



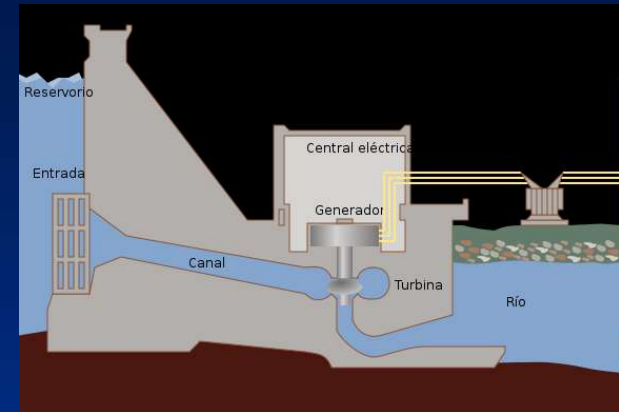
Universidad Nacional de Misiones

CÁTEDRA DE HIDRÁULICA APLICADA (CI453)

Ing. José A. Serra – Ing. Juan C. Pereira

H. Aplicada - Centrales de Pasada
Ing. José A. Serra - Ing. Juan C. Pereira

CENTRALES HIDROELÉCTRICAS



Definición:

Una central hidroeléctrica es aquella que utiliza energía hidráulica para la generación de energía eléctrica. Son el resultado actual de la evolución de los antiguos molinos que aprovechaban la corriente de los ríos para mover una rueda.

En general estas centrales aprovechan la energía potencial que posee la masa de agua de un cauce natural en virtud de un desnivel, también conocido como salto. El agua en su caída entre dos niveles del cauce se hace pasar por una turbina hidráulica la cual trasmite la energía a un generador el cual la convierte en energía eléctrica.

EN TODO APROVECHAMIENTO INTEGRAL DE UN CURSO DE AGUA SE DEBEN ESTABLECER LAS DOS MAGNITUDES FUNDAMENTALES:

Q y Hu

Q = Caudal → Función

ESTUDIOS HIDROLÓGICOS
(Aforos Líquidos y Sólidos)

Hu = Altura Útil → Función

ESTUDIOS TOPOGRÁFICOS
ESTUDIOS GEOLÓGICOS
ESTUDIOS HIDRÁULICOS

ESTUDIOS ECONÓMICOS



TIPOS DE CENTRALES

Clasificación:

1. **Según el Tipo de Embalse;**
2. Según la Altura Neta del Salto;
3. Según la Potencia Instalada;
4. Según el Sistema de Explotación;
5. Según la Demanda que Satisfacen.

1. TIPO DE EMBALSE

a)- **REGULARIZADAS**

Centrales de Embalse.

- Es el tipo más frecuente de central hidroeléctrica. Utilizan un embalse para reservar agua e ir graduando el agua que pasa por la turbina. Es posible generar energía durante todo el año si se dispone de reservas suficientes.

Centrales de Acumulación por Bombeo

- Se trata de un tipo de central que solo genera energía en *horas punta* y la consume en *horas valle* (noches y fines de semana), mediante un grupo electromecánico de bombeo y generación. Justifican su existencia para hacer frente a variaciones de demanda energética en horas determinadas.

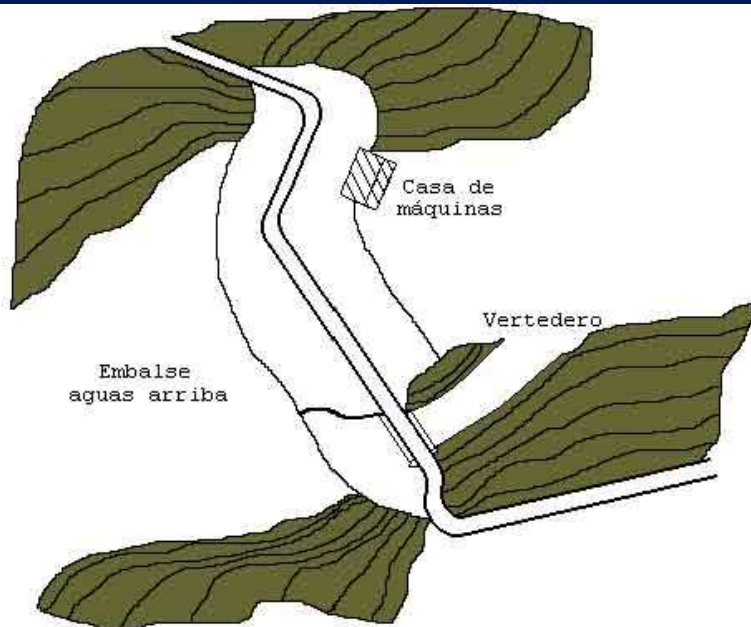
b)- **NO REGULARIZADAS**

Centrales a Pelo de Agua

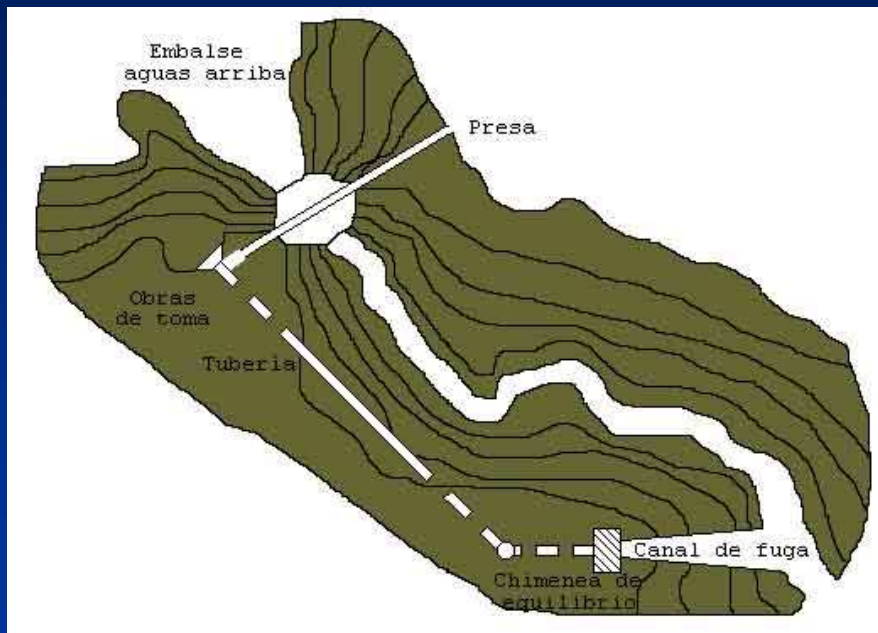
- También denominadas *centrales de pasada*, utilizan parte del flujo de un río para generar energía eléctrica. Operan en forma continua porque no tienen capacidad para almacenar agua, no disponen de embalse. Turbinan el agua disponible en el momento, limitadamente a la capacidad instalada.

Central Hidroeléctrica con Embalse de Reserva

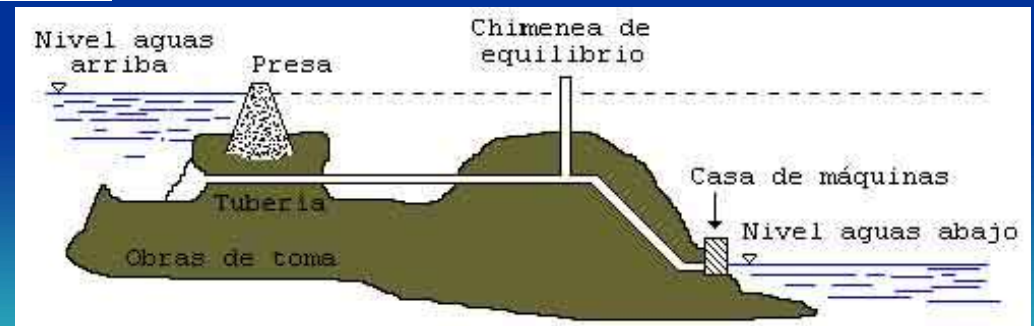
- *Se embalsa un volumen considerable de líquido "aguas arriba" de las turbinas mediante la construcción de una o más presas que forman lagos artificiales.*



Central Hidroeléctrica con Embalse de Reserva y aprovechamiento por derivación del agua



- *En el lugar apropiado por la topografía del terreno, se ubica la obra de toma de agua, y el líquido se lleva por medio de canales, o tuberías de presión, hasta las proximidades de la casa de máquinas.*

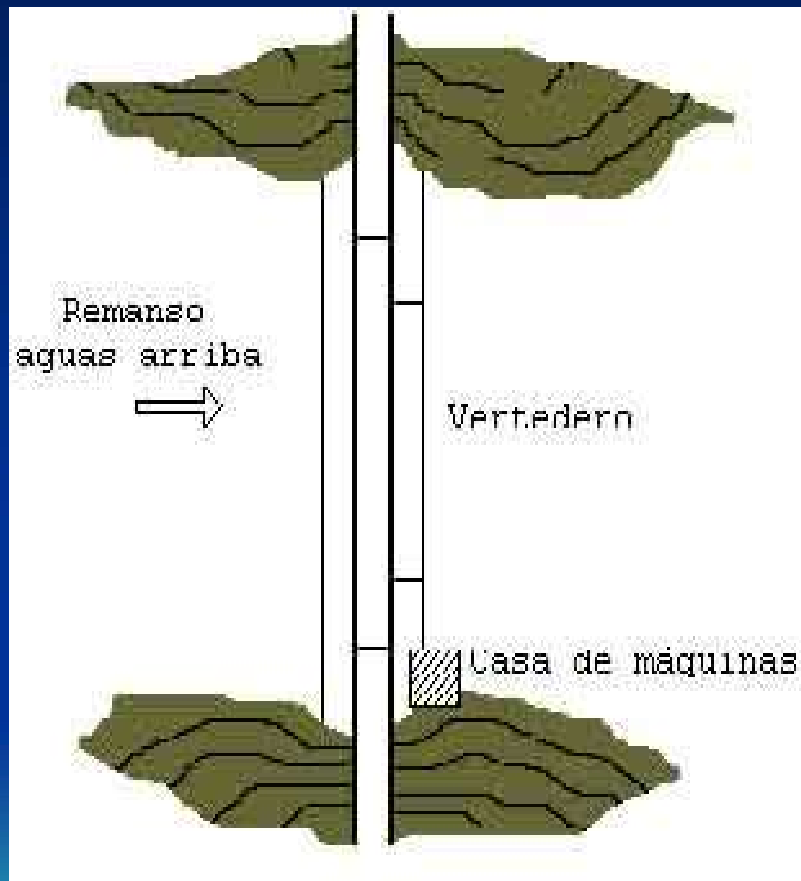




H. Aplicada - Centrales de Pasada
Ing. José A. Serra - Ing. Juan C. Pereira

Central Hidroeléctrica de Pasada

Se aprovecha un estrechamiento del río



- *El desnivel entre "aguas arriba" y "aguas abajo", es reducido.*



ESTUDIO HIDROLÓGICO DE UN CURSO DE AGUA EN VISTA DE SU APROVECHAMIENTO HIDROELÉCTRICO

- ESTABLECIDO YA EL SALTO QUE SE HA DE APROVECHAR EN NUESTRA INSTALACIÓN, QUEDA POR DETERMINAR EL CAUDAL **Q**, QUE POR OTRA PARTE PERMITIRÁ ESTABLECER LAS PÉRDIDAS DE ENERGÍA QUE DESCONTADAS DE LA CAIDA BRUTA DARA LA ALTURA ÚTIL **Hu**.

$$H_u = H_t - (kQ^2/2g)$$

- EL CAUDAL **Q** HABRÁ DE ESTABLECERSE EN BASE A OBSERVACIONES DIRECTAS DEL RÍO EFECTUADAS EN UN LARGO PERÍODO DE TIEMPO, PREFERIBLEMENTE MAYOR A 20 AÑOS. AFORANDO TANTO LÍQUIDO COMO SÓLIDO.

CRITERIO ECONÓMICO PARA LA
DETERMINACIÓN DEL
“CAUDAL DE INSTALACIÓN (Qi)”
DE UNA CENTRAL DE PASADA

CONSISTE EN DETERMINAR UNA ZONA ECONÓMICA DONDE OBTENEMOS EL COSTO DE LA ENERGÍA HIDRÁULICA (\$/kwh) PARA UNA SERIE DE POSIBLES “Qi” ADOPTADOS

- COSTO MÍNIMO DE LA ENERGÍA HIDRÁULICA



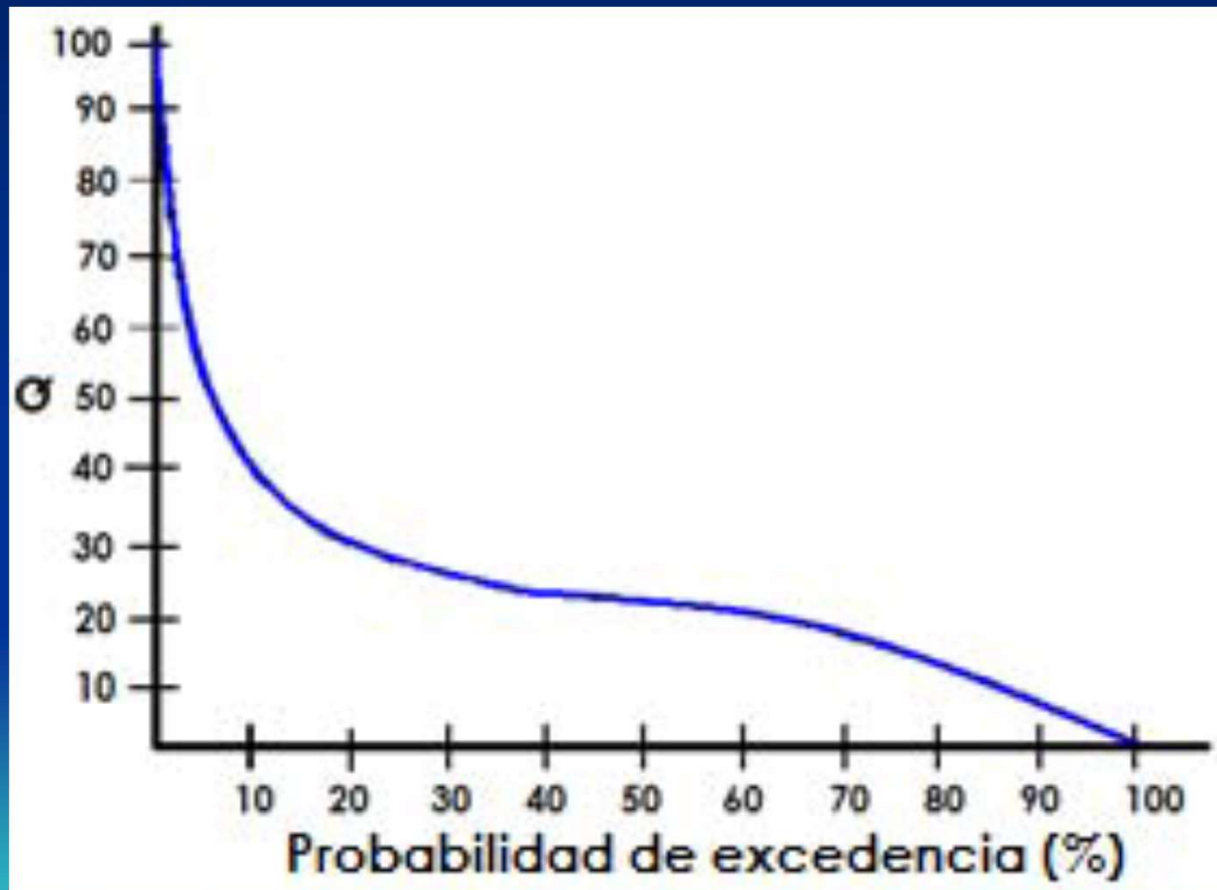
“Qi”

(o Zona Económica comparando con los costos de otro tipo de energía, por Ej: Térmica, Eólica, etc.)

LOS COSTOS QUE PONDERAMOS SON LOS DE CONSTRUCCIÓN Y LOS DE EXPLOTACIÓN DEL PROYECTO.

PASOS PARA LA DETERMINACIÓN DE “Qi”:

SI ANALIZAMOS LA CURVA DE DURACIÓN DE CAUDALES

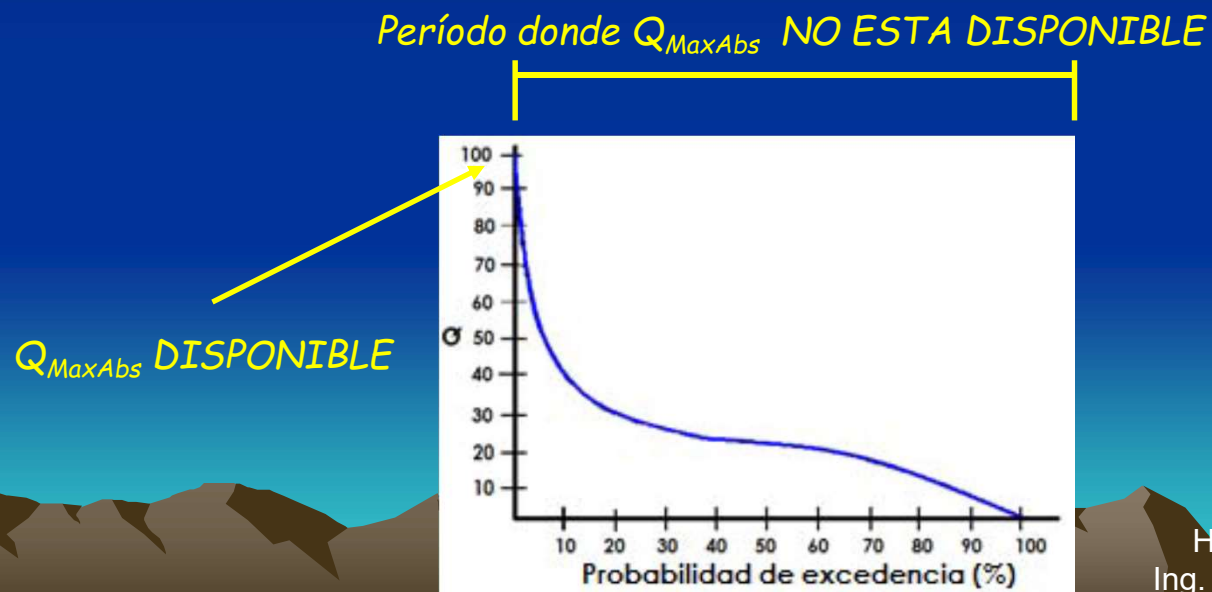


QUE CAUDAL
ADOPTAMOS
COMO “Qi”??

PASOS PARA LA DETERMINACIÓN DE “Qi”:

A)- SUPONEMOS QUE ADOPTAMOS Q_{MaxAbs}

- *Solo dispondremos del mismo, un día en todo el período;*
- *El resto del período no contaremos con dicho caudal para turbinar, los caudales serán menores al Q adoptado;*
- *ESTAMOS SOBRE-DIMENSIONANDO LA INSTALACIÓN, LA MISMA SE VUELVE ANTI-ECONÓMICA → AUMENTA EL COSTO (\$/kwh) DE LA ENERGÍA HIDRÁULICA (CEH)*



PASOS PARA LA DETERMINACIÓN DE “Qi”:

B)- SUPONEMOS QUE ADOPTAMOS Q_{MinAbs}

- *Dispondremos del mismo, todo el período;*
- *En este caso dimensionamos las instalaciones para ese caudal, pero la mayor parte del tiempo desaprovechamos caudales superiores;*
- *ESTAMOS SUB-DIMENSIONANDO LA INSTALACIÓN, LA MISMA TAMBIEN SE VUELVE ANTI-ECONÓMICA → AUMENTA EL COSTO (\$/kwh) DE LA ENERGÍA HIDRÁULICA (CEH)*

Período donde Q_{MinAbs} ESTA DISPONIBLE



Q_{MinAbs} SIEMPRE DISPONIBLE

PASOS PARA LA DETERMINACIÓN DE “Qi”:

C)- TENEMOS INFINITAS POSIBILIDADES PARA ADOPTAR “Qi”, DENTRO DE LOS VALORES DE LA CURVA DE DURACIÓN, ENTRE Q_{MaxAbs} Y Q_{MinAbs} .



PASO 1

ADOPTO VARIOS **Qi (m³/s)** DENTRO DE LA CURVA DE DURACIÓN, MÍNIMO 5 VALORES (CUANTOS MAS VALORES MEJOR PARA GRAFICAR).

(Trabajo en hoja de cálculo)

PASOS PARA LA DETERMINACIÓN DE “Qi”:

ECUACIONES FUNDAMENTALES

$$**POTENCIA (kw) \rightarrow N = 8 \cdot Hu \cdot Q**$$

Esta es la ecuación deducida en teoría, considerando los rendimientos tanto de la turbina como del generador!!

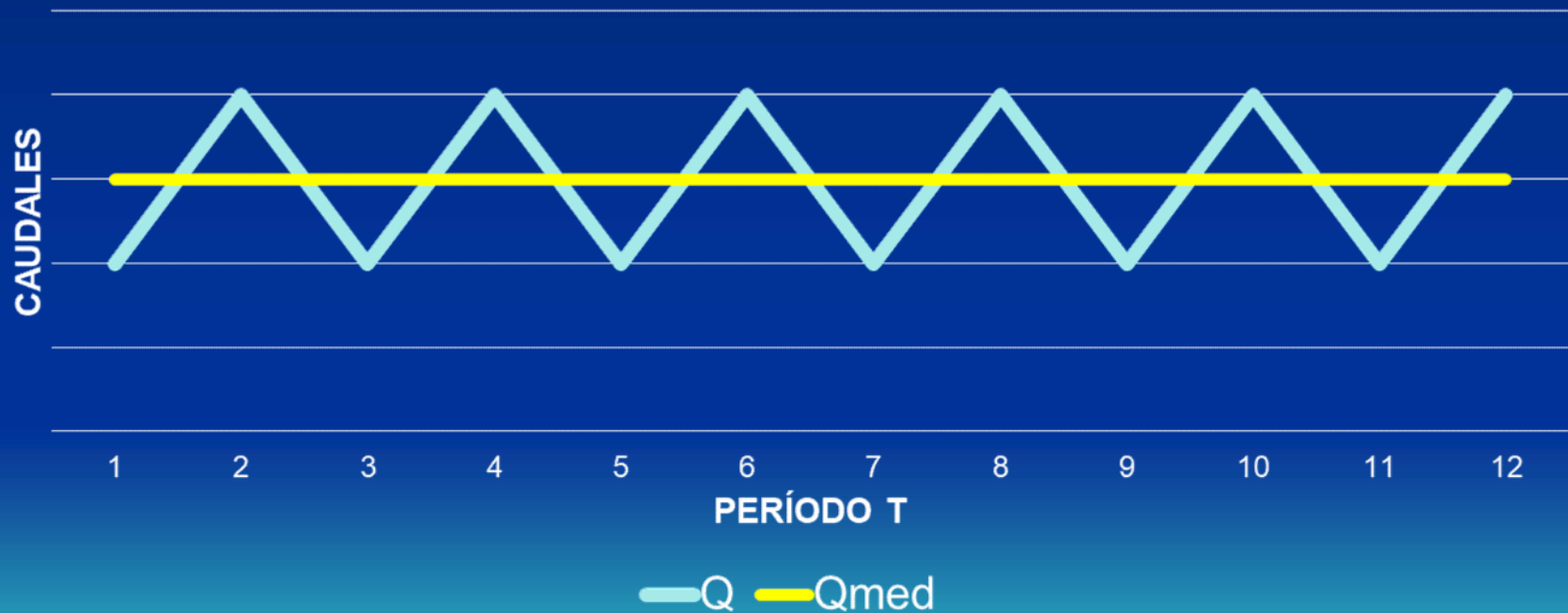
$$**ENERGÍA EN UN TIEMPO T (kwh) \rightarrow E = \int_0^T N \cdot dt**$$

$$**Ea = \int_0^T 8 \cdot Hu \cdot Q \cdot dt = 8 \cdot Hu \int_0^T Q \cdot dt = 8 \cdot Hu \cdot Q_{med} \cdot T**$$

PASOS PARA LA DETERMINACIÓN DE “Qi”:

ECUACIONES FUNDAMENTALES

$$Ea = \int_0^T 8 \cdot Hu \cdot Q \cdot dt = 8 \cdot Hu \int_0^T Q \cdot dt = 8 \cdot Hu \cdot Q_{med} \cdot T$$



PASOS PARA LA DETERMINACIÓN DE “Qi”:

CURVA DE DURACIÓN DE CAUDALES

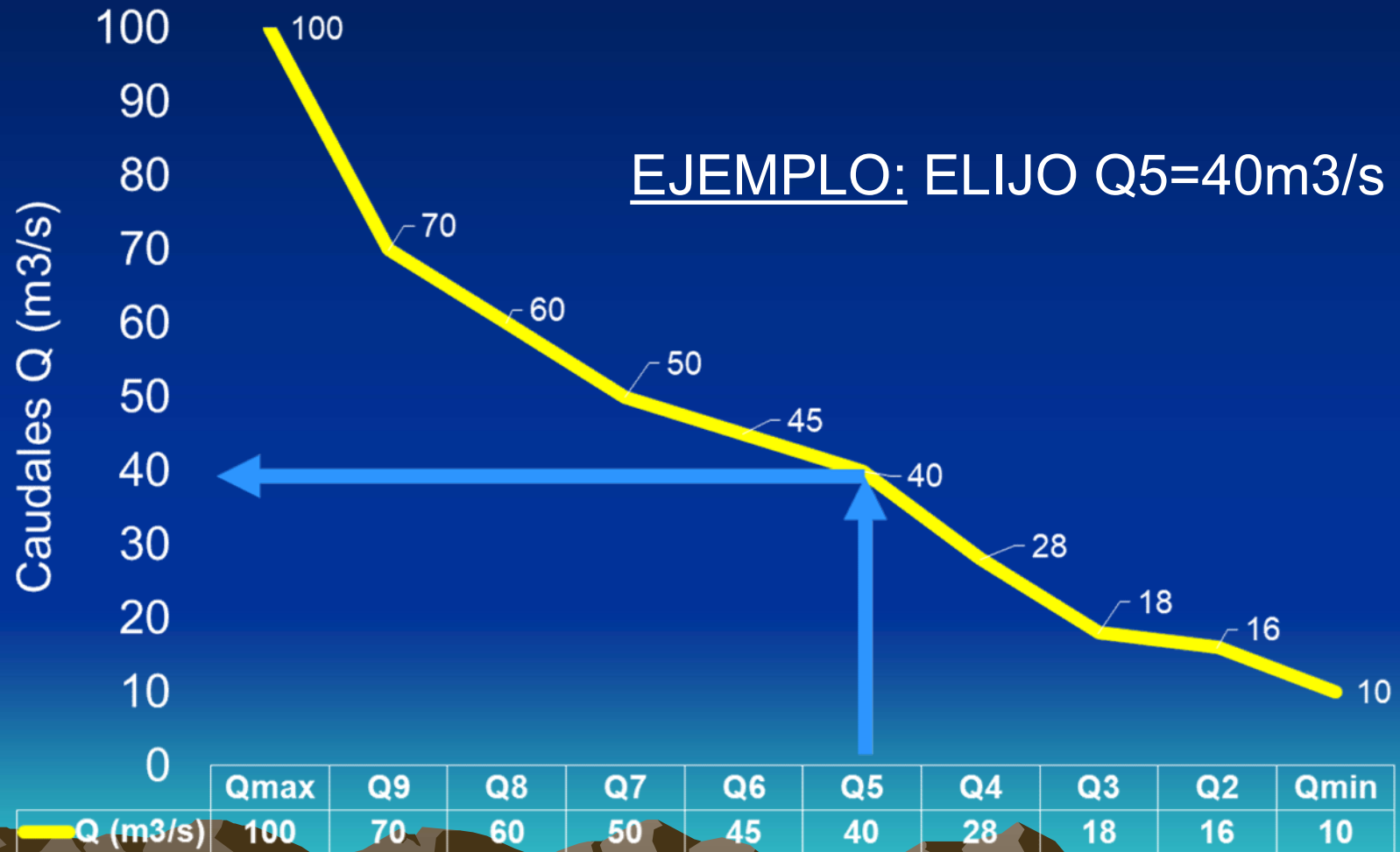


H. Aplicada - Centrales de Pasada
Ing. José A. Serra - Ing. Juan C. Pereira

Período (%)

PASOS PARA LA DETERMINACIÓN DE “Qi”:

CURVA DE DURACIÓN DE CAUDALES



H. Aplicada - Centrales de Pasada
Ing. José A. Serra - Ing. Juan C. Pereira

Período (%)

PASOS PARA LA DETERMINACIÓN DE “Qi”:

PASO 2

DETERMINO EL CAUDAL MEDIO Q_{mi} (m³/s) PARA CADA UNO DE LOS Q_i ADOPTADOS → PORQUE??

Porque cada Q_i solo lo tengo una fracción del período, el resto del período tengo un caudal inferior al elegido.....

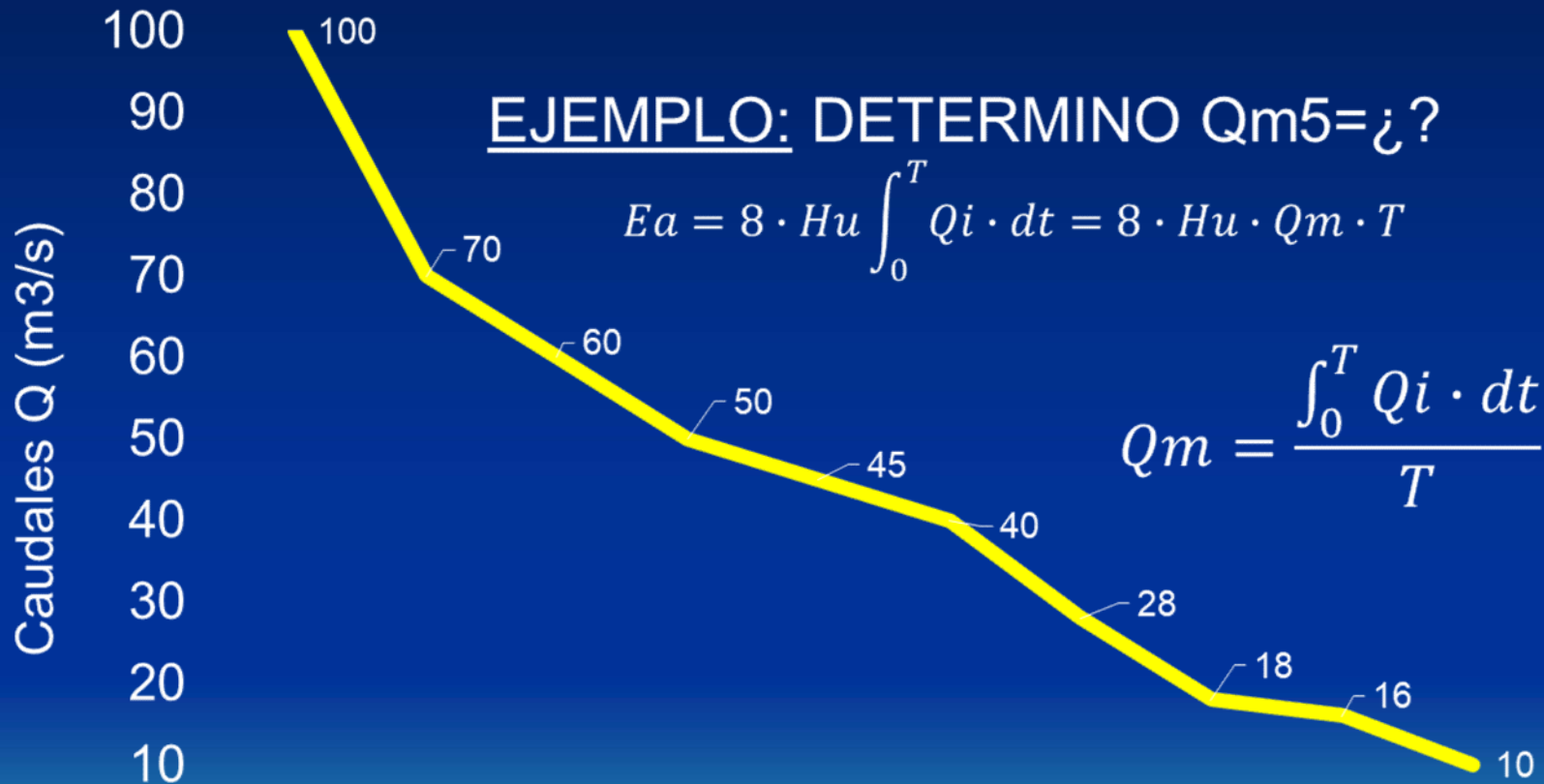
ESTO NO SE CUMPLE PARA → $Q_{MinAbs.}$



ESTE CAUDAL ESTA ASEGURADO EL 100% DEL PERÍODO T

PASOS PARA LA DETERMINACIÓN DE “Qi”:

CURVA DE DURACIÓN DE CAUDALES



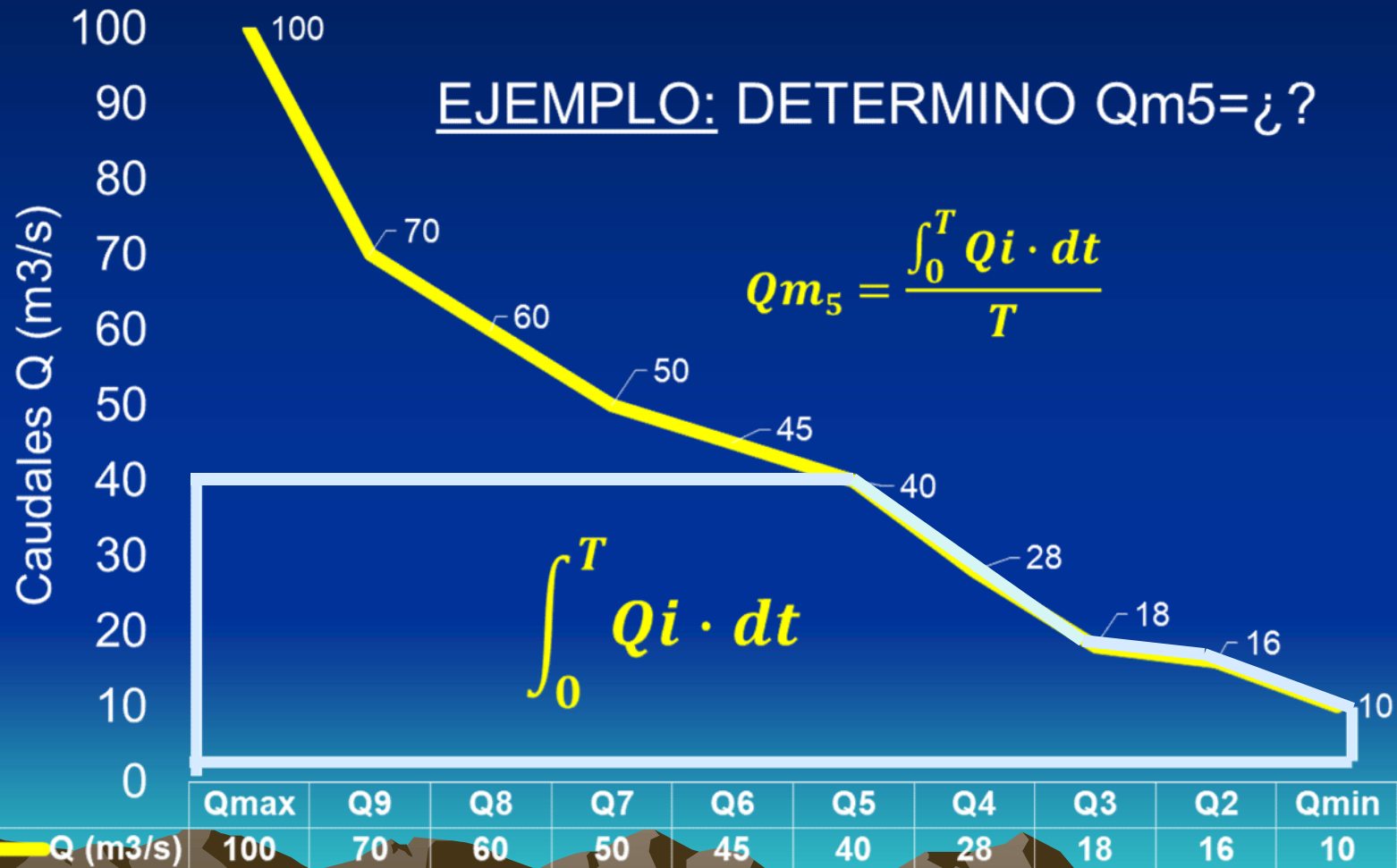
	Qmax	Q9	Q8	Q7	Q6	Q5	Q4	Q3	Q2	Qmin
Q (m3/s)	100	70	60	50	45	40	28	18	16	10

Período (%)

PASOS PARA LA DETERMINACIÓN DE “Qi”:

CURVA DE DURACIÓN DE CAUDALES

EJEMPLO: DETERMINO $Q_{m5} = ?$



PASOS PARA LA DETERMINACIÓN DE “Qi”:

CURVA DE DURACIÓN DE CAUDALES

EJEMPLO: GRAFICO Qm5 y el resto de los Qmi.....



H. Aplicada - Centrales de Pasada
Ing. José A. Serra - Ing. Juan C. Pereira

Período (%)

PASOS PARA LA DETERMINACIÓN DE “Qi”:

PASO 3

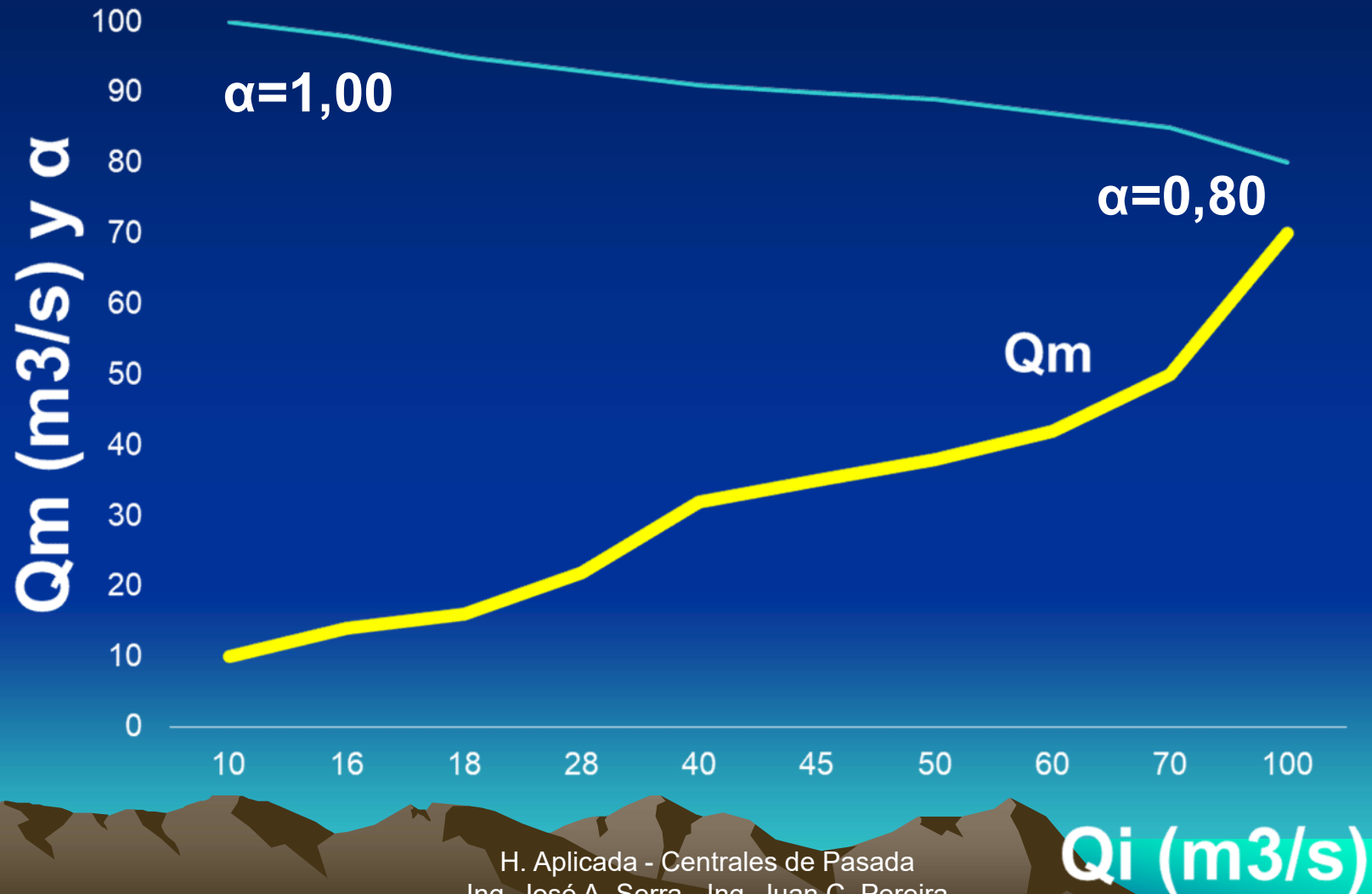
LOS Q_{mi} (m^3/s) SON TEÓRICOS, POR ELLO HAY QUE AFECTARLOS POR UN COEFICIENTE DE RENDIMIENTO DE LAS INSTALACIONES HIDRÁULICAS, QUE PARTIENDO DE LA UNIDAD PARA Q_{MinAbs} VARIA EN FORMA LINEAL HASTA UN CIERTO VALOR PARA $Q_{MaxCaract}$ → **COEFICIENTE α**

El valor de dicho coeficiente depende de la irregularidad del río. A curvas cronológicas regulares corresponde un coeficiente tendiendo a la unidad.

PARA → $Q_{MinAbs.}$ → $\alpha = 1$ y para $Q_{MaxCaract}$ → $\alpha < 1$

PASOS PARA LA DETERMINACIÓN DE “Qi”:

SI GRAFICAMOS LA VARIACIÓN DEL COEFICIENTE α



H. Aplicada - Centrales de Pasada
Ing. José A. Serra - Ing. Juan C. Pereira

PASOS PARA LA DETERMINACIÓN DE “Qi”:

PASO 4

AFECTO A LOS Q_{mi} (m³/s), POR EL → **COEFICIENTE α**

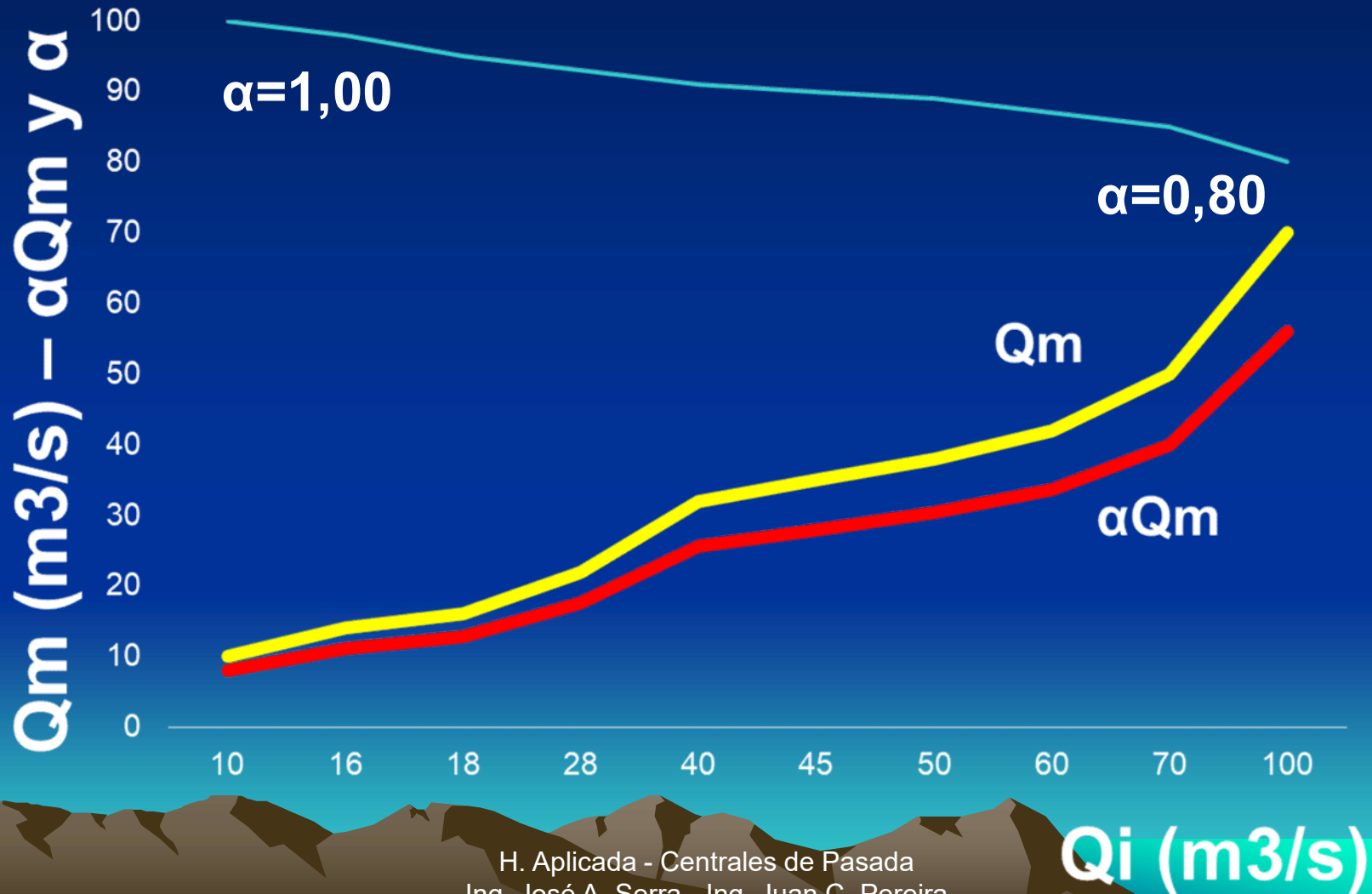


OBTENGO LOS CAUDALES MEDIOS UTILIZABLES

$$\alpha \cdot Q_m \text{ (m}^3\text{/s)}$$

PASOS PARA LA DETERMINACIÓN DE “Qi”:

SI GRAFICAMOS LA VARIACIÓN DEL COEFICIENTE α



H. Aplicada - Centrales de Pasada
Ing. José A. Serra - Ing. Juan C. Pereira

PASOS PARA LA DETERMINACIÓN DE “Qi”:

PASO 5

DETERMINO EL FACTOR DE UTILIZACIÓN → **Fu**



ES UN FACTOR QUE DA IDEA DEL GRADO DE UTILIZACIÓN DE LA POTENCIA INSTALADA EN UNA CENTRAL

$$\frac{\alpha \cdot Q_m}{Q_i} = \frac{8 \cdot H_u \cdot \alpha \cdot Q_m}{8 \cdot H_u \cdot Q_i} = \frac{N_{med}}{N_i} = F_u$$

PASOS PARA LA DETERMINACIÓN DE “Qi”:

PASO 6

CALCULO EL TIEMPO DE UTILIZACIÓN → **Tu**



ES EL NÚMERO DE HORAS EN EL AÑO QUE TRABAJANDO LA CENTRAL A PLENA CARGA ENTREGA TODA LA ENERGÍA QUE PUEDE PRODUCIR

$$Ea = 8 \cdot Hu \cdot \int_0^T Qi \cdot dt = 8 \cdot Hu \cdot Qi \cdot Tu = Ni \cdot Tu = 8 \cdot Hu \cdot \alpha \cdot Qm \cdot T$$

Si el período T representa 1 año, las horas alcanzan a 8760.

PASOS PARA LA DETERMINACIÓN DE “Qi”:

CALCULO EL TIEMPO DE UTILIZACIÓN → **Tu**



$$Ea = 8 \cdot Hu \cdot \int_0^T Qi \cdot dt = 8 \cdot Hu \cdot Qi \cdot Tu = Ni \cdot Tu = 8 \cdot Hu \cdot \alpha \cdot Qm \cdot T$$

$$Tu = \frac{8 \cdot Hu \cdot \alpha \cdot Qm \cdot 8760}{8 \cdot Hu \cdot Qi} = 8760 \cdot \frac{\alpha \cdot Qm}{Qi} = 8760 \cdot Fu$$

PASOS PARA LA DETERMINACIÓN DE “Qi”:

PASO 7

CALCULO LA POTENCIA INSTALADA → **Ni (kw)**



POTENCIA INSTALADA (kw) →

$$N_i = 8 \cdot H_u \cdot Q_i$$

(Para un H_u definido)

PASOS PARA LA DETERMINACIÓN DE “Qi”:

PASO 8

CALCULO LA ENERGÍA ANUAL → **Ea (kwh)**



$$\text{ENERGÍA ANUAL (kwh)} \rightarrow E_a = \int_0^T N_i \cdot dt$$

$$E_a = N_i \cdot T_u$$

PASOS PARA LA DETERMINACIÓN DE “Qi”:

PASO 9

PARA ESTE ANÁLISIS ECONÓMICO DISTINGUIMOS DOS GRANDES RUBROS:

- COSTOS DE CONSTRUCCIÓN DEL PROYECTO
- COSTOS DE EXPLOTACIÓN DEL PROYECTO
(Dentro de límites aceptables NO varían con Qi)



VARIAN CON Qi

PASOS PARA LA DETERMINACIÓN DE “Qi”:

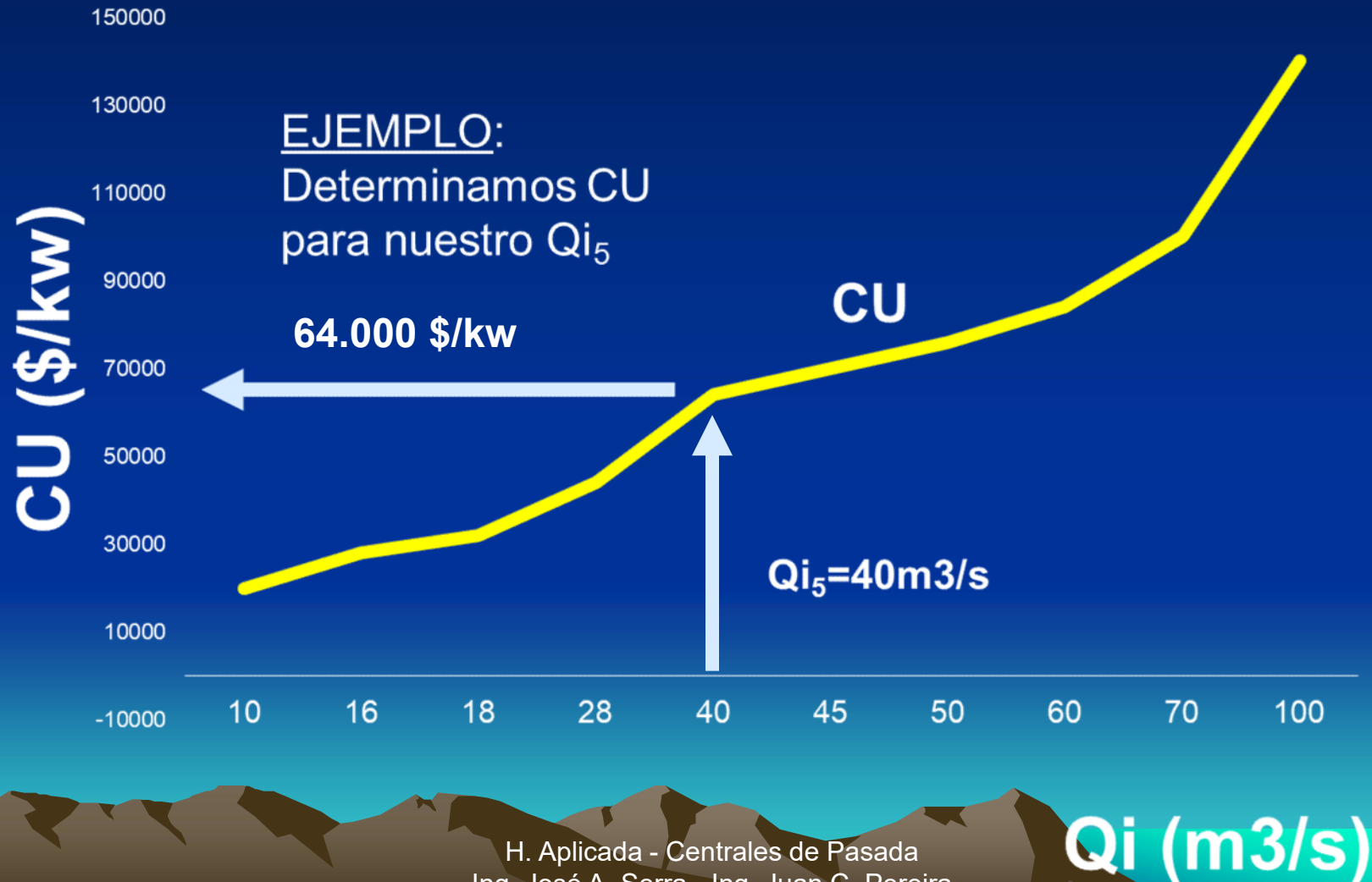
DEBEMOS ELABORAR 3 O 4 ANTEPROYECTOS DE OBRAS CON DISTINTOS **Qi** PARA PODER OBTENER UN COSTO UNITARIO DE CONSTRUCCIÓN (\$/kw):

$$CU(\$/kw) = \frac{\textit{Presupuestos de las Obras}}{8 \cdot Hu \cdot Qi} = \frac{PO}{Ni}$$

- DETERMINANDO LOS DIFERENTES CU PARA CADA Qi → **GRAFICO!!**
- ESTA CURVA ME PERMITIRÁ INTERPOLAR PARA CADA VALOR DE Qi QUE NECESITE.

PASOS PARA LA DETERMINACIÓN DE “Qi”:

SI GRAFICAMOS CU (\$/kw)



PASOS PARA LA DETERMINACIÓN DE “Qi”:

PASO 10

DETERMINO EL COSTO DE CONSTRUCCIÓN → **CC (\$)**

$$CC(\$) = CU(\$/kw) \cdot Ni(kw)$$

PASO 11

LA INVERSIÓN NECESARIA PARA CONSTRUIR LA OBRA
→ **CC (\$)** → REQUIERE UN PRÉSTAMO.....

ESTE CAPITAL INVERTIDO EXIGE UN SERVICIO DE
AMORTIZACIÓN Y DE INTERÉS ANUAL!!!

PASOS PARA LA DETERMINACIÓN DE “Qi”:

ESTO PUEDE DETERMINARSE CON LAS FÓRMULAS DE INTERÉS COMPUESTO:

- **TASA UNITARIA PARA LA AMORTIZACIÓN** → $a = \frac{i}{(1+i)^{n-1}}$

n = años del préstamo

- **TASA DE INTERÉS ANUAL** → $i =$ depende la calificación de cada país

- **TASA DE SERVICIO ANUAL DEL CAPITAL INVERTIDO** →

$$r = a + i$$

PASOS PARA LA DETERMINACIÓN DE “Qi”:

PASO 12

DETERMINO GASTO ANUAL QUE DEMANDA LA CONSTRUCCIÓN → **Sa (\$)**

$$Sa(\$) = CC(\$) \cdot r$$

PASO 13

SI AL GASTO ANUAL QUE DEMANDA LA CONSTRUCCIÓN LO DIVIDIMOS POR LA ENERGÍA ANUAL PRODUCIDA → **CCU (\$/kwh)**

$$CCU \left(\frac{\$}{kw} \right) = \frac{Sa(\$)}{Ea(kwh)}$$

COSTO DE LA ENERGÍA POR GASTOS DE CONSTRUCCIÓN

PASOS PARA LA DETERMINACIÓN DE “Qi”:

PASO 14

DETERMINO LOS COSTOS ANUALES DE EXPLOTACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LA CENTRAL → **Cexp (\$)**

Gastos de Operación de la central (sueldos, combustible, servicios, etc.);

Gastos por Mantenimiento de la central (repuestos, reparaciones, etc.);

Gastos por Mantenimiento Preventivo.

SE LO PUEDE ESTIMAR COMO UN % DEL COSTO DE CONSTRUCCIÓN PARA UN Qi DETERMINADO

PASOS PARA LA DETERMINACIÓN DE “Qi”:

PASO 15

SI AL GASTO ANUAL QUE DEMANDA LA EXPLOTACIÓN
LO DIVIDIMOS POR LA ENERGÍA ANUAL PRODUCIDA →
CEU (\$/kwh)

$$\text{CEU} \left(\frac{\$}{\text{kwh}} \right) = \frac{\text{Cexp}(\$)}{\text{Ea}(\text{kwh})}$$

COSTO DE LA ENERGÍA POR GASTOS DE EXPLOTACIÓN

PASO 16

DETERMINO EL COSTO DE LA ENERGÍA HIDRÁULICA →
CEH (\$/kwh)

PASOS PARA LA DETERMINACIÓN DE “Qi”:

→ SUMANDO LOS COSTOS DE LA ENERGÍA POR GASTOS DE CONSTRUCCIÓN Y EXPLOTACIÓN

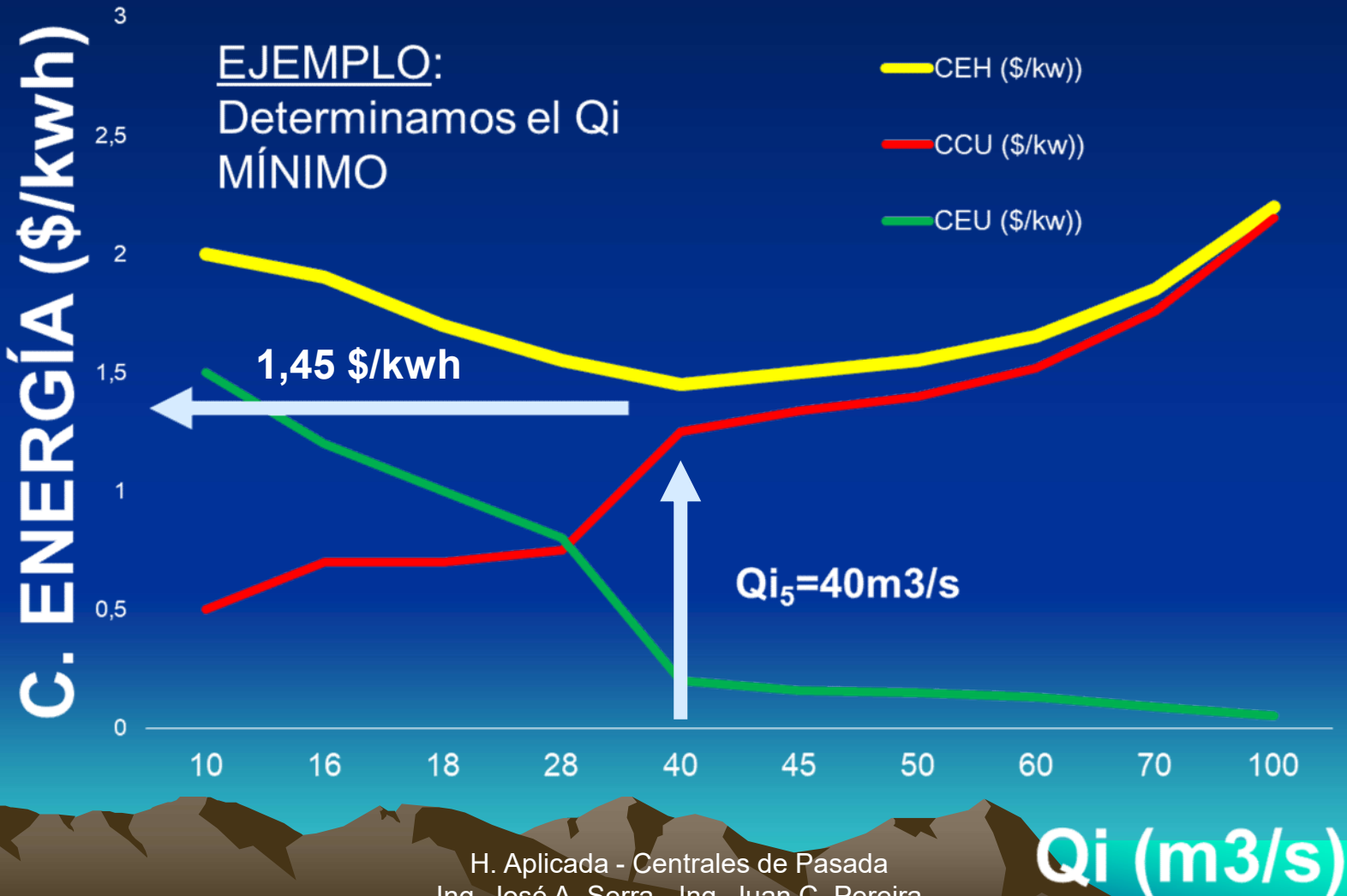
$$\text{CEH (\$/kwh)} = \text{CCU} + \text{CEU}$$



GRAFICO!!!!!!!

PASOS PARA LA DETERMINACIÓN DE “Qi”:

SI GRAFICAMOS COSTOS (\$/kwh)



PASOS PARA LA DETERMINACIÓN DE “Qi”:

PASO 17

EL MÍNIMO COSTO DE LA ENERGÍA HIDRÁULICA EN EL GRÁFICO →

DETERMINA EL “Qi” DE COSTO MÍNIMO

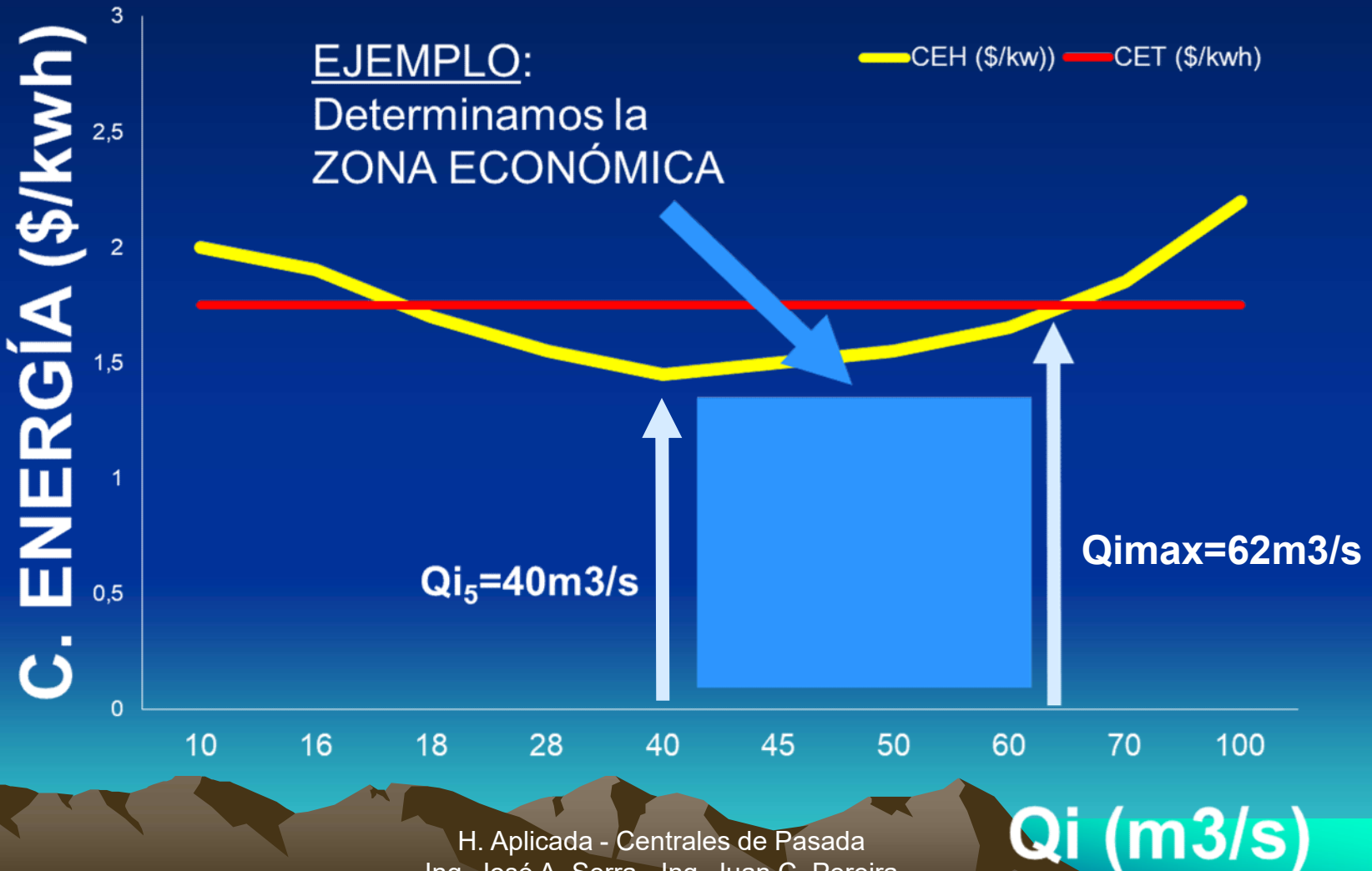
PASO 18

DEBO HACER LA COMPARATIVA CON EL COSTO DE OTROS TIPOS DE ENERGÍA PARA PODER ESTABLECER →

LA ZONA ECONÓMICA

PASOS PARA LA DETERMINACIÓN DE “Qi”:

SI GRAFICAMOS COSTOS DE ENERGÍAS (\$/kwh)



GRACIAS!!!!

Cátedra de Hidráulica Aplicada (CI453)

BIBLIOGRAFÍA

[1] VEN TE CHOW (1994) Hidrología Aplicada. Editorial McGRAW-HILL INTERAMERICANA S.A. Santa Fé de Bogotá – Colombia.

[2] INGENIERO COTTA ROBERTO DIEGO (1970) Clases de Máquinas Hidráulicas y Aprovechamientos Hidroeléctricos. CEILP.

[3] TEMEZ J.R. MOPU (1987) Cálculo Hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales. MOPU. Madrid.