



Indicadores de Flexibilidad y Resiliencia

Septiembre
2022



TABLA DE CONTENIDO

PARTE 1

¿Cuanta Flexibilidad necesita el SEP?

PARTE 2

¿Qué tan flexible es la solución?

PARTE 5

Recursos Energéticos Distribuidos-DER brindando servicios de Resiliencia y Flexibilidad

PARTE 3

¿Qué tan flexible es el SEP?

PARTE 4

¿Quien está proporcionando flexibilidad en el SEP?

PARTE 6

Ciberseguridad y riesgos identificados en los DER



PARTE 1
¿Cuanta Flexibilidad necesita el SEP?





¿Cuanta Flexibilidad necesita el SEP?

Authors	Brief description	Reference
Kondziella and Bruckner (2016)	Review and classification of methods quantifying short-term FS potential. FS theoretical potential can be equated to flexibility requirement.	[26]
Huber <i>et al.</i> (2014)	Study of the impact of wind and solar generation on short-term flexibility requirement by evaluating one and multiple hour ramp rate in residual load.	[22]
Holtinen <i>et al.</i> (2010)	Study the impact of wind generation on residual load variability by evaluating 10-60 minute ramp rates.	[28]
Deetjen <i>et al.</i> (2017)	Study the impact of VRE penetration on flexibility requirement through six indicators: 1 hour ramp-rate, 3 hour ramp rate, ramp factor, ramp acceleration, 1 hour volatility and 1 day volatility.	[29]
Lannoye <i>et al.</i> (2012)	Review of flexibility quantification methods. Proposed the basis for the classification used in this paper. Mention a few metrics that were used back then, such as standard deviation of VRE output and residual load, or forecast error statistics.	[9]
Dvorkin <i>et al.</i> (2014)	Study the impact of wind generation on flexibility requirement, by evaluating the magnitude, ramp rate and ramp duration of deviations between scheduled and actual residual load.	[30]
Nosair <i>et al.</i> (2015)	Present the "flexibility envelope" framework, which covers multiple facets of flexibility. Flexibility requirement is one of the framework's building blocks, and identified as 95% of the probability distribution function of VRE intra-hourly deviation from forecast.	[5]
Heggarty <i>et al.</i> (2019)	Present a set of metrics evaluating flexibility requirement on multiple timescales.	[24]
Olsen <i>et al.</i> (2020)	Extension of method presented by [24], looking at additional shorter timescales.	[31]
Makarov <i>et al.</i> (2012)	Present a methodology to quantify the storage capacity that would be required to manage the mismatch between hour-ahead residual load forecast and reality.	[33]
Oh and Son (2018)	Explore the feasibility of sizing a storage device to reduce penalties from wind forecasting errors.	[34]
Belderbos <i>et al.</i> (2017)	Study the link between storage power and energy sizing and the shape of generation and load profiles.	[35]
Steinke <i>et al.</i> (2013)	Study the roles of storage and network in providing "backup" for 100% VRE systems.	[36]
Heide <i>et al.</i> (2010)	Study the wind/solar balance that minimises the need to store energy.	[37]
Denholm and Hand (2011)	Study how curtailment is impacted by VRE penetration, wind/solar balance and the introduction of storage.	[38]
Weitemeyer <i>et al.</i> (2015)	Study the role of VER curtailment-fed storage in maximising VRE integration.	[39]
Zerrahn and Schill (2017)	Among other things, review storage requirement quantification methods.	[40]
Jurasz <i>et al.</i> (2020)	Review metrics quantifying energy resource complementarity.	[41]



¿Cuanta Flexibilidad necesita el SEP?

Indicadores básicos según referencias:

- Demanda Neta.
- Magnitud de rampas horarias e intra horarias, junto con desviaciones de rampa.
- Envolvente de flexibilidad.
- Capacidad de almacenamiento y transporte.
- Vertimientos de generación renovable-“curtailment”.

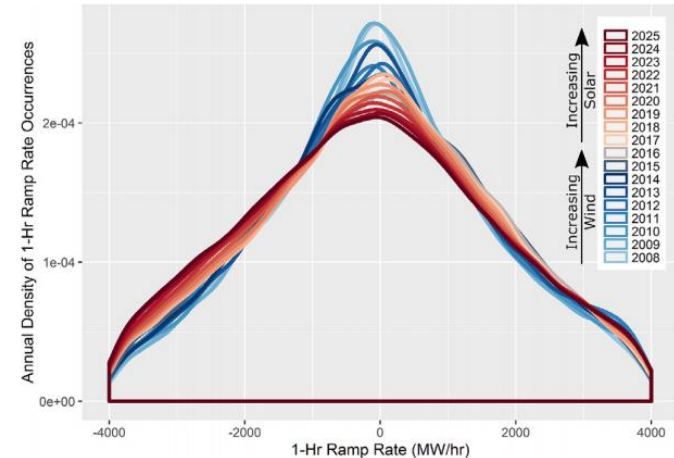
$$1HrRampRate(t) = NetLoad(t) - NetLoad(t - 4)$$

$$3HrRampRate(t) = NetLoad(t) - NetLoad(t - 12)$$

$$RampFactor(t) = \frac{(NetLoad(t) - NetLoad(t - 1))}{(NetLoad(t - 1))}$$

$$RampAccel.(t) = abs(15MinRampRate(t) - 15MinRampRate(t - 1))$$

$$1HrVolatility(t) = \sum_{t=1}^{t-4} RampAcceleration(t)$$



















¿Cuanta Flexibilidad necesita el SEP?

Indicadores básicos según referencias:

- Demanda Neta.
- Magnitud de rampas horarias e intra horarias, junto con desviaciones de rampa.
- Envolvente de flexibilidad.
- Capacidad de almacenamiento y transporte.
- Vertimientos de generación renovable-“curtailment”.

Normalized Flexibility Index (NFI), índice *offline* que evalúa el aporte de cada máquina a la flexibilidad del sistema, es deseable que el valor de este índice sea alto.

Generador	Tipo	Parámetros e índices de unidades				Ejemplo de Composición de Sistema						
		Pmax [MW]	Min Téc [% Pmax]	Ramp [% / min]	Flex_i (t= 5 min)	Participación en Parque Desp						
							Caso 1	Caso 2	Caso 3			
EL TORO	Hidro Emb	450	0%	32.9%		1.00		30%		10%		50%
NUEVA RENCA CC	CC GNatural	318	50%	3.1%		0.33		15%		40%		
GUACOLDA 1	Carbón	138	36%	1.4%		0.36		50%		45%		
TALTAL 1 (*)	TG GNatural	115	4%	8.7%		0.70		5%		5%		50%
(*) Mínimo técnico sin considerar restricción ambiental							NFI	0.56	0.43	0.85		

si $flex(i) \leq NFI_A$ se entenderá que la unidad i no es flexible.

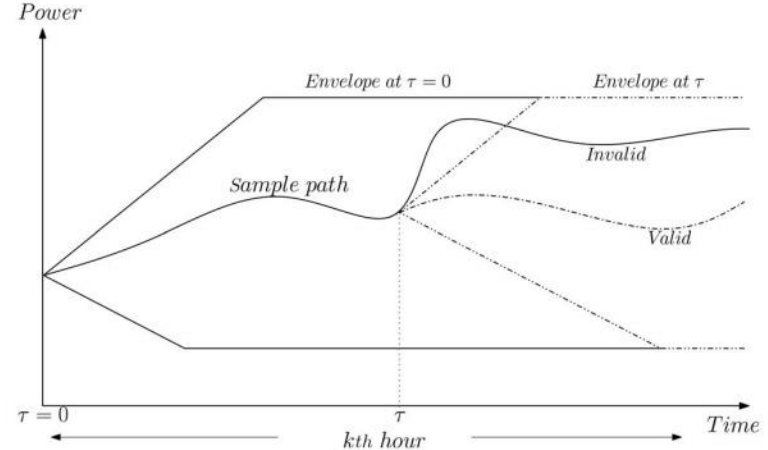


¿Cuanta Flexibilidad necesita el SEP?

Indicadores básicos según referencias:

- Demanda Neta.
- Magnitud de rampas horarias e intra horarias, junto con desviaciones de rampa.
- Envolvente de flexibilidad.
- Capacidad de almacenamiento y transporte.
- Vertimientos de generación renovable-“curtailment”.

$$w(k, \tau) = \hat{P}_{\text{RES}}(k) - P_{\text{RES}}(k + \tau)$$



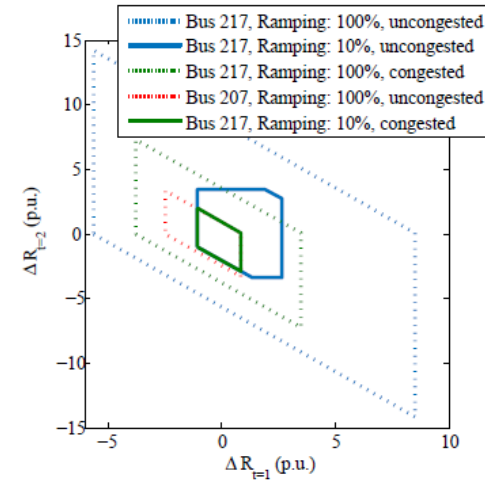


¿Cuanta Flexibilidad necesita el SEP?

Indicadores básicos según referencias:

- Demanda Neta.
- Magnitud de rampas horarias e intra horarias, junto con desviaciones de rampa.
- Envolvente de flexibilidad.
- Capacidad de almacenamiento y transporte.
- Vertimientos de generación renovable-“curtailment”.

Locational flexibility at buses 217 and 207 for time steps $t = \{1, 2\}$.

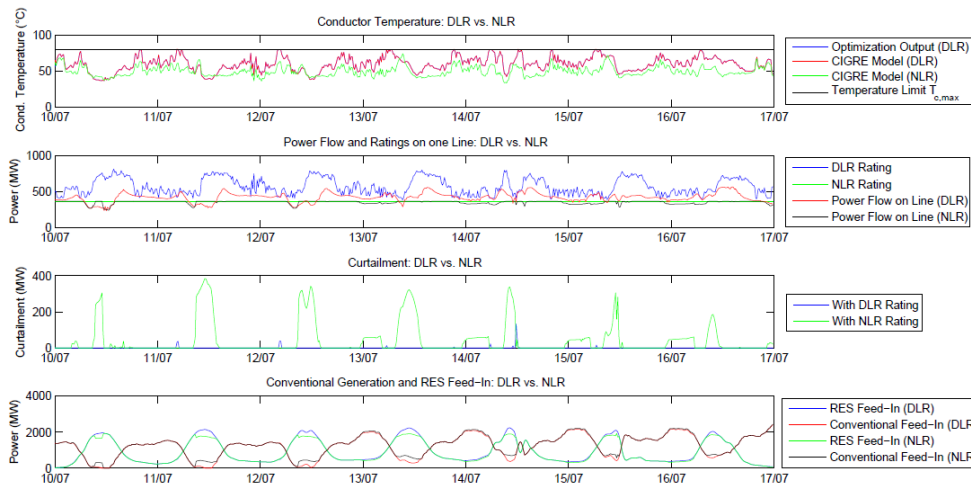




¿Cuanta Flexibilidad necesita el SEP?

Indicadores básicos según referencias:

- Demanda Neta.
- Magnitud de rampas horarias e intra horarias, junto con desviaciones de rampa.
- Envolvente de flexibilidad.
- Capacidad de almacenamiento y transporte.
- Vertimientos de generación renovable-“curtailment”.



Indicadores de Flexibilidad y Resiliencia

Fuente: Quantifying power system flexibility provision.
Thomas Heggarty, Jean-Yves Bourmaud, Robin Girard, Georges Kariniotakis



PARTE 2
¿Qué tan flexible es la solución?





¿Qué tan flexible es la solución?

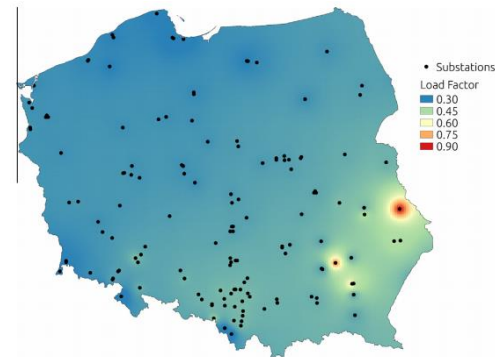
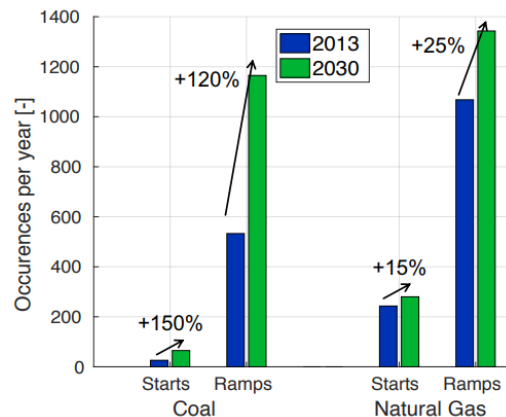
Authors	Brief description	Reference
Ma <i>et al.</i> (2014)	Present a composite metric based on a generator's operational margin and ramp rate. Aggregation method is also proposed to express the metric at system level.	[18]
Oree and Hassen (2016)	An extension of [18], present a composite metric based on 8 indicators: operational range, minimum power output, up/down ramping capability, start-up and shut-down times, response time, and minimum up and down times. Aggregation method is also proposed to express the metric at system level.	[42]
Wu <i>et al.</i> (2020)	While analysing the link between flexibility and scheduling cost, calculate a flexibility index for generating units following a method close to [42]. Aggregation method is also proposed to express the metric at system level.	[43]
Ulbig <i>et al.</i> (2015)	Based on power system simulation, evaluate power capability for up/down regulation, energy storage capability, power ramping capability, power ramping duration. This is performed at both FS and system level.	[6]
Nosair <i>et al.</i> (2015)	Present the "flexibility envelope" framework, which covers multiple facets of flexibility. As part of this framework, they track upward and downward potential against a constant scheduled output, for both an individual solution and a system.	[5]
Lannoye <i>et al.</i> (2012)	Review of existing flexibility quantification methods. Proposed the basis for the classification used in this paper. Mention a few metrics that were used back then, such as ramp rate, energy available within a certain timescale, or the ability to provide reserve.	[9]



¿Qué tan flexible es la solución?

No. of units	Unit size (MW)	Unit type	P_{\min} (%)	OR (MW)	RUR (MW/h)	RDR (MW/h)	SUT (h)	SDT (h)	MUT (h)	MDT (h)
5	12	Oil/Steam	0.2	9.6	9.6	9.6	4	0	0	0
4	20	Oil/combustion turbine (CT)	0.2	16	16	16	0	0	0	0
4	76	Coal/Steam	0.2	60.8	38.5	60.8	12	1	3	2
3	100	Oil/Steam	0.25	75	51	74	7	2	4	4
4	155	Coal/Steam	0.35	100.76	55	78	11	2	5	3
3	197	Oil/Steam	0.35	128.05	55	99	7	2	5	6
1	350	Coal/3 Steam	0.4	210	70	120	12	3	8	5
2	400	Nuclear	0.25	300	50.5	100	24	4	8	5

EnerPol simulations show that for Europe with increased penetration of RES electricity in 2030 coal and natural gas power plants face significant increase in cycling operation





PARTE 3

¿Qué tan flexible es el SEP?



¿Qué tan flexible es el SEP?

Authors	Brief description	Reference
Nosair <i>et al.</i> (2015)	Present the "flexibility envelope" framework, which covers multiple facets of flexibility. As part of this framework, they track upward and downward potential against a constant scheduled output, for both an individual solution and a system.	[5]
Ma <i>et al.</i> (2014)	Present a composite metric based on a generator's operational margin and ramp rate. Aggregation method is also proposed to express the metric at system level.	[18]
Oree and Hassen (2016)	An extension of [18], present a composite metric based on 8 indicators: operational range, minimum power output, up/down ramping capability, start-up and shut-down times, response time, and minimum up and down times. Aggregation method is also proposed to express the metric at system level.	[42]
Wu <i>et al.</i> (2020)	While analysing the link between flexibility and scheduling cost, calculate a flexibility index for generating units following a method close to [42]. Aggregation method is also proposed to express the metric at system level.	[43]
Ulbig <i>et al.</i> (2015)	Based on power system simulation, evaluate power capability for up/down regulation, energy storage capability, power ramping capability, power ramping duration. This is performed at both FS and system level.	[6]
NERC (2016)	Among other things, discuss probabilistic adequacy metrics.	[44]
Bird <i>et al.</i> (2016)	Review of international experience with VRE curtailment.	[45]
Lannoye <i>et al.</i> (2015)	Propose two metrics identifying flexibility deficiency: Periods of Flexibility Deficits, Insufficient Ramping Resource Expectation.	[9]
Tuohy and Lannoye (2014)	Provide a broad overview of flexibility assessment methods, while also introducing the Expected Unserved Ramping metric.	[23]
Zhao <i>et al.</i> (2016)	Propose a versatile unified framework to define and measure flexibility, allowing the consideration of several of its facets. Among other things, they maximise the uncertainty that a system can accommodate for a given cost, and propose a Boolean metric indicating whether a system's largest variation range is within a target range.	[4]
Menemenlis <i>et al.</i> (2011)	Propose a methodology to evaluate the probability of a balancing reserve strategy satisfying various scenarios.	[47]
Deane <i>et al.</i> (2014)	In their analysis of the impact of sub-hourly modelling of a power system with high wind penetration, calculate the shadow price of ramping.	[48]
Vithayasrichareon <i>et al.</i> (2017)	Quantify the cost implications of various flexibility constraints e.g. ramping, Pmin, start-up costs.	[49]
Morales <i>et al.</i> (2013)	Addresses modelling challenges for VRE market integration.	[50]
Bresesti <i>et al.</i> (2013)	Propose an index comparing the flexibility of different network configurations, for use both in planning and operations.	[12]
Capasso <i>et al.</i> (2014)	From a network congestion point of view, propose a metric quantifying the additional generation that a transmission system can accommodate.	[51]
Papaefthymiou <i>et al.</i> (2018)	List 80 key performance indicators to assess a system's readiness for high shares of VRE.	[10]

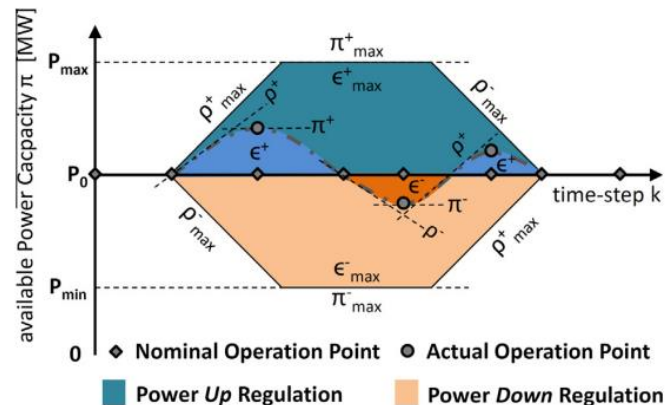


¿Qué tan flexible es el SEP?

Indicadores básicos según referencias:

- Demanda Neta.
- **Simulación detallada de la operación del SEP.**
- Magnitud de rampas horarias e intra horarias, junto con desviaciones de rampa.
- **Valor Esperado de Rampa Insuficiente.**
- Envolvente de flexibilidad.
- Capacidad de almacenamiento y transporte.
- Vertimientos de generación renovable-“curtailment”.

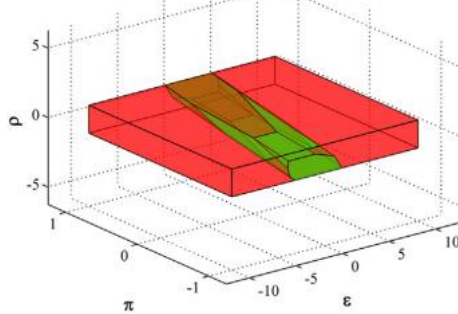
Power provision capacity π (MW).
 Power ramp-rate capacity ρ (MW/min).
 Energy provision capacity ϵ (MWh) as well as
 Ramp duration δ (min).



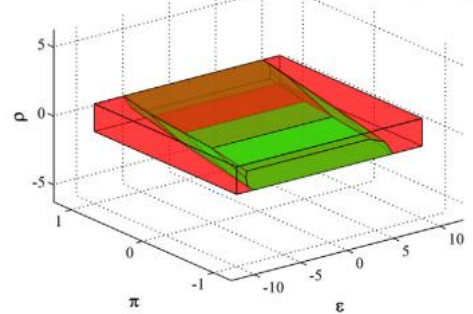


¿Qué tan flexible es el SEP?

Evolution of Available Flexibility over Time ($k=5$)



Evolution of Available Flexibility over Time ($k=10$)



Evolution of Available Flexibility over Time ($k=15$)

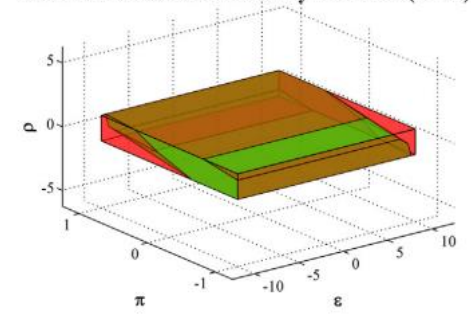
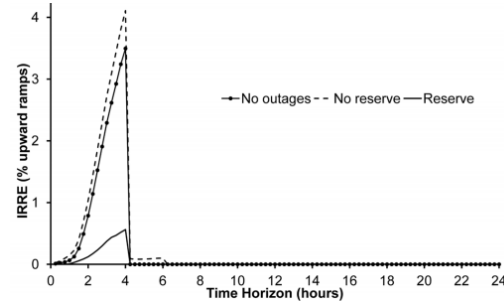


Fig. 8. Time-evolution of available operational flexibility from a storage unit at its nominal set-point $u^0 = [u_{\text{gen}}^0, u_{\text{load}}^0]_k$ at $k=0$. Green: Available flexibility at $k=1$ h, 2 h, 3 h, 5 h, 10 h, 15 h (reach set calculation). Red: Maximum available flexibility at $k \rightarrow \infty$ (calculated using Eq. (4) and (5)). (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)





PARTE 4

¿Quien está proporcionando flexibilidad en el SEP?



¿Quien está proporcionando flexibilidad en el SEP?

Authors	Brief description	Reference
Yasuda <i>et al.</i> (2013)	Propose a "flexibility chart" to give an overview of a system's existing FS capacities.	[52]
Deane <i>et al.</i> (2014)	In their analysis of the impact of sub-hourly modelling of a power system with high wind penetration, track the number of generator start-ups.	[48]
Vithayasrichareon <i>et al.</i> (2017)	In their quantification of the cost implications of various flexibility constraints, track the number of generator start-ups.	[49]

Average annual number of start ups per unit for each generation category.

	60 min Simulation	30 min Simulation	15 min Simulation	5 min Simulation
Base load	40	42	43	45
gas				
Mid merit	27	28	28	30
gas				
GAS OCGT	58	61	63	65
Coal	8	8	9	11
PHES	817	1191	1867	3446



PARTE 5
Los Recursos Energéticos Distribuidos-DER
brindando servicios de Resiliencia y
Flexibilidad

In February 2021, as a result of deadly winter storm and record low temperatures in Texas, USA, 4.5 million people were cut off from power.

Parte 5



2021 European Floods – Extreme Event

Erfstadt, July 2021



What happened:

- A storm complex moved from France to Germany and brought excessive amount of rainfall

Losses:

- > 200 deaths
- > USD 3 billion

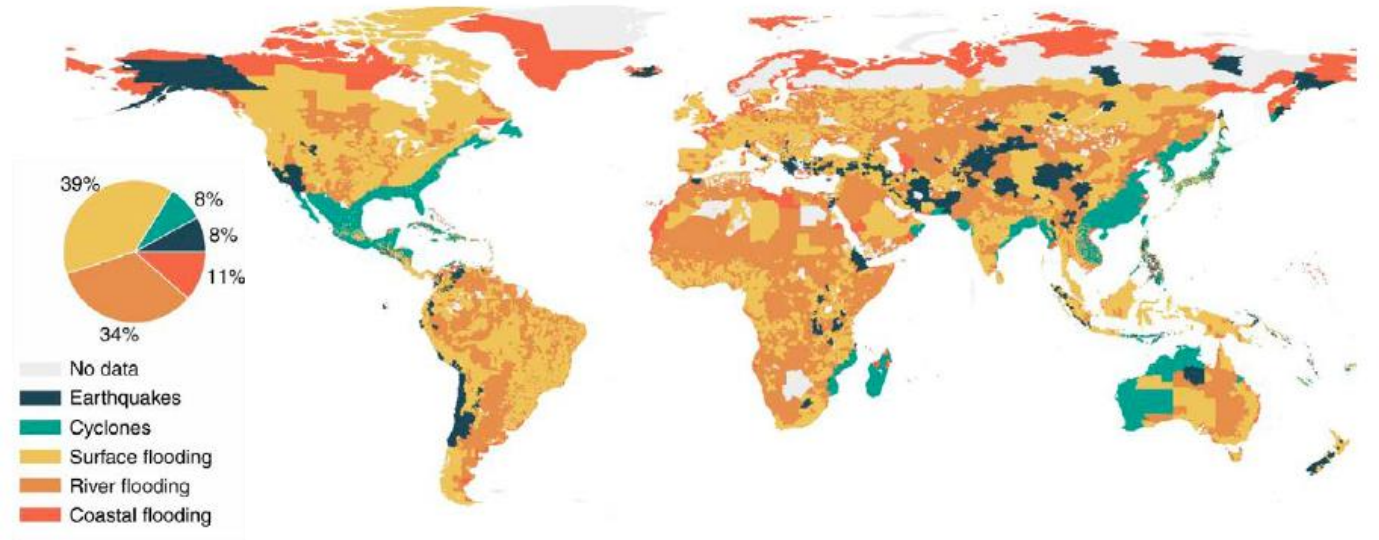
Key observations:

- Intense rainfall was forecasted for affected areas
- Not a Grey or Black Swan event

Fuente: Future Resilient Systems-FRS

Transportation Infrastructures and disaster risks

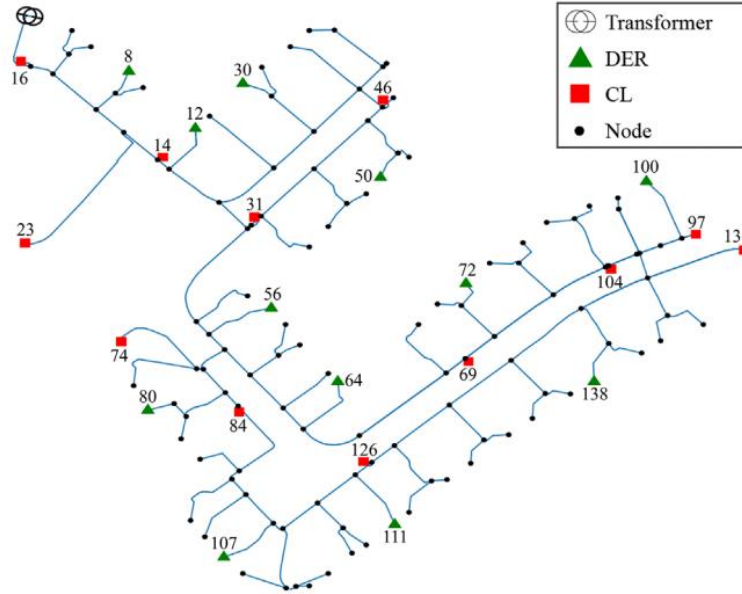
Global dominant hazard exposure per region (Koks et al., 2019)



Fuente: Global multi-hazard risk analysis of road and railway infrastructure assets



DER proporcionando Resiliencia



$$\begin{aligned} &\text{maximise} \quad \Gamma(\mathbf{p}^{CL}) - \Phi(\mathcal{N}_{MG}) \\ &\quad \quad \quad p^{CL}, \mathcal{N}_{MG} \\ &\text{s.t.} \quad \Pr(p_{drop}^{CL}) \leq \epsilon. \end{aligned}$$

$\Gamma(\mathbf{p}^{CL})$ Función que proporciona la cantidad de potencia suministrada a las cargas críticas por la Microred.

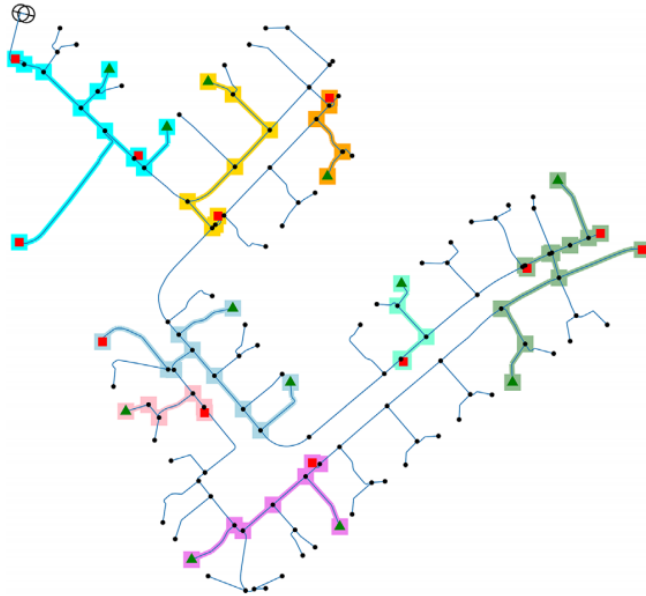
$\Phi(\mathcal{N}_{MG})$ Función que penaliza el tamaño de la Microred.

$\Pr(p_{drop}^{CL})$ Probabilidad de suministro insuficiente.

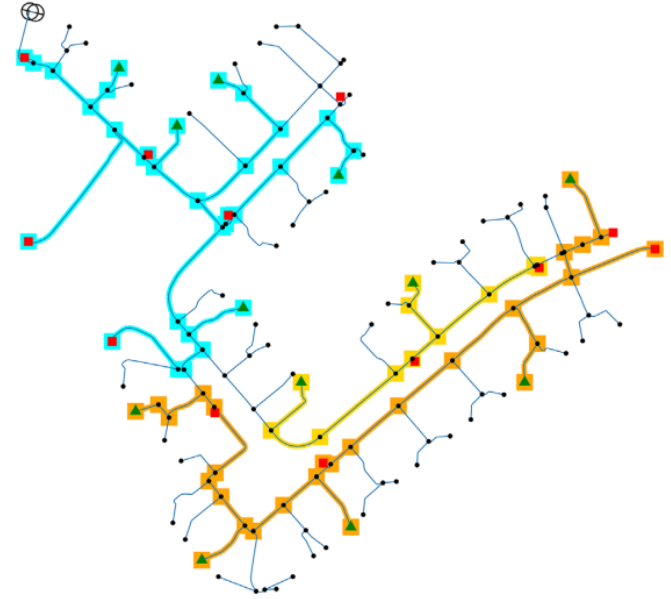
ϵ . Nivel de confianza.



DER proporcionando Resiliencia



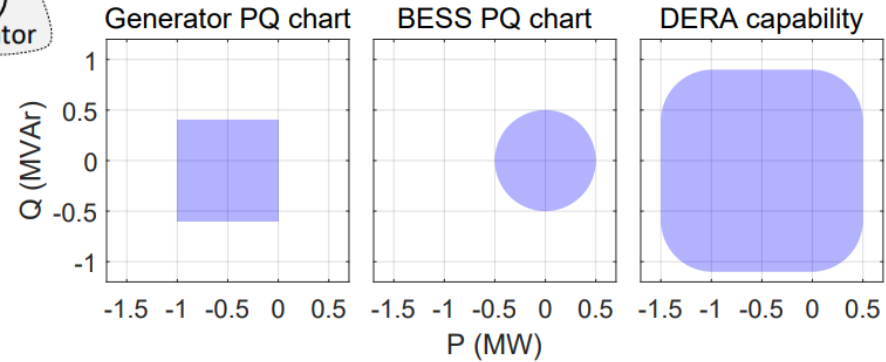
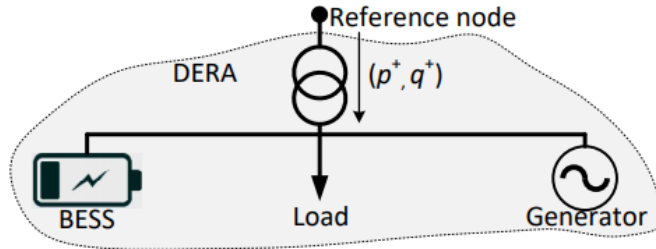
La formación intencional de islas, contemplando las características de los DER, puede disminuir los tiempos de re-establecimiento después de un apagón total o parcial.



Fuente: Formation of ad hoc microgrids for prompt critical load pickup during blackouts by leveraging stochastic distributed energy resources



DER proporcionando Flexibilidad



La agrupación de DER (DERA) puede, bajo un mecanismo de coordinación DSO-TSO, brindar flexibilidad desde la distribución hacia la transmisión.

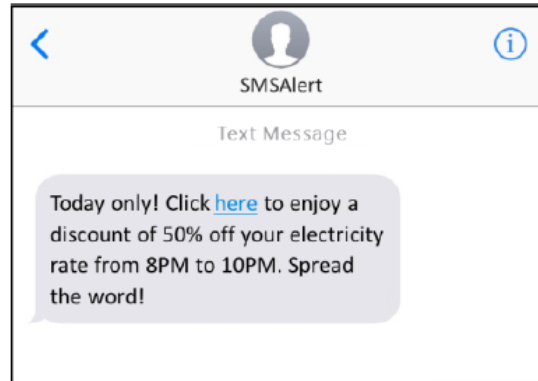


PARTE 6

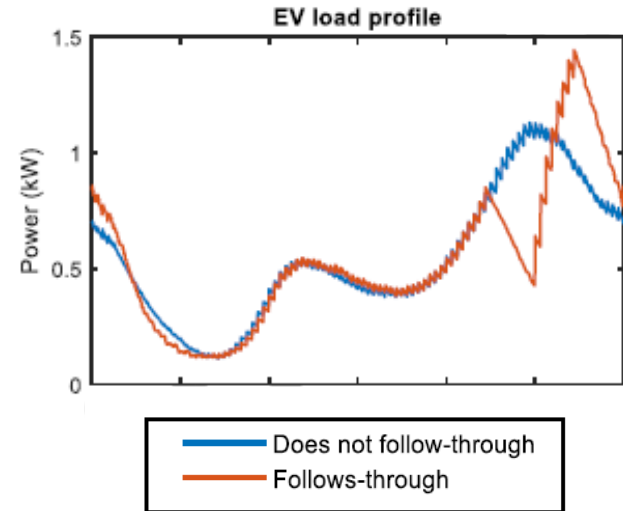
Ciberseguridad y riesgos identificados en los DER



Ataque cibernético (desinformación) en redes distribución

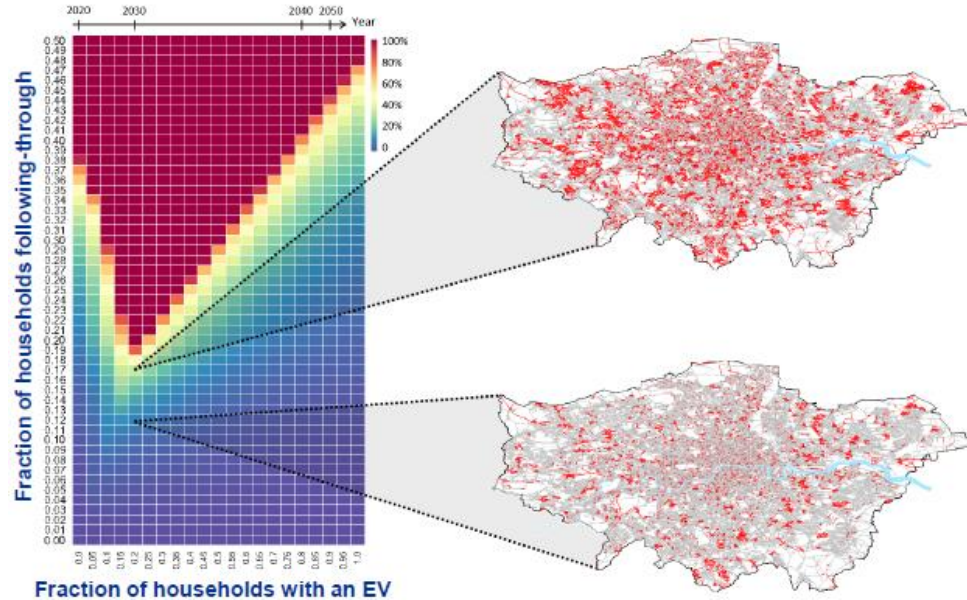


Disinformation notification
received by consumers





Ataque cibernético (desinformación) en redes distribución



- Se simula el ataque en una fracción de la red de distribución de Londres, asumiendo un límite de sobrecarga del 10 % en los alimentadores y transformadores.
- Para un mismo nivel de penetración de vehículos eléctricos, la evolución de los apagones es diferente en función del porcentaje de usuarios que siguen el ataque cibernético.

Fuente: How weaponizing disinformation can bring down a city's power grid



Conclusiones:

Proponemos los siguientes indicadores básicos de cuantificación de la flexibilidad, obtenidos a partir de una simulación detallada de la operación del SEP:

- Demanda Neta.
- Magnitud de rampas horarias e intra horarias, junto con desviaciones de rampa.
- Valor Esperado de Rampa Insuficiente.
- Número de eventos de "ciclaje" (arranques y paradas).
- Envolverte de flexibilidad.
- Capacidad de almacenamiento y transporte.
- Vertimientos de generación renovable-"curtailment".

Sugerimos al CND considerar en sus estudios de Resiliencia y Flexibilidad el aporte de los Recursos Energéticos Distribuidos-DER. En este sentido, el SAPE y el Comité de Distribución podrían colaborar en la estructuración de una metodología de cuantificación de dichos atributos.

La evolución de los recientes eventos climatológicos nos indican que estos acontecimientos serán cada vez más frecuentes. Se debe tener en cuenta el cambio de enfoque por el actual estado del arte, donde se prioriza la reducción de los tiempos de restablecimiento en detrimento de la construcción de super estructuras.



Observaciones:

- Disponibilidad de información por subárea para la demanda neta (generación por recurso primario renovable y demanda).
- Calcular fdp de rampas horarias de demanda neta a partir de la salidas del modelo.
- Por ahora, se sigue mirando los "ciclajes" como la versión 3 del estudio de flexibilidad.
- Para el índice de valor esperado de rampa insuficiente, si se cuenta con la información de arranque de las plantas hidroeléctricas, si vale la pena cuantificar dicho indicador.
- Envolvente flexibilidad: Se tratará de presentar en la 4 versión del estudio de flexibilidad el comportamiento para las rampas, al igual que su curva de duración.
- Para el % de uso de la red, en esta versión, se presentará el índice para la región caribe. Dependiendo de los resultados, se podrá masificar para otros cortes importantes del SIN.
- El Vertimiento energético ("on line") se mirará en esta 4 versión, y dependiendo de los resultados, se podrá hacer un doble click para una tecnología en particular.



Recomendaciones 2022:

Observaciones sobre el último estudio de Flexibilidad de XM:

- Considerar que el primer estudio de flexibilidad lo realizó la UPME en el Plan de Expansión 2016-2030.
- Se propone encontrar los límites de flexibilidad del SIN, considerando la cantidad de solicitudes de conexión de generación intermitente informada por la UPME.
- El estudio no refleja los atrapamientos de las 53 plantas que los análisis eléctricos ha identificado en sus estudios de planeamiento operativo eléctrico de mediano y largo plazo.
- Los vertimientos se calculan bajo el enfoque de suficiencia, no el análisis de potencia. Teniendo en cuenta los posibles atrapamientos asociados a las 53 plantas, se podría tener un nivel de “curtailment” mucho mayor.
- El ejemplo de desviaciones en los diferentes recursos y su efecto en los principales cortes es muy interesante, se sugiere presentarlo para todos los límites de transferencia que se verían impactados negativamente por la conexión de generación intermitente.
- (slide 19) Las conclusiones respecto a la flexibilidad por potencia, entendemos son producto del análisis convencional de red completa y contingencia N-1, sugerimos simular nuevamente eventos de estrés y considerar un horizonte de optimización móvil limitado, y una frecuencia de optimización mayor a 1.



Recomendaciones 2022:

Observaciones sobre el último estudio de Flexibilidad de XM:

- A diferencia de la versión anterior del estudio, se desconoce a partir de que potencia instantánea se empezarían a visualizar eventos de sub frecuencia que puedan activar la primera etapa de activación del EDAC. En el análisis anterior este valor era de 1500 MW para el 2021-2022 y 4400 MW para el periodo 2024-2025, garantizando una inercia de 300 segundos. En este sentido, ¿la conclusión “con las reservas se pueden incorporar 8100 MW”, sigue siendo valida?
- La mayoría de las observaciones planteadas previamente por el grupo SPO-SP-SAPES siguen siendo vigentes.



Recomendaciones 2022:

Considerar la flexibilidad que pueden aportar los Recursos Energéticos Distribuidos-DER

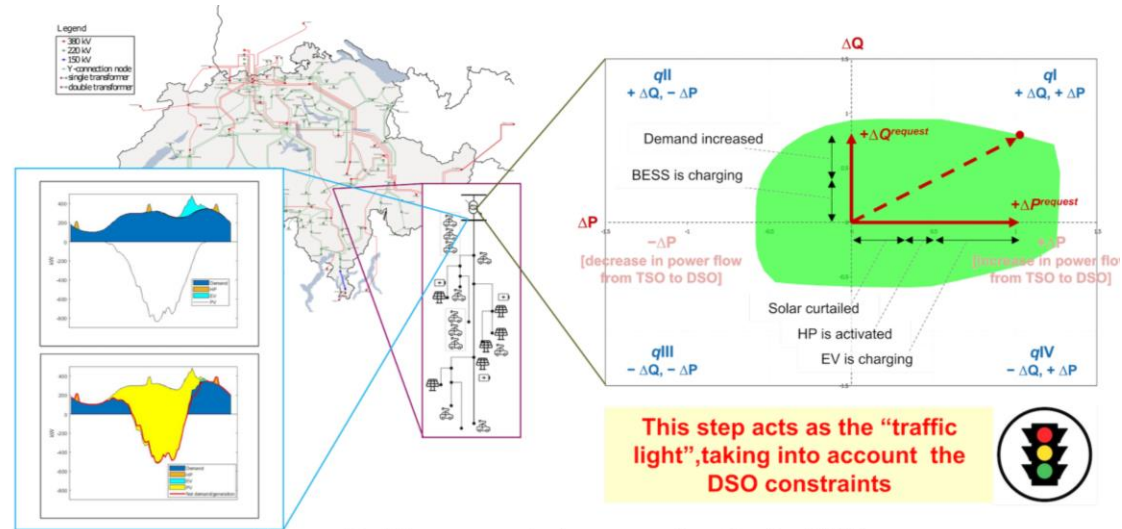


Figure 13: The concept of aggregating the flexibilities



Recomendaciones 2022:

Considerar la flexibilidad que pueden aportar los Recursos Energéticos Distribuidos-DER

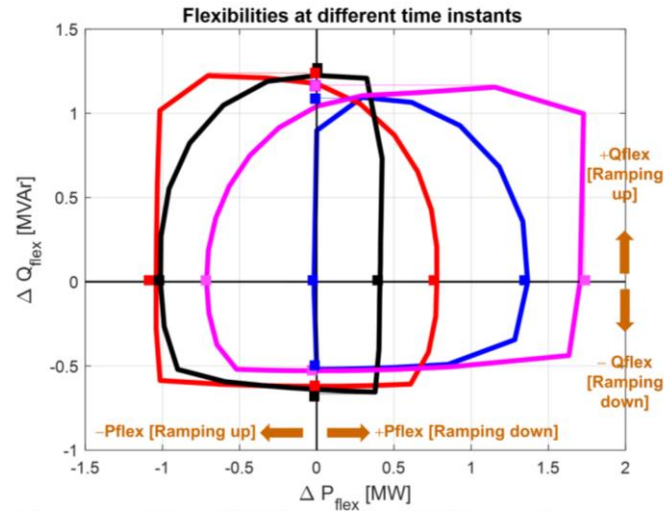
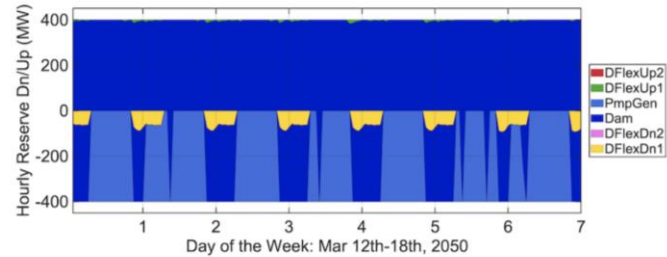


Figure 16: Flexibility area at $t=6:00$, $t=11:00$, $t=16:00$, $t=21:00$, contributed by all technologies and aggregated at the TS-DSO substation at each time step, for a Summer week day with high solar PV generation

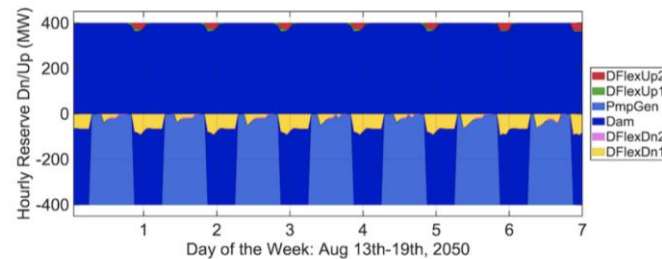


Recomendaciones 2022:

Considerar la flexibilidad que pueden aportar los Recursos Energéticos Distribuidos-DER



(a) CH Reserve Procurement - Winter



(b) CH Reserve Procurement - Summer



Recomendaciones 2022:

Considerar la flexibilidad que pueden aportar los Recursos Energéticos Distribuidos-DER

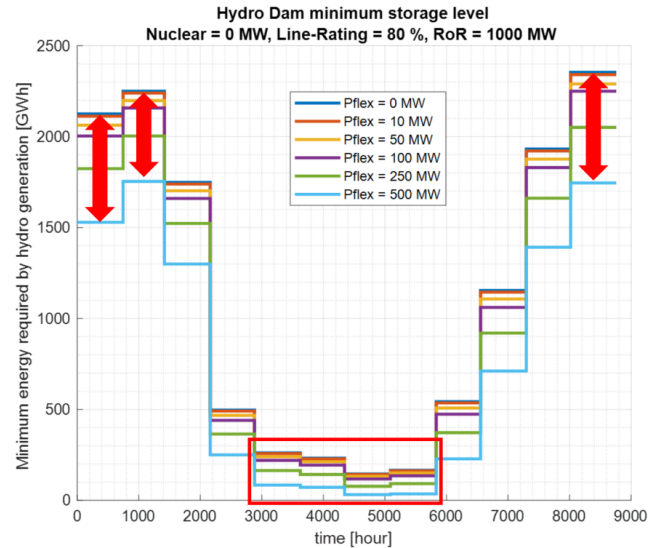


Figure 63: Total required energy by hydro dams, without nuclear, with respect to different DFlex availabilities