

# Modelo Simple de optimización de un Sistema Hidrotérmico con ERNC

# Modelo Simple para la Planificación de Inversiones de Generación Eléctrica

Reporte Técnico N° 5

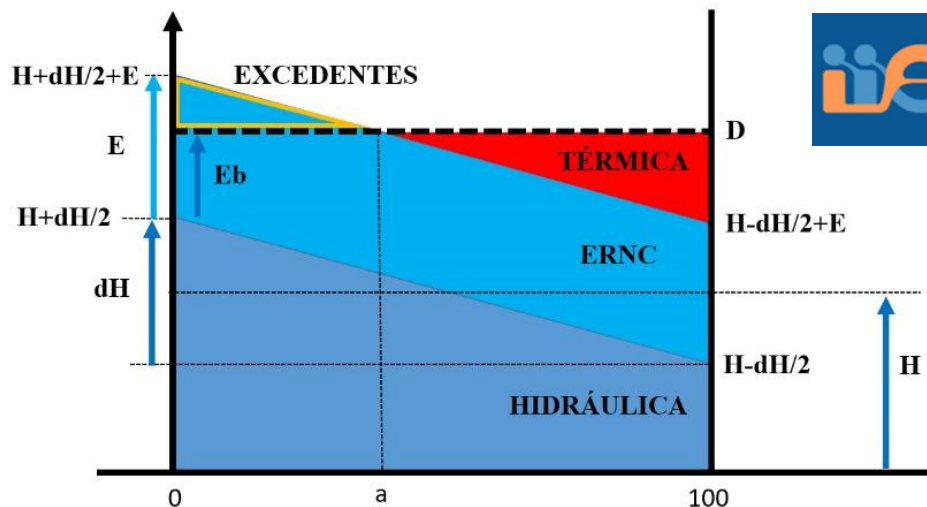
Gonzalo Casaravilla

Grupo GEE- Departamento de Potencia - Instituto de Ingeniería Eléctrica

Universidad de la República - Uruguay

Setiembre 2021

[https://iie.fing.edu.uy/investigacion/grupos/gee/wp-content/uploads/sites/19/2021/09/Modelo\\_Simple\\_de\\_PIG-2.pdf](https://iie.fing.edu.uy/investigacion/grupos/gee/wp-content/uploads/sites/19/2021/09/Modelo_Simple_de_PIG-2.pdf)




 Universidad de la República - Facultad de Ingeniería  
**Instituto de Ingeniería Eléctrica**  
 "Prof. Ing. Agustín Cisa"

Departamento de Potencia  
 Planificación y Operación Óptimas de  
 Sistemas de Energía Eléctrica

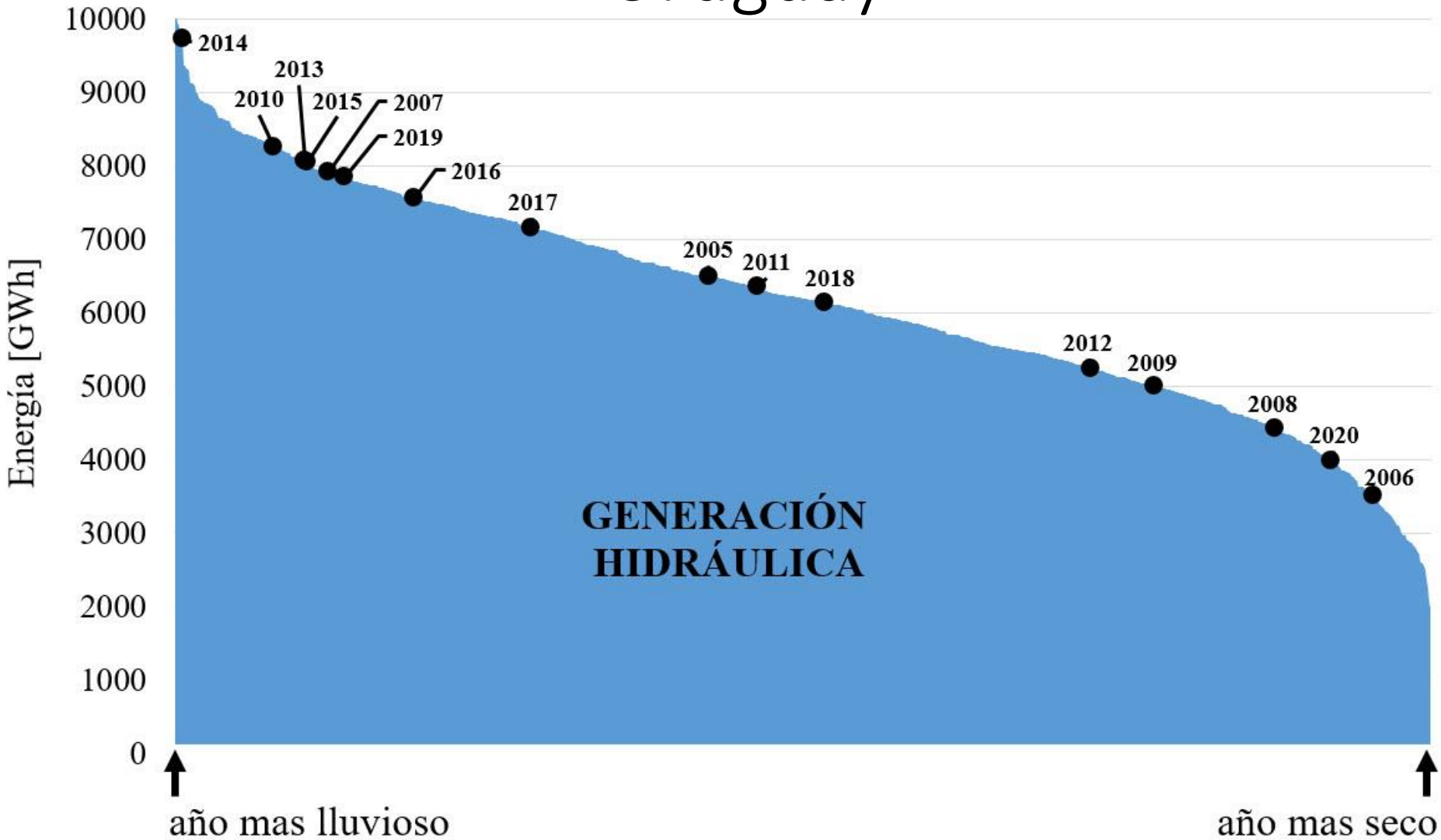
**GEE**

<https://iie.fing.edu.uy/investigacion/grupos/gee/>

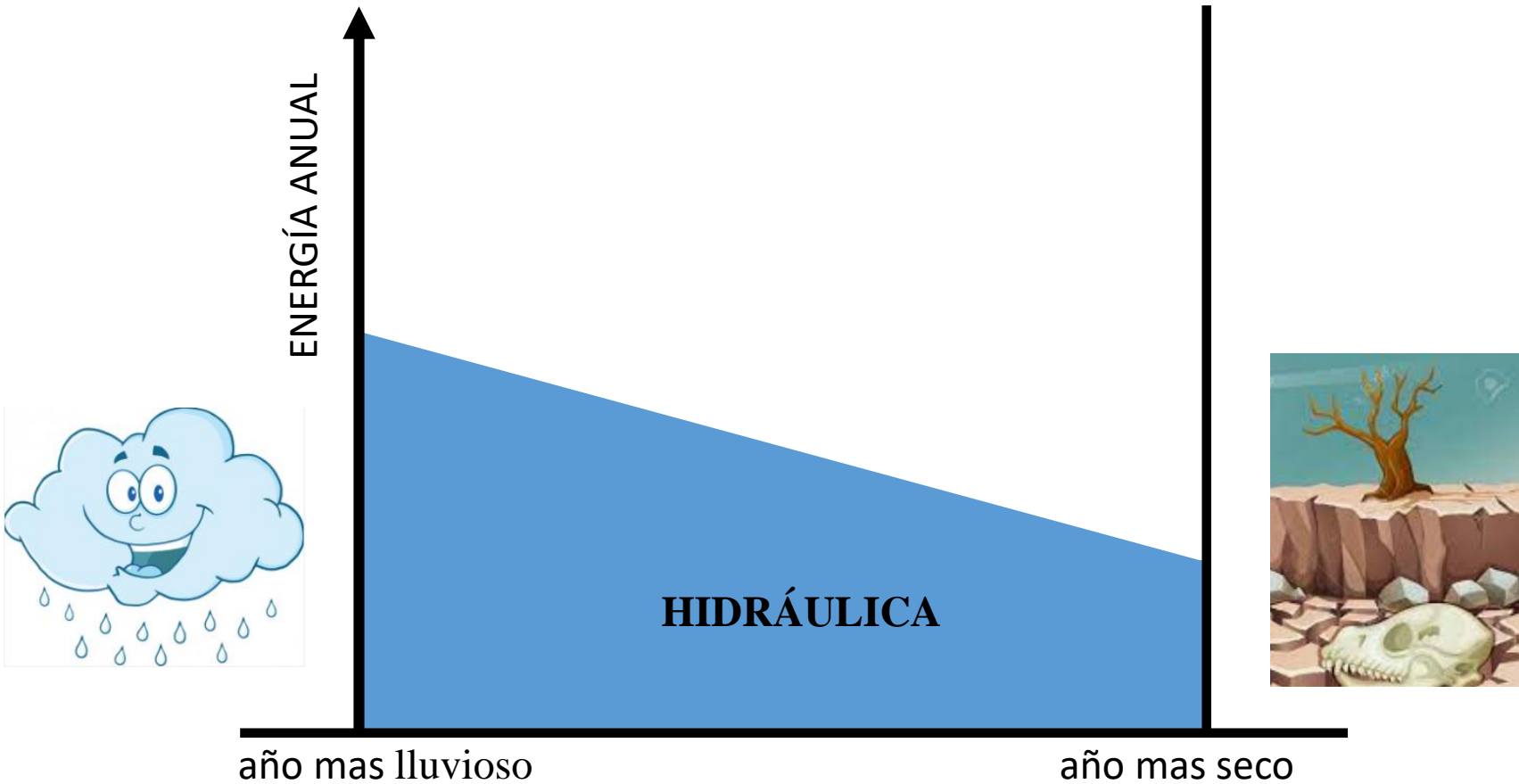
# Hipótesis para el Modelo Simple: es un estudio ENERGETICO y no se tiene en cuenta restricciones de POTENCIA

Como primera aproximación, para ver cuál es la cantidad **ÓPTIMA** de **ERNC**, solo se considera el costo **FIJO** de **ERNC** y todos los costos **VARIABLES** (combustible y venta de excedentes) ya que los demás costos son **FIJOS**.

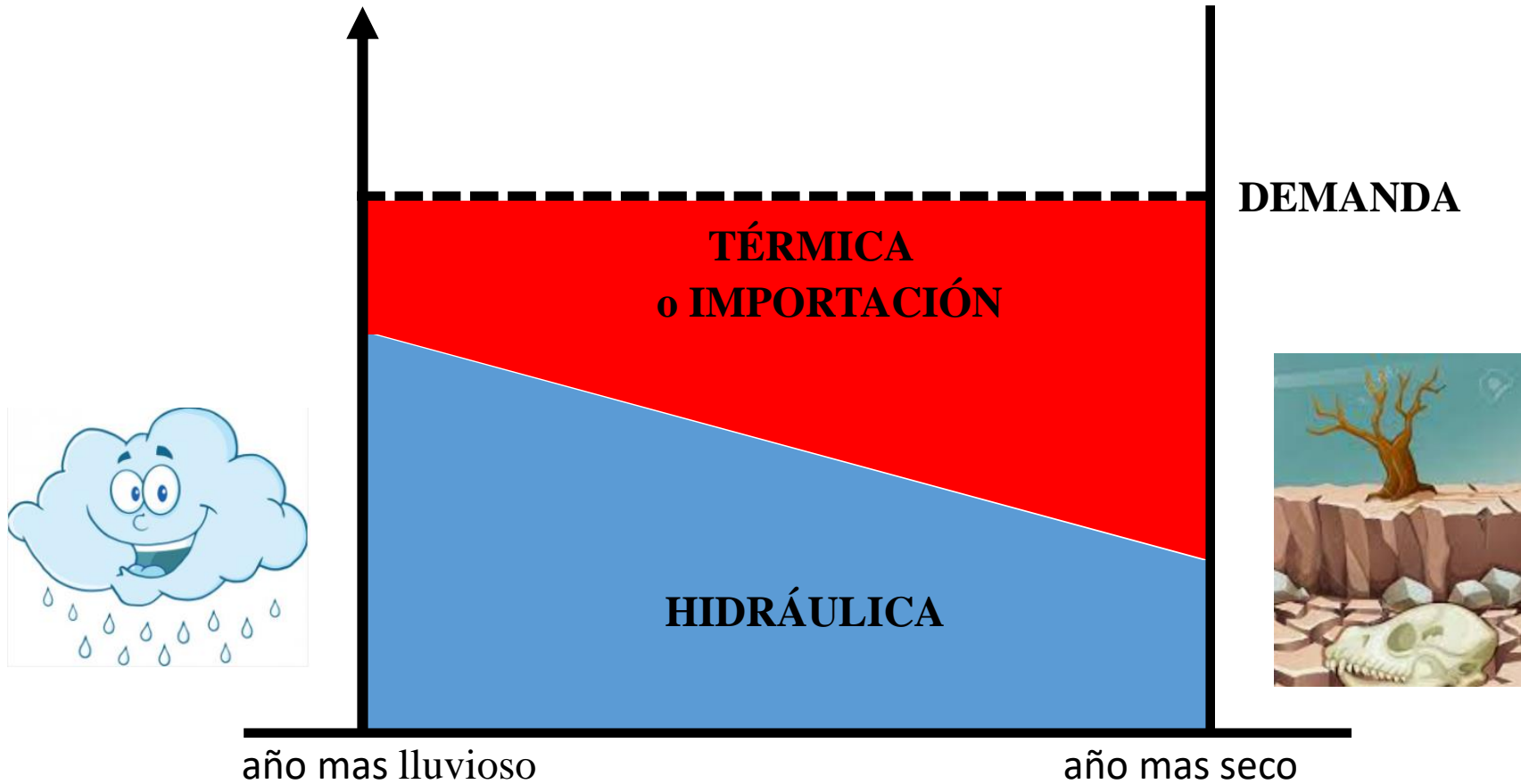
# Histórico de Generación Hidráulica de Uruguay



# Modelo Simple

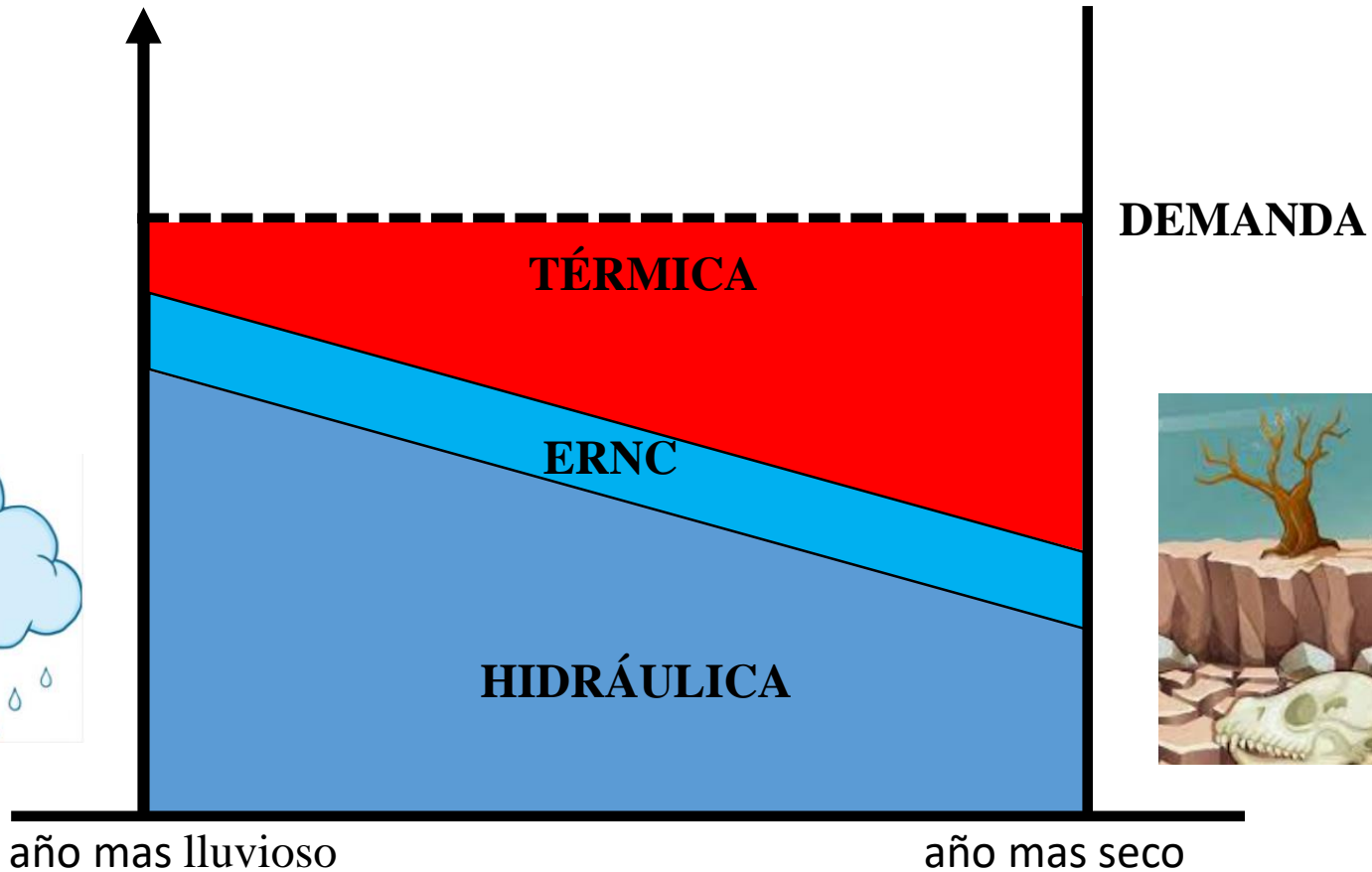


# Matriz de Generación a Optimizar

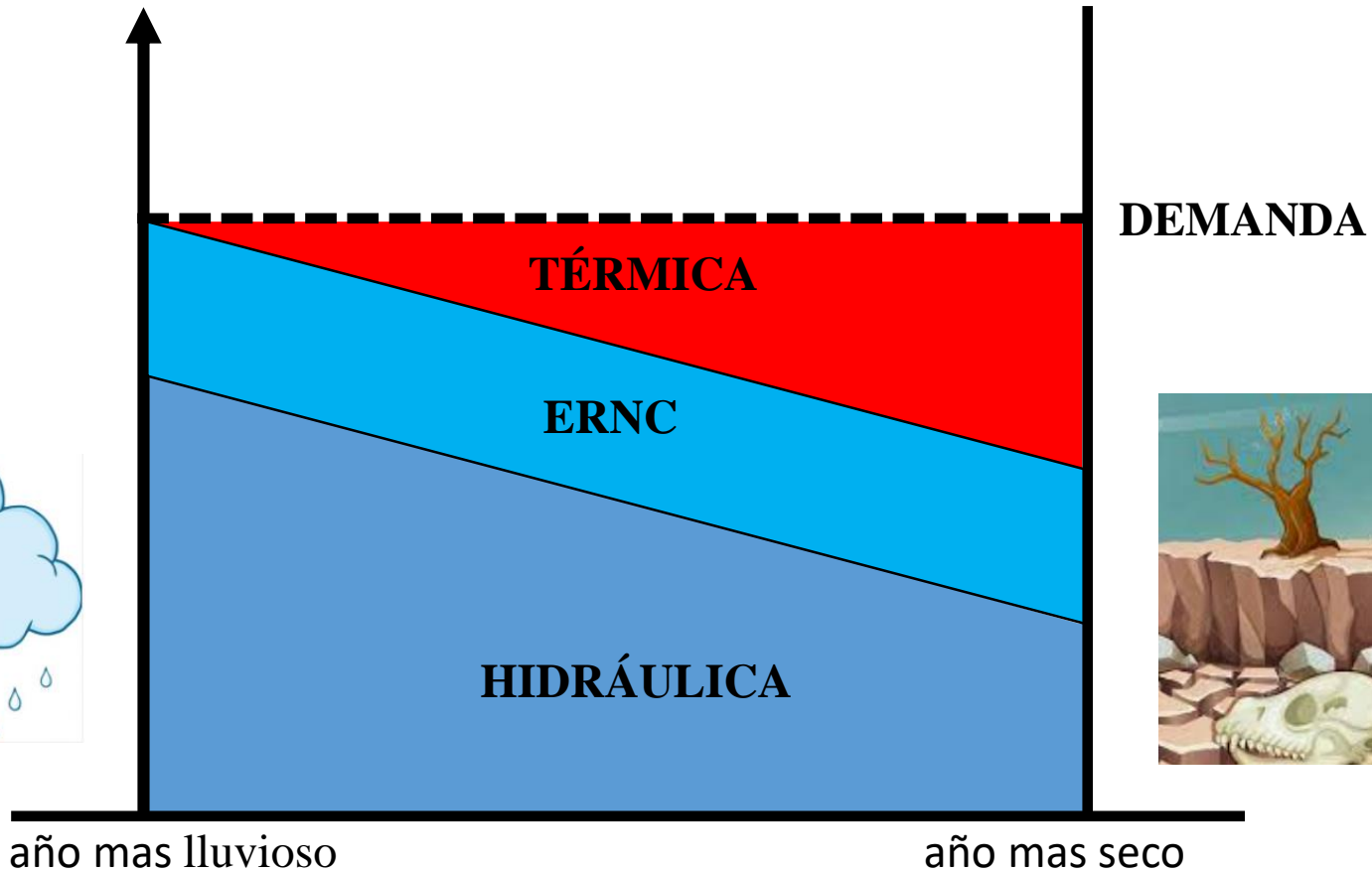


# La Receta: Sustitución de Térmica con ERNC

(Solar – Eólica y/o Biomasa)



# Máxima Sustitución sin Excedentes



año mas lluvioso

año mas seco

DEMANDA

TÉRMICA

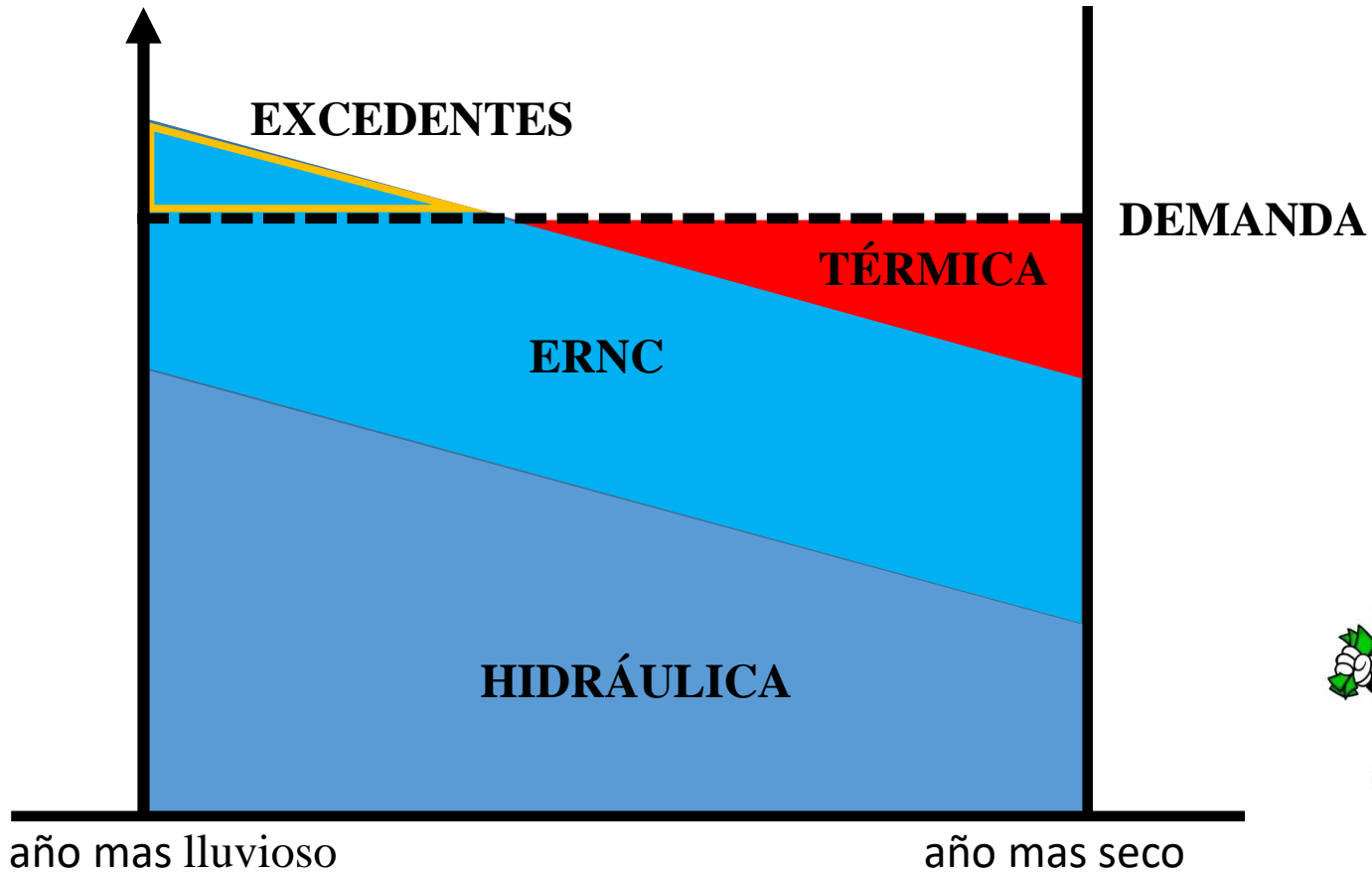
ERNC

HIDRÁULICA

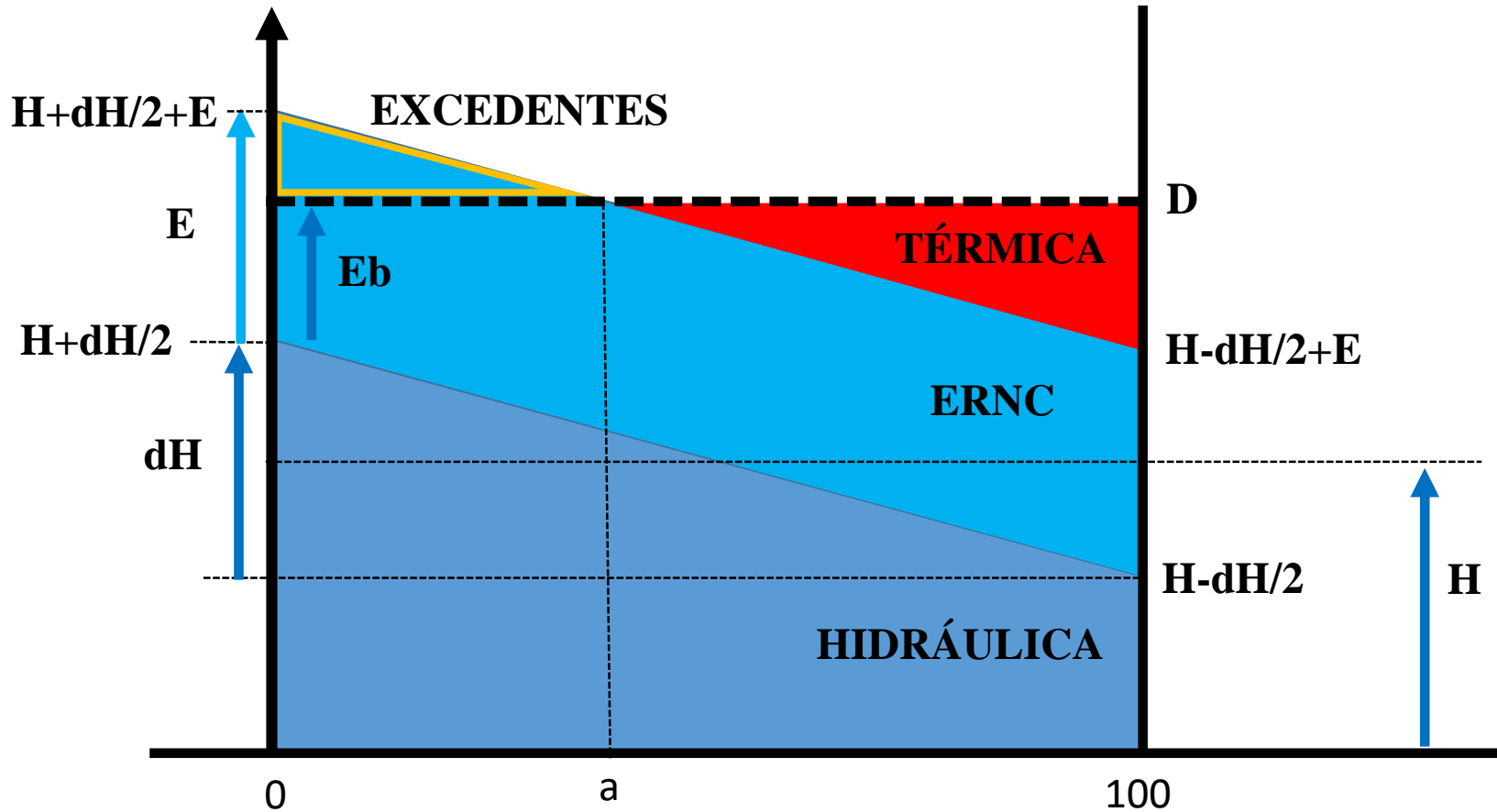




# Sustitución y aparición de Excedentes



# Cuentas...

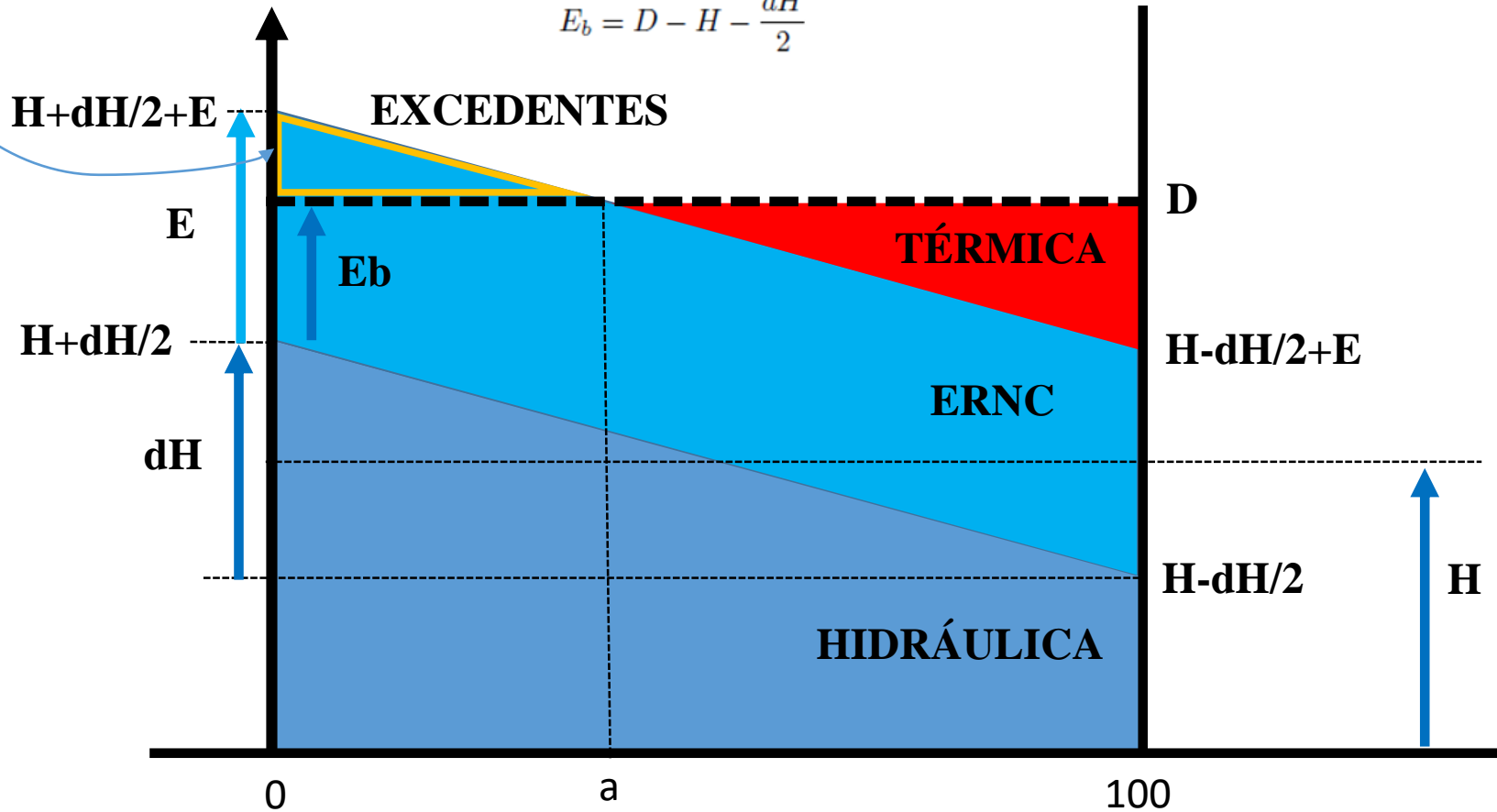


# Cuentas...

$$\frac{H + \frac{dH}{2} + E - D}{a} = \frac{dH}{100}$$

$$X = \frac{AREA_X}{100} = (H + \frac{dH}{2} + E - D) \times a \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{100}$$

$$E_b = D - H - \frac{dH}{2}$$



# Cálculo de $T(E)$ y $X(E)$

$$E_b = D - H - \frac{dH}{2} \quad (7)$$

Luego, por una parte, aplicando semejanza de triángulos al mercado como excedentes, se puede escribir la Ec. 8

$$\frac{H + \frac{dH}{2} + E - D}{a} = \frac{dH}{100} \quad (8)$$

y el área del triángulo de excedentes es la que muestra la Ec. 9

$$AREA_X = \left(H + \frac{dH}{2} + E - D\right) \times a \times \frac{1}{2} \quad (9)$$

Por tanto, el valor esperado (promedio) de excedentes  $X$ , es el que indica la Ec. 10

$$X = \frac{AREA_X}{100} = \left(H + \frac{dH}{2} + E - D\right) \times a \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{100} \quad (10)$$

Finalmente, sustituyendo en la Ec. 10 el valor de  $a$  a partir de la Ec. 8 y de la Ec. 7 resultan las expresiones para  $X$  que muestra la Ec. Ec. 11

$$X = \frac{\left(H + \frac{dH}{2} + E - D\right)^2}{2 \times dH} = \frac{(E - E_b)^2}{2 \times dH} \quad (11)$$

Por otra parte, del triángulo de la energía térmica de la Fig. 7 y aplicando nuevamente semejanza resulta la Ec. 12

$$\frac{[D - (H - \frac{dH}{2} + E)]}{100 - a} = \frac{dH}{100} \quad (12)$$

Haciendo un razonamiento similar, resultan finalmente en la Ec. 13 las expresiones del valor esperado  $T$  de energía térmica

$$T = \frac{(D - H + \frac{dH}{2} - E)^2}{2 \times dH} = \frac{(E_b + dH - E)^2}{2 \times dH} \quad (13)$$

# Óptimo del CAD (E)

$$CAD(E) = T(E) \times cv + E \times p_e - X(E) \times p_x$$

La función a optimizar es la que muestra la Ec. 14

$$CAD(E) = T(E) \times cv + E \times p_e - X(E) \times p_x \quad (14)$$

Para simplificar se hace el cambio de variable  $E^* = E - E_b$  en que  $E_b$  es constante. Para encontrar el óptimo, se iguala la derivada del  $CAD$  respecto a la variable  $E^*$  a cero y se despeja el valor que anula dicha derivada. Luego se deshace el cambio de variables, resultando el valor que muestra la Ec. 15

$$E_{opt} = E_b + dH \frac{(cv - p_e)}{(cv - p_x)} \quad (15)$$

Luego, evaluando  $T$  y  $X$  en el óptimo, resultan las expresiones 16 y 17. Observar que tanto  $E_{opt}$ ,  $T_{opt}$  y  $X_{opt}$  solo dependen de los valores variables  $c_v$ ,  $p_e$  y  $p_x$  y  $dH$ .

$$T_{opt} = \frac{1}{2} dH \left( \frac{p_e - p_x}{cv - p_x} \right)^2 \quad (16)$$

$$X_{opt} = \frac{1}{2} dH \left( \frac{c_v - p_e}{cv - p_x} \right)^2 \quad (17)$$

$$E_{opt} = E_b + dH \frac{(cv - p_e)}{(cv - p_x)}$$

$$T_{opt} = \frac{1}{2} dH \left( \frac{p_e - p_x}{cv - p_x} \right)^2$$

$$E_b = D - H - \frac{dH}{2}$$

$$X_{opt} = \frac{1}{2} dH \left( \frac{c_v - p_e}{cv - p_x} \right)^2$$

**EL ÓPTIMO DE  
T y X  
NO DEPENDE  
de D ni de H**



## Ejercicio 7: Determine las Potencias a instalar de Eólica y de TGs

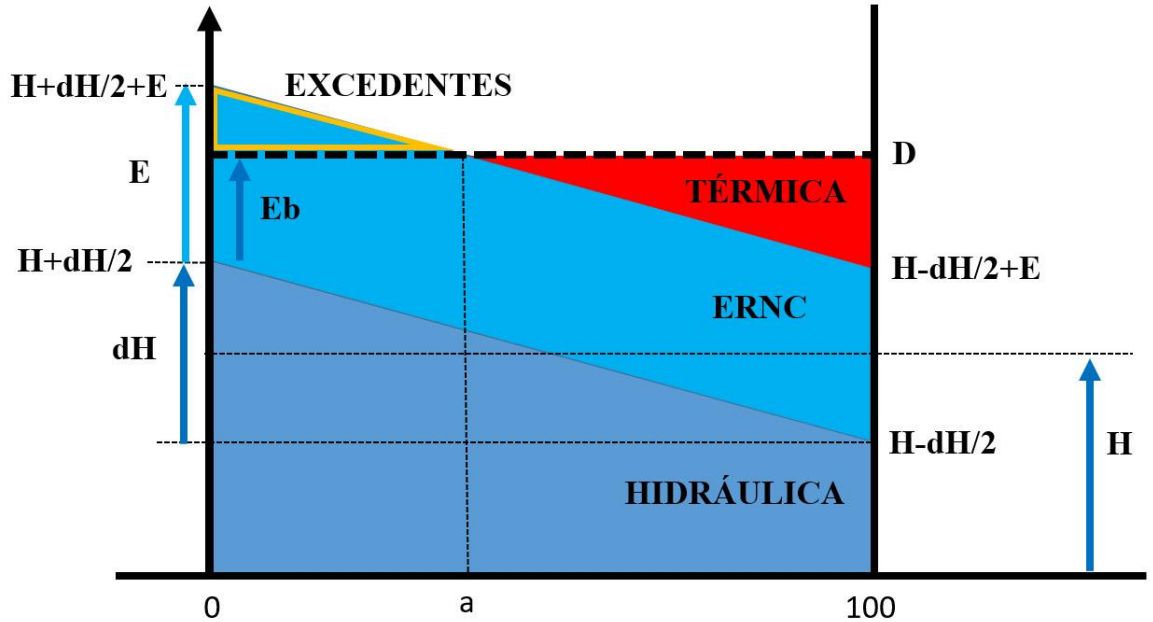
Es un análisis puramente ENERGÉTICO y no hay problemas de suministro de Potencia.

- Hay que alimentar una demanda de 12.000 GWh/año con distribución uniforme.
- Se dispone de un sistema hidráulico que genera entre 3.000 y 10.000 GWh/año con distribución uniforme.
- Se dispone de:
  - Eólica (con factor de planta de 0.4) con un pago por potencia disponible PP de 45 USD/MWh-d
  - TGs con  $fd=1$  que tiene un PP de 15 USD/MWh-d y un cv de 131 USD/MWh.
- Los excedentes NO se valorizan.

# Ejercicio 7: Determine las Potencias a instalar de Eólica y de TGs

## Modelo Simple

D	GWh	12000
H	GWh	6500
dH	GWh	7000
cv	USD/MWh	131
pe	USD/MWh-d	45
px	USD/MWh	0
pt	USD/MWh-d	15



$$CAD(E) = T(E) \times cv + E \times pe - X(E) \times px$$

Para garantizar que en un peor año se tenga energía suficiente, hay que poner una térmica que cubra  $T_{min} = 9,000 \text{ GWh} \quad (D - H + dH/2)$ .

**Caso 1:** Por cada MWh disponible de Eólica (que se paga a 45 USD/MWh-d) se deja de pagar un MWh-d de térmica (que se habría pagado a 15 USD/MWh-d), por lo que el costo resultante “real” es  $pe = (45 - 15) \text{ USD/MWh-d} = 30 \text{ USD/MWh-d}$ .

**Caso 2:** No saca nada de Térmica al ir aumentando la E.

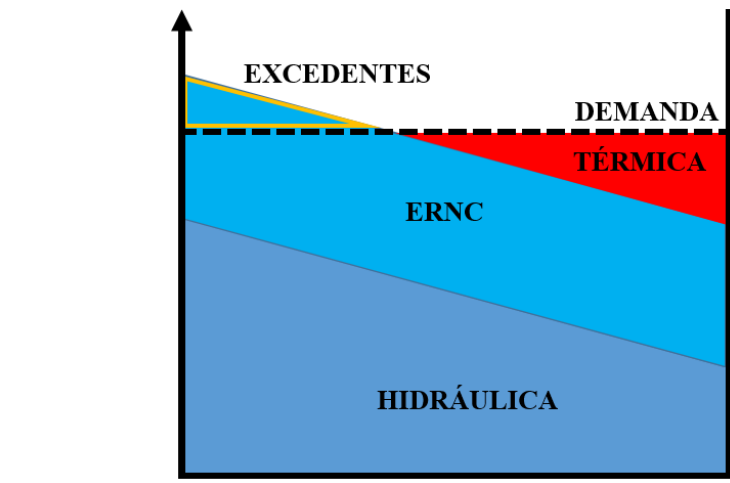
# Solución del Problema N° 7



¿Si tuviese que decidir apurado, optaría por el Caso 1 o el Caso 2?

	Caso 1	Caso 2
factor de utilidad de eólica	0.4	0.4
D GWh	12000	12000
H GWh	6500	6500
dH GWh	7000	7000
cv USD/MWh	131	131
pe USD/MWh-d	45	45
px USD/MWh	0	0
pt USD/MWh-d	15	15
Tmin_o GWh	9000	9000
\$Tmin_o MMUSD	135	135
PTmin_o MW-m	1027	
pe_real USD/MWh-d	30	45
Eb GWh	2000	2000
E_opt GWh	7397	6595
ETmin GWh	1603	
PT_min MW-m	183	
\$PTmin MUSD	24	
P_E_opt MW-m	844	753
\$E_opt MUSD	333	297
T_opt GWh	184	413
\$cvT_opt MUSD	24	54
MUSD	381	351

$$183 \text{ MW-m} = 1000 * (9.000 - 7.397) \text{ GWh} / 365 / 24$$



Caso 1 en que SE considera retorno del fijo de Térmica

	Energía MW-m	Energía GWh	Pago fijo MUSD	Pago var MUSD	MUSD	Potencia MW
Térmica	183	184	24	24	48	
Eólica	844	7,397	333		333	2,111
Hidráulica		6,500				
Generación		14,081	357	24	381	
Excedentes		2,081				

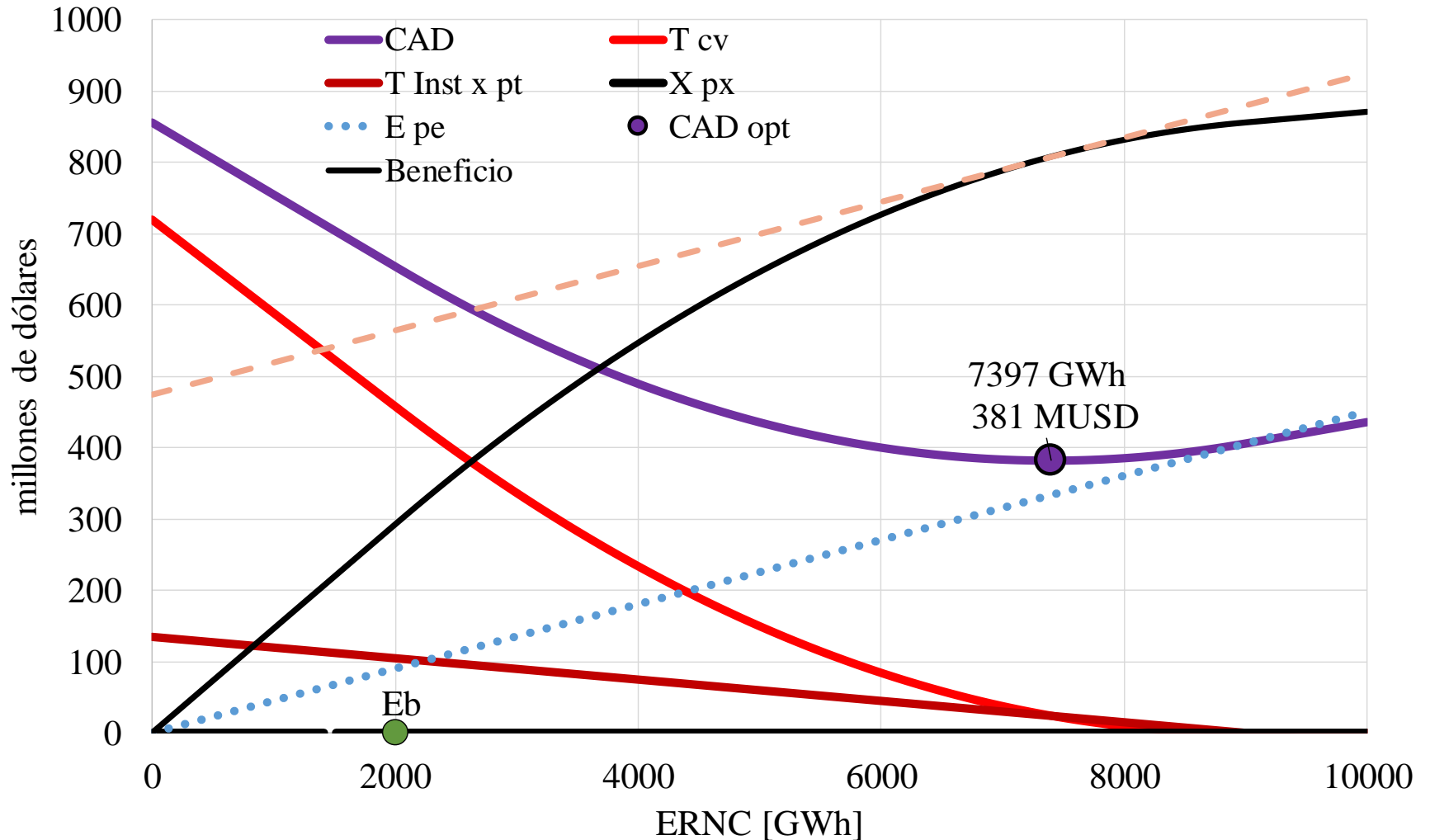
Caso 2 en que NO SE considera retorno del fijo de Térmica

	Energía MW-m	Energía GWh	Pago fijo MUSD	Pago var MUSD	MUSD	Potencia MW
Térmica	0	413	135	54	189	
Eólica	753	6,595	297		297	1,882
Hidráulica		6,500				
Generación		13,508	432	54	486	
Excedentes		1,508				

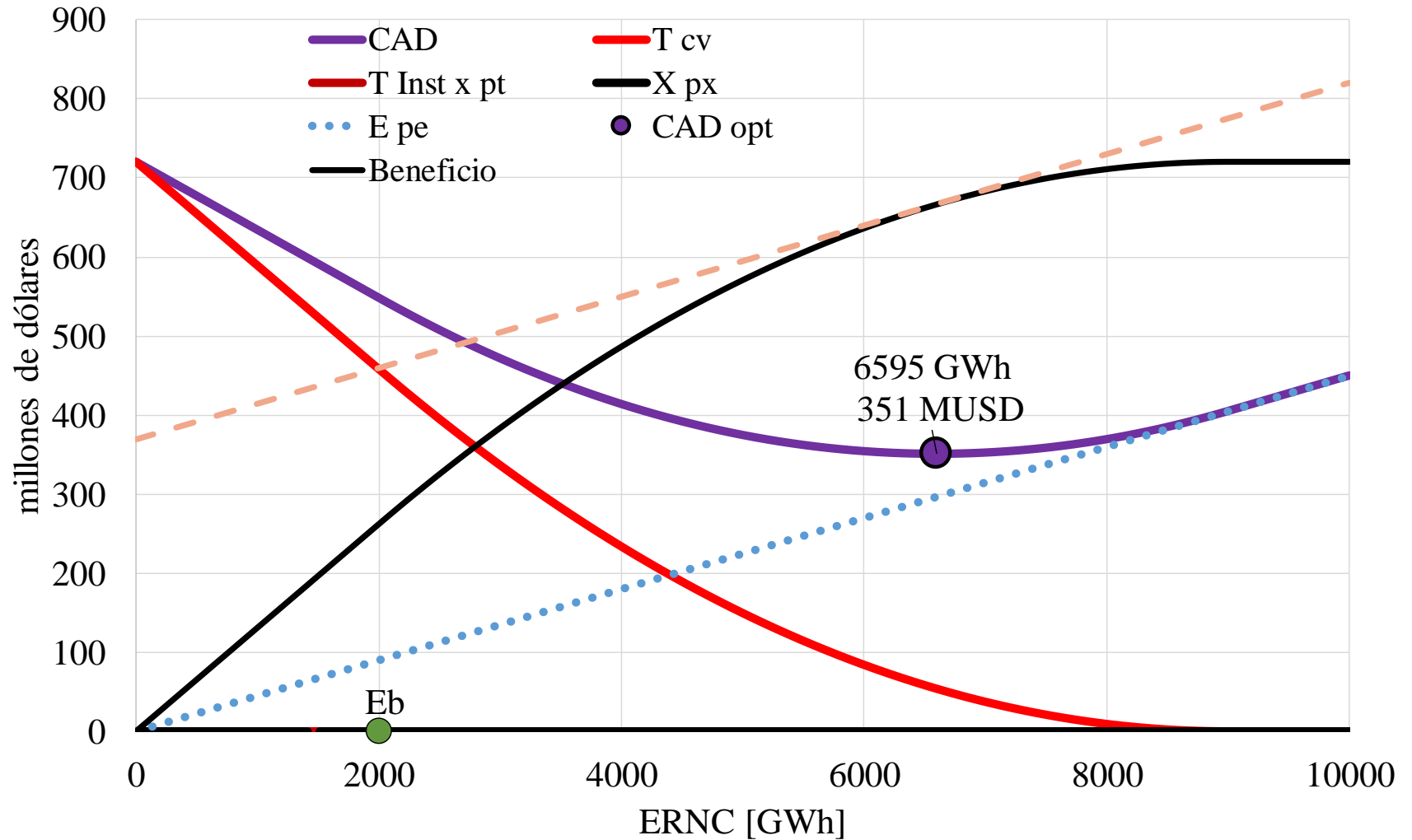
$$1.027 \text{ MW-m} = 1000 * 9000 \text{ GWh} / 365 / 24$$



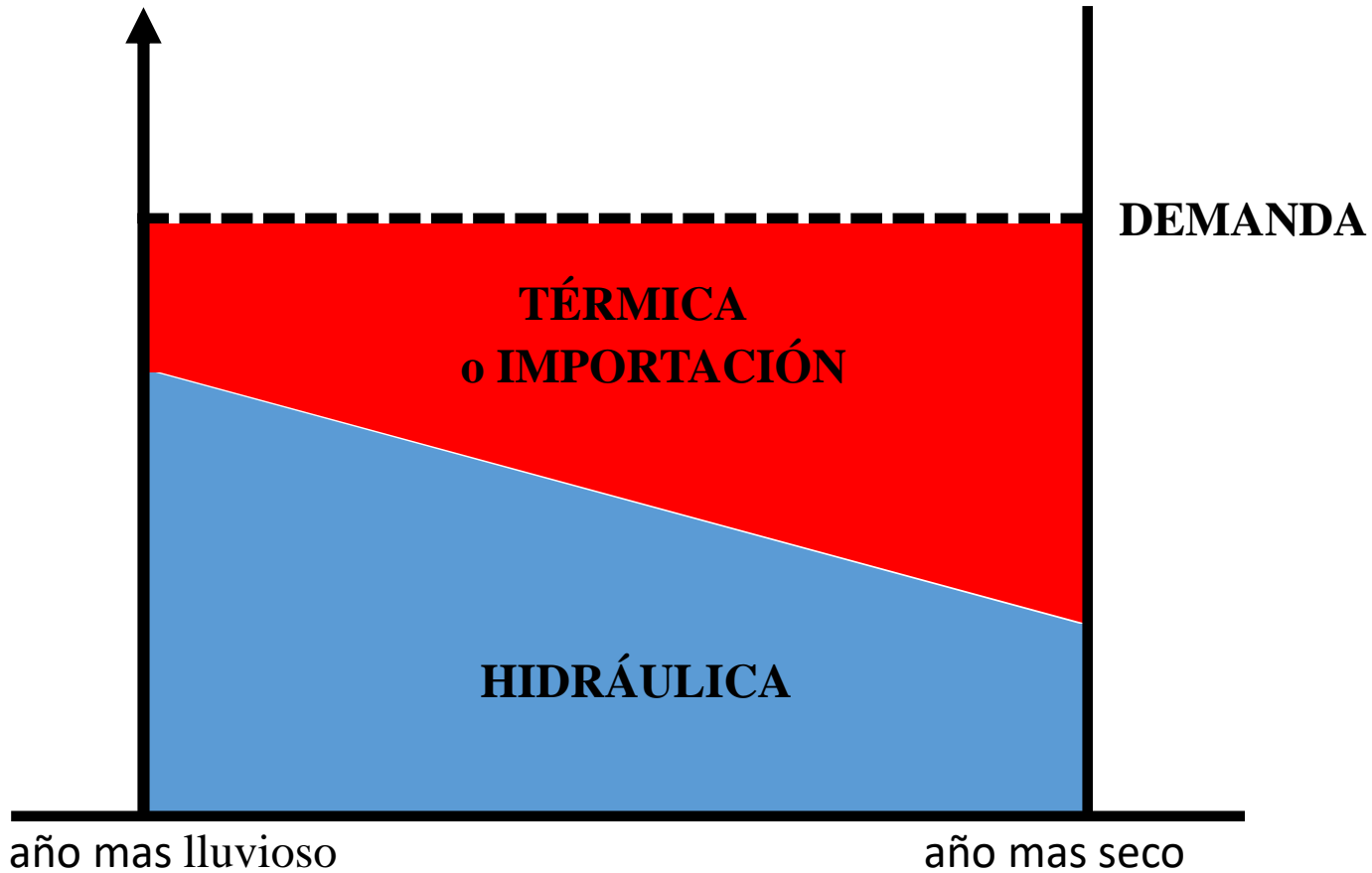
# Solución del Problema N° 7: Caso 1



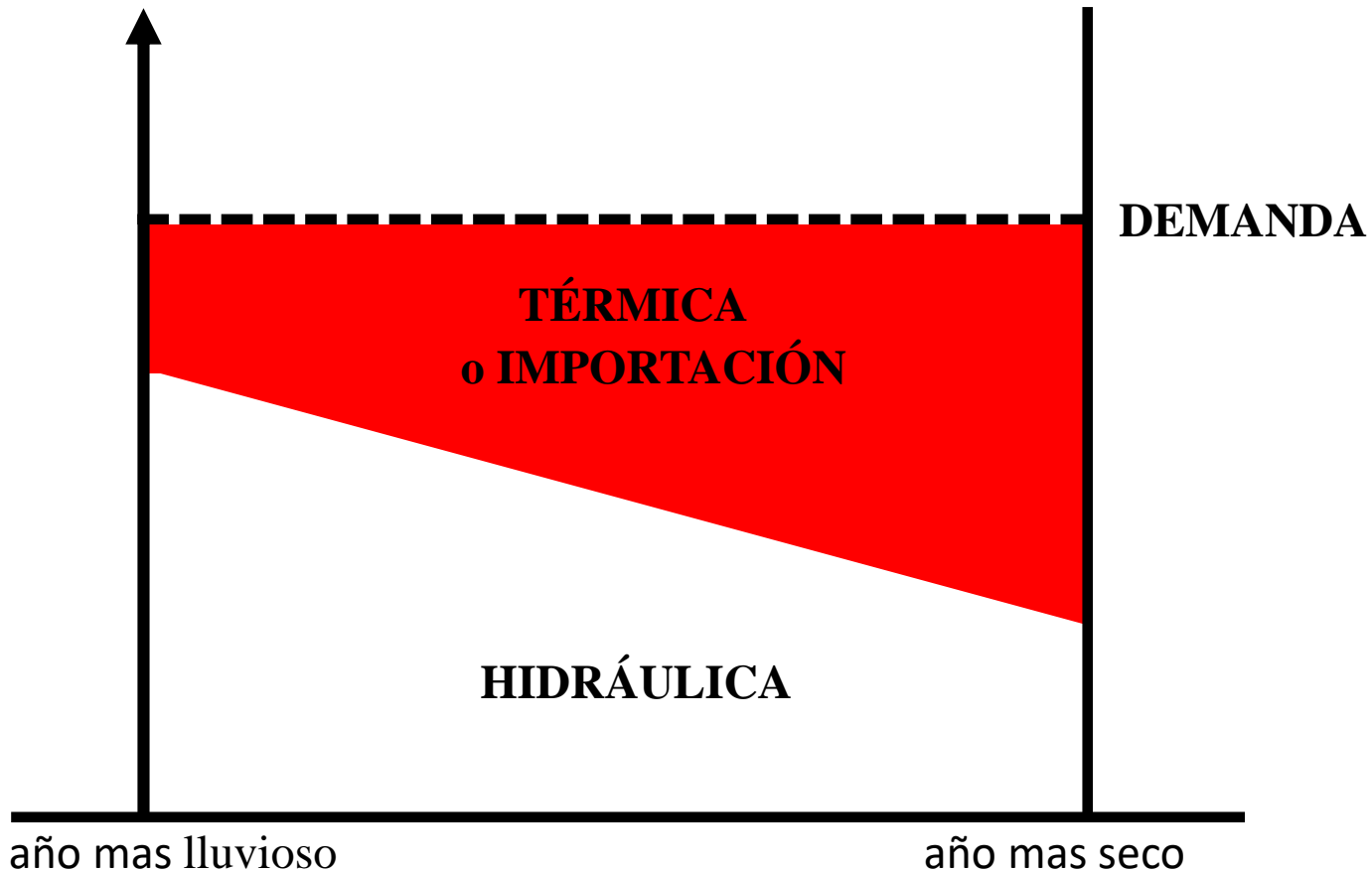
# Solución del Problema N° 7: Caso 2



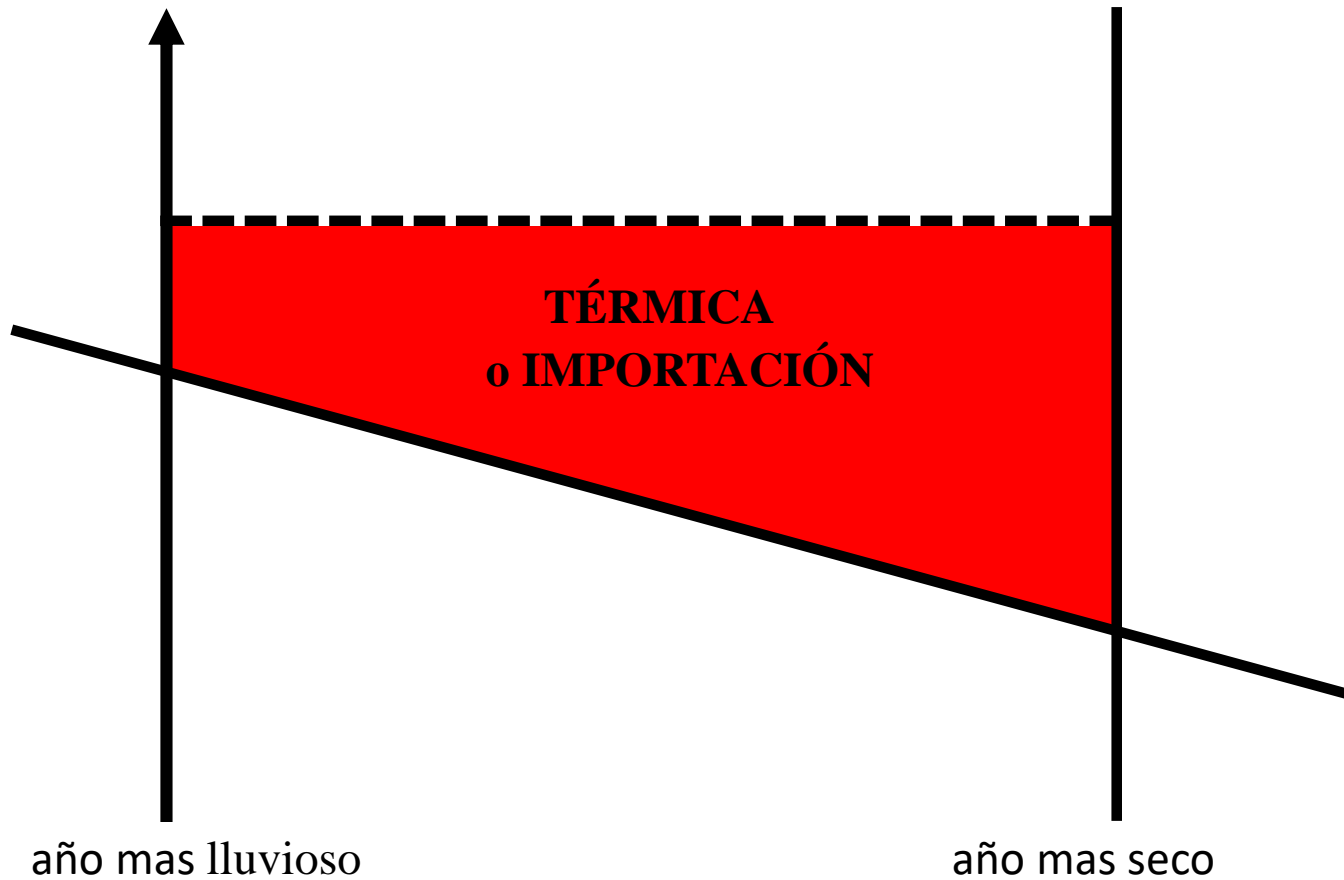
# ¿mmm....esto no lo vi antes?



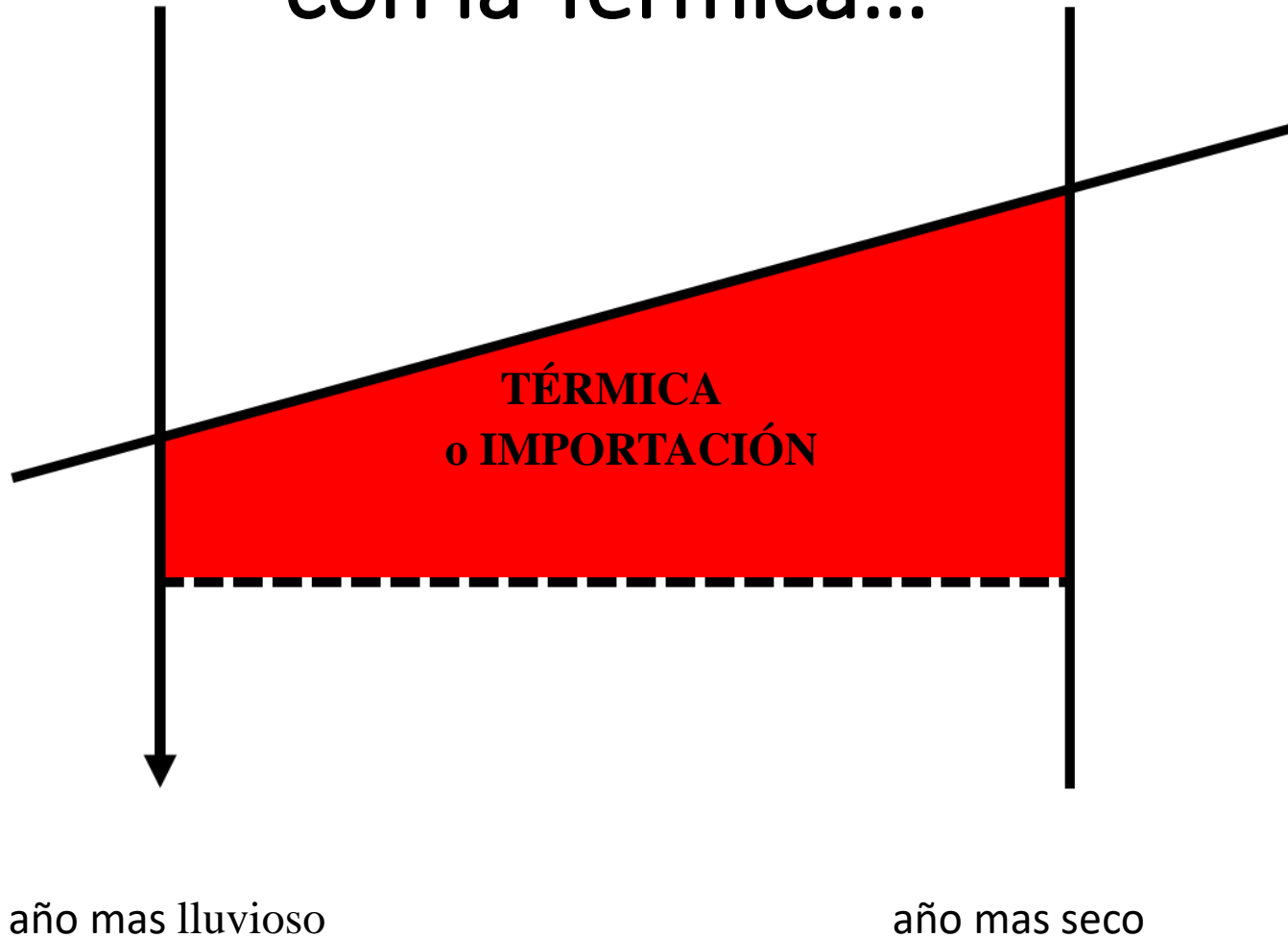
# El problema se reduce a ver que hacer con la Térmica...



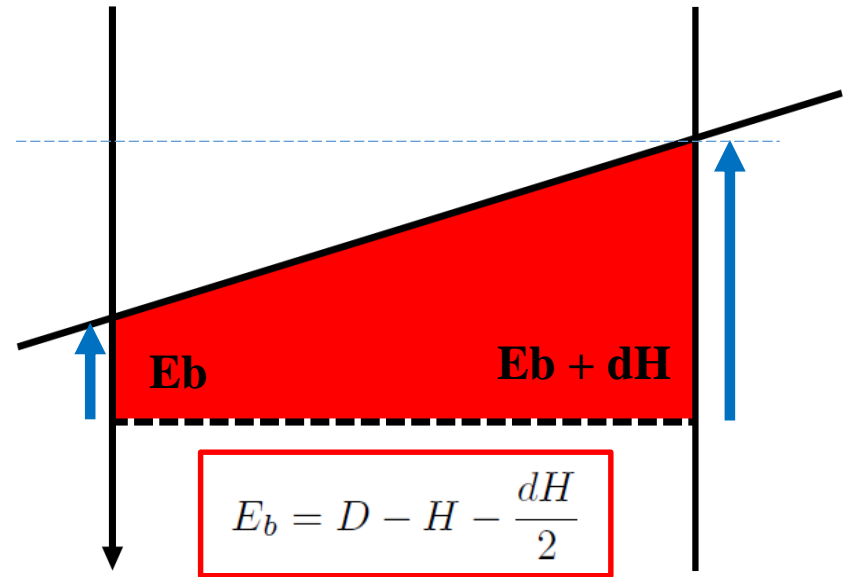
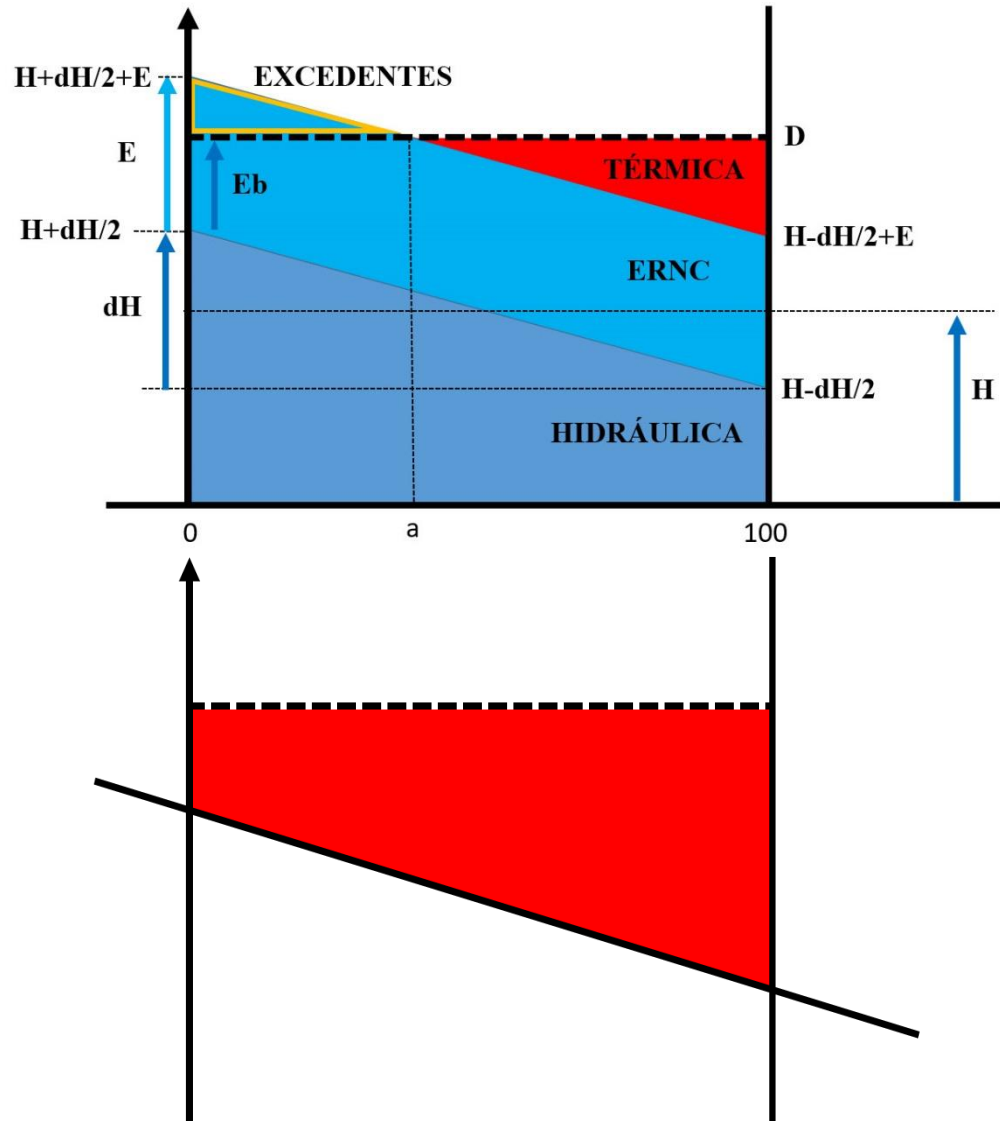
# El problema se reduce a ver que hacer con la Térmica...



# El problema se reduce a ver que hacer con la Térmica...

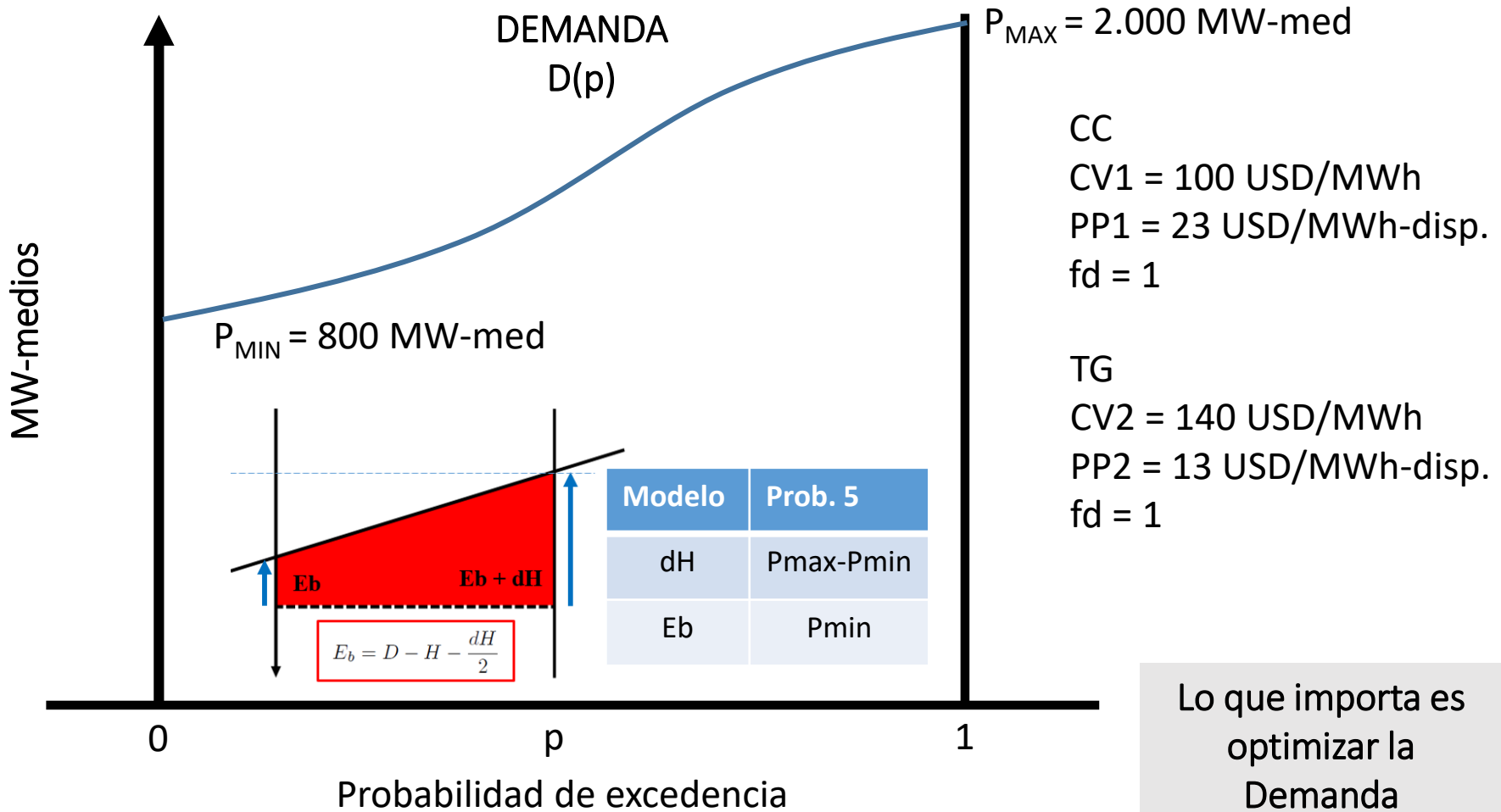


El problema se reduce a ver que hacer con la Térmica...



# Ejercicio 5: Determine las Potencias a instalar de TGs y de CCs

Es un análisis puramente ENERGÉTICO y no hay problemas de suministro de Potencia.  
 Para la solución se podrá modelar que la curva de permanencia de la demanda es lineal.

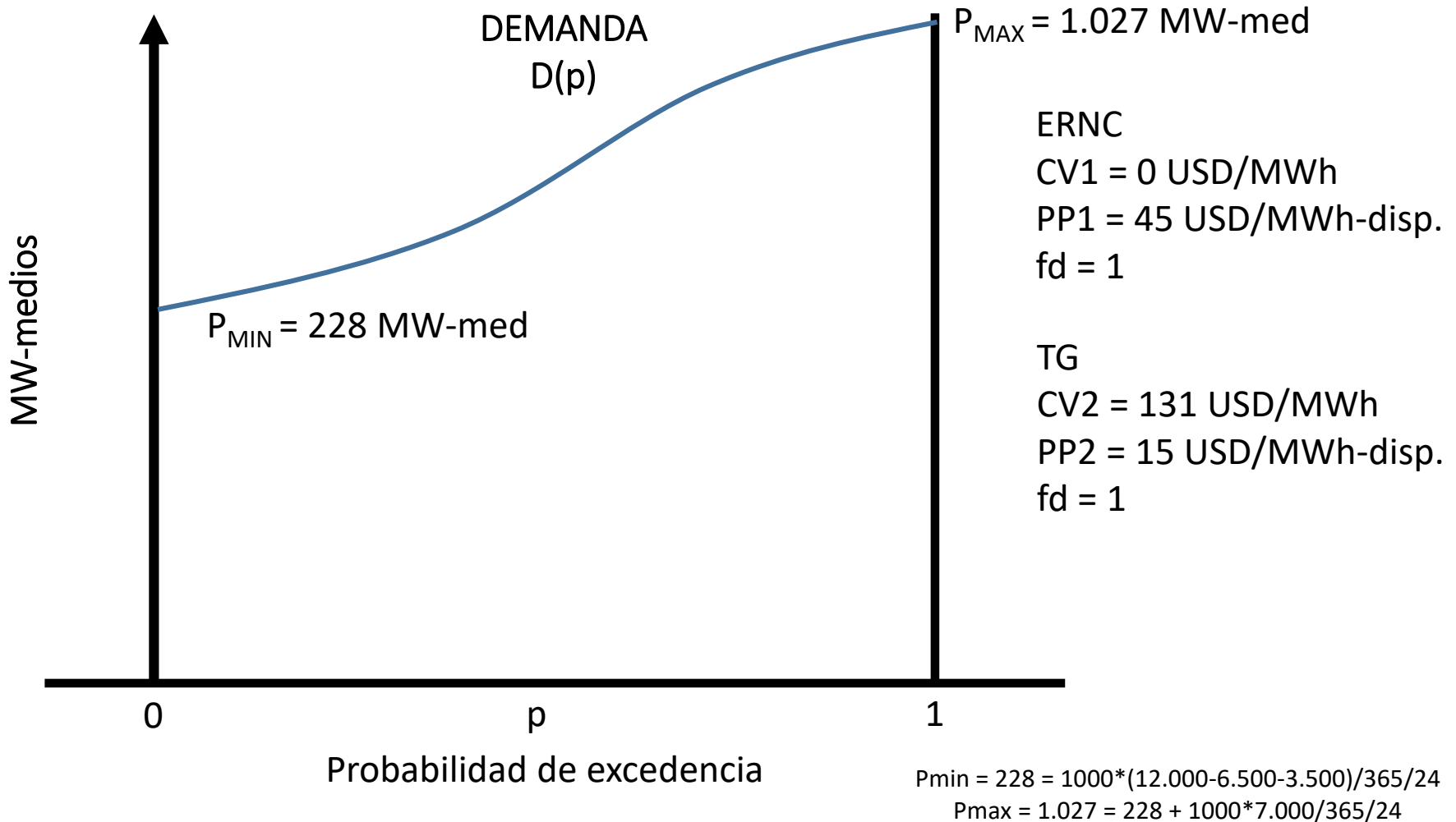


Lo que importa es optimizar la Demanda Gestionable



# Ejercicio 7: Determine las Potencias a instalar de ERNC y de TGs

Es un análisis puramente ENERGÉTICO y no hay problemas de suministro de Potencia.  
 Para la solución se podrá modelar que la curva de permanencia de la demanda es lineal.

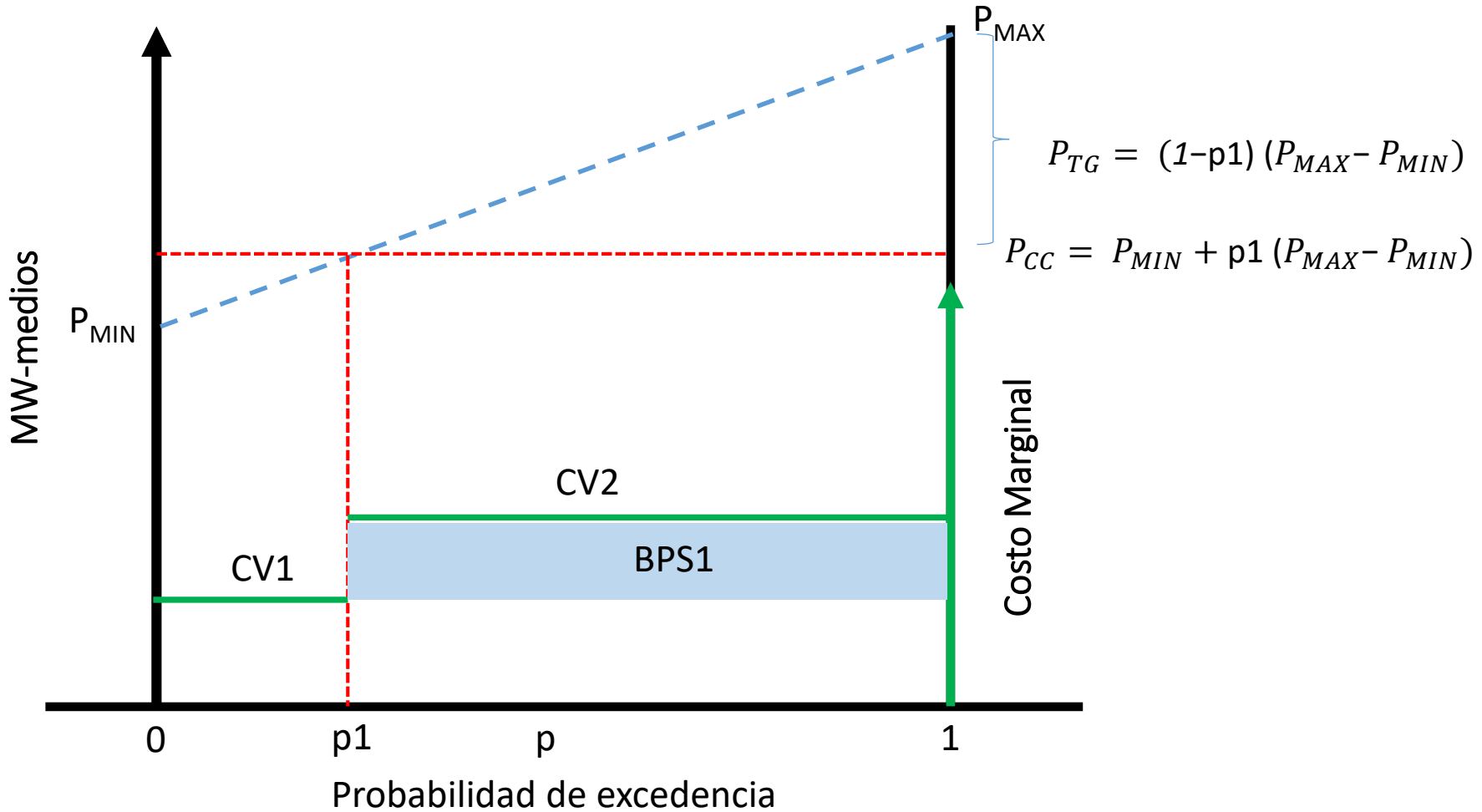


# Solución 5:

$$BPS1 = (CV2 - CV1)(1 - p1) = PP1$$

...pero, por cada MW-medio que instalo de ERNC, elimino un MW-medio de TGs, por lo que si utilizo esta fórmula, el PP1 real es **PP1-PP2**

$$p1 = 1 - \frac{PP1}{CV2 - CV1}$$



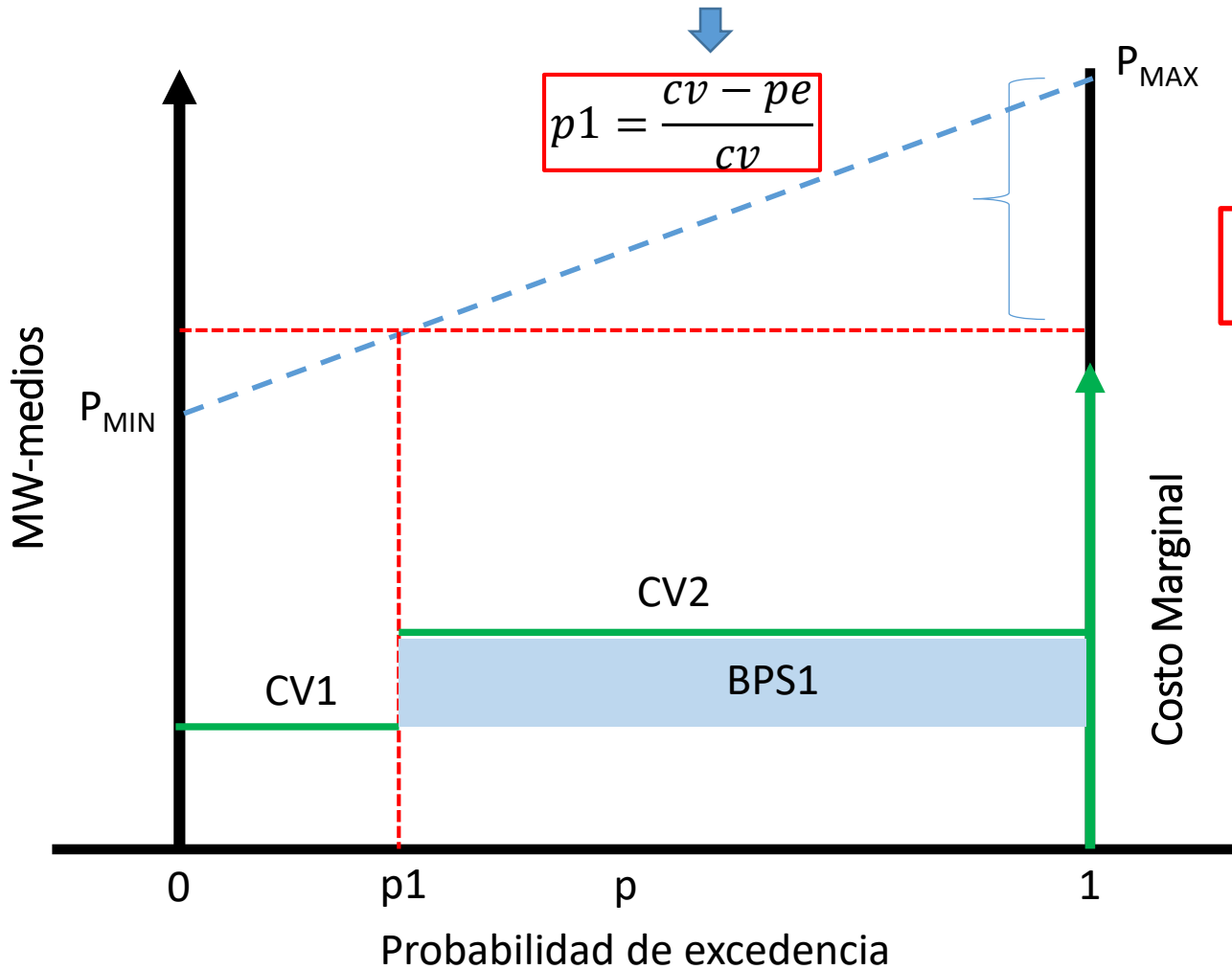
# Solución 7 (caso 1)

$$BPS1 = (CV2 - CV1)(1 - p1) = PP1 - PP2$$

$$p1 = 1 - \frac{PP1 - PP2}{CV2 - CV1} = \frac{CV2 - CV1 - (PP1 - PP2)}{CV2 - CV1}$$

$$P_{CC} = P_{MIN} + p1 (P_{MAX} - P_{MIN})$$

$$P_{TG} = (1 - p1) (P_{MAX} - P_{MIN})$$



$$p1 = \frac{cv - pe}{cv}$$

$$E_{opt} = E_b + dH \frac{(cv - pe)}{(cv - px)}$$

Modelo	Prob. 5
dH	Pmax-Pmin
Eb	Pmin
E	Pcc
a	p
cv	CV2
0	CV1
pe	PP1-PP2
px	0

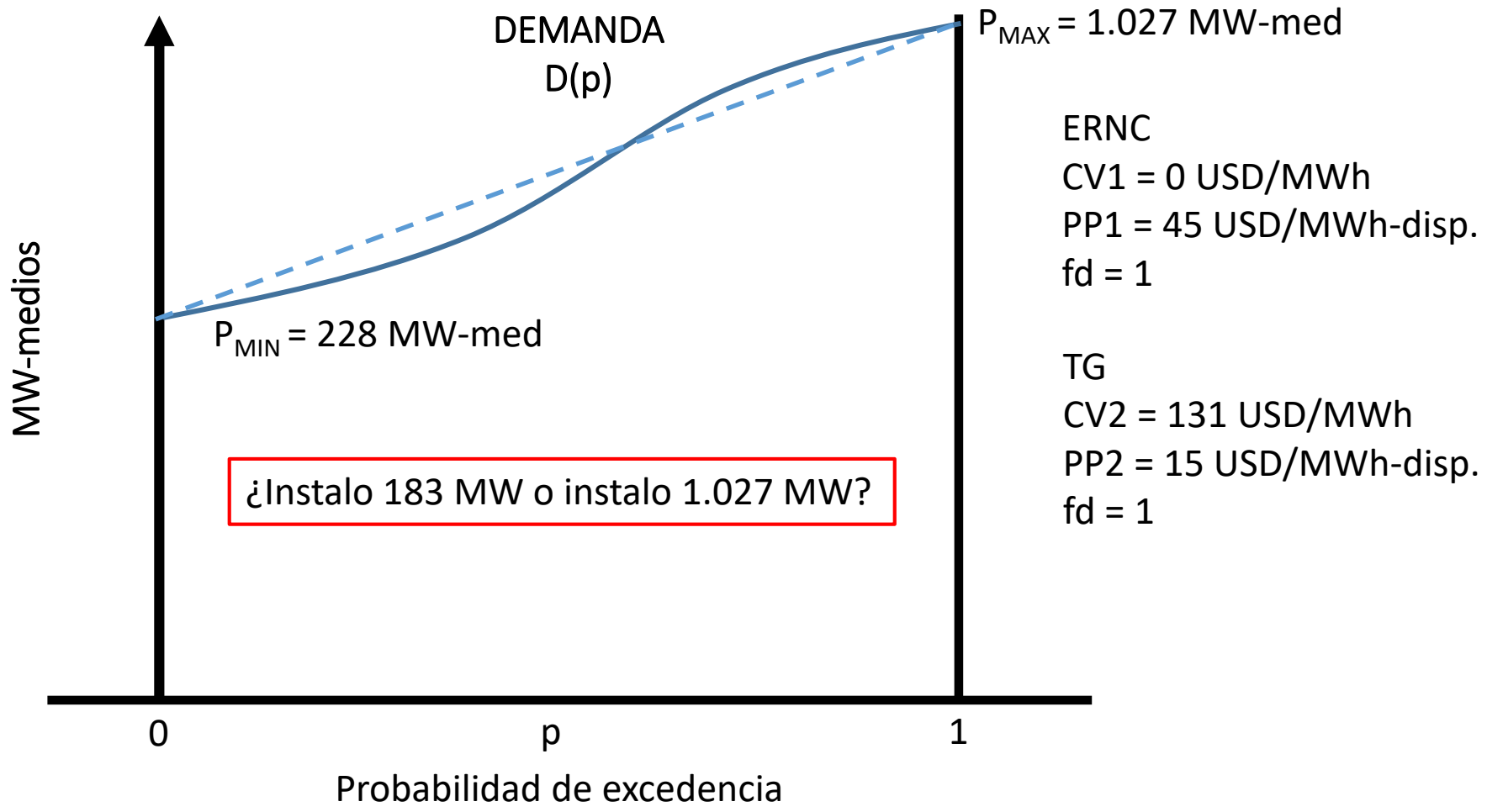
# Solución 7

$$p1 = 1 - \frac{PP1 - PP2}{CV2 - CV1}$$

$$P_{CC} = P_{MIN} + p1 (P_{MAX} - P_{MIN})$$

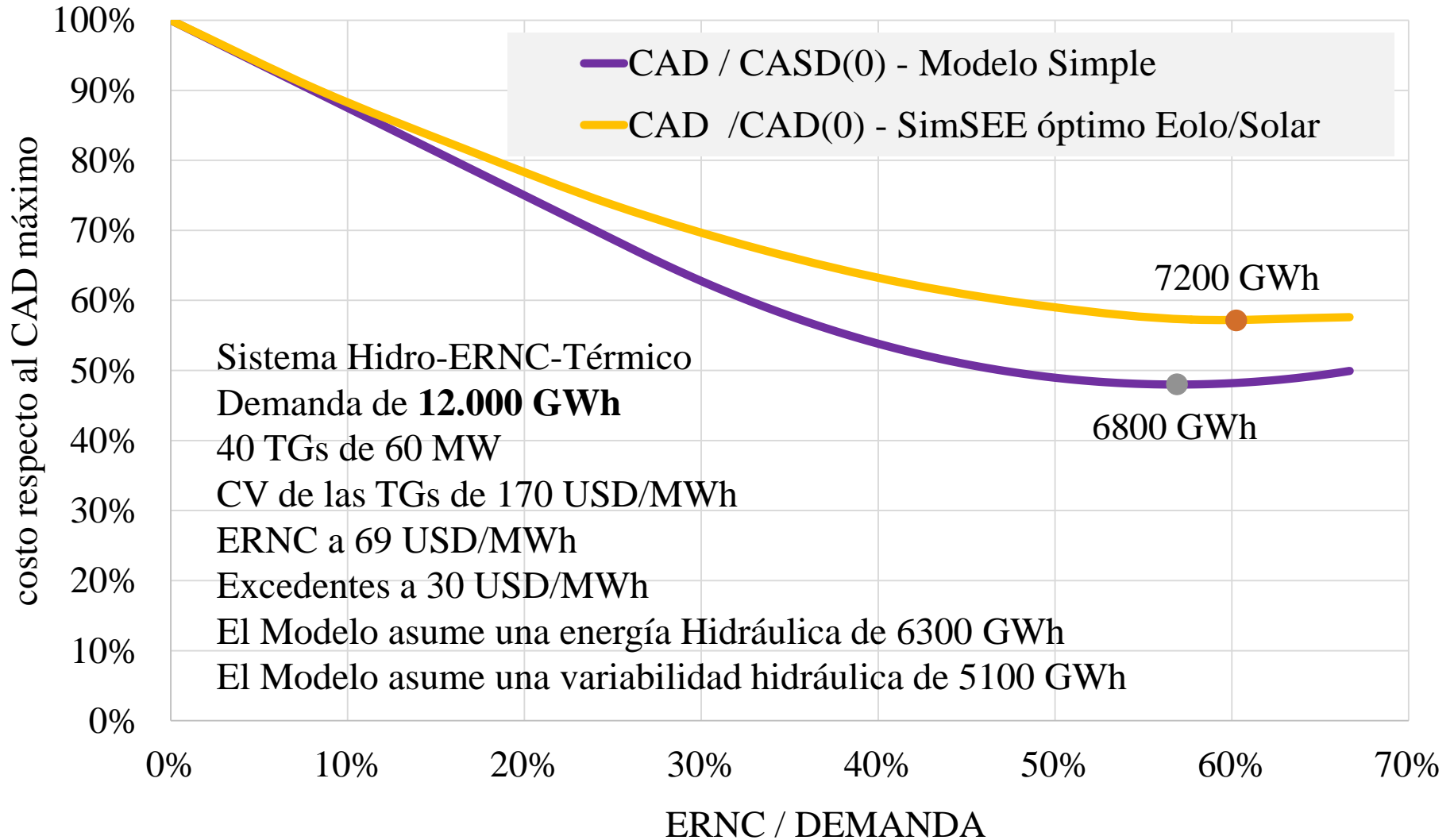
$$P_{TG} = (1-p1) (P_{MAX} - P_{MIN})$$

p1 = 0.77  
 E = 844 MW-med  
 PTG = 183 MW-med



# Ejemplo: Modelo Simple vs. Realidad

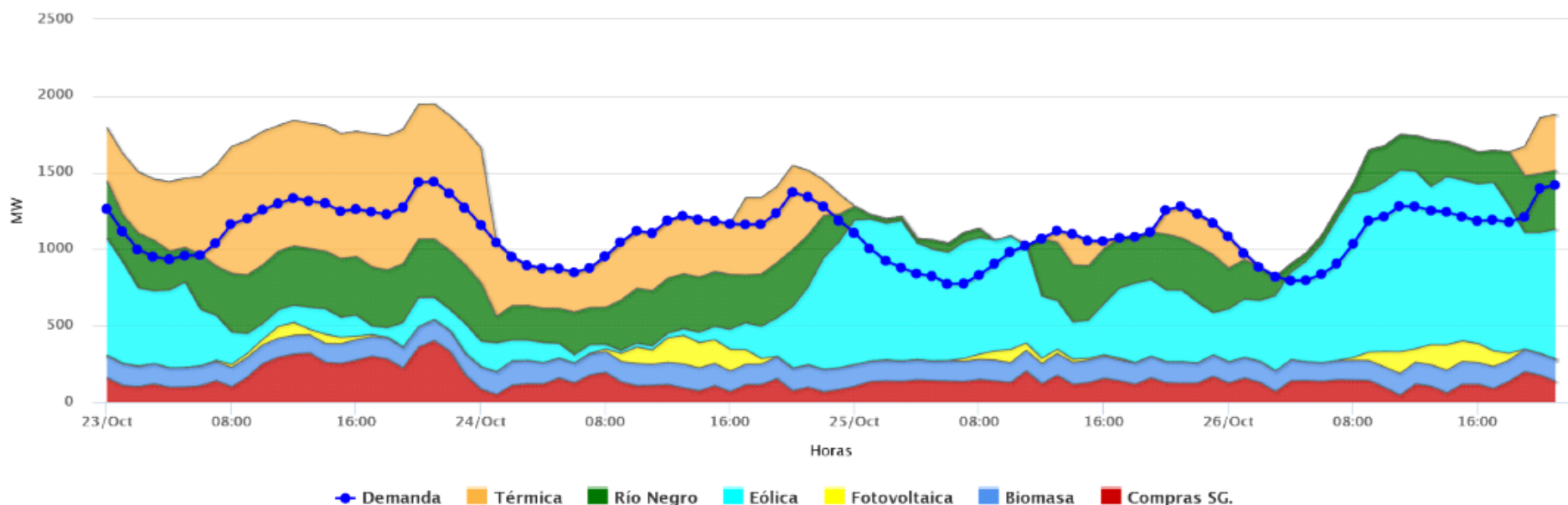
El Modelo ayuda “simplemente” a entender parte de la realidad...



# La realidad dista de ser la del Modelo

## Composición de la generación Uruguaya

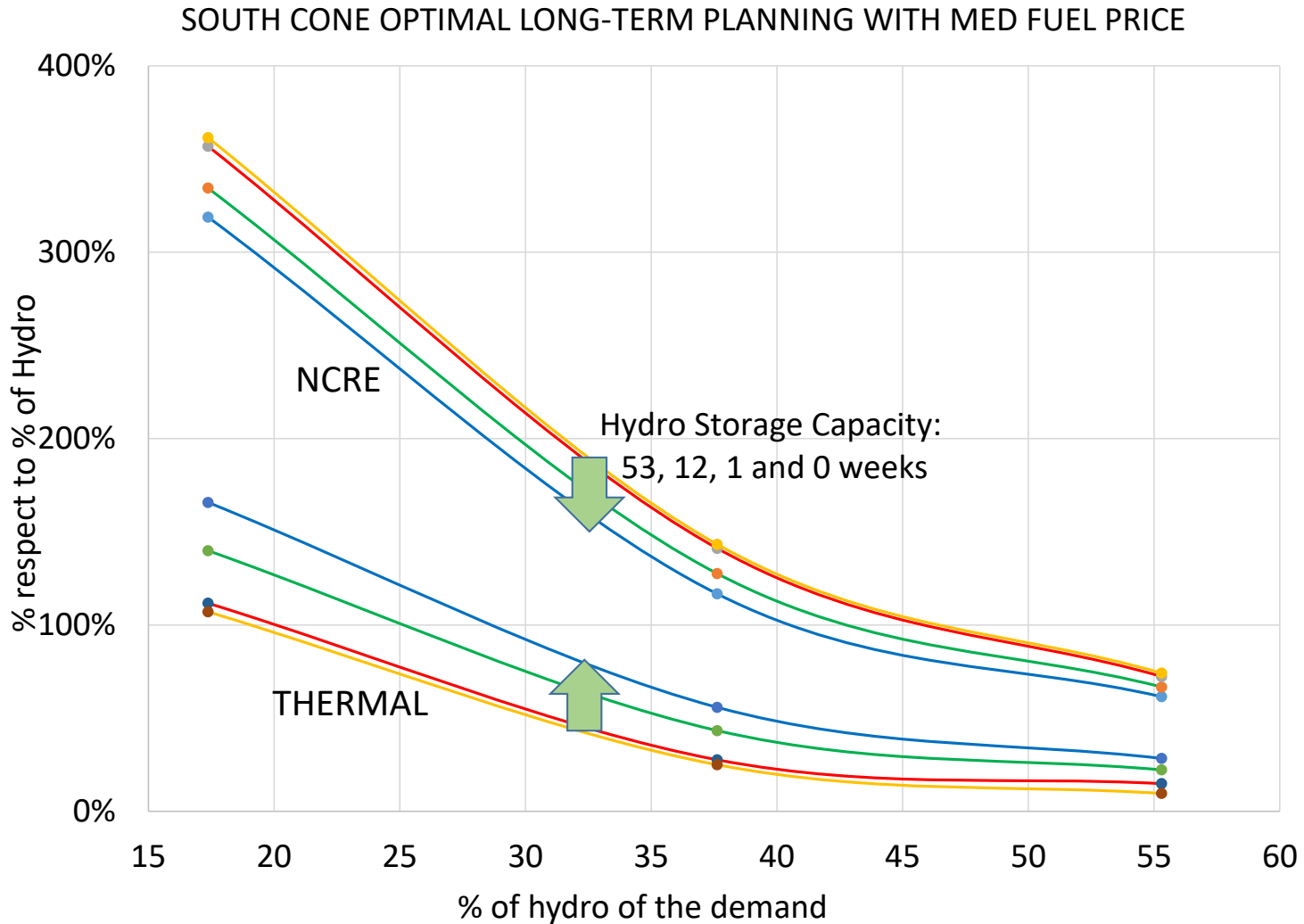
Porcentaje de Participación de las Fuentes Renovables al SIN = 77,51 %  
 Porcentaje de Participación en la Producción de las Fuentes Seleccionadas = 100,00 %



Highcharts.com

<http://apps.ute.com.uy/SgePublico/ConsSuministroGenUruguay.aspx>

# El almacenamiento es importante...



LONG-TERM PLANNING AND CHARACTERIZATION OF LATIN AMERICAN ELECTRICAL SYSTEMS BASED ON THEIR RESOURCES <http://www.iaee.org/proceedings/article/17048>  
 Conference Proceedings. Lorena Di Chiara, Gonzalo Casaravilla & Ruben Chaer

# Modelo Simple para la Planificación de Inversiones de Generación Eléctrica

Reporte Técnico N° 5

Gonzalo Casaravilla

Grupo GEE- Departamento de Potencia - Instituto de Ingeniería Eléctrica

Universidad de la República - Uruguay

Setiembre 2021

## V. CONCLUSIONES

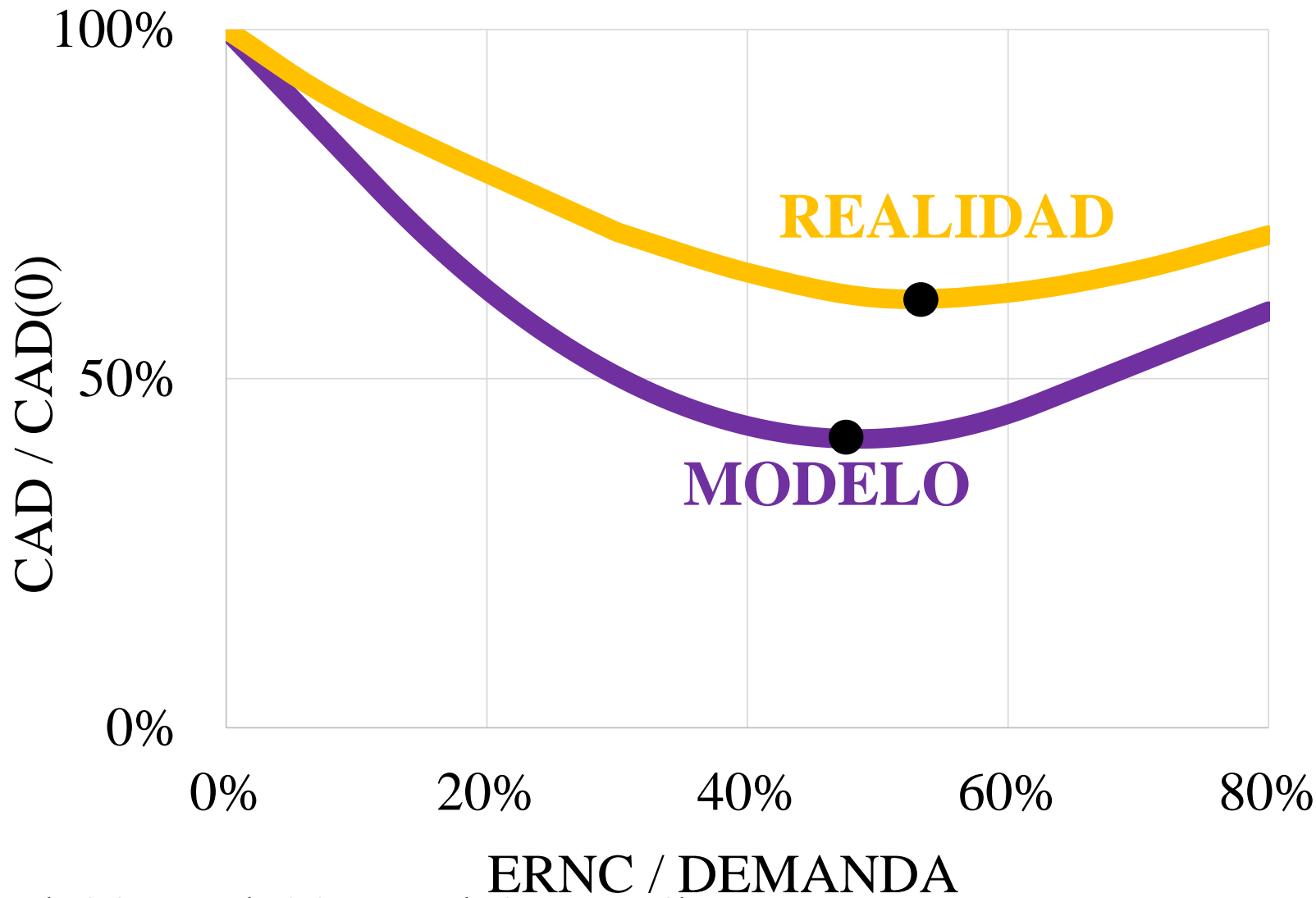
A modo de conclusiones se destacan los siguientes aspectos:

- Por simple sustitución de térmica por *ERNC* se produce la reducción lineal del *CAD* hasta el límite en que no habría excedentes. Luego, al seguir agregando *ERNC*, se siguen obteniendo beneficios, hasta un óptimo a partir del cual empiezan a aumentar los costos nuevamente.
- Se valoricen o no los excedentes, siempre es conveniente que los excedentes se generen. Si se parara la instalación de *ERNC* en el límite de que no existan excedentes, se estaría destruyendo beneficios alcanzables.
- El Modelo Simple recoge parte importante de la realidad, pero la realidad es bastante más compleja que el modelo. La mayor diferencia entre el Modelo Simple y la realidad es que el modelo considera a la demanda y a las *ERNC* constantes. También considera constante, para el transcurso de cada año, el aporte hidráulico. Pero la realidad es que nada de esto es cierto. La demanda diaria horaria no es constante, tampoco la demanda mensual. Tampoco son constantes los aportes eólicos y solares, ni los horarios ni los estacionales. Y tampoco es constante la hidráulica horaria o estacional. Finalmente no se valoriza el costo de inversión de las máquinas térmicas ni se subdividen de acuerdo a su flexibilidad.
- El Modelo Simple no recoge el hecho de que a determinada hora de la madrugada, con una demanda menor que las eventuales *ERNC*, existen excedentes en la realidad que no son registrados por el modelo.
- Cada vez que se desalinean demanda y recursos e instantáneamente se superan determinados límites, aumentan en valor esperado los excedentes y la térmica de la realidad respecto al resultado del Modelo Simple.
- La Planificación de Inversiones de Generación y la operación diaria de un sistema eléctrico real requiere herramientas de última generación. Uruguay las dispone, así como las personas que las utilizan y las desarrollan.

ROTURA, MANTENIMIENTO, MÍNIMOS TÉCNICOS, TEMPERATURA,...



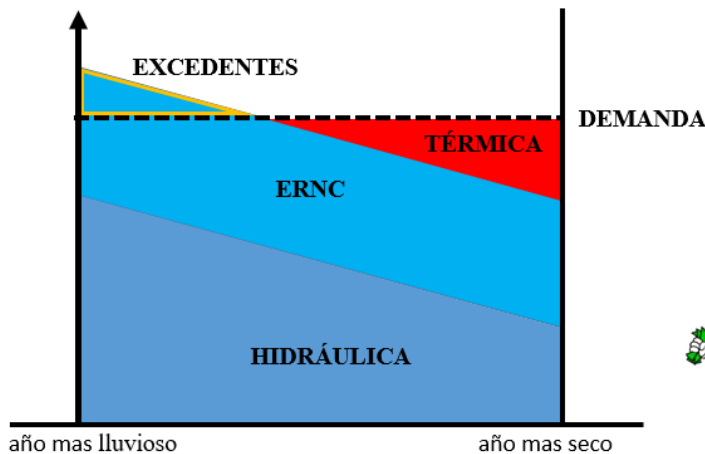
# El Modelo Simple, “simplemente” ayuda a entender parte de la realidad...





Grupo de Planificación y Operación Óptimas de  
Sistemas de Energía Eléctrica

# ¿Por qué en algún momento en Uruguay se produce más energía eléctrica que la que se consume?



<https://iie.fing.edu.uy/investigacion/grupos/gee/>

[https://youtu.be/Gnw9Utl\\_ji8](https://youtu.be/Gnw9Utl_ji8)

