



SimSEE

<https://simsee.org>



Simulación y Despacho Óptimo de Sistemas Eléctricos

Ruben Chaer

*Aniversario EPIM - Feb.2025
Montevideo-Uruguay*



**Capítulo Potencia, Energía,
Instrumentación y Medidas**
IEEE Sección Uruguay



Simulación de Sistemas de Energía Eléctrica

Instituto de Ingeniería Eléctrica

Facultad de Ingeniería

Universidad de la República Oriental del Uruguay.

Marzo 2025

Montevideo - Uruguay

Docentes:

- Ximena Caporale (Práctico y consultas)
- Gonzalo Casaravilla (Planificación de Inversiones)
- Ruben Chaer (Responsable del curso)

Importante:

Enviar mail a curso@simsee.org con el asunto:
"Info. Curso SimSEE" y con el siguiente contenido:

- **Nombre completo:**
- **Nacionalidad:**
- **Documento de identidad:**
- **Título/Especialidad:**
- **Área de trabajo/interés:** (con el objetivo de identificar posibles temas de interés para el trabajo final).

Calendario 2025 Martes y Jueves de 9 a 12.

(Pausa de 15 minutos a las 10:30)

Marzo						
DOM	LUN	MAR	MIÉ	JUE	VIE	SAB
						1
2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15
16	17	18	19	20	21	22
23	24	25	26	27	28	29
30	31					

Abril						
DOM	LUN	MAR	MIÉ	JUE	VIE	SAB
		1	2	3	4	5
6	7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18	19
20	21	22	23	24	25	26
27	28	29	30			

Mayo						
DOM	LUN	MAR	MIÉ	JUE	VIE	SAB
				1	2	3
4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17
18	19	20	21	22	23	24
25	26	27	28	29	30	31

Junio						
DOM	LUN	MAR	MIÉ	JUE	VIE	SAB
1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28
29	30					

Plan tentativo:

Clase	Fecha		
1	03/06/25	Jueves	Introducción al modelado y operación óptima de sistemas
2	03/11/25	Martes	Instalación de SimSEE y Práctico 1
3	03/13/25	Jueves	Optimización en pocas palabras y Práctico 2
4	03/18/25	Martes	Programación Orientada por los Objetos y Primeros Actores y Práctico
5	03/20/25	Jueves	Programación Dinámica Estocástica y Costo Futuro y Práctico 3
6	03/25/25	Martes	Práctico Sala LP. Expansión de la Demanda, cálculo de Gradiente de inversión de las tecnologías. Eol., Sol, Térmicas de Punta y de Base, expansión de la Demanda y planteo de la necesidad de expansión de la generación. Introducimos el concepto de Costos Fijos y Variables pero sin entrar en detalle de cómo calcular.
7	03/27/25	Jueves	Introducción a la Planificación de Inversiones.
8	04/01/25	Martes	Bellman + CEGH + SimSEE ICF y Aprendizaje por refuerzo
9	04/03/25	Jueves	Influencia de iN34 en la operación, asimilación de pronósticos de caudales + Práctico (si es que da el tiempo).
10	04/08/25	Martes	Integración de Ensamble de Pronósticos en CEGHs + Práctico
11	04/10/25	Jueves	Programación Estacional y Semanal y VATES + Práctico
	04/15/25	Martes	Semana Santa (Turismo)
	04/17/25	Jueves	Semana Santa (Turismo)
12	04/22/25	Martes	Repaso general Modelo de procesos estocásticos -CEGHs (rch). Práctico 4 (AnálisisSerial)
13	04/24/25	Jueves	TRACTORCITO y guía de trabajos finales.
14	04/29/25	Martes	Modelo CC Horario + Práctico (o capaz ROCOF y Restricciones de Cortes + Práctico)
	05/01/25	Jueves	Día de los trabajadores
15	05/06/25	Martes	Modelo de Demanda + Práctico (capaz + DBESS y Práctico)

Modelado y simulación: Sistema de Energía Eléctrica



Objetivo del curso: Aprendizaje de SimSEE

- Optimización del uso de los recursos de generación.
- Costo Marginal y Beneficio de Sustitución.
- Cálculo de beneficio de un proyecto.
- Cálculo de precios de equilibrio entre Demanda y Generación.
- Figuras de Riesgo.
- Planificación de Inversiones.
- Optimización de la Operación de Mediano y Corto Plazo.
- Optimización de las compras de combustibles.

Objetivos del curso

- Manejo de la incertidumbre hidrológica.
- Volatilidad del precio del petróleo sobre los costos de generación.
- Evaluación de la influencia de los Costos asignados de Falla sobre el uso de los recursos del sistema.
- Cálculo de la Potencia Firme necesaria en el sistema.

MÓDULO 1: Generalidades

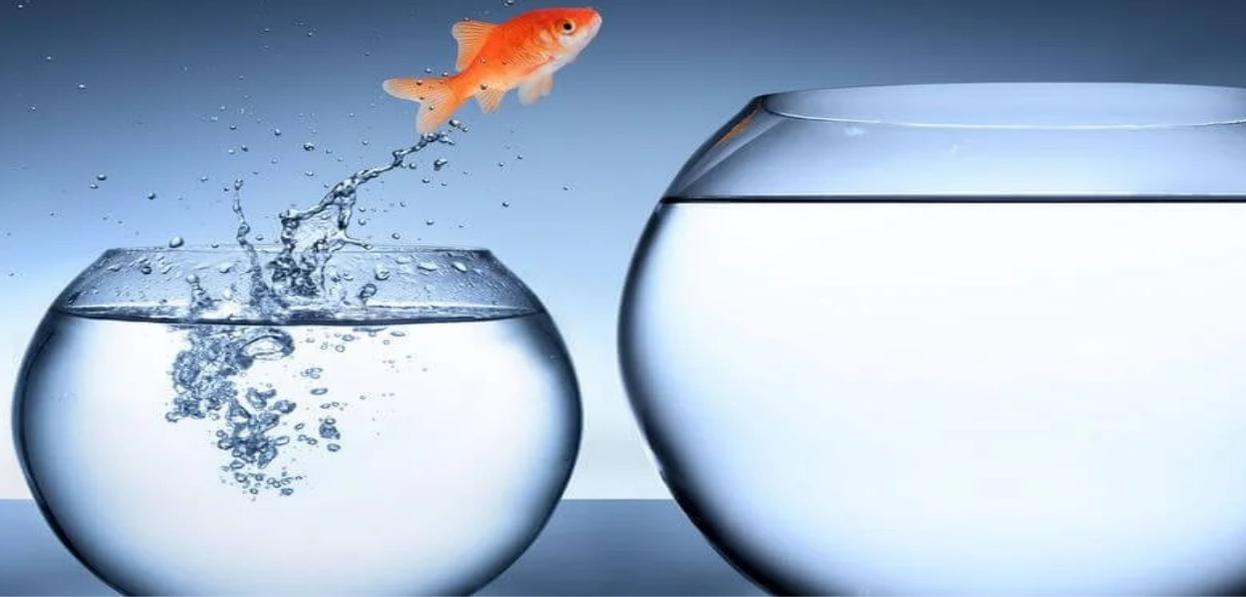
- Introducción a la simulación de sistemas dinámicos.
- Modelado y simulación
- Técnicas de modelado orientada por objetos
- Simulación y política de operación óptima.

MÓDULO 2: Descripción del Sistema

- Descripción del Sistema y Mercado Eléctrico
- Sistema Físico Generación, Transmisión y Distribución
- Despacho de ENERGÍA
- Simulación y Política de Operación de los Embalses
- Disponibilidad de POTENCIA
- COSTOS DE FALLA
- Interconexiones Internacionales
- Mercados de OCASIÓN y CONTRATOS

MÓDULO 3: Técnicas de modelado y simulación

- Simuladores y Despacho Óptimo
- Ejemplos de estudios.
- Ejercicios.



Aprobación del curso

- Caso de estudio analizado en grupos de 3 a 4 estudiantes.
- Instancia pública de presentación de los resultados en fecha a fijar posterior a la finalización del curso.
- Lo relevante del trabajo es mostrar que se ha aprendido el uso de las herramientas impartidas en el curso.
- No es relevante la precisión/veracidad de las hipótesis utilizadas.

The ultimate goal



El Sistema

Generadores

Demandas

Red eléctrica

Interconexiones



El Simulador

Una Herramienta



SimSEE, a simulation platform as a toolbox
Why and for what?



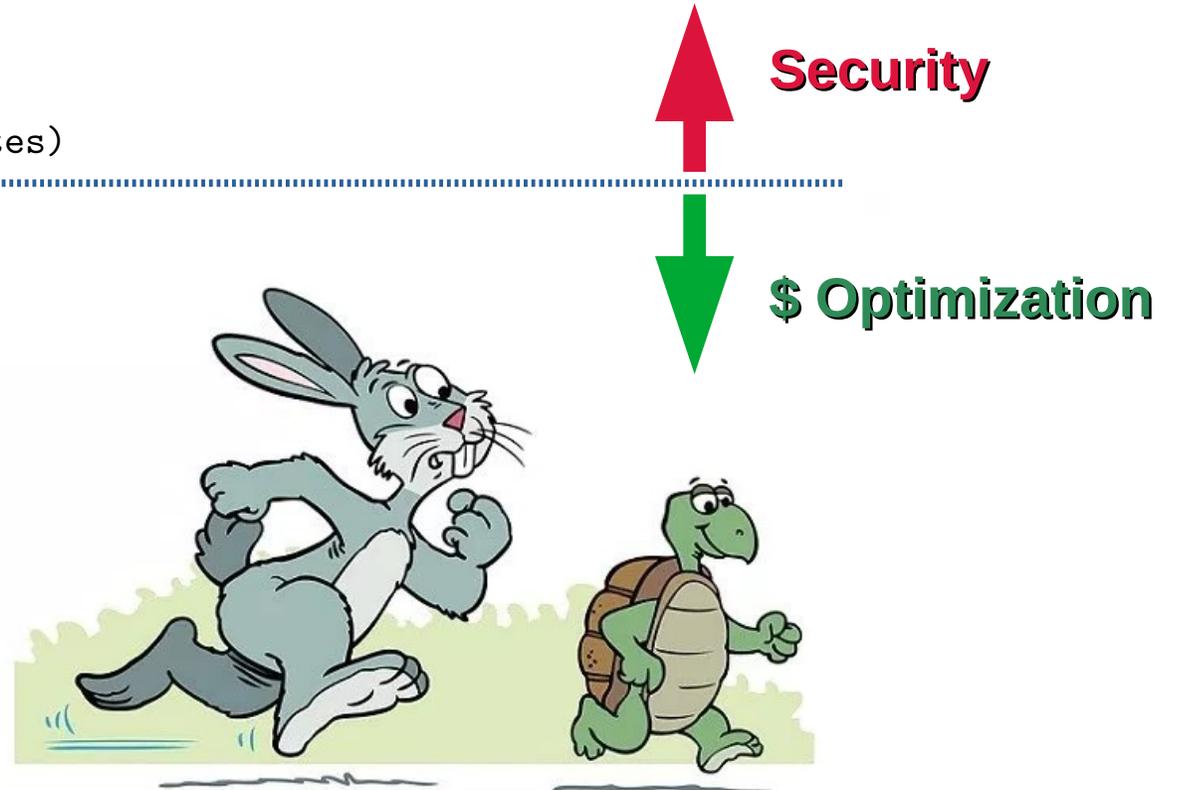
A model is a simplified representation of reality

Let the tree not hide the forest nor vice versa

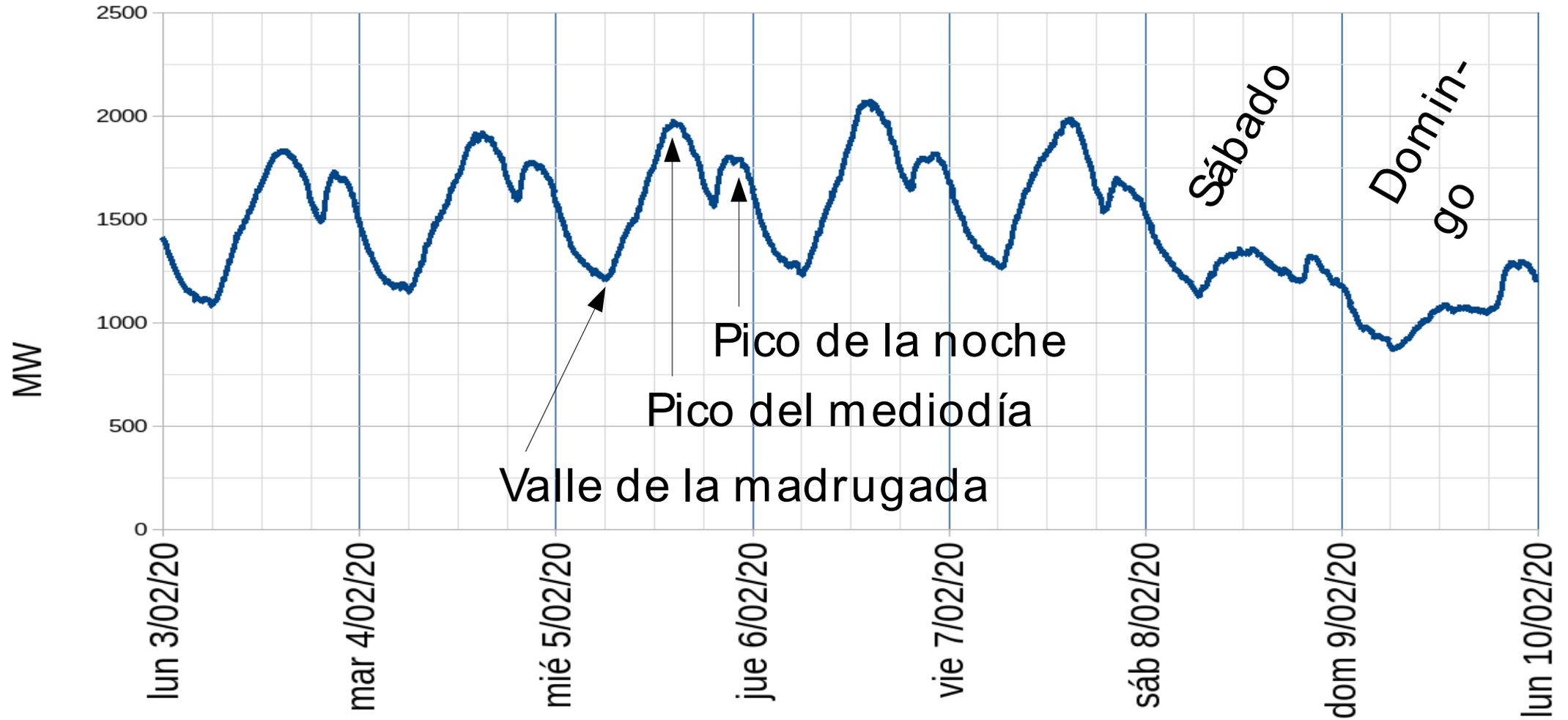


Time horizons for operation and analysis

- **milliseconds:** Generator statism - distributed control / Protections.
 - **seconds:** Frequency regulation - generator instructions.
 - **minutes:** Rotating Operating Reserve (2.1% of Demand)
 - **10 to 20 minutes:** Flexible Reserve (2.1% of Demand)
 - **>= 20 minutes:** Cold Reserve. (3% of Demand; 20 minutes)
-
- **hours:** Monitoring of Hourly Demand
 - **days:** Scheduling of resource use
 - **months:** Reservoir optimization and fuel management
 - **years:** Investment optimization

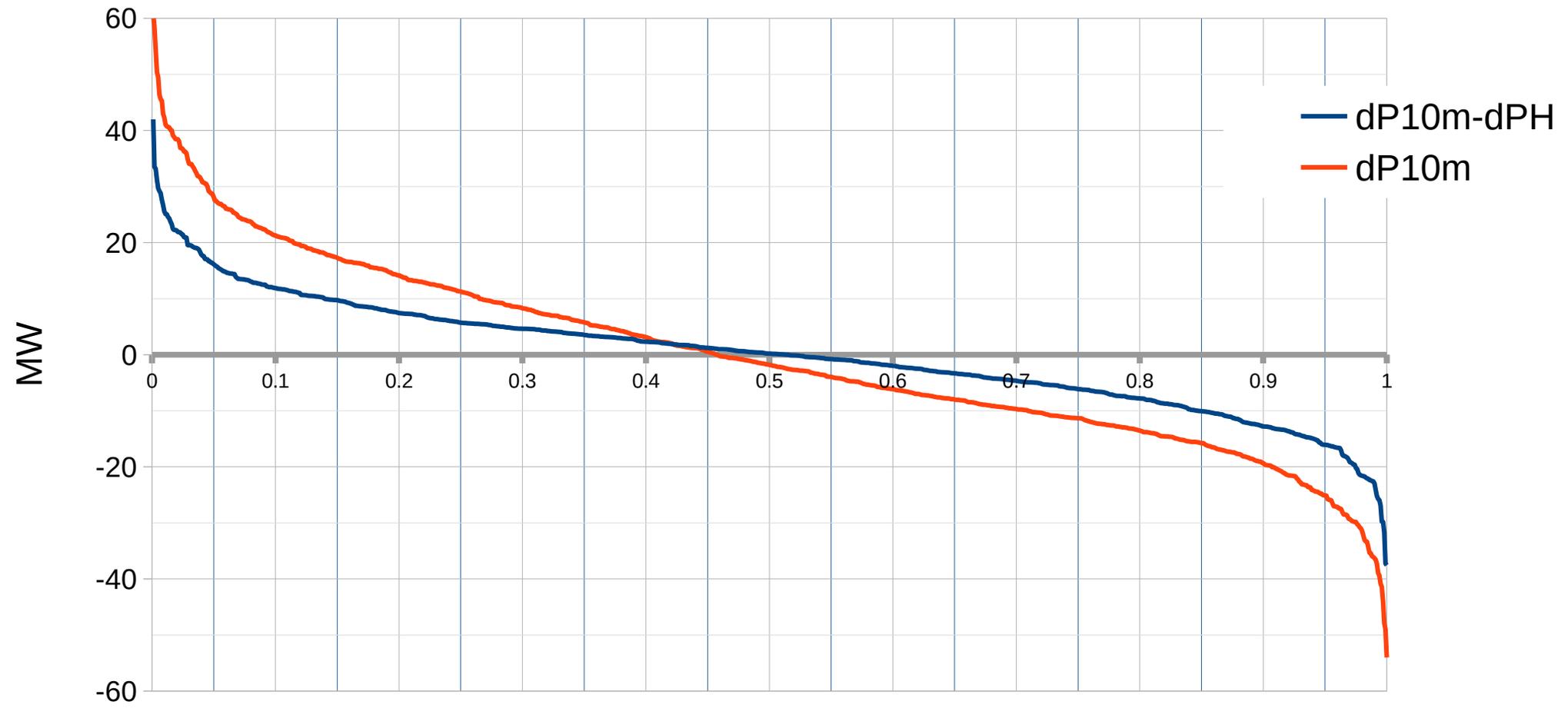


▣ ***Demanda - Potencia y Energía.***



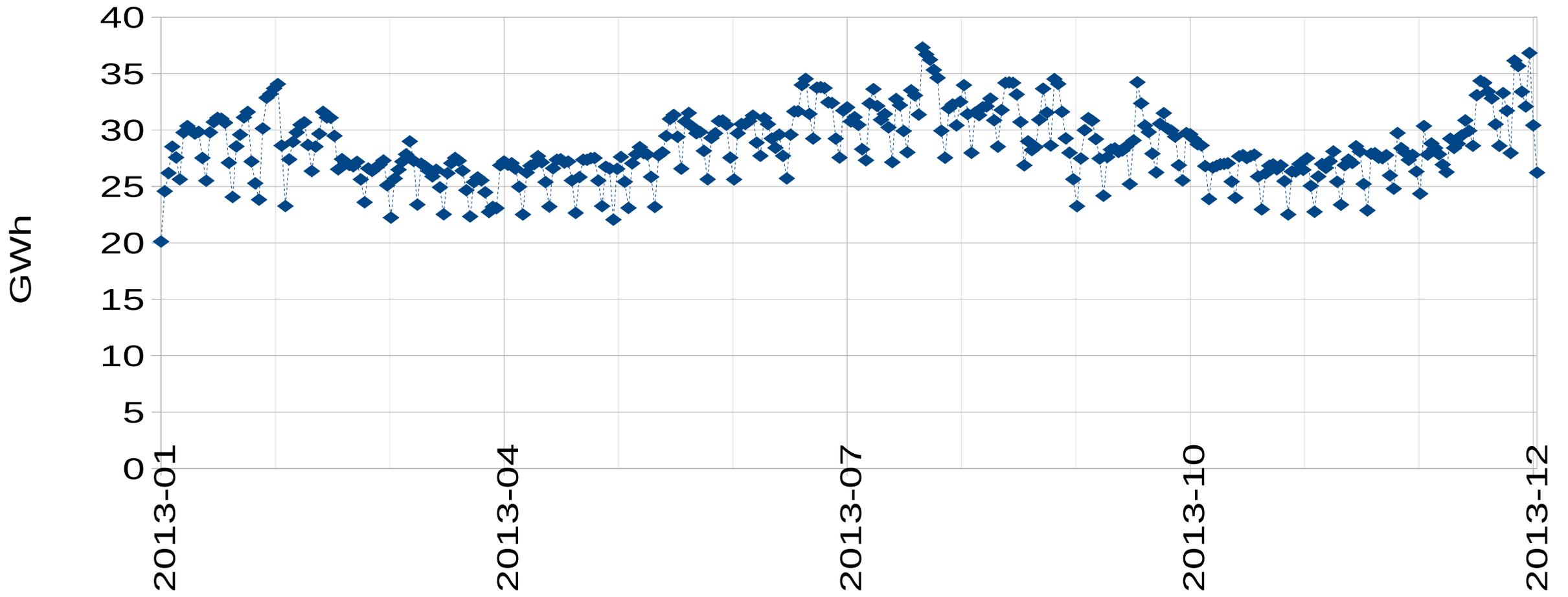
Serie diezminutal. Fuente ADME

Variación diezminutal



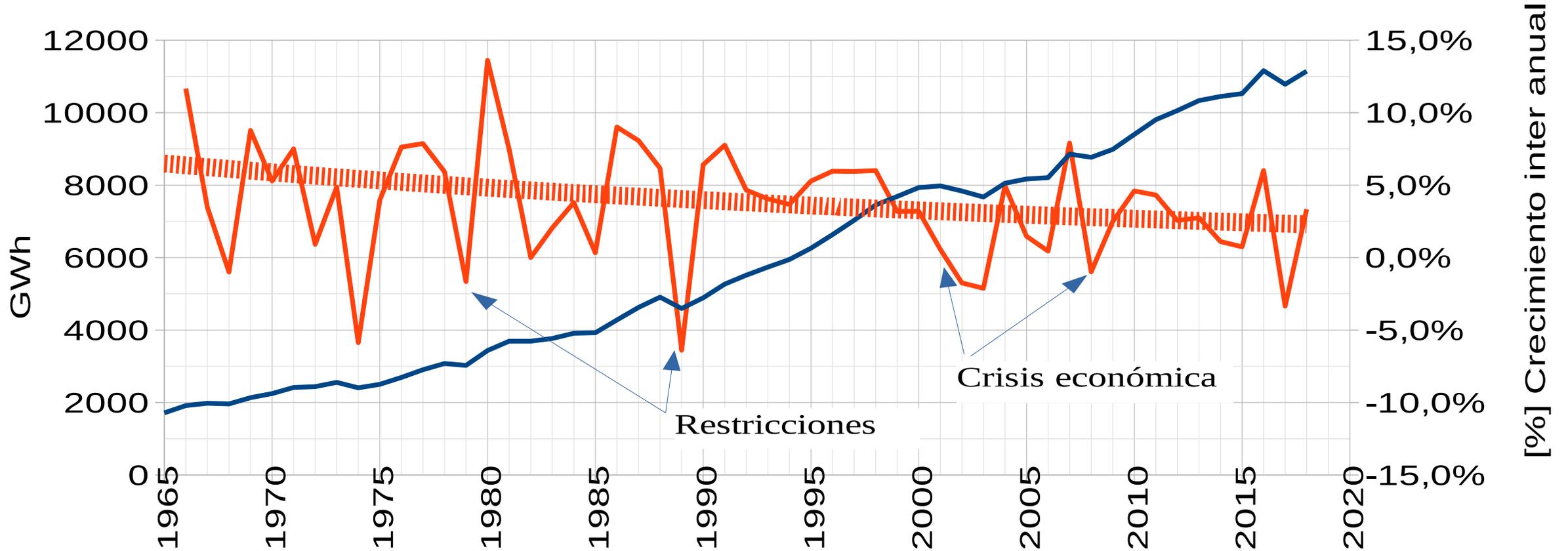
Estacionalidad de la demanda.

Demanda diaria - Uruguay 2013



Evolución de largo plazo.

Demanda de energía eléctrica de Uruguay a nivel de generación.





- Racionamiento
- Falla
- Déficit
- Demanda insatisfecha
- Costo de Falla

Déficit o Falla

Cuando no es posible cubrir la demanda, no hay forma de satisfacer una o más de las ecuaciones de balances de potencias. En ese caso se produce un DÉFICIT o FALLA en el suministro de energía y habrá demanda insatisfecha.

En la simulación del sistema, se agregan unos generadores ficticios que llamamos MÁQUINAS DE FALLA, de forma que se puedan satisfacer las ecuaciones de balance de potencia en todo instante.

Se puede saber en qué momentos se produce déficit y en qué cantidad, observando el despacho de estas MÁQUINAS DE FALLA.

Escalones de Falla

- Se suele agregar más de una MÁQUINA DE FALLA, asignándoles diferentes costos variables de operación.
- En SimSEE, para cada Demanda se deben definir los escalones de falla especificando su profundidad y costo.

	Escalón 1	Escalón 2	Escalón 3	Escalón 4
	2%	2 a 7%	7 a 14.5%	más de 14.5%
escf [pu]	0.020	0.050	0.075	0.855
cvf [USD/MWh]	CTR+10%	600	2400	4000

Generadores

En SimSEE, los Generadores son los Actores que producen energía.

- Según su tecnología se agrupan en: Térmicos, Hidráulicos, Eólicos, Solares, etc.
- Los Generadores térmicos están formados por una o más unidades turbina-generator (o moto-generator). Las turbinas pueden ser del tipo turbo-vapor, donde se produce la expansión del vapor generado en una caldera, o turbinas aero-derivativas como la de los aviones tipo jet, en que la combustión se produce en la misma turbina expandiéndose los gases de la combustión en su interior.
- Las centrales térmicas más comunes utilizan como combustible Carbón, FuelOil pesado, Gas Oil, Gas Natural, bio-combustibles.

Sistema de transporte

- Conectando a los Generadores y a las Demandas, tenemos el Sistema de Transporte que en detalle está compuesto por el conjunto de líneas, barras, transformadores etc. que hacen posible el transporte de la energía eléctrica desde los generadores hasta las demandas en condiciones de potencia, tensión y frecuencia requeridos.
- En SimSEE, bastará con definir barras “virtuales” de conexión donde se resumen las grandes áreas de carga y “arcos” entre las barras representando las capacidades de transporte y sus pérdidas entre dichas áreas.

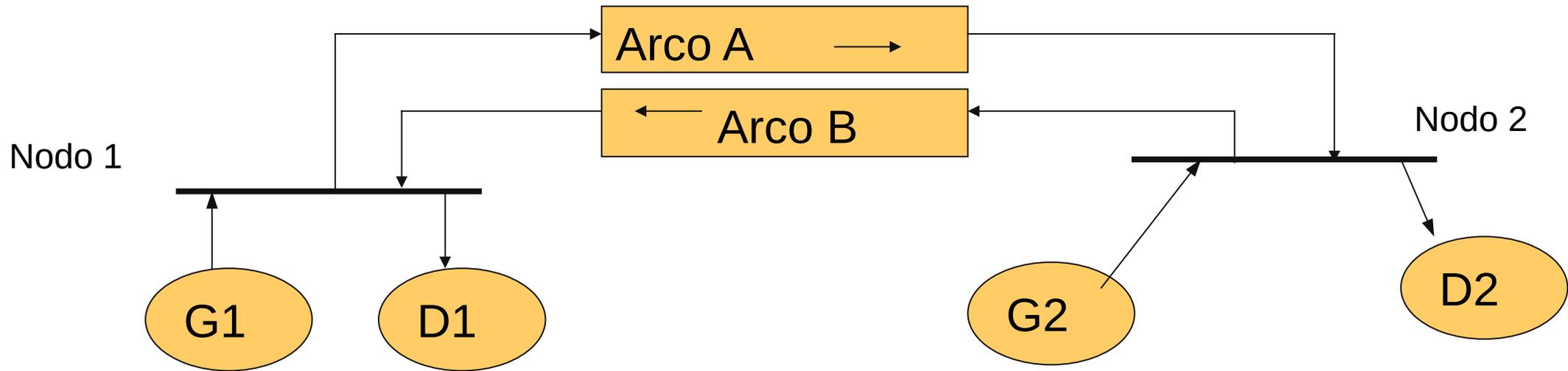
Despacho y restricciones de Nodo

Resolver el DESPACHO significa decidir en cada instante de tiempo qué máquinas serán las que generen y en qué cantidad, así como los flujos por las interconexiones y arcos para cubrir las diferentes demandas. El problema de despacho consiste en suministrar las demandas al menor costo posible.

En la simulación del sistema, el despacho se resuelve en cada intervalo de tiempo o paso de simulación.

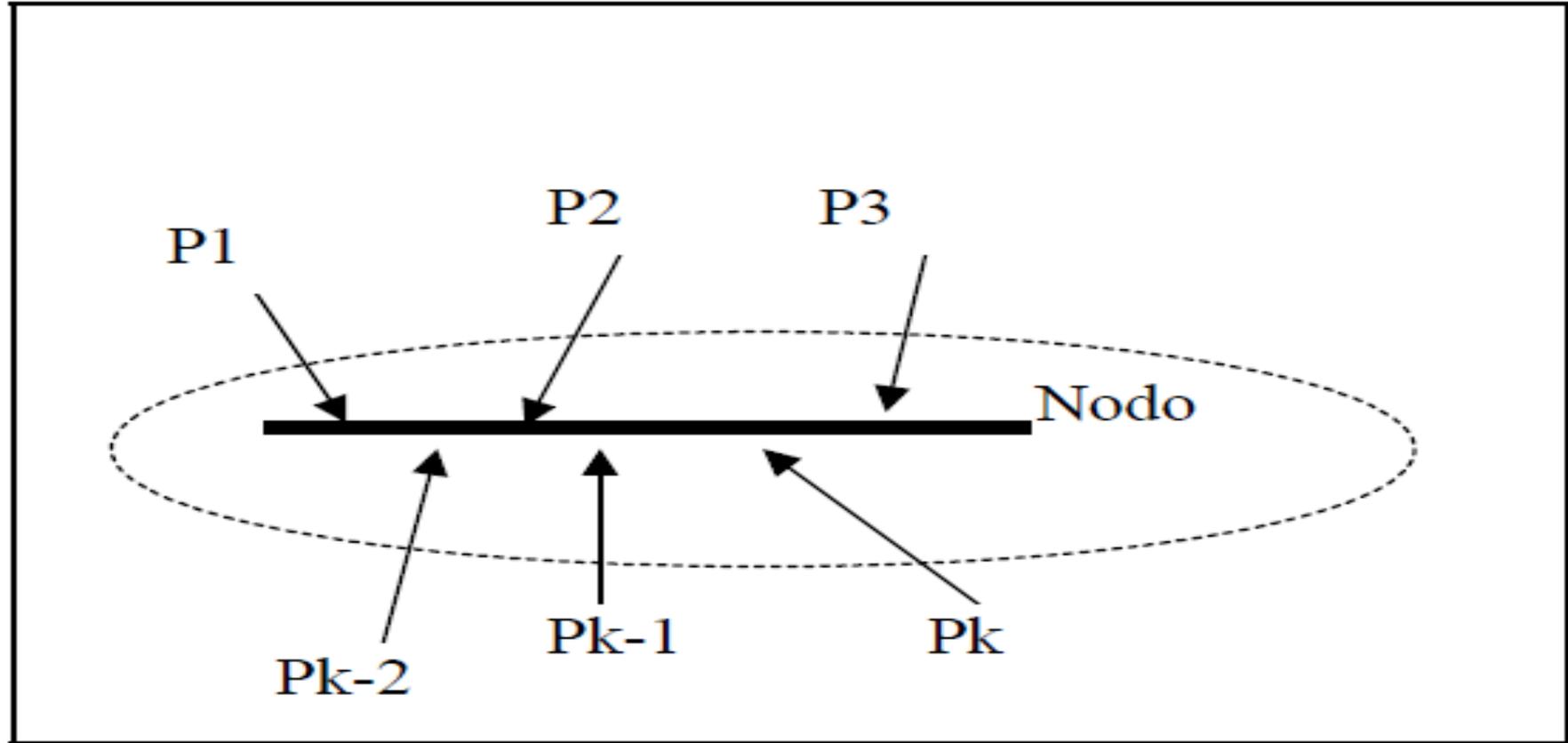
En cada nodo de un sistema se debe cumplir en todo instante el balance de Potencia. Es decir, la suma de las potencias inyectadas al nodo debe ser CERO.

Sistema de transporte



Despacho y restricciones de Nodo

$$\sum_k P_k = 0 ;$$



Despacho y restricciones de Nodo

Podemos plantear el problema de despacho como:

$$\begin{aligned} & \text{mín} \left(\sum_k c_k (PG_k) dt \right) \\ & @ \sum_k PG_k - \sum_h PD_h = 0 \end{aligned}$$

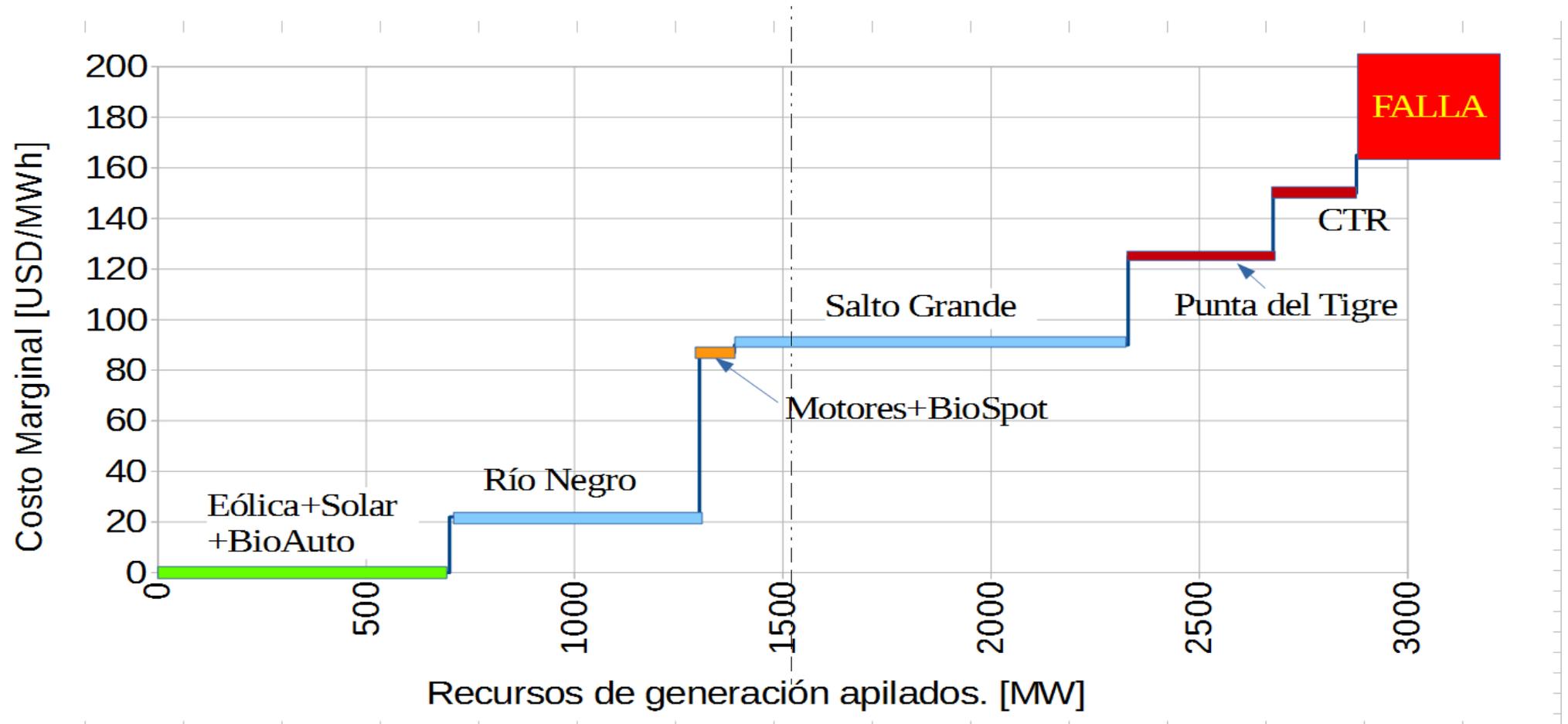
Donde:

- PG_k es la potencia inyectada por el generador k
- PD_h es la potencia retirada por la demanda h en el nodo en cuestión
- $c_k(PG_k)$ es el costo de generación del generador k expresado en USD/h cuando entrega una potencia PG_k y
- dt es la duración del paso de tiempo en horas.

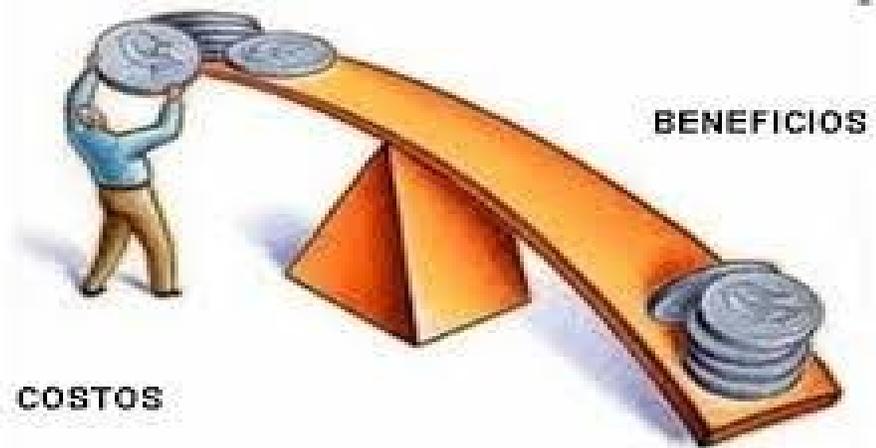
Despacho y restricciones de Nodo

- Entonces, el problema es minimizar el costo de generación en el paso de tiempo, cumpliendo con las restricciones de nodo.
- Este planteo es una simplificación del problema de despacho general que veremos más adelante, en que el costo a minimizar es el de generación en el horizonte de tiempo (conjunto de pasos) y en el que además de las restricciones de nodo se deben de verificar un conjunto mayor de restricciones como las impuestas por los embalses, las líneas de transmisión etc.

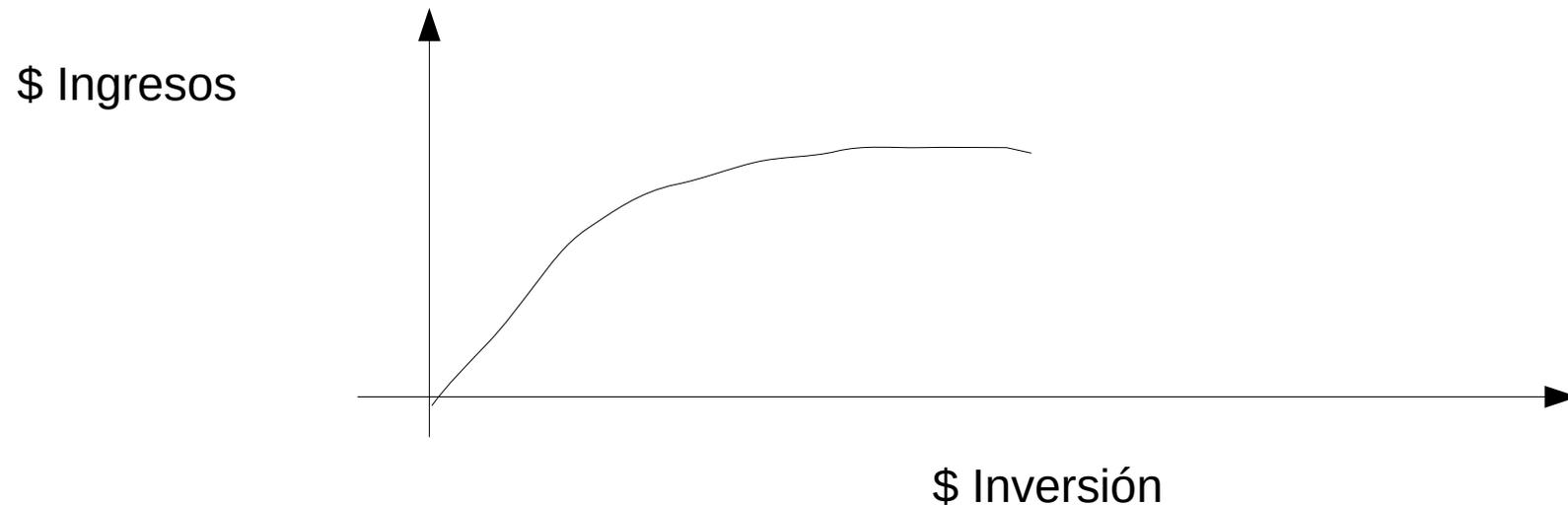
Orden de mérito y Costo Marginal. Sólo Costos Variables.



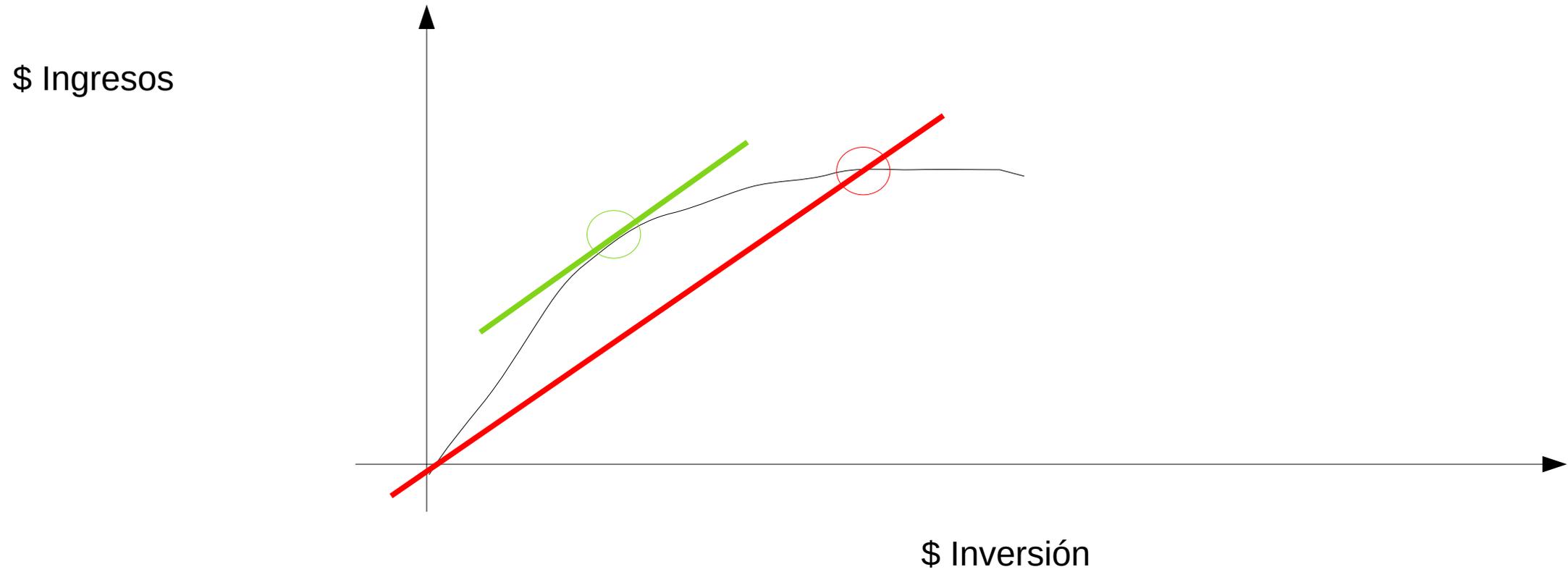
Beneficio MARGINAL como herramienta de razonamiento.



- Costos FIJOS.
- Costos VARIABLES.
- Beneficio MEDIO.
- Beneficio MARGINAL.
- Rendimientos decrecientes.



¿Hasta dónde invertir?



Los Recursos

Costos Variable = CV [USD/MWh]

Costos Fijos = PP [USD/MWh]

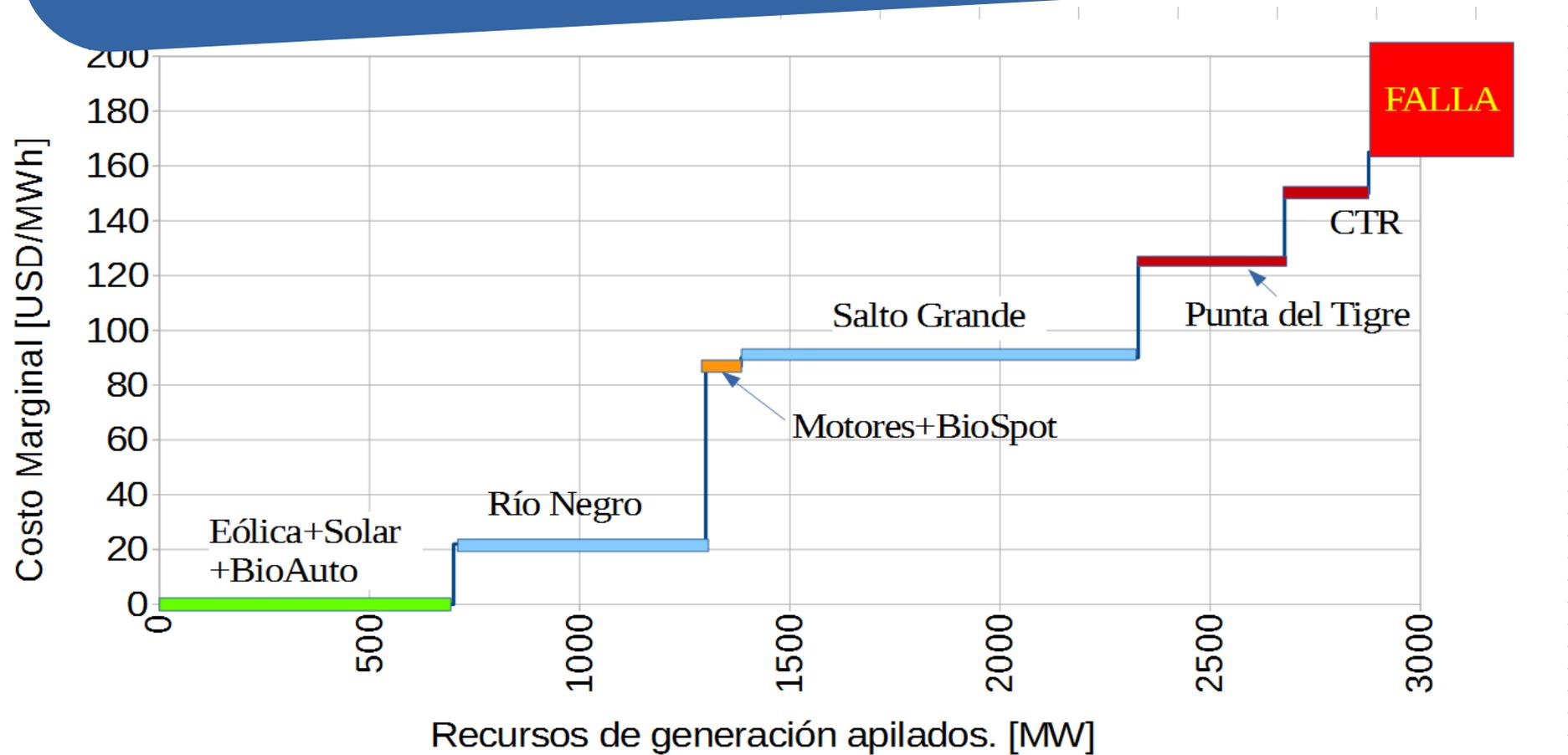
	PP [USD/MWh]	CV [USD/MWh]
eólica	65	0
solar	85	0
Turbina Ciclo Abierto (GO)	15	120
Ciclo Combinado (GO)	25	90
@wti = 50 USD/bbl		

Biomasa (Autodespachada | Spot)

Hidroeléctricas

Despacho Óptimo

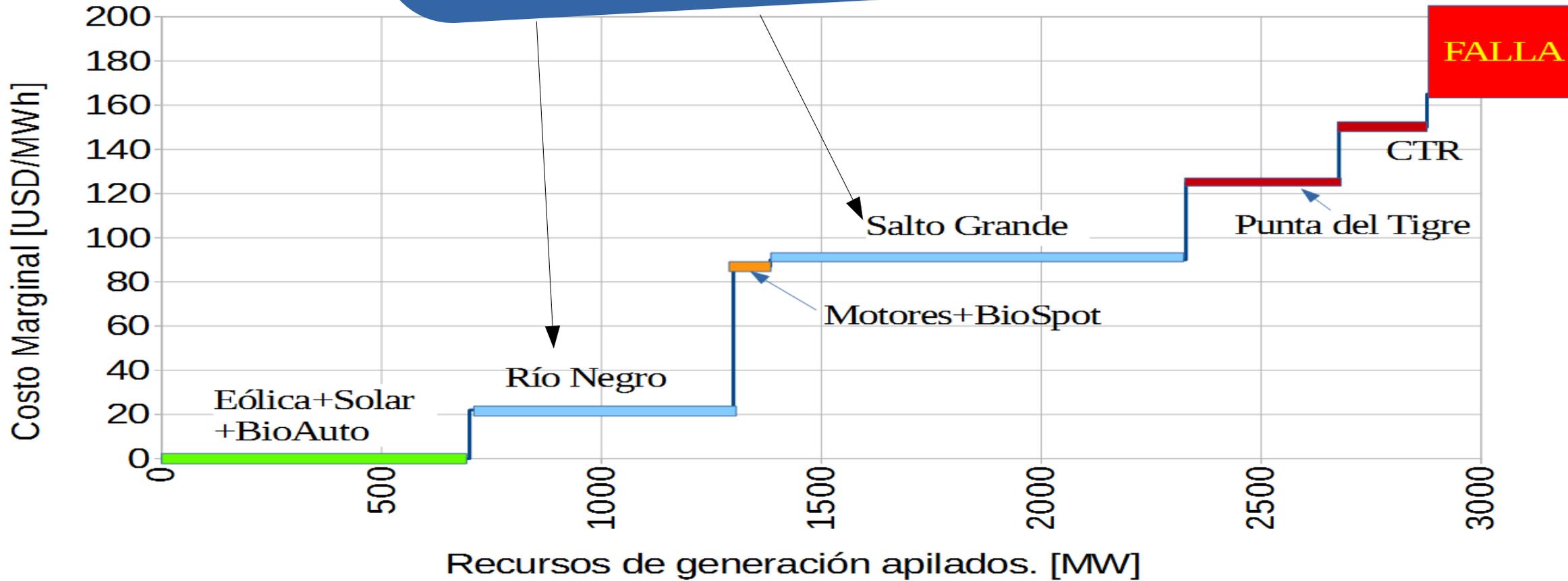
Primer Principio: “Sólo Costos Variables”



Despacho Óptimo
Segundo Principio:
“Los contratos son de papel”



Valor del Agua



Valor de un recurso almacenable



Comparación entre costo del presente y costo del futuro.

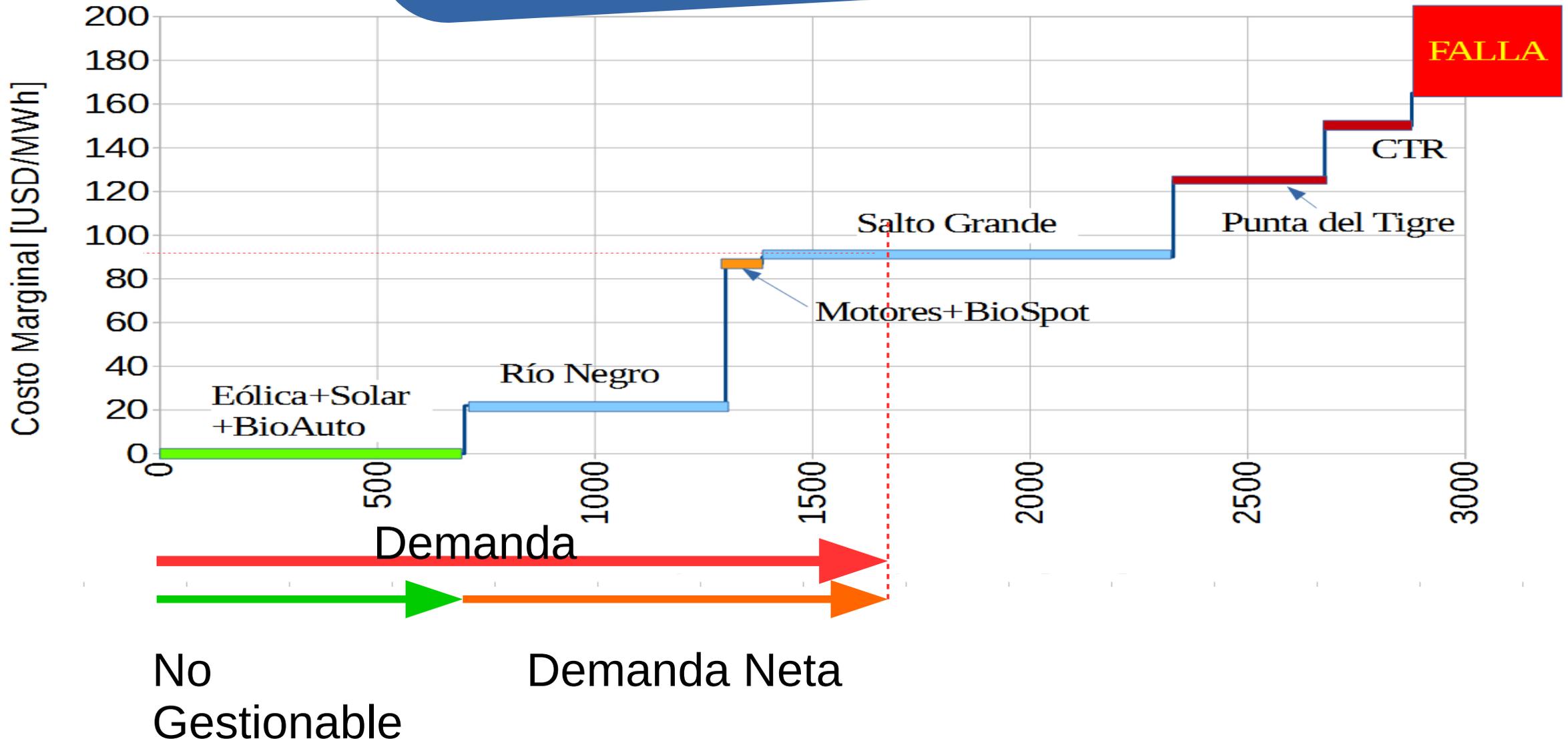
De no haber restricciones para el traslado en el tiempo, el costo marginal sería el mismo en todas las horas del futuro.

INCERTIDUMBRE DEL FUTURO.

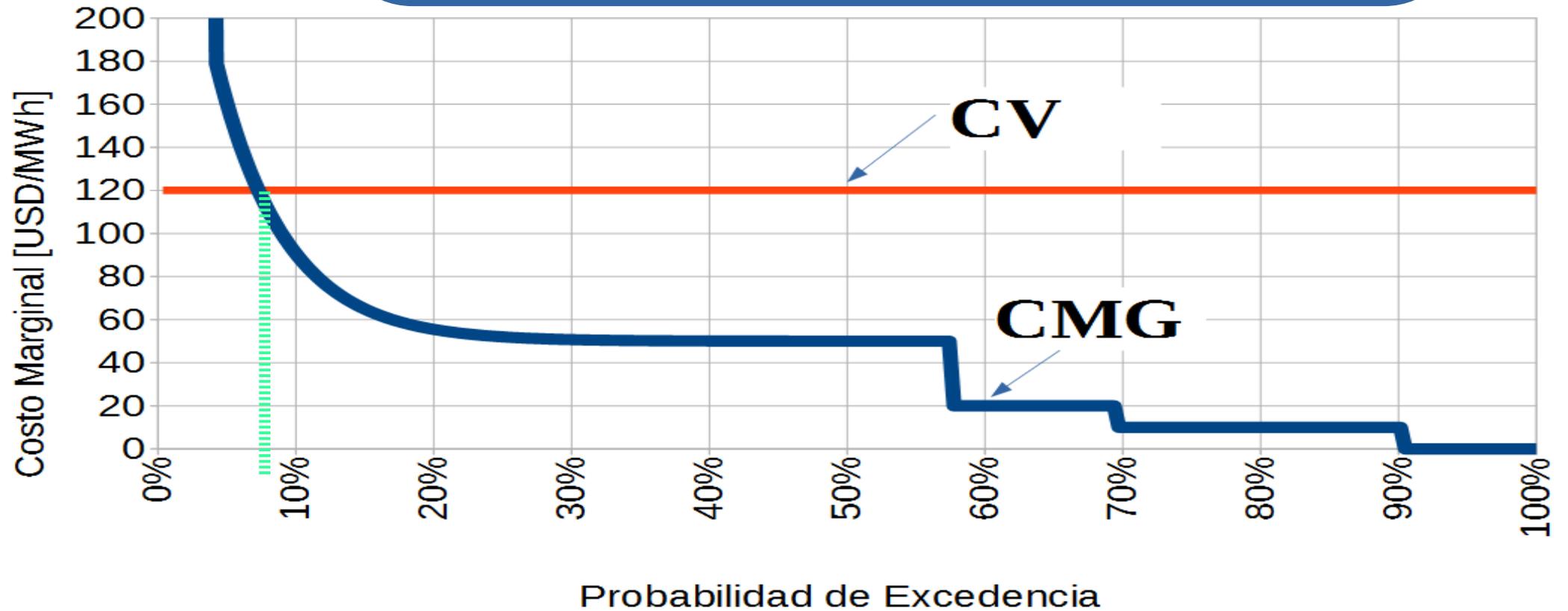
MODELOS ESTOCÁSTICOS

PRONÓSTICOS

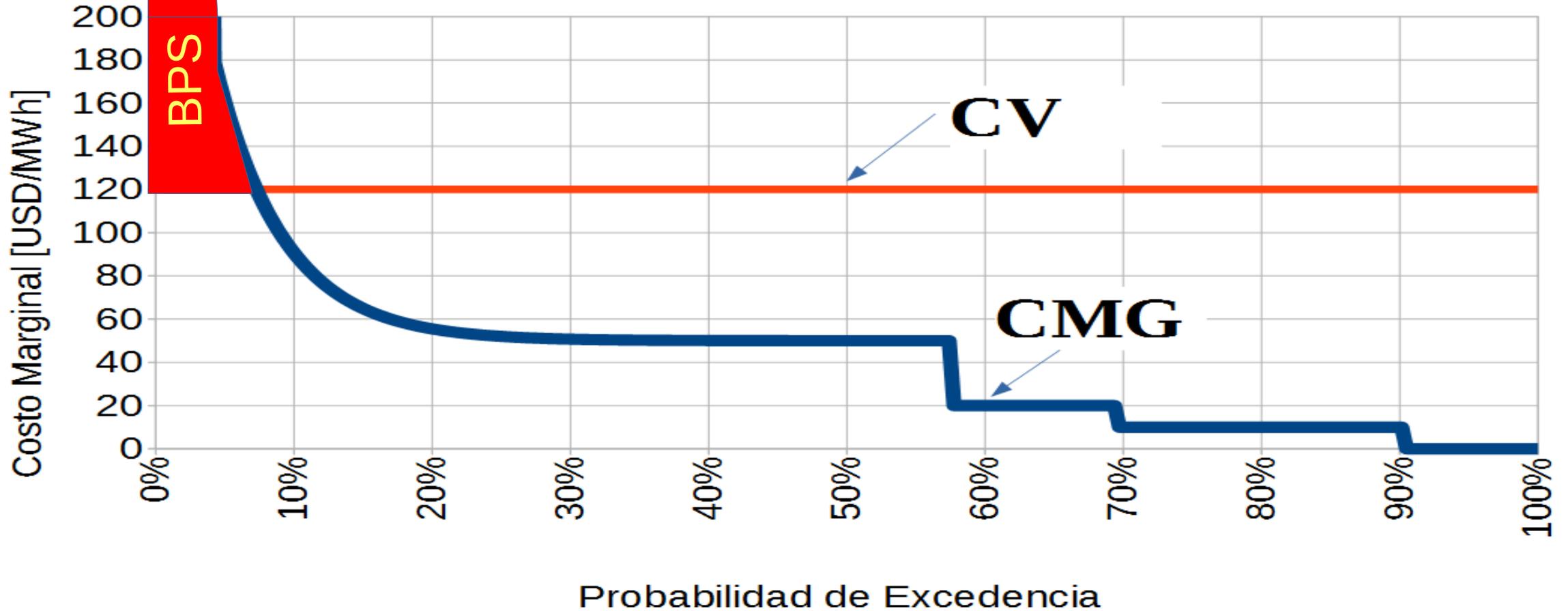
Costo Marginal



Costo Marginal, CV y Factor de Despacho.



Beneficio Por Sustitución.



Gradiente de Inversión.

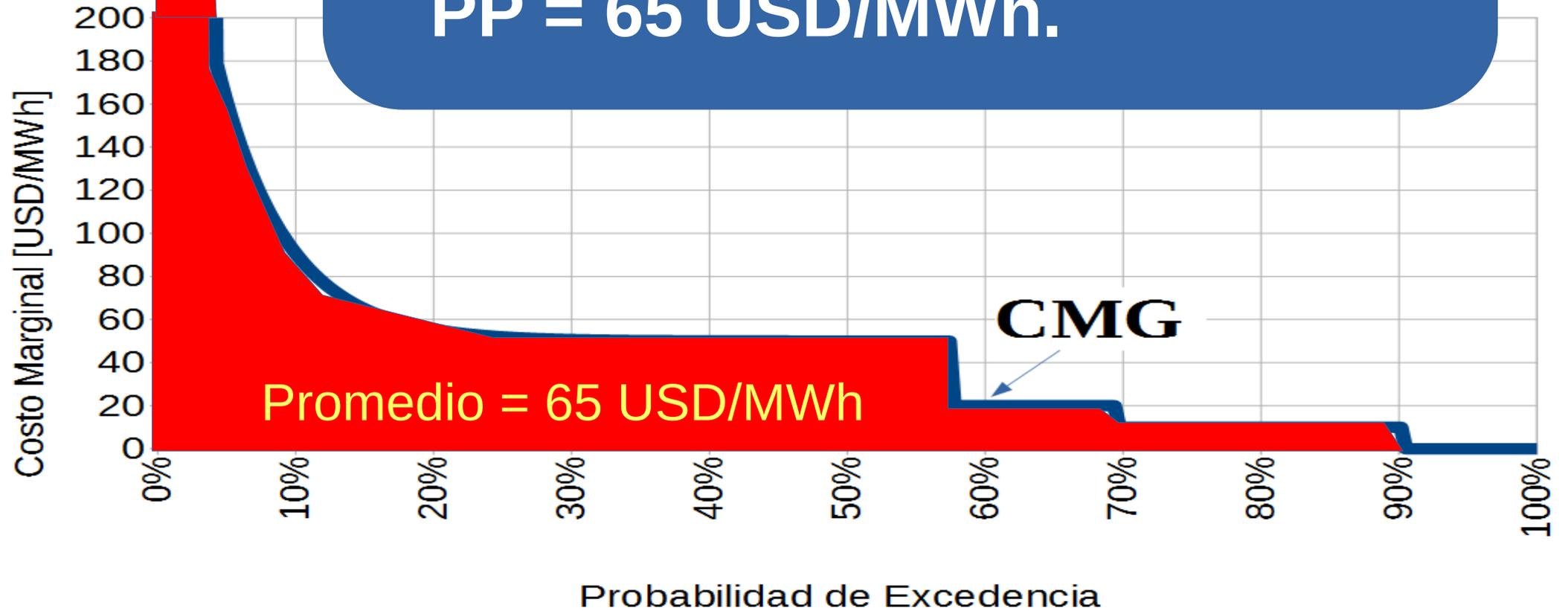
$$GI = (BPS * fd - PP) / PP$$

**La tecnología más eficiente
marca la expansión hasta que su
 $GI = 0$.**

Eólica:

CV = 0 USD/MWh

PP = 65 USD/MWh.



FIN!!! ...

Muchas gracias por vuestra atención!

