

Seminario “*Técnicas avanzadas para la mejora de la eficiencia energética y los costes de operación en sistemas de transporte y distribución de agua*”

# Una nueva propuesta para evaluar el balance energético en sistemas de transporte y distribución de agua.

## Aplicaciones



# Objetivos

---

**Desagregar los aportes de energía a un sistema de transporte y distribución de agua para determinar:**



**El destino final de la energía aportada al sistema por cada fuente de energía (embalses, depósitos, bombas)**



**La procedencia de la energía aportada a cada nudo desde las distintas fuentes de energía**



**El reparto de la energía disipada en los elementos de transporte (tuberías y válvulas) entre la distintas fuentes y destinos del agua**



**El valor energético del agua almacenada en los depósitos en cada momento**



**Obtener nuevos indicadores energéticos, basados en la descomposición anterior**

# Del balance hídrico al balance energético

Para un sistema de transporte y distribución de agua en un instante dado se cumple:



**Balance hídrico:**  $Q \text{ entrante sistema} - Q \text{ saliente sistema} = 0$

Embalses, Depósitos, Puntos de inyección, Nudos de demanda



**Balance energético:**  $E \text{ grav. entrante} - E \text{ grav. saliente} + E \text{ bombeo} - E \text{ fricción} - E \text{ sumin} = 0$

Embalses, Depósitos, Puntos de inyección, Nudos de demanda, Bombas, Tuberías, Válvulas

Altura piezométrica

$$H_j = \frac{p_j}{\gamma} + z_j$$

E gravitatoria

$$\gamma \sum_{j \in Dep, Em} \mp Q_j H_j$$

E bombeo

$$\gamma \sum_{j \in Bomb} + Q_j \Delta H_j$$

E fricción

$$\gamma \sum_{j \in Tub, Valv} - Q_j \Delta H_j$$

E suminr

$$\gamma \sum_{j \in Demad} \mp Q_j H_j$$

## Problemas de la formulación energética global:

- Los indicadores energéticos globales propuestos en la literatura dependen de la referencia de cotas
- El balance global no informa de cómo se distribuye la energía, y por tanto no sirve para tomar decisiones

# Balance hídrico y energético a nivel de nudo

Sea  $Q_d$  el caudal demandado en el nudo  $d$  y  $q_{d,s}$  el caudal que sale por dicho nudo procedente de la fuente  $s$ :



Balance hídrico:

$$\sum_{s \in S} q_{d,s} = Q_d$$



Balance energético:

$$\gamma \sum_{s \in S} q_{d,s} (z_s - z_d) + \sum_{p \in P} w_{d,p} - \sum_{l \in L} f_{d,l} = \gamma Q_d \frac{p_d}{\gamma}$$

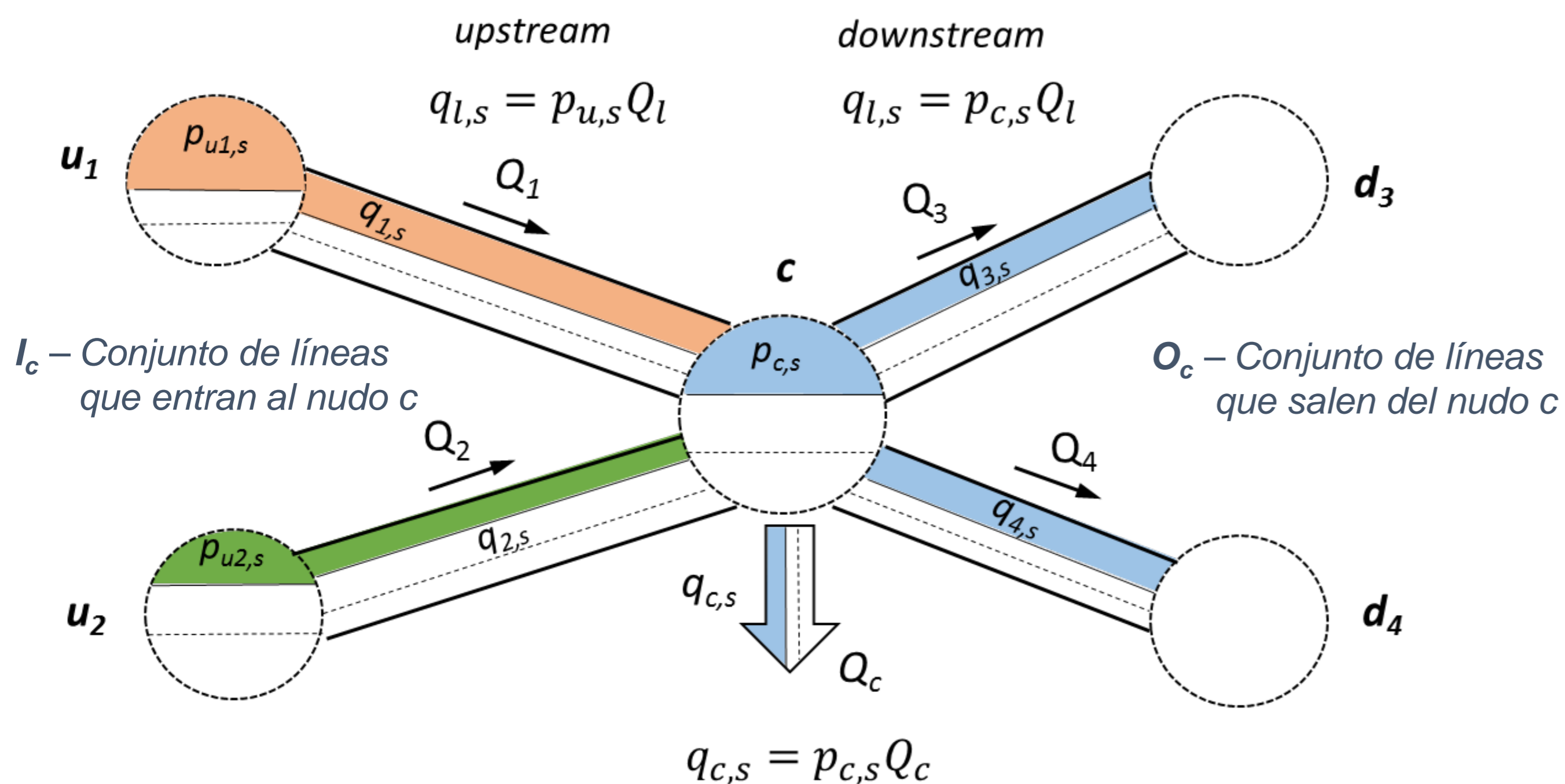
donde  $w_{d,p}$  es la energía que llega al nudo  $d$  procedente de la bomba  $p$ , y  $f_{d,l}$  la energía que no llega a dicho nudo por haberse disipado en el elemento  $l$

- Para los nudos que descargan a depósitos o embalses, la presión de llegada  $p_d$  será 0
- La suma de este balance para todos los nudos de demanda y puntos de descarga de la red, conduce a la ecuación de equilibrio global
- La cota de referencia no afecta al balance de energías, ya que las energías gravitatorias dependen de la diferencia de cotas  $z$  entre origen y destino

**Pero, ¿cómo determinar los valores de  $q_{d,s}$ ,  $w_{d,p}$  y  $f_{d,l}$ ?**

# Distribución de los caudales de suministro entre los nudos de consumo

$q_{l,s}$  = caudal que pasa por la línea  $l$  procedente de la fuente  $s$   
 $q_{c,s}$  = caudal que llega al nudo de consumo  $c$  desde la fuente  $s$   
 $p_{c,s}$  = porcentaje de caudal de la fuente  $s$  que llega al nudo  $c$



Ecuación de mezcla en los nudos:

$$p_{c,s} = \frac{\sum_{l \in I_c} q_{l,s}}{\sum_{l \in I_c} Q_l} = \frac{\sum_{l \in I_c} p_{u,s} Q_l}{\sum_{l \in O_c} Q_l + Q_c}$$

$$p_{c,s} \left( \sum_{l \in O_c} Q_l + Q_c \right) - \sum_{l \in I_c} p_{u,s} Q_l = 0$$

$$AP_s = Q_s \quad \left| \begin{array}{l} p_{c,s} \rightarrow q_{c,s} \\ p_{l,s} \rightarrow q_{l,s} \end{array} \right.$$

$$A = \Lambda Q_l \Lambda_d^T + Q_c$$

$\Lambda$  – Matriz de incidencias grafo no dirigido  
 $\Lambda_d$  – Matriz de incidencias grafo dirigido

# Distribución de la energía de bombeo entre los nudos de consumo

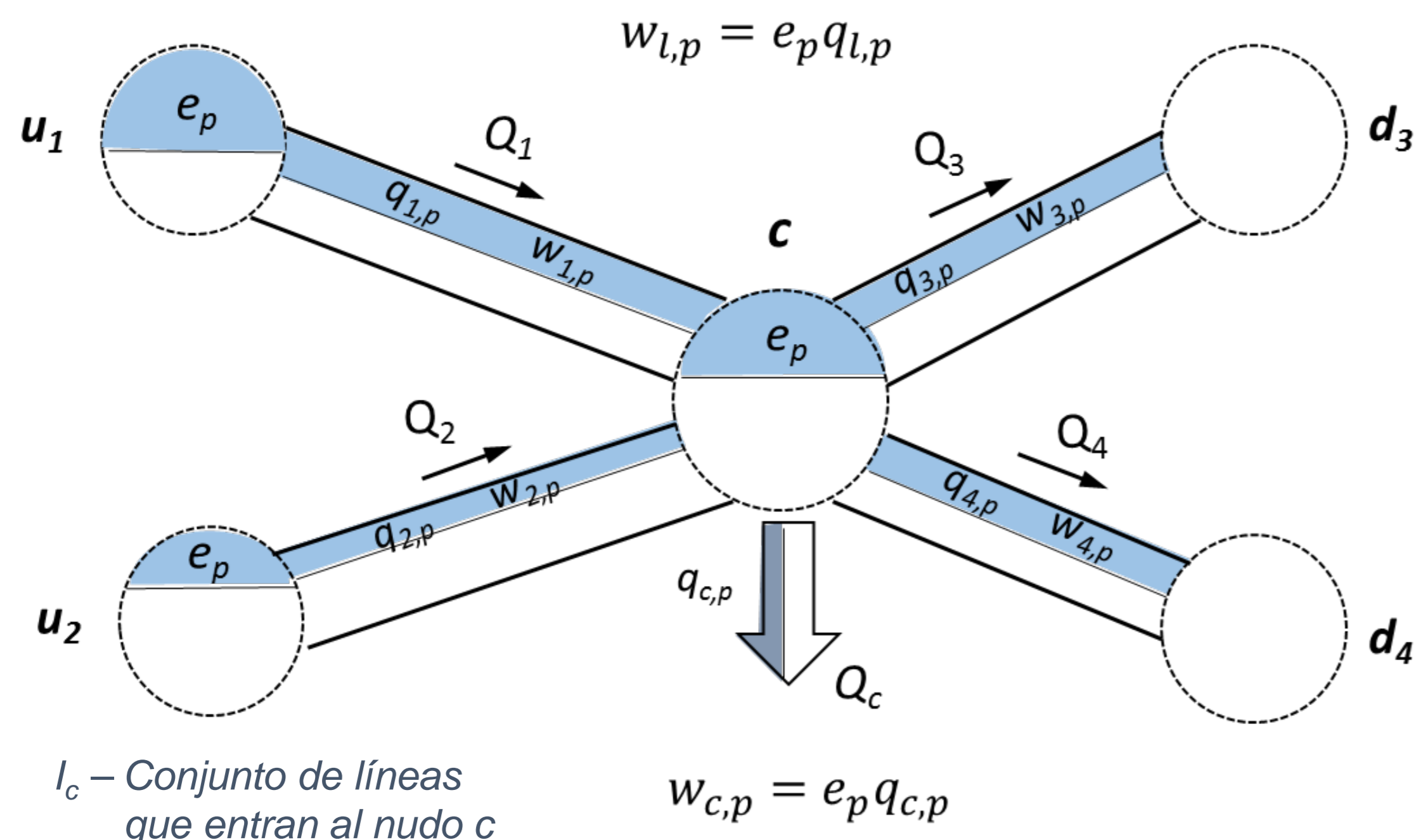
$e_p$  = energía por unidad de volumen transferida al agua al pasar por la bomba  $p$

$w_{l,p}$  = energía que pasa por la línea  $l$  procedente de la bomba  $p$

$w_{c,p}$  = energía aportada al nudo de consumo  $c$  desde la bomba  $p$

$$e_p = \frac{\Delta E_p}{\Delta V_p} = \frac{\gamma Q_p \Delta H_p}{Q_p} = \gamma \Delta H_p$$

$$\text{ó } \Delta H_p (m) = 367 e_p \text{ (kWh/m}^3\text{)}$$



- El valor de  $e_p$  será constante para todos los filetes en que se bifurca el caudal de la bomba  $p$
- Si la fuente de energía coincide con la fuente de caudal, para las tuberías que salen de los nudos se cumple:

$$\frac{w_{l,p}}{\sum_{l \in I_c} w_{l,p}} = \frac{e_p q_{l,p}}{e_p \sum_{l \in I_c} q_{l,p}} = \frac{q_{l,p}}{\sum_{l \in I_c} q_{l,p}} = \frac{Q_l}{\sum_{l \in I_c} Q_l}$$

- Luego la energía en un nudo se reparte siguiendo la misma proporción que los caudales, independientemente de su origen

# Proceso de mezcla de la energía en los nudos

$e_{c,p}$  = densidad de energía que llega al nudo  $c$  procedente de la fuente de energía  $p$

- Ecuación de mezcla energía en los nudos:

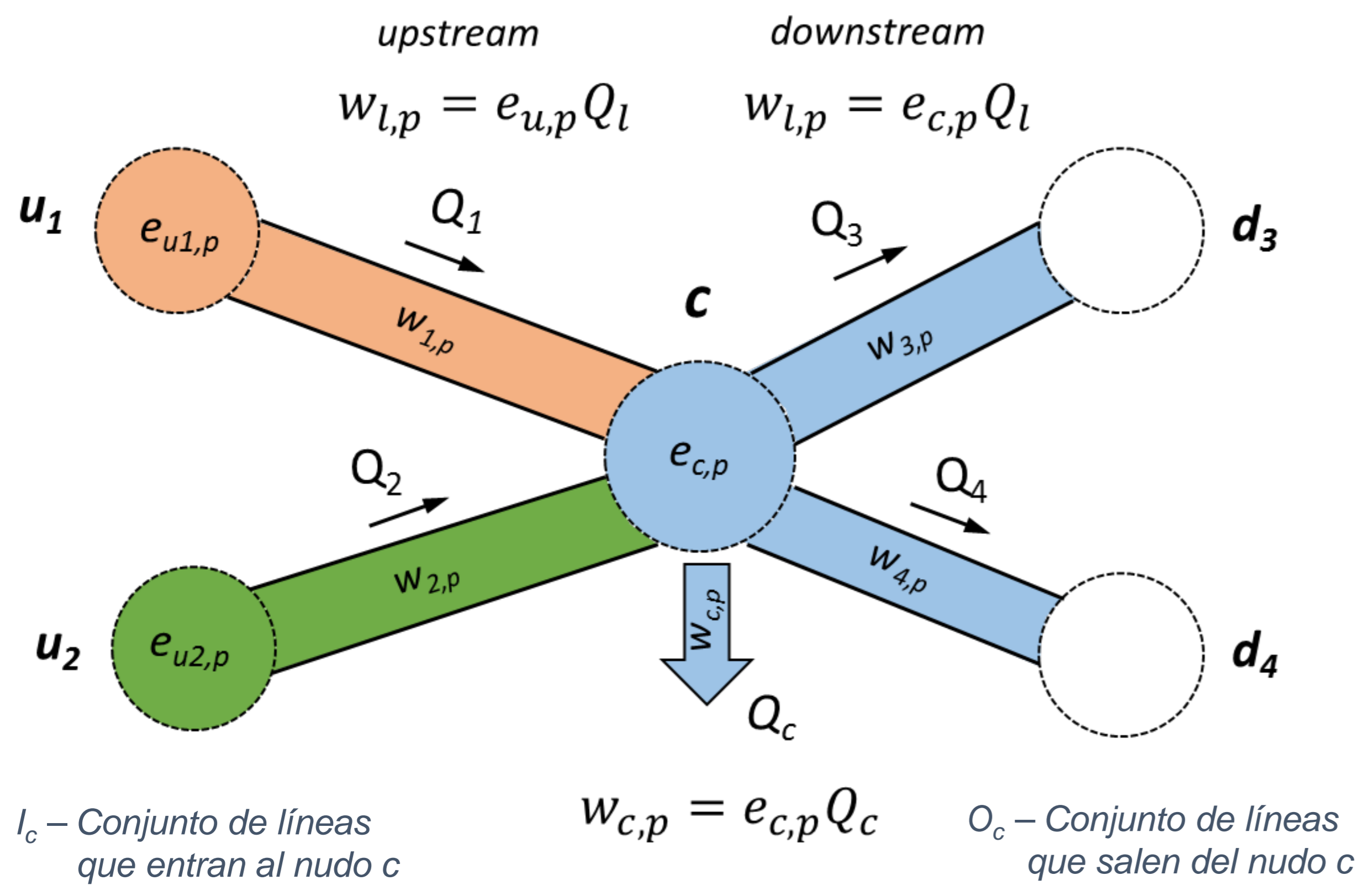
$$e_{c,p} = \frac{\sum_{l \in I_c} (e_{u,p} Q_l + W_{l,p})}{\sum_{l \in O_c} Q_l + Q_c}$$

$$AE_p = W_p \quad | \quad e_{c,p} \rightarrow W_{c,p}$$

- Las fuentes de energía pasan a ser independientes de las fuentes de suministro
- Se pueden agrupar las bombas y analizar la distribución de energías acumuladas:

$$AE_{P'} = W_{P'} \quad | \quad e_{c,P'} \rightarrow W_{c,P'}$$

$P'$  = grupo de bombas



# Reparto de la energía disipada en conducciones y válvulas

- Se procede de modo similar al reparto de energía de las bombas
- Las pérdidas en cada tubería o válvula / pueden considerarse por separado:
- También se pueden analizar las pérdidas acumuladas de todos los elementos disipativos:

$$F_l = \gamma Q_l h_l \quad , \quad h_l = \text{pérdida de carga}$$

- Ecuación de mezcla para la pérdida de energía en los nudos:

$e_{c,l}$  = densidad de energía que no llega al nudo  $c$  por haberse disipado en la tubería  $l$

$$e_{c,l} = \frac{\sum_{\ell \in I_c} (e_{u,\ell} Q_\ell + F_{\ell,l})}{\sum_{\ell \in O_c} Q_\ell + Q_c}$$

$$AE_l = F_l \quad \left| \quad e_{c,l} \rightarrow f_{c,l}$$

$$AE_L = F_L \quad \left| \quad e_{c,L} \rightarrow f_{c,L}$$

L = todos las conducciones y válvulas

- Incluso se puede analizar conjuntamente toda la energía aportada por las bombas y disipada por rozamientos, para obtener la densidad de energía útil:

$$AE_{PL} = W_P - F_L \quad \left| \quad e_{c,PL} \rightarrow w_{c,P} - f_{c,L}$$

L = todos las conducciones y válvulas

P = todas las bombas



# Comparación entre los modelos de transporte de masa y energía

---



Las densidades de energía son comparables a las concentraciones, los aportes de energía a los aportes de contaminantes, y la energía disipada a la disminución del contaminante por reacción con el medio



El transporte de la energía, sin considerar las pérdidas, es equivalente al transporte de contaminantes no reactivos, y considerando las pérdidas, al de contaminantes reactivos



El transporte de masa necesita un tiempo de viaje, mientras que el transporte de energía puede considerarse instantáneo → Los modelos de volúmenes finitos no son necesarios



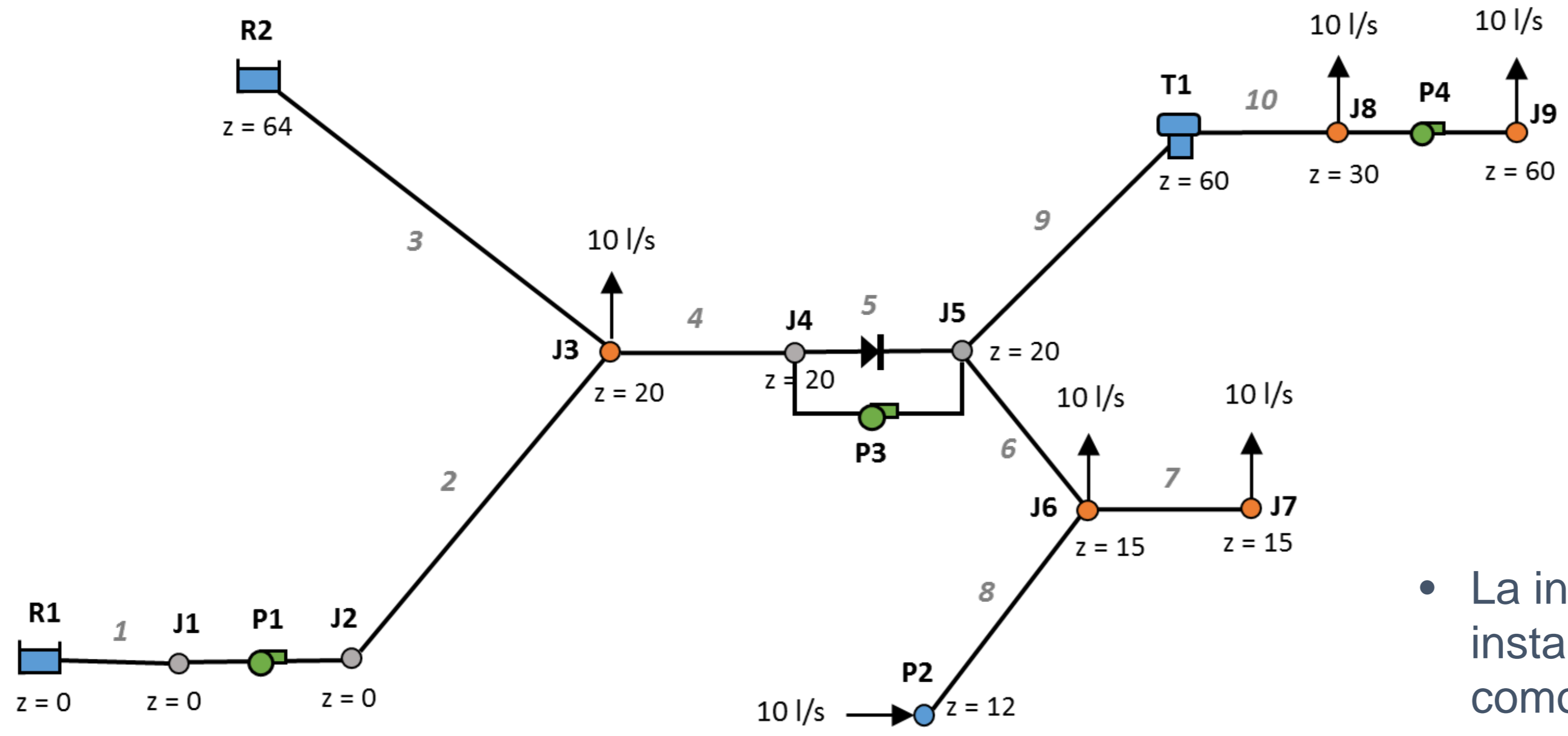
La distribución de las densidades energéticas en un instante dado no dependen de sus valores en el instante anterior, y se puede calcular resolviendo un SEL  
→ No se requiere establecer valores iniciales



La energía gravitatoria no puede transportarse como tal, pero sí evaluar su distribución a través de la distribución de caudales y la diferencia de cotas entre origen y destino

# Ejemplo Ilustrativo

## Descripción

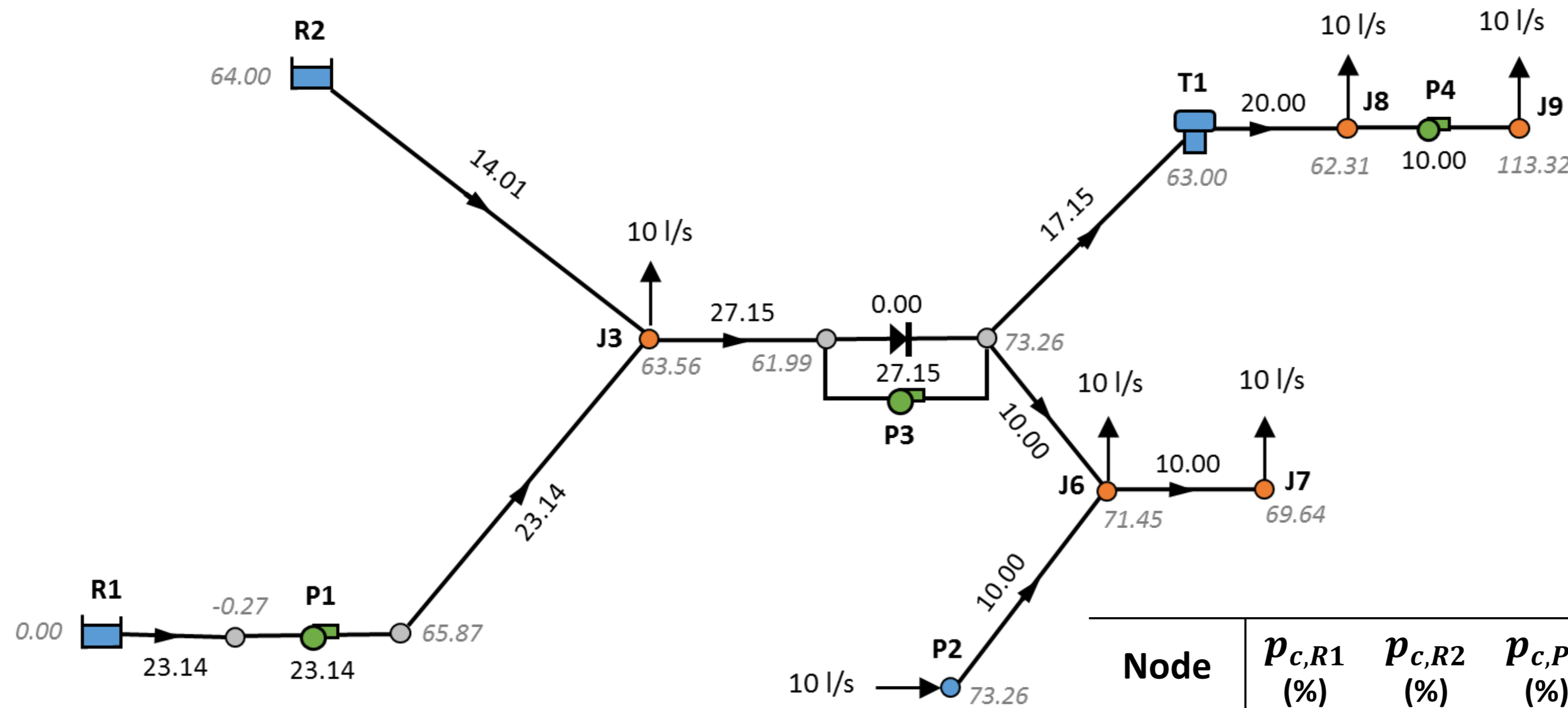


- Los nudos **J8** y **J9** se alimentan a través del depósito **T1**
- La incorporación del consumo **J9** exige intercalar el bombeo **P4**
- Debido al nuevo consumo, no llega agua suficiente al depósito **T1**, lo que obliga a introducir el rebombeo **P3**
- La incorporación del consumo en **J7** obliga a instalar el bombeo de refuerzo **P2** (simulado como una inyección de caudal de 10 l/s)

- La red debe abastecer 5 consumos localizados de 10 l/s
- El embalse **R2** aporta una cantidad de agua por gravedad, pero no es suficiente
- La bomba **P1** contribuye a alimentar el sistema desde otra fuente **R1** a cota más baja
-

# Ejemplo Ilustrativo

Distribución de los aportes y densidades de energía para un instante dado



- Los caudales circulantes se han obtenido mediante EPANET, para un nivel inicial en el depósito T1 de 3 m (rég. pte)
- Las alturas piezométricas en los nudos han sido proporcionadas por EPANET
- Restando a las alturas las cotas se obtienen las presiones en los nudos

Densidades energéticas en los puntos de consumo

Procedencia del caudal de consumo en cada nudo desde las distintas fuentes de suministro

Node	$p_{c,R1}$ (%)	$p_{c,R2}$ (%)	$p_{c,P2}$ (%)	$p_{c,T1o}$ (%)	$e_{c,P1}$ (kWh/m <sup>3</sup> )	$e_{c,P2}$ (kWh/m <sup>3</sup> )	$e_{c,P3}$ (kWh/m <sup>3</sup> )	$e_{c,P4}$ (kWh/m <sup>3</sup> )	$e_{c,L}$ (kWh/m <sup>3</sup> )
J3	62.29	37.71	0	0	0.1123	0	0	0	0.0048
J6	31.14	18.86	50.0	0	0.0561	0.0835	0.0154	0	0.0095
J7	31.14	18.86	50.0	0	0.0561	0.0835	0.0154	0	0.0144
T1	62.29	37.71	0	0	0.1123	0	0.0307	0	0.0371
J8	0	0	0	100	0	0	0	0	0.0019
J9	0	0	0	100	0	0	0	0.1390	0.0019

# Ejemplo Ilustrativo

## Distribución de energías para un instante dado

Node	Gravitational power (kW)				Pumping power (kW)				Losses power (kW)	Pressure power (kW)	Pressur (m)
	R1	R2	P2	T1	P1	P2	P3	P4			
J3	-1.22	1.63	0	0	4.04	0	0	0	0.17	4.27	43.56
J6	-0.46	0.92	-0,15	0	2.02	3.00	0.55	0	0.34	5.54	56.45
J7	-0.46	0.92	-0.15	0	2.02	3.00	0.55	0	0.52	5.36	54.64
T1	-6.60	0.06	0	0	6.92	0	1.90	0	2.29	0	0
J8	0	0	0	3.25	0	0	0	0	0.07	3.17	32.31
J9	0	0	0	0.29	0	0	0	5.00	0.07	5.23	53.32
<b>Total</b>	<b>-8.74</b>	<b>3.53</b>	<b>-0.30</b>	<b>3.54</b>	<b>15.00</b>	<b>6.00</b>	<b>3.00</b>	<b>5.00</b>	<b>3.46</b>	<b>23.57</b>	

- Las energías gravitatorias pueden ser negativas
- La energía de cada bomba aparece diferenciada, y solo afecta a los nudos aguas abajo de la misma
- Las pérdidas de energía en todas las tuberías aparecen acumuladas y repartidas entre los nudos de consumo
- Las densidades energéticas se han convertido en potencias al multiplicarlas por los caudales

$$w(kW) = e (kWh / m^3) q(m^3 / h)$$

$$= 3.6 e (kWh / m^3) q(l/s)$$

- Las densidades energéticas de las distintas fuentes de energía son acumulables en los nudos, siendo la energía total la suma de las contribuciones de cada fuente (Para **J3**,  $4.27 = -1.22 + 1.63 + 4.04 - 0.17$ )
- Las energías finales acumuladas se convierten en presiones mediante:  $p_d / \gamma (m) = W_d (kW) / 9,81 / Q_d (m^3 / s)$
- Las presiones así obtenidas son las mismas que aplicando la ecuación de Bernouilli ó EPANET:  $H_j = H_i - h_{ij}$ ,  $p_i / \gamma = H_i - z_i$
- El balance global del potencias se cumple para el sistema conjunto:
  - Energía gravitatoria total: -1,97 kW (independiente de la referencia de cotas =  $-8.74 + 3.53 - 0.30 + 3.54$ )
  - Energía de bombeo total: 29,00 kW (15 + 6 + 3 + 5)
  - Energía disipada total: 3,46 kW
  - Energía útil: **23,57 kW** (  $-1.97 + 29 - 3,46$  )

# Análisis de resultados

Reparto de la energía de cada fuente entre los nudos de demanda				
	$E_{c,g}/E_g$	$E_{c,w}/E_w$	$E_{c,f}/E_f$	$E_c/E$
Energy ditribution by Demand Nodes				
	Gravit. Power %	Pumping power %	Losses power %	Pressure power %
R1				
J1				
J2				
R2				
J3	-20,29	13,92	5,03	18,13
J4				
J5				
P2				
J6	-15,05	19,22	9,88	23,49
J7	-15,05	19,22	15,01	22,74
T1 in	327,03	30,41	66,17	0,00
T1 out				
J8	-161,92	0,00	1,96	13,45
J9	-14,72	17,24	1,96	22,19
	100,00	100,00	100,00	100,00



Contribucion de cada fuente a crear la energía de presión en cada nudo					
	$r_{c,g} = e_{c,g}/e_c$	$r_{c,p} = e_{c,p}/e_c$	$r_{c,g} + r_{c,p} = r_{c,f} + r_{c,pr}$	$r_{c,f} = e_{c,f}/e_c$	$r_{c,pr} = e_{c,pr}/e_c$
Energy distribution by Sources					
	Gravity power %	Pumping power %	Total power %	Losses power %	Pressure power %
R1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
J1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
J2	0,00	100,00	100,00	0,41	99,59
R2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
J3	9,12	90,88	100,00	3,91	96,09
J4	9,12	90,88	100,00	7,37	92,63
J5	7,31	92,69	100,00	5,91	94,09
P2	0,00	100,00	100,00	0,00	100,00
J6	5,12	94,88	100,00	5,81	94,19
J7	5,12	94,88	100,00	8,83	91,17
T1 in	-285,71	385,71	100,00	100,00	0,00
T1 out	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
J8	100,00	0,00	100,00	2,09	97,91
J9	5,55	94,45	100,00	1,28	98,72



# Análisis de resultados

Análisis de Costes															
		$C_{c,s} (\$/h) = 3,6 p_{c,s} Q_c (l/s) \pi_s$				$C_{c,g} = \sum_s C_{c,s}$	$C_{c,p} (\$/h) = 3,6 e_{c,s} Q_c (l/s) \pi_s$				$C_{c,w} = \sum_p C_{c,p}$	$C_c = C_{c,g} + C_{c,w}$	$\pi_c = C_c / (3,6 Q_c \frac{l}{s})$	$t_{c,g} = C_{c,g} / C_c$	$t_{c,w} = C_{c,w} / C_c$
		Costes de Tratamiento Unitarios (€/m3)				$\pi_p$	Costes de Bombeo unitarios (€ / kWh)				Coste Total Energía (€/h)	Coste Total (\$ / h)	Coste Total Unit (€/m3)	Distribución de los Costes	
$\pi_s$		0,06	0,02	0	0,04		0,15	0,25	0,2	0,3				Porcentaje Coste Producc (%)	Porcentaje Coste Energía (%)
		Coste de Producción del Agua (€ / h)				Coste Total Agua (€/h)	Coste de la Energía (€ / h)				Coste Total Energía (€/h)	Coste Total (\$ / h)	Coste Total Unit (€/m3)	Porcentaje Coste Producc (%)	Porcentaje Coste Energía (%)
Qs or Qc (l/s)		R1	R2	P2	T1 out		P1	P2	P3	P4					
R1	23,14	5,00	0,00	0,00	0,00	5,00									
J1	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
J2	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
R2	14,01	0,00	1,01	0,00	0,00	1,01									
J3	10	1,35	0,27	0,00	0,00	1,62	0,61	0,00	0,00	0,00	0,61	2,22	0,0618	72,73	27,27
J4	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
J5	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
P2	10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00									
J6	10	0,67	0,14	0,00	0,00	0,81	0,30	0,75	0,11	0,00	1,16	1,97	0,0548	40,97	59,03
J7	10	0,67	0,14	0,00	0,00	0,81	0,30	0,75	0,11	0,00	1,16	1,97	0,0548	40,97	59,03
T1 in	17,15	2,31	0,47	0,00	0,00	2,77	1,04	0,00	0,38	0,00	1,42	4,19	0,0679	66,15	33,85
T1 out	20	0,00	0,00	0,00	2,88	2,88									
J8	10	0,00	0,00	0,00	1,44	1,44	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,44	0,0400	100,00	0,00
J9	10	0,00	0,00	0,00	1,44	1,44	0,00	0,00	0,00	1,50	1,50	2,94	0,0817	48,96	51,04
Costes Origen		5,00	1,01	0,00	2,88	8,89	2,25	1,50	0,60	1,50	5,86	14,74		60,28	39,72
Costes Destino		5,00	1,01	0,00	2,88	8,89	2,25	1,50	0,60	1,50	5,86	14,74		60,28	39,72
						$C_g = \sum_c C_{c,g}$					$C_w = \sum_c C_{c,w}$	$C = C_g + C_w$	$t_g = C_g / C$	$t_w = C_w / C$	

# Conclusiones

---



**Es posible pasar de un balance global de energías a un balance desagregado por nudos de consumo, fuentes de suministro y fuentes de energía**



**Mientras que la energía aportada por las bombas o disipadas en las tuberías puede transportarse por la red, la energía gravitatoria no es transportable, y depende de las cotas de los nudos de origen y llegada (actúa como una función de estado)**



**El transporte de la energía por la red es asimilable al transporte de contaminantes, si bien hay diferencias importantes al ser el primero de ellos instantáneo; como consecuencia, el reparto de energía en el instante actual no depende del instante anterior**



**El cálculo correcto de la energía gravitatoria exige conocer el destino final de cada filete de agua entrante en el sistema. Conocida la diferencia de cotas, la cota de referencia utilizada para expresar las alturas piezométricas resulta irrelevante**



**Las fuentes de producción o disipación de energía pueden estar dispersas o agrupadas, y no tienen que estar necesariamente vinculadas a las fuentes de suministro**



**Las densidades energéticas en los nudos de consumo son acumulables. La suma total será la presión en el nudo, y puede determinarse cómo contribuye cada fuentes de energía a crearla**

# Desarrollos futuros

---



**Aplicar el balance de energías en periodo extendido (simulación dinámica)**



**Evaluar el valor energético del agua almacenada en cada momento en los depósitos**



**Desarrollar un procedimiento de cálculo sistemático, basado en la teoría de grafos, que no necesita resolver el SEL**



**Introducir el análisis de los costes en el proceso de descomposición, además del análisis de energías**



**Establecer balances de energías a nivel de sectores de demanda o de inyección**





**Identificar nuevos indicadores energéticos basados en la desagregación de energías y costes, y su reagrupación por sectores**

Los primeros resultados serán publicados próximamente en la revista JWRPM – ASCE con el título *“Disaggregation by Sources of the Energy Consumption at the Node Level of Water Supply Systems”*



# Aplicaciones

<p><b>Evaluar la zona de influencia real de cada fuente de suministro de agua y energía</b></p>	 	<p><b>Evaluar los elementos que contribuyen al aporte de agua y energía en cada nudo de consumo</b></p>
<p><b>Determinar el destino de los costes de operación del sistema</b></p>	 	<p><b>Repercutir los costes energéticos y de adquisición o tratamiento del agua en los puntos de demanda</b></p>
<p><b>Detectar las ineficiencias energéticas asociadas al modo de operación mediante el seguimiento de indicadores</b></p>	 	<p><b>Optimizar el uso de la energía disponible para reducir las ineficiencias</b></p>
<p><b>Determinar el coste del agua almacenada en cada momento en los depósitos</b></p>	 	<p><b>Decidir en cada momento si conviene bombear de la red o tomar agua almacenada, en función de los costes</b></p>
<p><b>Realizar el seguimiento del balance energético por sectores de una red en tiempo real</b></p>	 	<p><b>Operar una red sectorizada en base a los flujos de energía entrantes y salientes</b></p>



---

**GRACIAS POR SU  
ATENCIÓN**