

Operación óptima de sistemas dinámicos

Ruben Chaer - 14 de agosto de 2024

Montevideo Uruguay

(otro episodio de la serie: "Luchando contra La Maldición de Bellman")

Programa de la presentación

1) Operación óptima = (Programación Dinámica Estocástica)

- Estado de un sistema X , Costo Futuro = $CF(X)$, Recursión de Bellman y Maldición de Bellman

2) Modelado de la incertidumbre = (Procesos Estocásticos)

- Modelos CEGH, histogramas, correlaciones espaciales y temporales

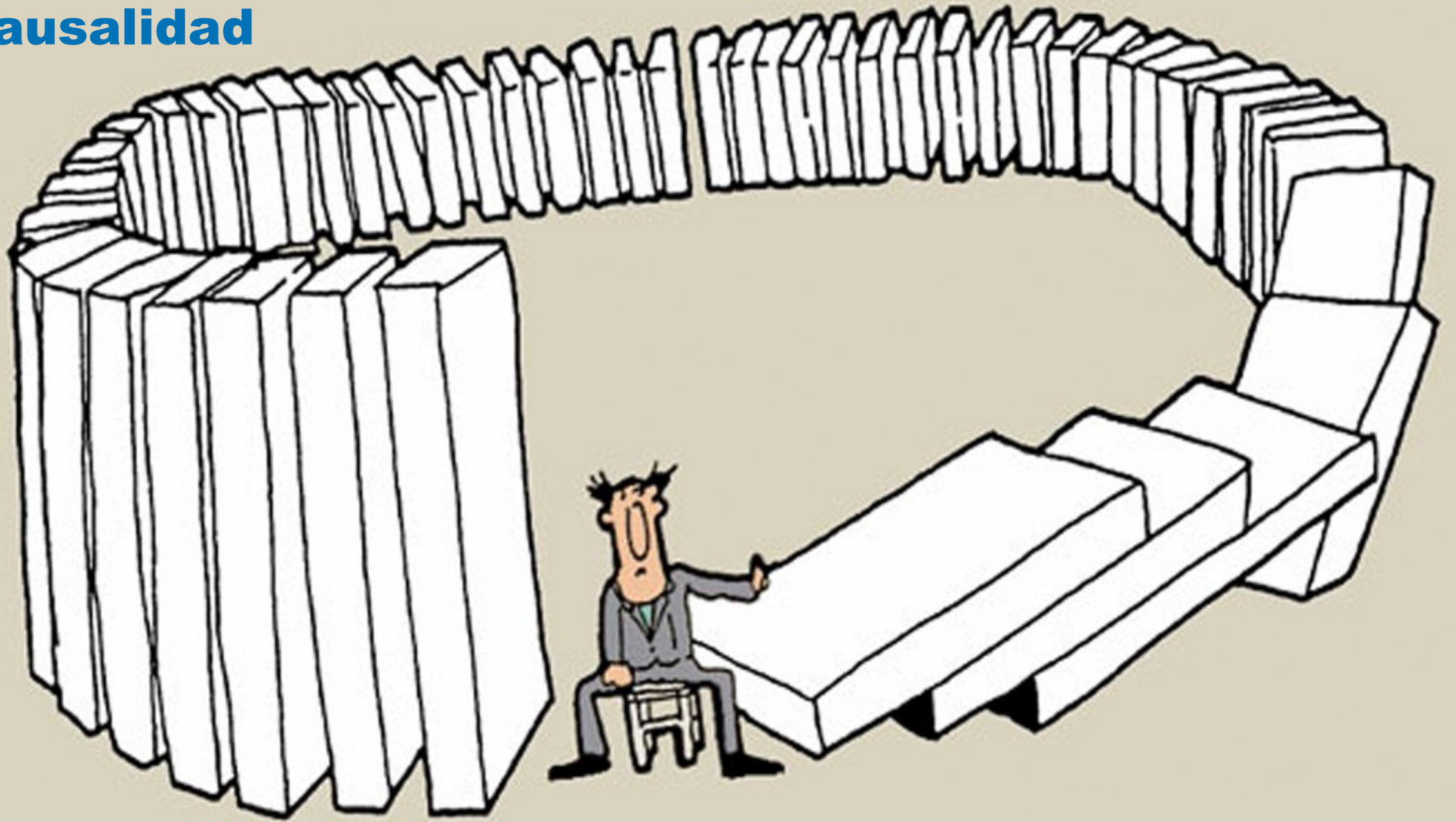
3) Aprendizaje por refuerzo = (REINFORCEMENT LEARNING, MACHINE LEARNING)

- Aproximación de $\text{grad}(CF(X))$ por redes neuronales y bucle de aprendizaje
- Necesidad de reducir la varianza, trayectorias de exploración y modos de evolución del estado.
- Complejidad, capacidad de representación vs. Información y regularizadores

4) Aplicación al caso Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay

- Descripción del modelo y algunos resultados

- **Causalidad**



Las decisiones se vinculan temporalmente.

El uso de los recursos almacenados (agua) hoy reduce los costos operativos del **presente** pero aumenta los costos operativos del **futuro**; y viceversa.

Una Política Óptima reduce el valor esperado del costo de operación futura del sistema.

Una Política Óptima equilibra los efectos de las acciones sobre los costos futuros y presentes.





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

Estado del Sistema

Vector de información que captura lo relevante del pasado del sistema.

Ecuación de evolución del

$$X_{k+1} = f \left(X_k, u_k, r_k, k \right)$$

Estado:

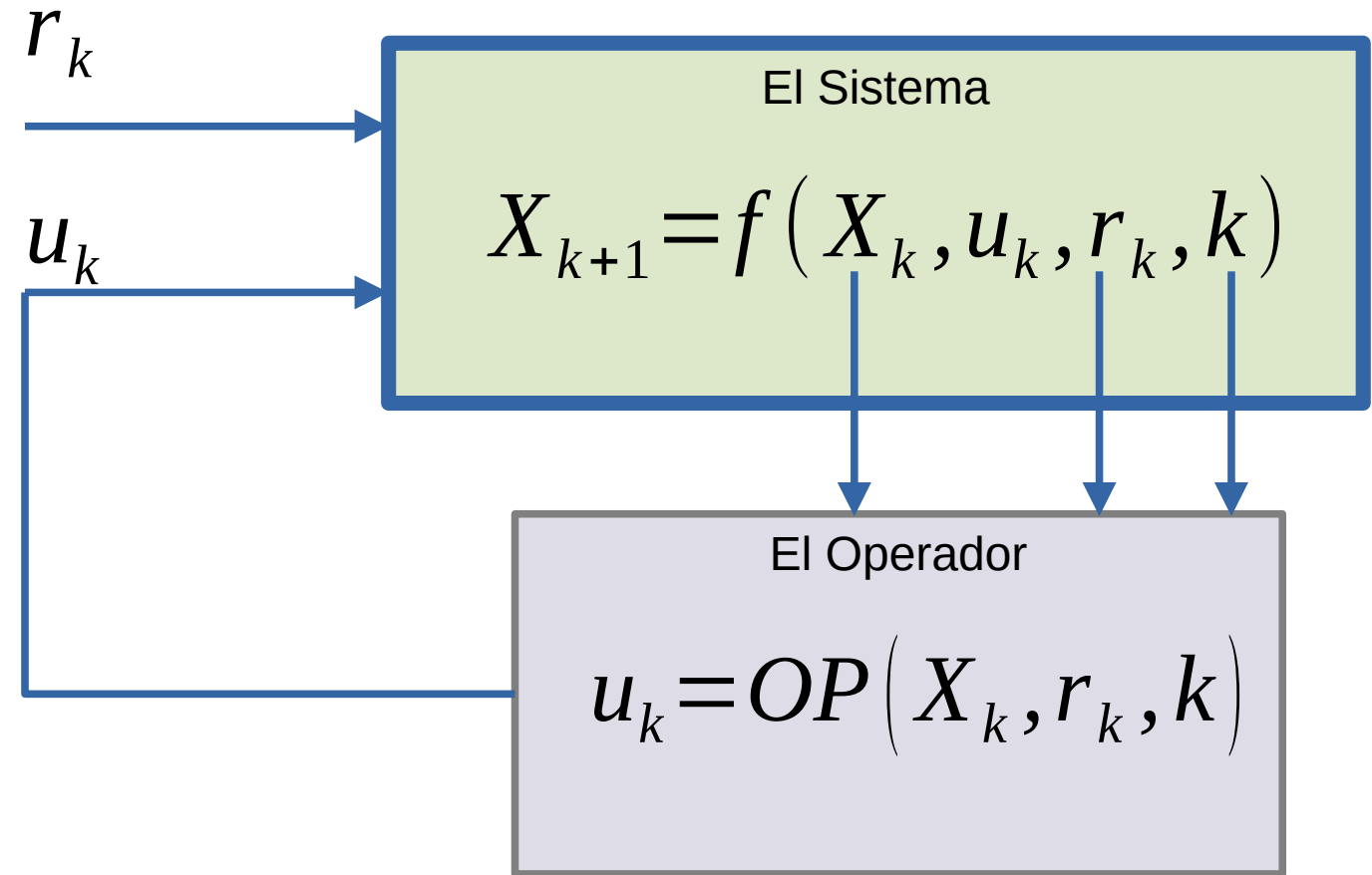
Costo de etapa:

$$ce_k = ce \left(X_k, r_k, u_k, k \right)$$

Costo Futuro:

$$CF(X, k) = \left\langle \sum_{h=k}^{\infty} q^{h-k} ce_h \right\rangle_{R,U}$$

El Operador y la Política de Operación



El Costo

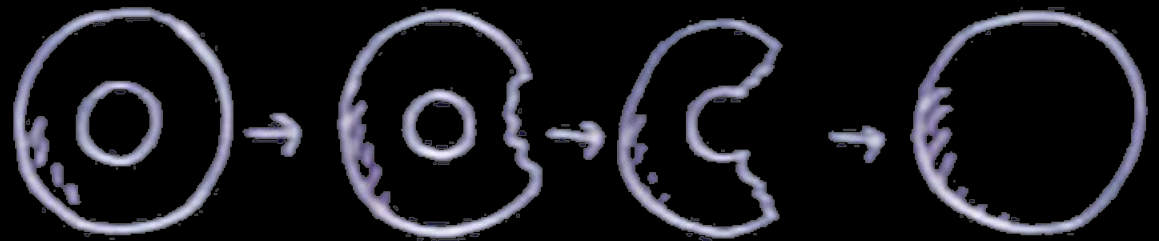
Futuro

$$CF(X, k) = \left\langle \sum_{h=k}^{\infty} q^{h-k} ce_h \right\rangle_{R,U}$$

Política

Óptima

$$\min_{OP} \left\langle CF(X, k) \right\rangle_R$$



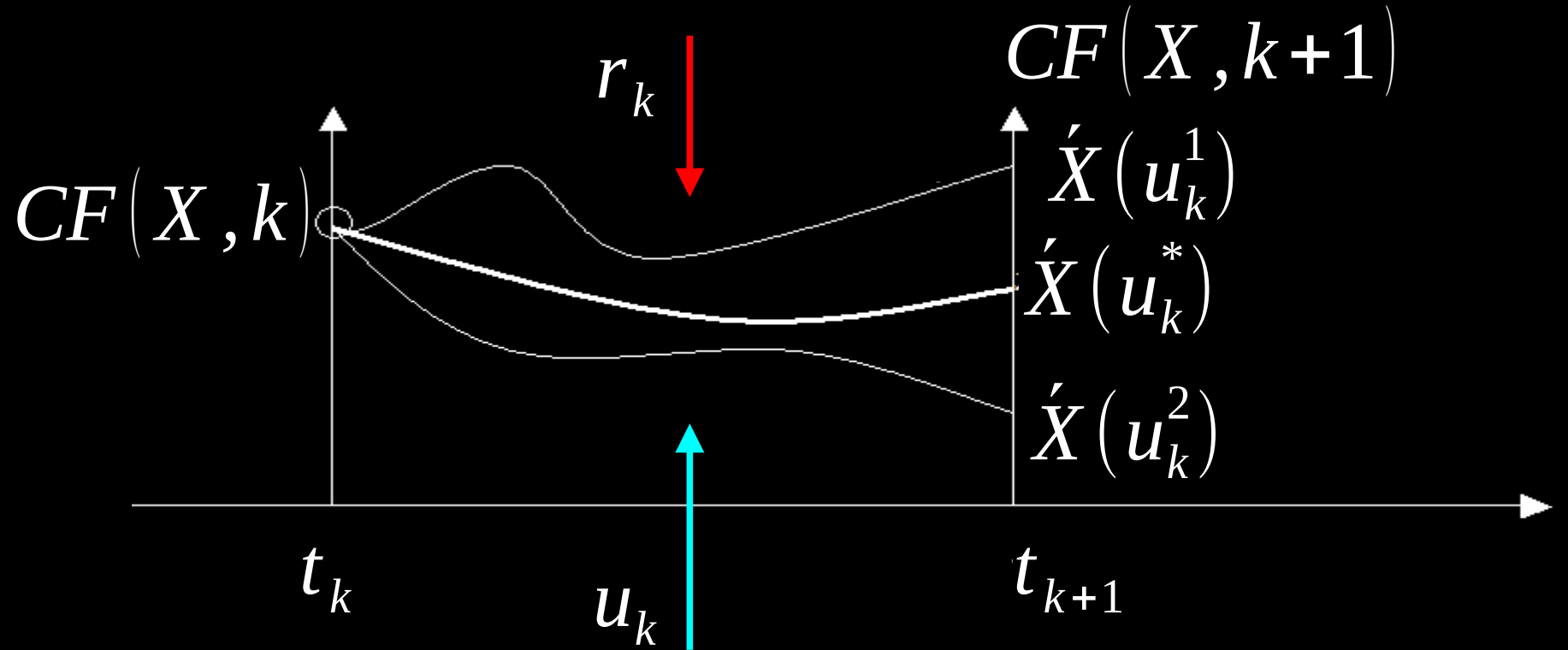


- **Dynamic Programming 1957.**

Recursión de Bellman



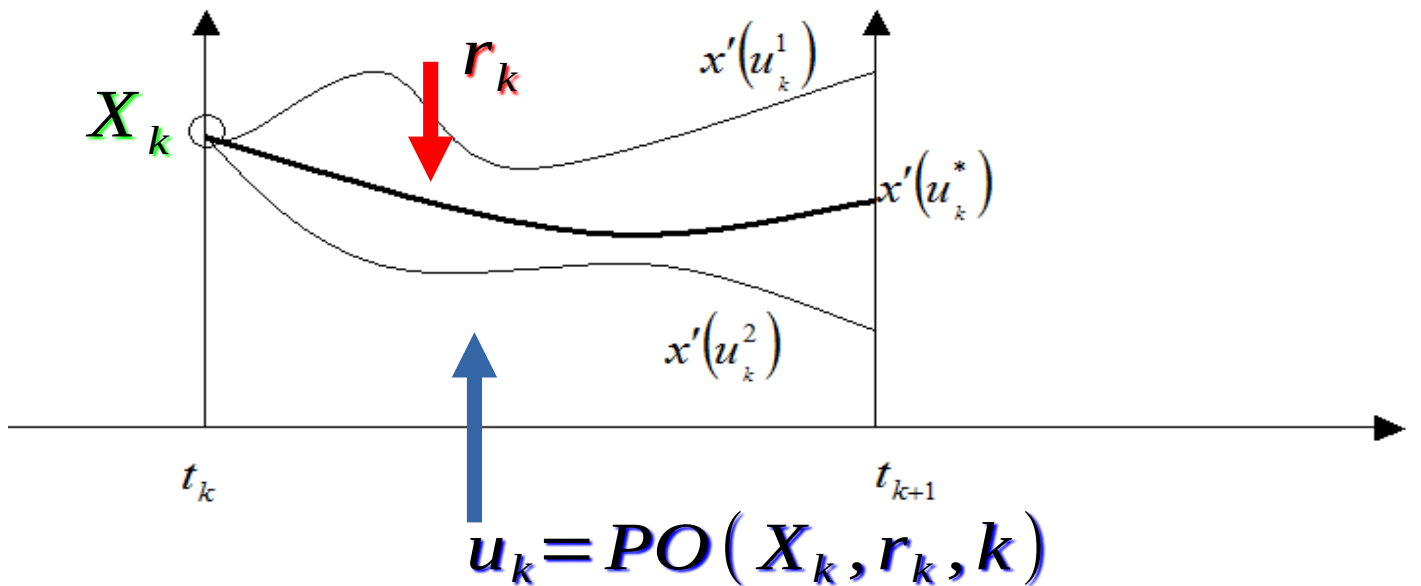
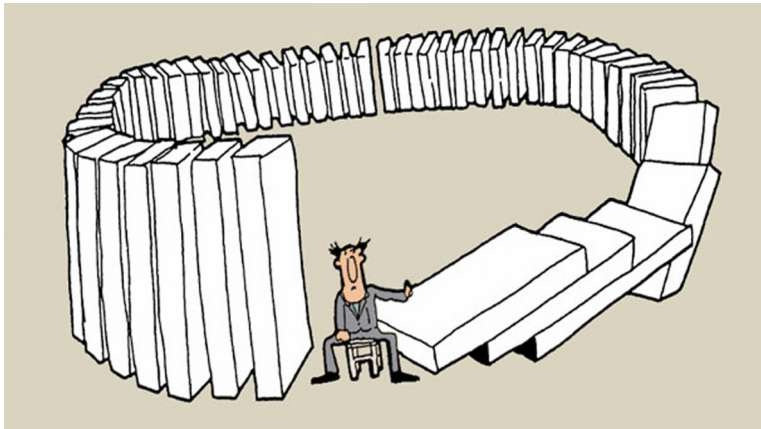
Richard Ernest Bellman (1920–1984)



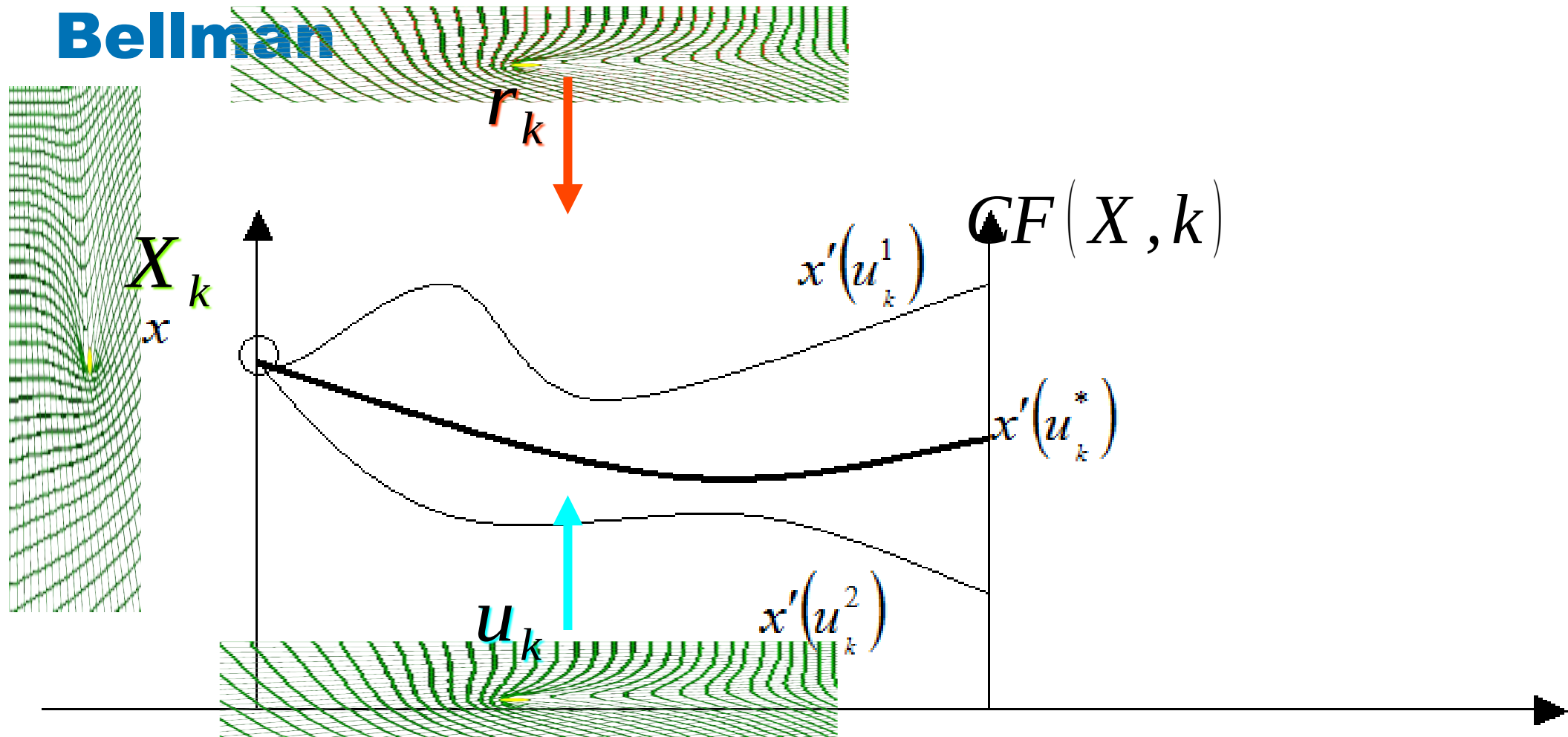
$$CF(X, k) = \left\langle \min_{u_k} \left\{ ce(X, u_k, r_k, k) + q CF(X_{k+1}) \right\} \right\rangle_{\{r_k, r_{k+1}, \dots\}}$$

PO_Optima = Minimizar el valor esperado del Costo Futuro

$$u_k : \min_{u_k} \left\{ ce(X, u_k, r_k, k) + q CF(X_{k+1}) \right\}$$



La Maldición de la Dimensionalidad de Bellman



$$Dim(u) \times N_{X_1}^{t_k} \times N_{X_2} \dots \times N_{X_{Dim(X)}} \times N_{r_1}^{t_{k+1}} \times N_{r_2} \dots \times N_{r_{Dim(r)}} \times N_t$$

Agregaciones Clásicas

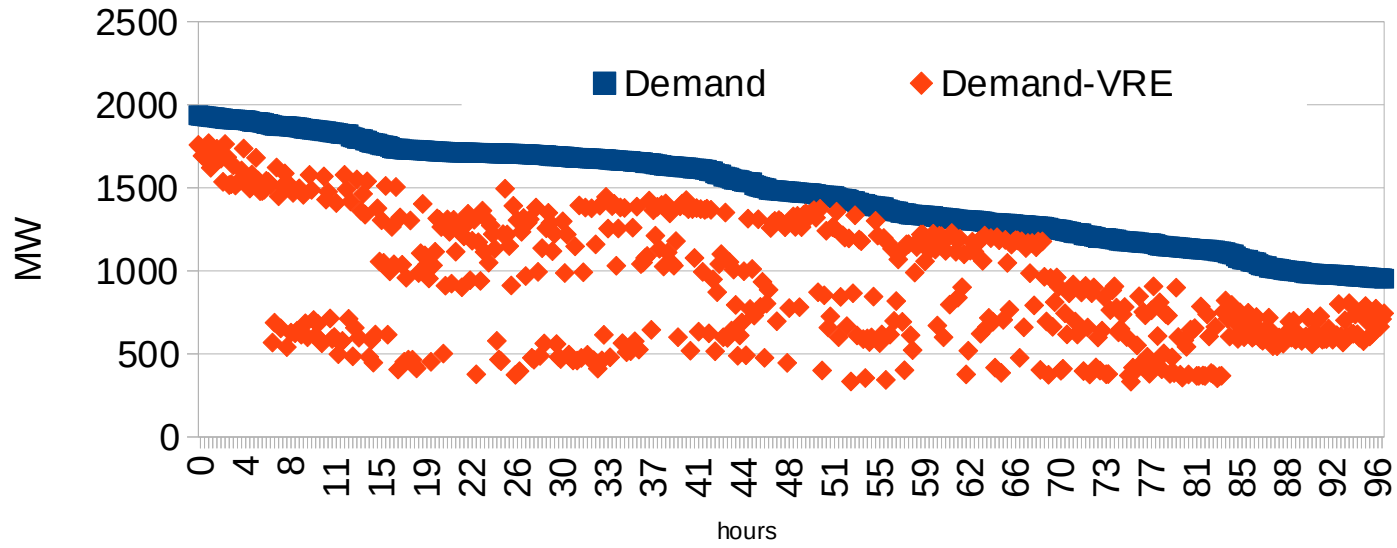
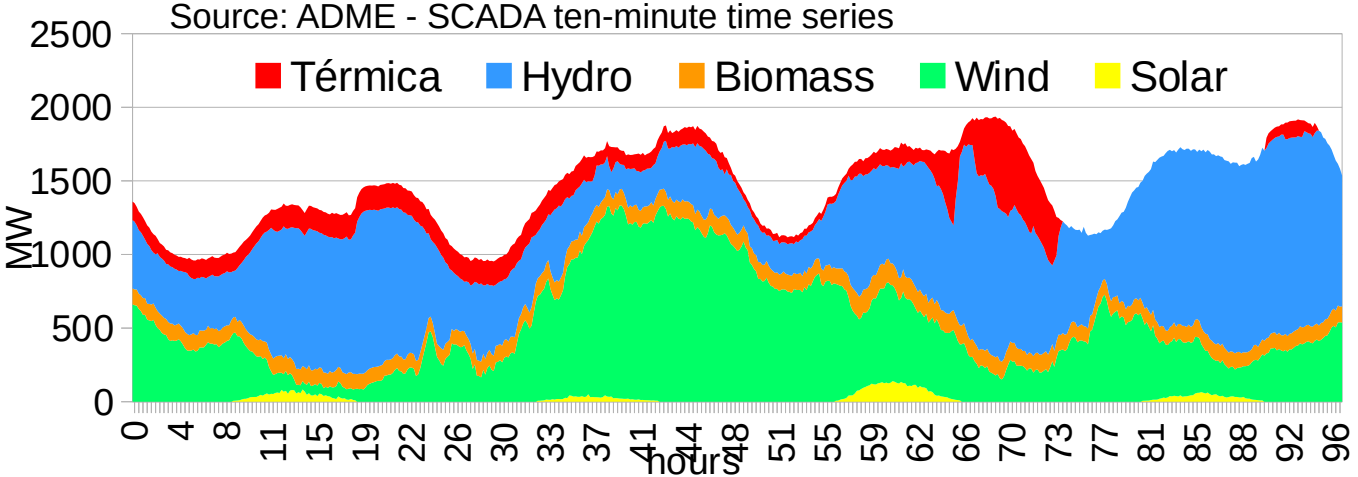


- **Encadenamiento de optimizaciones con diferente horizonte y paso temporal (meses, semanas, días, horas).
Largo_Plazo, Mediano_Plazo y Corto_Plazo. En el Largo plazo se consideran como variables de estado las PESADAS y se van agregando variables en el Mediano y en el Corto Plazo.**
- **En SimSEE con los CEGHs, posibilidad de reducción del estado de los procesos estocásticos.**
- **Subdivisión del paso de tiempo en POSTES, Bandas Horarias o PATAMARES.**

Postes (UY), Bandas Horarias (AR), Patamares (BR)

... tiene sentido usar la Monótona de Carga?

Solo un ejemplo, 4 días cualquiera de julio-2018-Uruguay





SimSEE utiliza Postizado- Dinámico

En cada paso de tiempo, se crea la Demanda Neta con detalle horio sumando todas las demandas y restando las energías no-gestionables y en base a la monótona de la Demanda Neta se definen los POSTES para la resolución del paso.

Modelado de la incertidumbre (Procesos Estocásticos)

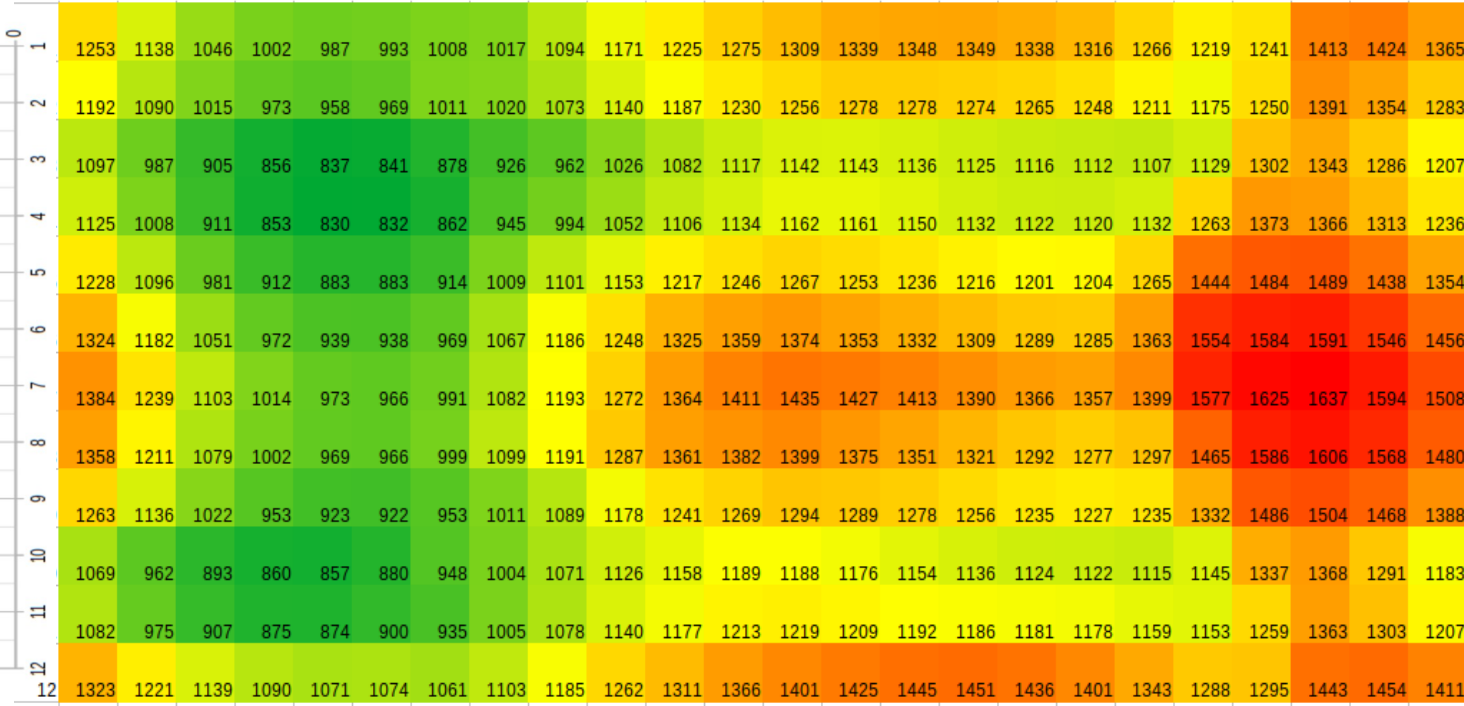
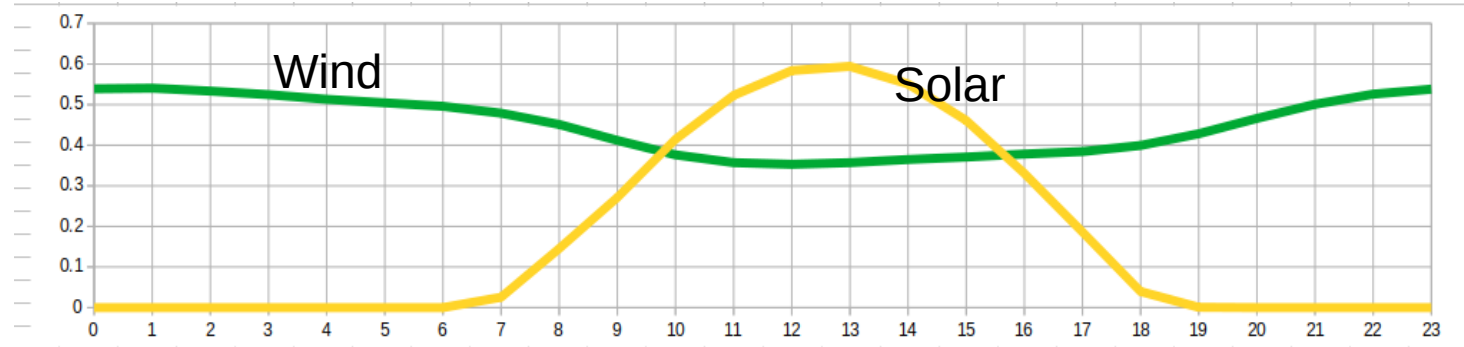




Fuentes de aleatoriedad

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

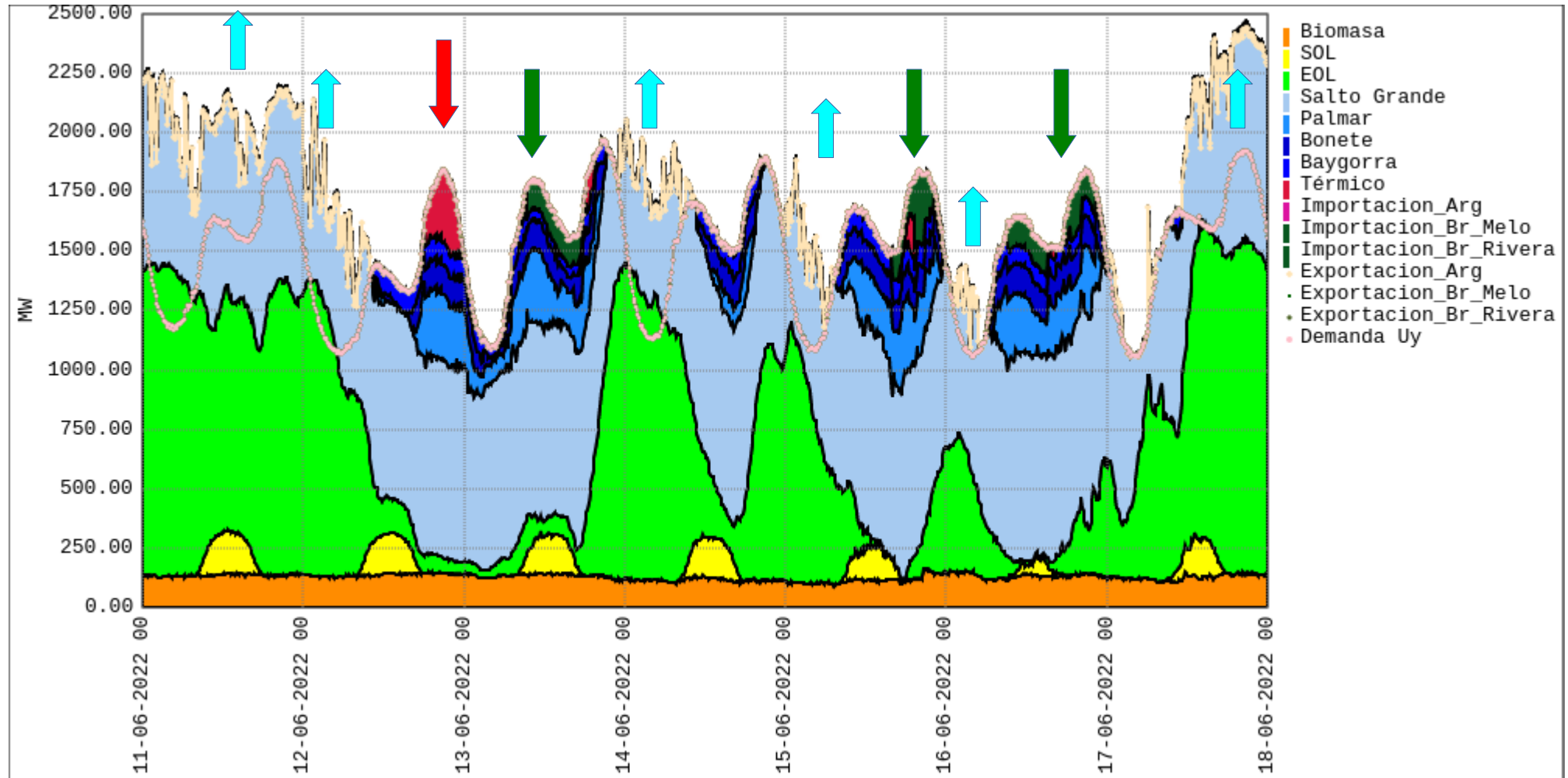
Wind, Solar and Demand correlations.



Demand



Ejemplo: Importancia de los INTERCAMBIOS OCASIONALES.



Fundamentos del CEGH.

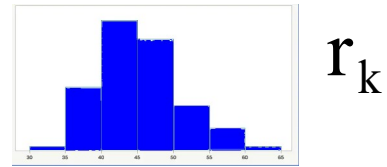
Dado un conjunto de series de datos, como ser caudales medios semanales a las represas.

¿Cómo introducir esa aleatoriedad en las simulaciones?.

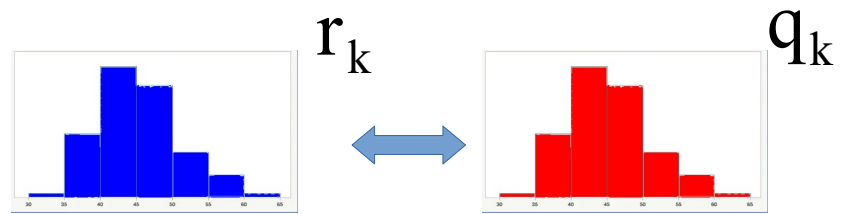
¿Cómo generar series sintéticas con iguales características que las series de datos?

¿Qué es importante representar en el modelo?

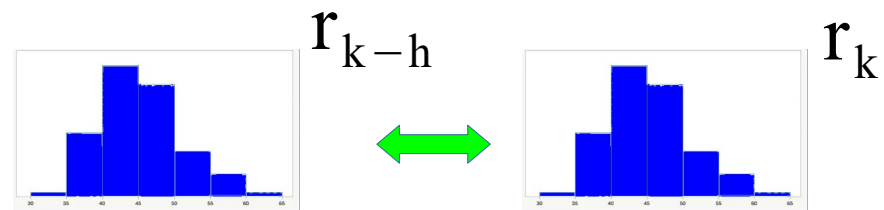
Histogramas de amplitud:

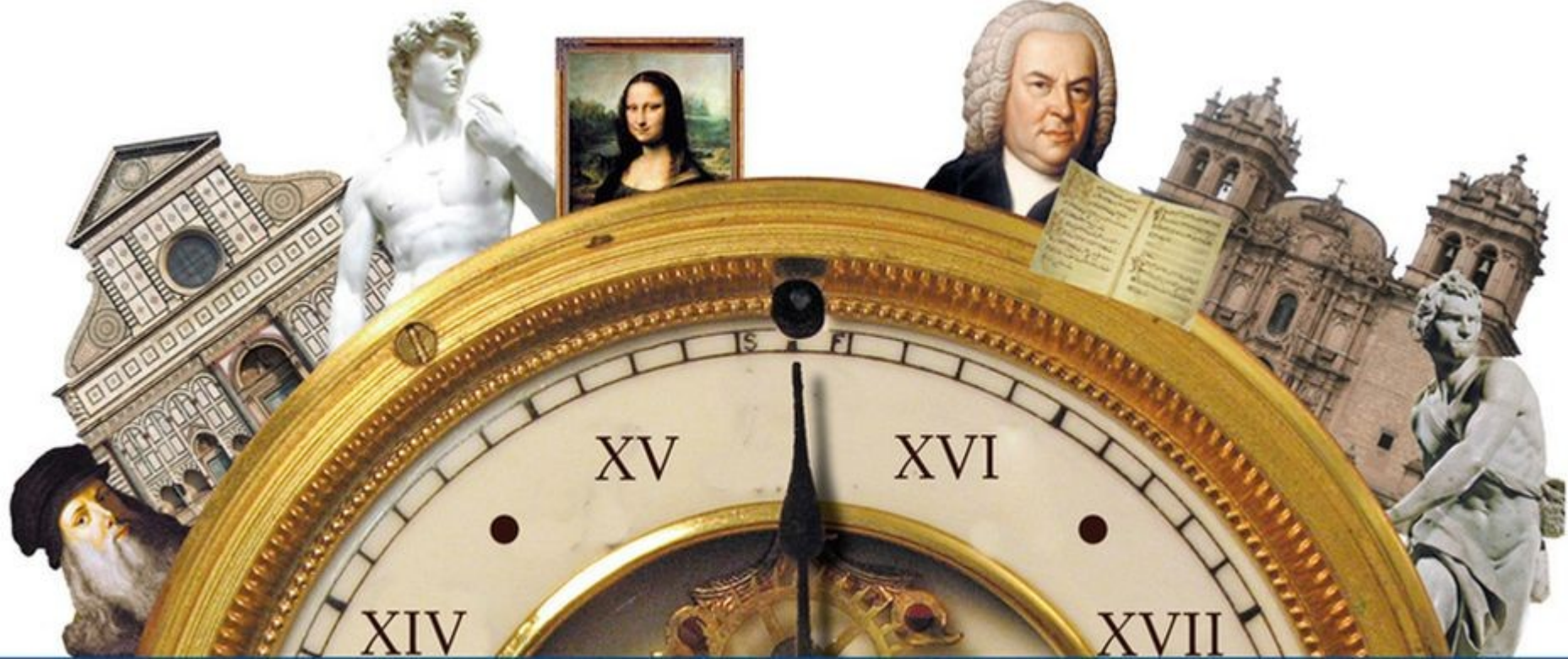


Correlaciones espaciales:



Correlaciones temporales:

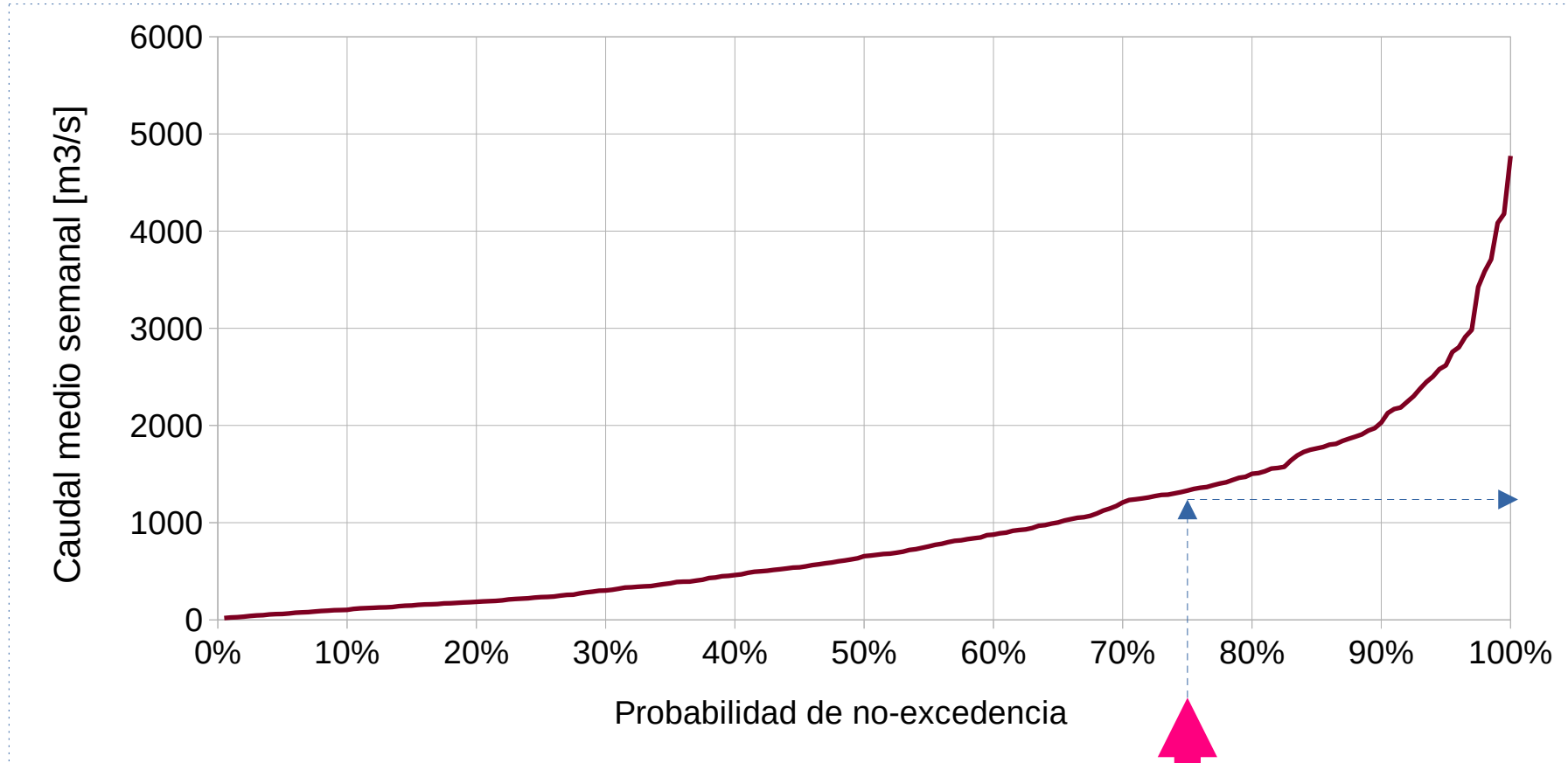




- **Series históricas. (SIN ESTADO!)**

- **Simplemente suponer que esas series históricas de medidas se repiten y ver cómo se comporta el sistema con esas entradas.**
- **Si durante el proceso de Optimización se utiliza una serie determinística el optimizador calculará la política óptima conociendo el Futuro. En la realidad no podrá operar así, porque seguramente no se repita el pasado Tal Cual.**

- **Ruido Blanco en base a la distribución histórica.
(SIN ESTADO!)**



Generador de números pseudo-aleatorios $U(0,1)$

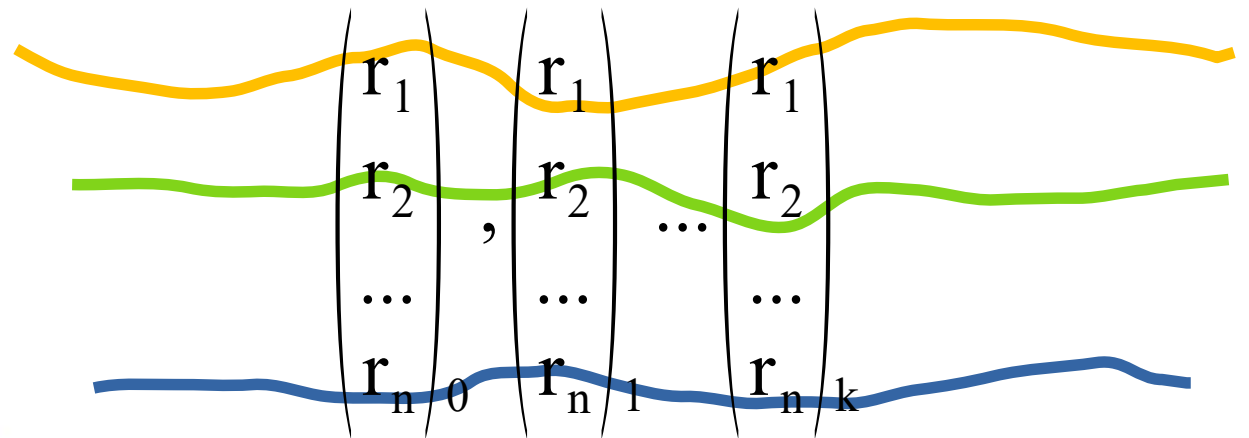
Herramientas disponibles

- **Terrible arsenal para tratamiento de sistemas lineales invariantes en el tiempo.**
- **Algunos resultados aplicables a procesos ergódicos.**
- **Algunos resultados sobre procesos gaussianos.**



Proceso estocástico

Un conjunto de variables aleatorias variando en el tiempo.



- **Medidas de probabilidad**

$$m(x): R^n \rightarrow R^m$$

La forma de realizar medidas de probabilidad es mediante la integral de una función ponderada por la función densidad de probabilidad.

$$\langle m(x) \rangle_x = \int_{\theta \in R^n} m(\theta) \cdot p_x(\theta) dV_\theta$$

Para realizar entonces cualquier cuantificación probabilística es necesario conocer la función de densidad de probabilidad.

$$p_x(\theta)$$

Ejemplos de medidas de probabilidad

Valor Esperado

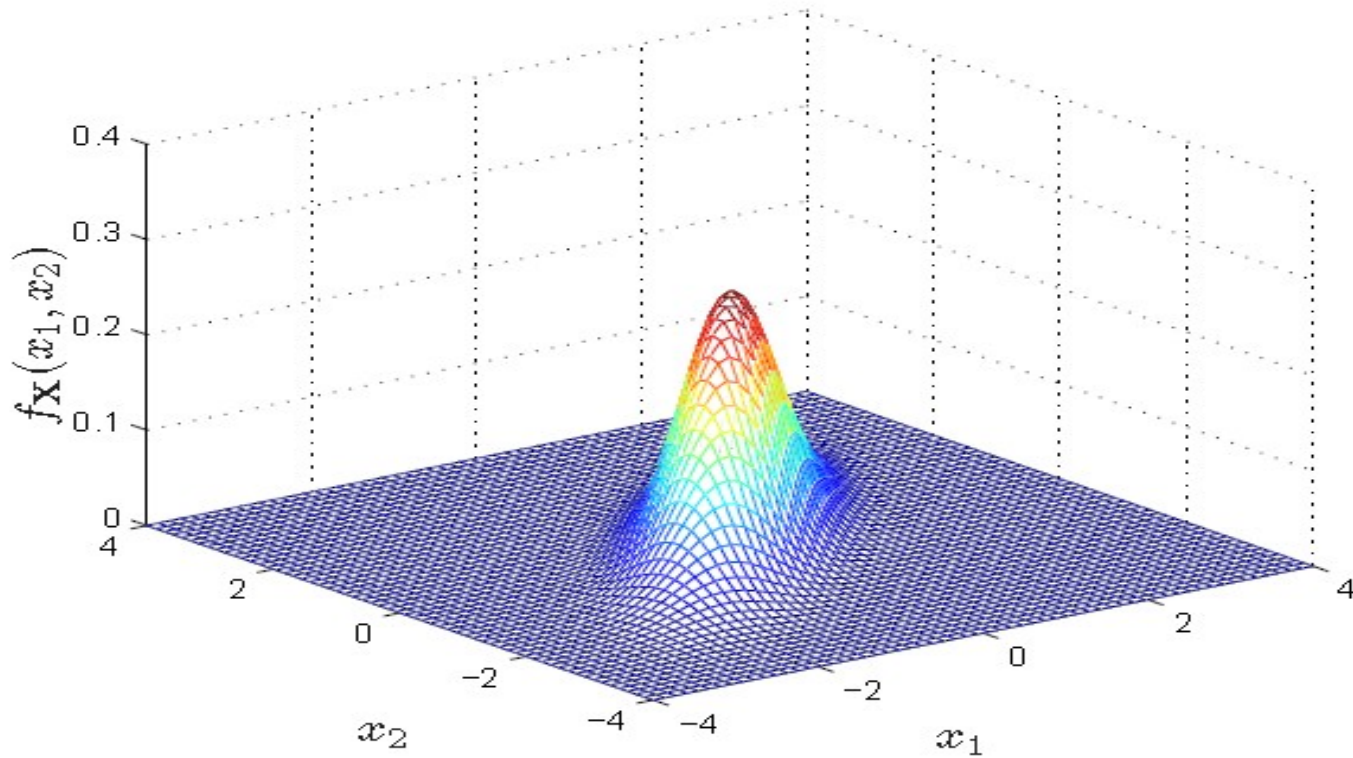
$$E(x) = \langle x \rangle_x = \int_{\theta \in R^n} x \cdot p_x(\theta) dV_\theta$$

Matriz de covarianzas

$$\Sigma_{xx} = \left\langle (x - E(X))(x - E(X))^T \right\rangle_x$$

FDP Gaussiana

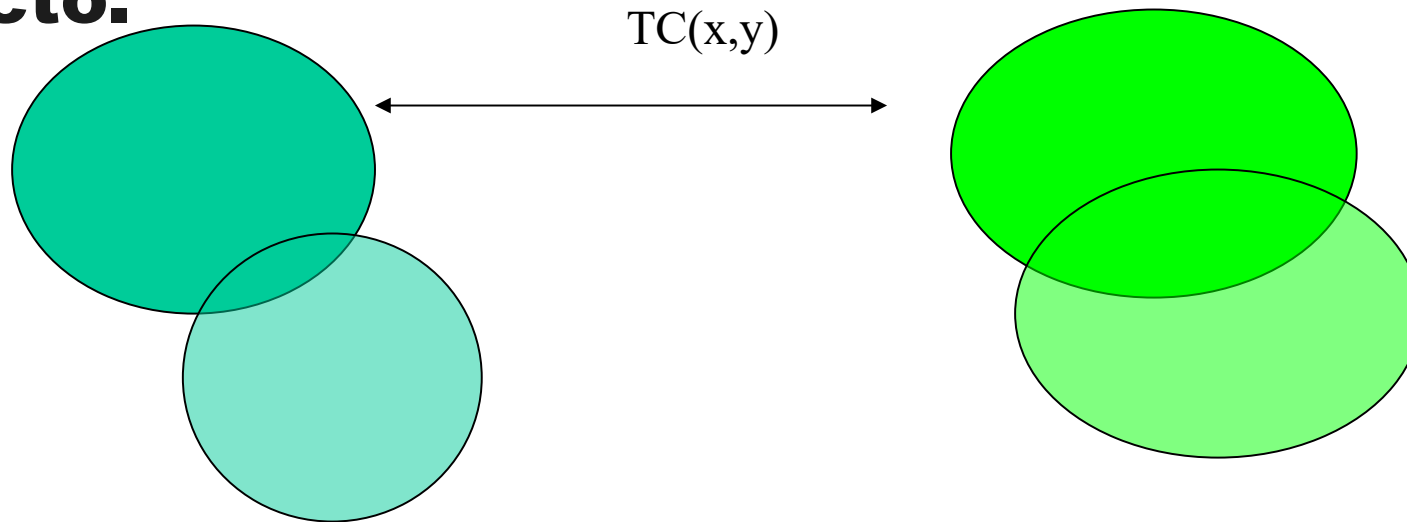
$$p_X(X) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^N \cdot |\Sigma|}} \cdot e^{-\left(\frac{1}{2} X^T \Sigma^{-1} X\right)}$$



$$\Sigma = \langle X \cdot X^T \rangle$$

Transformaciones Compactas.

Biunívoca y que transforme todo compacto en un compacto.

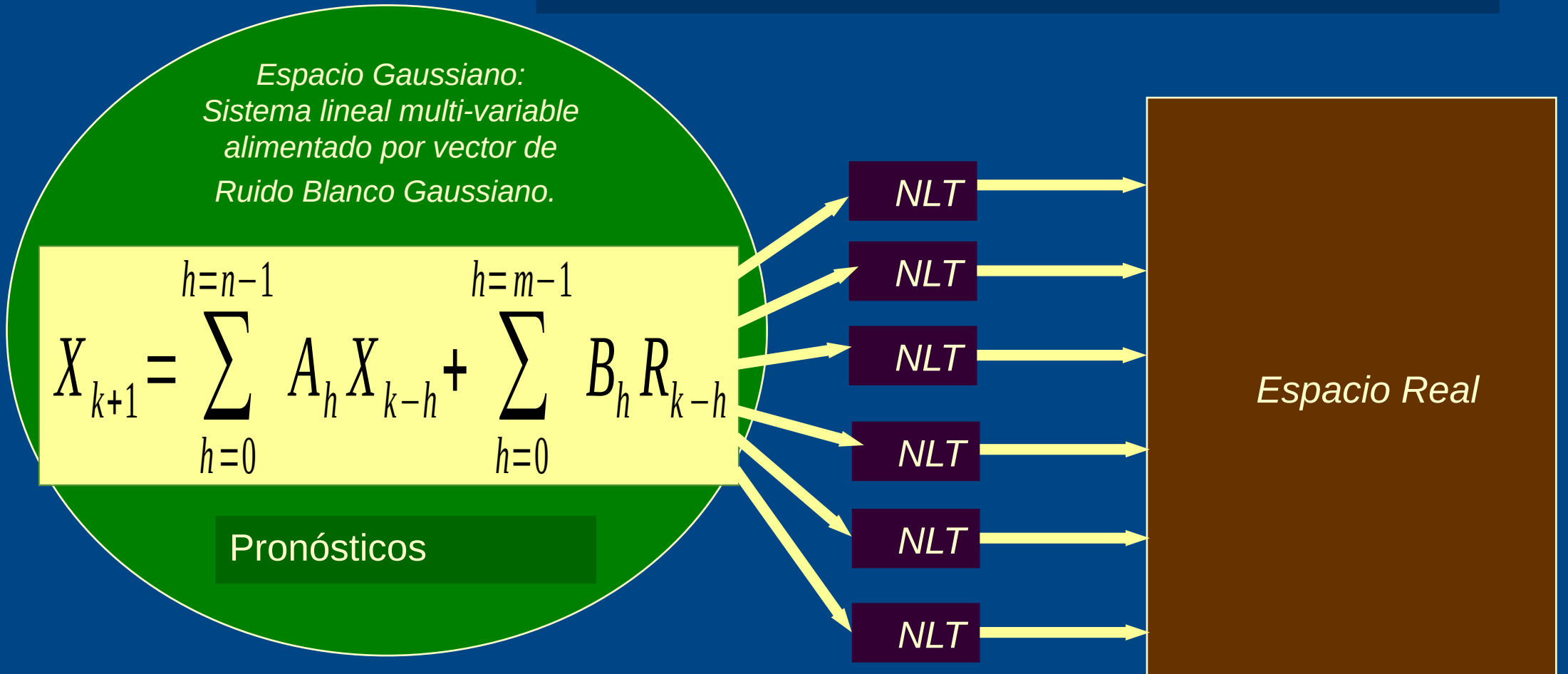


$$\langle m(x) \rangle_x = \int_{\theta \in R^n} m(\theta) \cdot p_x(\theta) dV_\theta$$

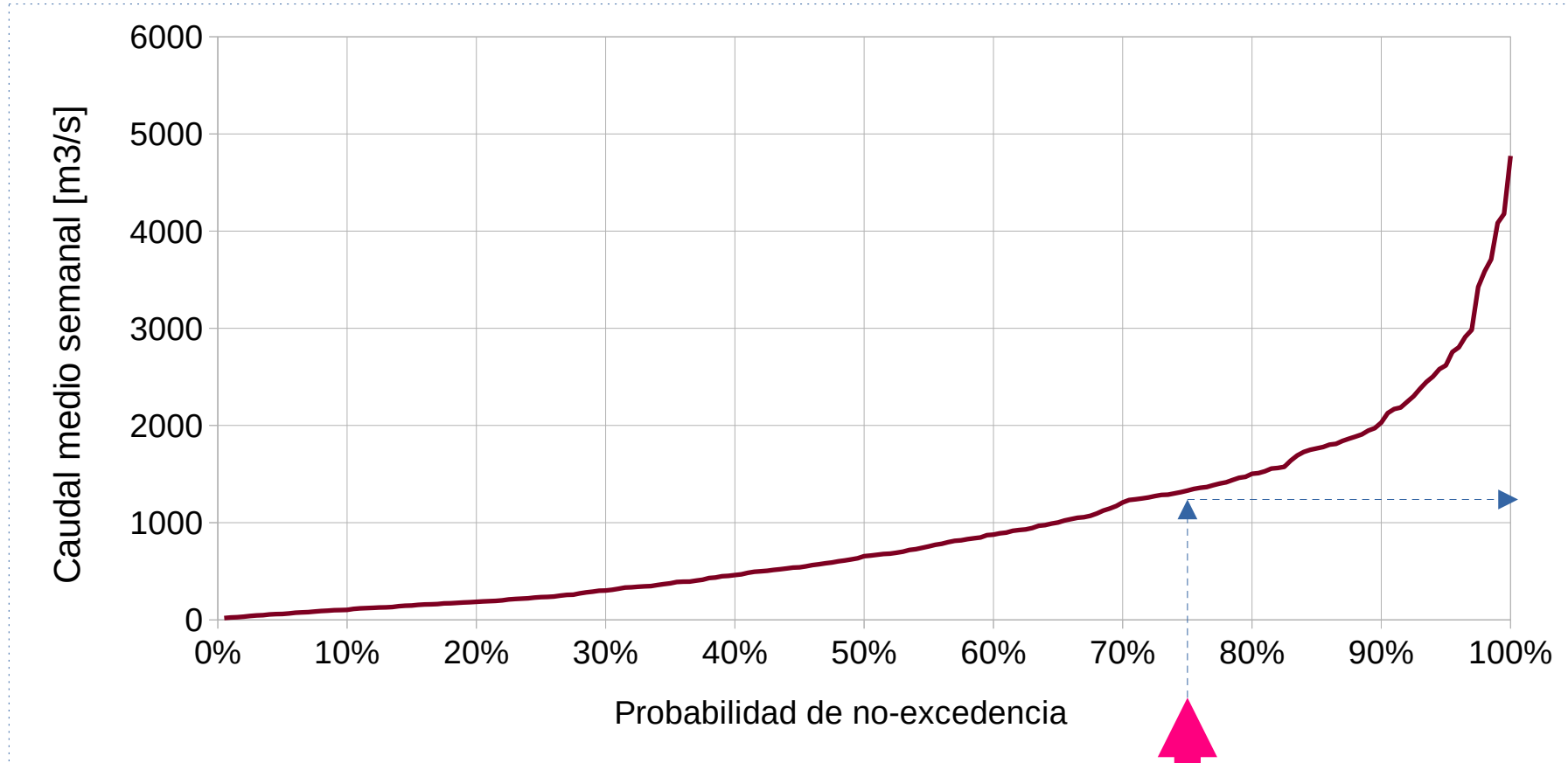
Modelos

CEGH  SimSEE

- Reproduce los histogramas de amplitudes de las series.
- Reproduce las correlaciones entre las series y con sus pasados..



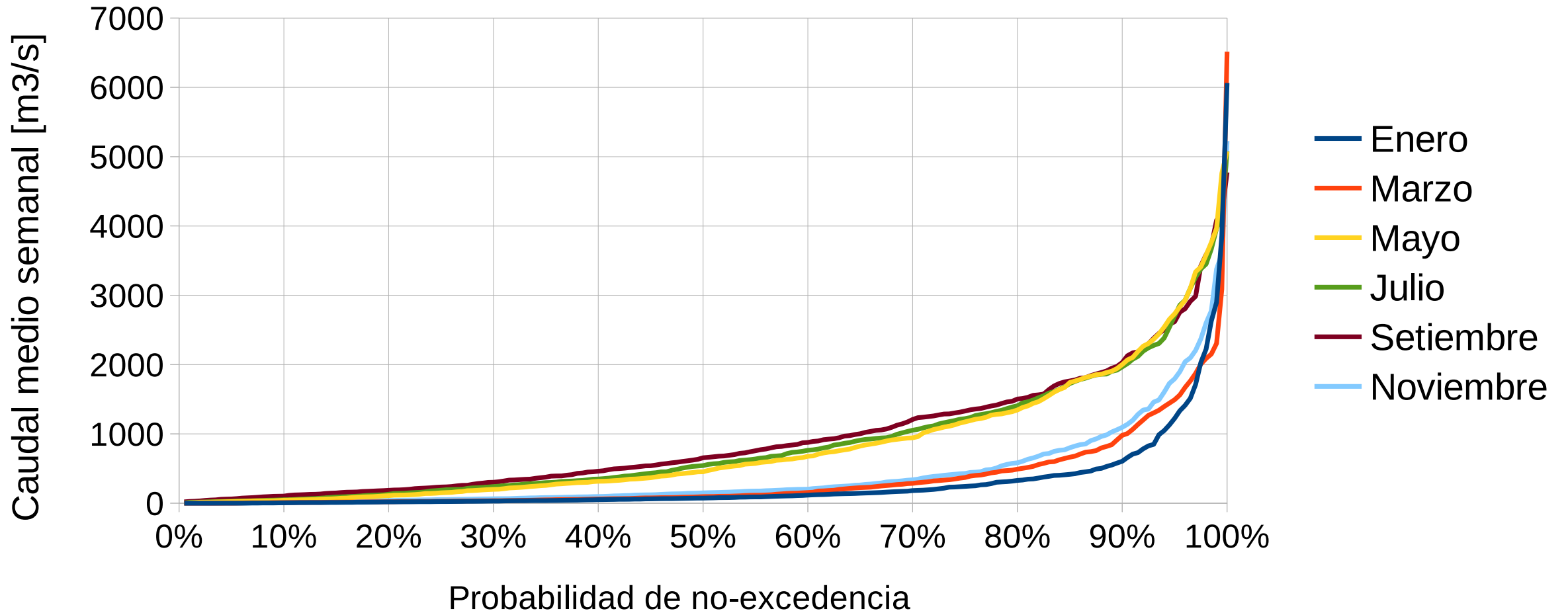
Deformadores por canal y por paso de tiempo (compactas)



$p_x(\theta)$

U(0,1)

Deformadores del caudal medio semanal a Rincón de Bonete para para distintos meses del año



Matríz de Covarianzas (en espacio gaussiano)

	B	P	S
B	1.000	0.571	0.536
P	0.571	1.000	0.296
S	0.536	0.296	1.000

$$\Sigma = \langle X \cdot X^T \rangle$$

$$p_X(X) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^N \cdot |\Sigma|}} \cdot e^{-\left(\frac{1}{2} X^T \Sigma^{-1} X\right)}$$

Matriz A y B del filtro (1 paso)

Bonete, Palmar y Salto

B[k]		0.76	0.02	0.08	*	B[k]		0.38	-0.18	-0.40	*	R1[k]
P[k]	=	0.16	0.63	0.01		P[k]	+	0.61	0.25	0.17		R2[k]
S[k]		0.12	-0.03	0.78		S[k]		0.18	-0.48	0.24		R3[k]

Estado = 3x1



Modelos CEGH.

**Asimilación de
Pronósticos**

Operador Sin Pronósticos.



Operador Con Pronósticos.



Facilidad de integración de PRONÓSTICO.

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

Los sesgos (s) cambian la Guía del probabilidad 50% y los factores de atenuación (f) regulan la inyección de ruido, permitiendo ir desde un Pronóstico Deteminístico (ruido nulo) a la desaparición del pronóstico (ruido histórico).

$$S_k = \begin{bmatrix} S_{1,k} \\ \dots \\ S_{n,k} \end{bmatrix}$$

$$F_k = \begin{bmatrix} f_{1,k} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & f_{2,k} & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & f_{n,k} \end{bmatrix}$$

Estado del proceso estocástico.

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

La información del pasado, necesaria para calcular la salida del sistema lineal en el espacio gaussiano, pasa a formar parte de El Estado del Sistema.

$$X_k, X_{k-1}, \dots, X_{k-(n_r-1)}$$

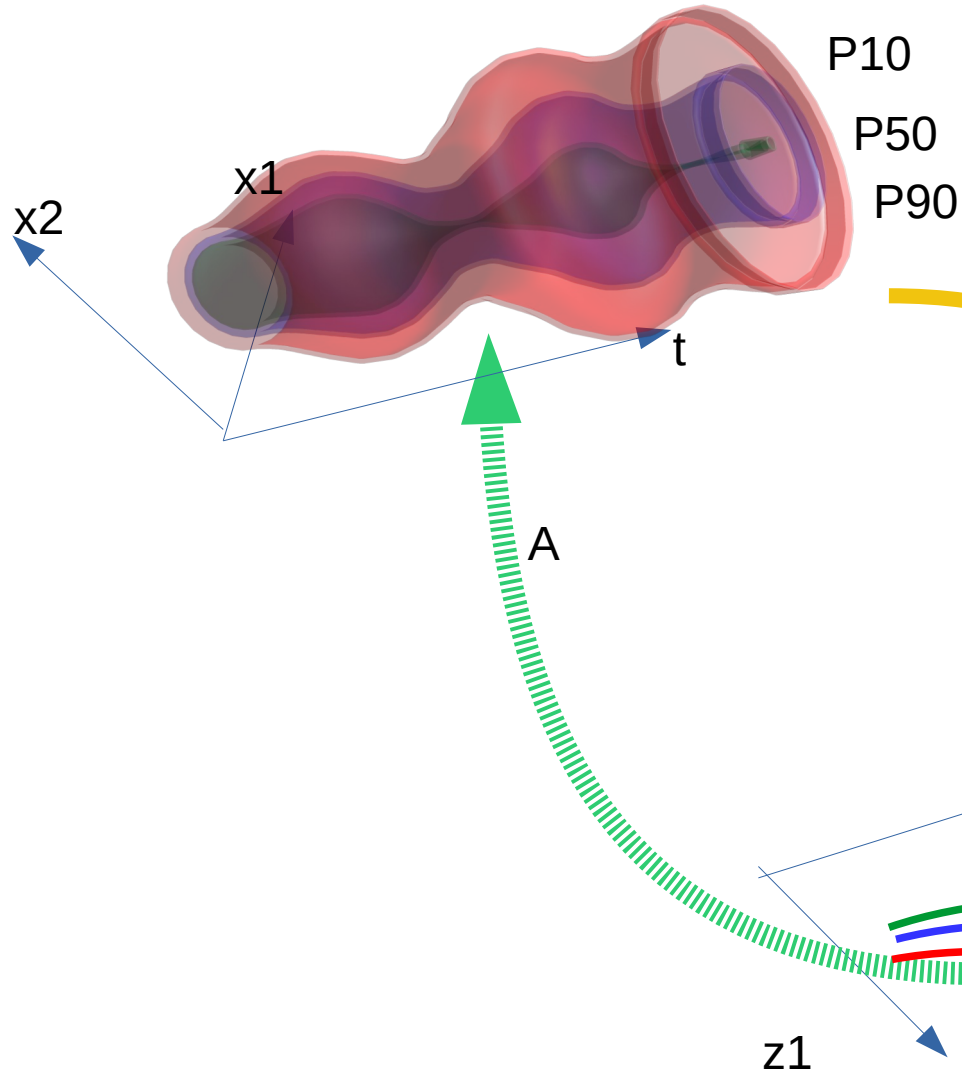
Maldición de Bellma

$$u_k = p(x_k, r_k, k)$$



$$\text{Dim}(u) \times \text{Dim}(x) \times \text{Dim}(r) \times \text{Dim}(k)$$

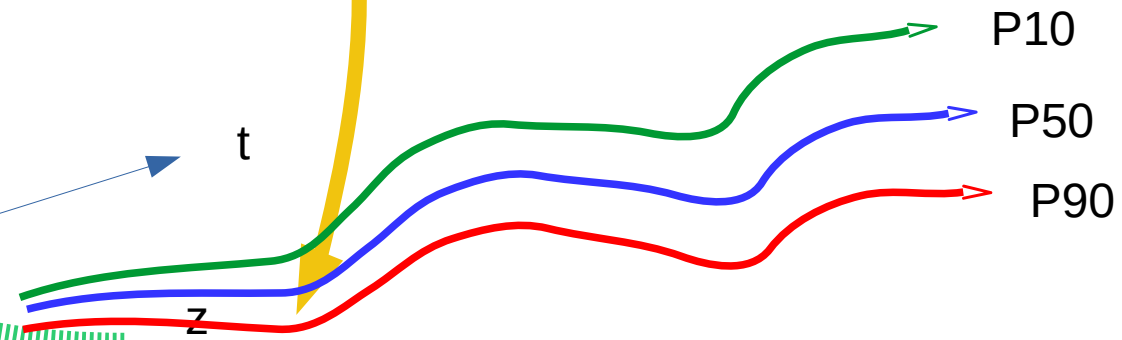
Tratamiento del pronóstico en el espacio Gaussiano con reducción.



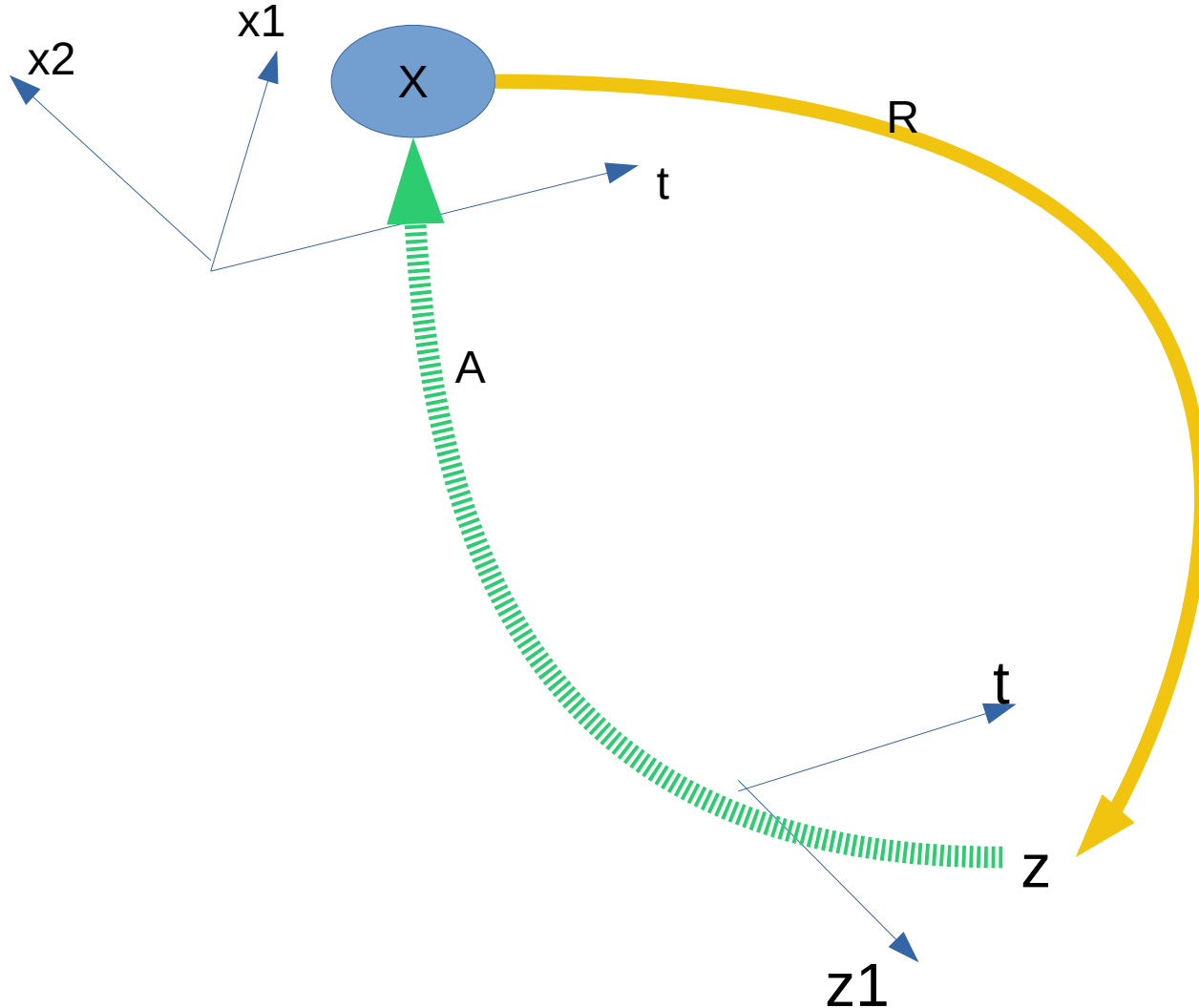
$$z = M_R X$$

$$u = P O_z(z, r, t)$$

$$X = M_A(t) z + B_A(t) w$$



Reducción del Espacio de Estado en modelos CEGH



$$z = R(X)$$

$$u = PO_z(z, r, t)$$

$$X = A(z, w)$$

W es el ruido que permite poblar el volumen de X que mapea en el z dado.

Aprendizaje

Automático

(machine learning)

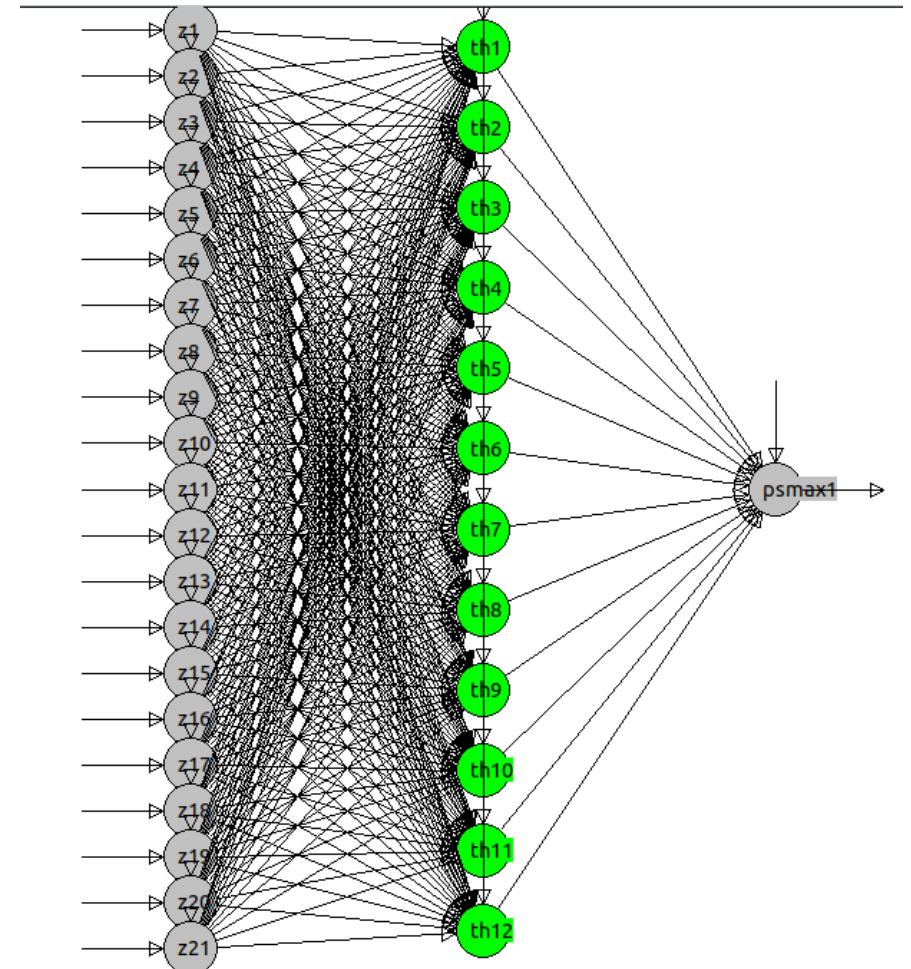


$$\min_u \left\{ ce(X_k, u_k, r_k, k) + CF(X_s, k+1) \right\}$$

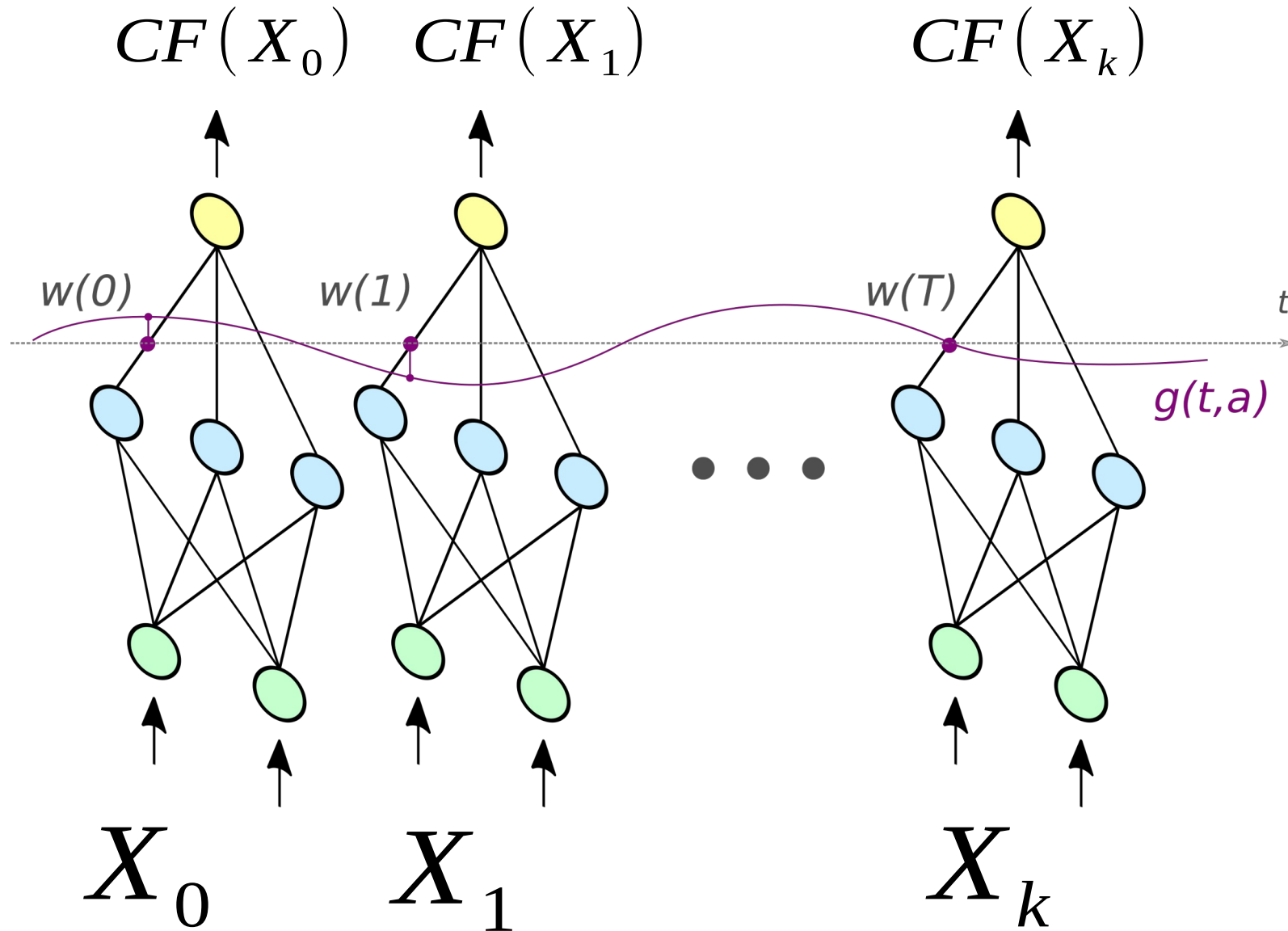
$$@ \begin{cases} u \in \Omega(X_k, r_k, k) \\ X_s = f(X_k, u_k, r_k, k) \end{cases}$$

Programación dinámica estocástica aproximada

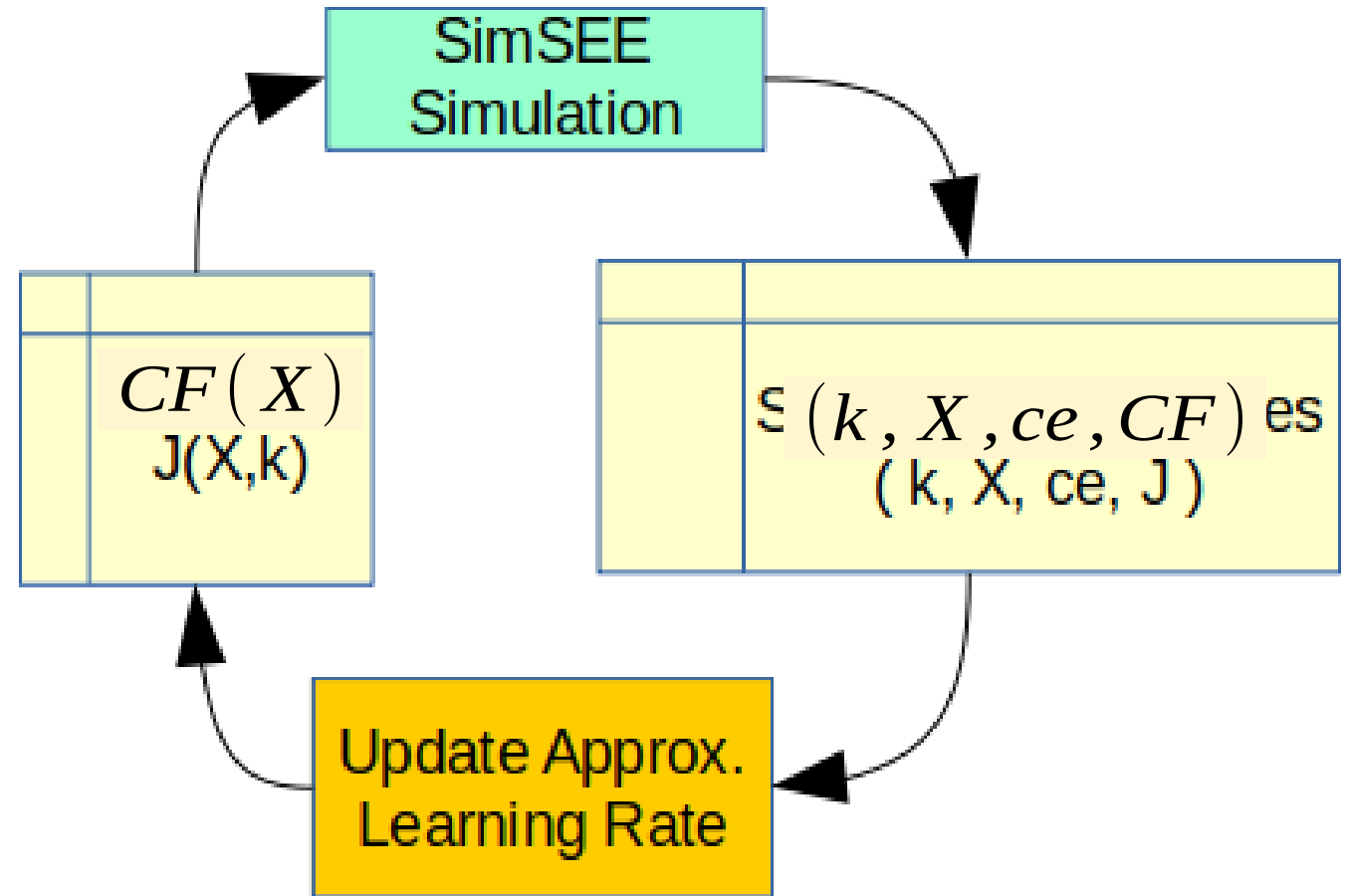
... dada una aproximación de $CF(X)$ puedo simular



Conjunto de redes neuronales, una por paso de tiempo



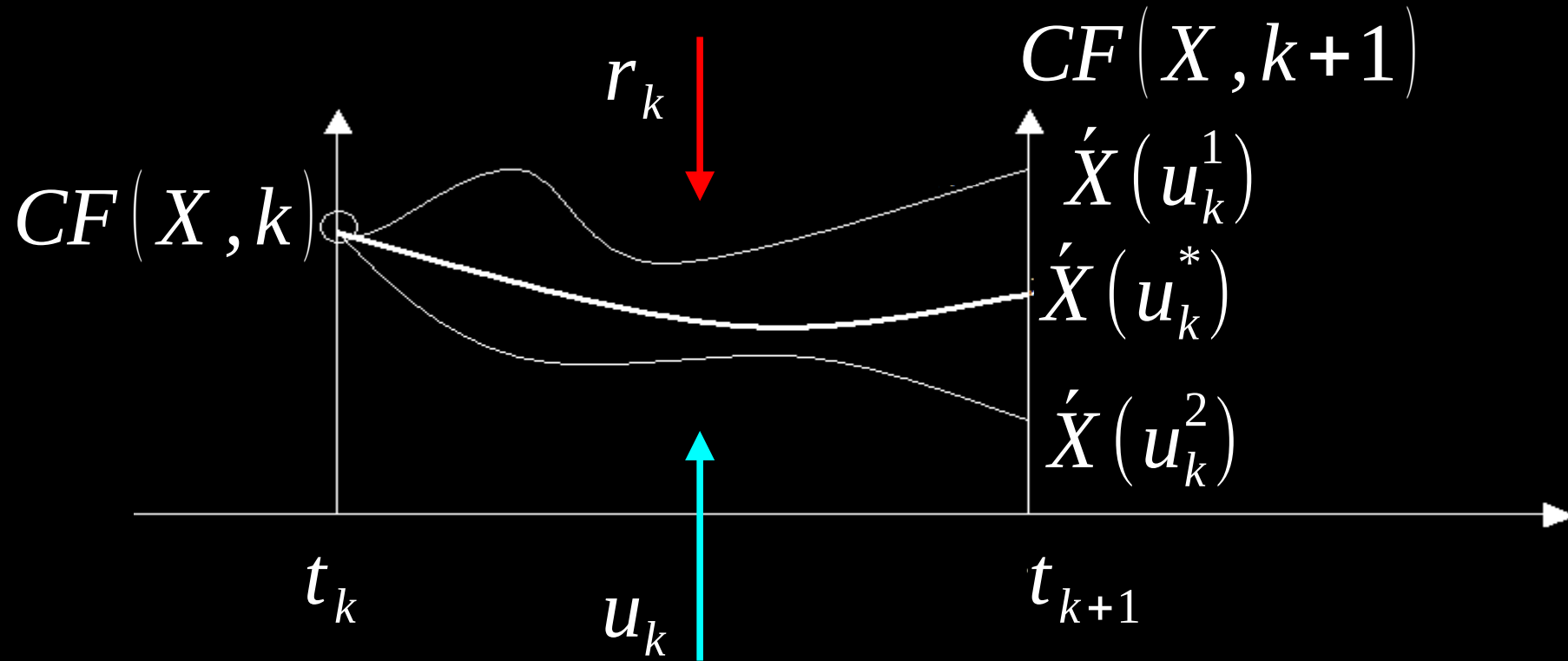
Bucle de aprendizaje



Representación de la Política de Operación

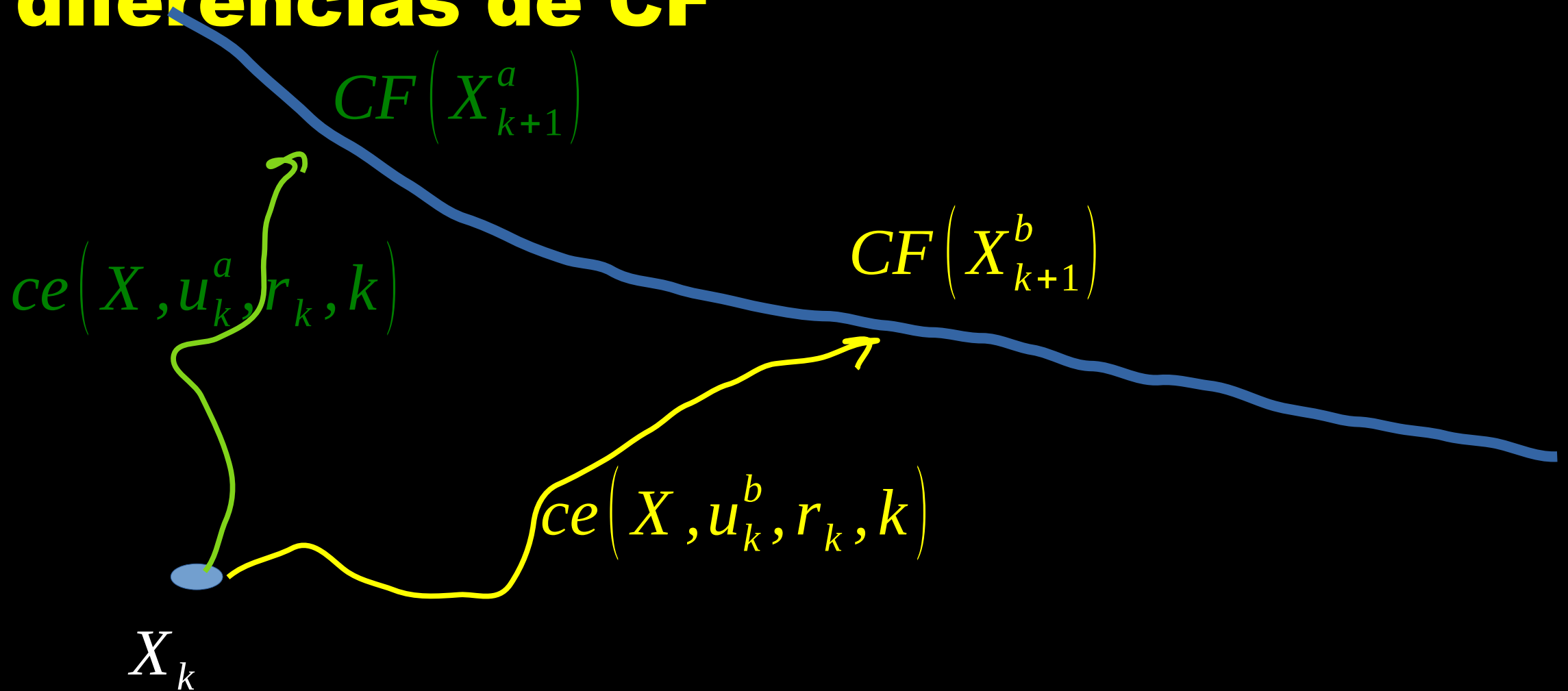
$$CF(X, k) = \left(\begin{array}{l} \min_u \{ ce(X_k, u_k, r_k, k) + CF(X_s, k+1) \} \\ @ \left| \begin{array}{l} u \in \Omega(X_k, r_k, k) \\ X_s = f(X_k, u_k, r_k, k) \end{array} \right. \end{array} \right)_{r_k}$$

Recursión de Bellman



$$CF(X, k) = \left\langle \min_{u_k} \left\{ ce(X, u_k, r_k, k) + q CF(X_{k+1}) \right\} \right\rangle_{\{r_k, r_{k+1}, \dots\}}$$

La información está en las diferencias de CF



Realizaciones y generadores de números pseudo-aleatorios

Cada entidad en SimSEE tiene su propio generador de números pseudo-aleatorios que se inicializan en base a una semilla aleatoria (un número entero) calculado a partir de una Semilla-MADRE igual para todos y un algoritmo que crea una semilla única a partir del Nombre y Tipo de Entidad.

Una Realización de los proceso estocásticos se obtiene en una simulación haciendo que cada entidad en cada paso de tiempo genere los números aleatorios que determinan sus incertidumbres.

Cambiando la Semilla-MADRE se simulan diferentes posibles futuros en base a las realizaciones de los procesos estocásticos representados.

Simulación dada una función $CF(X,k)$

$$\min_u \left\{ ce(X_k, u_k, r_k, k) + CF(X_s, k+1) \right\}$$
$$@ \left\{ \begin{array}{l} u \in \Omega(X_k, r_k, k) \\ X_s = f(X_k, u_k, r_k, k) \end{array} \right.$$

Estados

$$\{X_0^1, X_0^2, \dots, X_0^{nx}\}$$

**iniciales:
Semillas**

$$\{W_1, W_2, \dots, W_{nw}\}$$

aleatorias:

Trayectorias (nx x nw):

Estados iniciales

$$\left\{ X_0^1, X_0^2, \dots, X_0^{nx} \right\} \times \left\{ W_1, W_2, \dots, W_{nw} \right\}$$

Semillas Aleatorias



Trayectorias

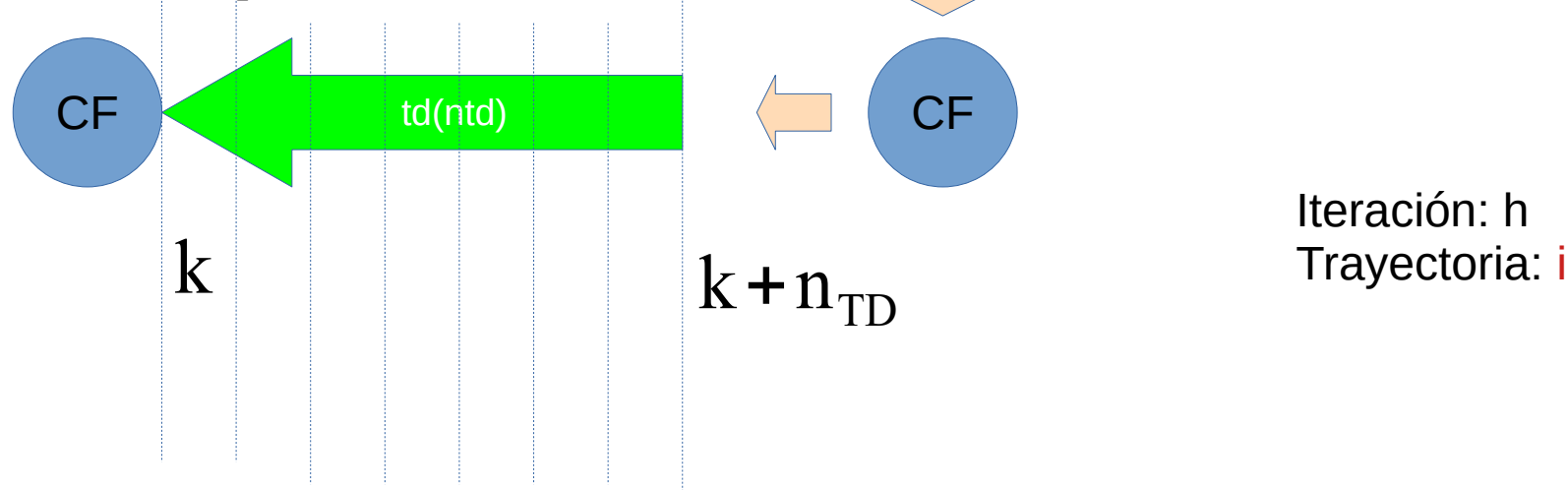
$$\left(\begin{array}{l} (X_0^1, w_1), (X_0^1, w_2), \dots, (X_0^1, w_{nw}) \\ (X_0^2, w_1), (X_0^2, w_2), \dots, (X_0^2, w_{nw}) \\ \dots \\ (X_0^{nx}, w_1), (X_0^{nx}, w_2), \dots, (X_0^{nx}, w_{nw}) \end{array} \right)$$

(X_0^1, w_1) →

k	X						MEE	ce	CF(X,k+1)
	x1	x2	x3	x4	x5	x6			
0	6339.434	560.223	1040.023	-1.378	-0.981	-0.811	7	-227978	-297041
1	6188.706	171.883	411.939	-1.368	-0.998	-0.846	7	-188945	-119353
2	6046.920	113.600	411.939	-1.339	-0.954	-0.880	7	-548	-17670
3	5929.287	113.600	411.939	-1.334	-1.021	-0.994	7	-206043	61942
4	5803.822	113.600	411.939	-1.333	-0.924	-1.113	7	-115979	126864
5	5687.223	113.600	411.939	-1.330	-0.960	-1.160	7	-58225	162629
6	5577.711	113.600	411.939	-1.325	-0.967	-1.128	7	-91917	196991
7	5474.921	113.600	411.939	-1.317	-0.963	-1.084	7	68926	231503
8	5378.466	113.600	383.063	-1.307	-1.115	-1.038	7	21433	255490
9	5286.142	112.375	410.533	-1.300	-1.109	-1.044	7	-142275	344703
10	5199.748	113.600	411.939	-1.296	-1.006	-1.079	7	-139002	416420
11	5119.304	113.600	411.939	-1.287	-0.884	-1.102	7	-44928	456890
12	5044.897	113.600	411.939	-1.212	-0.799	-1.105	7	-70140	486965

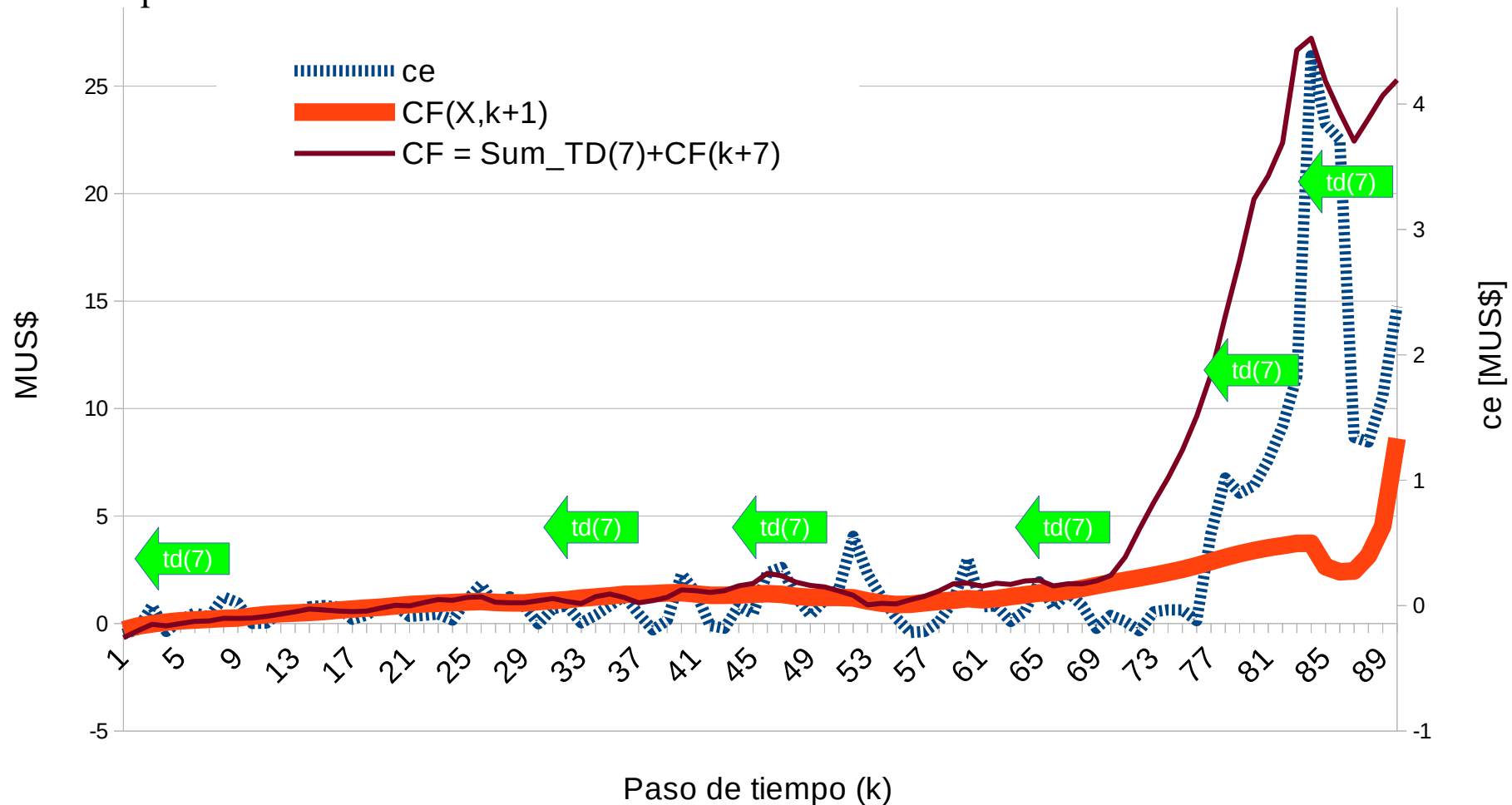
Estimación de CF a partir de la información de las trayectorias **td = Time Difference**

$$CF_{ki}^h = \sum_{p=k}^{p=k+n_{TD}} q^{(p-k)} ce_{ki} + q^{n_{TD}+1} CF^{h-1} (X_{(k+n_{TD}+1,i)}^s, k+n_{TD}+1)$$



Estimación de CF a partir de la información de las trayectorias $td = \text{Time Difference}$

$$CF_{k,i}^h = \sum_{p=k}^{p=k+n_{TD}} q^{(p-k)} ce_{k,i} + q^{n_{TD}+1} CF^{h-1}(X_{(k+n_{TD}+1,i)}^s, k+n_{TD}+1)$$



Claves para el éxito de la implementación

Técnicas de reducción de varianza (Common Random Number)

Evitar convergencia de las trayectorias durante la exploración.

+ mezcla de Time-Differences acode con las constantes de tiempo del sistema. (Modos de Evolución)

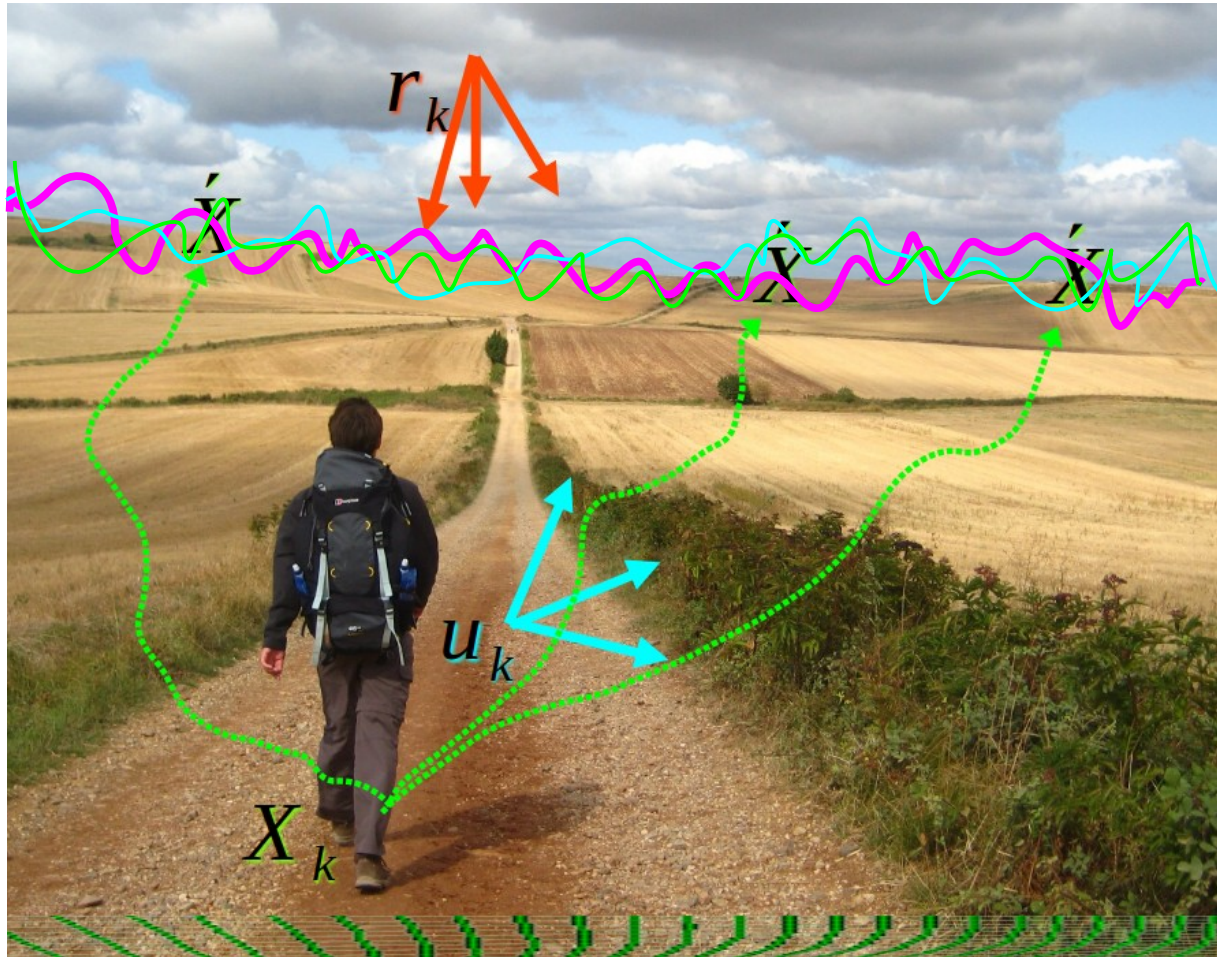
Regularizaciones:

+ Red Neuronal de estructura simple

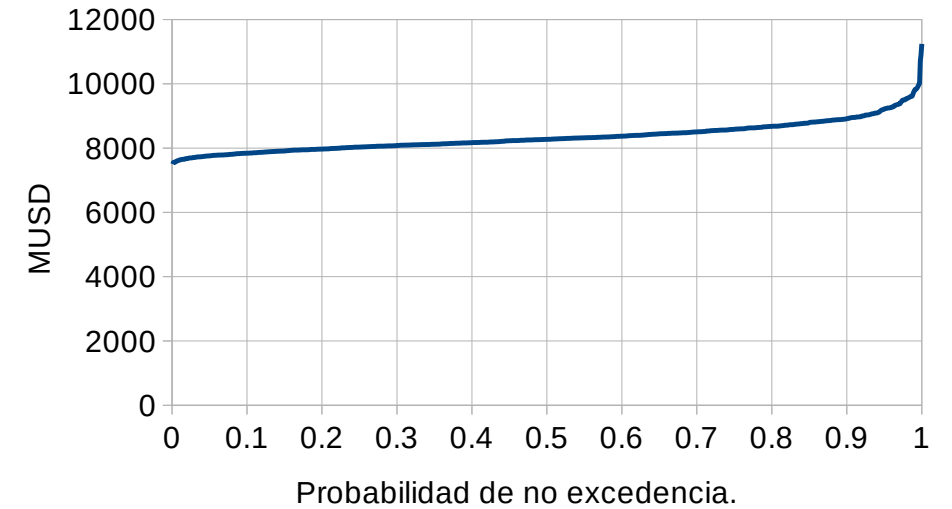
+ En los parámetros (Redge o Lasso)

+ En la variación temporal de los parámetros.

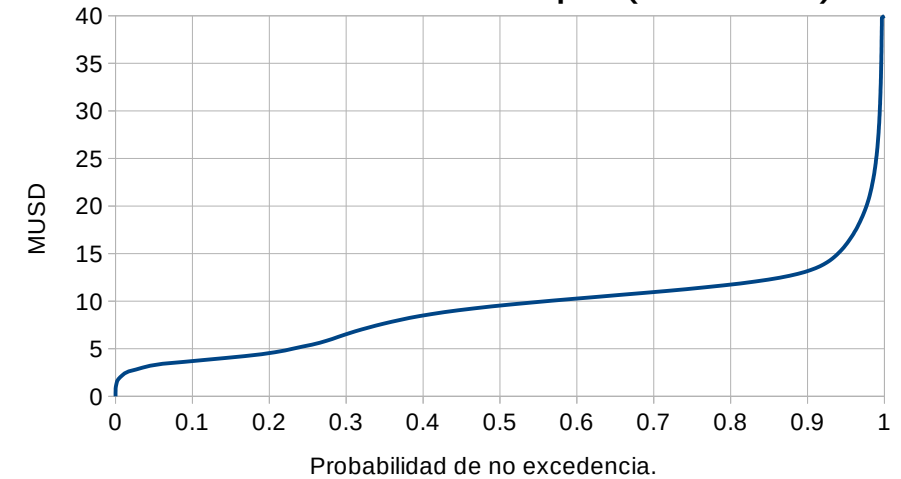
Por qué son necesarias las técnicas de reducción de la varianza.
Simulación 1000 crónicas con paso de tiempo semanal de Uruguay.



Distribución CF(X) - Uruguay



Distribución del costo de etapa (semanal).

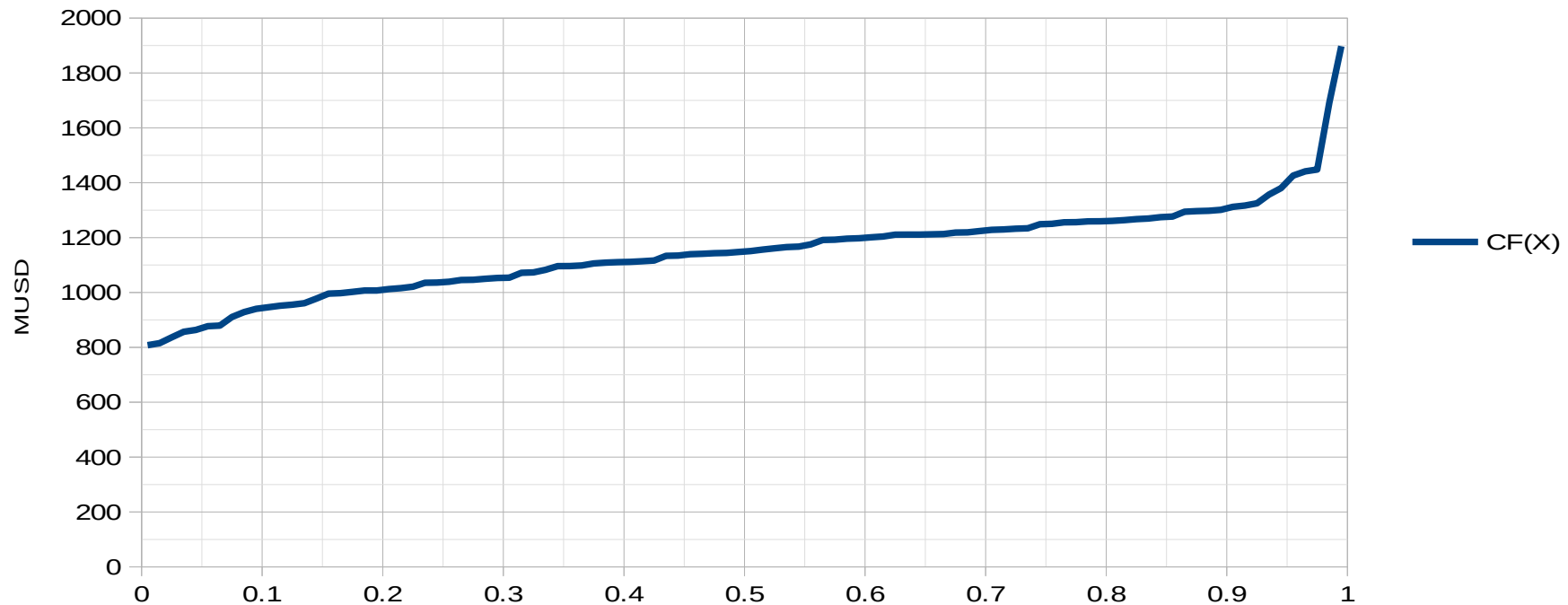


Simulaciones de Montecarlo varianza del valor esperado de la diferencia.

$$\langle (a - b)^2 \rangle = \langle a^2 \rangle + \langle b^2 \rangle - 2 \langle ab \rangle$$

Permanencia del Costo Futuro.

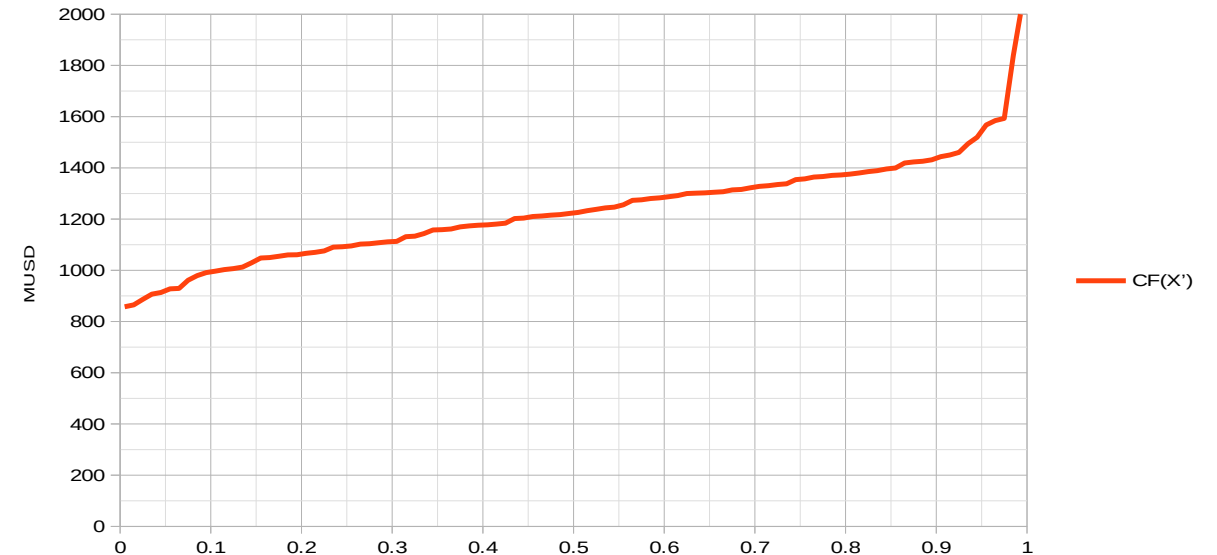
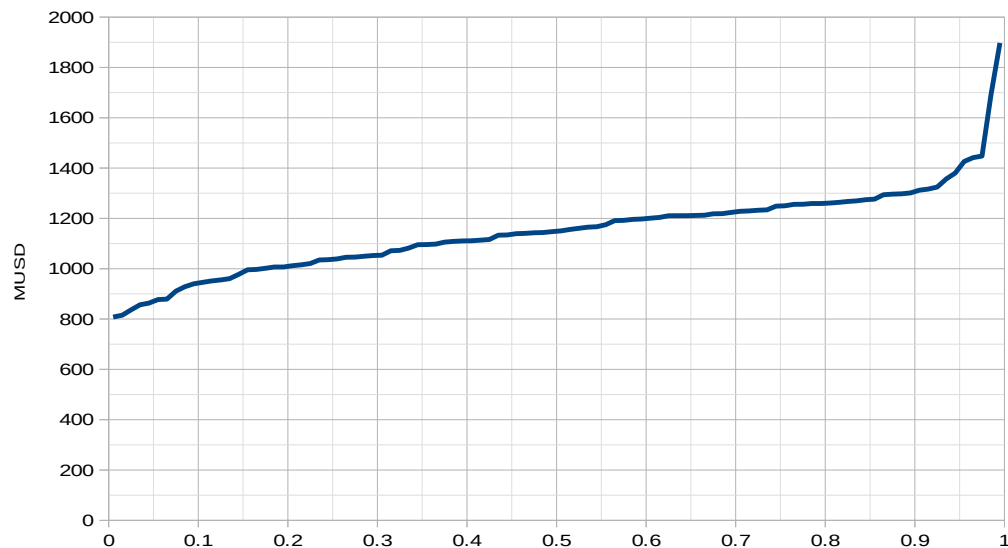
Programación Estacional Nov.2021 - ADME



Common Random Numbers.

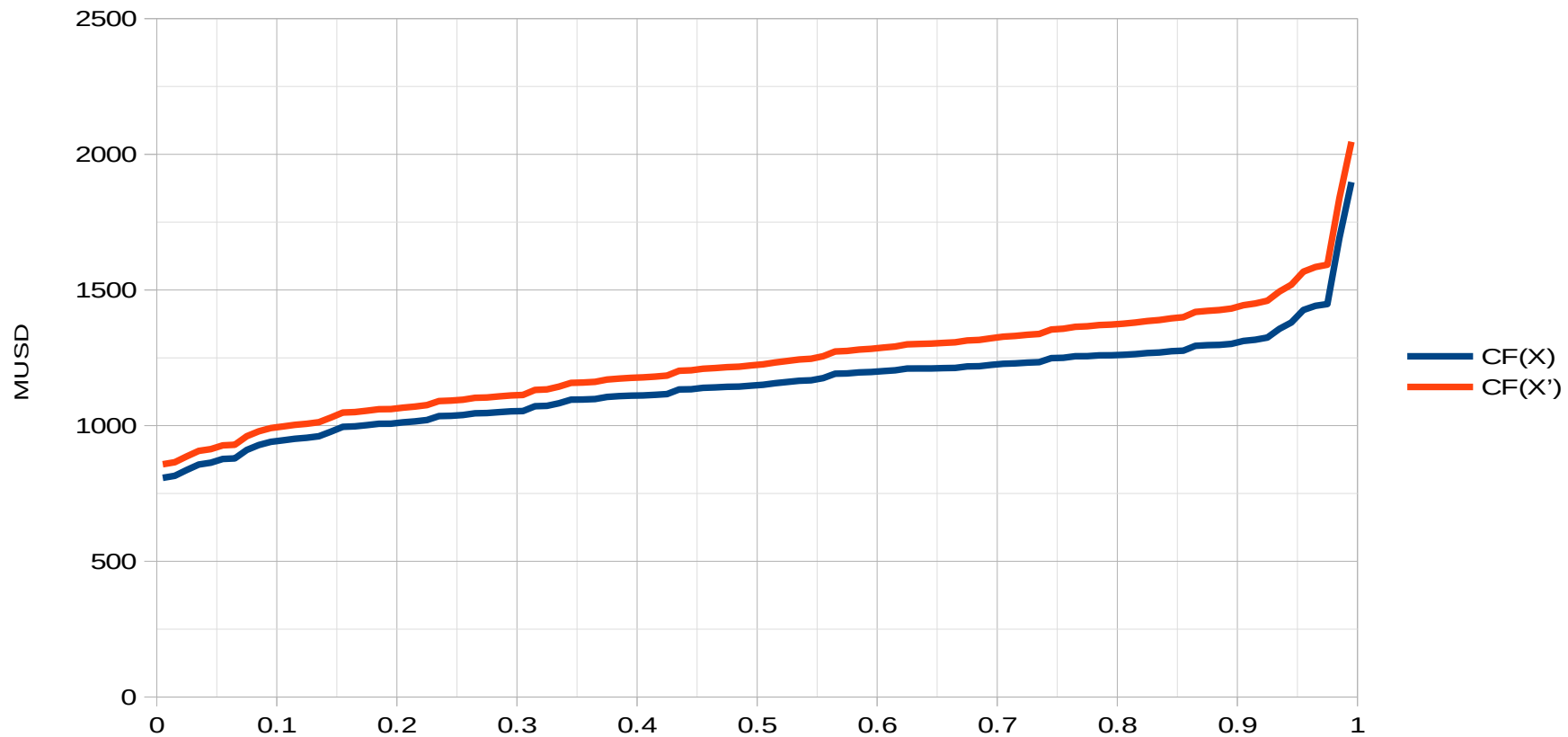
Técnica de reducción de la varianza de la esperanza de la diferencia.

$$\langle (a - b)^2 \rangle = \langle a^2 \rangle + \langle b^2 \rangle - 2 \langle ab \rangle$$

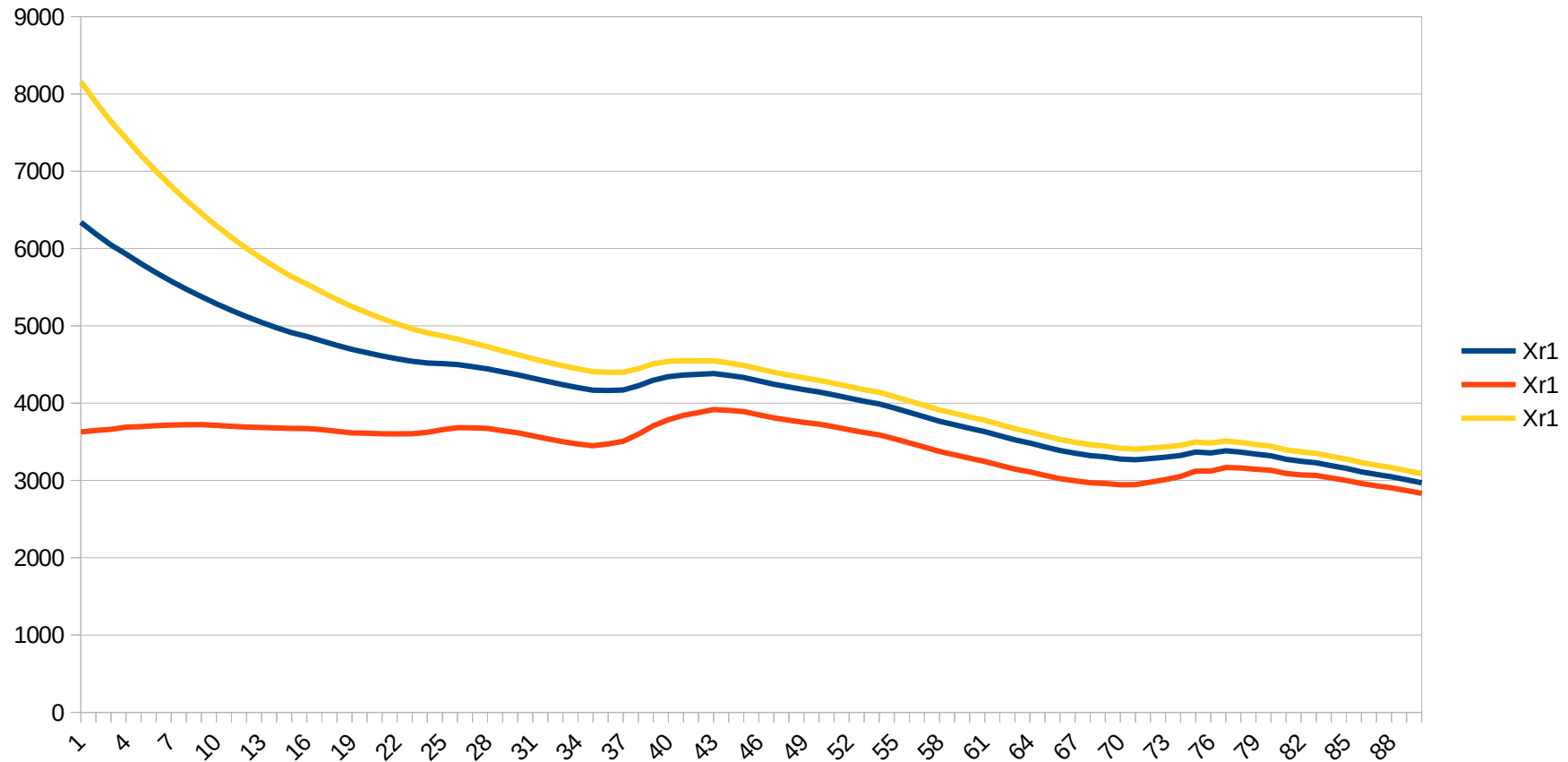


Common Random Numbers.

Técnica de reducción de la varianza de la esperanza de la diferencia.



Convergencia de los estados ante realizaciones con CRN



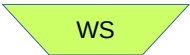
Characterization of the variability in Uruguay.

water inflows



16 years

wind & solar

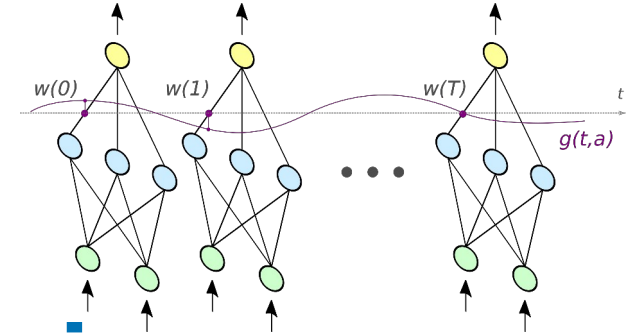


2 month



Representación y entrenamiento de $CF(X,k)$

$$CF^h(X, k) = M(X, k, \theta_k)$$

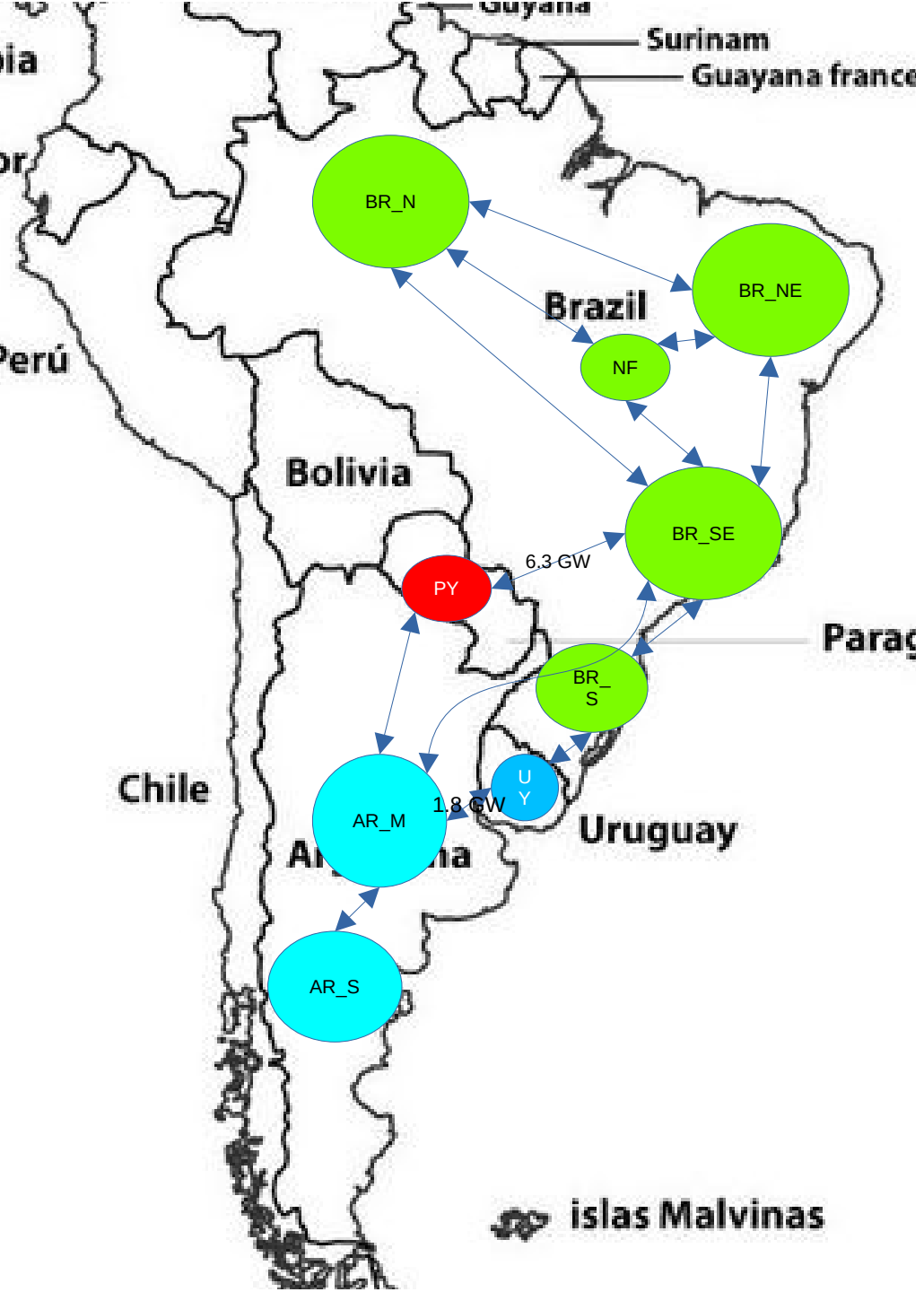


Función de error en base a las diferencias

$$L_{kg} = \frac{1}{4N^2} \sum_{i \neq j \in g} \left((M(X_{kj}, \theta_k) - M(X_{ki}, \theta_k)) - (CF_{kj} - CF_{ki}) \right)^2$$

Función de error completa con regularizadores

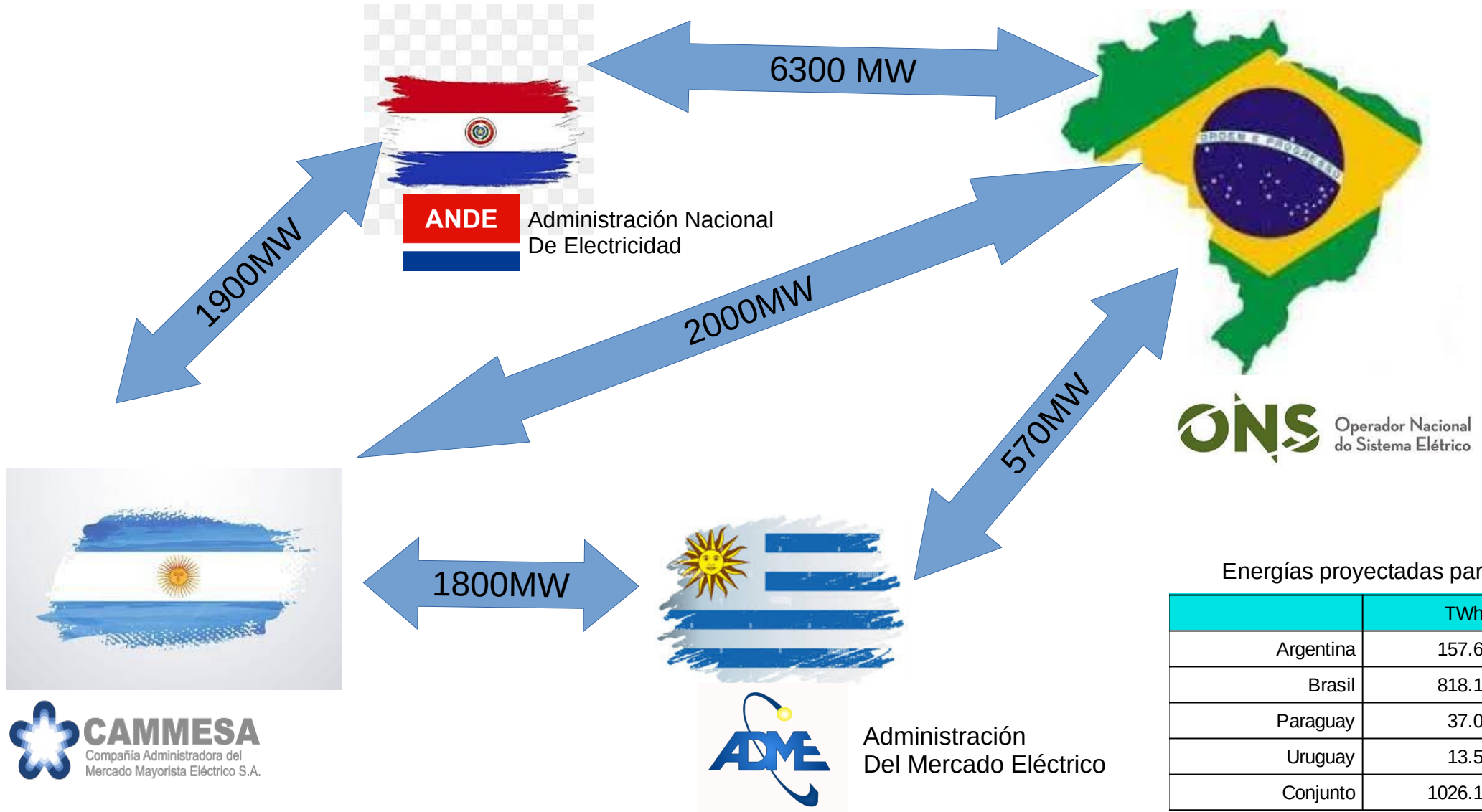
$$L = \sum_{k, g} L_{kg} + \lambda \sum_k \|\theta_k\|^2 + \beta \sum_{k=2} \|\theta_k - \theta_{k-1}\|^2$$



Ejemplo de aplicación, aprendizaje de una Política de Operación del conjunto:

- Argentina
- Brasil
- Paraguay
- Uruguay

Sistemas e Interconexiones



Energías proyectadas para 2030

	TWh	E/Uy
Argentina	157.6	12
Brasil	818.1	61
Paraguay	37.0	3
Uruguay	13.5	1
Conjunto	1026.1	76

Fuentes de información:



Modelo de Uruguay en SimSEE
Prog. Estacional Nov. 2021
<https://www.adme.com.uy/informes/progest.php>



Modelo de Brasil en NEWAVE, programación Diciembre 2021 (CCEE)



Demanda 2021 (ONS)
<https://dados.ons.org.br/dataset/?tags=Hist%C3%B3rico+da+Opera%C3%A7%C3%A3o>



Plano Decenal de Expansão de Energia 2031 (MME - epe)
<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2031>



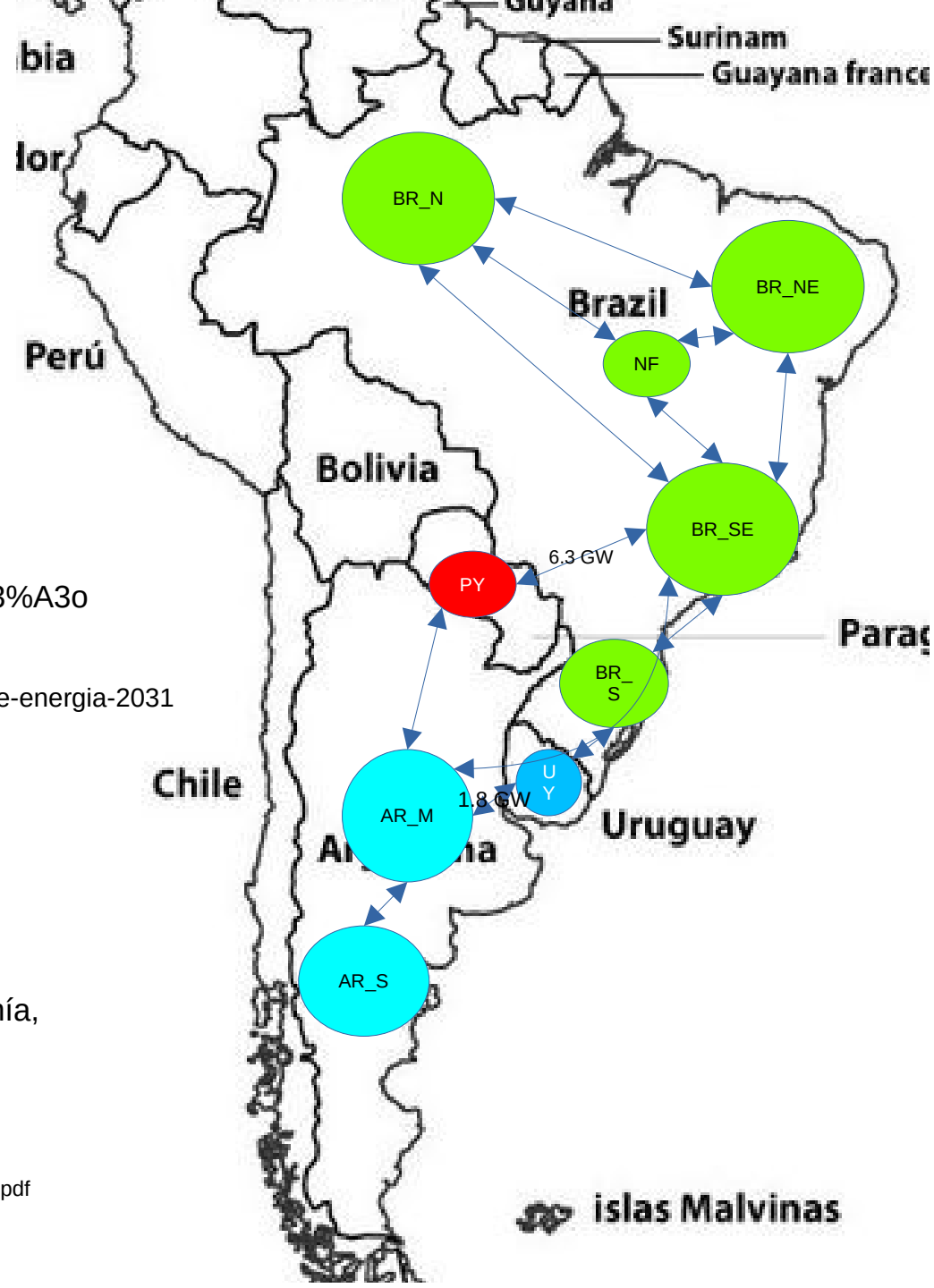
Modelo de Argentina en VMARGO.
Programación Estacional Nov2021-Abr2022.
<https://cammesaweb.cammesa.com/visual-margo/>



Lineamientos para un Plan de Transición Energética al 2030. Ministerio de Economía, Secretaría de Energía, Argentina. Octubre 2021
<https://www.argentina.gob.ar/economia/energia/planeamiento-energetico>

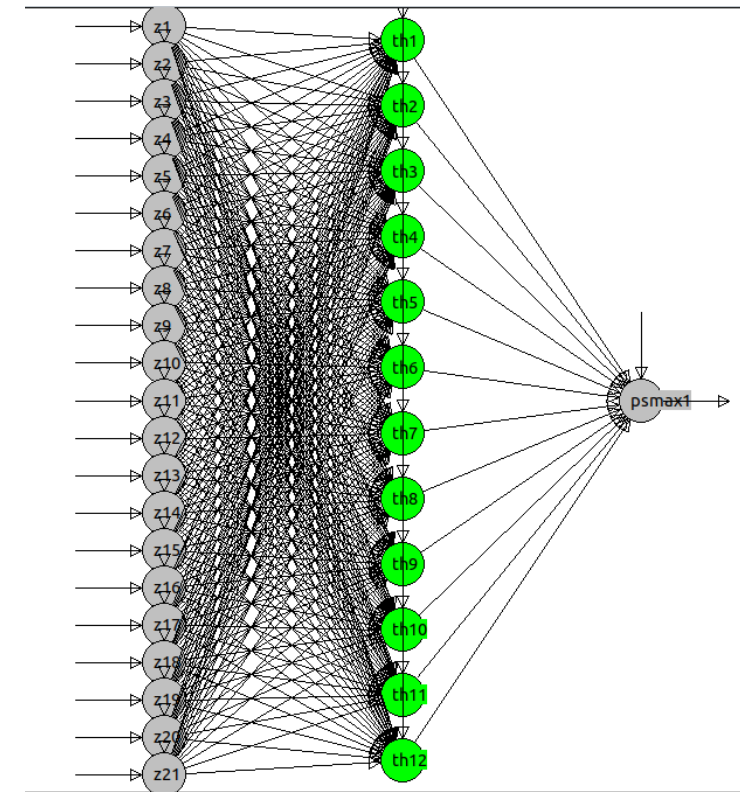


Plan Maestro de Generación. Período: 2021–2040. Paraguay. Febrero 2021
https://www.ande.gov.py/documentos/plan_maestro/PLAN%20MAESTRO%20DE%20GENERACION%20%202021-2040.pdf



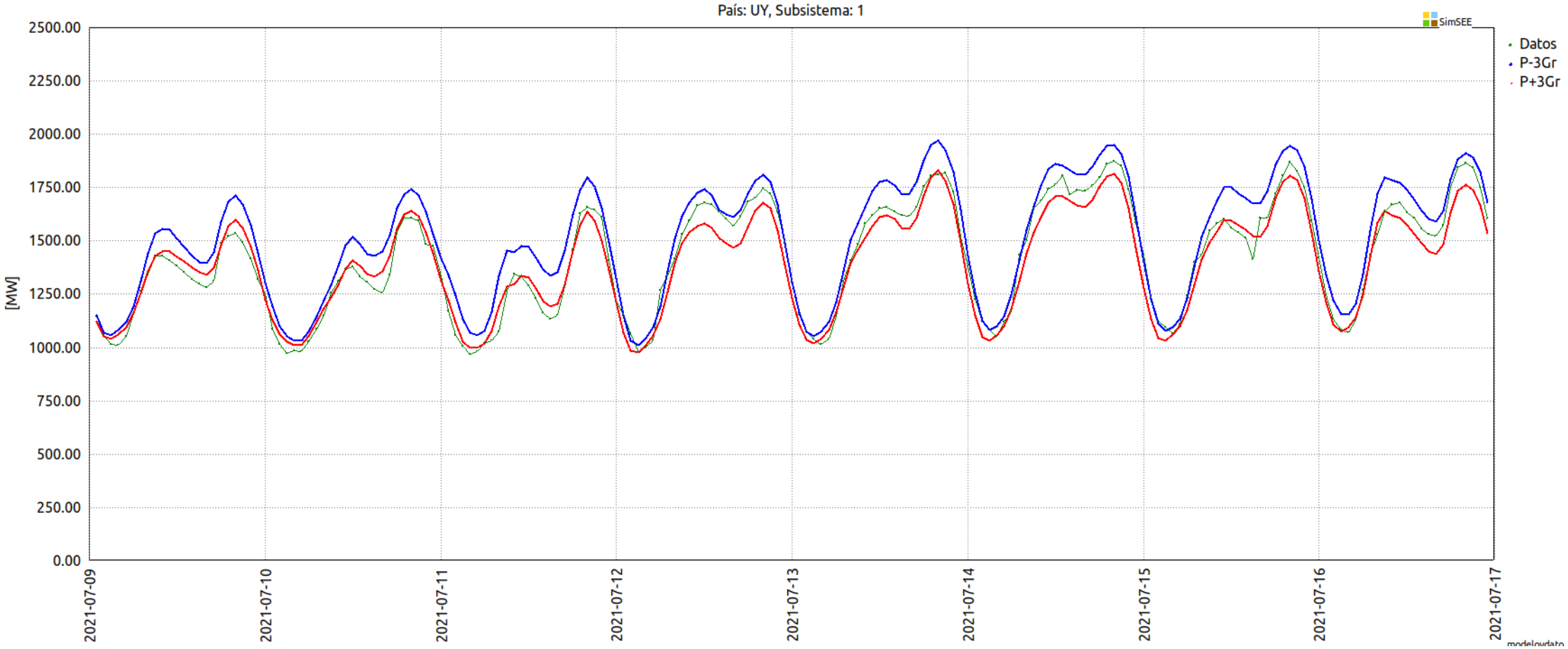
Modelado de las Demandas

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	
VERSION_FORMATO_SERIE:		3//										
11												
2021	1	1	0	0	0	// año mes día hora minuto segundo de la fecha de primer muestra						
1// periodo de muestreo en horas												
8760// cantidad de puntos totales por serie												
1// cantidad de puntos en un ciclo												
1// cantidad de crónicas por serie												
yyyyyyyyyyyyyyyyyy		// tipo de cada serie y = SALIDA, x = ENTRADA										
kCron:		1										
	SE	S	NE	N	FRT_Temp	MTG_Temp	PAL_Temp	RDJ_Temp	SLV_Temp	SNP_Temp	diasem	
	2021-01-01 00:00:00	33498.4	9060.6	10343.5	5511.8	24.1	23.0	19.7	22.7	19.6	19.8	6
	2021-01-01 01:00:00	33183.0	9020.2	10428.2	5470.1	23.5	22.9	19.7	22.2	18.8	19.6	6
	2021-01-01 02:00:00	32630.7	8696.5	10428.9	5497.6	23.2	23.0	18.9	22.0	18.6	19.2	6
	2021-01-01 03:00:00	31738.5	8338.1	10380.6	5508.8	23.1	23.0	18.7	21.9	18.9	19.1	6
	2021-01-01 04:00:00	31233.2	8081.1	10244.2	5408.8	22.7	22.9	18.5	21.9	18.8	19.1	6
	2021-01-01 05:00:00	29944.3	7716.1	9499.5	5381.0	22.7	22.8	18.0	22.2	19.2	19.1	6
	2021-01-01 06:00:00	28583.6	7322.3	8972.6	5118.8	25.4	23.5	22.3	24.9	22.4	20.8	6
	2021-01-01 07:00:00	28589.8	7383.2	8838.3	4938.0	26.2	25.9	22.8	26.4	23.9	20.7	6
	2021-01-01 08:00:00	29052.2	7472.9	8734.1	4865.5	27.0	27.1	23.4	27.3	24.8	20.6	6
	2021-01-01 09:00:00	29675.1	7680.8	8612.7	4837.3	27.4	28.2	24.2	27.9	25.6	21.1	6
	2021-01-01 10:00:00	30490.9	7904.7	8609.4	4803.4	28.1	29.3	25.5	28.4	27.0	22.1	6
	2021-01-01 11:00:00	31191.9	8018.6	8657.8	4753.3	31.8	31.6	28.1	28.7	29.5	23.1	6
	2021-01-01 12:00:00	31208.0	7792.8	8714.4	4748.5	32.4	31.8	28.5	27.2	30.5	24.1	6
	2021-01-01 13:00:00	30782.2	7654.7	8767.5	4840.7	33.4	31.0	28.9	26.2	31.5	24.9	6
	2021-01-01 14:00:00	30618.7	7653.0	8979.2	4937.6	33.9	31.4	29.3	25.8	31.4	24.5	6
	2021-01-01 15:00:00	30815.3	7800.3	9159.0	5014.8	33.4	30.1	29.3	25.4	31.8	24.3	6
	2021-01-01 16:00:00	31429.6	8149.5	9325.6	5069.8	31.5	28.2	28.8	24.8	31.1	23.2	6
	2021-01-01 17:00:00	32311.7	8660.7	9565.5	5087.0	29.4	26.9	27.8	24.2	29.0	23.0	6
	2021-01-01 18:00:00	34157.9	9102.1	10760.2	5250.7	28.6	25.4	25.0	22.8	25.7	21.3	6
	2021-01-01 19:00:00	37790.4	10137.9	11263.2	5555.9	27.9	25.3	23.9	22.5	24.3	20.9	6



- 21 Entradas: temperatura media diaria, el tipo de día, el instante temporal y las series de senos y cosenos del instante temporal que permiten captar los tres primeros armónicos del ciclo anual, semanal y diario.
- Capa Oculta: 12 neuronas con saturación del tipo Tangente Hiperbólica (fully-connected).
- Capa de Salida: una neurona con saturación del tipo PonderSoftMax.

Ejemplo de salida del modelo Demanda Uruguay +/-3Gr



Series Hidro (iN34:1910, Ar:1943, UY:1909, BR:1931, PY:1978)

	País	Central		País	Central		País	Central		País	Central		País	Central
1	Pacífico	iN34	26	BR	BATALHA	51	BR	JORDAO	76	BR	MIRANDA	101	BR	FOZ R. CLARO
2	UY	Bonete	27	BR	CORUMBA III	52	BR	G.B. MUNHOZ	77	BR	CAPIM BRANC1	102	BR-PY	ITAIPU
3	UY	Palmar	28	BR	EMBORCACAO	53	BR	SEGREDO	78	BR	CORUMBA I	103	BR	MANSO
4	UY-AG	Salto Grande	29	BR	NOVA PONTE	54	BR	SLT.SANTIAGO	79	BR	FUNIL-GRANDE	104	BR	PONTE PEDRA
5	AG	Alicurá	30	BR	CAPIM BRANC2	55	BR	SALTO OSORIO	80	BR	BARRA GRANDE	105	BR	OLHO DAGUA
6	AG	Chocón	31	BR	ITUMBIARA	56	BR	SAO JOAO	81	BR	CAMPOS NOVOS	106	BR	QUEBRA QUEIX
7	AG	Condor Cliff	32	BR	CACH.DOURADA	57	BR	BAIXO IGUACU	82	BR	MACHADINHO	107	BR	ITUMIRIM
8	AG	Futeleufú	33	BR	SAO SIMAO	58	BR	CACHOEIRINHA	83	BR	MONJOLINHO	108	BR	SALTO
9	AG	Planicie Banderita	34	BR	I. SOLTEIRA	59	BR	PAI QUERE	84	BR	SALTO CAXIAS	109	BR	JAURU
10	AG-PY	Yacyretá	35	BR	A.A. LAYDNER	60	BR	SAO ROQUE	85	BR	BARRA BONITA	110	BR	ITAGUACU
11	BR	CAMARGOS	36	BR	PIRAJU	61	BR	GARIBALDI	86	BR	A.S. LIMA	111	PY	YGUAZU
12	BR	ITUTINGA	37	BR	CHAVANTES	62	BR	ITA	87	BR	IBITINGA	112	PY	Acaray
13	BR	FURNAS	38	BR	L.N. GARCEZ	63	BR	PASSO FUNDO	88	BR	PROMISSAO			
14	BR	M. DE MORAES	39	BR	CANOAS II	64	BR	FOZ CHAPECO	89	BR	SLT VERDINHO			
15	BR	ESTREITO	40	BR	CANOAS I	65	BR	ESPORA	90	BR	NAVANHANDAVA			
16	BR	JAGUARA	41	BR	STA BRANCA T	66	BR	SAO JOSE	91	BR	TRES IRMAOS			
17	BR	IGARAPAVA	42	BR	TIBAGI MONT	67	BR	PASSO S JOAO	92	BR	I. SOLT. EQV			
18	BR	VOLTA GRANDE	43	BR	MAUA	68	BR	TRAICAO	93	BR	JUPIA			
19	BR	P. COLOMBIA	44	BR	SAO JERONIMO	69	BR	PEDREIRA	94	BR	P. PRIMAVERA			
20	BR	CACONDE	45	BR	CAPIVARA	70	BR	GUARAPIRANGA	95	BR	CACU			
21	BR	E. DA CUNHA	46	BR	TAQUARUCU	71	BR	BILLINGS	96	BR	B. COQUEIROS			
22	BR	A.S. OLIVEIRA	47	BR	ROSANA	72	BR	SAO DOMINGOS	97	BR	OURINHOS			
23	BR	MARIMBONDO	48	BR	S GDE CHOPIM	73	BR	PONTE NOVA	98	BR	SERRA FACAO			
24	BR	A. VERMELHA	49	BR	STA CLARA PR	74	BR	EDGARD SOUZA	99	BR	ITIQUIRA II			
25	BR	BOCAINA	50	BR	FUNDAO	75	BR	CORUMBA IV	100	BR	ITIQUIRA I			

Variables de estado consideradas

1	AR_hid_ALI_Vol	21	BR_hid_CORUMBA_III_Vol	41	BR_hid_MACHADINHO_Vol	61	BR_hid_SAO_SIMAO_Vol
2	AR_hid_CHO_Vol	22	BR_hid_CORUMBA_IV_Vol	42	BR_hid_MANSO_Vol	62	BR_hid_SEGREDO_Vol
3	AR_hid_PBA_Vol	23	BR_hid_CURUA-UNA_Vol	43	BR_hid_MARIMBONDO_Vol	63	BR_hid_SERRA_FACAO_Vol
4	AR_hid_PIE_Vol	24	BR_hid_EMBORCACAO_Vol	44	BR_hid_MAUA_Vol	64	BR_hid_SERRA_MESA_Vol
5	BR_hid_A.A. LAYDNER_Vol	25	BR_hid_ERNESTINA_Vol	45	BR_hid_MIRANDA_Vol	65	BR_hid_SINOP_Vol
6	BR_hid_A. VERMELHA_Vol	26	BR_hid_ESPORA_Vol	46	BR_hid_NOVA_PONTE_Vol	66	BR_hid_SLT.SANTIAGO_Vol
7	BR_hid_B. ESPERANCA_Vol	27	BR_hid_FUNIL_Vol	47	BR_hid_P. CAVALO_Vol	67	BR_hid_SOBRADINHO_Vol
8	BR_hid_BALBINA_Vol	28	BR_hid_FURNAS_Vol	48	BR_hid_P. ESTRELA_Vol	68	BR_hid_STA_CLARA_PR_Vol
9	BR_hid_BARRA_BONITA_Vol	29	BR_hid_G.B. MUNHOZ_Vol	49	BR_hid_PARAIBUNA_Vol	69	BR_hid_TRES_IRMAOS_Vol
10	BR_hid_BARRA_GRANDE_Vol	30	BR_hid_G.P. SOUZA_Vol	50	BR_hid_PASSO_FUNDO_Vol	70	BR_hid_TRES_MARIAS_Vol
11	BR_hid_BATALHA_Vol	31	BR_hid_GARIBALDI_Vol	51	BR_hid_PASSO_REAL_Vol	71	BR_hid_TUCURUI_Vol
12	BR_hid_BILLINGS_Vol	32	BR_hid_GUARAPIRANGA_Vol	52	BR_hid_PEIXE_ANGIC_Vol	72	PY_hid_Yguazú_Vol
13	BR_hid_CACONDE_Vol	33	BR_hid_I. SOLTEIRA_Vol	53	BR_hid_PROMISSAO_Vol	73	UY_hid_Bonete_Vol
14	BR_hid_CACU_Vol	34	BR_hid_IRAPE_Vol	54	BR_hid_QUEBRA_QUEIX_Vol	74	UY_hid_Palmar_Vol
15	BR_hid_CAMARGOS_Vol	35	BR_hid_ITAPARICA_Vol	55	BR_hid_QUEIMADO_Vol	75	UY_hid_SaltoGrande_CTM50_Vol
16	BR_hid_CAMPOS_NOVOS_Vol	36	BR_hid_ITUMBIARA_Vol	56	BR_hid_RETIRO_BAIXO_Vol	76	iN34
17	BR_hid_CAPIM_BRANC1_Vol	37	BR_hid_JAGUARI_Vol	57	BR_hid_RONDON_II_Vol		
18	BR_hid_CAPIVARA_Vol	38	BR_hid_JORDAO_Vol	58	BR_hid_SAMUEL_Vol		
19	BR_hid_CHAVANTES_Vol	39	BR_hid_LAJES_Vol	59	BR_hid_SANTA_BRANCA_Vol		
20	BR_hid_CORUMBA_I_Vol	40	BR_hid_M. DE MORAES_Vol	60	BR_hid_SAO_ROQUE_Vol		

Temperatura radiación solar y velocidad de viento (CEGH)

Se consutruyó CEGH en base a series de re-análisis en 27 puntos distribuidos entre los cuatro países.

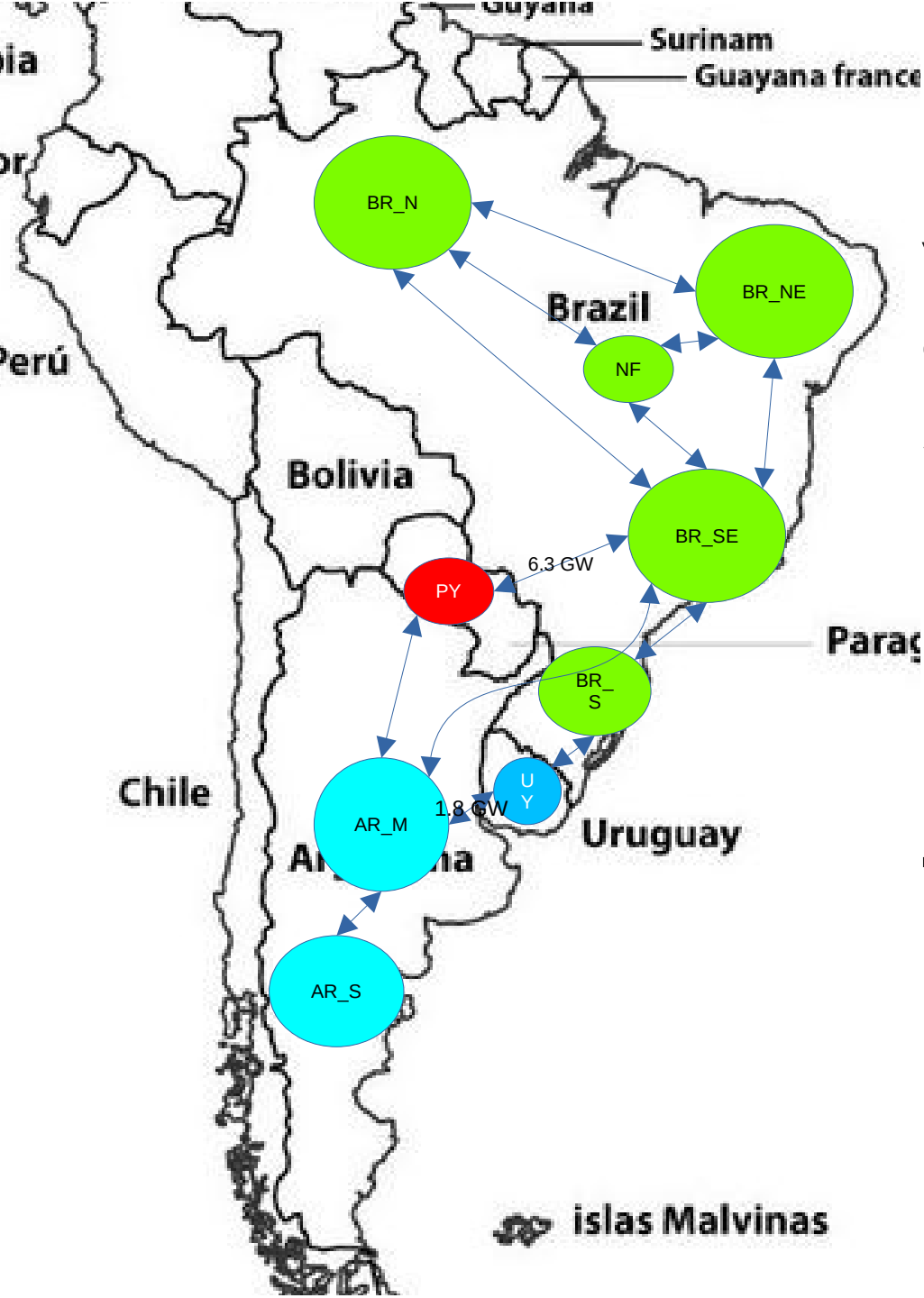
Las series fueron bajadas del sitio: <https://cds.climate.copernicus.eu>

Las centrales térmicas se agruparon por costo variable y flexibilidad

CV000 = Autodespachadas, biomasa, co-generación. (en la base)

CV060 = Ciclos combinados y centrales nucleares y de carbón (despacho diario)

CV150 = Turbinas de Ciclo Abierto - Moto-Generadores (despacho flexible)



Simulación UY+BR+PY+AG

variables de estado: 76

discretización del espacio de estado:

$$52 * 3 * 5^{76} = 2 \times 10^{55}$$

Recursión de Bellman memoria:

$$2 * 10^{55} * 10 / 1E9 = 2 * 10^{47} \text{GB}$$

Dimensión Simplex sobre: 5000x2000

Tiempo de resolución Simplex: 64 ms

hora de resolver la recursión de Bellman:

$$2 * 10^{55} * 64 / 1000 / 3600 / 24 / 365 / 1000 = 4 * 10^{43} \text{ milenios!!!!}$$

Algunos resultados

Tiempo de aprendizaje 200 iterations: 80 horas <<<<< **4*10⁴³**
millenios!!!!

2030 Costo Marginales [US\$/MWh]:

	h00h06	h06h12	h12h18	h18h26	Daily
AR_ComPat	40.1	40.1	40.2	40.6	40.3
AR_Mer	41.0	40.9	41.0	41.4	41.1
BR_N	17.1	17.2	17.8	21.5	18.4
BR_NE	15.9	16.0	16.6	20.3	17.2
BR_NO	16.9	16.9	17.6	21.2	18.2
BR_S	17.2	17.2	17.9	21.7	18.5
BR_SE	17.0	17.1	17.7	21.5	18.3
PY	17.4	17.4	18.1	21.9	18.7
UY	46.8	48.0	48.4	50.5	48.4

Algunos resultados

	US\$/MWh	TWh	TWh	TWh	TWh	TWh	TWh	TWh	TWh	TWh	TWh	TWh
	Costo Marginal	Demanda	Exportación	Excedentes	Pérdidas	Hidro	Eolica	Solar	TCV000	TCV060	TCV150	Imp
Argentina	39	158	0.82	0.00	1.33	40.38	22.47	6.50	3.32	77.06	0.00	10.05
Brasil	15	818	0.88	26.17	2.34	544.93	110.09	56.92	115.68	5.33	2.14	12.36
Paraguay	16	37	21.19	0.00	0.71	58.89	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Uruguay	48	13	0.18	1.21	0.01	5.77	5.07	0.73	2.62	0.00	0.00	0.66

	US\$/MWh	TWh	%Dem	%Dem	%Dem	%Dem	%Dem	%Dem	%Dem	%Dem	%Dem	%Dem
	Costo Marginal	Demanda	Exportación	Excedentes	Pérdidas	Hidro	Eolica	Solar	TCV000	TCV060	TCV150	Imp
Argentina	39	158	0.52%	0.00%	0.84%	25.61%	14.26%	4.12%	2.11%	48.88%	0.00%	6.37%
Brasil	15	818	0.11%	3.20%	0.29%	66.61%	13.46%	6.96%	14.14%	0.65%	0.26%	1.51%
Paraguay	16	37	57.27%	0.00%	1.93%	159.20%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Uruguay	48	13	1.37%	8.95%	0.10%	42.86%	37.68%	5.45%	19.49%	0.00%	0.01%	4.93%

Principales dificultades

- **La mayor dificultad actual está en la resolución del Despacho de un paso de tiempo por la dimensión del problema de optimización del orden de (5000 variables x 2000 restricciones). Esto lleva a fallas por truncamiento en los resolvedores Simplex disponibles. SimSEE utiliza tres formas de resolver. Si falla la primera prueba la segunda y si falla la segunda prueba la tercera. Igualmente se considera que este es un "talón de aquiles" de las soluciones actuales.**
- **El tema del POSTIZADO dinámico crea dificultades por las diferencias horarias entre los nodos. Si por ej. se quisiera incorporar Chile tendríamos que resolver cómo hacer el POSTIZADO.**

Divide Et Impera



- **Particionar el problema por CONJUNTO DE NODOS (CN)**
- **Cada CN resuelve suponiendo conocido un modelo de los costos marginales de los CN a los que está interconectado**
- **El modelo de costos marginales de un CN debe ser tal que permita reflejar la sensibilidad del costo marginal a los intercambios.**
- **En forma iterativa, los CN irán aprendiendo su Política de Operación y aprendiendo el modelo de costos marginales de sus vecinos.**
- **Esta implementación permite partir la resolución del despacho en sub-problemas de menor dimensión.**
- **Esta implementación permite considerar un postizado dinámico difernete para cada CN.**



**Gracias por vuestra
atención.**