



OPTIMIZACIÓN DE CENTRALES HIDROELECTRICAS

PROFESOR: RAMIRO ORTIZ FLOREZ Ph.D
Laboratorio de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas
pamupo@univalle.edu.co
ramiro.ortiz@correounivalle.edu.co

UNIVERSIDAD DEL VALLE
BOGOTA- 2011

Importancia del Uso Racional del Agua

1. Revisar la **eficacia de las grandes represas** para promover el desarrollo y evaluar alternativas para el aprovechamiento del agua y la energía.
2. **Formular criterios** aceptables internacionalmente, y donde fuera adecuado guías y normas, para la planificación, diseño, evaluación, construcción, **funcionamiento**, inspección y desmantelamiento de represas.
3. **La pérdida innecesaria de agua y energía** se puede evitar, reduciendo las fugas del sistema, con mantenimiento adecuado, y mejorando la tecnología de control, transmisión y distribución del sector energético.

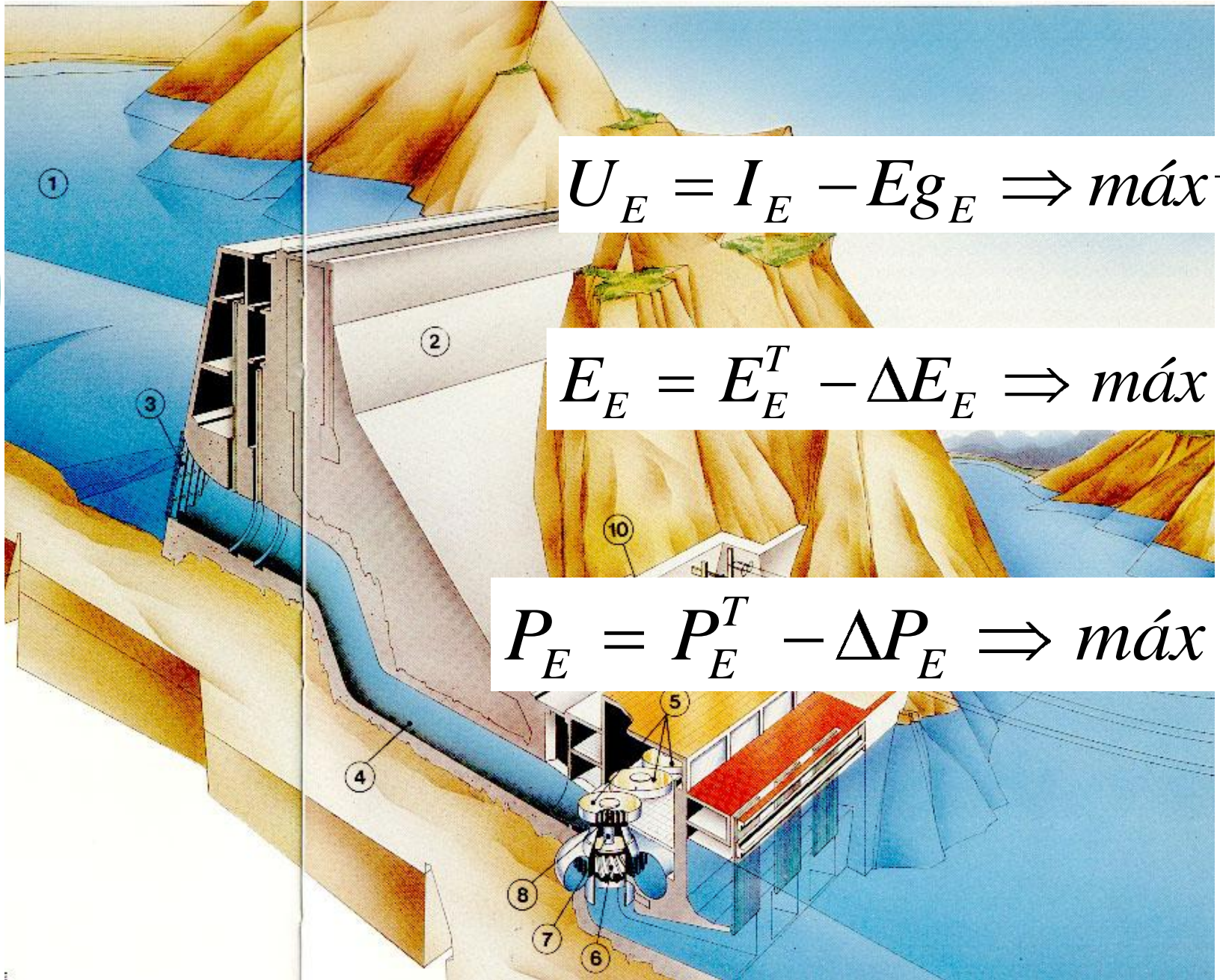
Opciones para el Desarrollo de los Recursos de Agua y Energía. Informe de la Comisión Mundial de Represas - Noviembre del 2000.

Agua y Energía - ONUDI

- Hay nexos de unión muy fuertes entre el agua y la energía eléctrica que, a día de hoy, no se tienen plenamente en cuenta a la hora de formular políticas, de gestionar y de operar con el agua y los sistemas de generación de electricidad. La consecuencia es que se están perdiendo muchas oportunidades de ahorro, tanto de energía como de agua.



Uso Racional Hidroenergético.



$$U_E = I_E - E g_E \Rightarrow \text{máx}$$

$$E_E = E_E^T - \Delta E_E \Rightarrow \text{máx}$$

$$P_E = P_E^T - \Delta P_E \Rightarrow \text{máx}$$

1. Optimización por utilidades

$$U_E = I_E - E g_E \Rightarrow \text{máx}$$

Estrategias para maximizar los ingresos:

1. Energía despachada.
2. Precio del kilovatio hora.
3. Estrategias de mercado.
4. Costos de administración.
5. Entre otros.

1. Optimización por utilidades

$$U_E = I_E - E g_E \Rightarrow \text{máx}$$

Estrategias para minimizar los egresos:

Es viable en el instante en que se pague por el consumo del hidroenergético, mientras tanto, se puede evaluar como el costo de los recursos no usados eficientemente.

2. Optimización por energía

$$V_i + \int Q_r(dt) - \int Q_t(dt) - \int dQ(dt) \Rightarrow \text{máx}$$

Corresponde a un **balance hidroenergético** en un tiempo dado, determinado por:

1. El caudal aportado por el recurso hidroenergético.
2. El caudal turbinado.
3. Las restricciones del embalse, como: caudales ecológico, volúmenes máximo y mínimo, otros usos, pérdidas, entre otros.

2. Optimización por energía

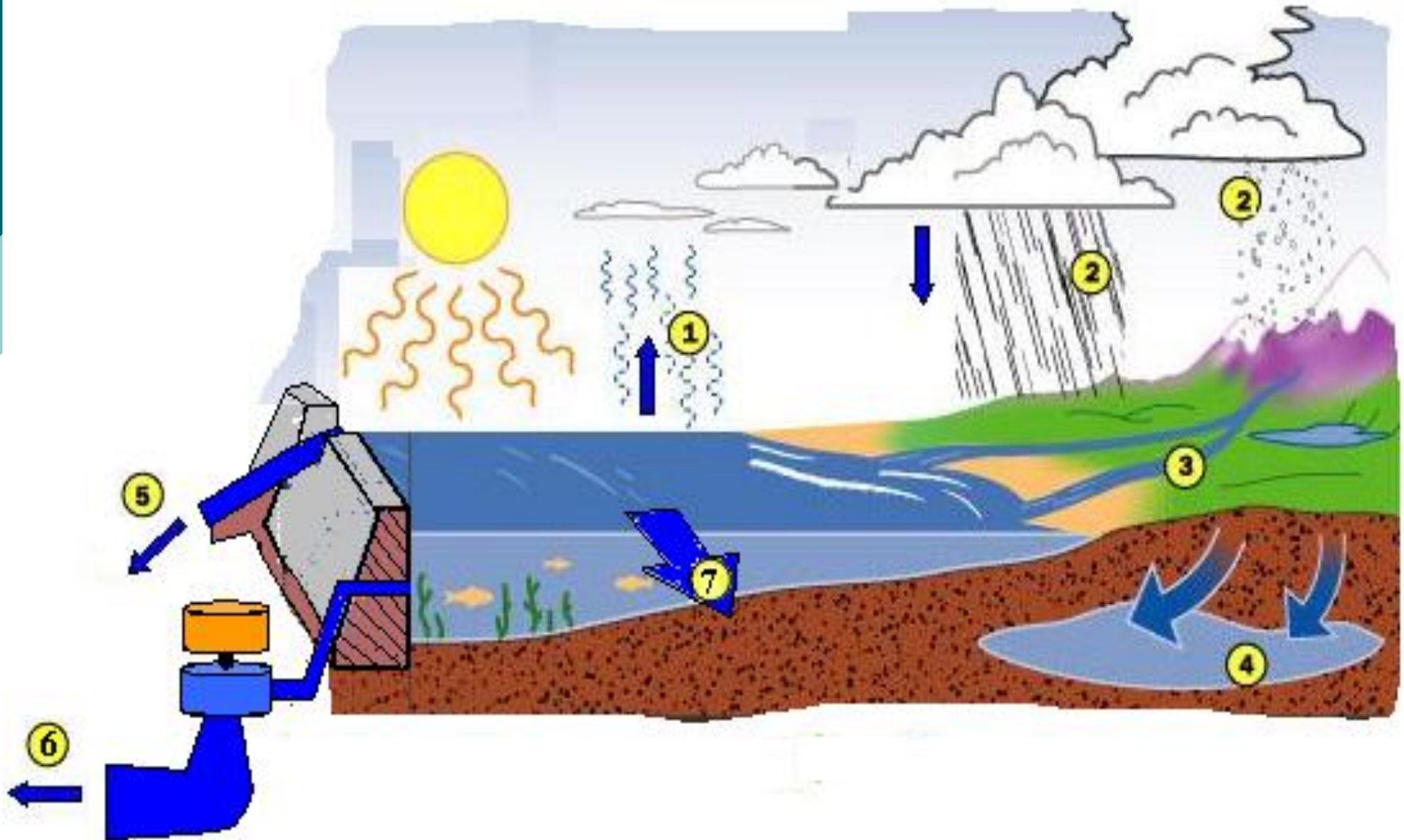
$$E_E = E_E^T - \Delta E_E \Rightarrow \text{máx}$$

$$E_E \Rightarrow \text{máx}: E_E^T \Rightarrow \text{máx} \text{ y } \Delta E_E \Rightarrow \text{min}$$

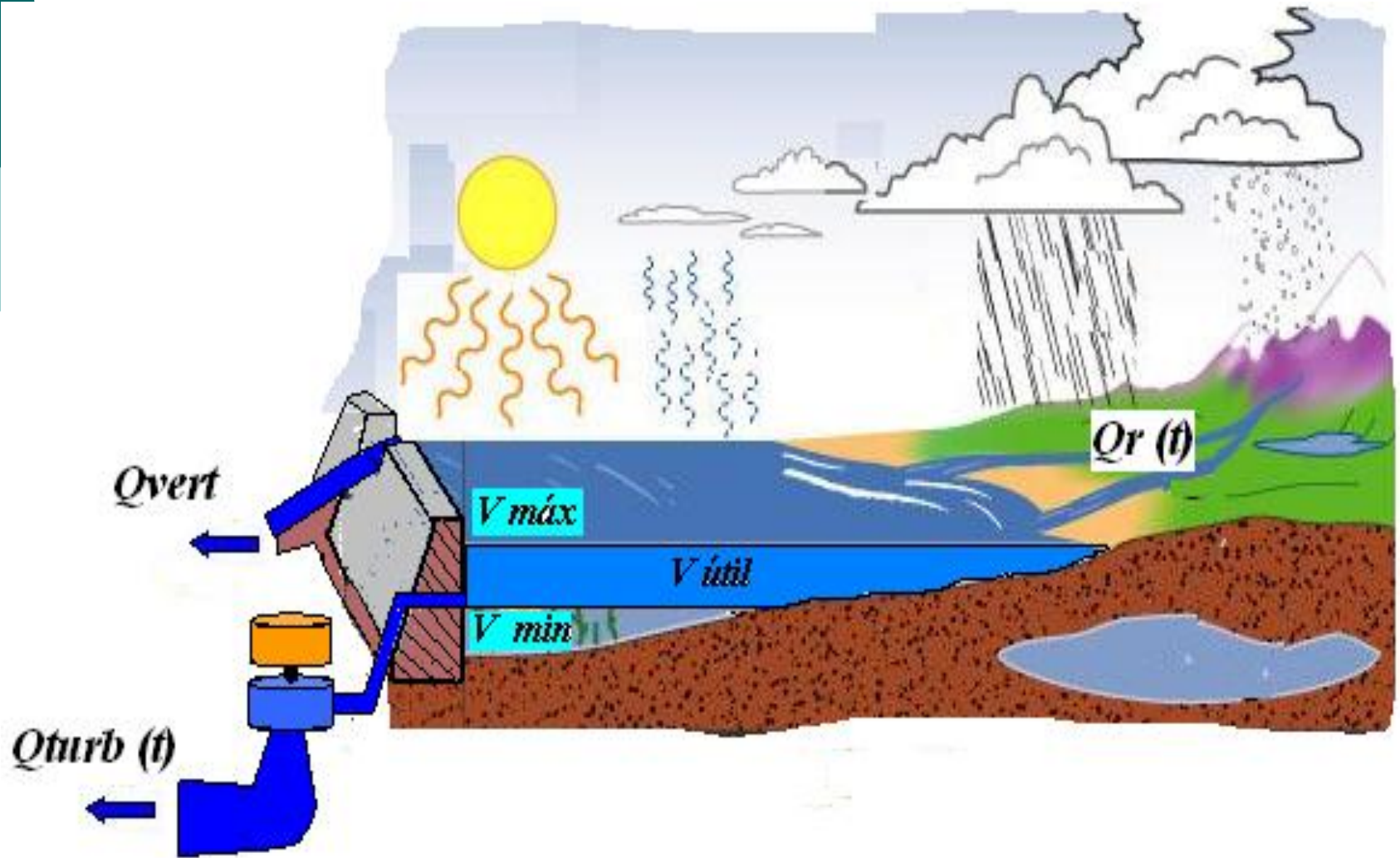
$$E_E^T \left(\right) = \int \left(E_{\text{emb}} \left(\right) + E_{\text{río}} \left(\right) - \Delta E_{\text{emb}} \left(\right) \right) dt$$

$$V_E^T \left(\right) = V_{\text{emb}} \left(\right) + V_{\text{río}} \left(\right) - \Delta V_{\text{emb}} \left(\right)$$

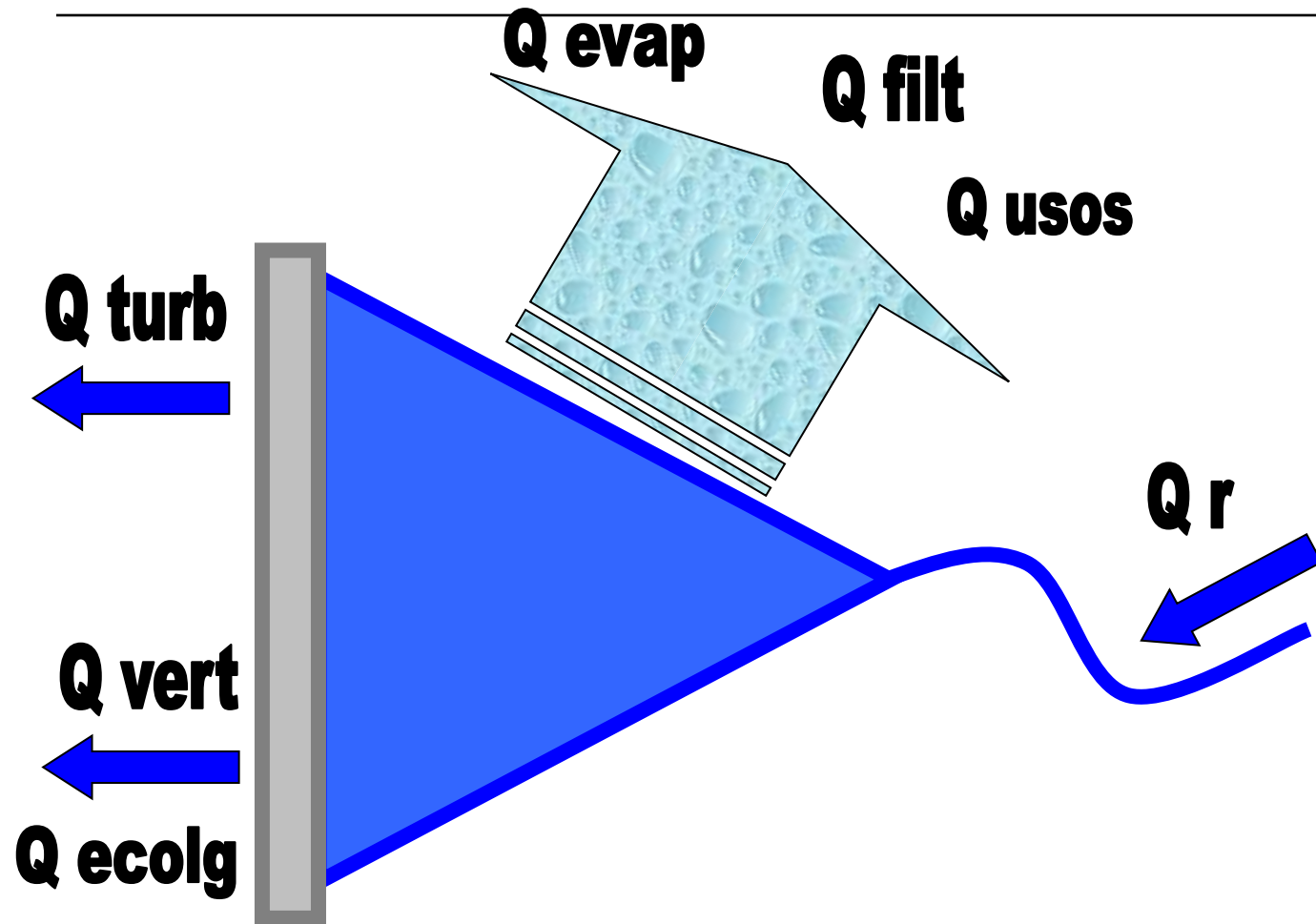
Balance hidroenergético del embalse



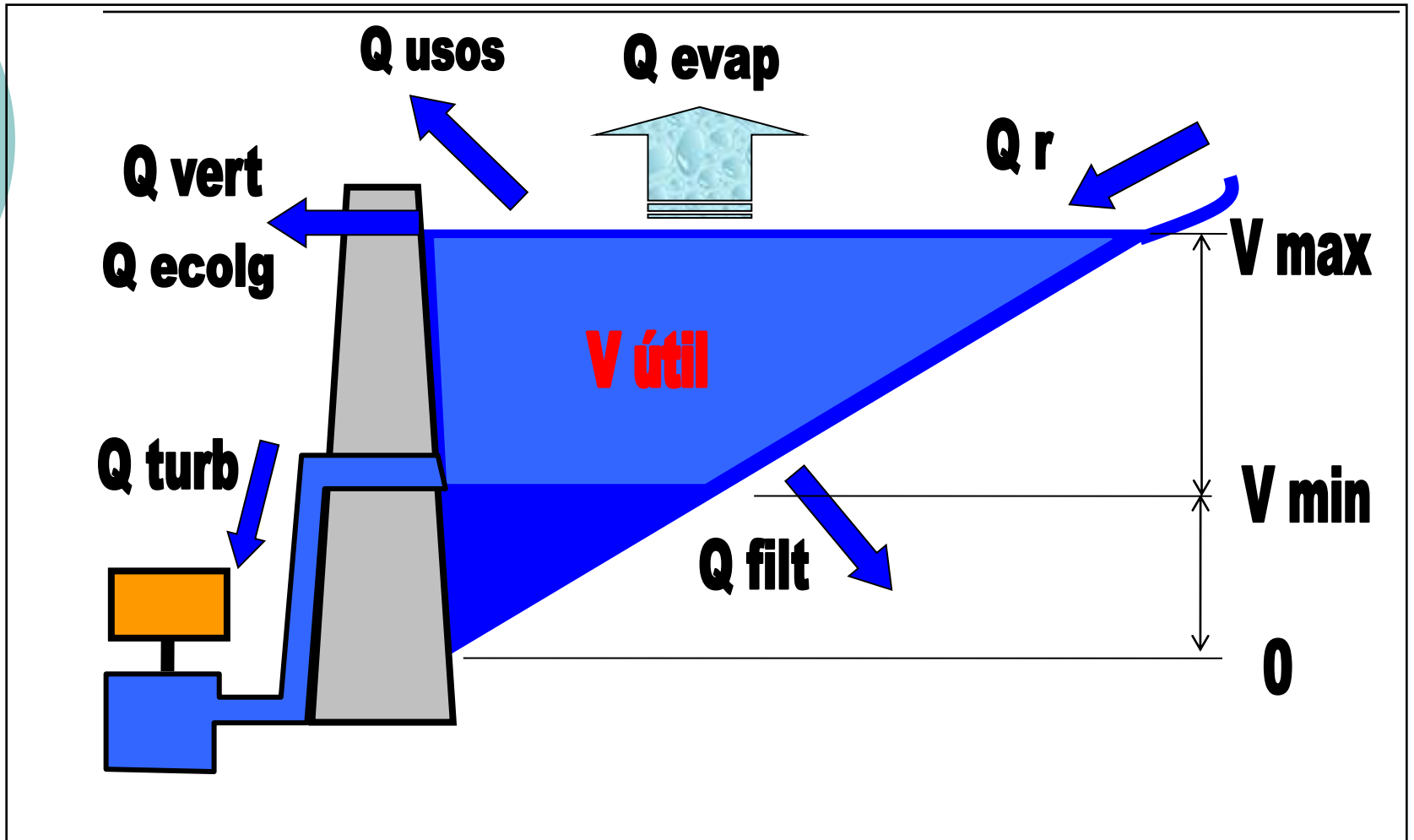
Restricciones



Balance hidroenergético del embalse



Restricciones



2. Optimización por energía.

$$E_{total_E} = f \Rightarrow máx$$

$$\int E_{emb} dt \Rightarrow máx$$

$$\int E_{río} dt \Rightarrow máx$$

$$\int \Delta E_{emb} dt \Rightarrow mín$$

$$\int \Delta E_E dt \Rightarrow mín$$

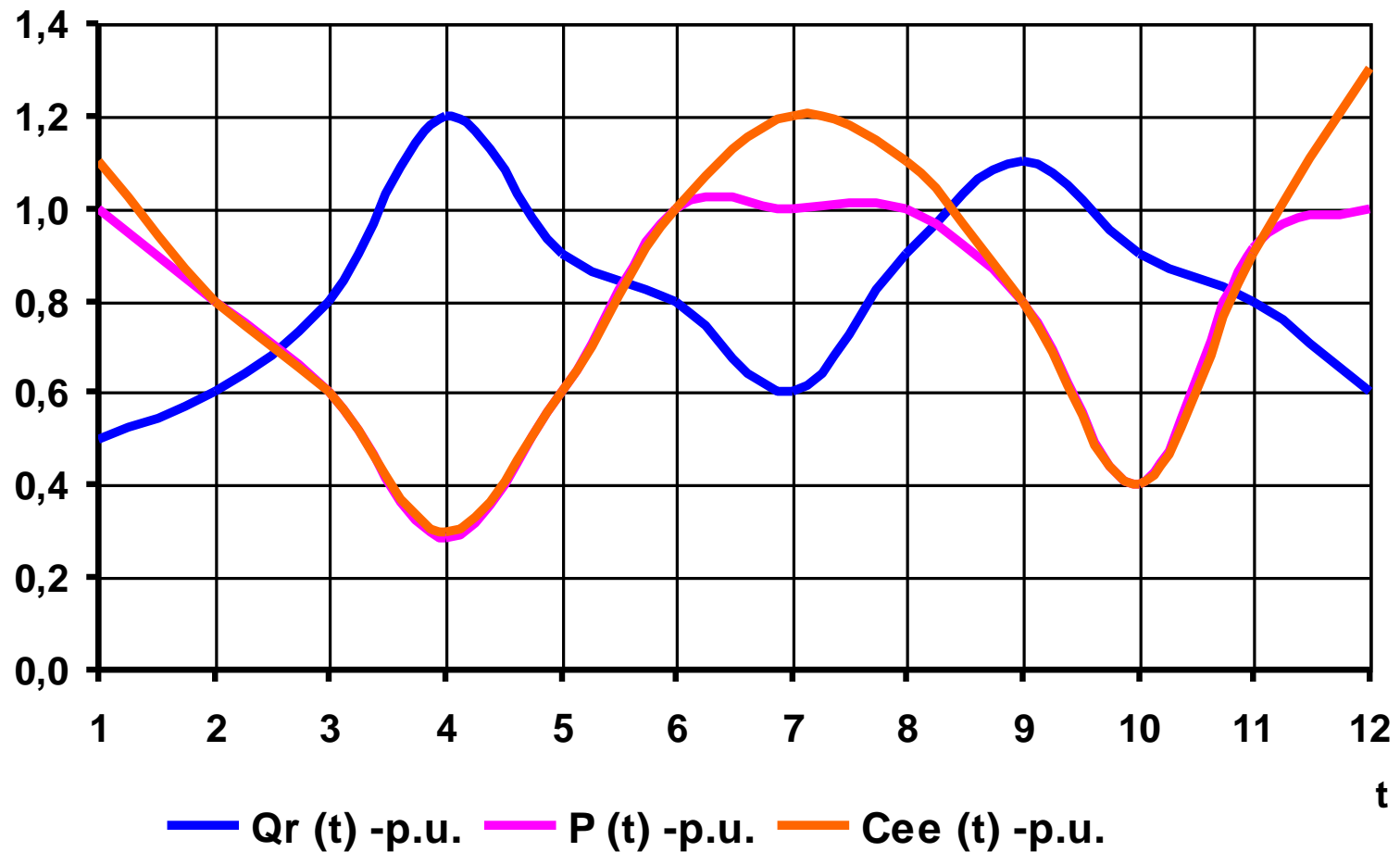
**Despacho
a largo plazo**

2. Optimización por energía.

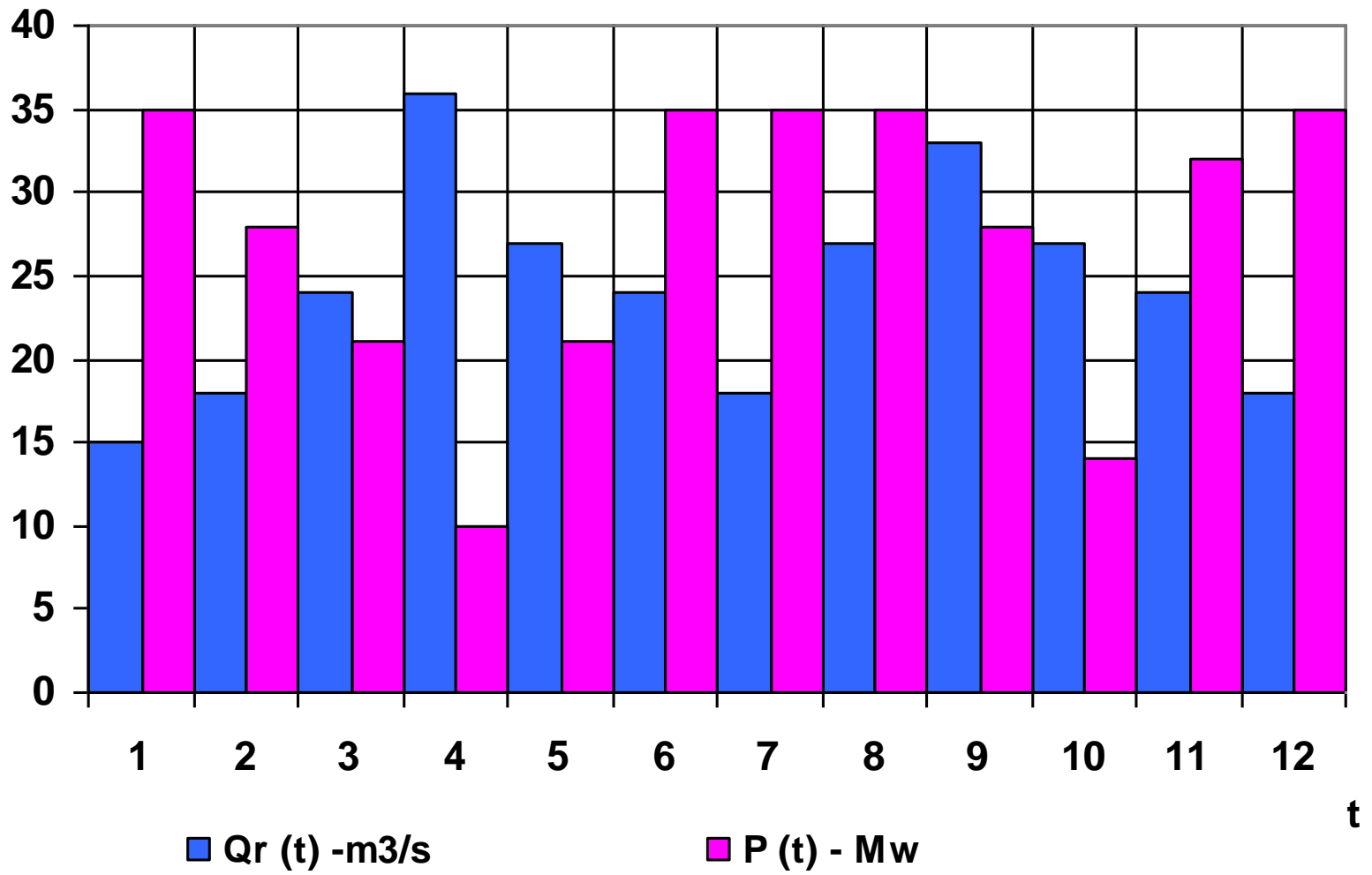
En razón a que la energía depende del tiempo, su optimización se debe hacer al **largo plazo**, orientándose desde el punto hidroenergético ha obtener la mayor **disponibilidad** durante un periodo.

2. Optimización por energía. Ejemplo:

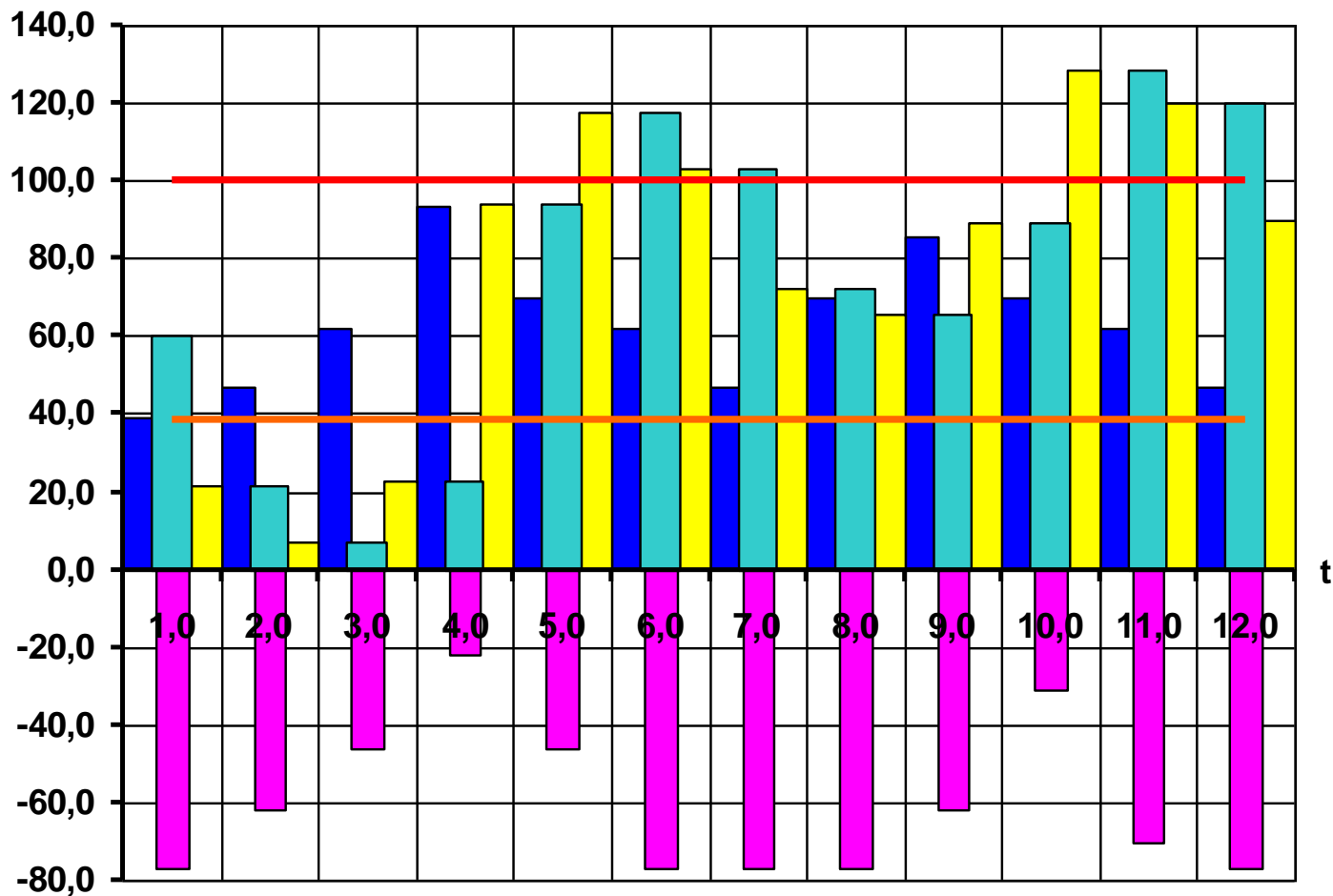
Q_r ; C_{ee} ; P_g



Qr; Pg



Q (m³/s)



$V_r(t)$ **$V_{turb}(t)$** **$V_f(t+1)$** **$V_i(t)$** **$V_{min}(t)$** **$V_{max}(t)$**

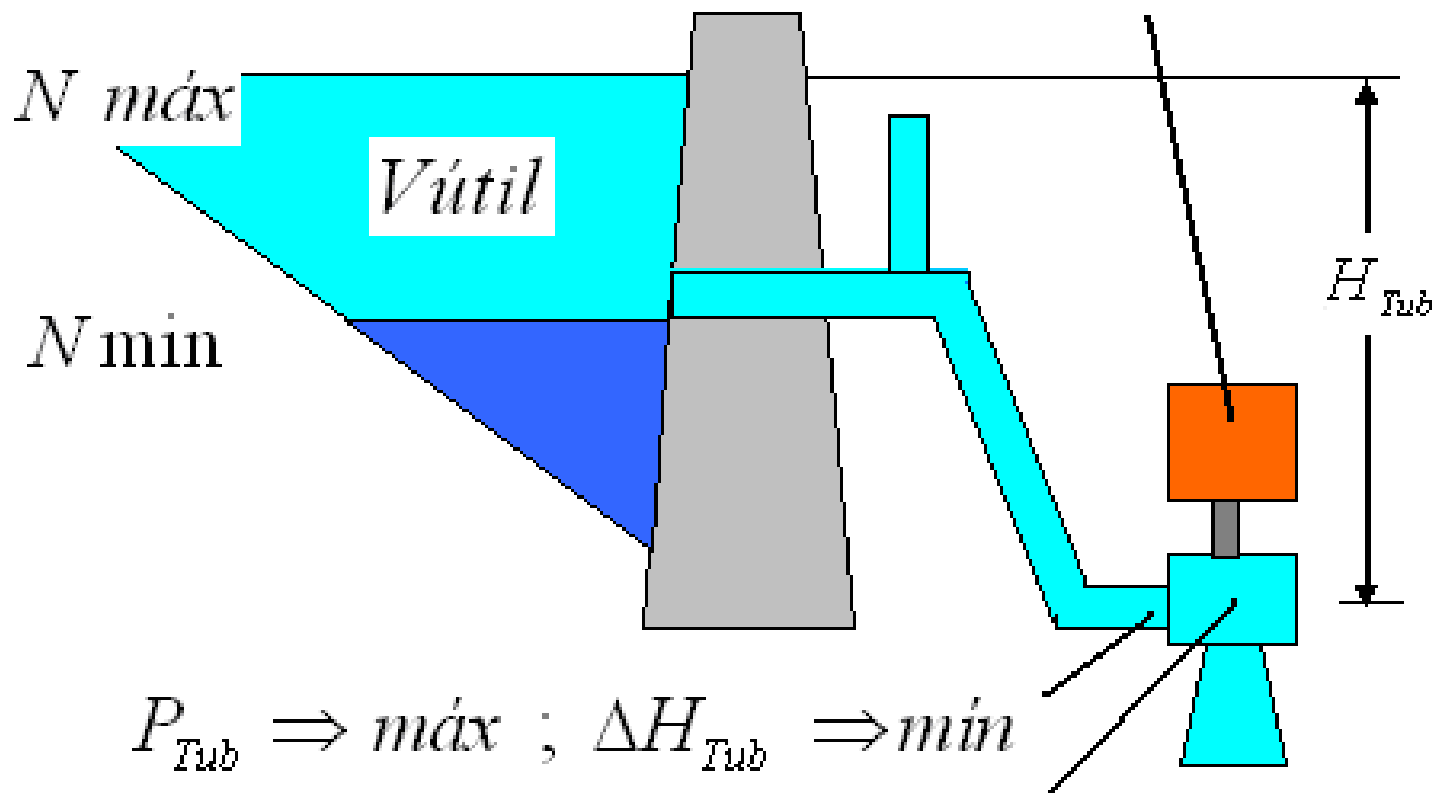
3. Optimización por potencia

$$P_E = P_E^T - \Delta P_E \Rightarrow \text{máx}$$

$$P_E \Rightarrow \text{máx}: \quad P_E^T \Rightarrow \text{máx} \quad \text{y} \quad \Delta P_E \Rightarrow \text{min}$$

$$P_E = 9.81 \sum_{i=1}^n Q_i^{Turb} * \left(H_{Tub} - \Delta H_{Tub} \right) \eta_i^{Turb} * \eta_i^G$$

$$P_E \Rightarrow \text{máx}, \quad \sum_{i=1}^n \eta_i^G \Rightarrow \text{máx}$$



$$P_{Turb} \Rightarrow \text{máx} ; \quad \Delta H_{Turb} \Rightarrow \text{min}$$

$$P_{Mec} \Rightarrow \text{máx}, \quad \sum_{i=1}^n \eta_i^{Turb} \Rightarrow \text{máx}$$

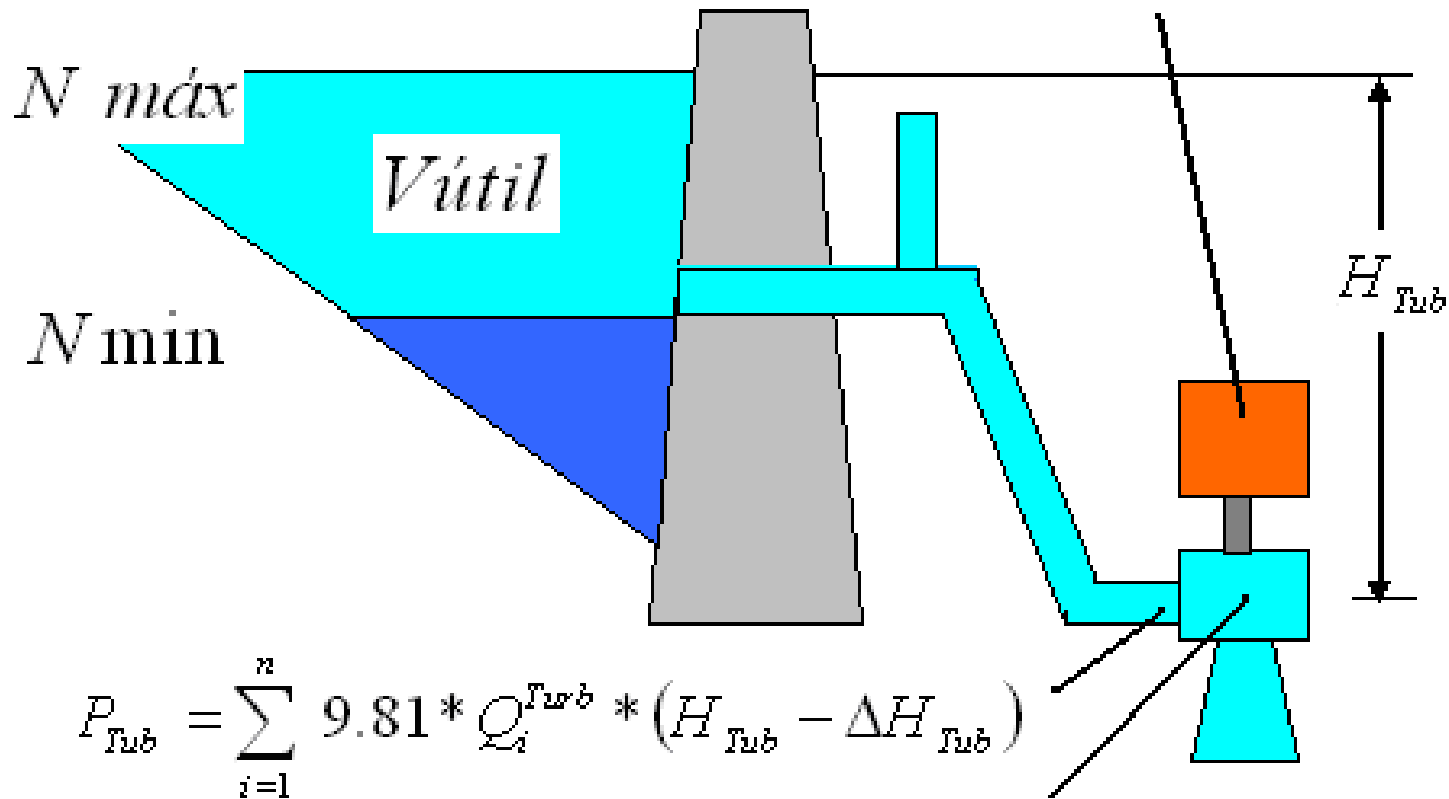
3. Optimización por potencia

$$P_{Tub} \Rightarrow \text{máx} ; \Delta H_{Tub} \Rightarrow \text{mín}$$

$$P_{Mec} \Rightarrow \text{máx}; \sum_{i=1}^n \eta_i^{Turb} \Rightarrow \text{máx}$$

$$P_E \Rightarrow \text{máx}; \sum_{i=1}^n \eta_i^G \Rightarrow \text{máx}$$

$$P_E = \sum_{i=1}^n 9.81 * Q_i^{Turb} * (H_{Tub} - \Delta H_{Tub}) * \eta_i^{Turb} * \eta_i^G$$



$$P_{Tub} = \sum_{i=1}^n 9.81 * Q_i^{Turb} * (H_{Tub} - \Delta H_{Tub})$$

$$P_{Mec} = \sum_{i=1}^n 9.81 * Q_i^{Turb} * (H_{Tub} - \Delta H_{Tub}) * \eta_i^{Turb}$$

3.1. *Mínimo de pérdidas en la conducción.*

$$P_{Tub} \Rightarrow \text{máx} ; \Delta H_{Tub} \Rightarrow \text{mín}$$

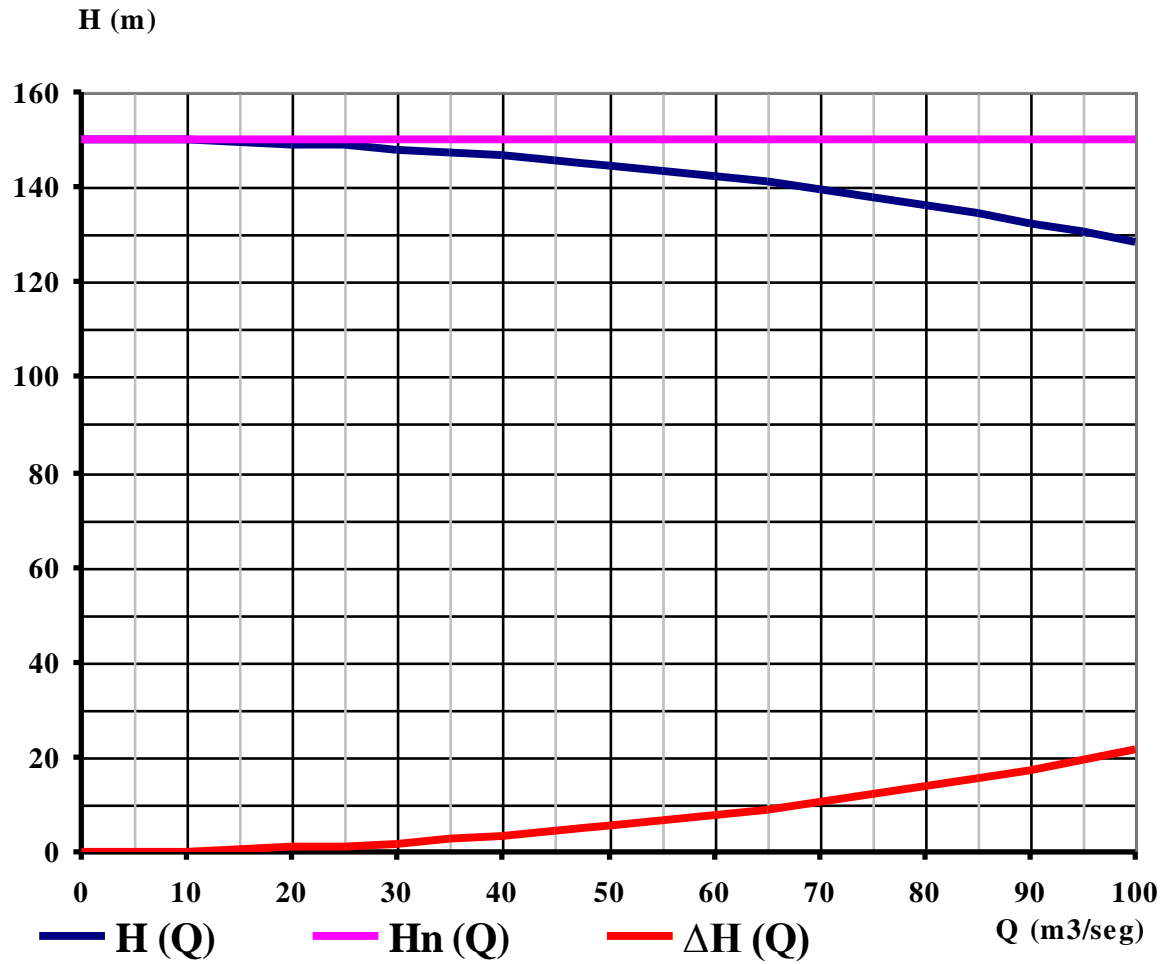
$$\Delta H_{Tub} = \frac{v^2}{2g} \left(\lambda \frac{L}{D} + \sum_{j=1}^m \xi_j \right)$$

$$\Delta H_{Tub} = \sum_{i=1}^n \left[\frac{8 Q_i^{Turb}{}^2}{\pi^2 D^4 g} \left(\lambda \frac{L}{D} + \sum_{j=1}^m \xi_j \right) \right]$$

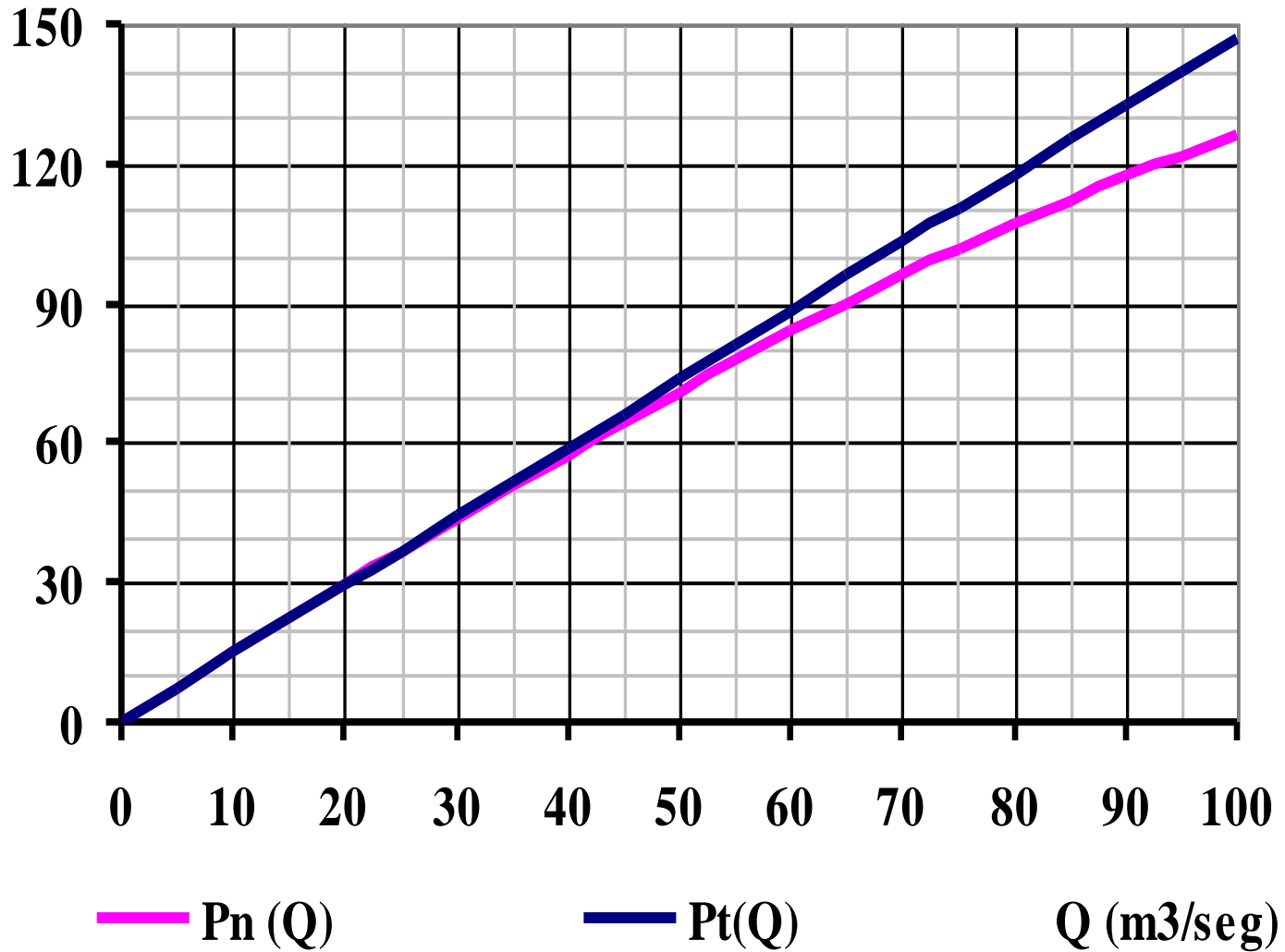
3. Optimización por potencia

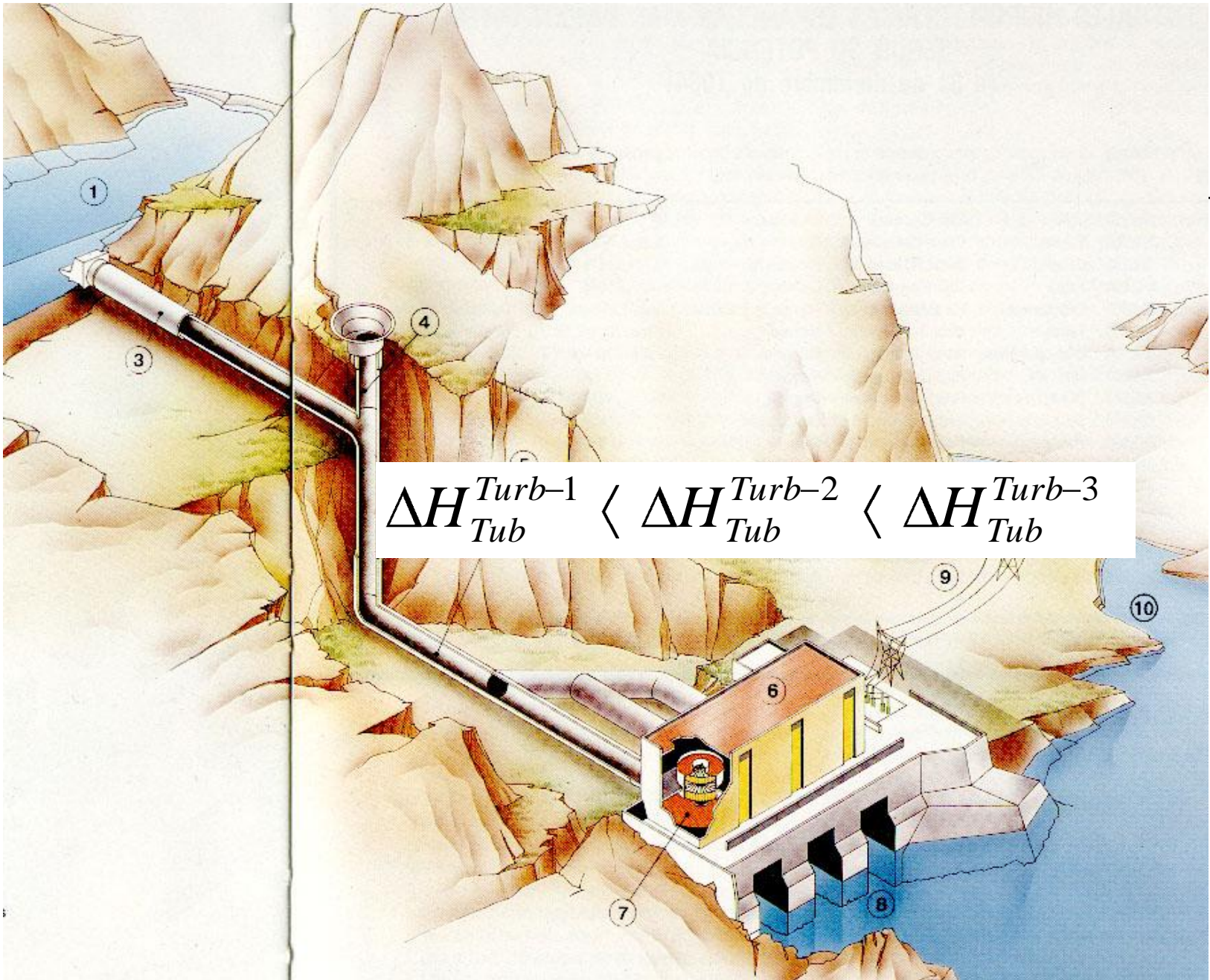
Dado que la potencia no depende del tiempo, su optimización es de **corto plazo**, orientándose desde el punto hidroenergético a obtener el **mínimo de pérdidas**.

Ejemplo



P (Mw)





Ejemplo

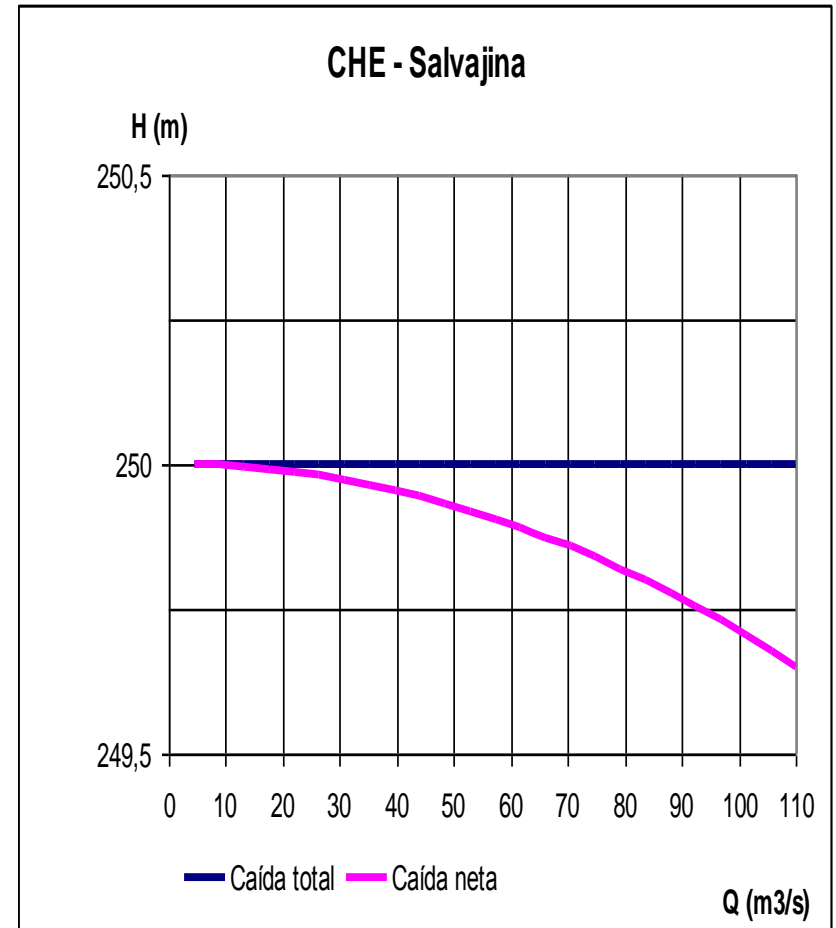
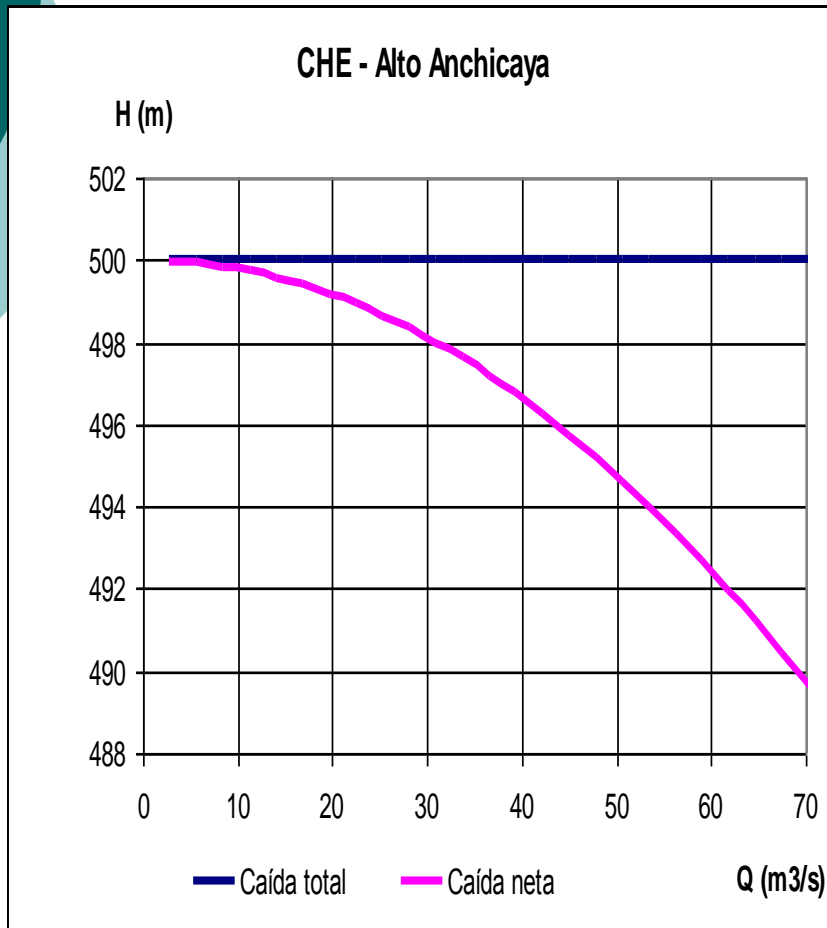
CHE – Gran Caída.

- Potencia instalada: 365 MW.
- Túnel de conducción: longitud: 8.3 km, diámetro: 5m.
- Túnel de carga: longitud: 450 m.
- Caída media: 440 m.
- Caudal medio: $43.3 \frac{m^3}{s}$

CHE –Pie de presa.

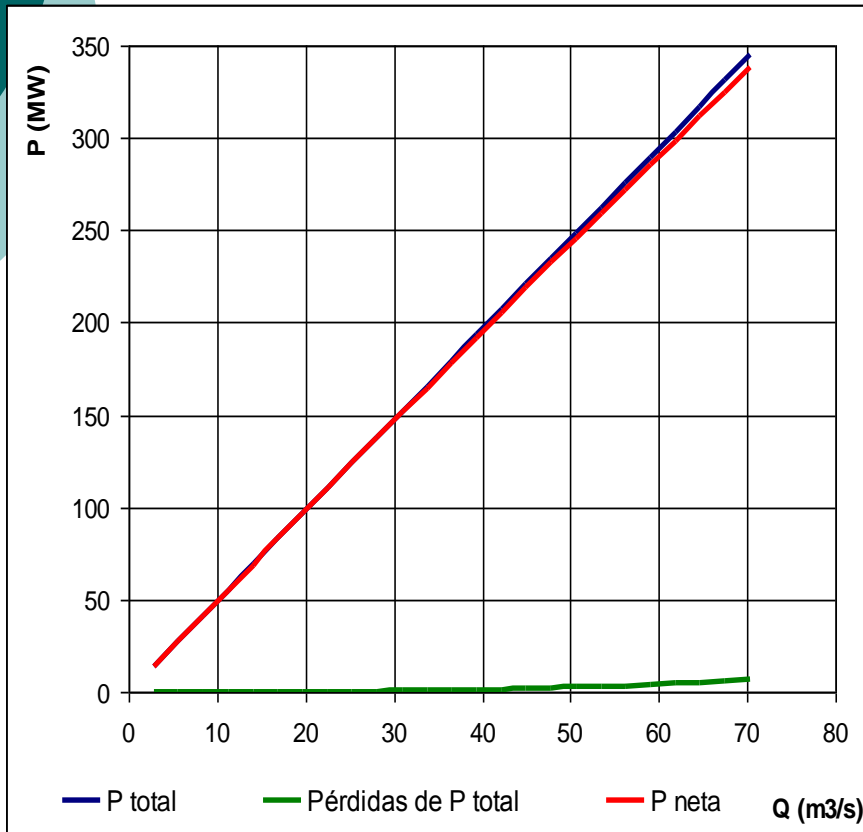
- Potencia instalada: 285 MW.
- Túnel de conducción: No tiene.
- Túnel de carga: longitud: 326 m, diámetro: 7.4 m..
- Caída media: 92m.
- Caudal medio: $144 \frac{m^3}{s}$

Pérdidas en la tubería.

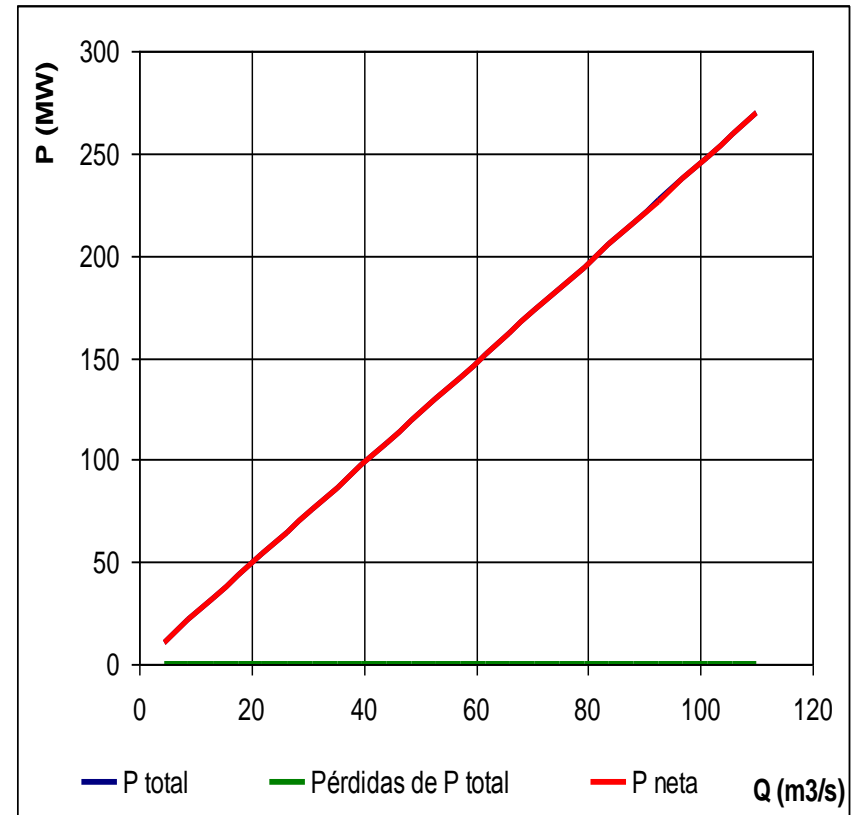


Potencia neta

CHE – Alto Anchicaya

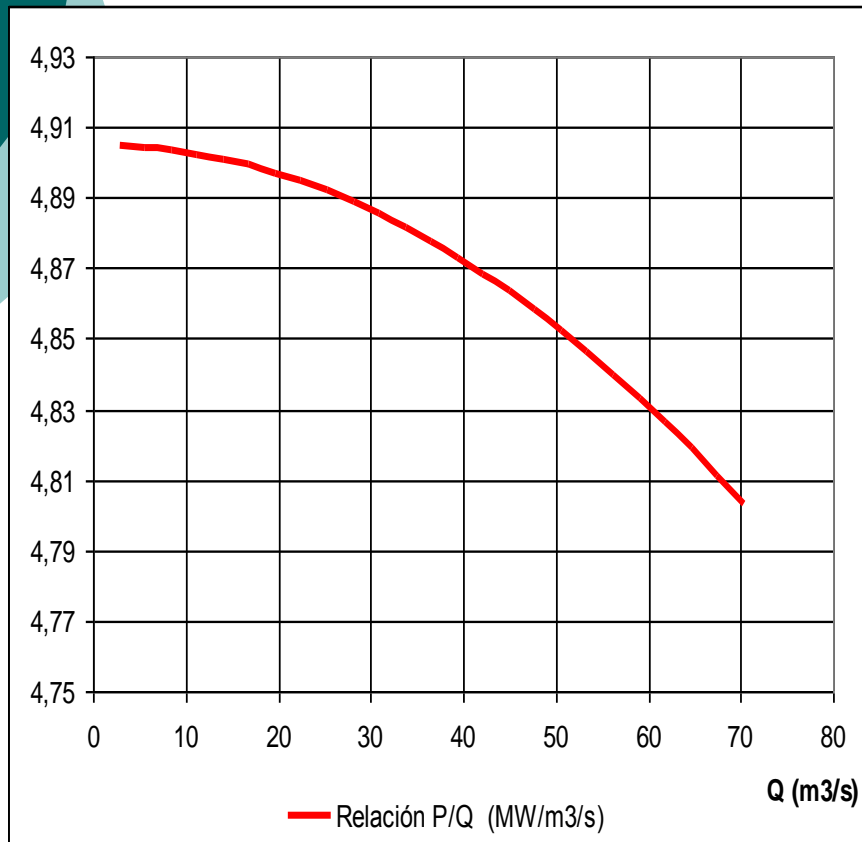


CHE - Salvajina

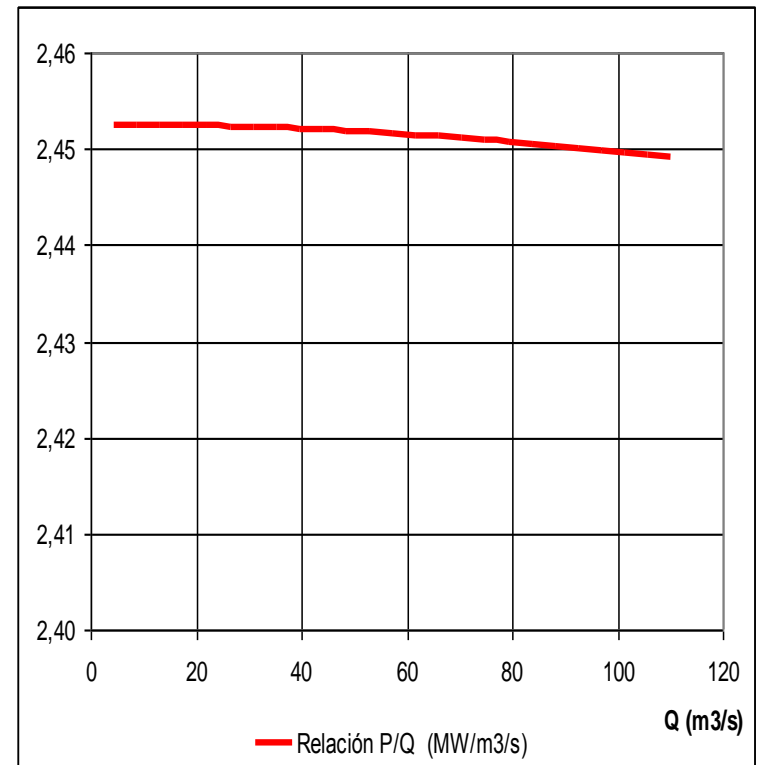


Relación potencia neta / caudal.

CHE – Alto Anchicaya

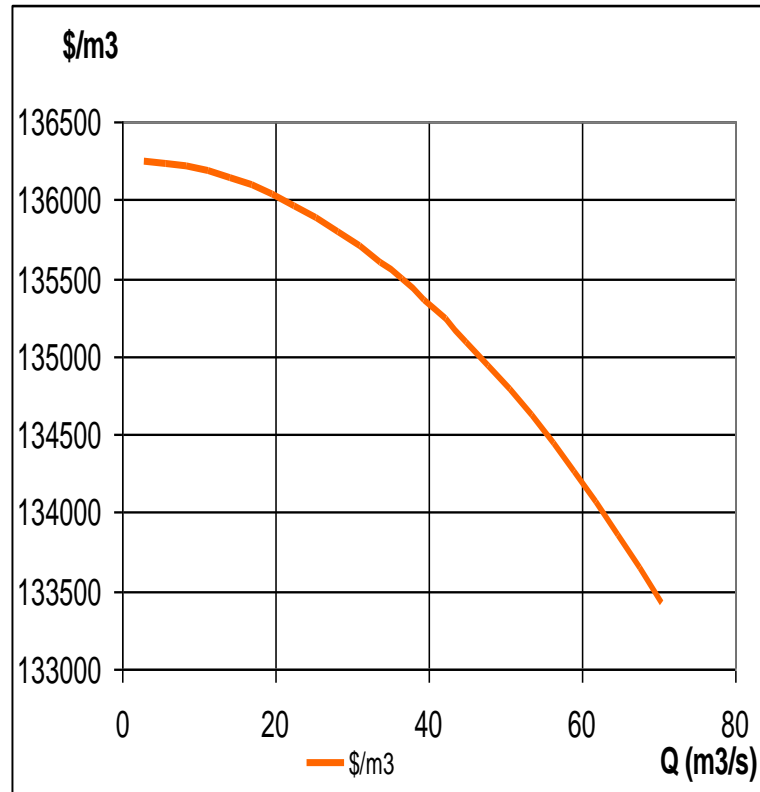


CHE - Salvajina

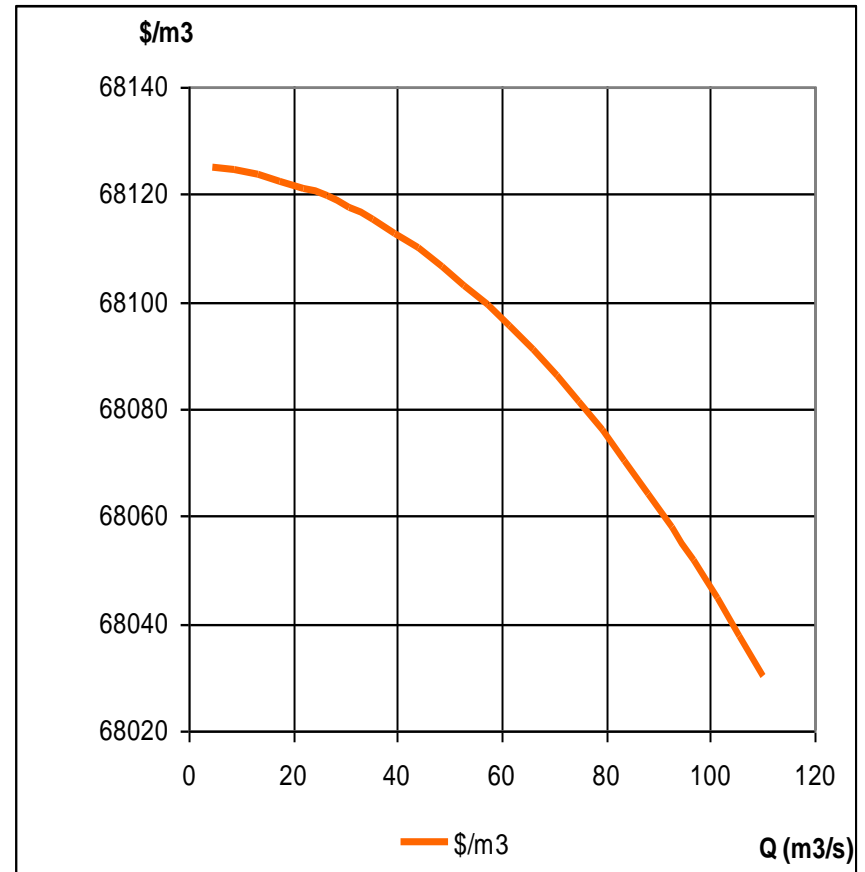


Costo del volumen de agua en el embalse, para un precio de 100 \$/kWh (\$/m³).

CHE – Alto Anchicaya



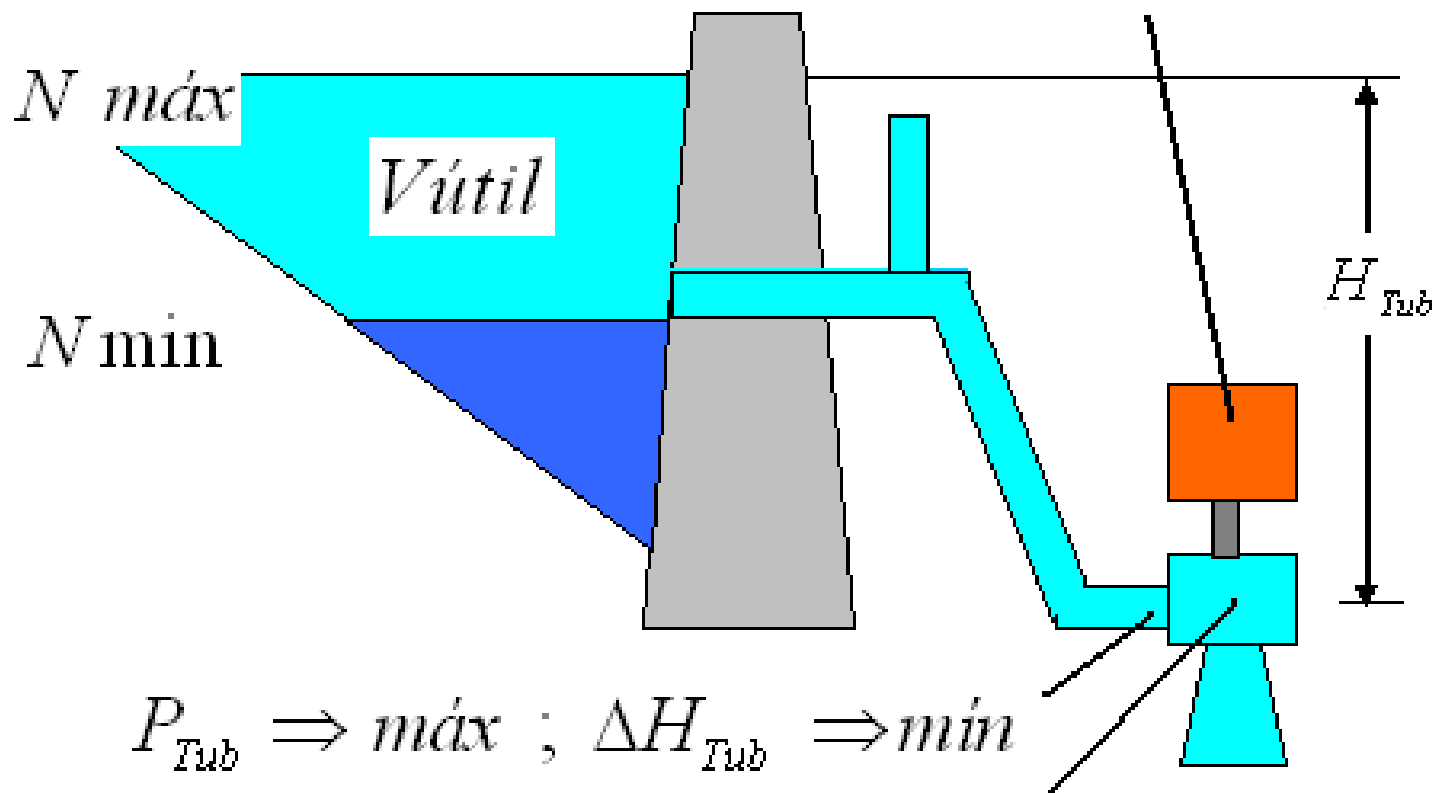
CHE - Salvajina



3.2. Mínimo de pérdidas en las turbinas

El costo del agua en una CHE, aumenta una relación directa a la caída. En tal sentido es importante hacer un Uso Racional Hidroenergético, basado en la Optimización de la distribución de la potencia entre las turbinas de una CHE, tal que garantice un despacho asignado con el mínimo caudal.

$$P_E \Rightarrow \text{máx}, \quad \sum_{i=1}^n \eta_i^G \Rightarrow \text{máx}$$



$$P_{Turb} \Rightarrow \text{máx} ; \quad \Delta H_{Turb} \Rightarrow \text{mín}$$

$$P_{Mec} \Rightarrow \text{máx}, \quad \sum_{i=1}^n \eta_i^{Turb} \Rightarrow \text{máx}$$

3.2. *Mínimo de pérdidas en las turbinas*

$$\sum_{i=1}^n \eta_i^{Turb} \Rightarrow \textit{máx}$$

$$P_{Mec} \Rightarrow \textit{máx} \quad \sum_{i=1}^n Q_i^{Turb} \Rightarrow \textit{mín}$$

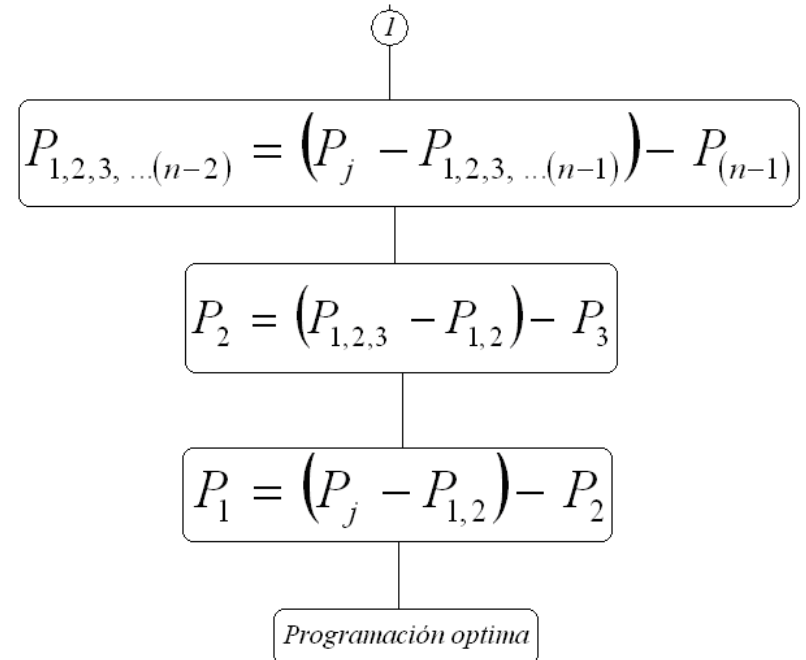
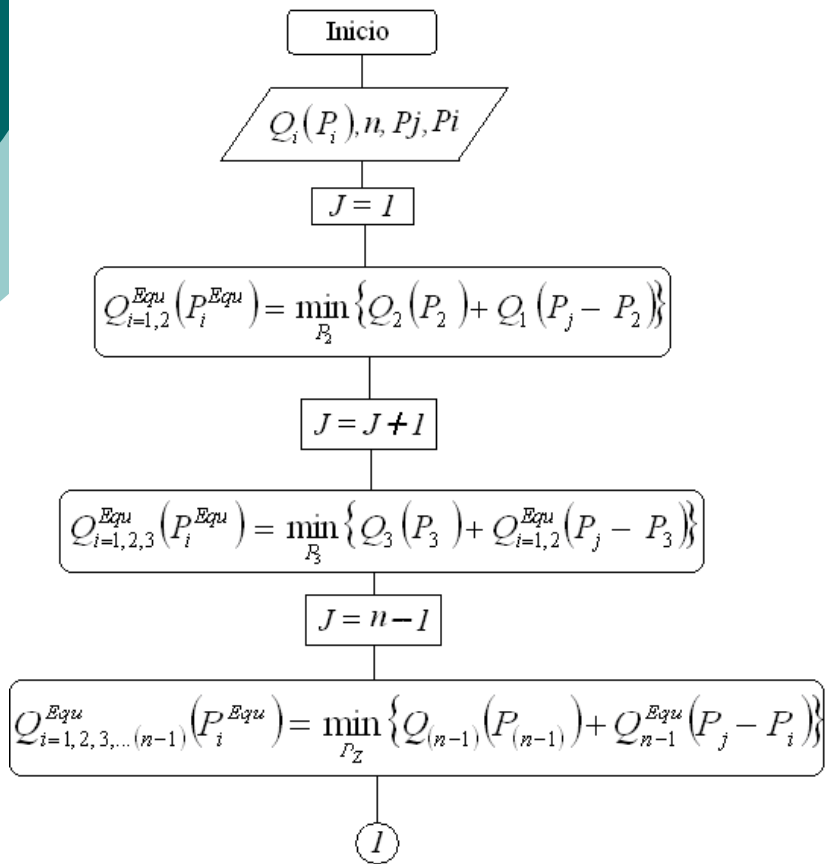
$$Q_{Opt} \quad P_{Mec} \Rightarrow \sum_{i=1}^n Q_i^{Turb} \Rightarrow \textit{mín}$$



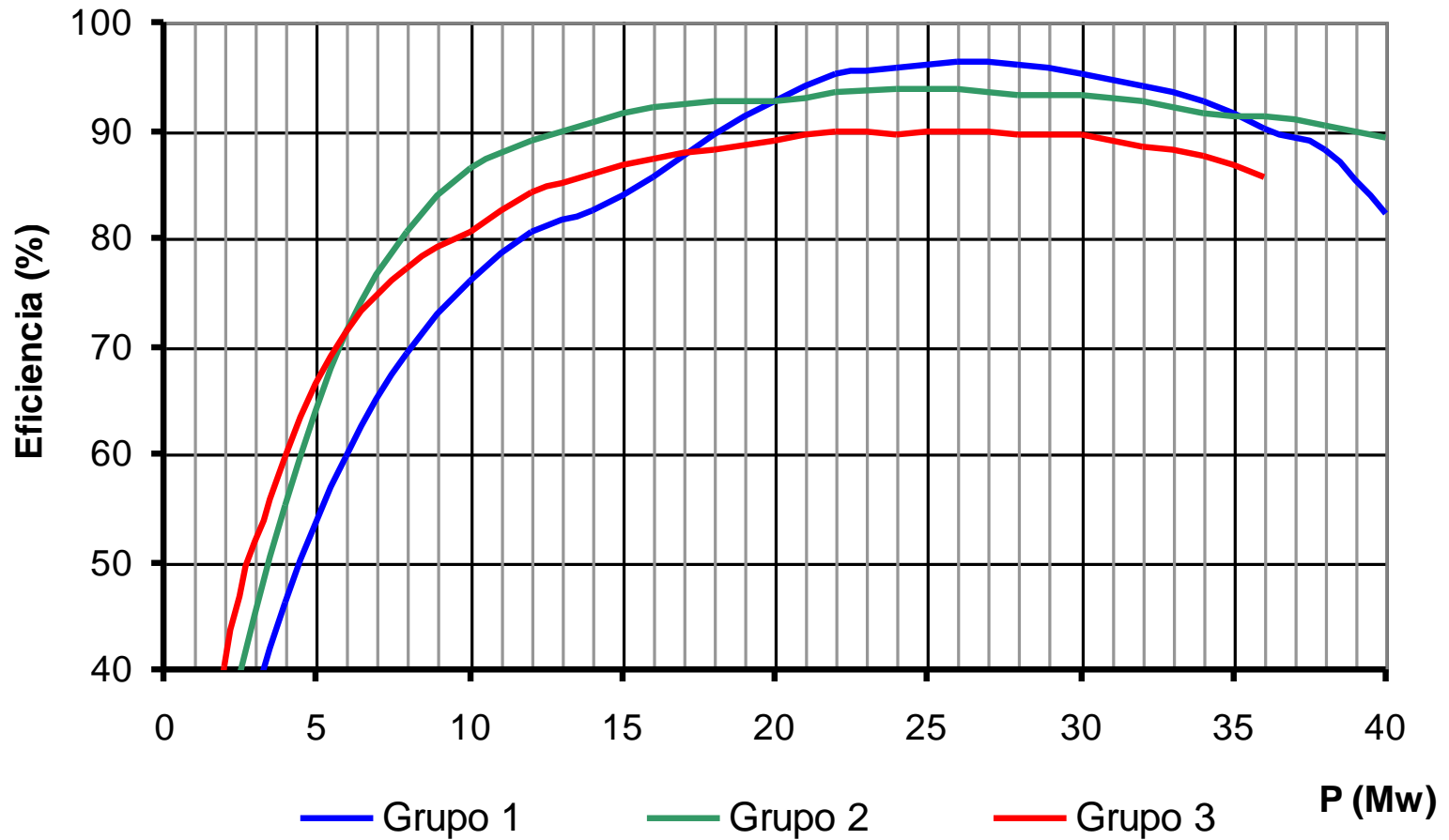
Métodos para Optimizar el despacho interno .

Programación dinámica

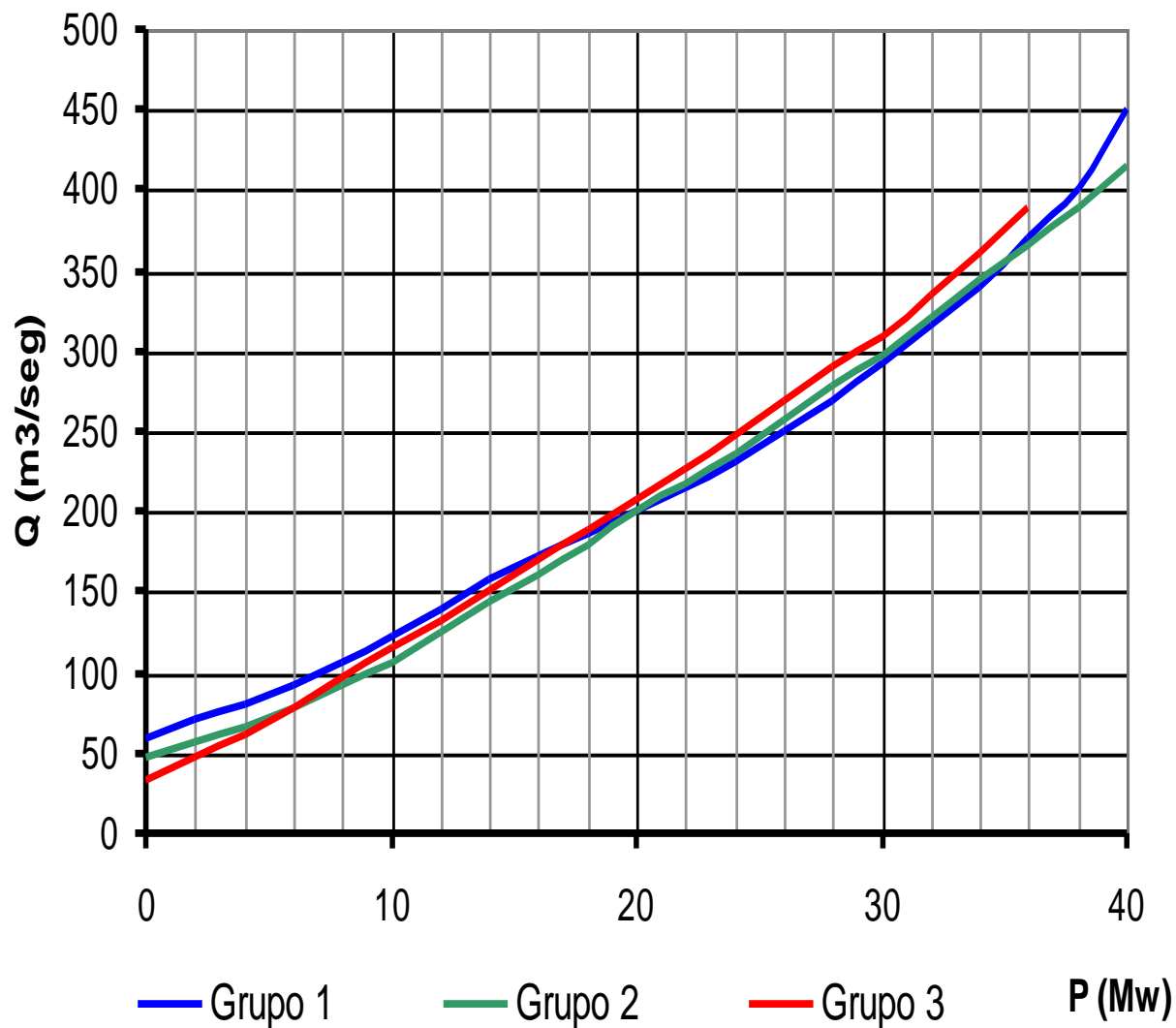
Programación dinámica



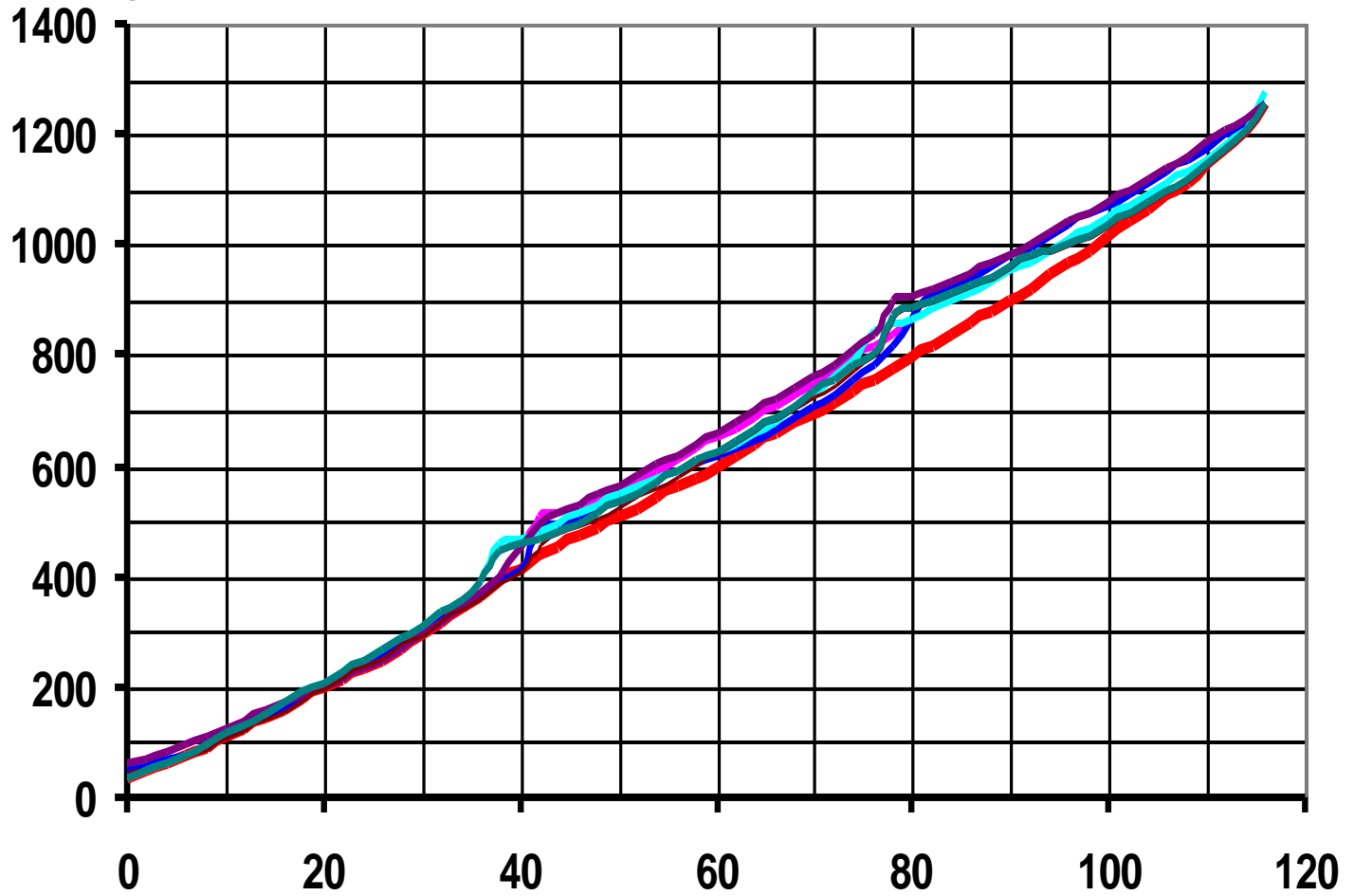
Ejemplo



P _{tur} (Mw)	Q (m ³ /seg)		
	G-1	G-2	G-3
0	60	48	32
2	70	56	46
4	80	67	62
6	93	78	78
8	107	92	96
10	122	107	115
12	138	125	132
14	157	143	151
16	173	161	170
18	186	180	189
20	200	200	208
22	214	218	227
24	232	237	248
26	250	257	268
28	270	278	290
30	292	298	310
32	315	320	335
34	340	344	360
36	370	366	390
38	400	390	
40	450	415	

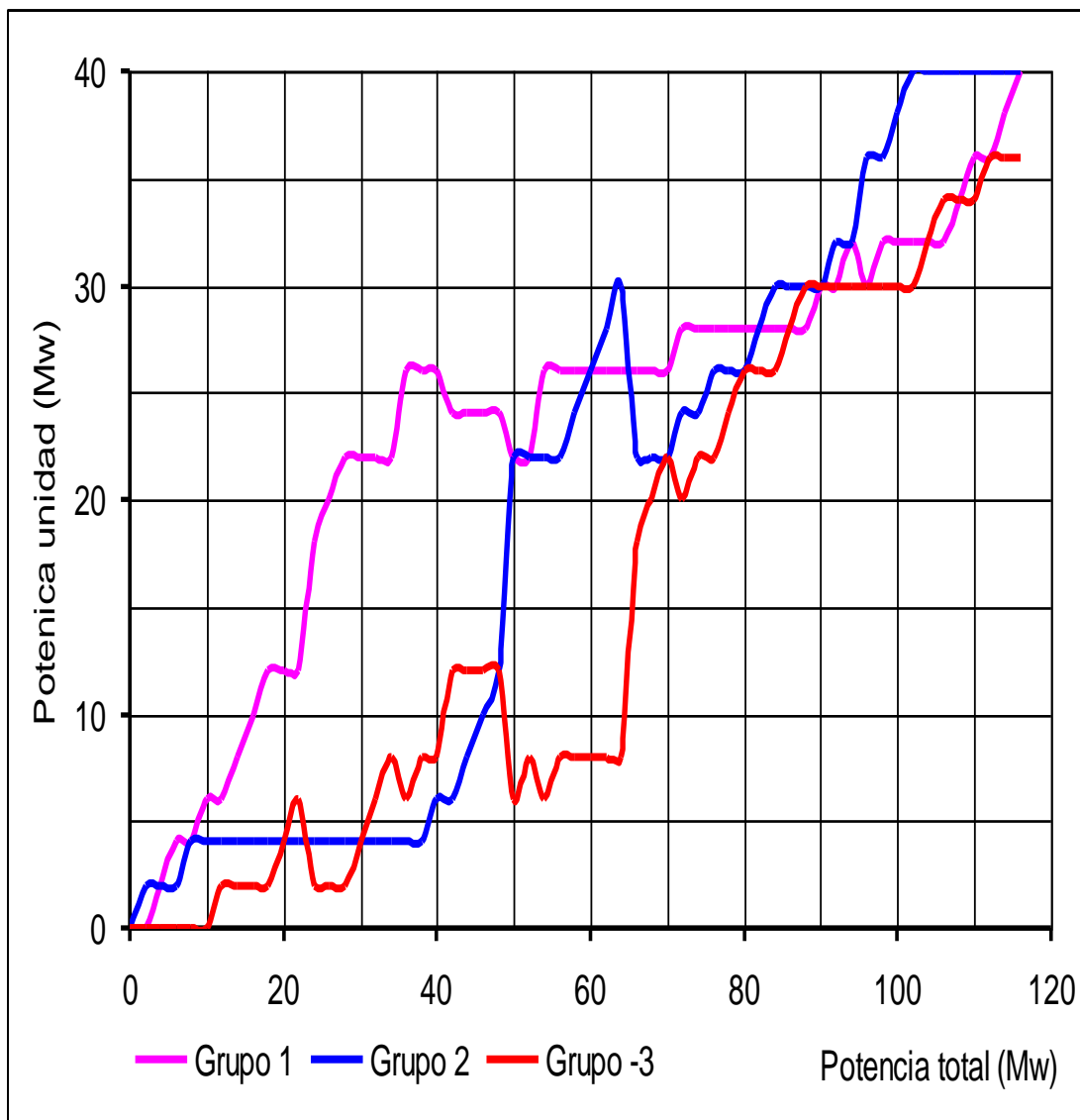


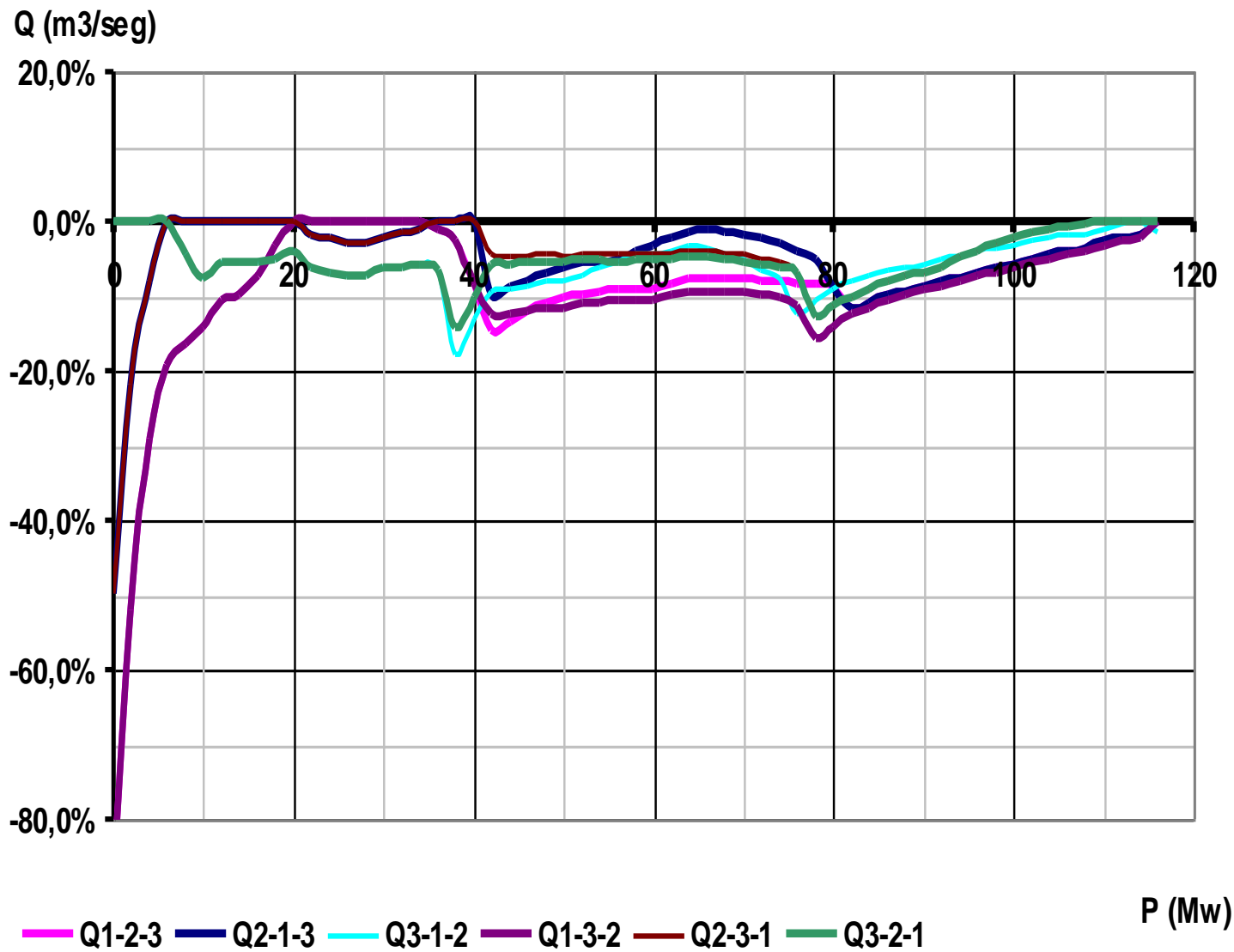
Q (m³/seg)



Qoptimo Q1-2-3 Q2-1-3 Q3-1-2 Q1-3-2 Q2-3-1 Q3-2-1

P_{CHE} Mw	Q (m ³ /seg)	G-1 Mw	G-2 Mw	G-3 Mw
0	140	0	0	0
10	192	6	4	0
20	267	12	4	4
30	343	22	4	4
40	424	26	6	8
50	506	22	22	6
60	596	26	26	8
70	695	26	22	22
80	795	28	26	26
90	900	30	30	30
100	1015	32	38	30
110	1145	36	40	34
116	1255	40	40	36





Optimización del CHE.

- ***Optimización por utilidades***
- ***Optimización por energía***
- ***Optimización por potencia.***
- **Despacho estratégico de largo plazo.**
- **Despacho a largo plazo.**
- **Despacho en el corto plazo**

Conclusiones.

- Genera beneficios económicos, en la medida que el volumen no turbinado, representa un ahorro hidroenergético.
- Permite la construcción de características óptimas de cargabilidad para el despacho interno de CHE's, dadas para diferentes niveles del embalse.
- El despacho interno de la CHE, se puede optimizar aun más, al integrar las pérdidas hidráulicas en la conducción del caudal en la CHE.

Conclusiones.

- La aplicación de los procesos de optimización son validos para todo tipo de turbinas hidráulicas.
- Los procesos de optimización también son aplicables para optimización del funcionamiento del embalse.
- Requiere conocer la curva de cargabilidad para diferentes niveles de caída de cada una de las turbinas.

Aporte al mejoramiento empresarial

La optimización del despacho interno de la CHE, le permite a las empresas generadoras:

- Mejorar la disponibilidad y confiabilidad de sus CHE´s.
- Le genera ahorros de energía.
- Acerca a las empresas generadoras al cumplimiento de objetivos, emanados por la comunidad internacional.