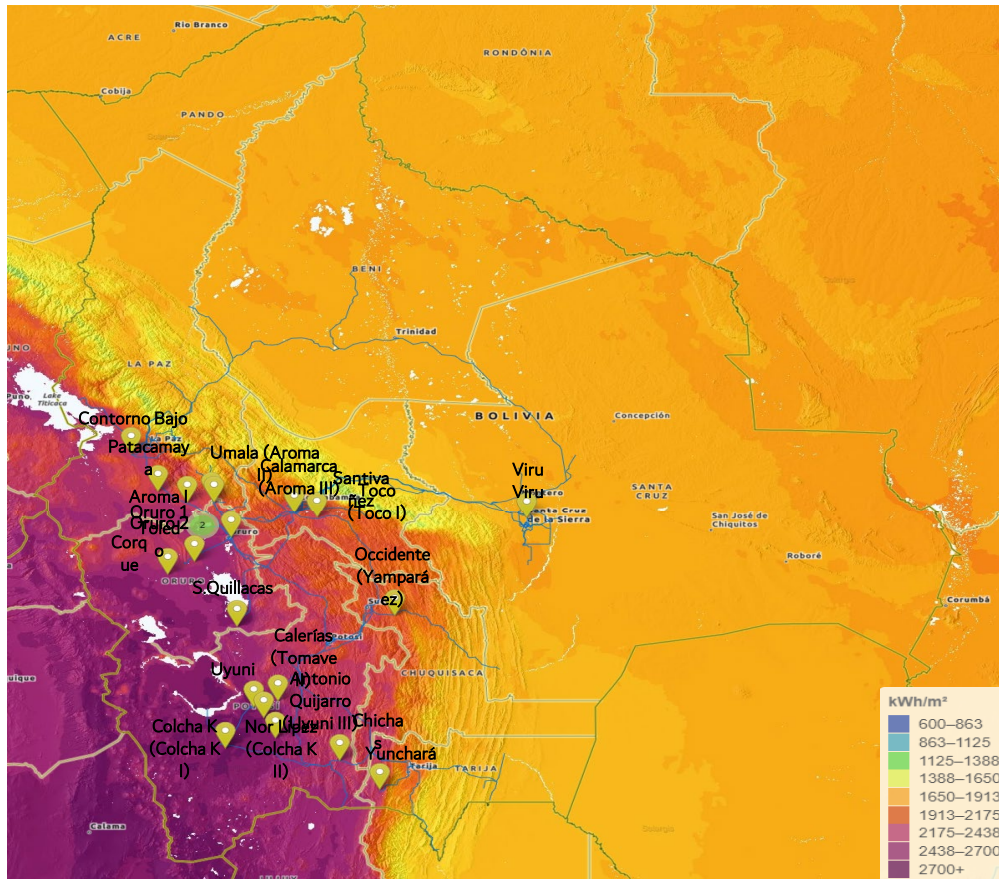
¿Que es el análisis de flexibilidad?



Atributos sistémicos

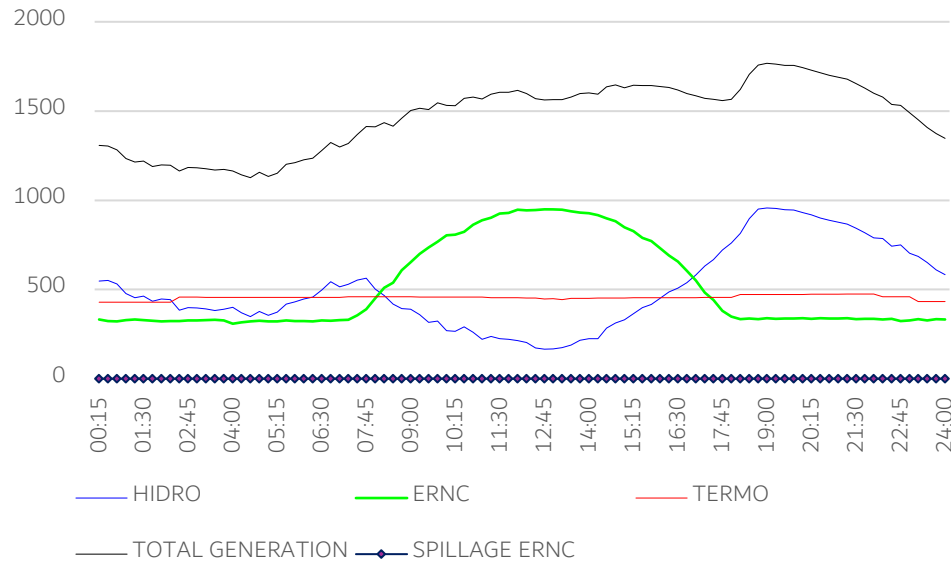
Análisis de complementariedad

Ubicación de plantas generadoras

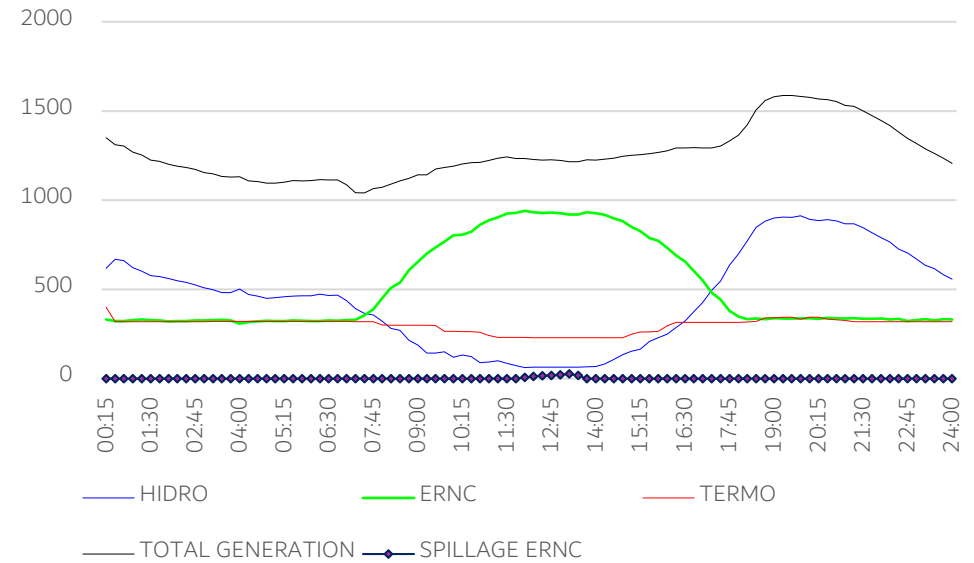


Análisis de complementariedad

Despacho de Carga (MW) - Promedio Seco
(Jueves)

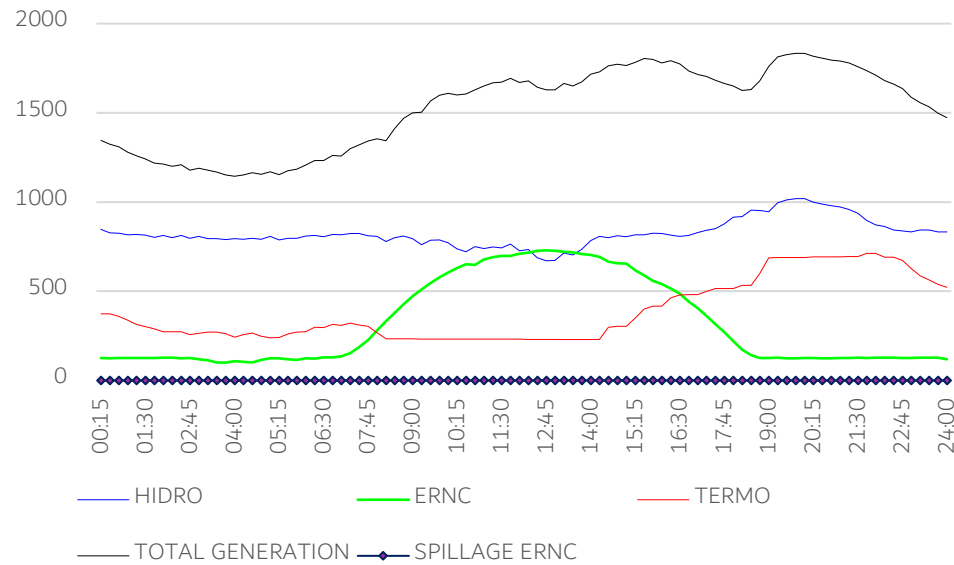


Despacho de Carga (MW) - Promedio Seco
(Domingo)

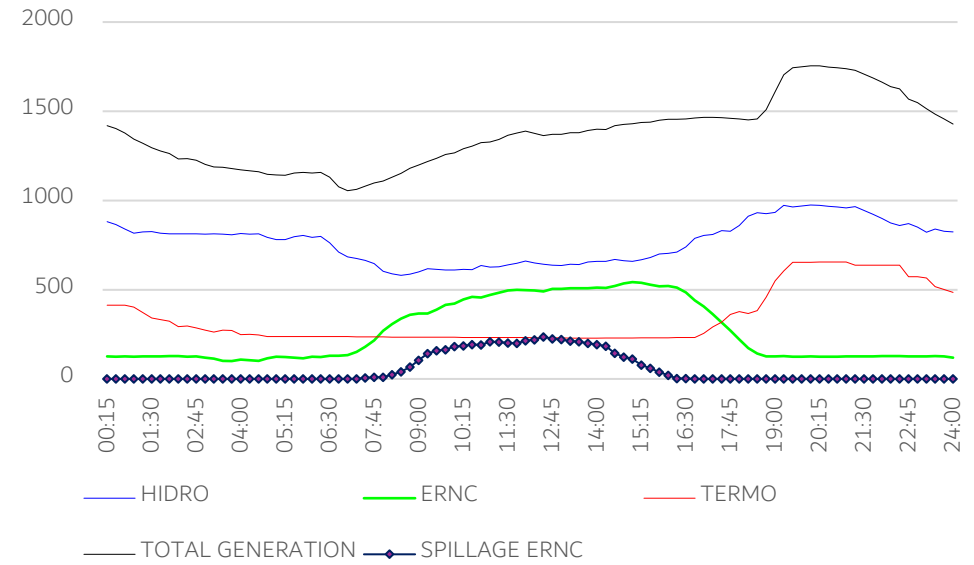


Análisis de complementariedad

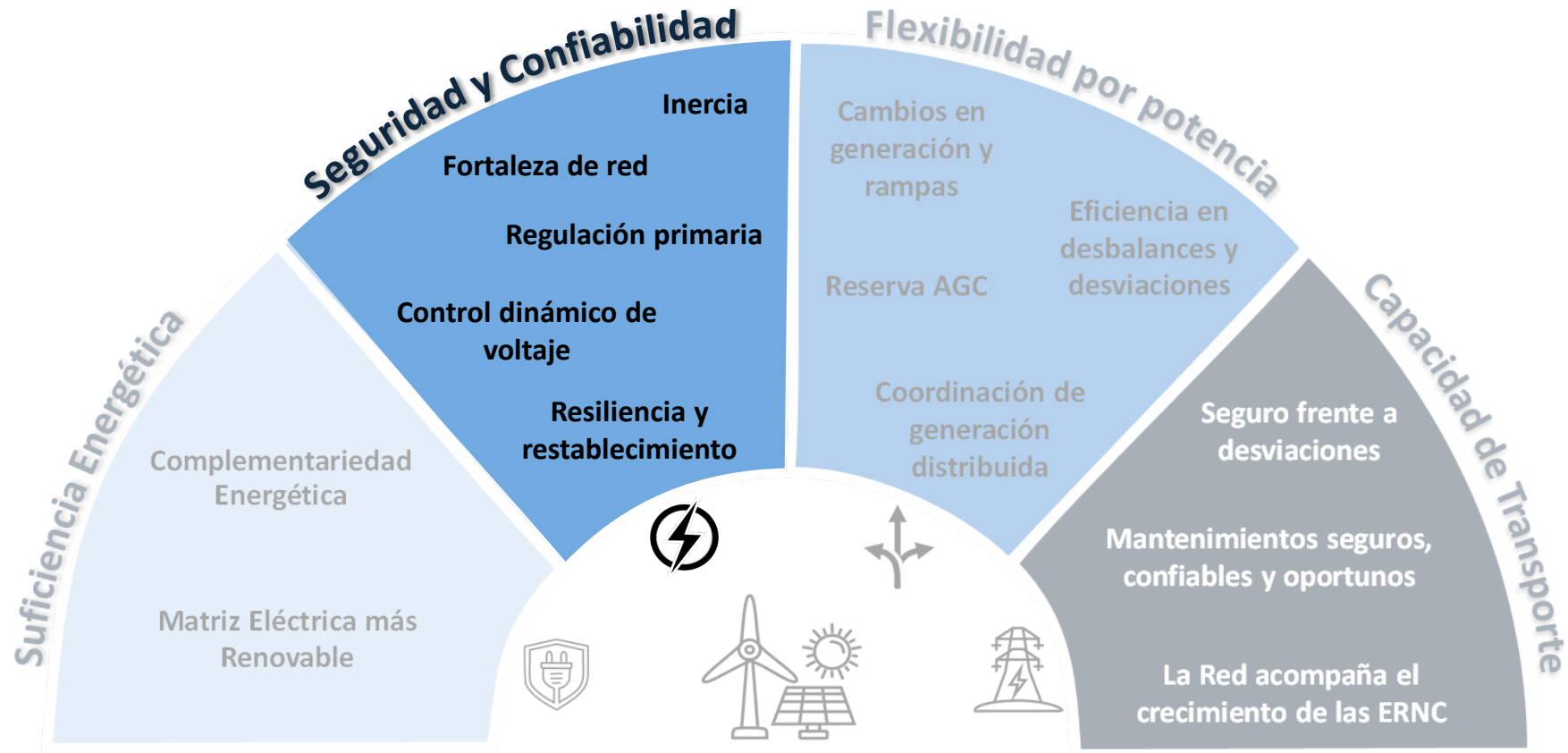
Despacho de Carga (MW) - Promedio Húmedo
(Jueves)



Despacho de Carga (MW) - Promedio Húmedo
(Domingo)



Seguridad y Confiabilidad



Atributos sistémicos

Seguridad y Confiabilidad

Variabilidad

Variabilidad de corto plazo

Variabilidad de largo plazo

Fortaleza de la Red

Potencia de Cortocircuito

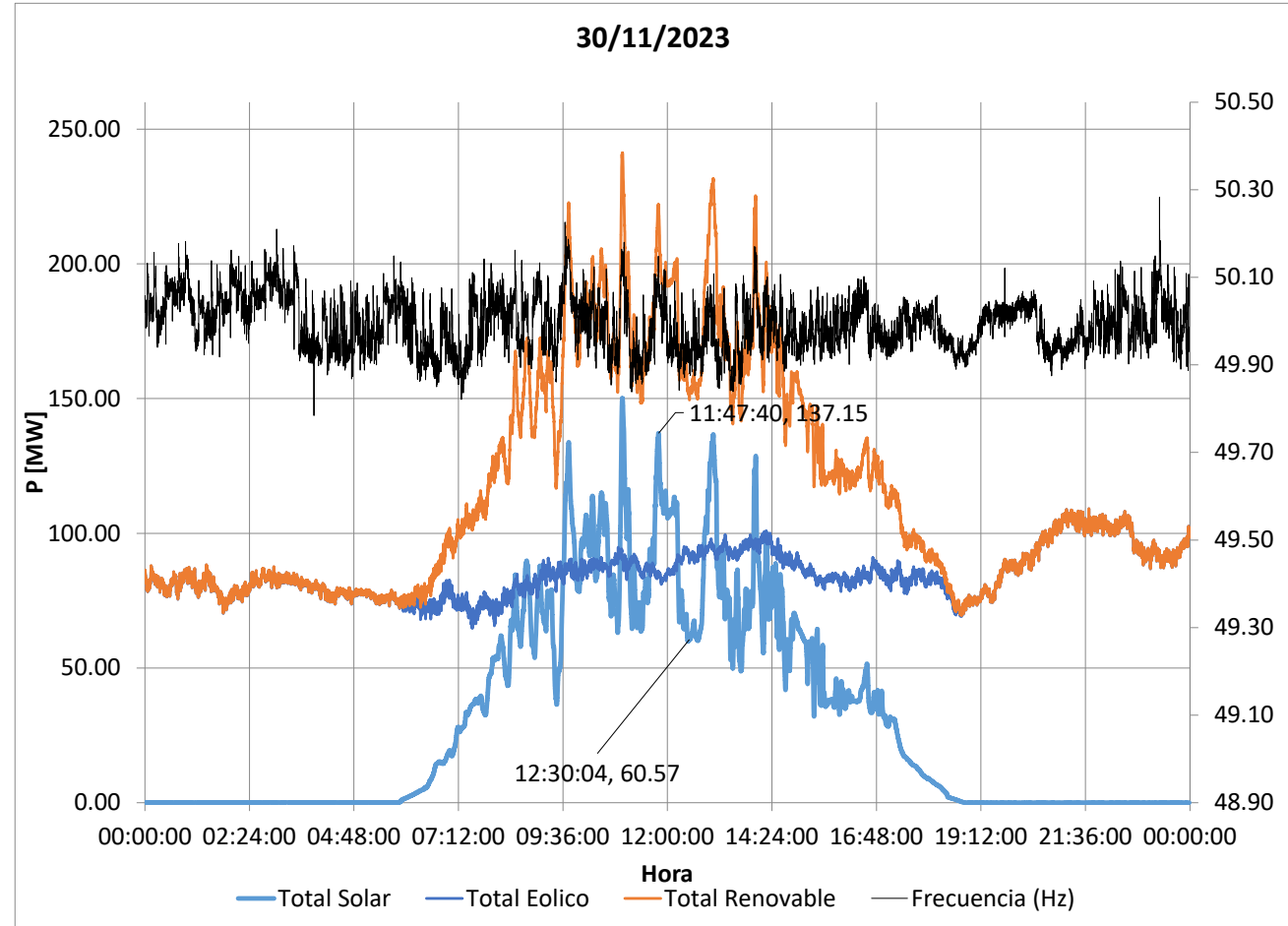
Inercia Sistémica

Variabilidad de la generación eólica y solar:

Variabilidad

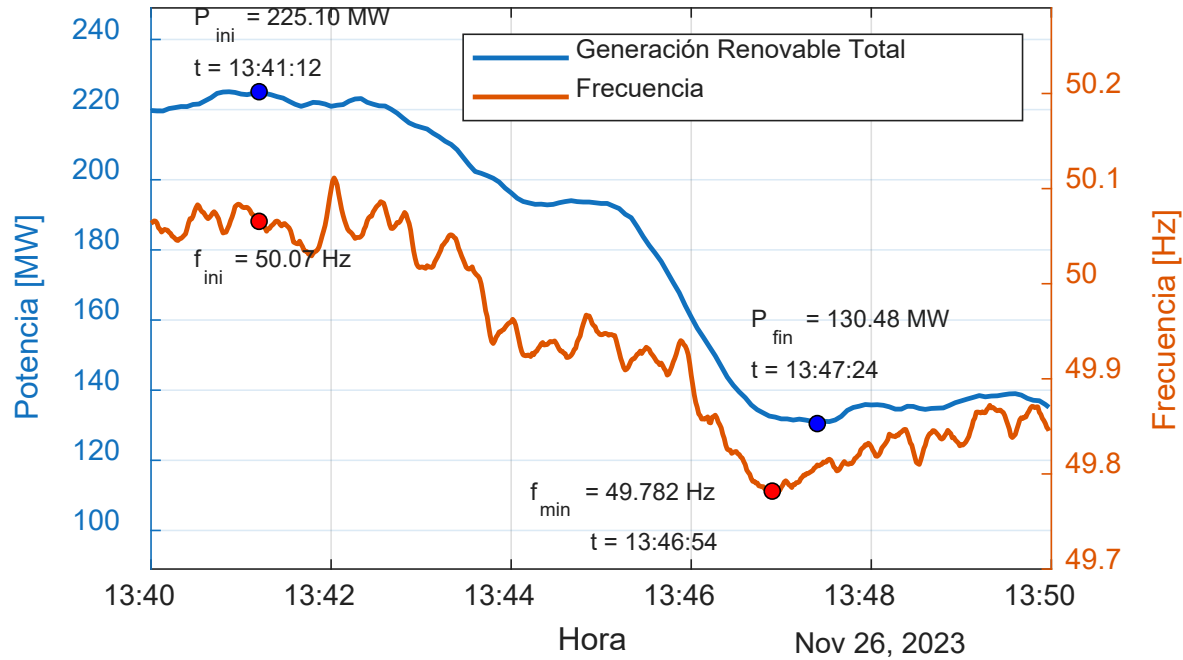
Variabilidad de corto plazo

Variabilidad de largo plazo



Variabilidad de la generación eólica y solar:

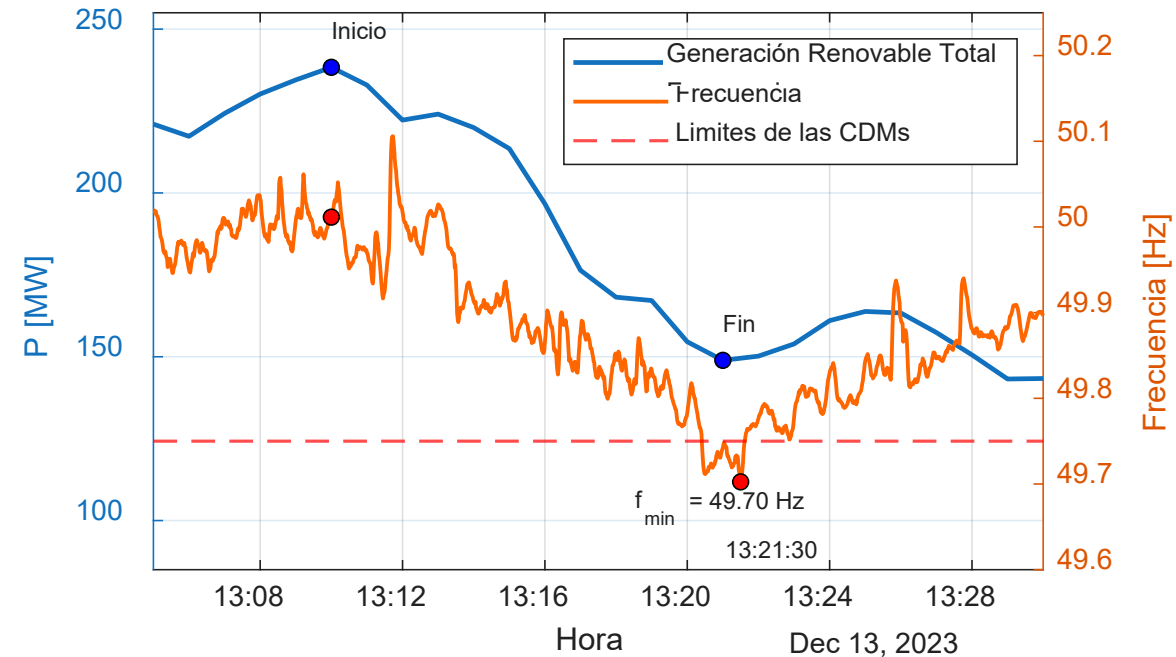
Variación de frecuencia asociado a la rampa renovable



- Actúa la regulación primaria para **variaciones de corto plazo.**

- AGC podría contribuir a mitigar las **variaciones de largo plazo.**

Rampa de bajada crítica

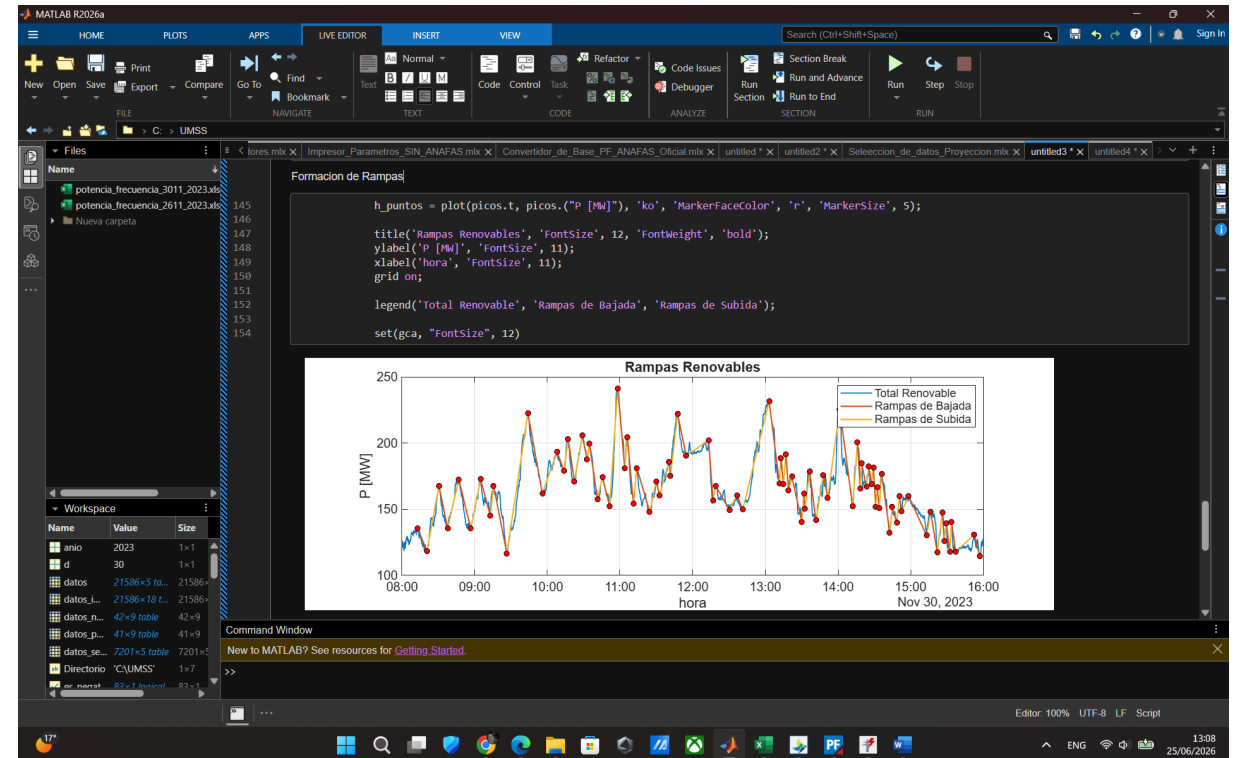


Variabilidad de la generación eólica y solar:

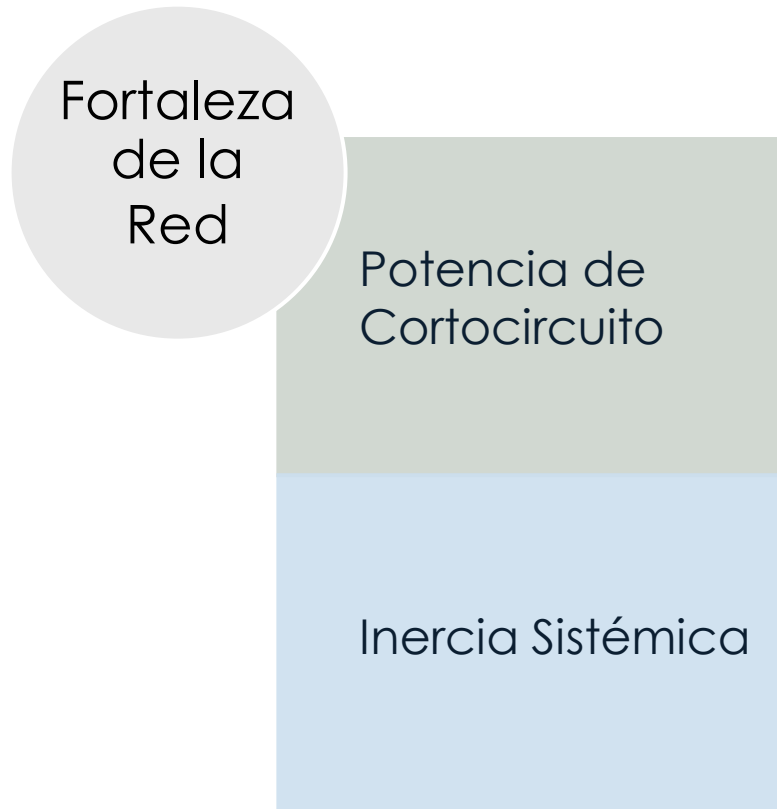


Herramientas aplicadas en el análisis:

- Se ha desarrollado automatismos para calcular rampas de la generación solar (Matlab y Python).
- Así como para verificar la afectación de la variabilidad en la regulación de frecuencia (Matlab y Python). Análisis estadísticos.



Fortaleza de la Red



Relación de cortocircuito equivalente:

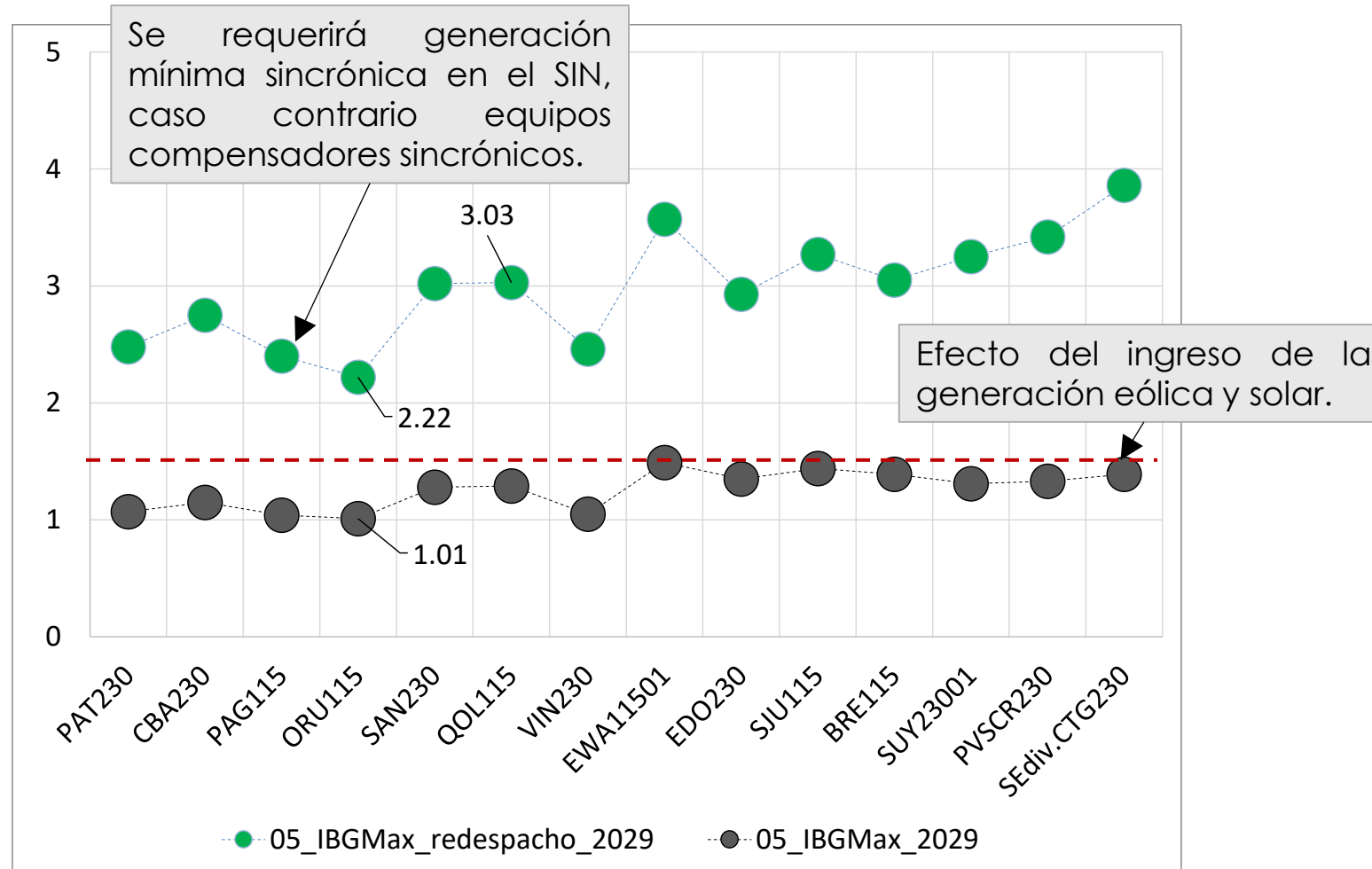
$$ESCR_j = \frac{S_{ccj}}{\sum_{k=1}^{N_{IBG}} (IF_{jk} * P_k)}$$

Rango	Situación
$ESCR > 3$	La rigidez del sistema es lo suficientemente alta.
$ESCR \leq 3$	La rigidez del sistema no ser suficiente para alcanzar una respuesta dinámica estable del sistema y de los inversores de la renovables.

- En el sistema actualmente el ESCR es >5 y en el mediano plazo >3.

Fortaleza de la Red

- **ESCR** del mediano y largo plazo.



Fortaleza de la Red

El compensador síncrono

Puede llegar a entregar corriente de cortocircuito varias veces su corriente nominal (potencia de cortocircuito)

Al ser una maquina rotativa, aporta inercia al sistema gracias a las masas rotantes que posee en el eje



Mediante control de excitación puede entregar o absorber potencia reactiva



Inercia Sistémica

Herramientas aplicadas en el análisis:

- Se ha desarrollado scripts en PowerFactory para automatizar el calculo de ESCR (Códigos en Python) en varios escenarios de planificación.

```

PF DlgSILENT PowerFactory 2024 - "13 PMP_MAY26_ABR30_30042026"
File Edit View Insert Data Calculation Output Tools Window H
[Icons]
Output Window
[x] Errors (0) [!] Warnings (0) [i] Information (3) [b] Events (0) [C]

Active Project: 13 PMP_MAY26_ABR30_30042026_completo
05 MED_SECO_11_2026
Area SK[MVA] totWP[MW] ESCR[-]
ORU115 NaN 505.2 52.7 9.59
SJU115 NaN 1439.9 38.4 37.48
SUY23001 NaN 557.2 40.4 13.80
EDO230 NaN 2246.6 55.5 40.45
EWA11501 NaN 2002.4 34.6 57.95
QOL115 NaN 252.6 20.8 12.14
YUN024 NaN 21.0 3.1 6.77

05 MED_SECO_11_2029
Area SK[MVA] totWP[MW] ESCR[-]
ORU115 NaN 495.8 51.7 9.59
SJU115 NaN 1469.1 36.3 40.51
SUY23001 NaN 624.2 40.1 15.58
EDO230 NaN 2333.2 52.3 44.58
EWA11501 NaN 2048.7 31.8 64.45
QOL115 NaN 254.3 20.1 12.64
YUN024 NaN 20.9 3.0 7.00

Area 05 MED_SECO_11_2026 05 MED_SECO_11_2029
ORU115 NaN 9.59 9.59
SJU115 NaN 37.48 40.51
SUY23001 NaN 13.80 15.58
EDO230 NaN 40.45 44.58
EWA11501 NaN 57.95 64.45
QOL115 NaN 12.14 12.64
YUN024 NaN 6.77 7.00

-----Total elapsed time: 20.1 s
Python Script '05_ESCR_Comparison_v01' successfully executed

```

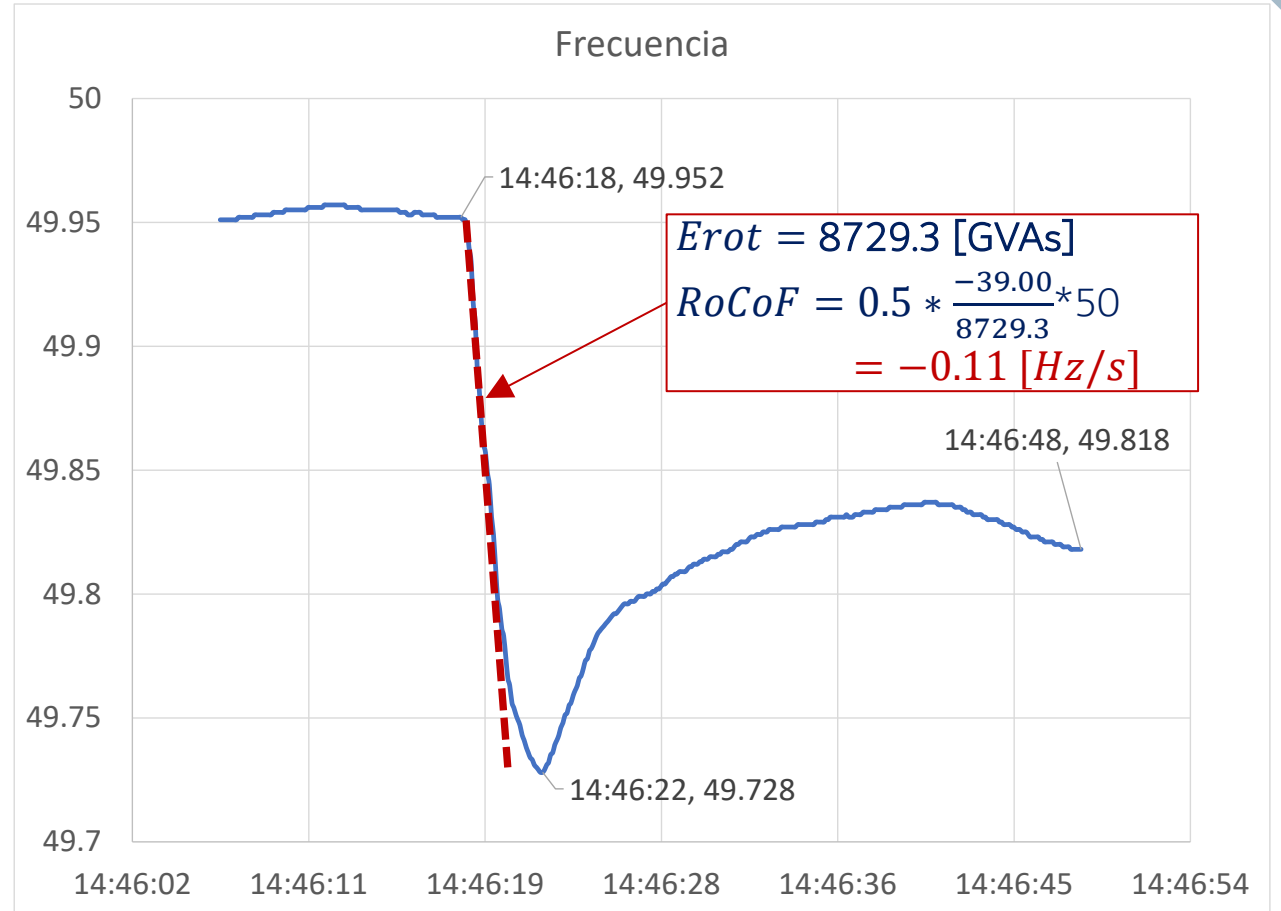
Inercia Sistémica

$$RoCoF = \frac{f_o * \Delta P}{2 * E_{rot}}$$

$$E_{rot} = \sum_i H_i * S_i$$

Mientras mas pequeña es la inercia del sistema se observa una mayor variación de la frecuencia

29/06/2025 Hrs. 14:40:00
AGU02=39.00 MW ; Demanda=1096.6 MW

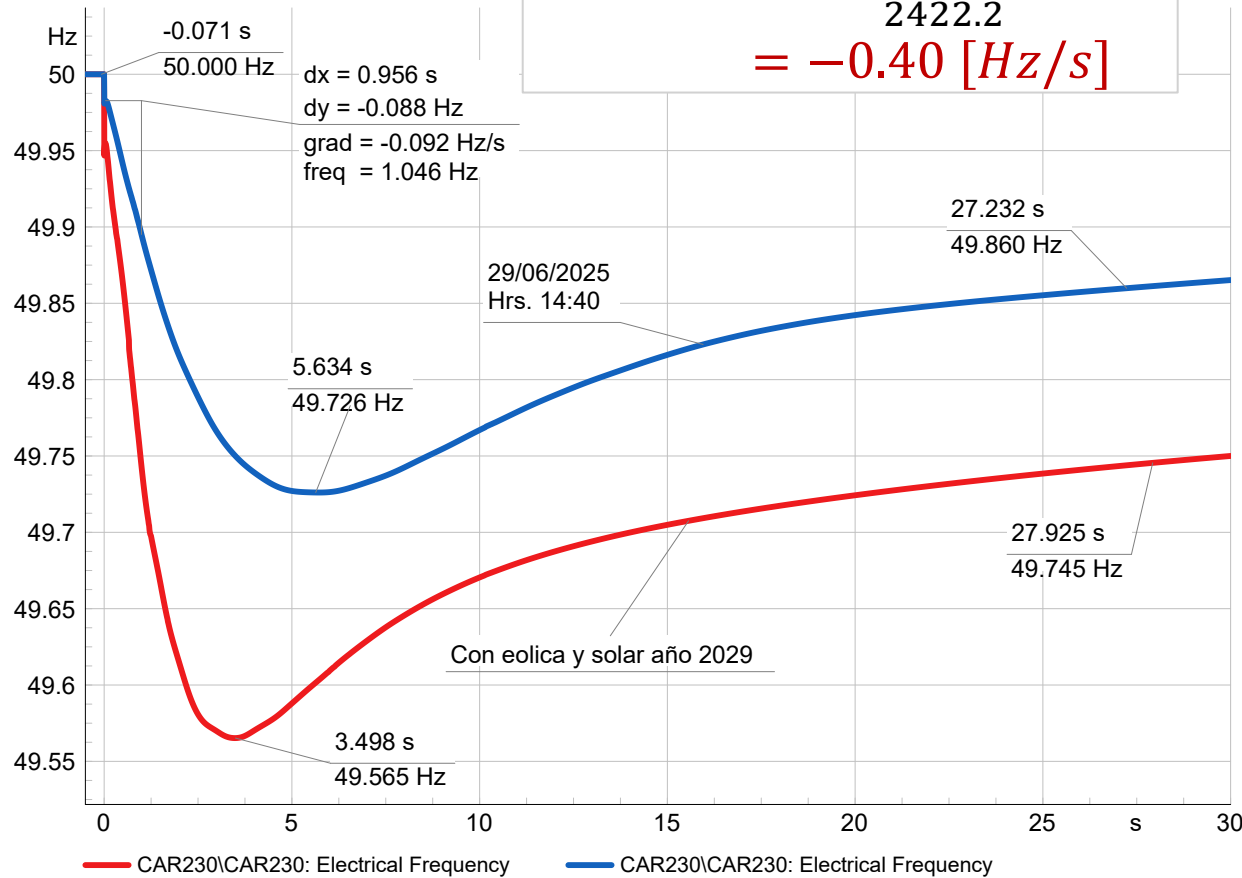


Inercia Sistémica

$$E_{rot} = 2422.2 \text{ [GVAs]}$$

$$RoCoF = 0.5 * \frac{-39.00}{2422.2} * 50$$

$$= -0.40 \text{ [Hz/s]}$$



- El RoCoF del sistema no es crítica, puesto que aún es lejano al limite de la protección de **-0.8 Hz/s**.
- La implementación de BESS en modo regulación primaria de frecuencia, contribuye al desempeño del sistema.

Inercia Sistémica

Herramientas aplicadas en el análisis:

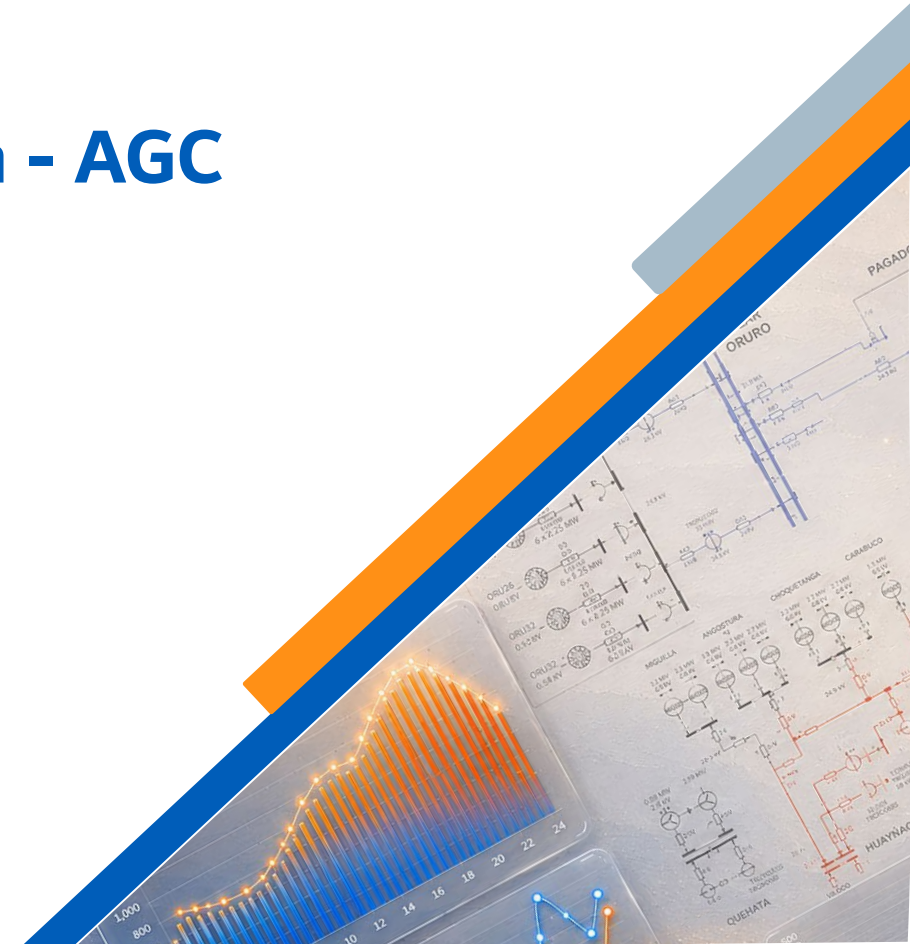
- Se ha desarrollado scripts en PowerFactory para automatizar el calculo de RoCoF (Códigos en Python).
- **Metodologías de dimensionamiento de BESS por seguridad.** Se pretende automatizar estos análisis para estudios de planificación (Códigos en Python) .

Seguridad y Confiabilidad

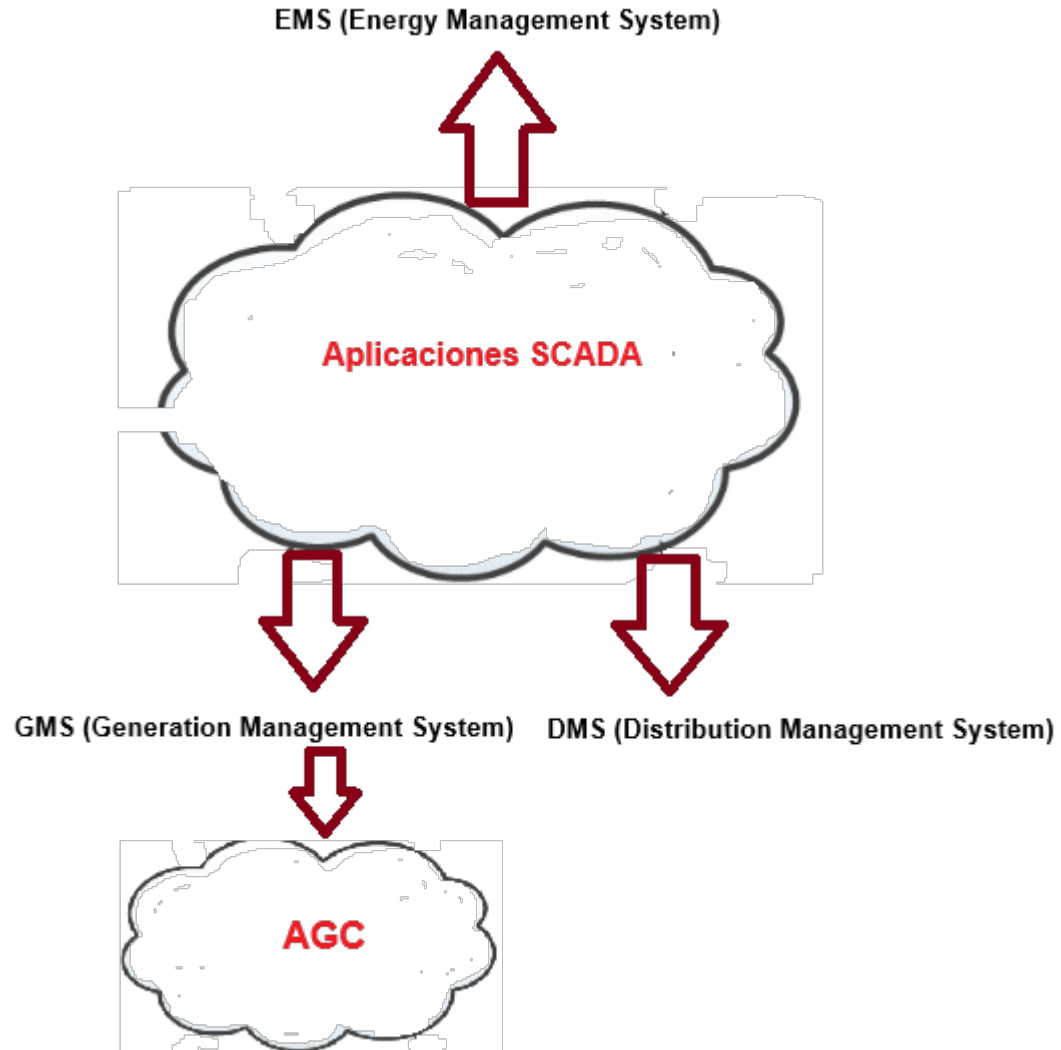
Próximos pasos :

- Consultoría con GIZ para dimensionar los Compensadores Sincrónicos.
- Tecnología Grid-Forming (GFM) para asegurar la fortaleza de la red.
- Contribución de los BESS en la inercia, regulación de frecuencia del Sistema y compensación de la variabilidad de la generación eólica y solar.
- **Operativizar el sistema AGC para compensar las variabilidades de largo plazo (minutos).**

Control Automático de Generación - AGC



Aplicaciones SCADA - AGC



AGC (Automatic Generation Control) = Control Automático de Generación.

¿Por qué se necesita AGC?

Equilibrar balance de generación y carga

Mantiene la frecuencia cerca a 50 Hz.

El AGC

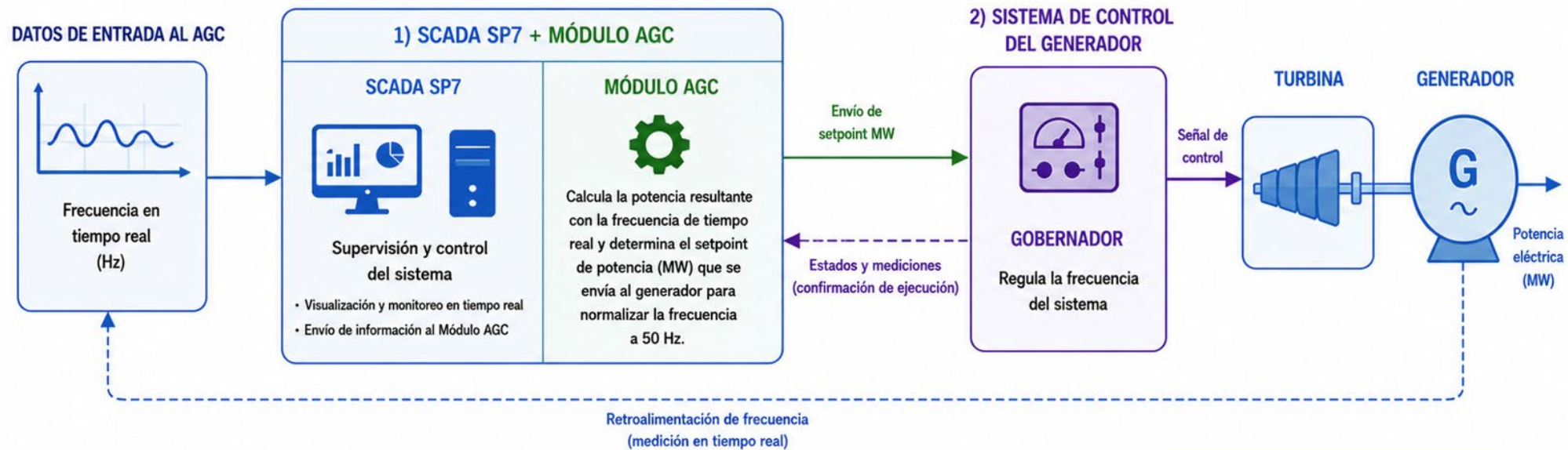


Regulación de frecuencia secundaria.



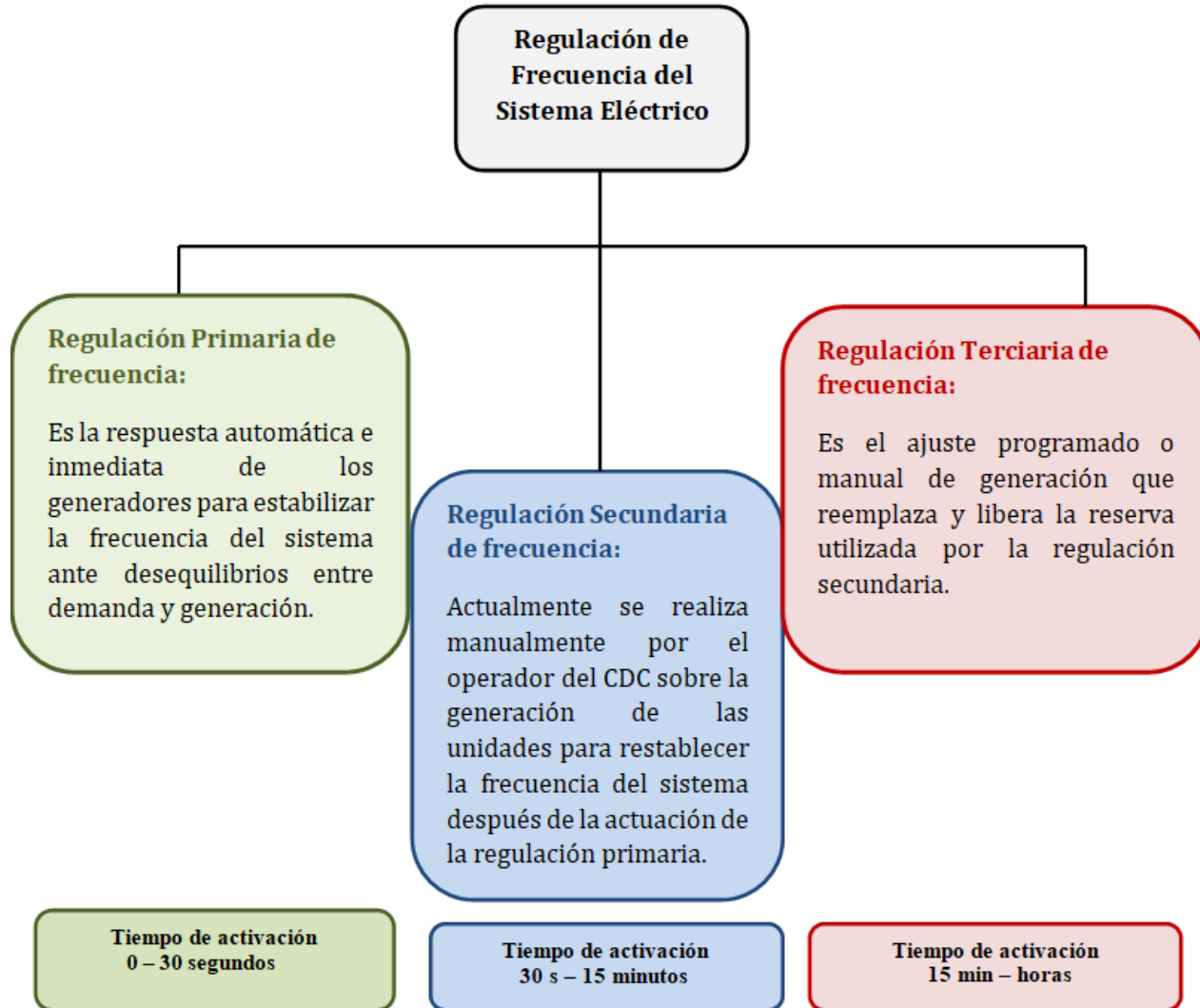
¿Cómo opera el AGC?

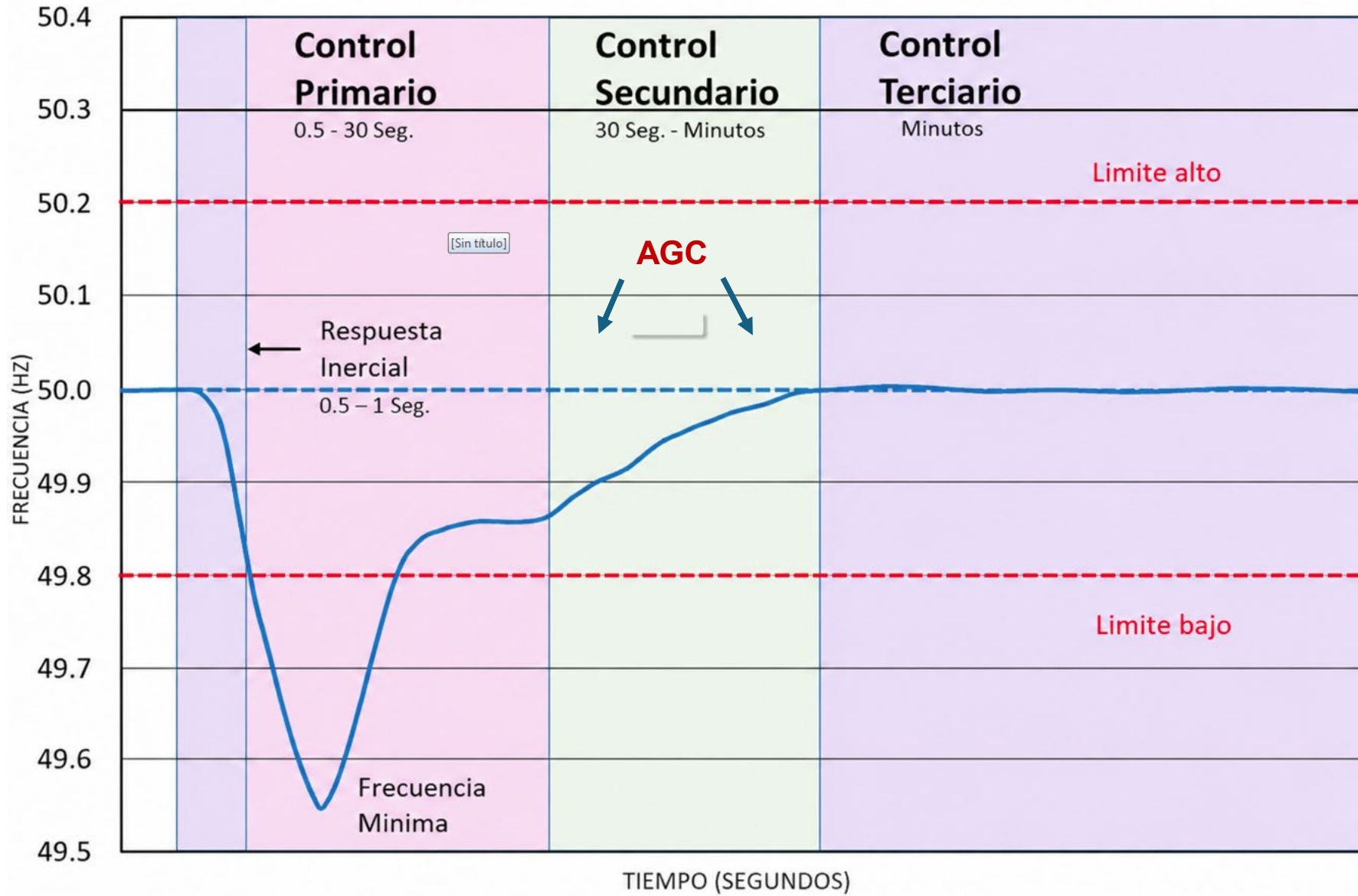
DIAGRAMA DE BLOQUE – AGC (Automatic Generation Control)



OBJETIVO DEL AGC: Mantener la frecuencia del sistema en su valor nominal (50 Hz) ajustando automáticamente la potencia generada (MW) mediante el control de la turbina del generador.

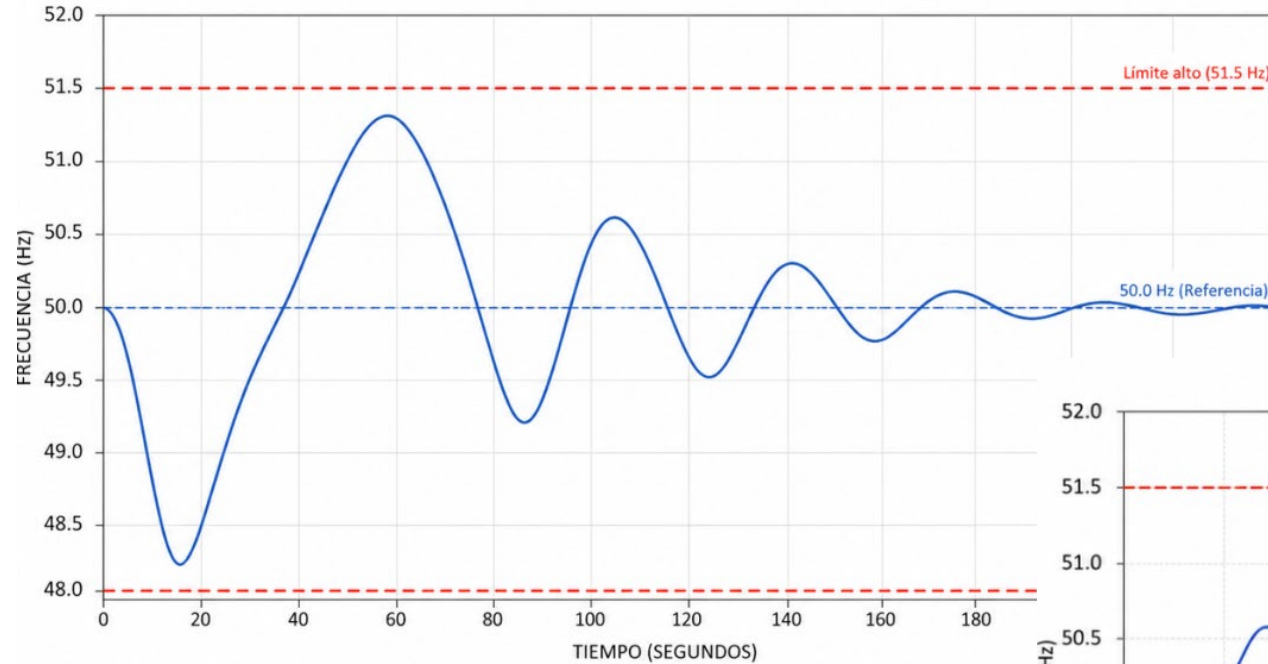
Regulación de frecuencia secundaria



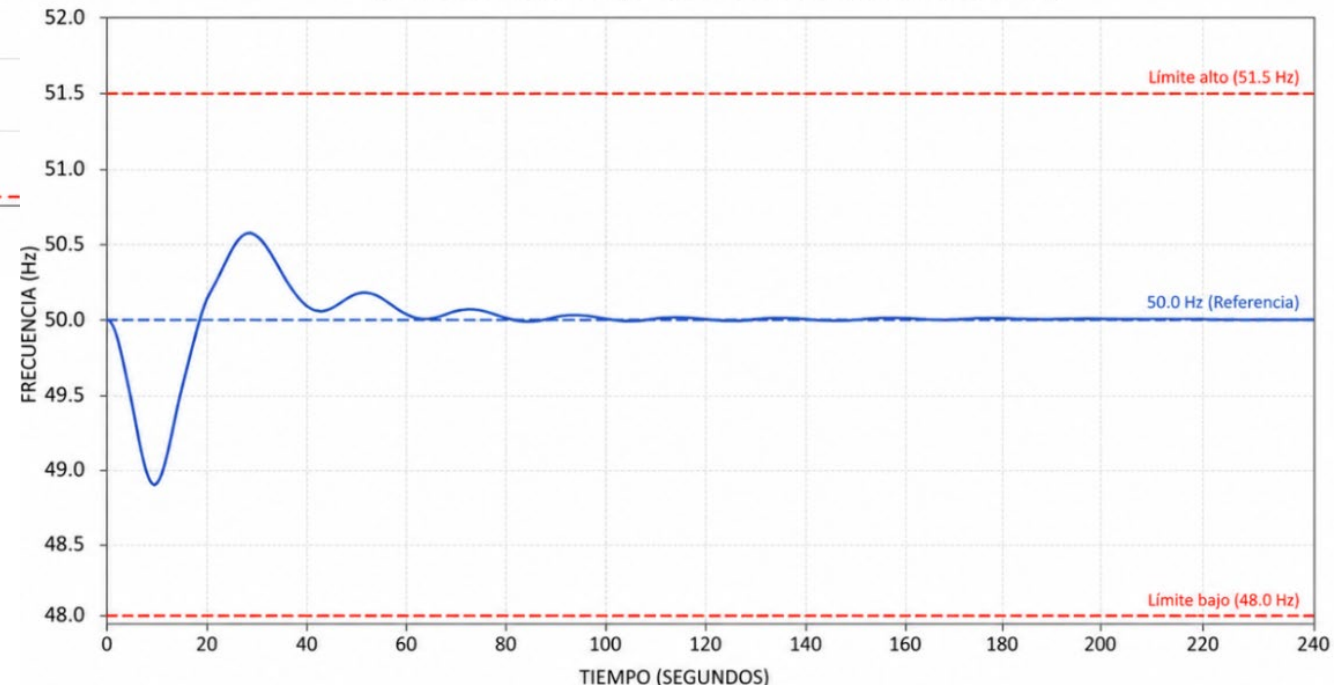


Comportamiento de la frecuencia sin AGC y con AGC

Frecuencia sin AGC (Respuesta natural)



Frecuencia con AGC (Respuesta con control automático)



¿Qué se gana?

- Frecuencia estable del sistema eléctrico – variación de demanda
- Minimiza costos de operación
- Regula la frecuencia - generación renovable intermitente – **Integración de Generación Renovable Intermitente**
- Intercambio de potencia programado entre áreas.
- Prevención de daño en turbinas y motores
- Despacho económico óptimo
- AGC ya tiene algoritmos que consideran baterías, previsión solares, eólicas - incertidumbre.





AFD - RTE international

Pruebas y ensayos con ciclos combinados de ENDE Andina:

- Cálculo y parametrización del AGC.
- Prueba del módulo AGC en fecha 24-11-2023
- Pruebas en blanco sin unidades generadoras conectadas
- WAR20 en fecha 28-11-2023 y 29-11-2023
- WAR20 en fecha 07-12-2023 y 08-12-2023
- WAR20 y ERI50 en fecha 03-04-2024
- WAR20 en fecha 03-05-2024.
- ERI50 en fecha 22-07-2024.
- 29 -07- 2024 a 01-08-2024 WAR10 y WAR30.

¿Cuáles son los avances en AGC?

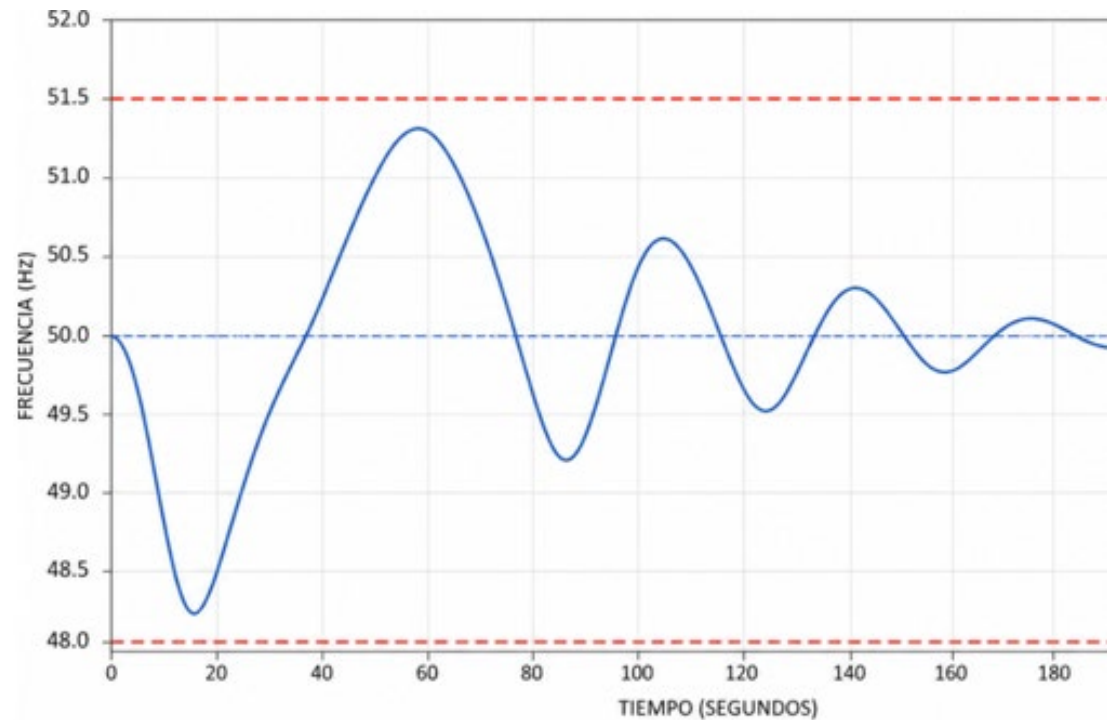


Resultados de pruebas AGC

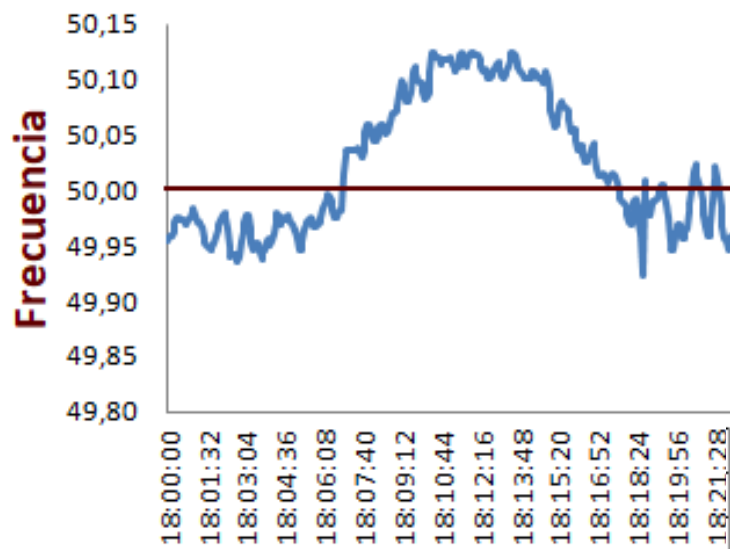
- ❑ El valor de frecuencia se aproxima al valor nominal de 50 Hz.
- ❑ Menor dispersión, lo que significa menos variabilidad.
- ❑ Reducción de los picos máximos de variación de frecuencia



CALIDAD DEL SERVICIO ELÉCTRICO

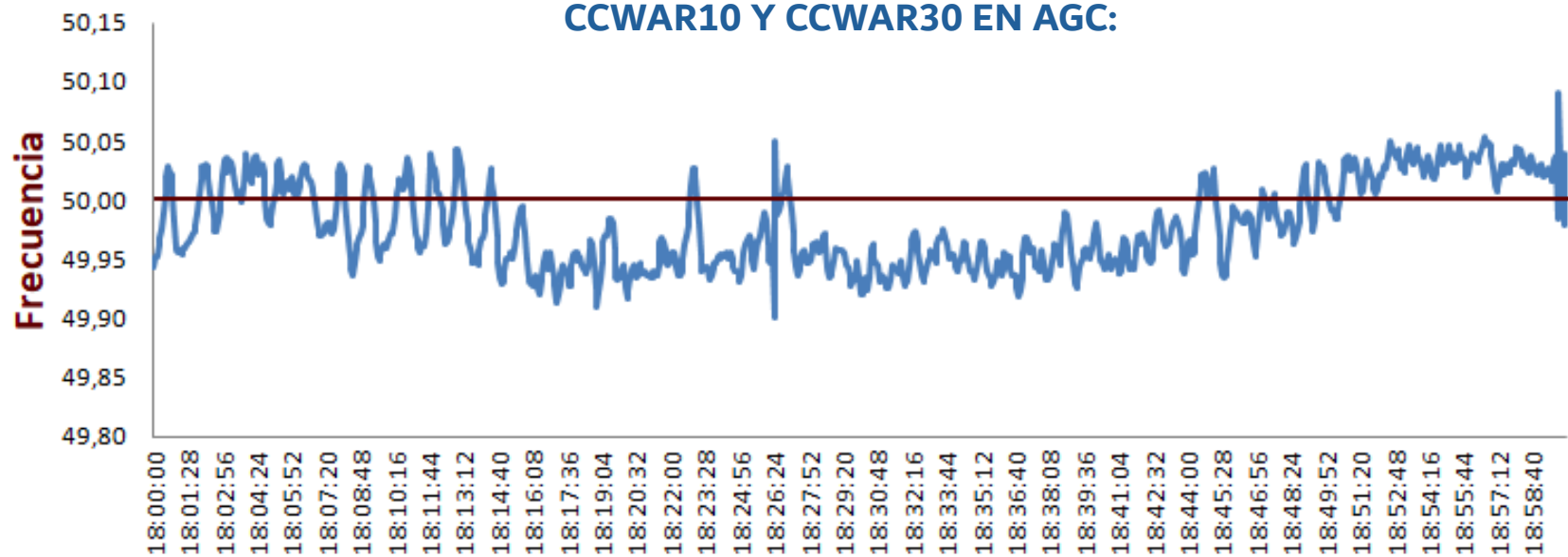


Regulación Secundaria de Frecuencia sin AGC



Regulación Secundaria de Frecuencia con AGC

CCWAR10 Y CCWAR30 EN AGC:

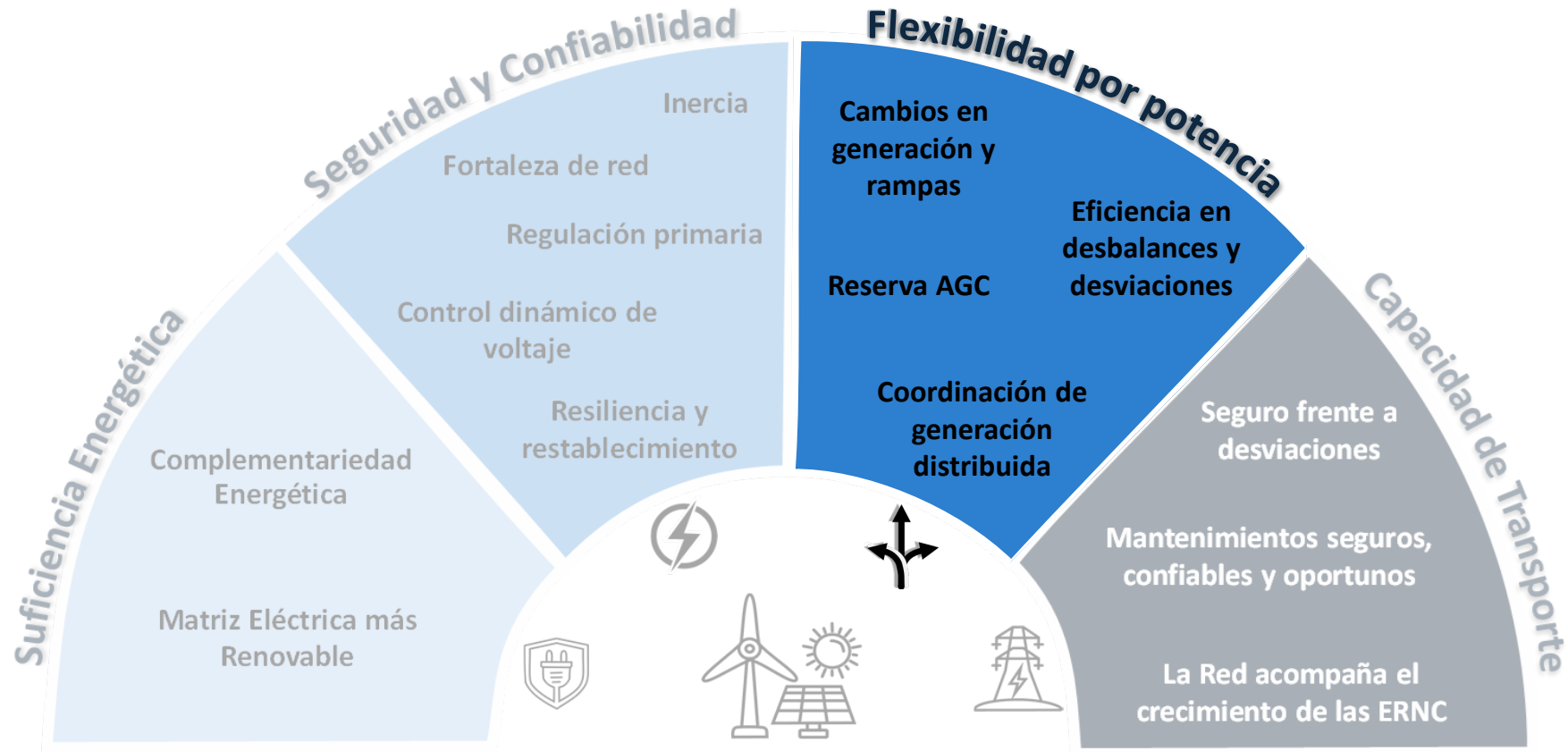


¿Cuáles son los próximos pasos?

- Pruebas con mayor cantidad de unidades en AGC otros agentes térmicos e hidroeléctricos
- Ajuste fino de los controladores del AGC, mejor comportamiento
- Adecuar la Normativa.



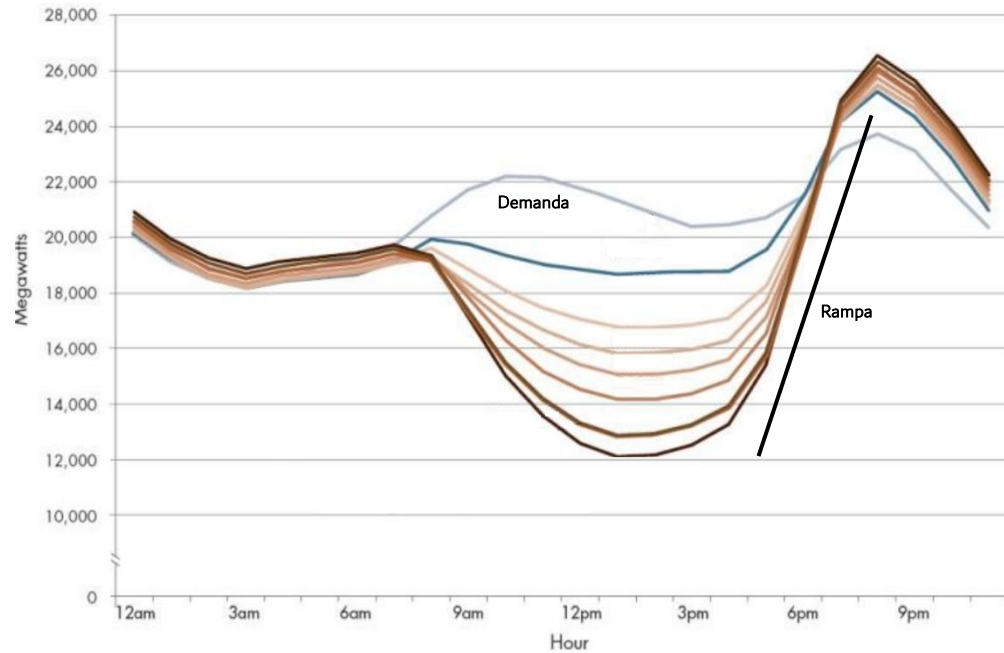
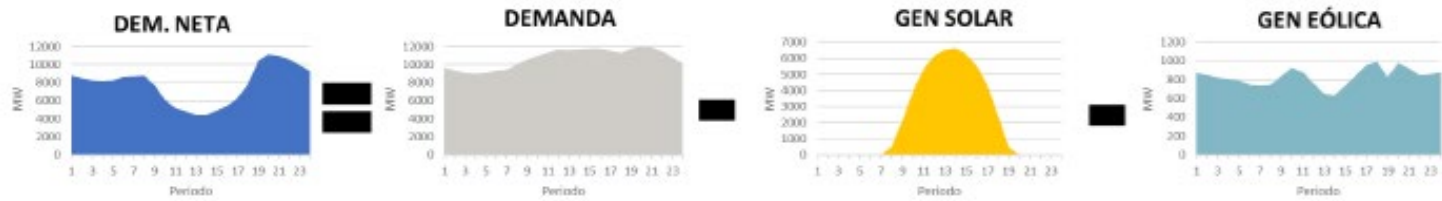
Flexibilidad por potencia



Atributos sistémicos

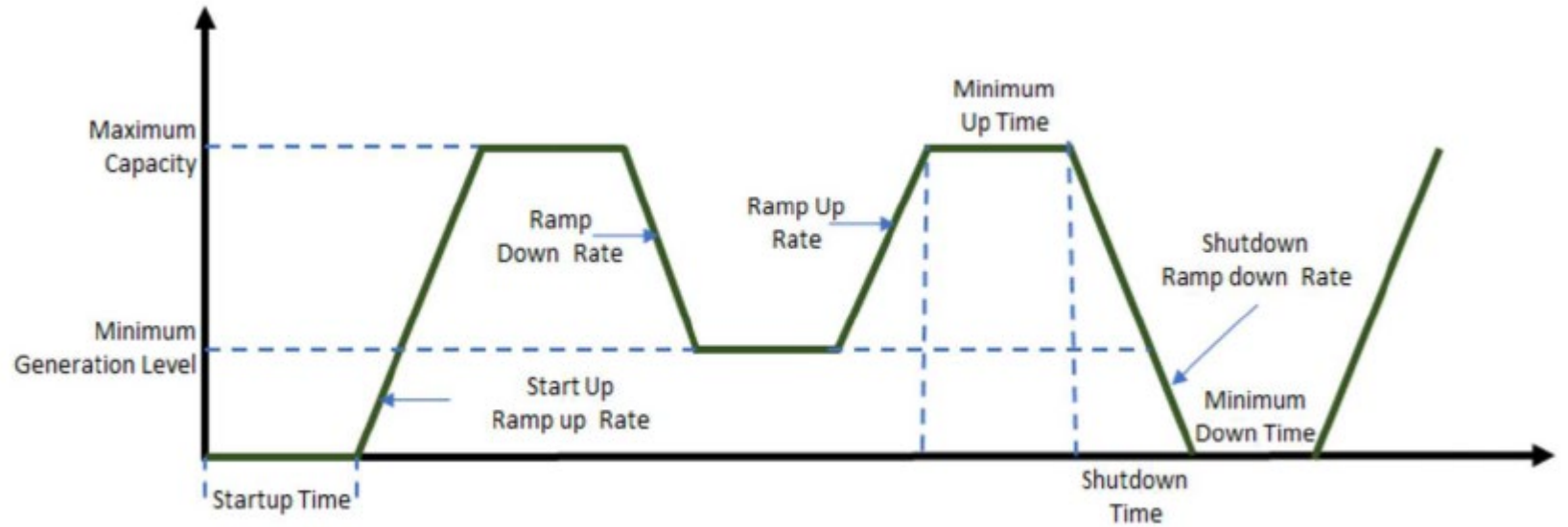
Análisis de rampas

Demanda Neta



Análisis de rampas

Atributos de flexibilidad de un generador



Source: NREL (2020b)

Análisis de rampas

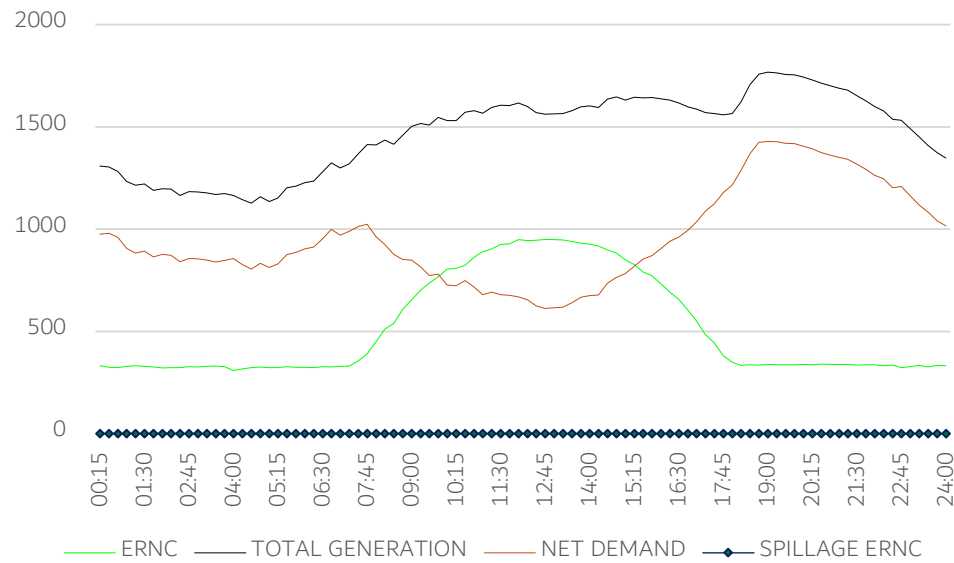
t = Downtime Prior to Start up	Start up Type	Start up Time
t < 8 hours	Hot Start	7 to 11 hours
8 hours < t < 48 hours	Warm Start	9 to 14 hours
t > 48 horas	Cold Start	15 to 20 hours

Hot Start (Arranque en Caliente) = 7 a 11 hrs.,

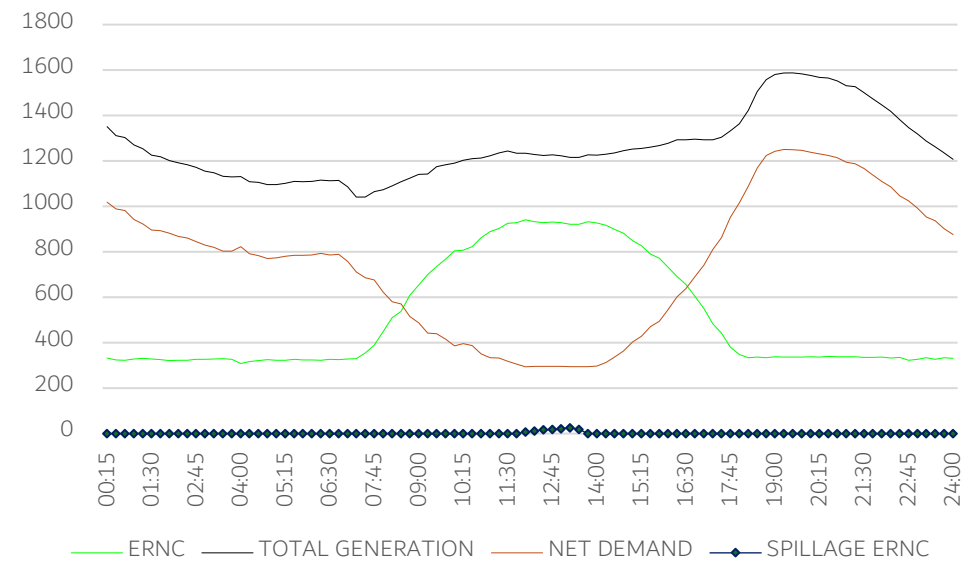


Análisis de rampas

Demanda Neta (MW) – Promedio Seco
(Jueves)

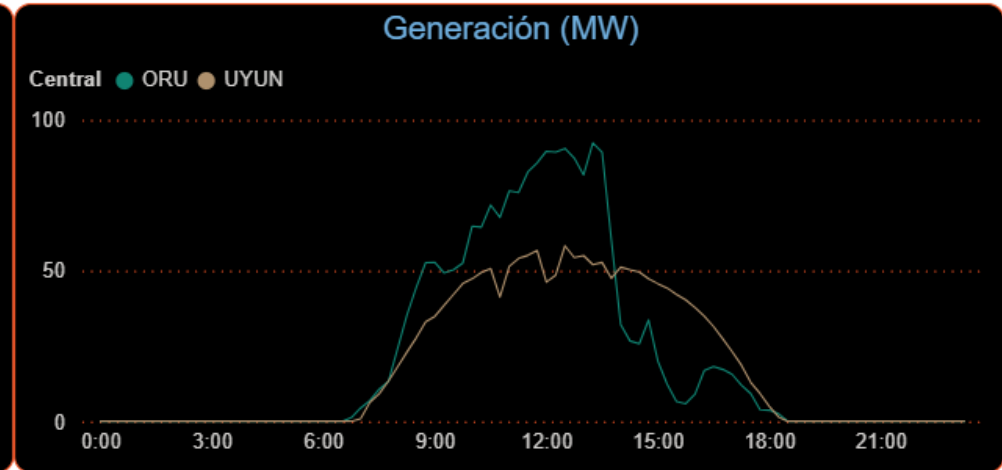
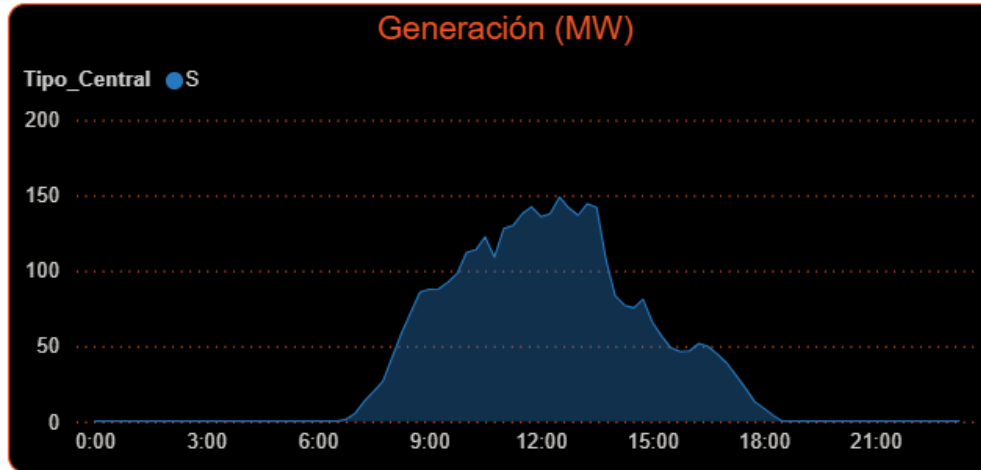


Demanda Neta (MW) – Promedio Seco
(Domingo)



Análisis de rampas

17-marzo-2025.



¿Hacia dónde vamos?

- Sistema de información basados en registradores digitales
- Sistema PMU y WAMS
- Simulaciones eléctricas EMT
- Sistema de toma de decisiones, IA