

# Modelos en sistemas de alta integración de FERNC: estado del arte

Luiz Barroso

luiz@psr-inc.com

PSR, Brasil

Foro XM – 9 de mayo de 2024



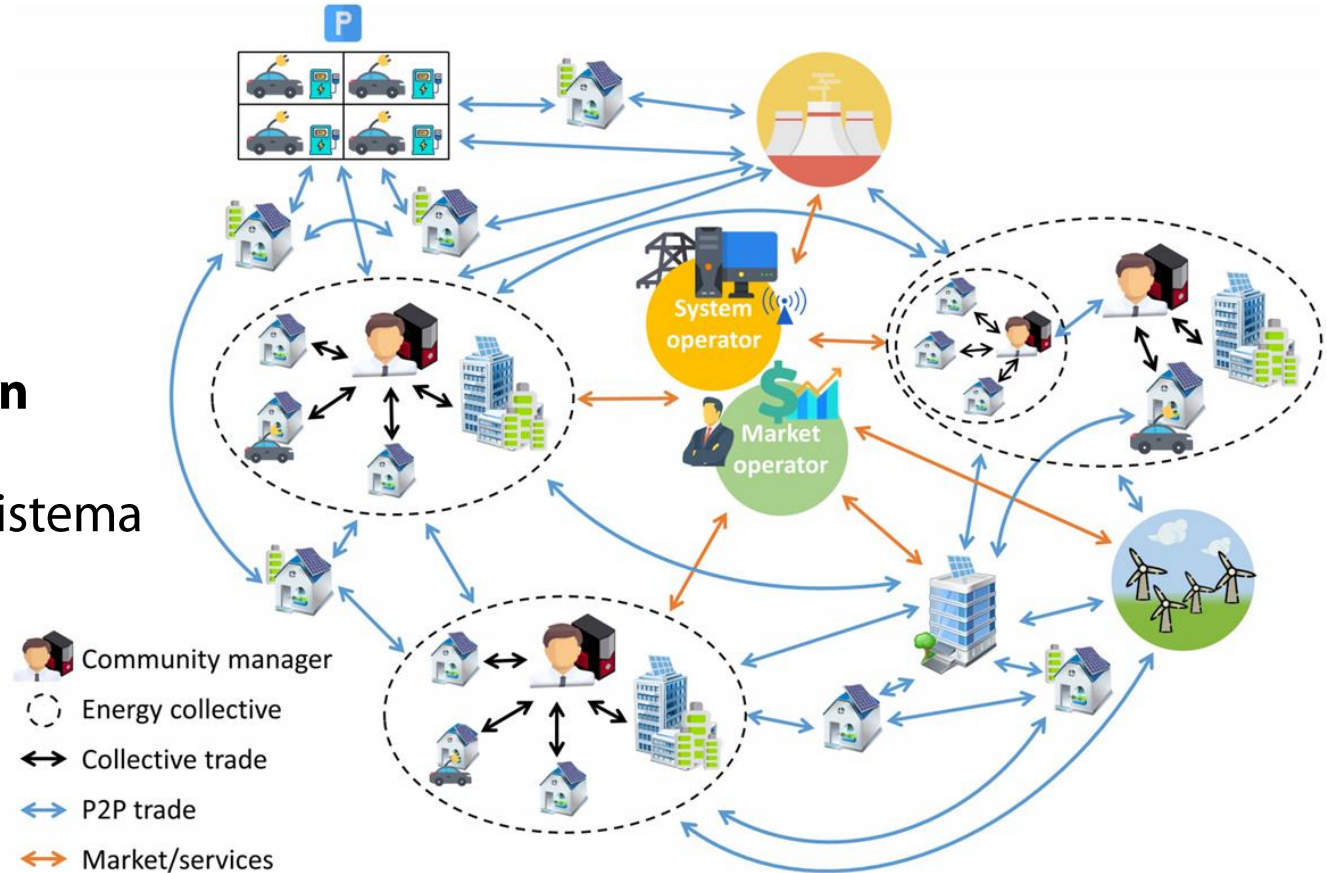
# Para donde estamos yendo como industria?

**Multiplicidad de nuevos actores**

**Generadores** ubicados en la **distribución**

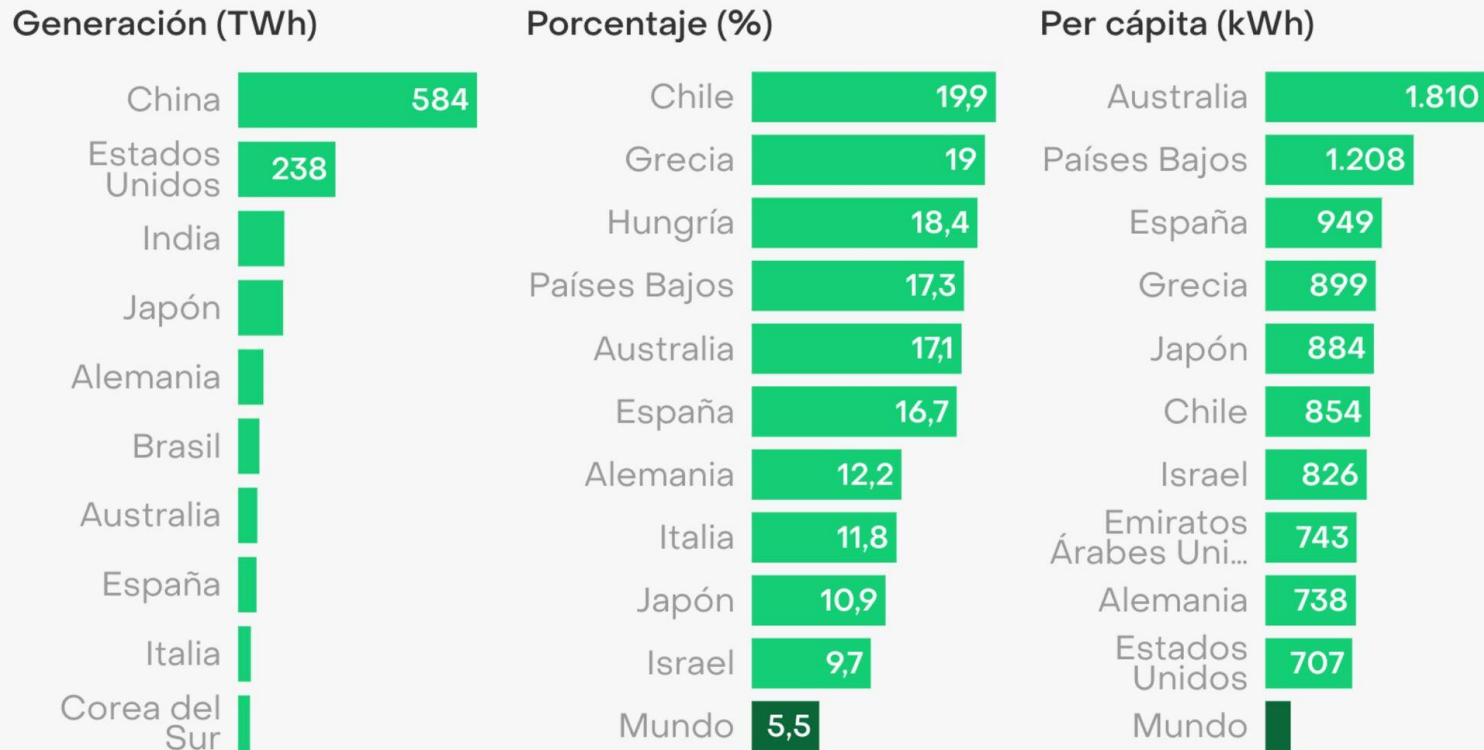
Los **consumidores** prestan servicios de **generación**

Mucha **variabilidad** física e **incertidumbre** en el sistema



# Que significa altos niveles de FERNC?

## Solar: Tabla de clasificación a nivel mundial en 2023



Fuente: Datos anuales de electricidad, Ember  
El gráfico solamente incluye países o regiones con generación de fuentes superiores a 5 TWh; en los casos en que no se dispone de datos de 2023, se usan los datos de 2022.



# Altos niveles de FERNC: caso California



## California ISO | PEAK RECORDS

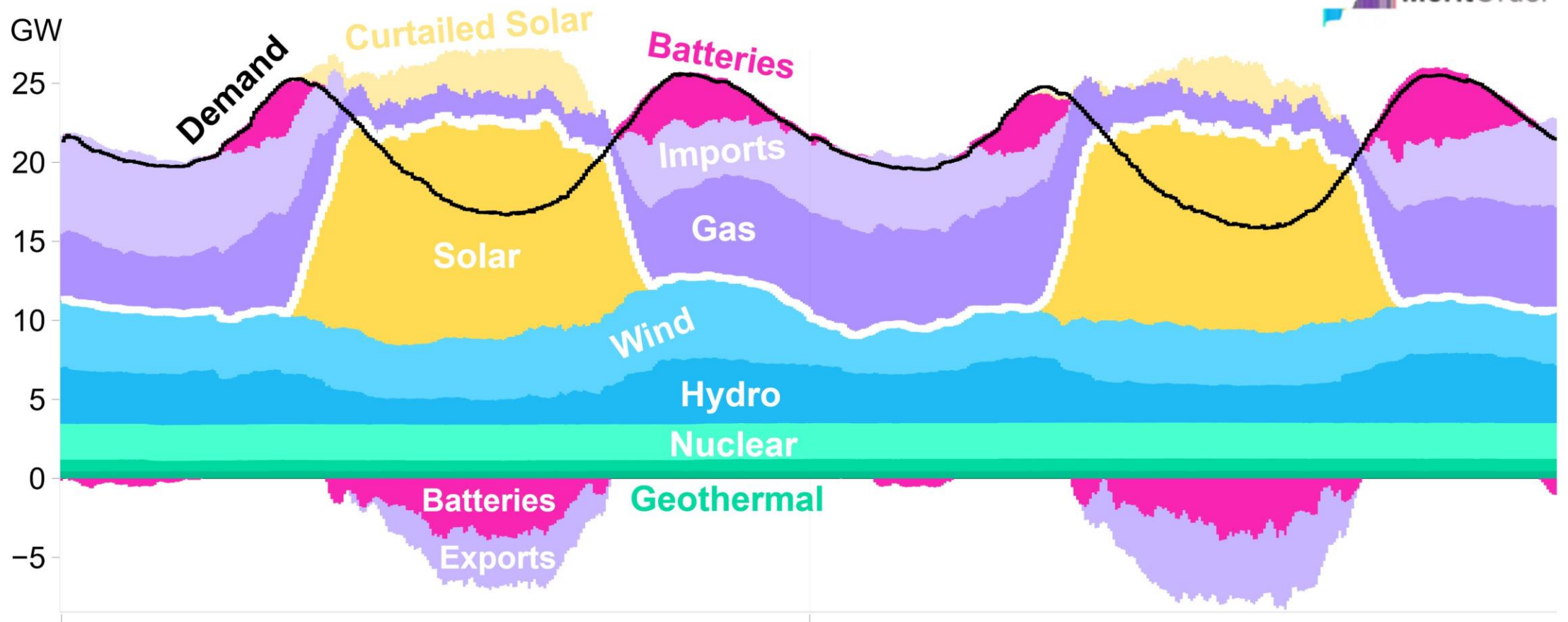
ISO set a new instantaneous 'All-Time Max Demand Served by Solar' peak of **97.5%** at 2:24 p.m. on 4/20/24.

Previous record: 86.4% at 12:30 p.m. on 4/11/24

Visit Today's Outlook at [www.caiso.com](http://www.caiso.com)

# Altos niveles de FERNC: caso California

## CAISO power supply and demand

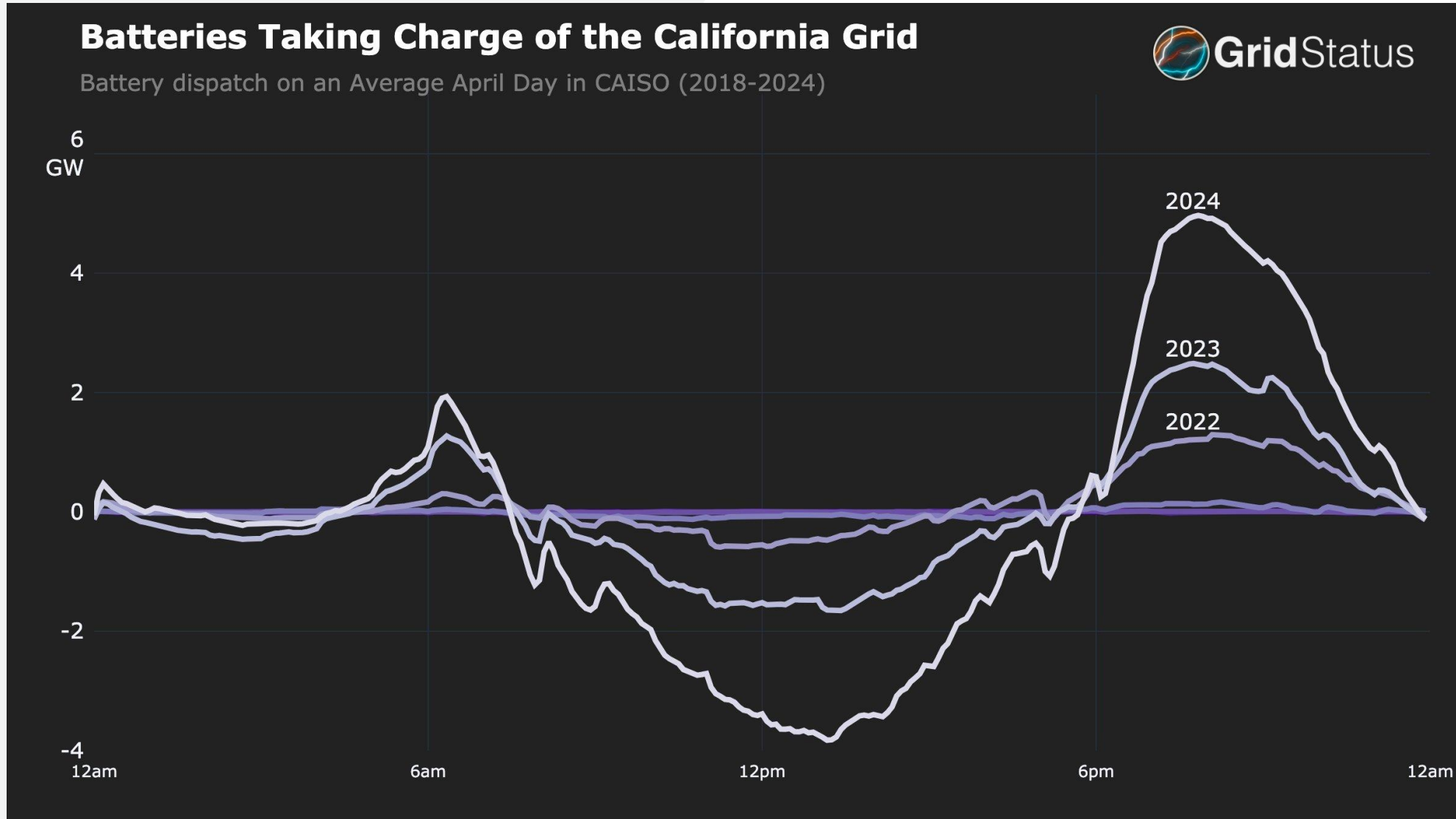


Wed  
Mar 13, 2024

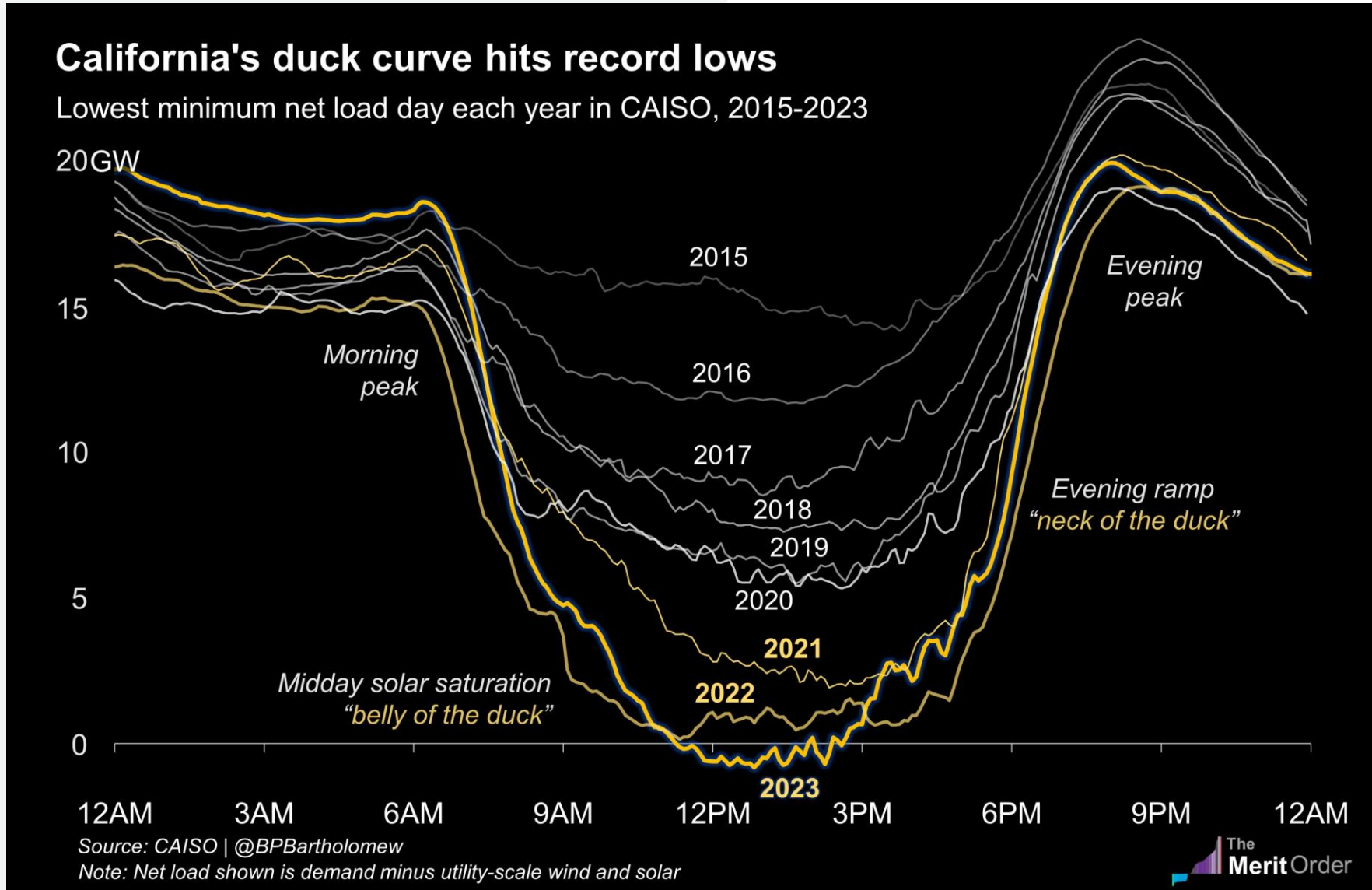
Thu  
Mar 14, 2024

Data: CAISO, GridStatus | Chart: @BPBartholomew | Note: Utility-scale solar only

# Altos niveles de FERNC y baterías: caso California



# Altos niveles de FERNC y la curva del pato: caso California



# Herramientas



- Granularidad suficiente (periodos de tiempo (sub)horarios)
- Representación de la red
- Almacenamiento (baterías, emisiones, combustibles)
- Decisiones de compromiso de unidad y restricciones de rampa
- Limitaciones hidráulicas en cuencas hidrográficas
- Variabilidad de los recursos
- Correlación entre los recursos
- Enfoque probabilístico y cambio climático
- Necesidades de energía, capacidad y reservas
- Co-optimización entre necesidades del sistema
- Computación en la nube y procesamiento paralelo

Herramientas apoyan decisiones de inversión y operación con criterios objetivos



# Algunas referencias

**BID**  
Banco Interamericano de Desarrollo  
División de Energía  
DOCUMENTO PARA DISCUSIÓN  
# IDB-DP-341  
Análisis del impacto del incremento de la generación de energía renovable no convencional en los sistemas eléctricos latinoamericanos  
Herramientas y metodologías de evaluación del futuro de la operación, planificación y expansión  
Carlos Batlle  
Enero 2014

European Commission  
JRC TECHNICAL REPORTS  
Systematic mapping of power system models  
Expert survey  
Fernández-Blanco Carramolino, R.  
Careri, F.  
Kavvadias, K.  
Hidalgo-Gonzalez, I.  
Zucker, A.  
Peteves, E.  
2017

IRENA  
International Renewable Energy Agency  
PLANNING FOR THE RENEWABLE FUTURE  
LONG-TERM MODELLING AND TOOLS TO EXPAND VARIABLE RENEWABLE POWER IN EMERGING ECONOMIES  
Applied Energy 357 (2024) 122495  
Contents lists available at ScienceDirect  
Applied Energy  
journal homepage: www.elsevier.com/locate/apenergy  
ELSEVIER  
Check for updates

## Power market models for the clean energy transition: State of the art and future research needs

Mari Haugen<sup>a,b,1,\*</sup>, Paris L. Blaisdell-Pijuan<sup>c,d,1</sup>, Audun Botterud<sup>d,e,\*</sup>, Todd Levin<sup>d</sup>, Zhi Zhou<sup>f</sup>, Michael Belsnes<sup>g</sup>, Magnus Korpås<sup>h</sup>, Abhishek Somani<sup>i</sup>

<sup>a</sup> Norwegian University of Science and Technology, Department of Electric Energy, Norway  
<sup>b</sup> SINTEF Energy Research, Department of Energy Systems, Norway  
<sup>c</sup> Princeton University, Department of Electrical Engineering, United States of America  
<sup>d</sup> Argonne National Laboratory, Center for Energy, Environmental, and Economic Systems Analysis, United States of America  
<sup>e</sup> Massachusetts Institute of Technology, Laboratory for Information and Decision Systems, United States of America  
<sup>f</sup> Pacific Northwest National Laboratory, Distributed Systems Group, United States of America

### HIGHLIGHTS

- Review methodologies and assumptions commonly used in power market models.
- Identify model design features critical to analyzing the clean energy transition.
- Survey current state-of-the-art in modeling low-carbon power markets.
- Identify key model improvements needed for future deep decarbonization scenarios.
- Highlight importance of tailoring tools for specific power market applications.

Fuentes: <https://publications.iadb.org/es/publicacion/16834/analisis-del-impacto-del-incremento-de-la-generacion-de-energia-renovable-no>

<https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/systematic-mapping-power-system-models-expert-survey>

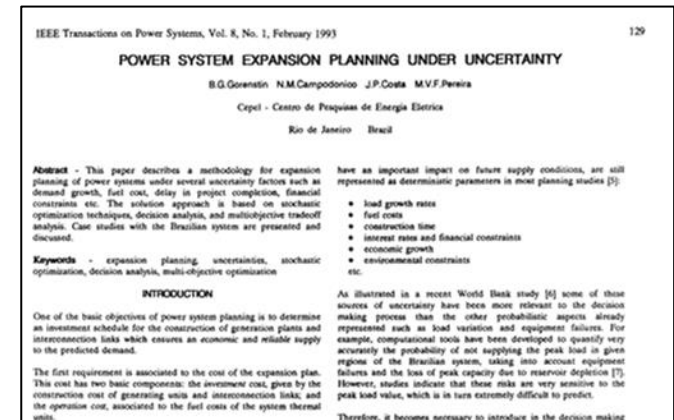
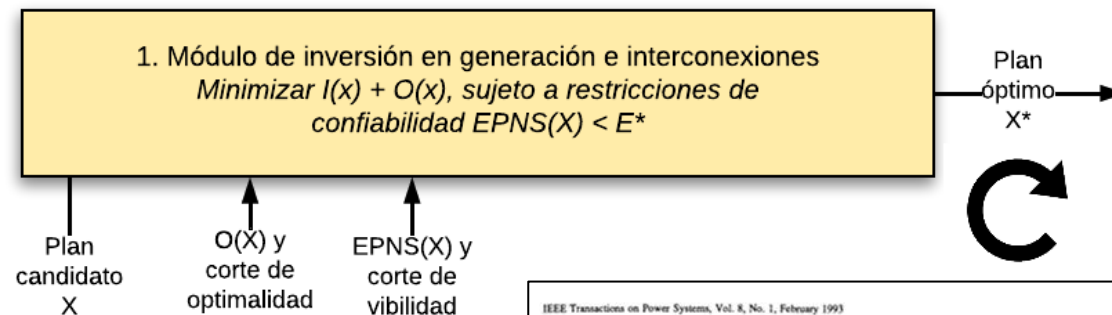
<https://www.irena.org/publications/2017/Jan/Planning-for-the-renewable-future-Long-term-modelling-and-tools-to-expand-variable-renewable-power>

# “back to basics”: que tenemos hoy ya consolidado?



**Planificación 1.0:** eficiencia económica + directrices de política energética + confiabilidad

- Minimizar los costos totales al consumidor
- Suministro fiable en una amplia gama de condiciones ("desconocidos conocidos"): variabilidad renovable, de la demanda (ej. efecto de la temperatura etc.)
- Directivas de política energética: límites a las emisiones, metas de penetración renovable, etc.
- Confiabilidad en el suministro: compuesta generación y transmisión

Metodología de solución: descomposición de Benders multi-estágio estocástica



## Reliability-Constrained Power System Expansion Planning: A Stochastic Risk-Averse Optimization Approach

Luiz Carlos da Costa Jr. , Fernando Souza Thomé, Joaquim Dias Garcia , Student Member, IEEE, and Mario V. F. Pereira, Fellow, IEEE

**Abstract**—This work presents a methodology to incorporate reliability constraints in the optimal power systems expansion planning problem. Besides Loss Of Load Probability (LOLP) and Expected Power Not Supplied (EPNS), traditionally used in power systems, this work proposes the use of the risk measures VaR (Value-at-Risk) and CVaR (Conditional Value-at-Risk), widely used in financial markets. The explicit consideration of reliability constraints in the planning problem can be an extremely hard task and, to minimize computational effort, this work applies the Benders decomposition technique splitting the expansion planning problem into an investment problem and two subproblems to evaluate the system's operational cost and the reliability index. The operation subproblem is solved by Stochastic Dual Dynamic Programming (SDDP) and the reliability subproblem by Monte Carlo simulation. The proposed methodology is applied to the real problem of optimal expansion planning of the Brazilian power system.

**Index Terms**—System expansion planning, Benders decomposition, Power systems, Reliability, Stochastic programming, Risk measures, Mixed Integer Programming, Monte Carlo, Stochastic Dual Dynamic Programming.

**I. INTRODUCTION**  
THE goal of power system expansion planning (SEP) is to determine necessary changes in the system due to load growth, new technologies and policy-related constraints. In this



This planning process constitutes an extremely complex problem that cannot be solved without simplifications. Depending on the goals of the planner different aspects and details of power systems can be considered in general SEP. Many possible constraints are described in [7], some specific aspects include: carbon capture and storage [8]; unit commitment in the operation [9]; flexible demand and electric vehicles [10]; aggressive wind power penetration [11]. A common aspect in most SEP models is the representation of uncertainties, although each model typically focuses on specific sources of randomness, like renewable energy and load [12], outages or contingencies [13], [14]. Frequently used frameworks to deal with uncertainties in SEP are Stochastic Optimization [15], [16] and Robust Optimization [12], [17], both of which can also be combined [18]. Many techniques were proposed to solve the large-scale problems that arise from SEP modeling. Heuristics like Particle Swarm Optimization and GRASP were proposed in [8] and [19]. Many decomposition methods were presented due to natural scenario-wise and/or stage-wise structure: [20], [21] and [22] apply progressive hedging, Dantzig Wolfe decomposition was applied in [23] and Benders decomposition, perhaps the most used one, was applied in [12], [13], [15], [24]–[28].

# Otros factores que se debe considerar con alta penet. de FERNC<sup>11</sup>

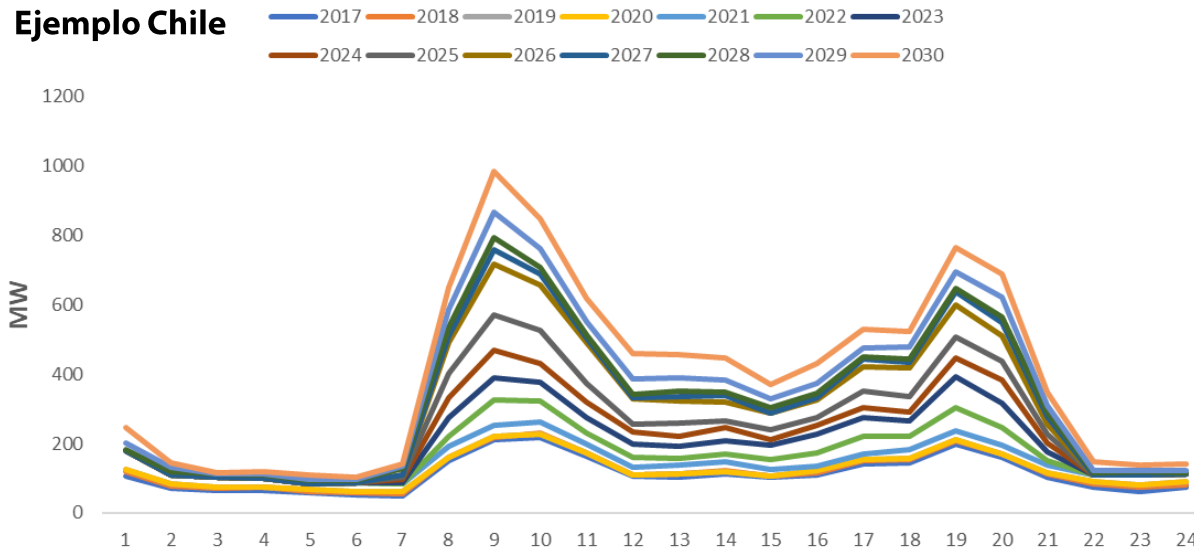
---

1. Mejor necesidad de dimensionamiento de las **reservas operativas**
2. **Co-optimización** energía y reserva, y representación en la planificación
3. **Resiliencia**
4. **Acoplamiento sectorial**, cadenas energéticas y *power-to-X* (y X-to-Y)

# 1. Reserva probabilista dinámica (RPD)

- **Probabilística** en las fuentes de **incertidumbres** en la demanda líquida
- **Dinámica** pues considera que el requisito de reserva **varía con el tiempo**
- Representa **criterios de riesgo** en su definición
- Requisitos de **reserva más adaptados al mix** → **menor costo**

## Ejemplo Chile



## Impacts of Dynamic Probabilistic Reserve Sizing Techniques on Reserve Requirements and System Costs

Michael Bucksteeg, Lenja Niesen, and Christoph Weber, *Member, IEEE*

**Abstract**—The increasing share of intermittent renewable energy sources (RES) potentially endangers a reliable power system operation. Due to the variability and unpredictability of added RES, reserve requirements will increase in the future. To counter this, adequate reserve sizing techniques are of major importance. While most system operators apply simple deterministic or probabilistic models assuming RES forecast errors to follow a Gaussian distribution, we propose an improved dynamic reserve sizing method using nonparametric distributions as a forecast error description. The added value of the presented methodology is the use of a conditional kernel-based estimator in combination with a

**Variables:**

$IC^y$	installed capacity in year $y$
$x_t$	measured load or generation
$\hat{x}_t$	forecasted load or generation
$\epsilon_i$	forecast error of cluster $i$
$\epsilon_{i,t}$	conditional forecast error
$\mu_i$	cluster centroid
$\pi_i$	probability function of uncertainty

Energy Policy 124 (2019) 272–285



Dynamic dimensioning approach for operating reserves: Proof of concept in Belgium

K. De Vos<sup>a,\*</sup>, N. Stevens<sup>b</sup>, O. Devolder<sup>b</sup>, A. Papavasiliou<sup>c</sup>, B. Hebb<sup>a</sup>, J. Matthey-Donnadieu<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Elia System Operator, Belgium  
<sup>b</sup> N-SIDE, Belgium  
<sup>c</sup> Université Catholique de Louvain, Belgium



Comité de Estudos CE - Título do Comité de Estudos CE

### APLICACIÓN DE UN MODELO DE EXPANSIÓN DE LA GENERACIÓN CONSIDERANDO EL REQUERIMIENTO DE RESERVA PROBABILÍSTICA DINÁMICA EN EL SISTEMA ELÉCTRICO MEXICANO

W. S. MORAIS\*  
PSR  
Brasil

R. C. PEREZ  
PSR  
Brasil

A. SOARES  
PSR  
Brasil

**Resumen** – Con el aumento de la participación de fuentes renovables intermitentes en sistemas eléctricos, surge la necesidad de planificar la expansión considerando las características inherentes a esas fuentes, como la alta intermitencia y la estocasticidad de su despacho. Este trabajo propone la utilización de un modelo de optimización que objetiva minimizar el costo asociado a la expansión con enfoque probabilístico y discretización horaria, capaz de capturar tanto la incertidumbre y la intermitencia características de las tecnologías renovables como eólica y solar fotovoltaica (SFV), teniendo en cuenta aún el modelado de un requerimiento de reserva que contemple el efecto de la intermitencia y preserve la confiabilidad del sistema. Por último, se presenta un estudio de caso de la expansión de un sistema eléctrico real, el sistema eléctrico mexicano, y los resultados obtenidos con la aplicación de la metodología propuesta.

**Palabras clave:** planificación de expansión de la generación, optimización, requerimiento de reserva, integración de fuentes renovables.

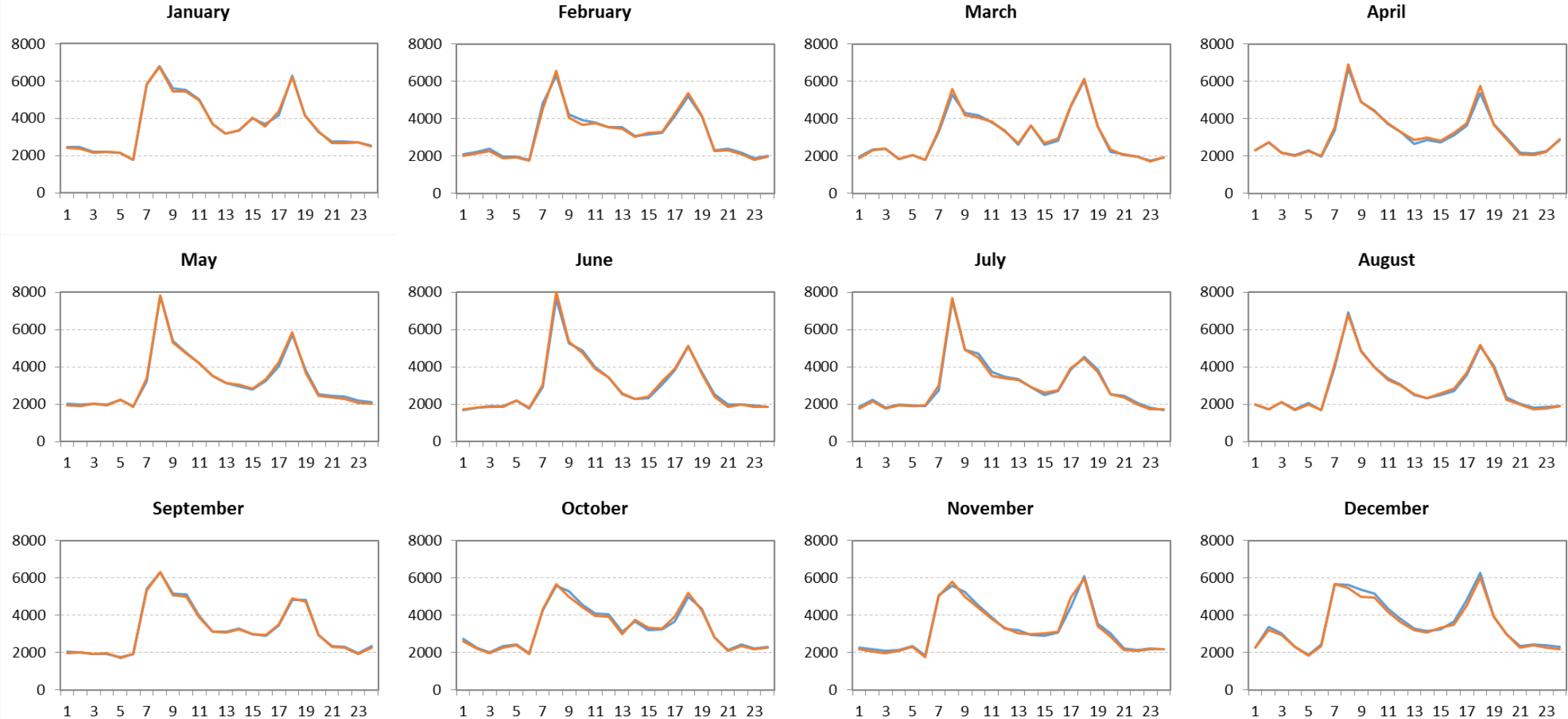
#### 1 INTRODUCCIÓN

El uso de modelos de optimización aplicados a la expansión de sistemas eléctricos es una práctica adoptada como forma de auxiliar agentes de planificación a tomar decisiones que traen mayor beneficio para la sociedad, con el objetivo de atender el crecimiento de la demanda del sistema con el menor costo operativo posible, manteniendo en contrapartida los criterios de confiabilidad, la seguridad de suministro y contemplando también políticas energéticas y ambientales de intereses gubernamentales.

\* the sizing of operating reserves by electric power system operators to deal with unexpected variations of demand and generation, stem. This becomes increasingly challenging due to the increasing share of renewable energy sources. This paper revisits the current sizing method applied in oach that determines the required capacity once a year. The presented required capacity on a daily basis, using the estimated probability of at day. This risk is estimated based on historical observations of system algorithms. A proof of concept is presented for the Belgian system, and lology improves reliability management while decreasing the average s compliant with European market design, and the corresponding register for systems with a high share of renewable generation. For these gum towards 2020 has been decided based on the results of this study.



# Reserva probabilista dinámica, ejemplo Brasil



# 2. Co-optimización energía y reserva

Toma de decisión **simultánea**: producción de energía y reserva

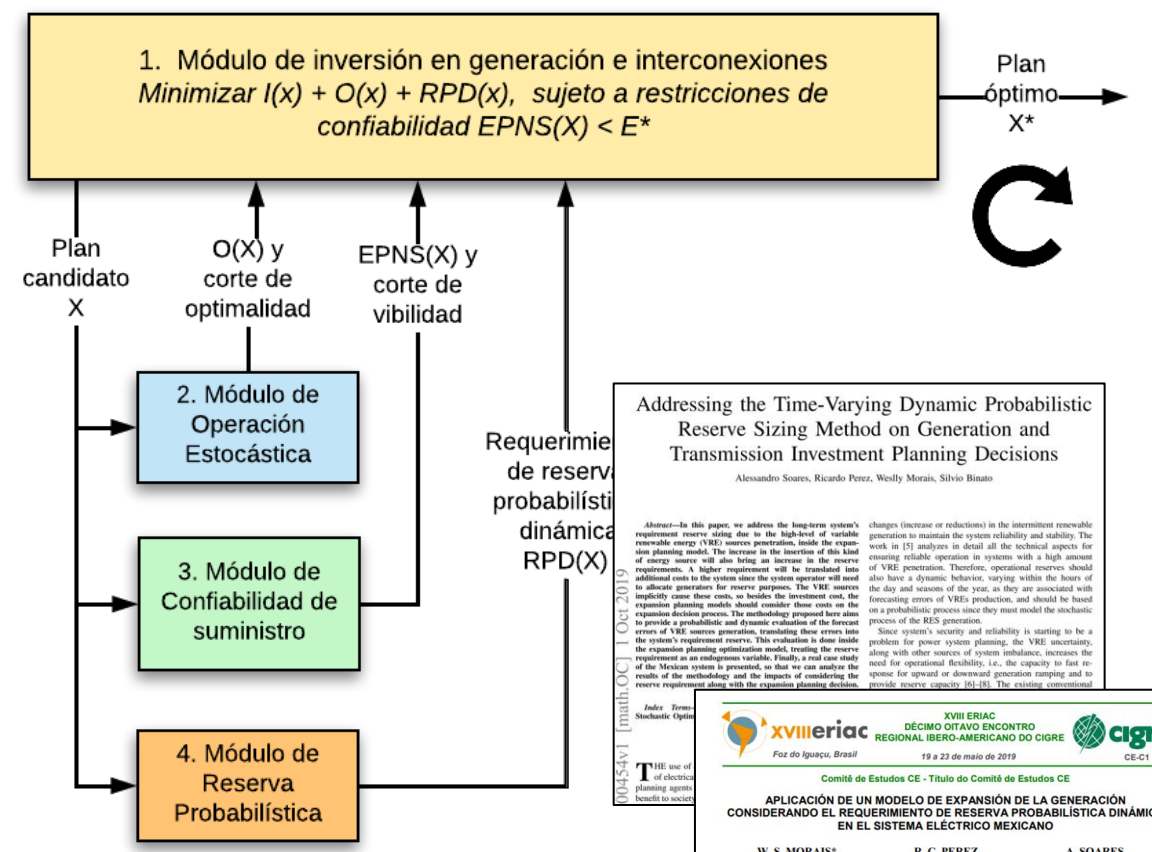
La incorporación de la RPD en los esquemas de la planificación y operación es inmediata (restricciones lineares)

**Planificación 2.0:** (1.0) + co-optimización con la RPD

La co-optimización permite representar el **efecto de cartera** de las energías renovables

- las correlaciones bajas con el sistema existente requieren menos reservas que las correlaciones altas
- evita concentrar las energías renovables en una sola región en las decisiones de inversión

Modelo linear permite mejor **asignación de costos**



Addressing the Time-Varying Dynamic Probabilistic Reserve Sizing Method on Generation and Transmission Investment Planning Decisions

Alessandro Soares, Ricardo Perez, Westly Morais, Silvio Binato

*Abstract*—In this paper, we address the long-term system's requirement reserve sizing due to the high-level of variable renewable energy (VRE) sources penetration, inside the expansion planning model. The increase in the insertion of this kind of energy source will also bring an increase in the reserve requirements. A higher requirement will be translated into additional costs in the system since the system operator will need to allocate generators for reserve purposes. The VRE sources implicitly cause these costs, so besides the investment cost, the expansion planning models should consider these costs on the expansion decision process. The methodology proposed here aims to provide a probabilistic and dynamic evaluation of the forecast errors of VRE source generation, translating these errors into the system's requirement reserve. This evaluation is done inside the expansion planning optimization model, treating the reserve requirement as an endogenous variable. Finally, a real case study of the Mexican system is presented, so that we can analyze the results of the methodology and the impact of considering the reserve requirement along with the expansion planning decision.

changes (increase or reductions) in the intermittent renewable generation to maintain the system reliability and stability. The work in [5] analyzes in detail all the technical aspects for ensuring reliable operation in systems with a high amount of VRE generation. Therefore, operational reserves should also have a dynamic behavior, varying within the hours of the day and seasons of the year, as they are associated with forecasting errors of VREs production, and should be based on a probabilistic process since they must model the stochastic process of the RES generation.

Since system's security and reliability is starting to be a problem for power system planning, the VRE uncertainty, along with other sources of system imbalance, increases the need for operational flexibility, i.e., the capacity to fast response for upward or downward generation ramping and to provide reserve capacity [6]–[8]. The existing conventional

Index Terms—Stochastic Optimal

THE use of of electric planning agents benefit to society

0045-4445 (c) Oct 2019 math.OCC

XVIII ERIC REGIONAL BERO-AMERICANO DO CIGRE

Foz do Iguaçu, Brasil 19 a 23 de maio de 2019

Comité de Estudos CE - Título do Comitê de Estudos CE

APLICACIÓN DE UN MODELO DE EXPANSIÓN DE LA GENERACIÓN CONSIDERANDO EL REQUERIMIENTO DE RESERVA PROBABILÍSTICA DINÁMICA EN EL SISTEMA ELÉCTRICO MEXICANO

W. S. MORAIS\* PSR Brasil  
 R. C. PEREZ PSR Brasil  
 A. SOARES PSR Brasil

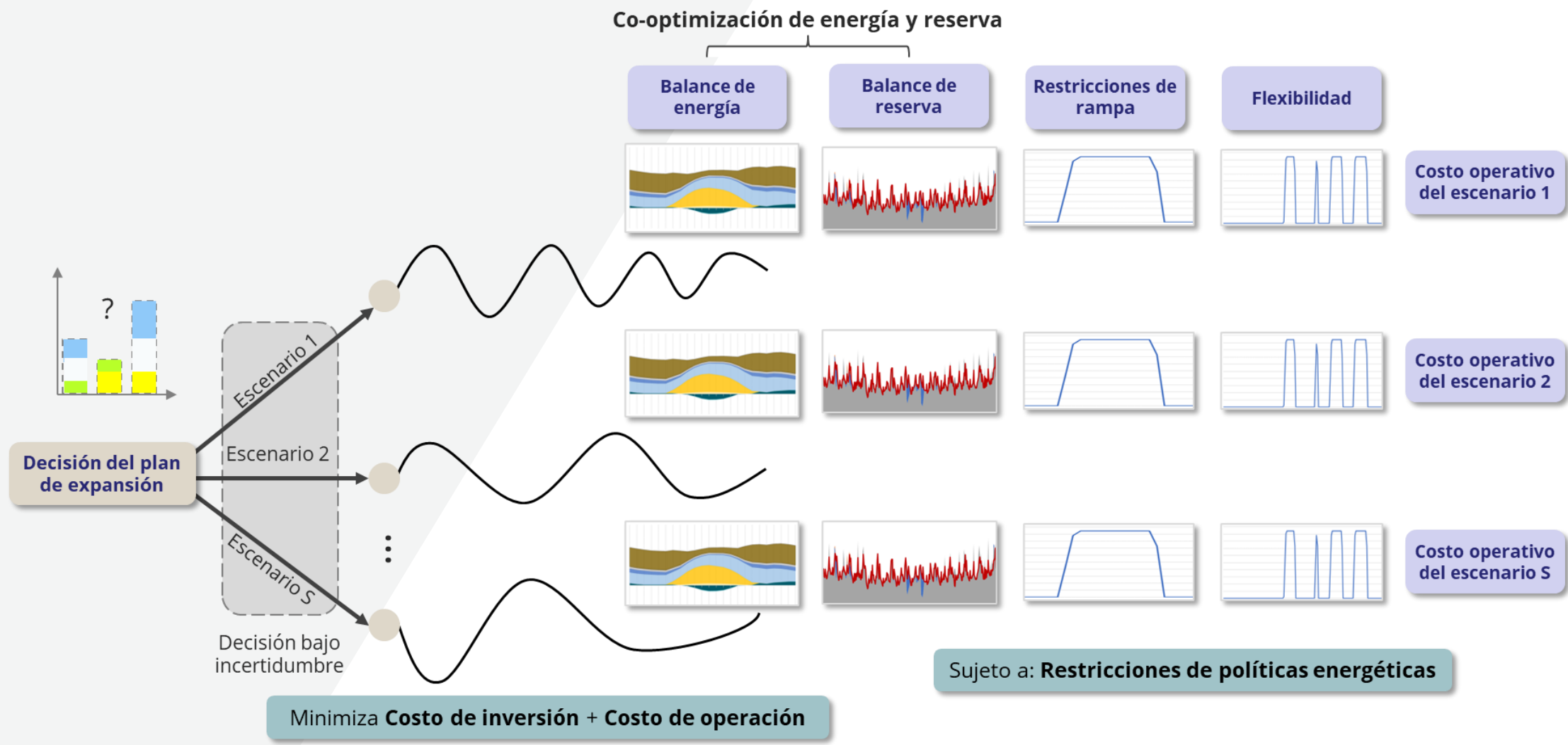
*Resumen*— Con el aumento de la participación de fuentes renovables intermitentes en sistemas eléctricos, surge la necesidad de planificar la expansión considerando las características inherentes a esas fuentes, como la alta intermitencia y la estocasticidad de su despacho. Este trabajo propone la utilización de un modelo de optimización que objetiva minimizar el costo asociado a la expansión con enfoque probabilístico y discretización horaria, capaz de capturar tanto la incertidumbre y la intermitencia características de las tecnologías renovables como eólica y solar fotovoltaica (PV), teniendo en cuenta aún el modelado de un requerimiento de reserva que contemple el efecto de la intermitencia y preserve la confiabilidad del sistema. Por último, se presenta un estudio de caso de la expansión de un sistema eléctrico real, el sistema eléctrico mexicano, y los resultados obtenidos con la aplicación de la metodología propuesta.

*Palabras clave:* planificación de expansión de la generación, optimización, requerimiento de reserva, integración de fuentes renovables.

1 INTRODUCCIÓN

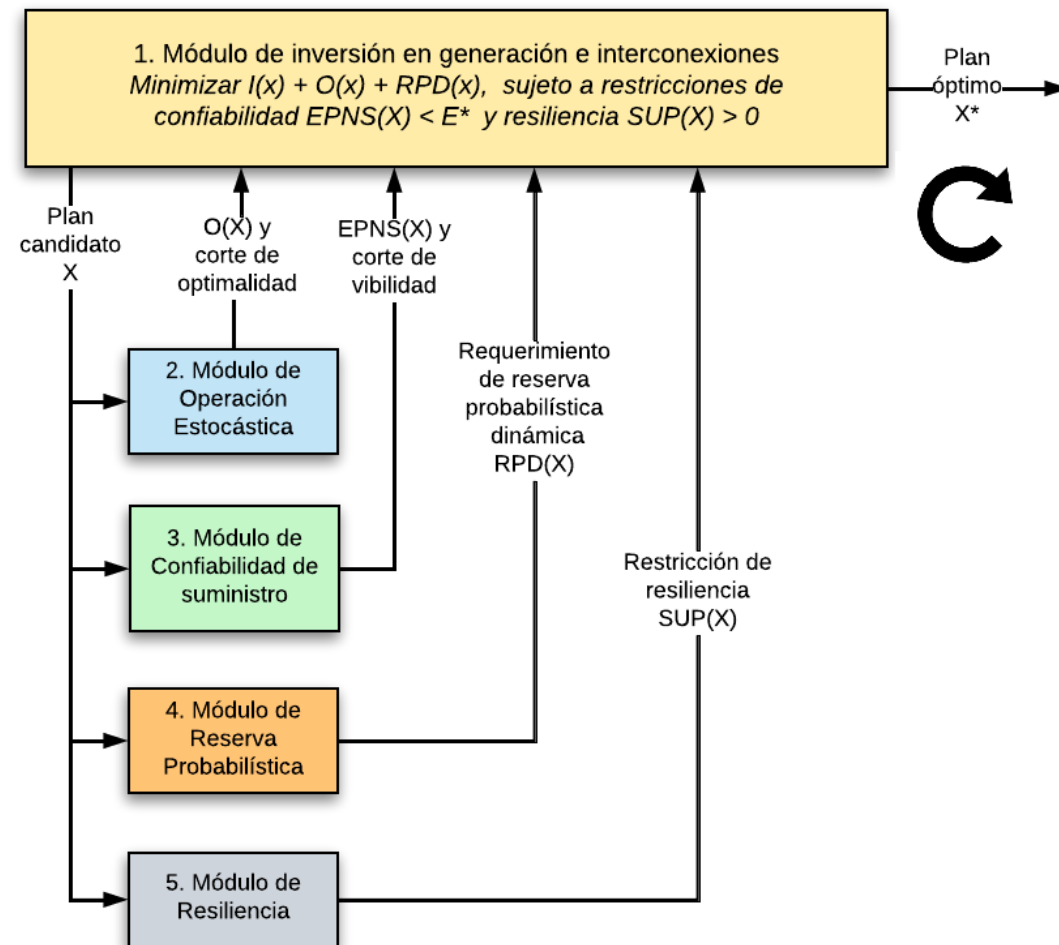
El uso de modelos de optimización aplicados a la expansión de sistemas eléctricos es una práctica adoptada como forma de auxiliar agentes de planificación a tomar decisiones que traen mayor beneficio para la sociedad, con el objetivo de atender el crecimiento de la demanda del sistema con el menor costo operativo posible, manteniendo en contrapartida los criterios de confiabilidad, la seguridad de suministro y contemplando también políticas energéticas y ambientales de intereses subsementales.

# 2. Co-optimización energía y reserva



# 3. Resiliencia

- El **nuevo desafío**: respuesta resiliente a los **eventos atípicos** ("unknown unknowns")
  - Interrupción geopolítica del suministro de combustible
  - Sequías catastróficas, terremotos
  - Combinación de eventos severos
- El desafío es representar fenómenos **sin distribución de probabilidades bien definidas** (posibilidades x probabilidades)
- **Planificación 3.0**: (2.0) + resiliencia
  - Representación por distribución de probabilidad
  - Representación por escenarios
  - Criterios de robustez



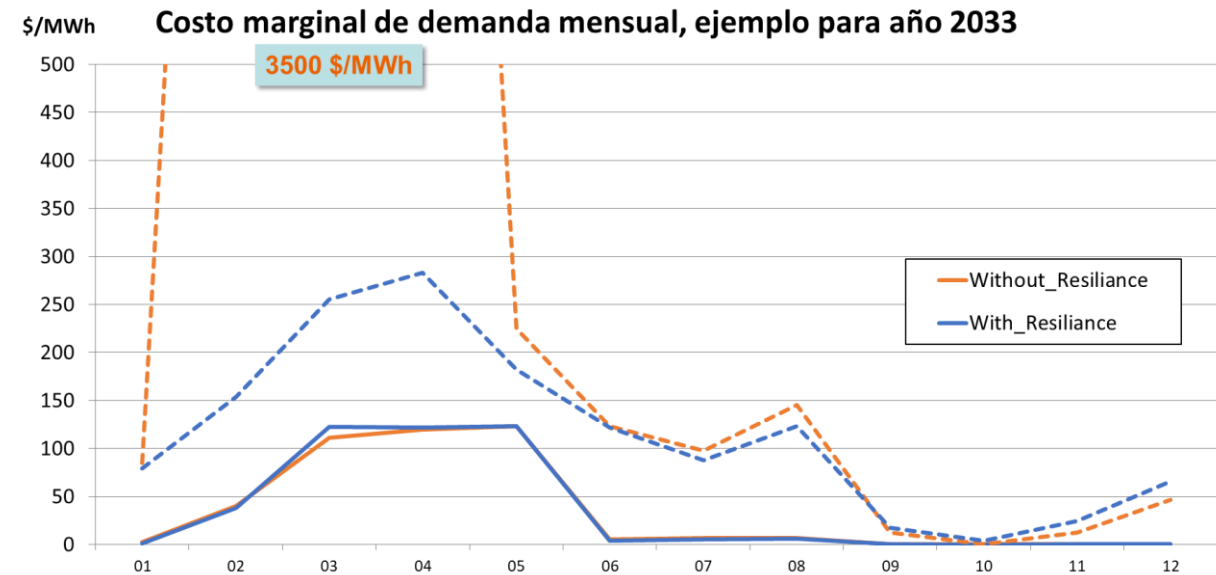
**Captura eventos de alto impacto y baja probabilidad**



# Resiliencia significa más diversificación de recursos

- La diversificación evita costos excesivos a los consumidores en caso de los eventos severos

Ejemplo Costa Rica: el escenario del "cisne negro" es una reducción severa e "inesperada" del viento



Cambio en el *mix*: más diversificación con menos eólica

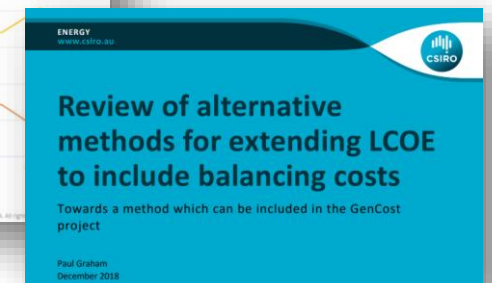
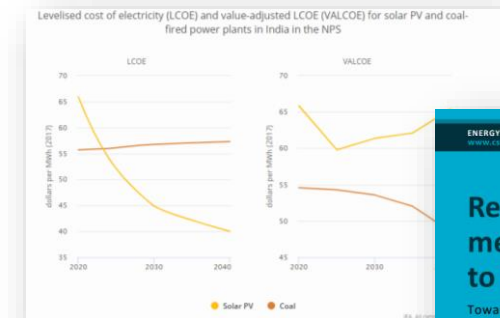
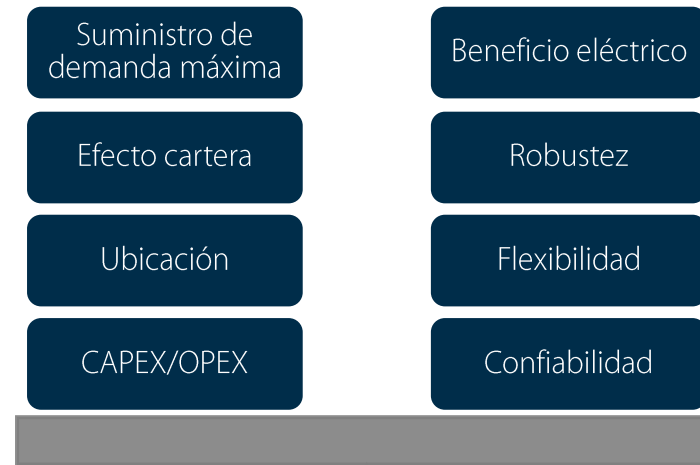
Se enfrenta el evento crítico con menores costos marginales

# Estos esquemas permiten mejor definir el valor de cada tecnología para el sistema

- Cada tecnología ofrece un valor diferente para los servicios que el sistema necesita
- Cada tecnología es una pieza del “rompecabezas” de la transición energética
- El esquema de planificación permite determinar estos valores para compararlas en la misma base, nivelando las reglas del juego



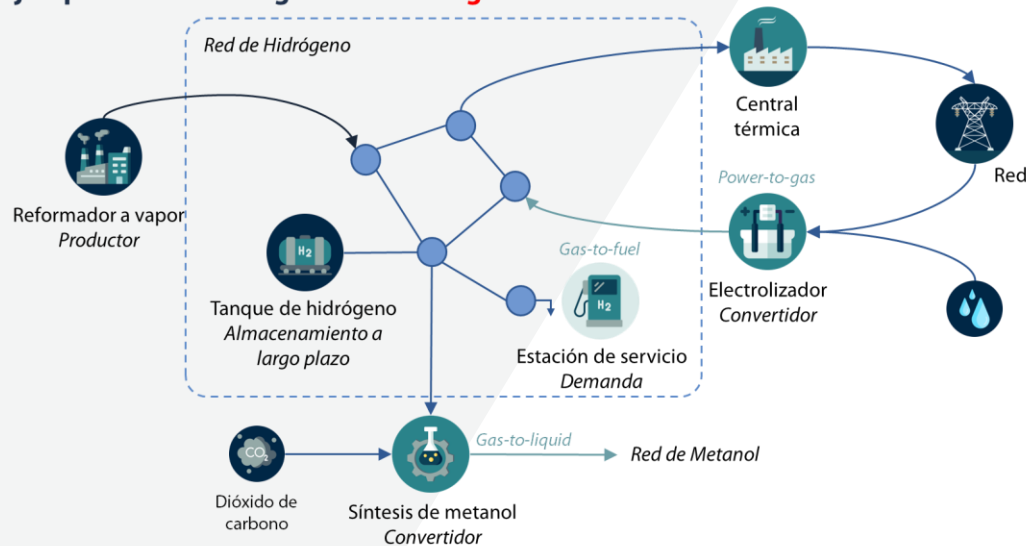
- CAPEX, OPEX
- Servicios de generación (modulación, sinergias en la producción, flexibilidad)
- Costos de infraestructura
- Subvenciones e incentivos
- Emisión de carbono
- Resiliencia



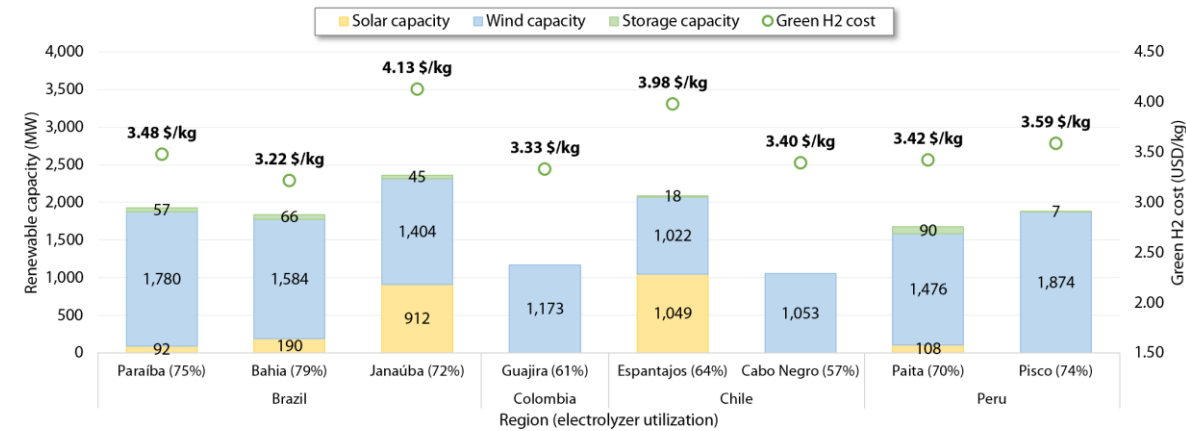
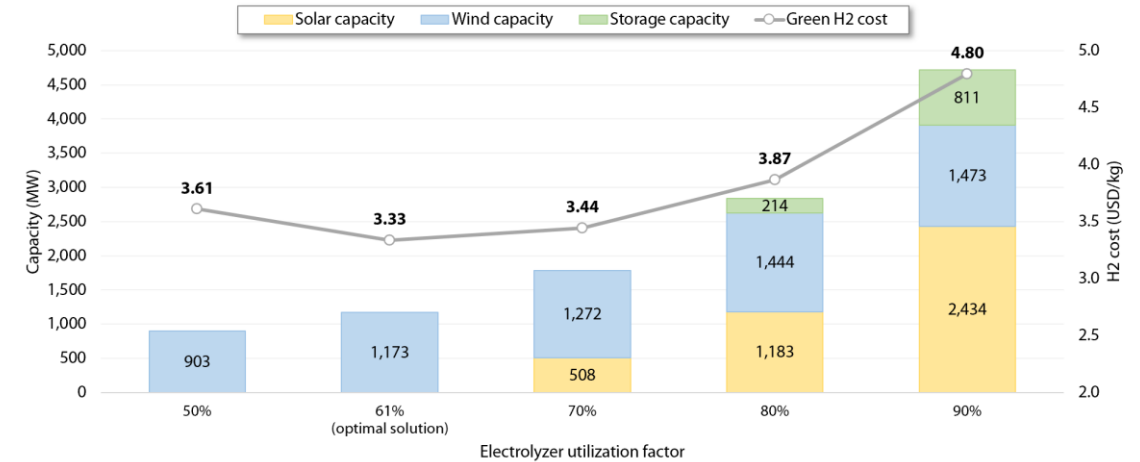
# 4. Y hay el acoplamiento sectorial con cadenas energéticas

- Tecnologías de *power-to-x* (y *X-to-Y*)
- Acoplamiento sectorial y cadenas energéticas (oleo y gas, H2, biomasa, etc)
- Pueden ser incorporados en la planificación 3.0

## Ejemplo: cadena energética de hidrógeno



## Ejemplo: optimización de recursos para la producción de H2



# Otros temas fundamentales sobre los cuales no hablamos

---

- Modelación de eventos extremos y cambios climáticos
- Representación de aversión al riesgo
- Co-optimización de la expansión y operación de alto voltaje (TSO) y bajo voltaje (DSO)
- High Performance Computing
- Aplicaciones de IA conjuntamente con modelos de optimización



# En resumen...

---

- La **complejidad** y el **acoplamiento** del sistema de producción, transporte y consumo de energía ha aumentado sustancialmente y la **importancia** de los **esquemas de planificación** va a crecer bastante
- Será fundamental **asegurar la confiabilidad** del suministro **bajo un amplio rango de incertidumbres** y esto exige una visión integrada de todos os recursos de oferta y demanda en la operación y planificación.
- Además de la confiabilidad, eventos disruptivos recientes (temperaturas e inundaciones extremas; choques de precios de combustibles, etc) dejaron claro que **será necesario asegurar la resiliencia** de los sistemas de energía
- Afortunadamente **el herramental analítico** está disponible

# Las herramientas de PSR incorporan lo discutido en esa presentación

## ELAU PSR 2024

Encuentro Latinoamericano de Usuarios de PSR

Ciudad de Panamá, Panamá 18 - 22 Marzo, 2024

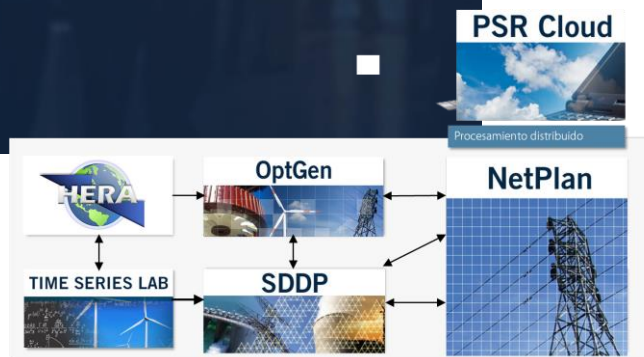
REGISTRO

<https://elau2024.psr-inc.com/>



### ¡Ten todo el contenido en tu mano!

En esta página podrás acceder al material completo del evento, incluyendo las presentaciones y recursos adicionales que fueron presentados. En caso de cualquier problema o duda, no dudes en contactarnos.



Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
<a href="#">Descargar</a>	<a href="#">Descargar</a>	<a href="#">Descargar</a>	<a href="#">Descargar</a>	<a href="#">Descargar</a>
Actualizado el 2024-03-20	Actualizado el 2024-03-21	Actualizado el 2024-03-22	Actualizado el 2024-03-25	Actualizado el 2024-03-25



# Ejemplo de estudio de integración de FERNC en Brasil



QR Code ONS



QR Code EPE

[https://cutt.ly/GIZ\\_ESOF\\_BR\\_ONS](https://cutt.ly/GIZ_ESOF_BR_ONS)

[https://cutt.ly/GIZ\\_ESOF\\_BR\\_EPE](https://cutt.ly/GIZ_ESOF_BR_EPE)







# Gracias

 [www.psr-inc.com](http://www.psr-inc.com)

 [psr@psr-inc.com](mailto:psr@psr-inc.com)

 +55 21 3906-2100



 /psrenergy

 @psrenergy

 /psrenergy

 @psrenergy

