



# Simulación de Sistemas de Energía Eléctrica

Instituto de Ingeniería Eléctrica  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de la República Oriental del Uruguay.

Ing. Ruben Chaer. <[rchaer@simsee.org](mailto:rchaer@simsee.org)>

Marzo 2022

*Montevideo - Uruguay*

## ***Docentes:***

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

# Calendario 2022 *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:

1	08/03/2022	Martes	Introducción al modelado y operación óptima de sistemas
2	10/03/2022	Jueves	Instalación de SimSEE y Práctico 1
3	15/03/2022	Martes	Optimización en pocas palabras y Práctico 2
4	17/03/2022	Jueves	Programación Dinámica Estocástica y Costo Futuro y Práctico 3
5	22/03/2022	Martes	Modelo de procesos estocásticos -CEGHs (rch). Práctico 4 (AnálisisSerial)
6	24/03/2022	Jueves	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	29/03/2022	Martes	Cálculo de Costos Fijos. OddFace y Precisión de Resultados
8	31/03/2022	Jueves	Influencia de iN34 en la operación, asimilación de pronósticos de caudales + Práctico (si es que da el tiempo).
9	05/04/2022	Martes	Integración de Ensamble de Pronósticos en CEGHs + Práctico
10	07/04/2022	Jueves	Programación Estacional y Semanal y VATES + Práctico
Turismo			
11	21/04/2022	Jueves	Repaso general y guía de trabajos finales.
12	26/04/2022	Martes	Modelo de Demanda + Práctico
13	28/04/2022	Jueves	Modelo CC Horario + Práctico
14	03/05/2022	Martes	Modelos parques eólicos y solares MDN + Práctico reserva rotante (flexibilidad)
15	05/05/2022	Jueves	Consulta sobre trabajos finales
16	10/05/2022	Martes	Consulta sobre trabajos finales

# 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.

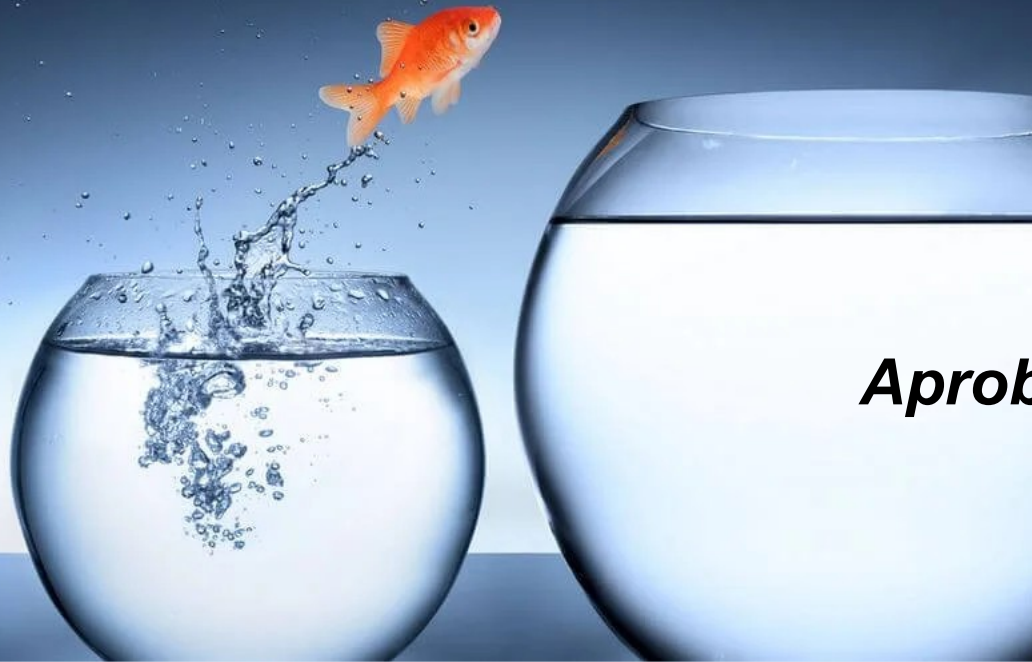


## ***MÓDULO 2: Descripción del Sistema***

- 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 Básico.***

- 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.

## *El Sistema*

**Generadores**

**Demandas**

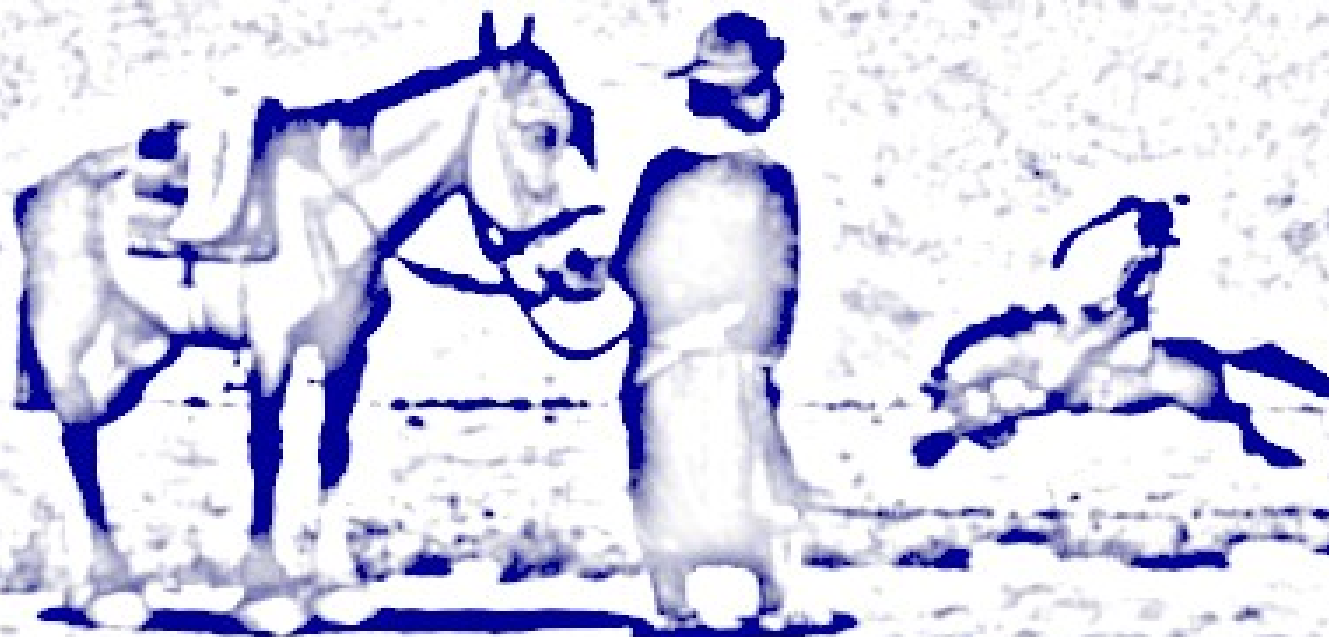
**Red eléctrica**

**Interconexiones**



*El Simulador*

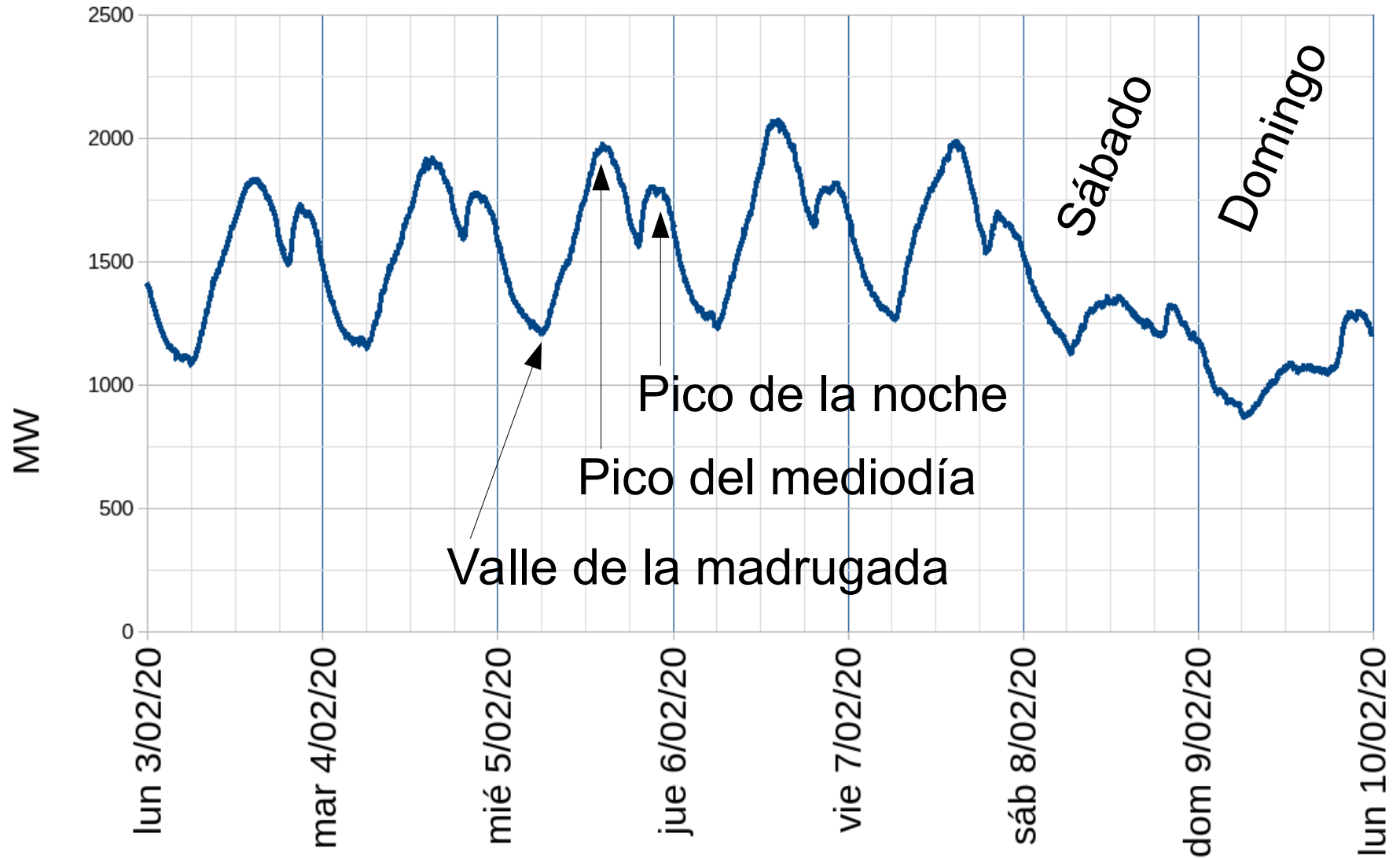
# Una Herramienta



*¿Por qué y para qué?*

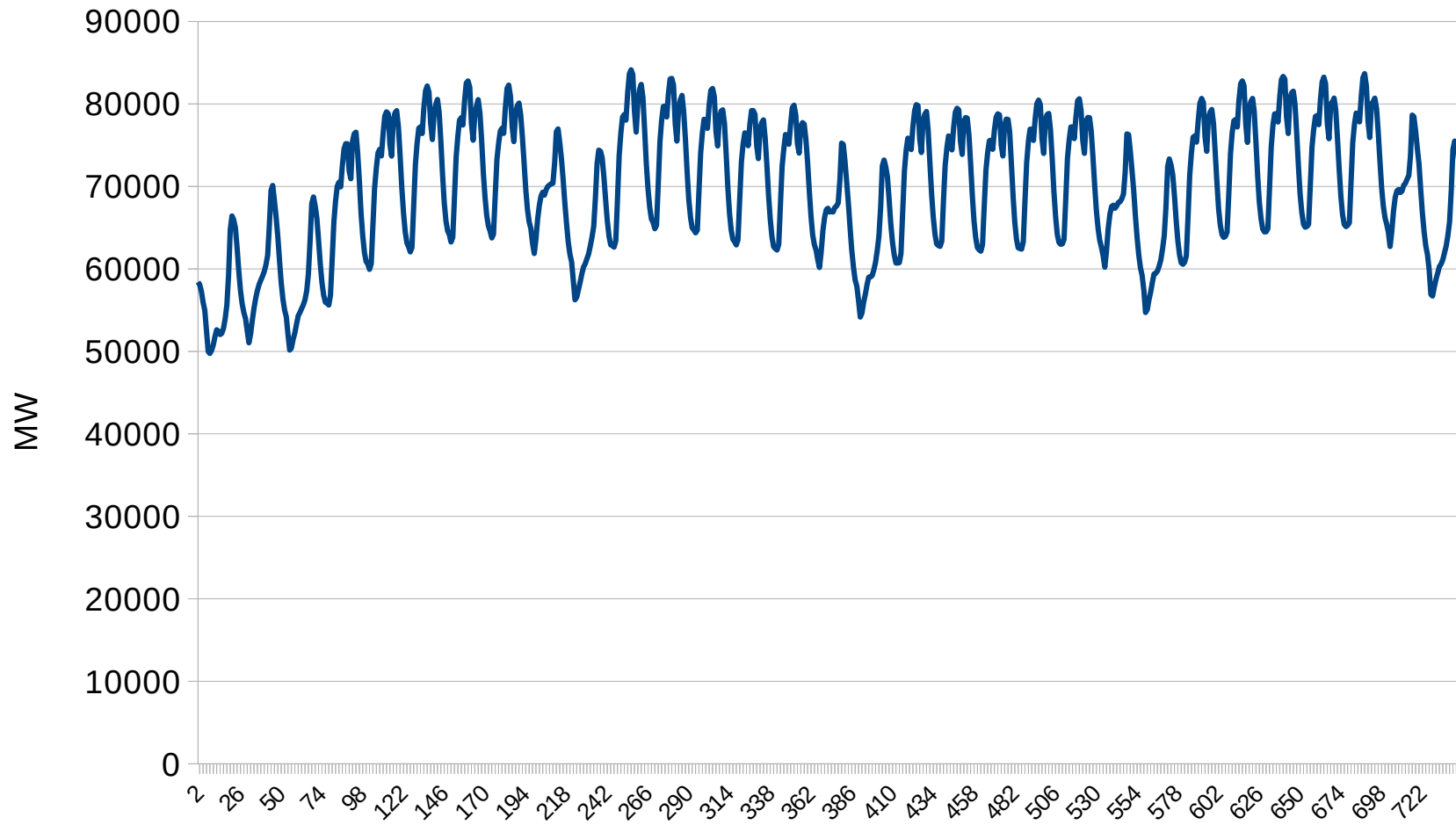


## ▣ ***Demanda - Potencia y Energía.***



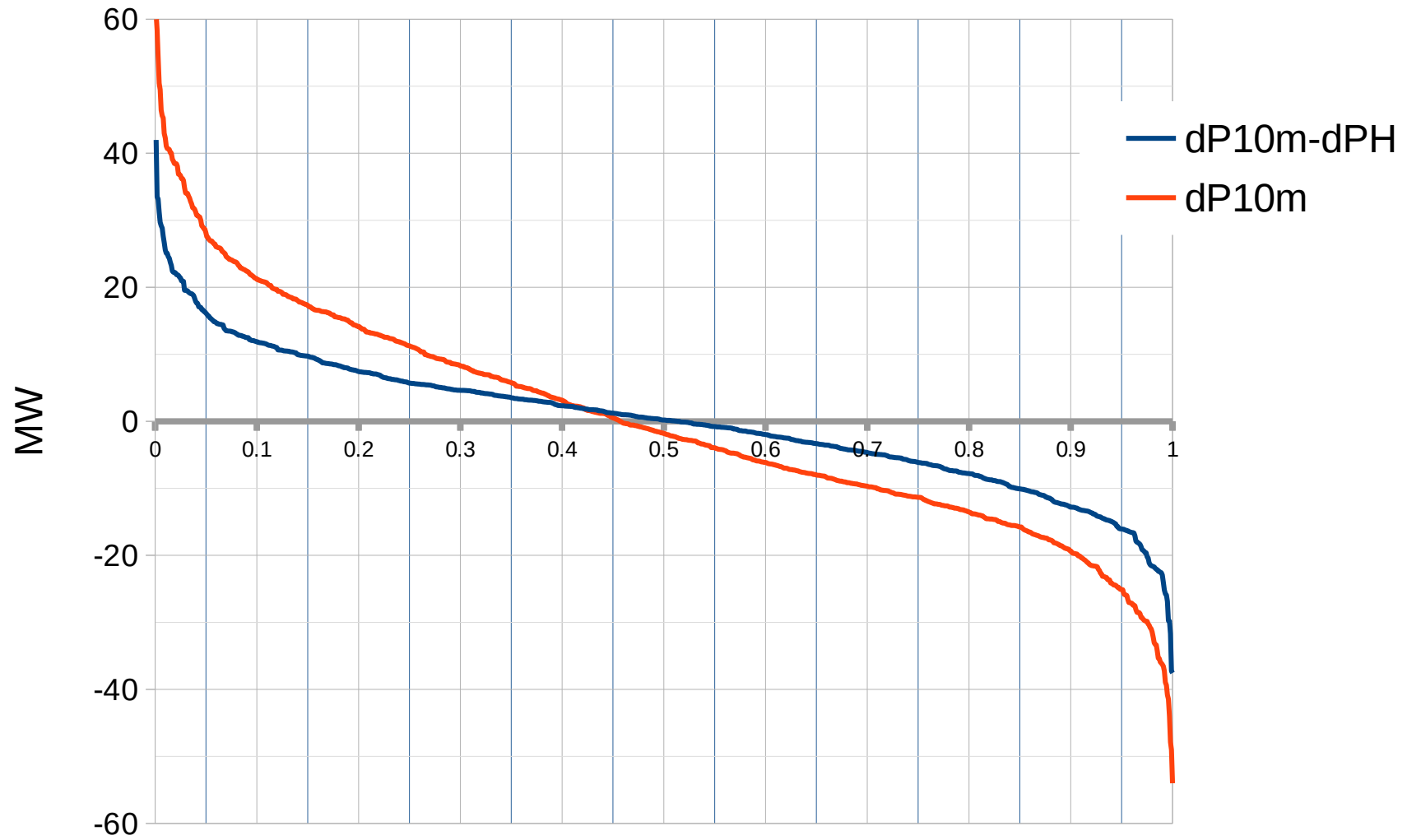
*Serie diezminutal. Fuente ADME.*

# Brasil enero 2021





# Variación diezminutal



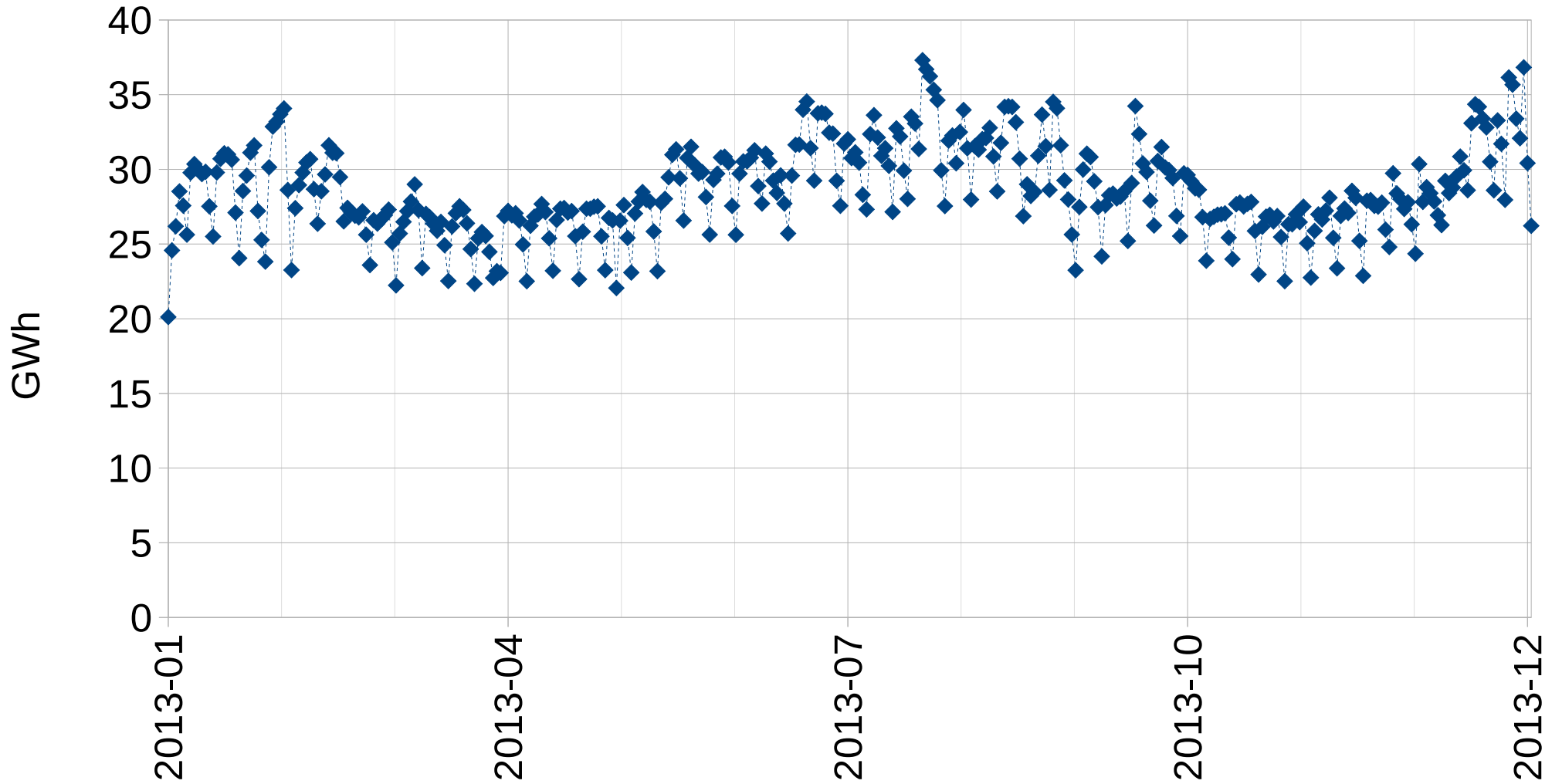
## ***Reservas de corto plazo***

- Reserva Operativa. (2.1% de la Demanda; < 10 minutos).
  - Reserva 10 minutos. (2.1% de la Demanda; 10 a 20 minutos).
  - Reserva Fría. (3% de la Demanda; 20 minutos).
- 
- Seguimiento de la Demanda Horaria.



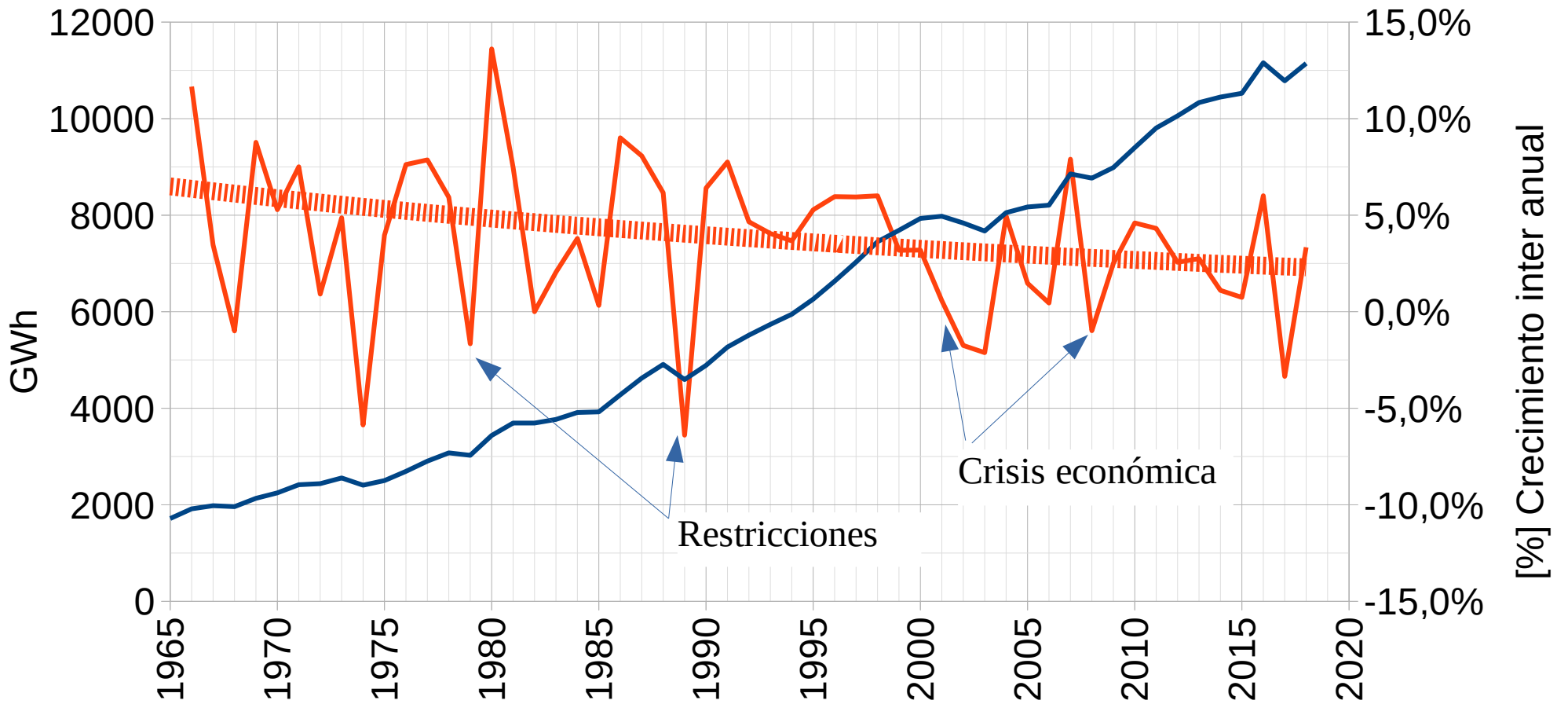
# *Estacionalidad de la demanda.*

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***

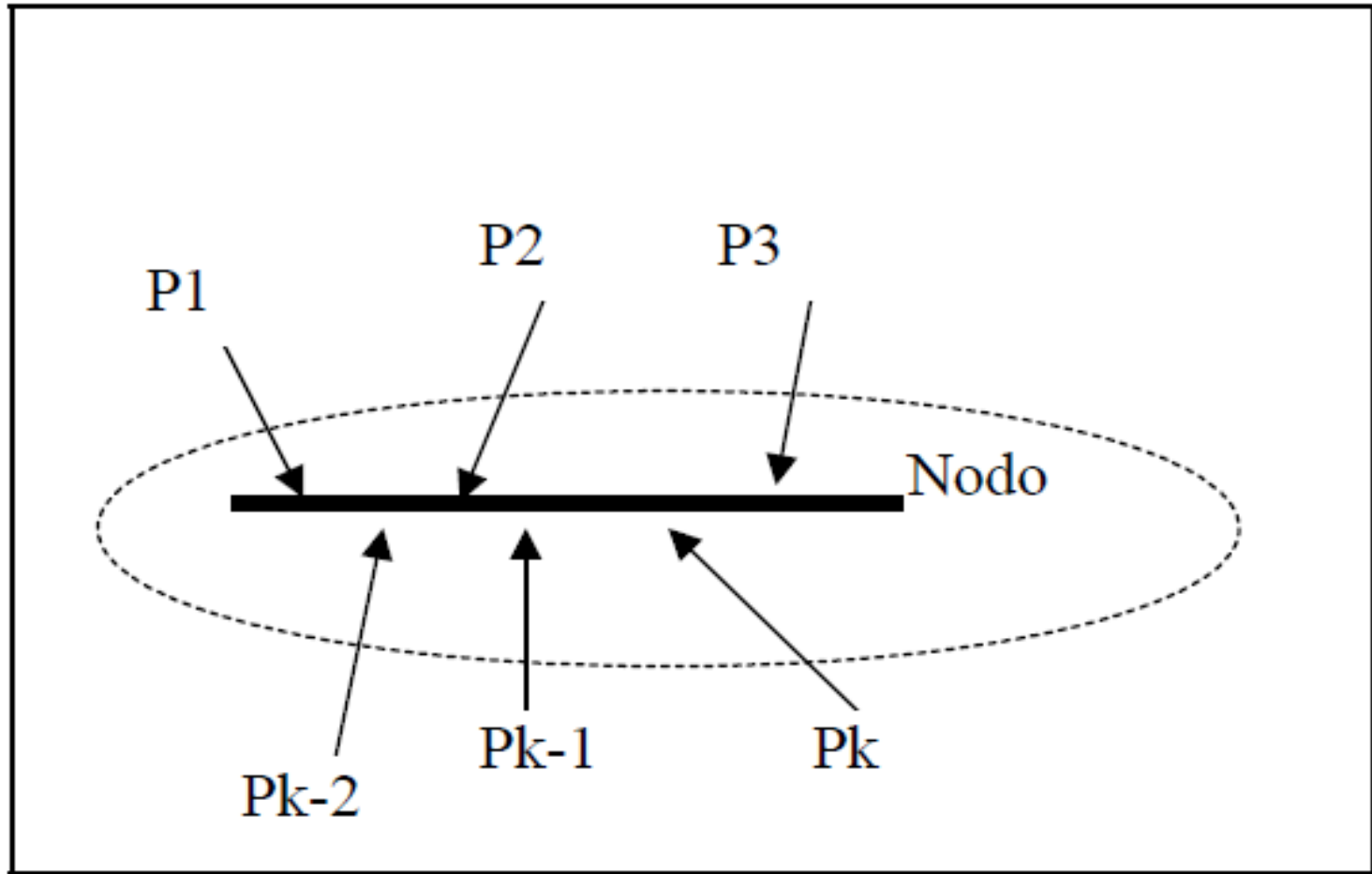
Resolver el DESPACHO significa decidir en cada instante de tiempo qué máquinas serán las que generen y en qué cantidad, así como los flujos por las interconexiones y arcos para cubrir las diferentes demandas. El problema de despacho consiste en suministrar las demandas al menor costo posible.

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.

## Despacho y restricciones de Nodo

$$\sum_k P_k = 0 ;$$



## Despacho y restricciones de Nodo

Podemos plantear el problema de despacho como:

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

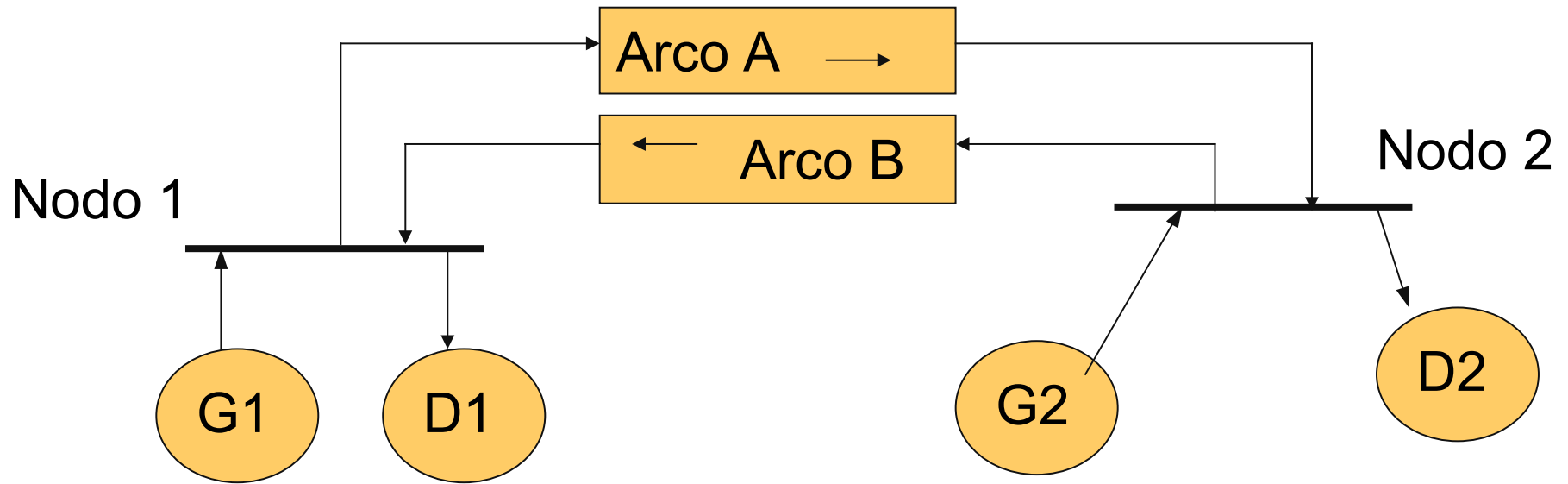
Donde:

- $PG_k$  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.

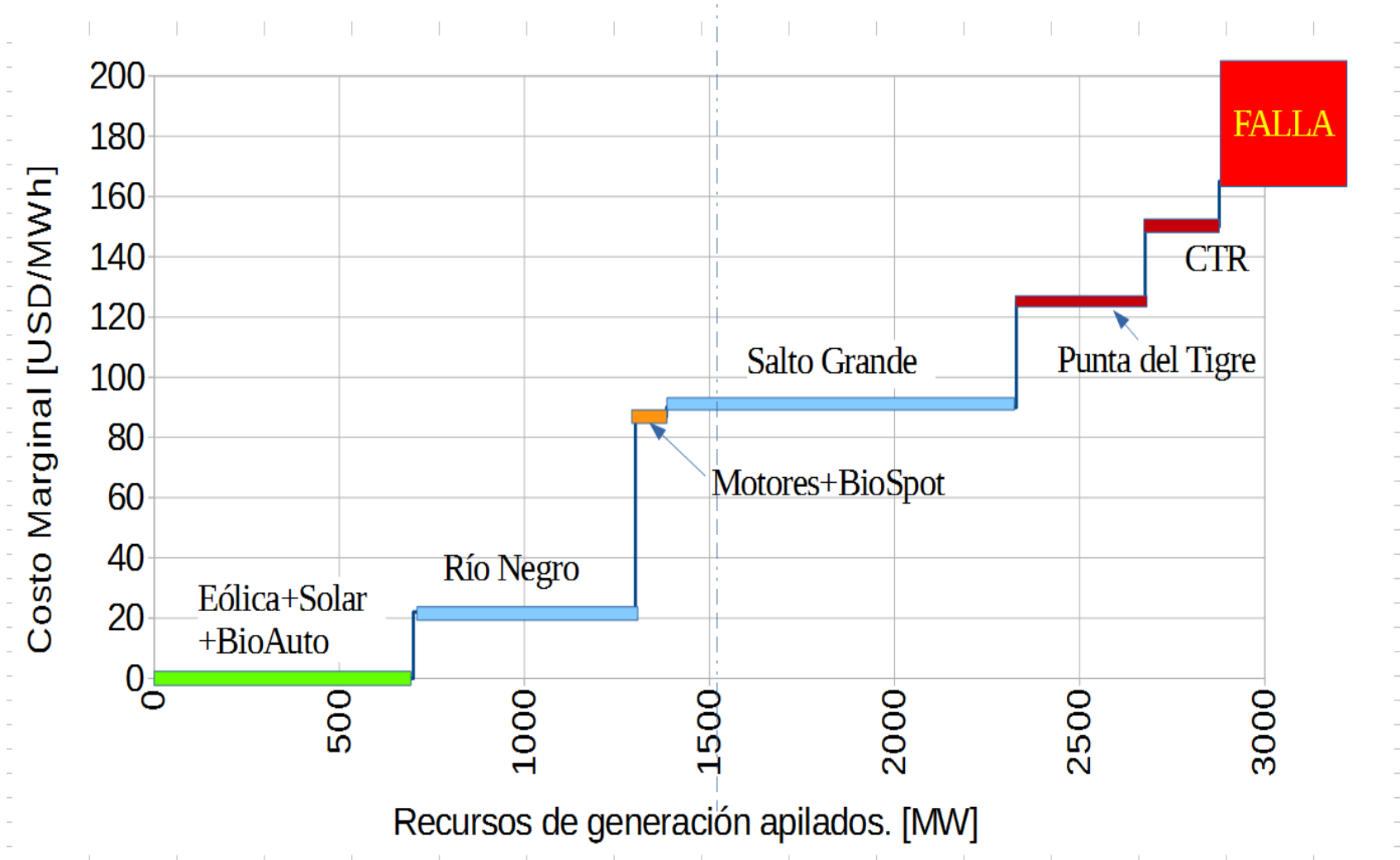
## ***Despacho y restricciones de Nodo***

- 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.

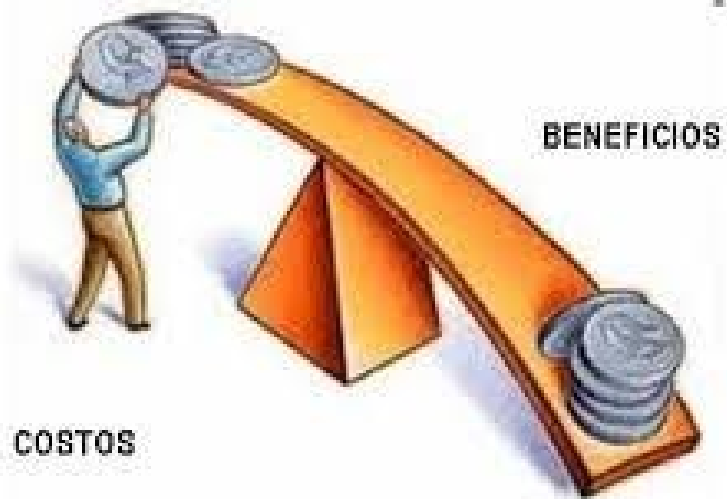
# Sistema de transporte



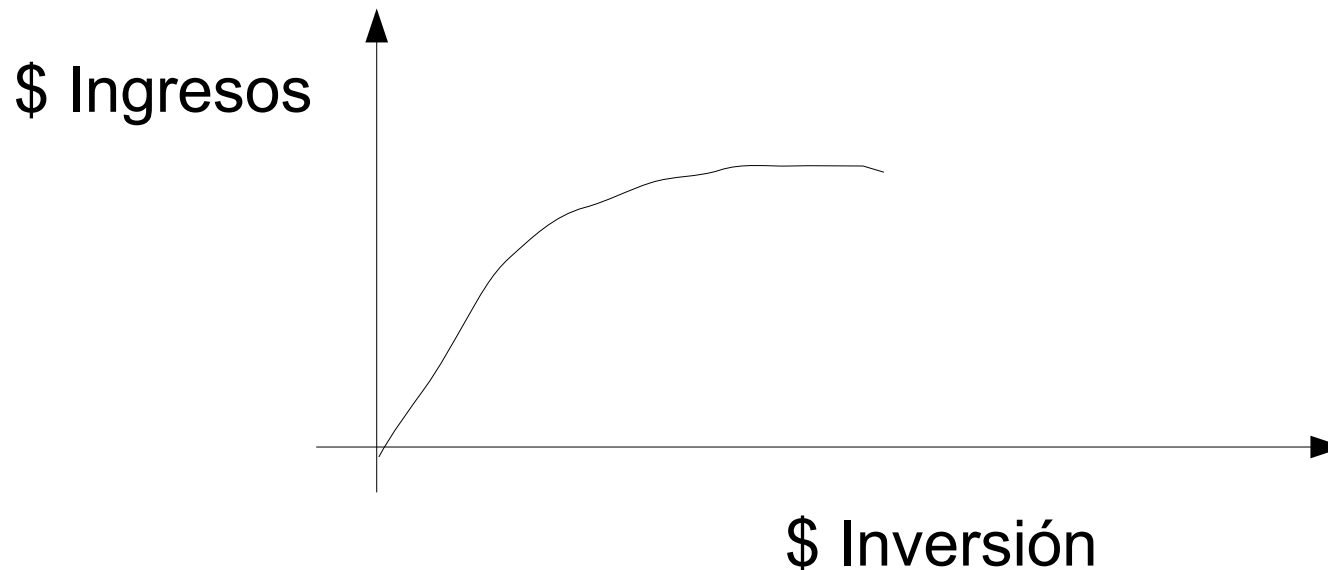
# Orden de mérito y Costo Marginal. Sólo Costos Variables.



## **Beneficio MARGINAL como herramienta de razonamiento.**

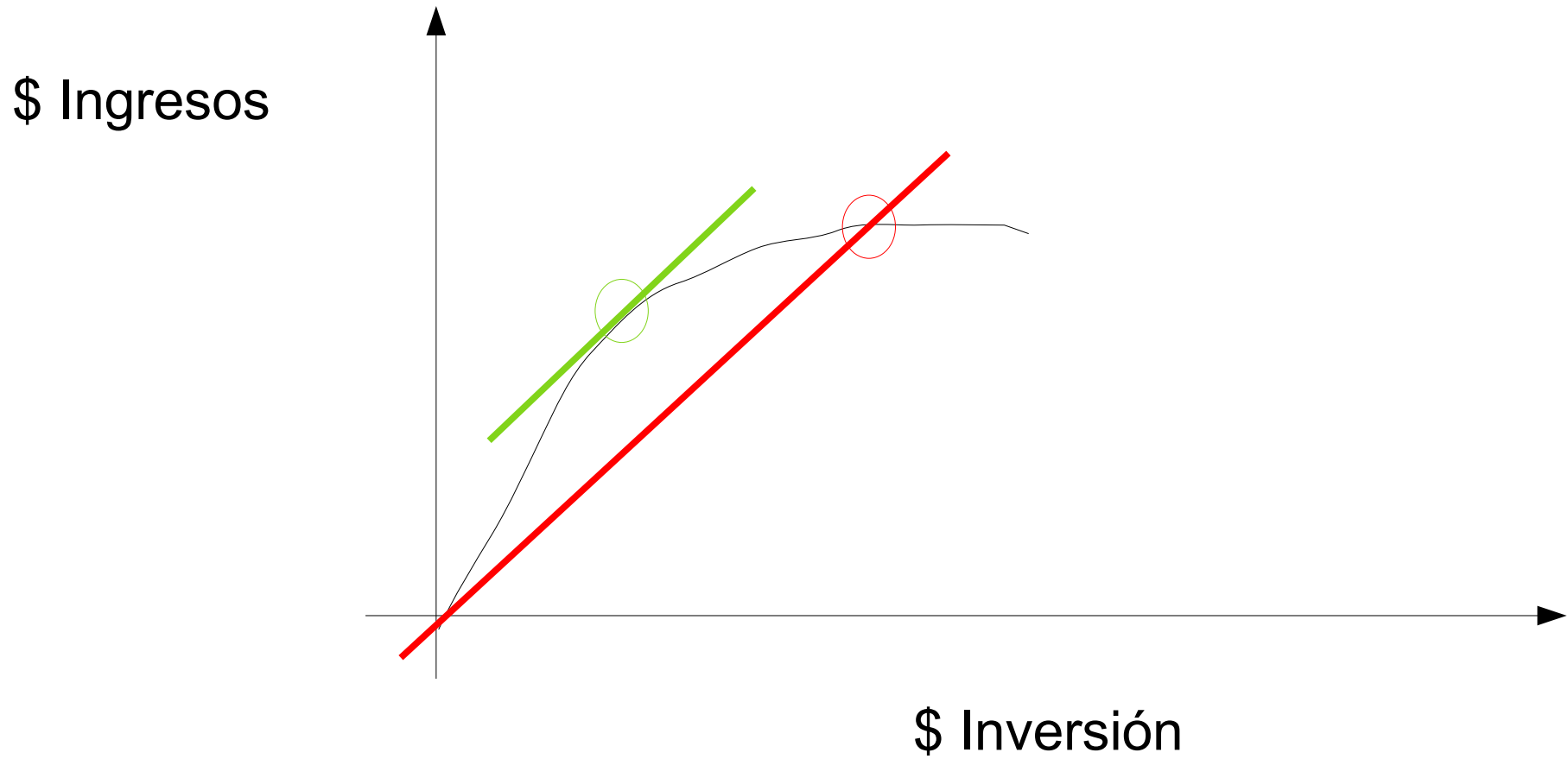


- Costos FIJOS.
- Costos VARIABLES.
- Beneficio MEDIO.
- Beneficio MARGINAL.
- Rendimientos decrecientes.





## ¿Hasta dónde invertir?



# Los Recursos

Costos Variable = CV [USD/MWh]

Costos Fijos = PP [USD/MWh]

	Fijos	Variables	
	USD/MW-h	USD/MWh	
Solar	40	0	
Eólica	45	0	
Moto generador	15	131	Fuel oil*
Turbina aeroderivativa	15	214	Gasoil*
Ciclo combinado	25	157	Gasoil*

\* Fuente: <https://www.adme.com.uy/> (8/3/2022)

Biomasa ( Autodespachada | Spot )

Hidroeléctricas

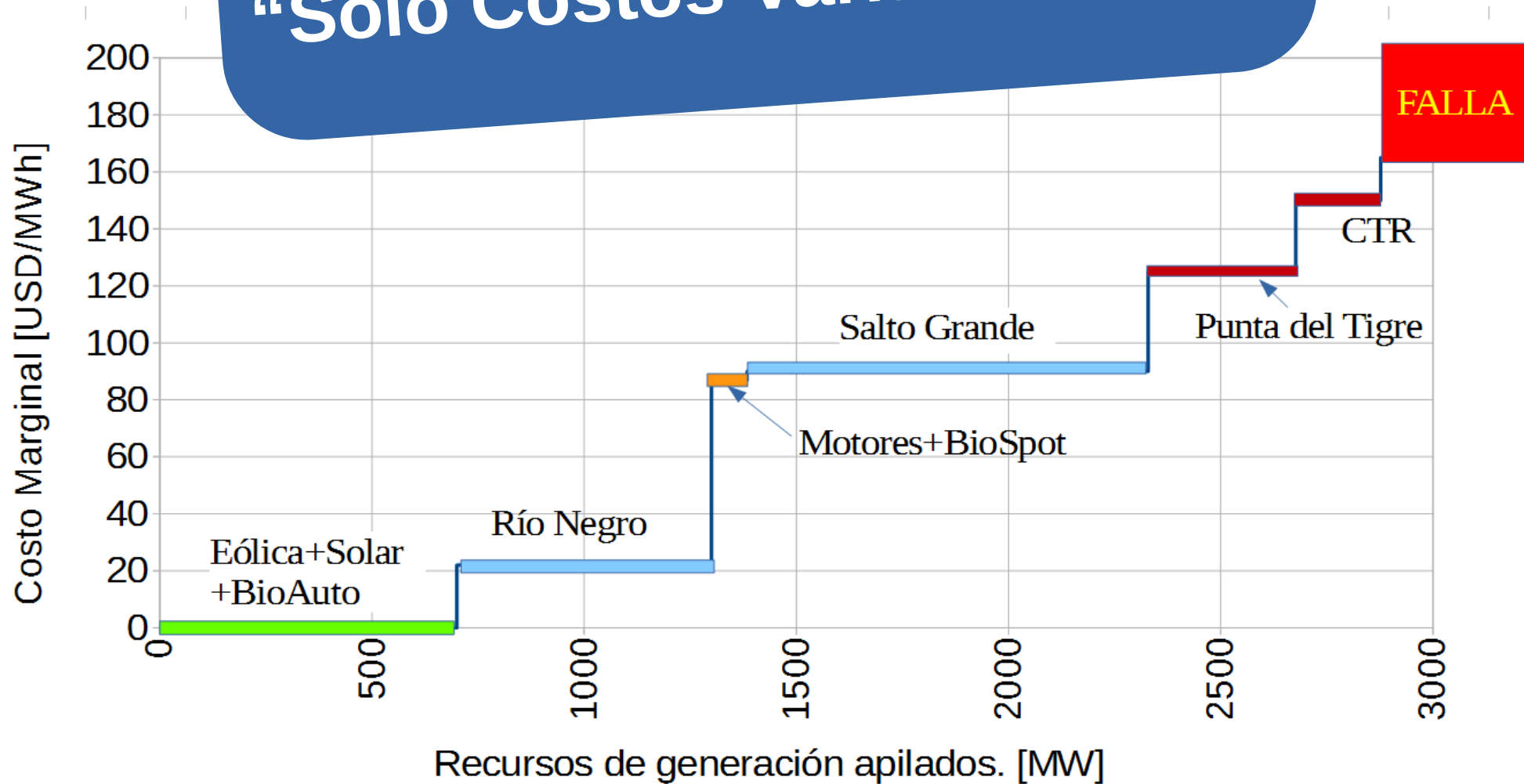
# Ejercicio práctico (OBLIGATORIO).

Enviar por mail <[rchaer@simsee.org](mailto:rchaer@simsee.org)> antes de 9/3/2021 23:59.

Incluir en el mail Nombre Completo y N° de documento y en el asunto poner: "Curso SimSEE práctico 1".

- Hay que alimentar una demanda de 12000 GWh/año
- El sistema hidráulico genera entre 3000 y 10000 GWh/año con distribución uniforme.
- Se puede instalar Eólica con factor de capacidad 0.4. Se considerará que la generación eólica a escala anual no tiene dispersión.
- Además se puede instalar centrales térmicas.
- ¿Cuánto instalaría de eólica y de térmicas en base al cuadro de costos del slide anterior?
- Resolver sin considerar restricciones instantáneas de potencia. Solo en base al balance anual de la energía.

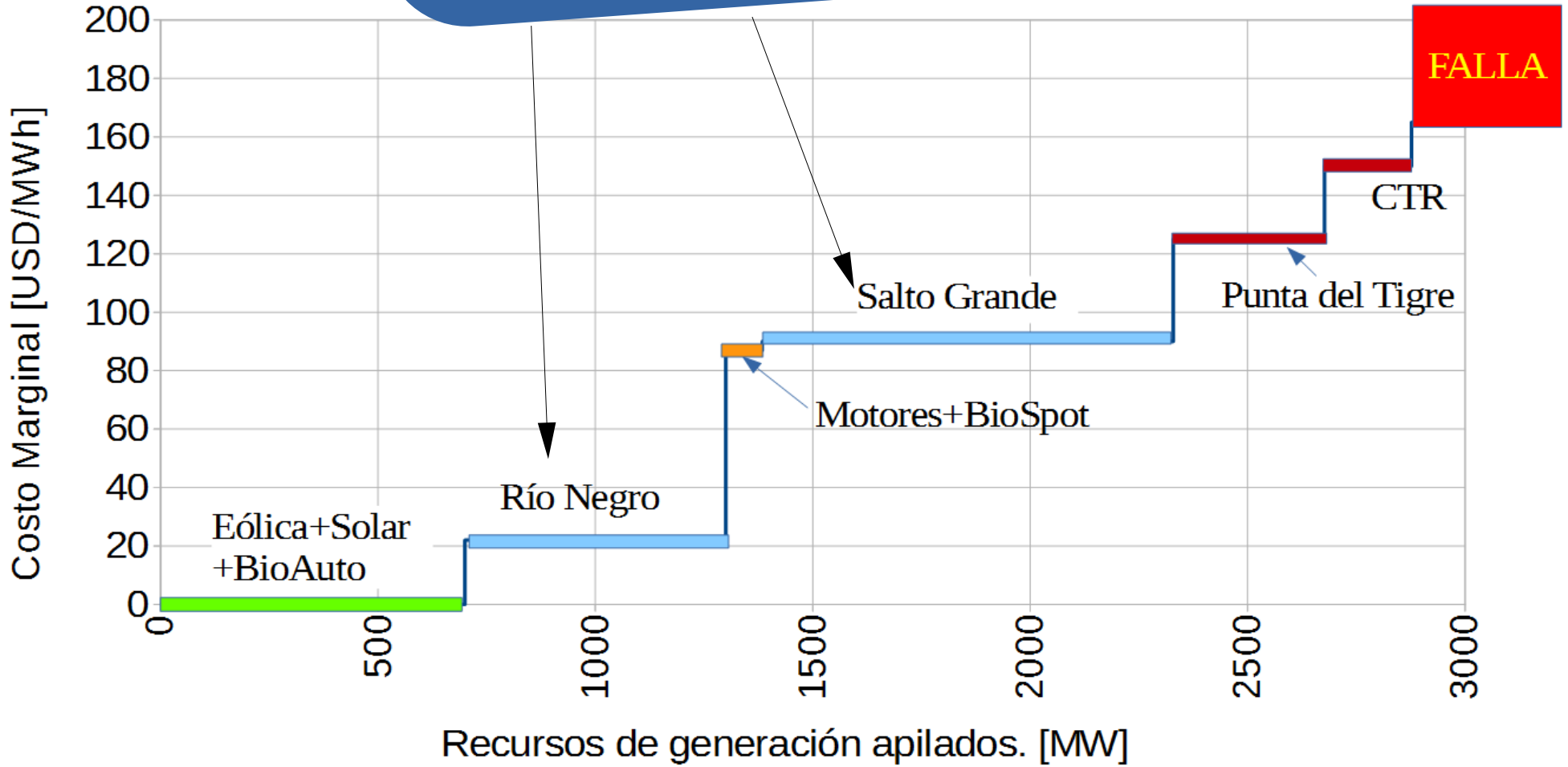
# Despacho Óptimo Primer Principio: “Sólo Costos Variables”



**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.

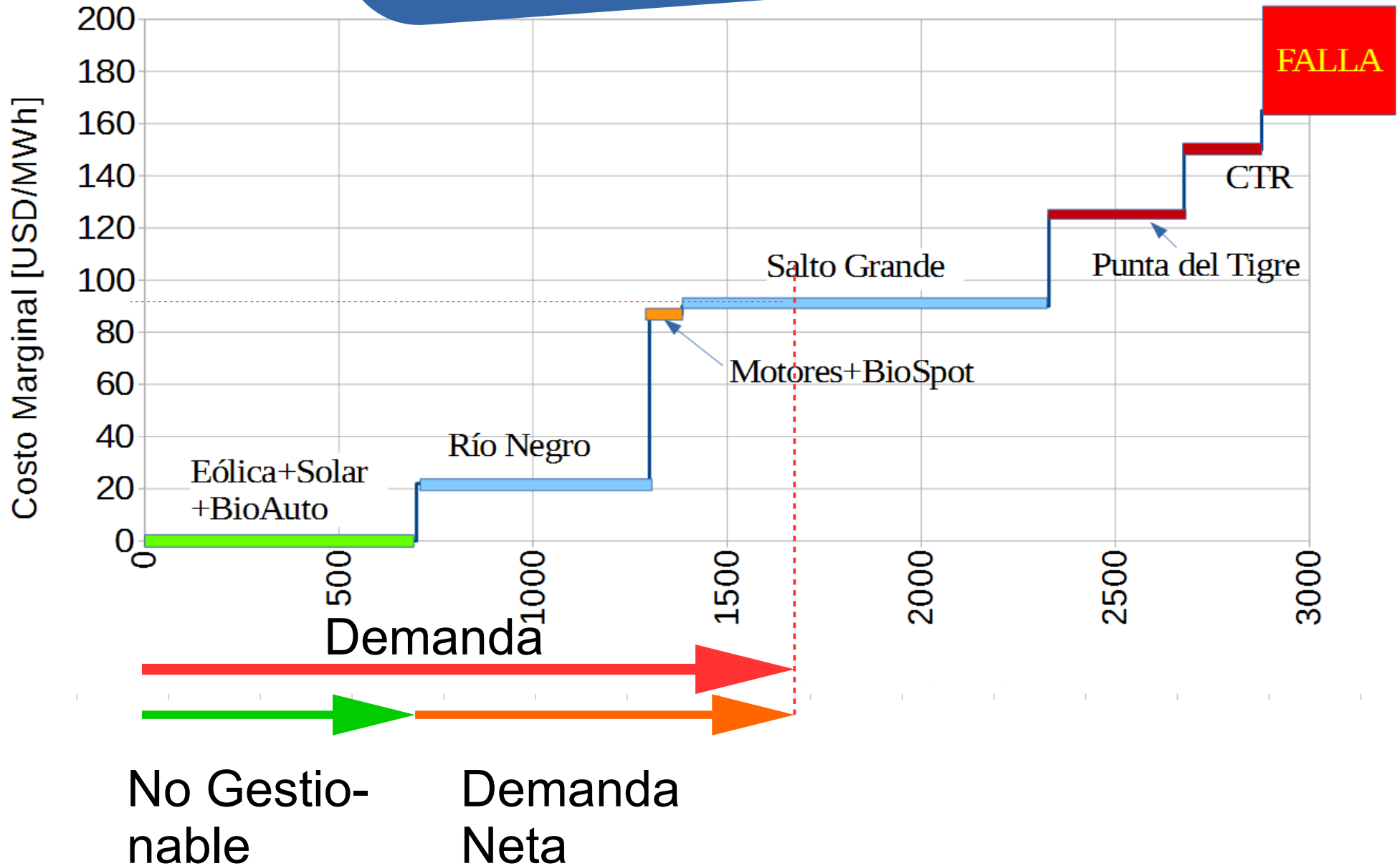
De no haber restricciones para el traslado en el tiempo, el costo marginal sería el mismo en todas las horas del futuro.

INCERTIDUMBRE DEL FUTURO.

MODELOS ESTOCÁSTICOS

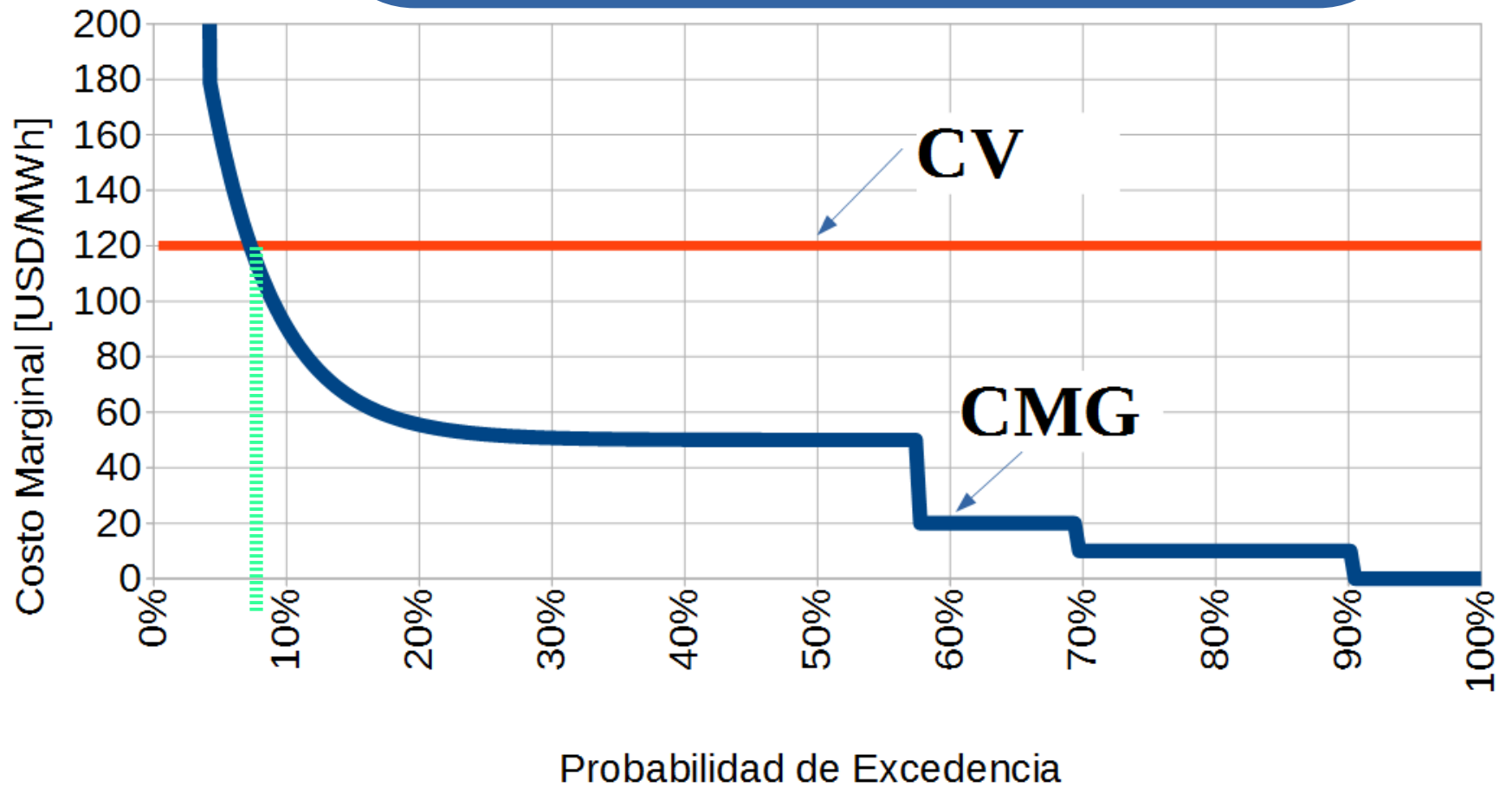
PRONÓSTICOS

# Costo Marginal

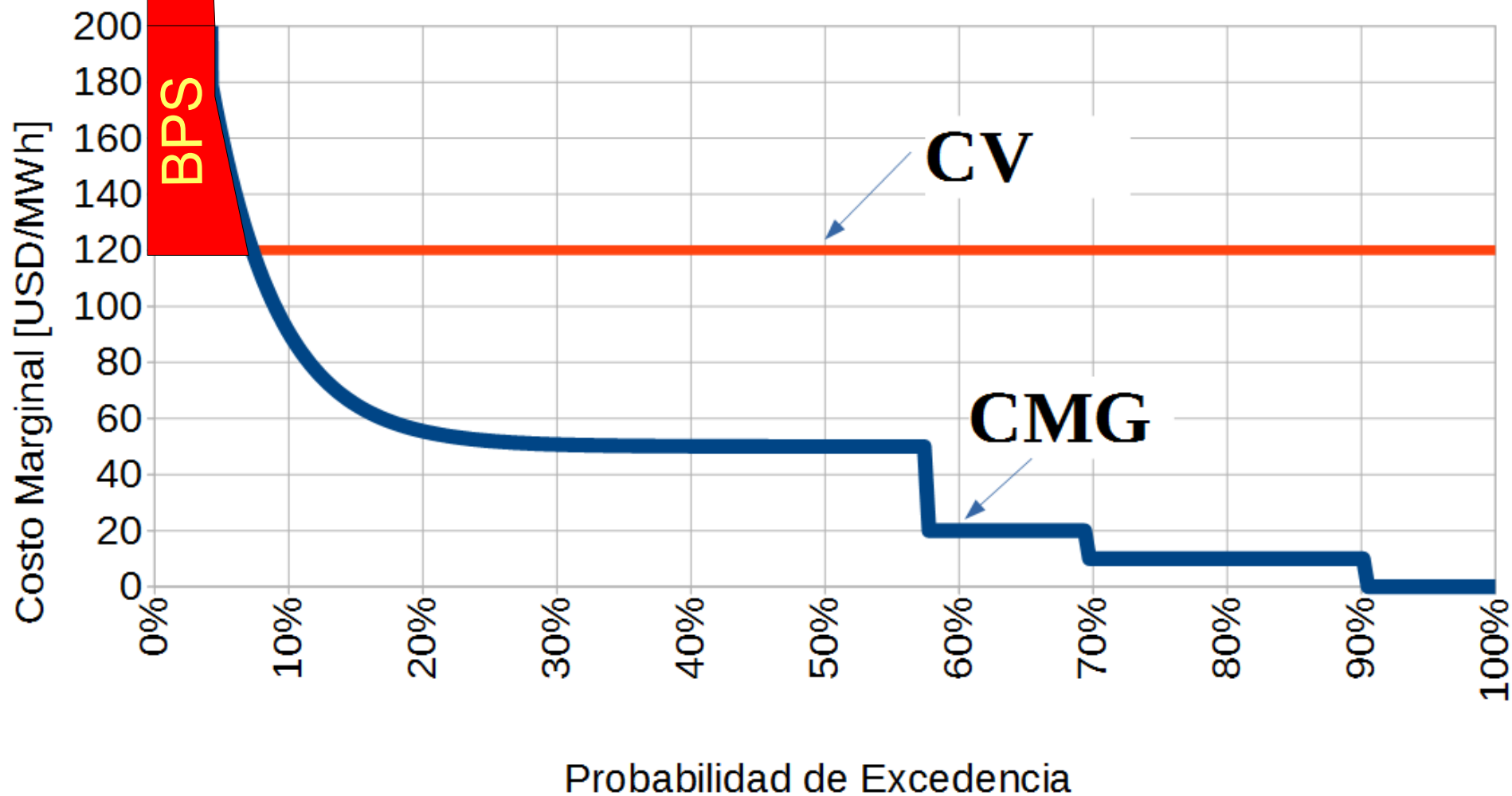




# Costo Marginal, CV y Factor de Despacho.



# Beneficio Por Sustitución.



## Gradiente de Inversión.

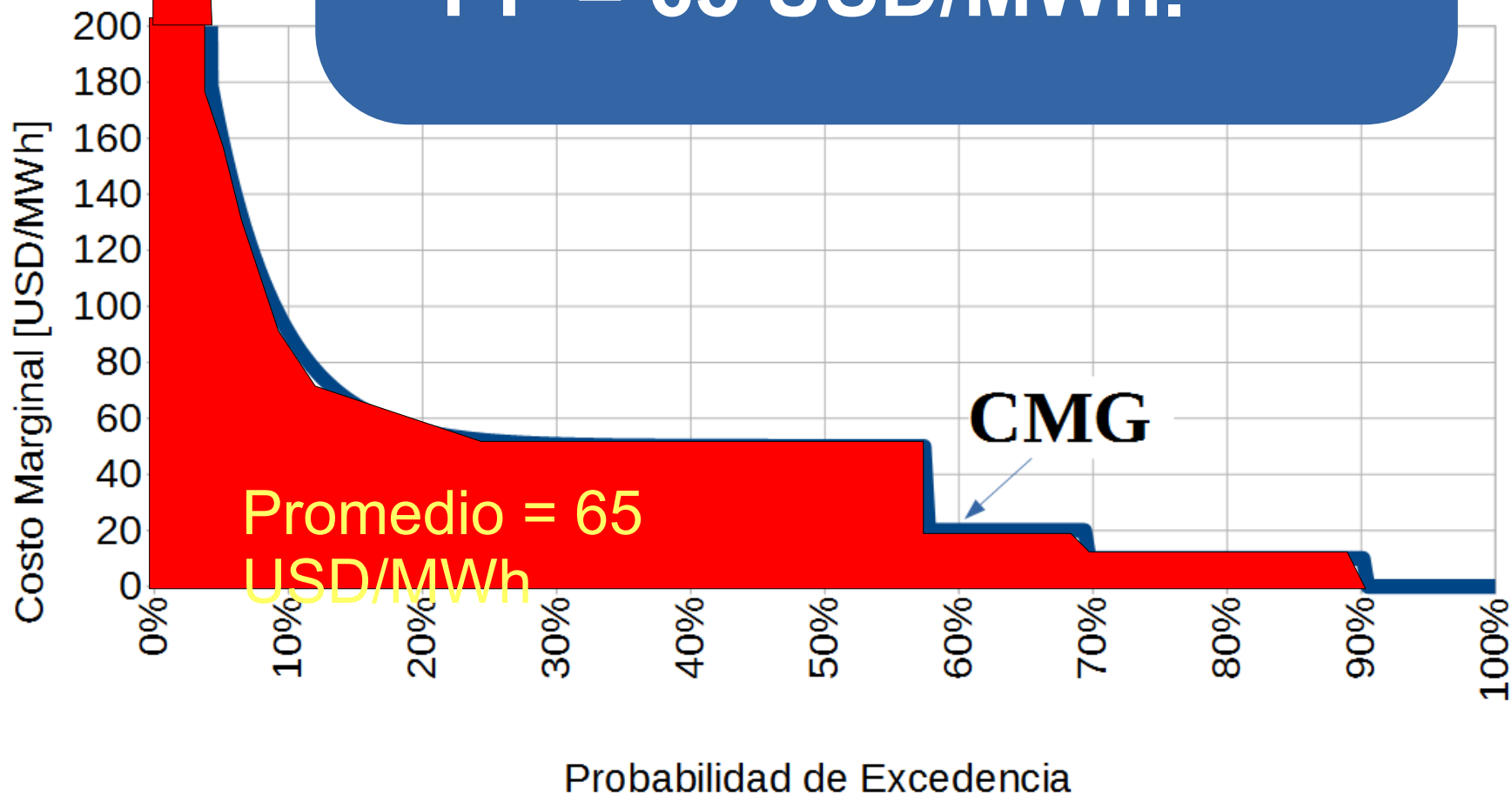
$$GI = ( BPS * fd - PP ) / PP$$

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

**Eólica:**

**CV = 0 USD/MWh**

**PP = 65 USD/MWh.**



# *Operación óptima de un Sistema Dinámico.*



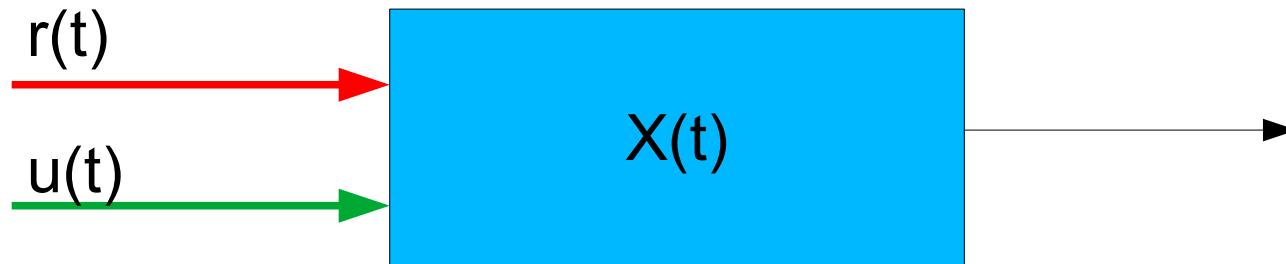
## Estado de un Sistema Dinámico



- $X$  = Vector de información que capta todo lo relevante del pasado para calcular el futuro si se conocen las entradas de aquí en mas.

$$X(t) = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{bmatrix}$$

## ***Entradas de Control y Entradas No Controlables***



- $r(t)$  : Entradas que no podemos controlar. Por ej.: Lluvias.
- $u(t)$  : Entradas sobre las que podemos actuar para guiar el sistema por donde nos convenga (entradas de control). Por ej.: Potencia despachada en cada generador.

## Introducción: Sistema Dinámico

Modelo del Sistema Dinámico:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= f(x, u, r, t) \\ y &= g(x, u, r, t)\end{aligned}$$

- $x$ , es el vector de estado del sistema.
- $y$ , es el vector de variables observadas o salidas del sistema.
- $u$ , es un vector controlable de entradas del sistema.
- $r$ , es un vector no-controlable de entradas del sistema.
- $t$ , es el tiempo.



## Introducción: Modelo del Sistema

$$\dot{x} = f(x, u, r, t)$$

$$y = g(x, u, r, t)$$

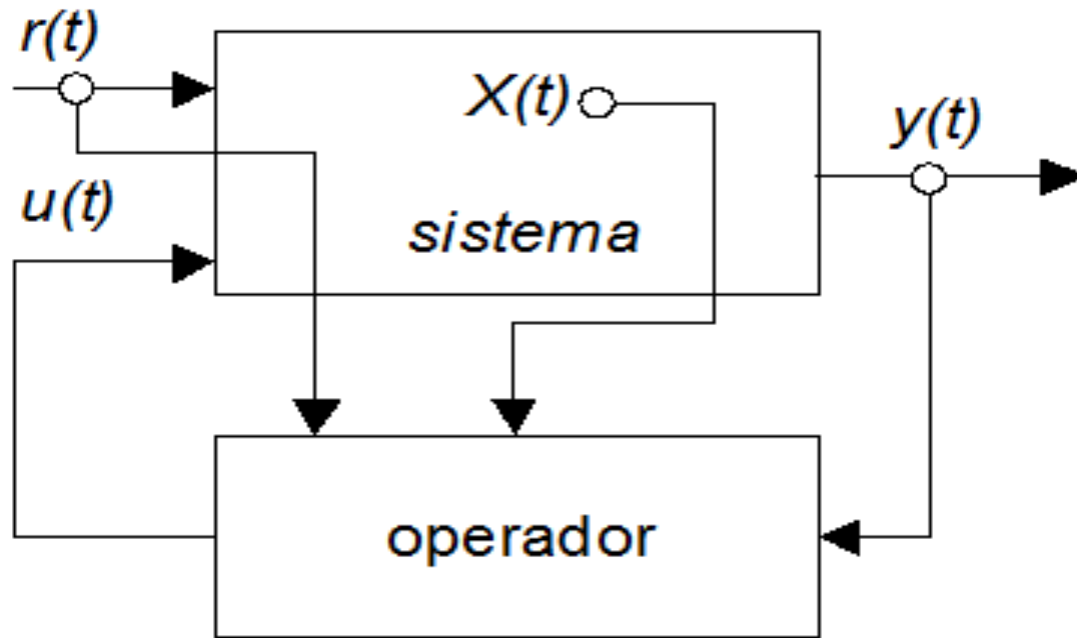
Conocidas estas ecuaciones, si en un instante dado  $t_0$  conocemos el estado  $x(t_0)$  y desde ese instante hasta el tiempo  $t_1$  conocemos el valor que toman las entradas al sistema  $u(t)$  podemos calcular el valor del estado  $x(t_1)$  para el instante  $t_1$ .

Simulación:

$$x(t_1) = x(t_0) + \int_{t=t_0}^{t=t_1} \dot{x} \cdot dt = x(t_0) + \int_{t=t_0}^{t=t_1} f(x, u, t) \cdot dt$$

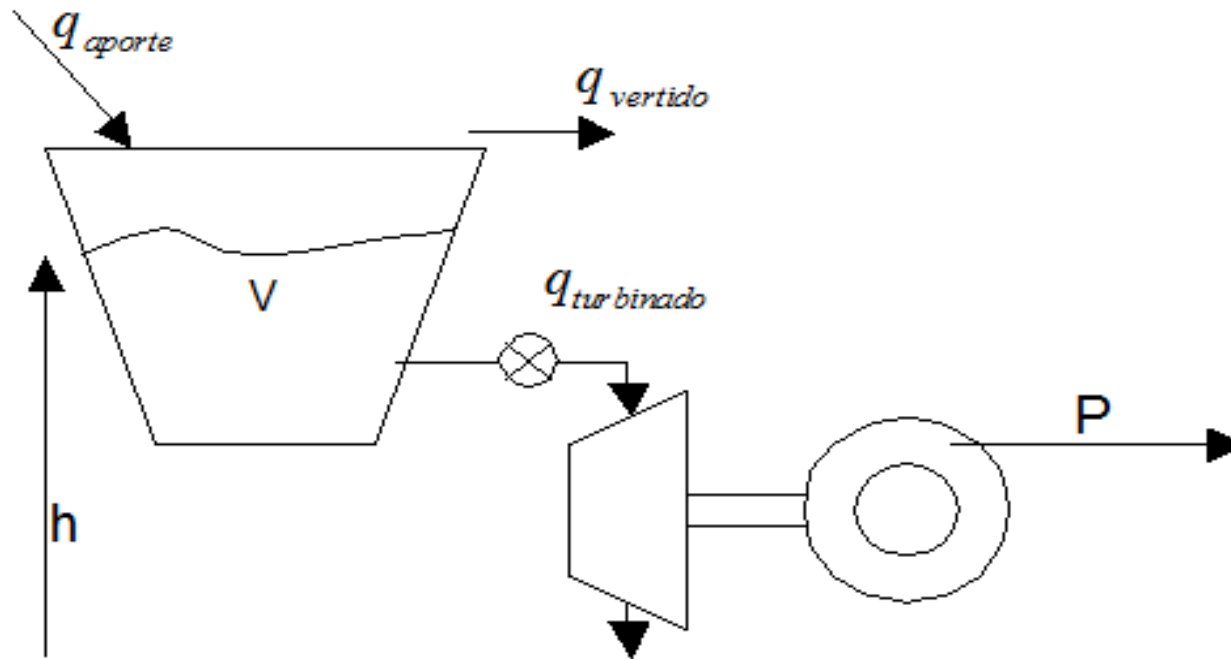
$$y(t_1) = g(x(t_1), u(t_1), t_1)$$

## *El Operador del SIN.*



OPERADOR del sistema como bloque de control que observando las salidas, el estado y las entradas del sistema genera los valores de las variables de control.

## Ejemplo: Sistema con una variable de estado

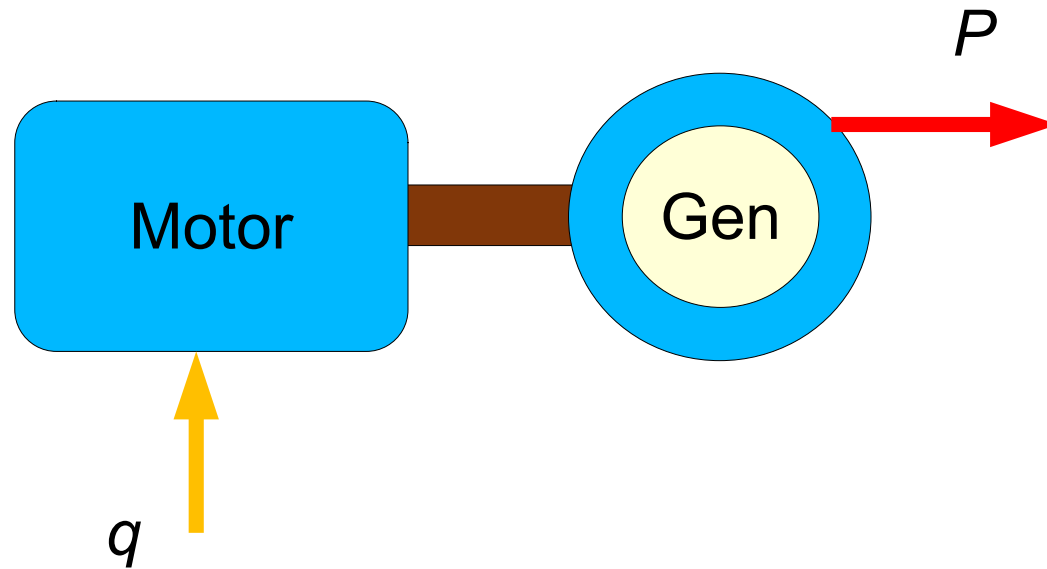


$$\frac{\partial}{\partial t} V = q_{\text{aporte}} - q_{\text{turbinado}} - q_{\text{vertido}}$$

$$\text{sujeto a: } 0 \leq V \leq V_{\text{máx}}$$

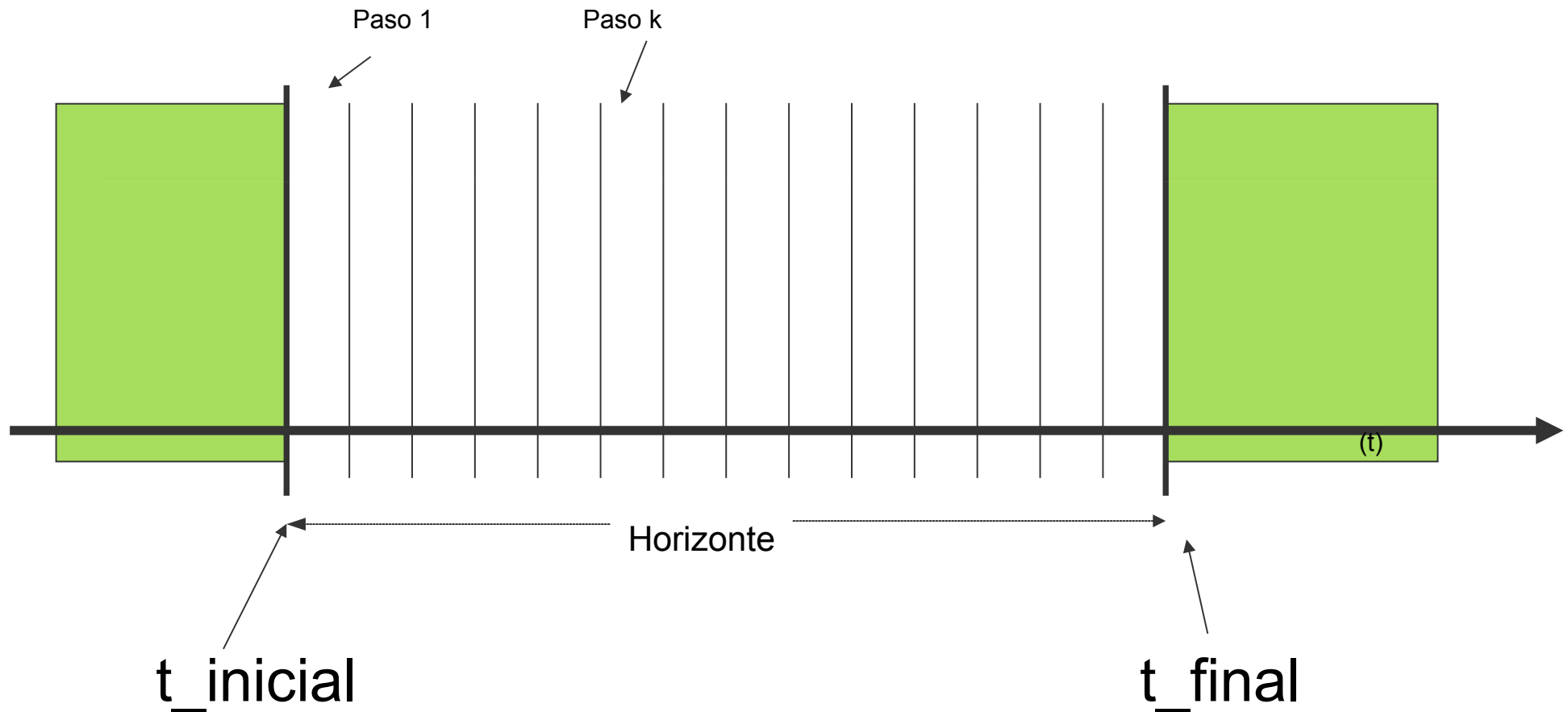
$$P = h \cdot \rho \cdot g \cdot \eta \cdot q_{\text{turbinado}}$$

## Introducción: Sistema sin variable de estado



$$P = \eta \cdot p \cdot i \cdot q$$

# Horizonte de tiempo y Paso de tiempo



- **Horizonte de Tiempo:** ventana de tiempo en la que vamos a realizar el estudio del sistema.
- **Paso de Tiempo:** intervalo seleccionado para realizar la integración de las ecuaciones del Sistema.

## **Generadores**

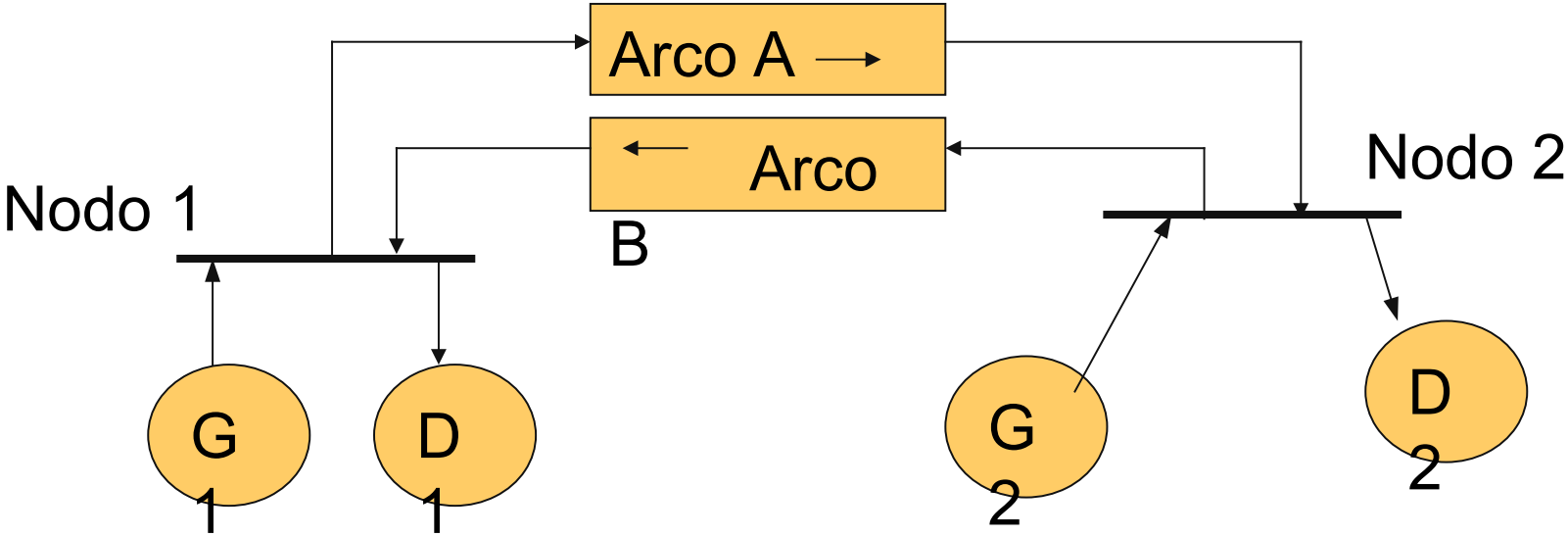
Llamaremos Generadores del sistema al conjunto de actores que producen energía.

- Los Generadores del sistema se suelen clasificar a su vez por el tipo de tecnología en: Térmicos, Hidráulicos, Eólicos, Solares, etc.
- Las centrales térmicas están formadas por uno o más grupos turbina-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.
- Nos bastará con definir barras “virtuales” de conexión donde resumimos los grandes centros de carga y “arcos” entre las barras representando las capacidades de transporte y sus pérdidas entre dichas barras.

# Sistema de transporte





## ***Despacho***

- El DESPACHO del sistema en un instante dado es el estado del sistema en lo que se refiere a cuáles máquinas se encuentran prendidas y apagadas y qué potencia produce cada una de las máquinas junto con la información de las potencias por las interconexiones que existan y la potencia de la demanda.
- Generalmente el objetivo último de un sistema de generación de energía eléctrica es el de suministrar la demanda al menor costo posible. Cuando hablamos de costo de suministro estamos hablando de costo en el largo plazo.

## Costo Futuro

$$CF = \int_{t=ahora}^{\infty} \left( \sum_{centrales} cc(t) + \sum_{deficit} cd(t) + \sum_{importaciones} ci(t) - \sum_{exp ortaciones} ie(t) \right) dt$$

El Costo Futuro (CF) es la integral en el tiempo desde ahora hasta el infinito del costo de combustible en las centrales más el costo de no suministro de la demanda en cada situación en que se produzca un déficit más el costo de la energía que se necesite importar y menos los ingresos que se obtenga por la exportación de energía hacia otros sistemas.

## ***Objetivo del OED = min( CF )***

El encargado del despacho, tendrá como objetivo en todo momento lograr minimizar el valor de la función CF.

- Cuando en el sistema hay “reservorios” la decisión de usar los recursos almacenados en un instante de tiempo afectan los costos futuros dado que no dispondremos del recurso utilizado en el futuro.
- Cuando no hay reservorios, las decisiones tomadas en un tiempo dado, no afectan las posibilidades de tomar decisiones en el futuro. En estas circunstancias, minimizar CF, es simplemente minimizar el integrando en todo instante.

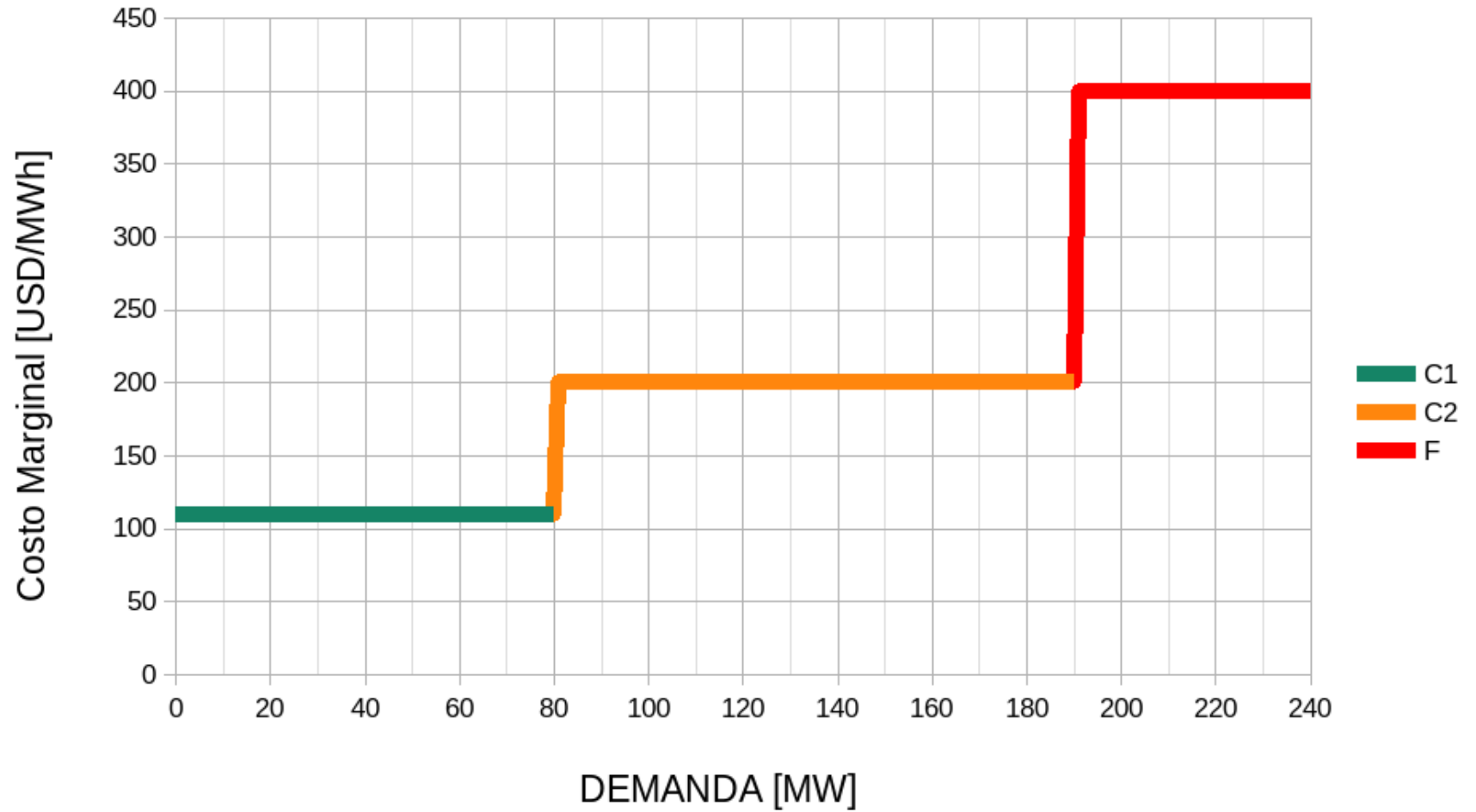
## ***Ejemplo – Despacho sistema Sin-Estado.***

- Dos centrales:
- C1 de 80MW y 110USD/MWh
- C2 de 110MW y 200USD/MWh
- costo de déficit (no suministro de la demanda) es 400USD/MWh.

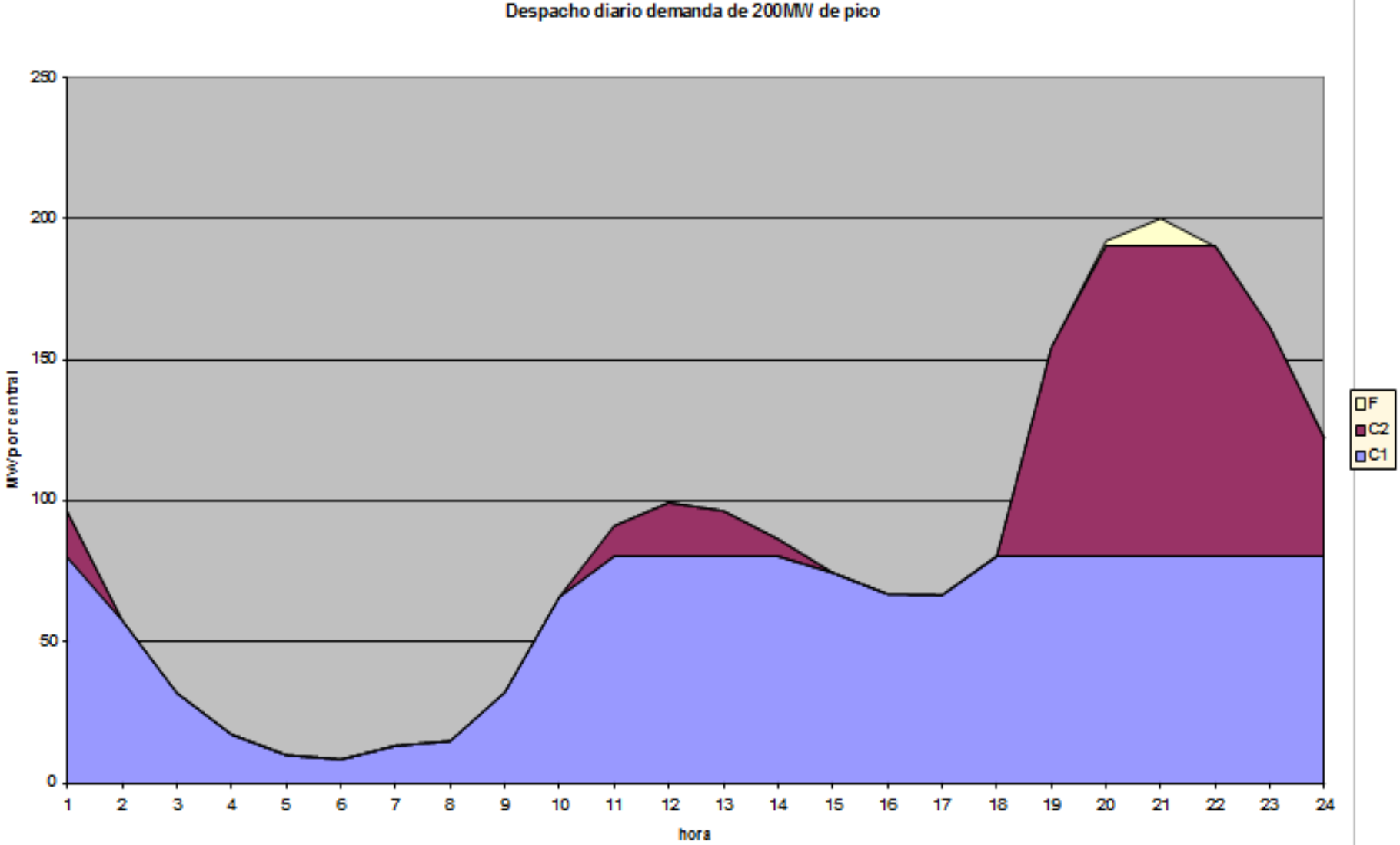
Si llamamos “D” al valor de la demanda en cada instante y “F” al valor de la demanda no satisfecha (falla) tendremos en función del valor de la demanda el siguiente despacho:

Si suponemos una demanda variando el día entre 9.9MW y 200MW la siguiente figura muestra cómo sería el despacho hora a hora.

# Curva de Oferta y Costo Marginal



# Depacho horario.



## ***Bandas Horarias, Postes o Patamares***

En la simulación de un SEE, en cada paso de tiempo hay que resolver con que generadores se suministra la demanda.

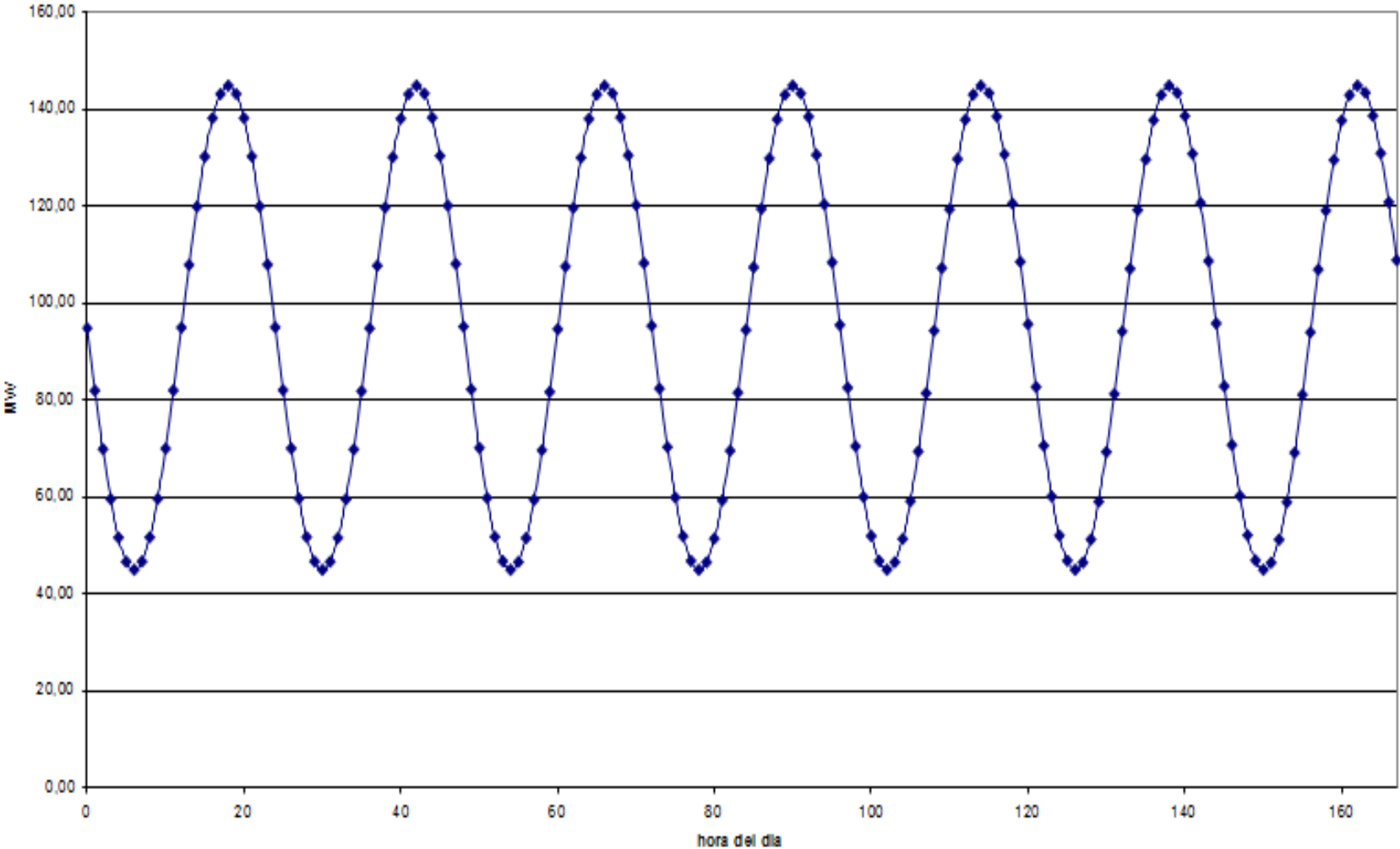
El paso de tiempo se debe hacer lo suficientemente pequeño como para poder suponer que la potencia de cada actor es constante en el paso de tiempo.

Para respetar el Balance Instantáneo de Potencia; se debe cumplir que la potencia media de cada actor (demandas y generadores) sea una buena representación de las potencias durante el paso de tiempo.

Cuanto más chico sea el paso de tiempo, mejor será la representación del sistema y menor serán los errores.

# Postes Horarios

Demanda de una semana con detalle horario





## ***Postes Horarios***

C1 100MW a un costo de 25USD/MWh

C2 50MW a un costo de 80USD/MWh.

Si como paso de tiempo de simulación consideramos una semana, la demanda quedará representada por su potencia media (95MW) y bastará con prender la máquina de 25USD/MWh. Lo mismo sucede si bajamos el paso de tiempo a un día.

Aunque la energía que puede generar C1 es suficiente para cubrir la energía de la demanda en una semana, no le da la potencia y por lo tanto habrá intervalos de tiempo durante la semana en que será necesario prender la máquina más cara.

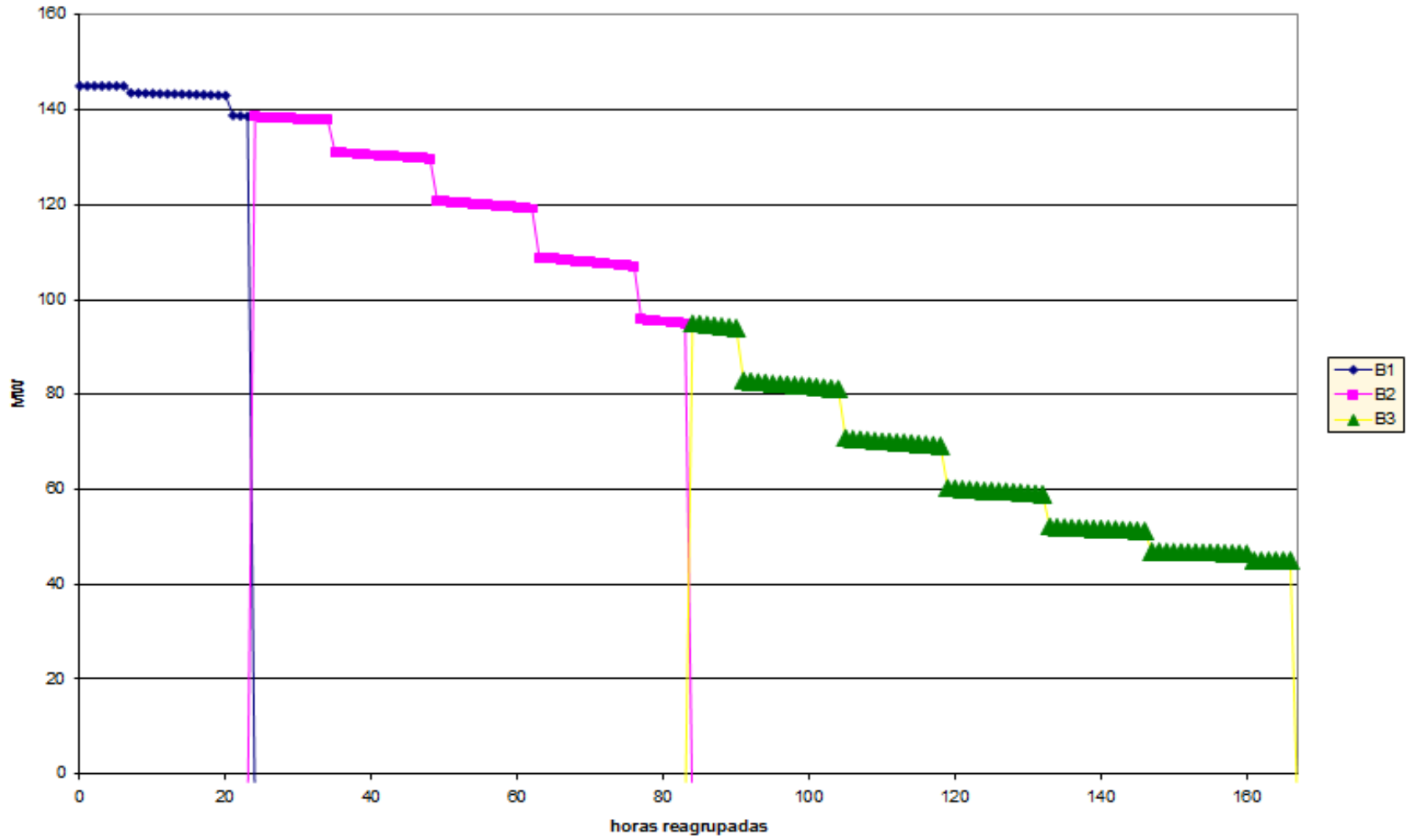
Estamos ante un problema de POTENCIA y no de ENERGIA.

## ***Postes Horarios***

- Se introduce el concepto BANDA HORARIA, POSTE o PATAMAR (son tres formas de llamar a lo mismo).
- La idea es desordenar el tiempo dentro del paso de tiempo.
- Definimos BANDAS HORARIAS, que son diferente duración en las que el nivel de demanda está bien representado.

# Postes Horarios

Monotona de carga de una semana



## ***Resolución por Postes***

- Resolvemos el despacho para cada poste considerando la potencia media de la demanda en el poste, en las ecuaciones de balance de potencia de los nodos.
- Para el cálculo de costos tenemos en cuenta la duración de cada poste.
- Con esta definición en tres bandas dentro de un paso de tiempo, la solución será prender la máquina C1 durante todo el paso de tiempo, y la máquina C2 en los intervalos correspondientes a las bandas 1 y 2.

## ***Resolución por Postes***

- Desventajas:
- Es una aproximación y como tal introduce errores o pérdida de detalle en lo que estamos simulando.
- No es posible tener en cuenta detalles como el costo de arranque parada de las centrales o la frecuencia con que estas admiten ser prendidas, dado que dentro del paso de tiempo se ha perdido la secuencia horaria.
- Se construyeron modelos de centrales que admiten prendido y apagado por POSTE o prendido apagado por PASO DE TIEMPO.

## ***Máquinas de Falla***

Entonces se definen cuatro MAQUINAS DE FALLA (una para cada escalón), con potencias máximas (por POSTE) de forma que sólo puedan suministrar la energía asignada al escalón.

Las ecuaciones de balance de potencia quedan:

$$\sum_{i=1}^{i=NG} P_{i,j} + \sum_{i=1}^{i=NF} F_{i,j} = D_j ; \text{ para cada POSTE } (j)$$

## ***Despacho y restricciones de Nodo***

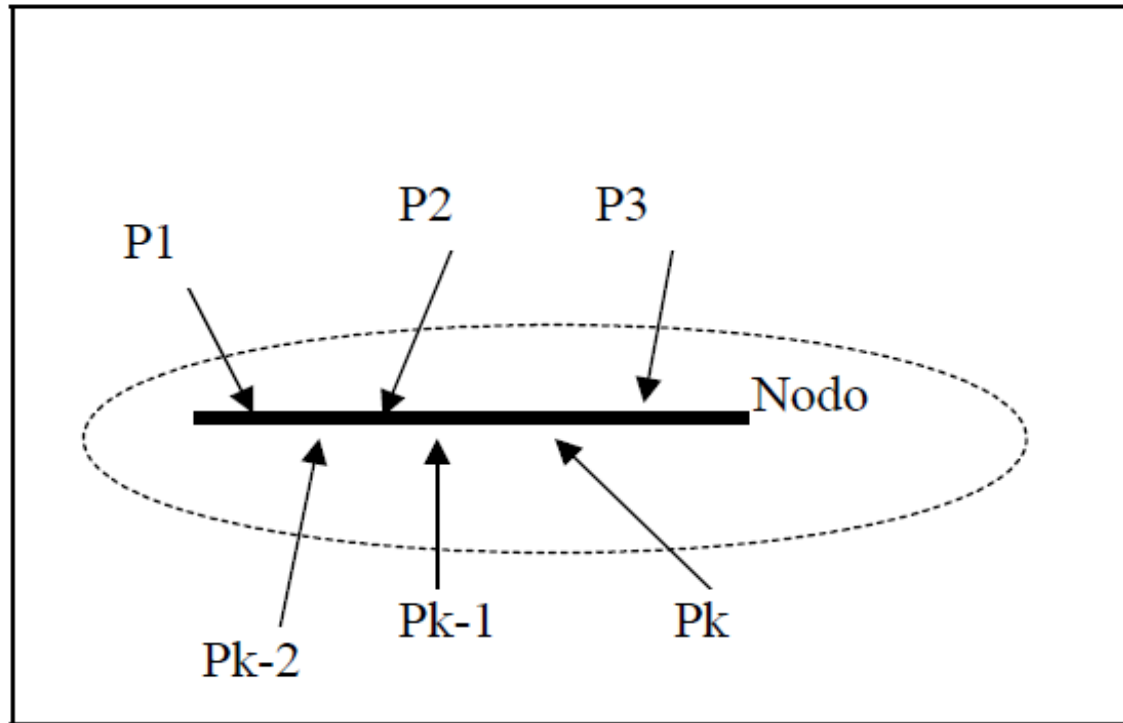
Resolver el DESPACHO significa decidir en cada instante de tiempo qué máquinas serán las que generen y en qué cantidad, así como los flujos por las interconexiones y arcos para cubrir las diferentes demandas. El problema de despacho consiste en suministrar las demandas al menor costo posible.

En la simulación del sistema el despacho se resuelve 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.

# Despacho y restricciones de Nodo

$$\sum_k P_k = 0$$





## ***Despacho y restricciones de Nodo***

Podemos plantear el problema de despacho como:

$$\begin{aligned}
 & \text{minimizar} \left( \sum_k c_k (PG_k) \cdot dt \right) \\
 & \text{sujeto a : } \sum_k PG_k - \sum_h PD_h = 0
 \end{aligned}$$

Dónde  $PG_k$  es la potencia inyectada por el generador  $k$  y  $PD_h$  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.

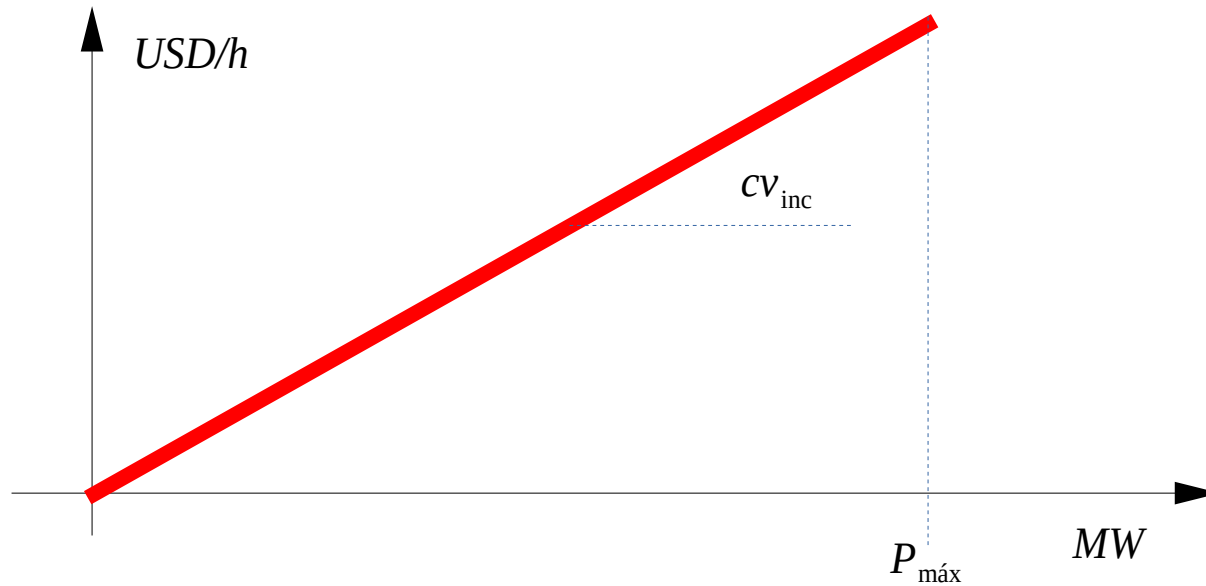
## ***Modelo de Central Térmica***

El rendimiento de una central de generación térmica está determinado por los rendimientos de sus turbinas, del generador eléctrico, del tipo de combustible utilizado, de la temperatura del aire de alimentación, etc.

Resumiendo todos los factores y conocido el costo de combustible, representaremos el costo de generación como una función dependiente de la potencia generada.

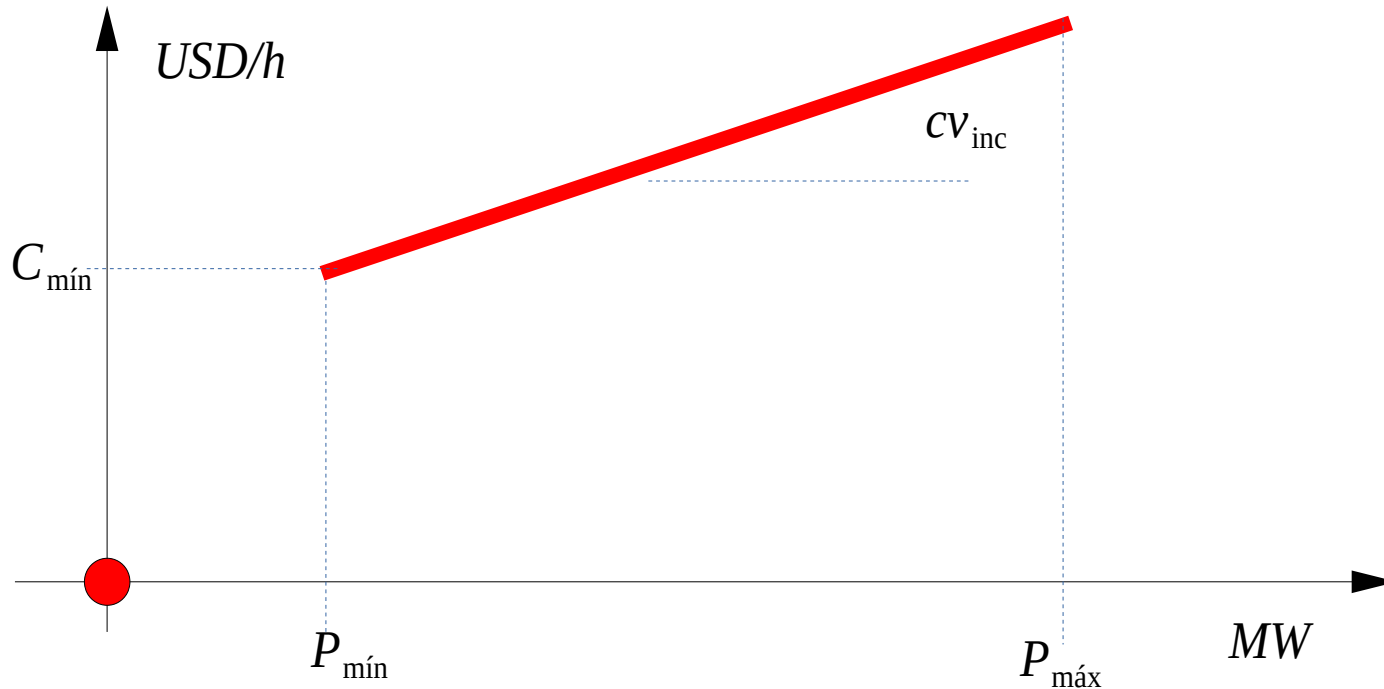
Dónde “cv” es el costo variable de generación y  $P_{min}$  es la potencia mínima a la cual se puede operar la central (o máquina) y es lo que llamamos “mínimo técnico”.

# Modelo de Generador Térmico Básico.



$$C = \sum_{j=1}^{N\text{Postes}} P_j CV_{\text{inc}} \Delta t_j$$

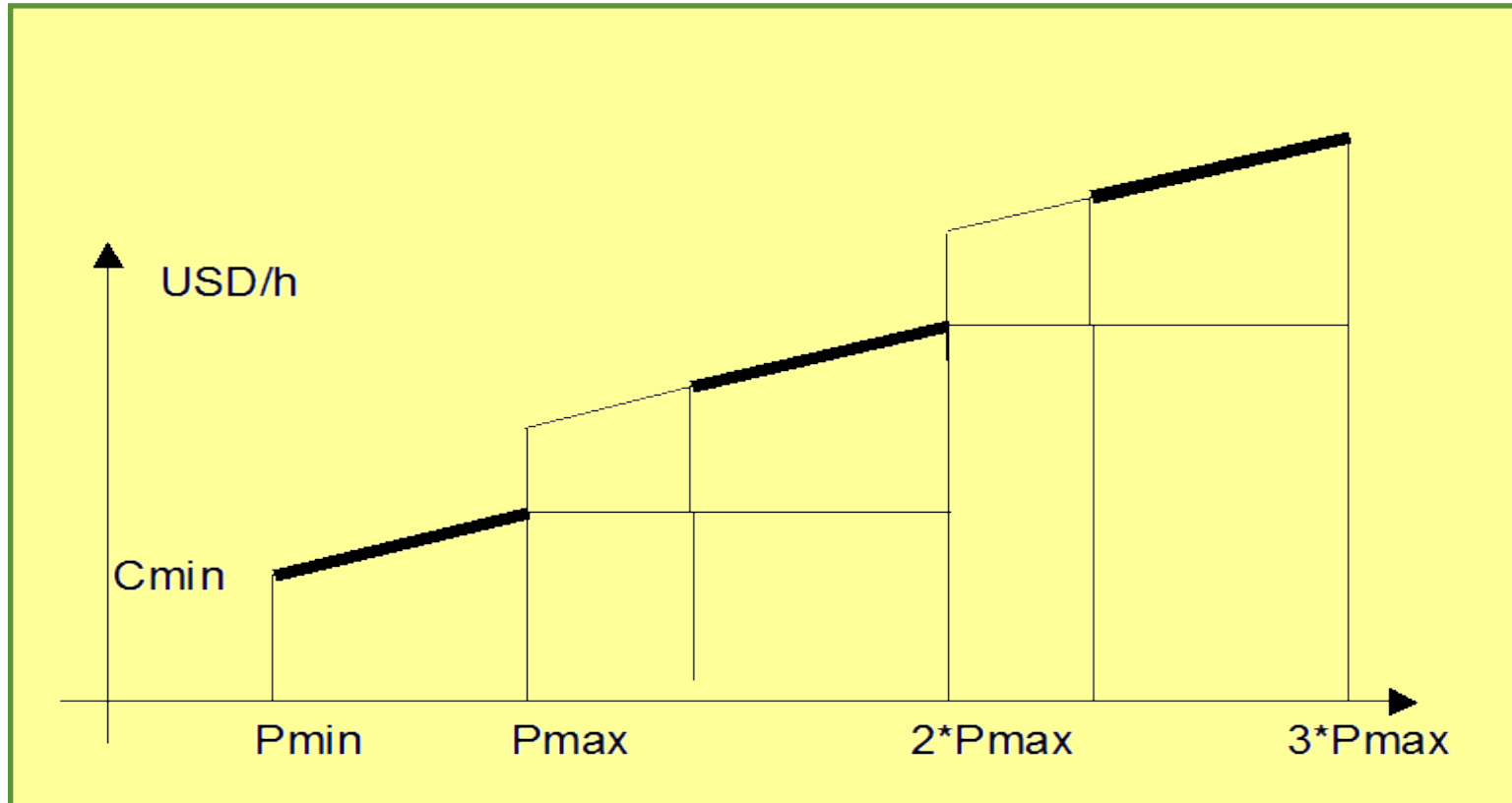
## Modelo de Generador con Mínimo Técnico.



$$C = \sum_{j=1}^{N\text{Postes}} A_j \left( C_{\text{mín}} + (P_j - P_{\text{mín}}) CV_{\text{inc}} \right) \Delta t_j$$

$$A_j = P_j > P_{\text{mín}}$$

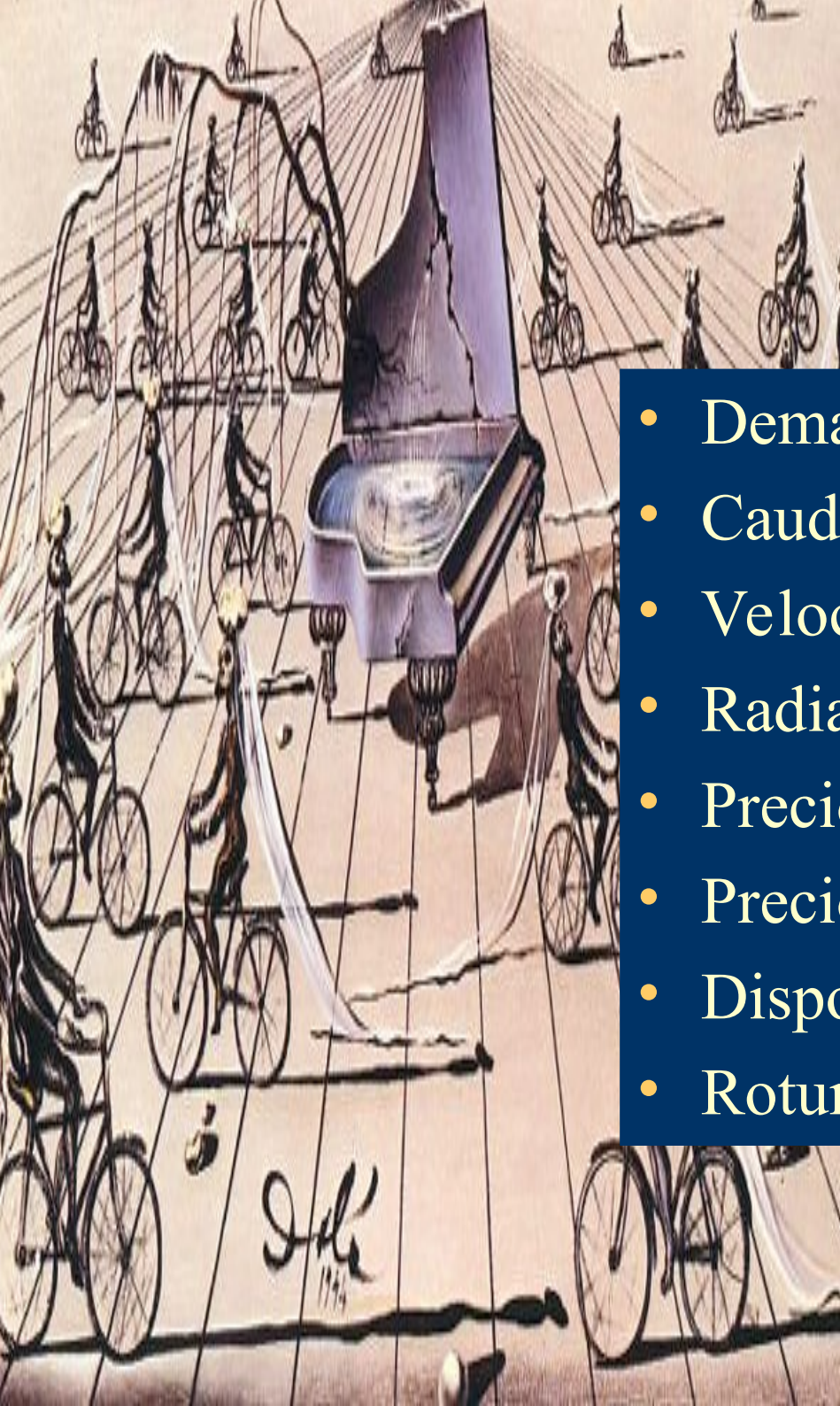
## Central con varias unidades



$$C(P) = \sum_{j=1}^{j=NPostes} \left( C_{\min} \cdot A_j - cv \cdot (P_j - P_{\min} \cdot A_j) \right) \cdot Durpos_j$$

Representación de la  
incertidumbre.



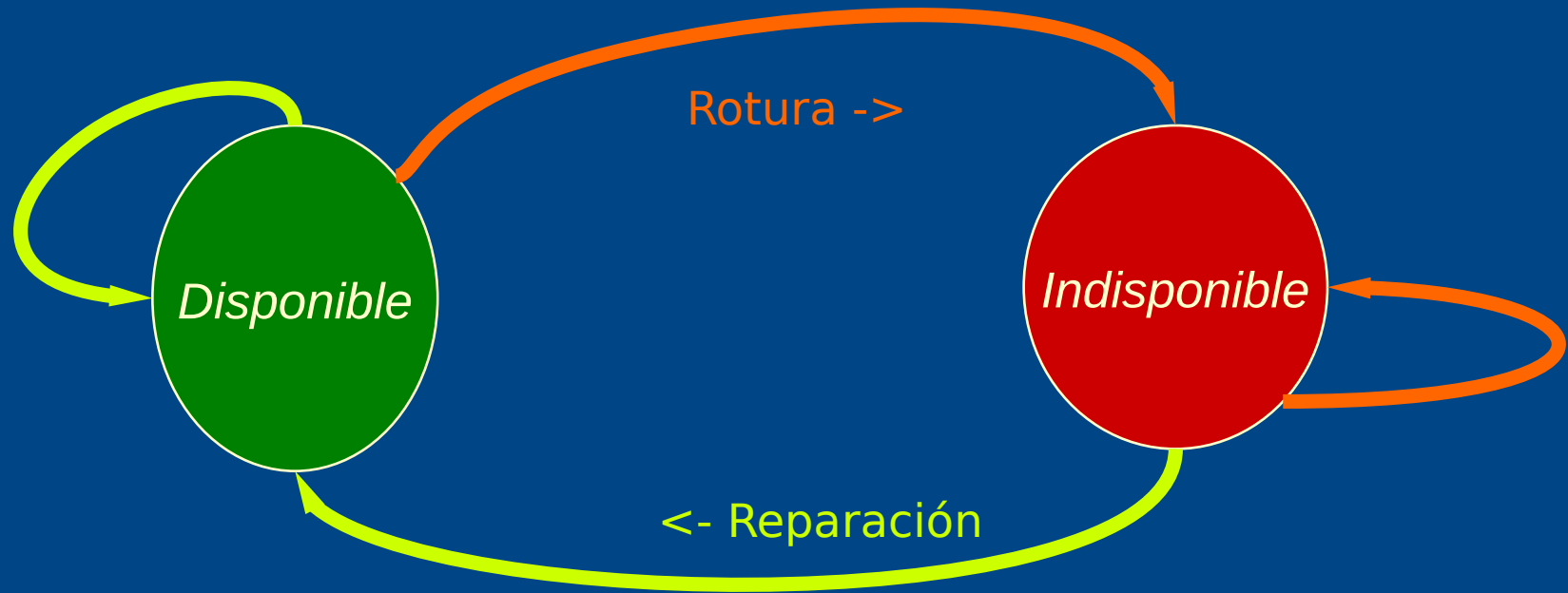


## ***Fuentes de aleatoriedad***

- Demanda eléctrica.
- Caudales de aportes hídricos.
- Velocidad del viento.
- Radiación solar.
- Precio de los mercados regionales.
- Precios de los combustibles.
- Disponibilidad de combustibles.
- Roturas fortuitas.



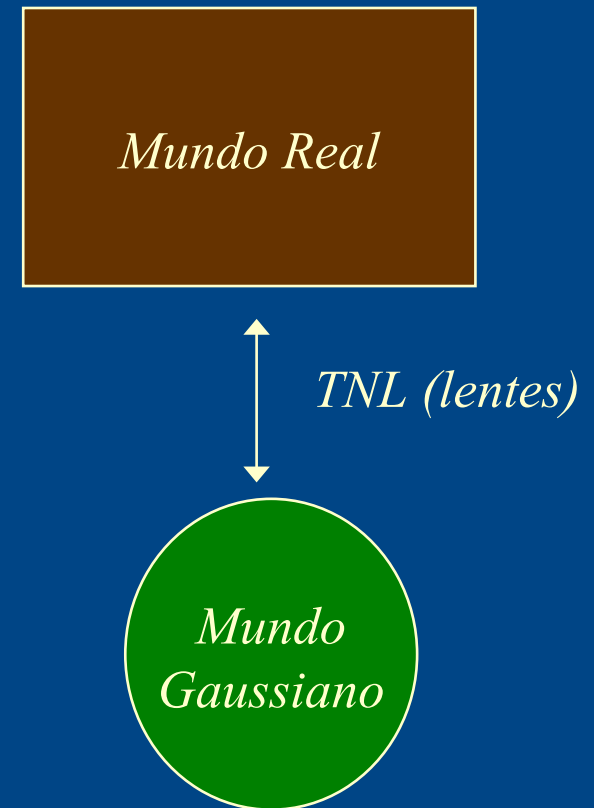
# *Disponibilidad de Generadores, líneas de transmisión, etc.*



- Si no representamos el estado de Disponible/Indisponible, con pasos de tiempo de simulación pequeños, el efecto de la Inercia del proceso de Rotura/Reparación es subestimado.
- Cada unidad representada agrega una variable de estado booleana.

# Modelos CEGH.

- Conservan histogramas de amplitudes.
- Conservan correlaciones.



# Modelos CEGH.

*Espacio Gaussiano:  
Sistema lineal multi-variable  
alimentado por vector de  
Ruido Blanco Gaussiano.*

$$X_{k+1} = \sum_{h=0}^{n_r-1} A_h X_{k-h} + \sum_{h=0}^{m-1} B_h R_{k-h}$$

Permite definir reducciones del estado.

Permite la incorporación de información de Pronósticos.

NLT

NLT

NLT

NLT

NLT

NLT

*Espacio Real*

***Modelos  
CEGH.***

***Asimilación de  
Pronósticos***

# Operador Sin Pronósticos.



# Operador Con Pronósticos.



***FIN!!! ...***

***Muchas gracias por vuestra atención!***

