

1 ariketa – Tobera batean 2 kg/s ur-lurrun sartzen da 20 baretan eta 300 °C-tan.

- a) Kalkula bedi, toberaren irteeran ur-lurrunaren abiadura 600 m/s izatea nahi badugu, zein presioraino zabaldu beharko den ur-lurruna toberan.
- b) Zein izango da ur-lurrunaren tenperatura diferentzia prozesuan zehar?
- c) Kalkula bedi toberaren irteerako sekzioaren azalera.

2 ariketa – 20 °C-tan dagoen pabiloi batean, 0.2 m³-ko bolumena duen eta termikoki isolatuta ez dagoen gordailu zurrun bat dago. Hasiera batean, gordailua nitrogenoz beteta dago 20 bar eta 60 °C-tan. Gordailu hau hasieran itxita dagoen balbula baten bitartez hutsik dagoen beste gordailu zurrun eta isolatu gabe batekin konektatuta dago. Une batean, balbula hau ireki egiten da eta oreka egoera berrian, nitrogenoak bi gordailuak betetzen ditu eta presio berria 5 bar da. Kalkula bitez:

- a) Hasieran hutsik dagoen gordailuaren bolumena.
- b) Unibertsoan garatutako entropia.
- c) Ehunekotan emaitzak emanez, arrazoitu zein den itzulezintasun iturri nagusia.

OHARRA: Kontsidera bedi b) atala erantzuterakoan, prozesuko tenperatura, hasierako tenperaturaren eta bukaerako tenperaturaren arteko batez bestekoa dela.

3 ariketa – Burdinurtuzko hodi batean (barne diametroa 50 mm, lodiera 5 mm eta luzera 1.2 m, 2 kg/s ur likido 38 °C-tan sartzen da eta 45 °C-tan irteten da. Kalkula bedi hodiaren kanpo gainazaleko tenperatura. Kontsidera bedi burdinurtuaren eroankortasun termikoa 52 W/mK.

Denbora: 2.5 ordu

Ariketak bakoitzak azterketa osoak balio duenaren herena balio du. Hurrengo datuak idatzi behar dira entregatutako orri guztietan, bestela orri horiek ez dira zuzenduko: Izena eta abizenak, NAN zenbakia, espezialitatea eta taldea.

INGENIERÍA TÉRMICA – 30 de enero de 2023

Ejercicio 1 - A una tobera entran 2 kg/s de vapor de agua a 300 °C y 20 bar.

- a) ¿Hasta qué presión deberá expandirse el vapor en la tobera si se desea obtener una velocidad de chorro de 600 m/s?
- b) ¿Cuál será la variación de temperatura del vapor a lo largo del proceso?
- c) ¿Cuál es el área transversal de la sección de salida de la tobera?

Ejercicio 2 - En un pabellón a 20 °C, hay un recipiente rígido y sin aislamiento térmico de 0.2 m³ lleno de nitrógeno a 20 bar y 60 °C. El recipiente está conectado a otro recipiente vacío mediante una válvula, que en un momento determinado se abre, tras lo cual, la presión en el nuevo estado de equilibrio pasa a ser de 5 bar. Calcúlese:

- a) El volumen del recipiente que inicialmente se encuentra vacío.
- b) La entropía total generada en el universo.
- c) Determínese porcentualmente, cuál es la principal fuente de irreversibilidad.

NOTA: Considérese a efectos de la pregunta b), como temperatura del proceso la temperatura media entre el estado inicial y el estado final.

Ejercicio 3 - En una tubería de hierro fundido de diámetro interior 50 mm, espesor 5 mm y longitud 1.2 m, entra un gasto de agua líquida de 2 kg/s a 38 °C y sale a 45 °C. Calcúlese la temperatura superficial exterior de la tubería. Tómese la conductividad térmica del hierro fundido igual a 52 W/mK.

Tiempo: 2.5 horas

Cada ejercicio vale un tercio del valor del examen total.

Las hojas de examen que no estén identificadas con nombre y apellidos, DNI, número de grupo y titulación, no serán corregidas.



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

GIPUZKOAKO
INGENIARITZA
ESKOLA
ESCUELA
DE INGENIERÍA
DE GIPUZKOA

DEITURAK / APELLIDOS:

IZENA / NOMBRE:

TITULAZIOA / TITULACIÓN:

N.A.N. / D.N.I.

IKASTURTEA / CURSO:

DATA / FECHA:

IRAKASGAIA / ASIGNATURA:

KALIFIKAZIOA
CALIFICACIÓN

14

EJERCICIO 1

Datos:

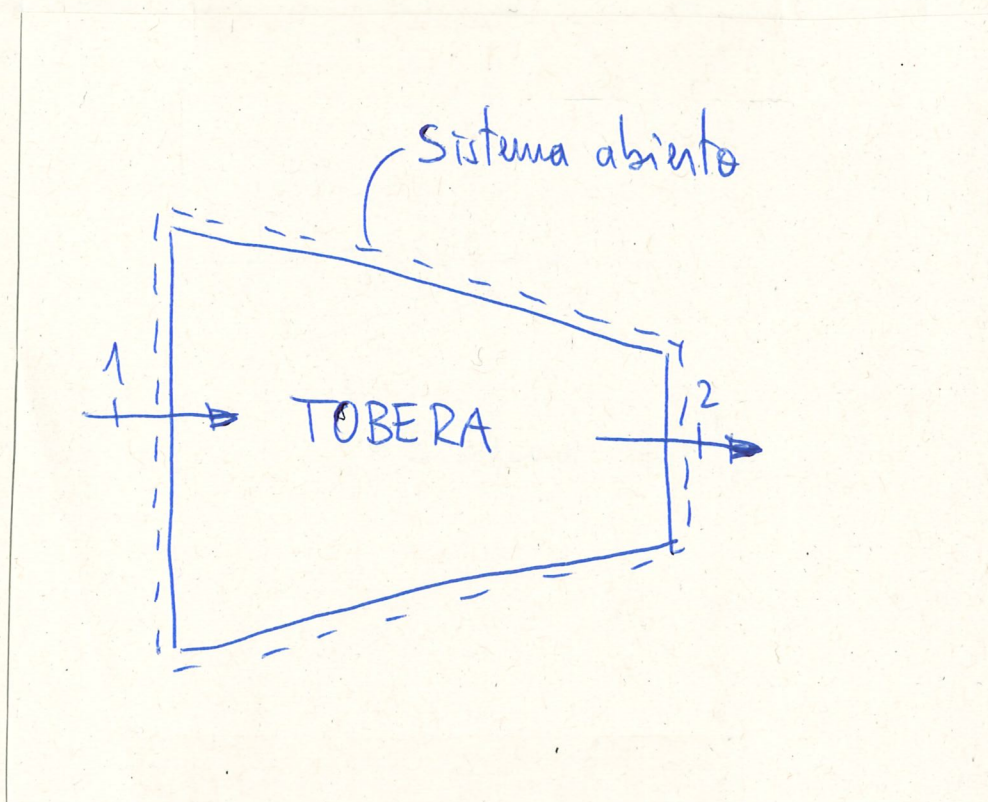
- Vapor de agua
- $\dot{m} = 2 \text{ kg/s}$
- $\theta_1 = 300^\circ\text{C}$
- $P_1 = 20 \text{ bar}$
- $C_2 = 600 \text{ m/s}$

Se pide:

a) P_2 ?

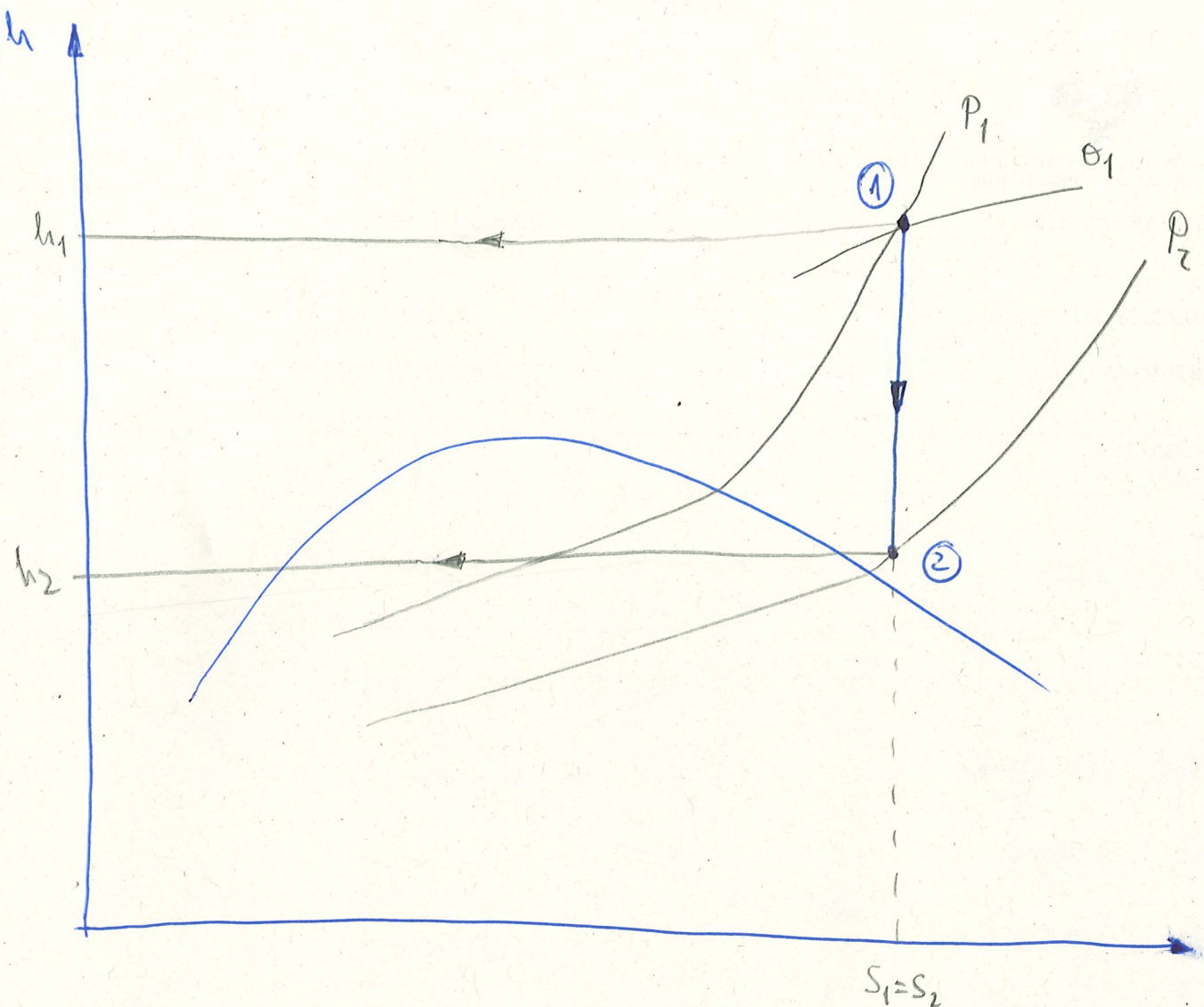
b) ΔT_{12} ?

c) A_2



A falta de datos, se considera la tobera adiabática y reversible, es decir isentrópica, luego $S_1 = S_2$.

Resolviendo por el diagrama de Mollier:



Se trata de un sistema abierto operando en régimen permanente, luego es de aplicación la Ecuación de la Energía:

$$\dot{Q} = \dot{m} \left[(h_2 - h_1) + \left(\frac{C_2^2 - C_1^2}{2} \right) + g(z_2 - z_1) \right] + \dot{W}$$

$$h_2 = h_1 - \frac{C_2^2}{2}$$

$$\left. \begin{matrix} P_1 \\ \theta_1 \end{matrix} \right\} \text{Diagrama de Mollier} \rightarrow \left\{ \begin{matrix} h_1 = 3024 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\ s_1 = 6.784 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \end{matrix} \right.$$



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

GIPUZKOAKO
INGENIARITZA
ESKOLA
ESCUELA
DE INGENIERÍA
DE GIPUZKOA

DEITURAK / APELLIDOS:

IZENA / NOMBRE:

TITULAZIOA / TITULACIÓN:

N.A.N. / D.N.I.

IRASTURTEA / CURSO:

DATA / FECHA:

IRAKASGAIA / ASIGNATURA:

KALIFIKAZIOA CALIFICACIÓN											
------------------------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

$$h_2 = 3024 - \frac{600^2 \cdot 10^{-3}}{2} = 2844 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\left. \begin{matrix} h_2 \\ s_2 \end{matrix} \right\} \text{Diagrama de Mollier} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} P_2 = 9.2 \text{ bar} \\ \theta_2 = 205^\circ\text{C} \end{array} \right.$$

$$b) \boxed{\Delta T_{12} = \Delta \theta_{12} = 300 - 205 = 95^\circ\text{C}}$$

c) De la ecuación de la continuidad:

$$\dot{m} = \rho_2 \cdot c_2 \cdot A_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot c_2 \cdot A_2$$

$$A_2 = \frac{\dot{m} \cdot \sqrt{2}}{c_2}$$

En el diagrama de Mollier no se representan las isócoras, por lo que el volumen específico a la salida de la tobera

se debe determinar mediante las tablas

Interpolando entre 10 bar y 8 bar, a las temperaturas de

200°C y 250°C :

<u>10 bar</u>	<u>$\theta (^{\circ}\text{C})$</u>	<u>$v (\text{m}^3/\text{kg})$</u>
	200	— 0'20602
	205	— X
	250	— 0'23275

$x = 0'20869 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$

<u>8 bar</u>	<u>$\theta (^{\circ}\text{C})$</u>	<u>$v (\text{m}^3/\text{kg})$</u>
	200	— 0'26088
	205	— X
	250	— 0'29320

$x = 0'264112 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$

<u>$P (\text{bar})$</u>	<u>$v (\text{m}^3/\text{kg})$</u>
10	0'20869
9'2	X
8	0'264112

$v_2 = 0'23086 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$

$$\boxed{A_2 = \frac{\dot{m} \cdot v_2}{c_2} = \frac{2 \cdot 0'23086}{600} = 0'00077 \text{ m}^2 = 7'695 \text{ cm}^2}$$



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

GIPUZKOAKO
INGENIARITZA
ESKOLA
ESCUELA
DE INGENIERÍA
DE GIPUZKOA

DEITURAK / APELLIDOS:

IZENA / NOMBRE:

TITULAZIOA / TITULACIÓN:

N.A.N. / D.N.I.

IRASTURTEA / CURSO:

DATA / FECHA:

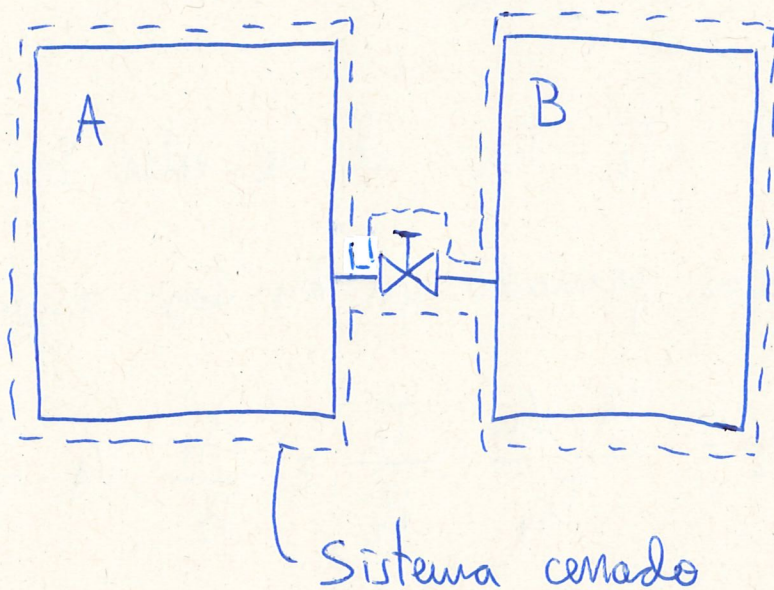
IRAKASGAIA / ASIGNATURA:

KALIFIKAZIOA
CALIFICACIÓN

EJERCICIO 2

Datos:

- N_2
- $P_{A_1} = 20 \text{ bar}$
- $\theta_{A_1} = 60^\circ \text{C}$
- $P_2 = 5 \text{ bar}$
- $V_A = 0.2 \text{ m}^3$
- $\theta_0 = 20^\circ \text{C} = \theta_{MC}$



a) Considerando el N_2 como gas ideal:

$$M_{N_2} = 28 \text{ kg/kmol}$$

$$R'_{N_2} = \frac{8.3145}{28} = 0.297 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$$

$$\gamma_{N_2} = 1.4$$

$$C_{V_{N_2}} = \frac{R'_{N_2}}{\gamma_{N_2} - 1} = \frac{0.297}{1.4 - 1} = 0.742 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$$

$$C_{PN_2} = \gamma_{N_2} \cdot C_{VN_2} = 1'039 \text{ kJ/kgK}$$

Aplicando la Ecuación de Estado de los gases ideales en los estados de equilibrio termodinámico inicial y final:

$$\frac{P_{A1} \cdot V_A}{T_{A1}} = \frac{P_2 \cdot V_2}{T_2}$$

donde $T_2 = T_{Mc}$ al no estar térmicamente aislado el sistema formado por los dos recipientes unidos

$$V_2 = \frac{P_{A1} \cdot V_A}{T_{A1}} \cdot \frac{T_2}{P_2} = \frac{P_{A1}}{P_2} \cdot V_A \cdot \frac{T_2}{T_{A1}} = \frac{20}{5} \cdot 0'2 \cdot \frac{293}{333}$$

$$V_2 = 0'704 \text{ m}^3$$

$$\boxed{V_B = V_2 - V_A = 0'704 - 0'2 = 0'504 \text{ m}^3}$$

- b) El proceso tiene 2 fuentes de irreversibilidad, por un lado está la irreversibilidad del proceso de trasvase del N_2 entre depósitos al abrirse la válvula. Por otro lado, está la irreversibilidad del proceso de intercambio



Universidad del País Vasco
Euskal Herriko Unibertsitatea

GIPUZKOAKO
INGENIARITZA
ESKOLA
ESCUELA
DE INGENIERÍA
DE GIPUZKOA

DEITURAK / APELLIDOS:

IZENA / NOMBRE:

TITULAZIOA / TITULACIÓN:

N.A.N. / D.N.I.

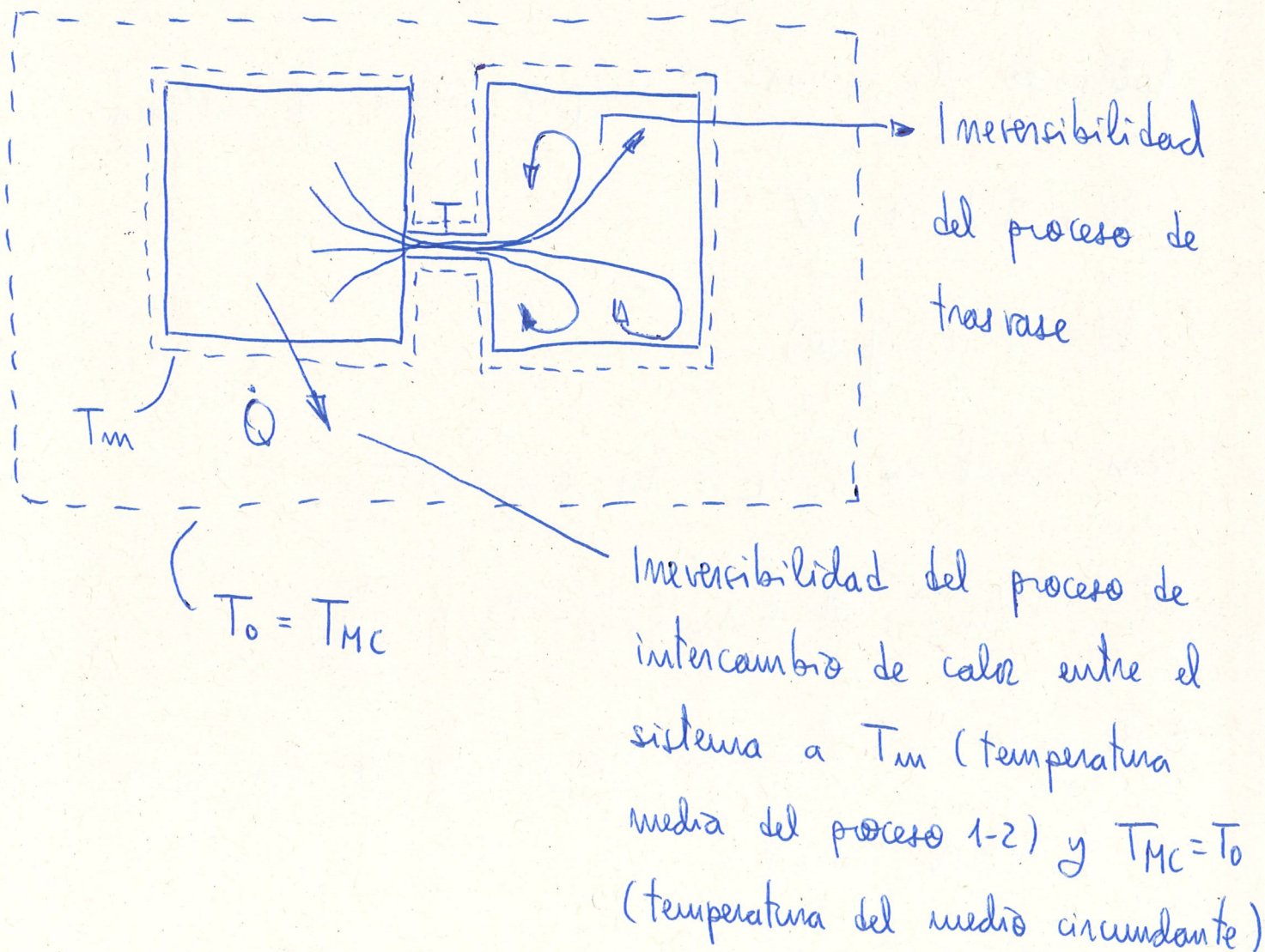
IKASTURTEA / CURSO:

DATA / FECHA:

IRAKASGAIA / ASIGNATURA:

KALIFIKAZIOA CALIFICACIÓN											
------------------------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

de calor entre el recipiente y el medio circundante
motivado por una diferencia finita de temperaturas:



Aplicando el balance de entropía al sistema:

$$\Delta S_{12} = \int \frac{\delta Q}{T} + S_{G_{sist}} = \frac{Q}{T_m} + S_{G_{sist}}$$

Como la temperatura del proceso es variable y no se puede formular la variación de la temperatura, se tomará la temperatura media entre el estado inicial y el estado final:

$$T_m = \frac{T_1 + T_2}{2} = \frac{T_{A1} + T_2}{2} = \frac{333 + 293}{2} = 313 \text{ K}$$

Aplicando el primer principio sobre el sistema:

$$Q = \Delta U_{12} + W$$

$$W = 0 \text{ (Rígido)}$$

$$\text{Gas ideal} \rightarrow \Delta U_{12} = m \cdot c_{V_{N_2}} \cdot \Delta T_{12}$$

$$Q = \Delta U_{12} = m \cdot c_{V_{N_2}} (T_2 - T_{A1}) \quad (*)$$

Aplicando la Ecuación de Estado de los gases ideales en el estado inicial:

$$m = \frac{P_{A1} \cdot V_A}{R'_{N_2} \cdot T_{A1}} = \frac{20 \cdot 10^2 \cdot 0'2}{0'297 \cdot 333} = 4'044 \text{ kg}$$



Universidad del País Vasco Euskal Herriko Unibertsitatea

GIPUZKOAKO INGENIARITZA ESKOLA ESCUELA DE INGENIERÍA DE GIPUZKOA

DEITURAK / APELLIDOS:

IZENA / NOMBRE:

TITULAZIOA / TITULACIÓN:

N.A.N. / D.N.I.

IRASTURTEA / CURSO:

DATA / FECHA:

IRAKASGAIA / ASIGNATURA:

KALIFIKAZIOA CALIFICACIÓN											
------------------------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Sustituyendo en $(*)$:

$$Q = 4'044 \cdot 0'742 (293 - 333) = -120'06 \text{ kJ}$$

$$\begin{aligned} \text{Gas ideal} \rightarrow \Delta S_{12} &= m \left[c_{pN_2} \ln \frac{T_2}{T_{A_1}} - R'_{N_2} \ln \frac{p_2}{p_{A_1}} \right] = \\ &= 4'044 \left[1'039 \ln \frac{293}{333} - 0'297 \ln \frac{5}{20} \right] = 1'127 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \end{aligned}$$

$$\dot{S}_{G_{\text{SIST}}} = \Delta S_{12} - \frac{Q}{T_m} = 1'127 - \frac{(-120'06)}{313} = 1'511 \frac{\text{kJ}}{\text{K}}$$

Aplicando el balance de entropía en el medio circundante:

$$\Delta S_{MC} = \int \frac{\delta Q}{T_{MC}} + \cancel{\dot{S}_{G_{MC}}} = \frac{Q_{MC}}{T_{MC}}$$

$$Q_{MC} = -Q = 120'06 \text{ kJ}$$

$$\Delta S'_{MC} = \frac{120'06}{293} = 0'41 \frac{\text{kJ}}{\text{K}}$$

Resumen:

- El sistema aumenta su entropía ($\Delta S_{12} > 0$) pese a que pierde calor ($Q < 0$) y con ello entropía, ya que al mismo tiempo genera entropía ($S'_{G\text{sist}} > 0$) debido a la irreversibilidad del proceso de transferencia.
- El medio circundante recibe calor ($Q > 0$) desde el sistema y con ello recibe entropía ($\Delta S_{MC} > 0$)

Aplicando el balance de entropía en el universo, formado por sistema y medio circundante:

$$\begin{aligned}\Delta S_{\text{UNIV}} &= \Delta S_{\text{SIST}} + \Delta S_{\text{MC}} = \Delta S_{12} + \Delta S_{\text{MC}} = \\ &= 1'127 + 0'41 = \boxed{1'537 \frac{\text{kJ}}{\text{K}} = S'_{G\text{UNIV}}}\end{aligned}$$

c) Conclusión: En el universo se han generado en total $1'537 \frac{\text{kJ}}{\text{K}}$ de entropía por irreversibilidades, de los cuales $1'511 \frac{\text{kJ}}{\text{K}}$ corresponden a la entropía generada



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

GIPUZKOAKO
INGENIARITZA
ESKOLA
ESCUELA
DE INGENIERÍA
DE GIPUZKOA

DEITURAK / APELLIDOS:

IZENA / NOMBRE:

TITULAZIOA / TITULACIÓN:

N.A.N. / D.N.I.

IRASTURTEA / CURSO:

DATA / FECHA:

IRAKASGAIA / ASIGNATURA:

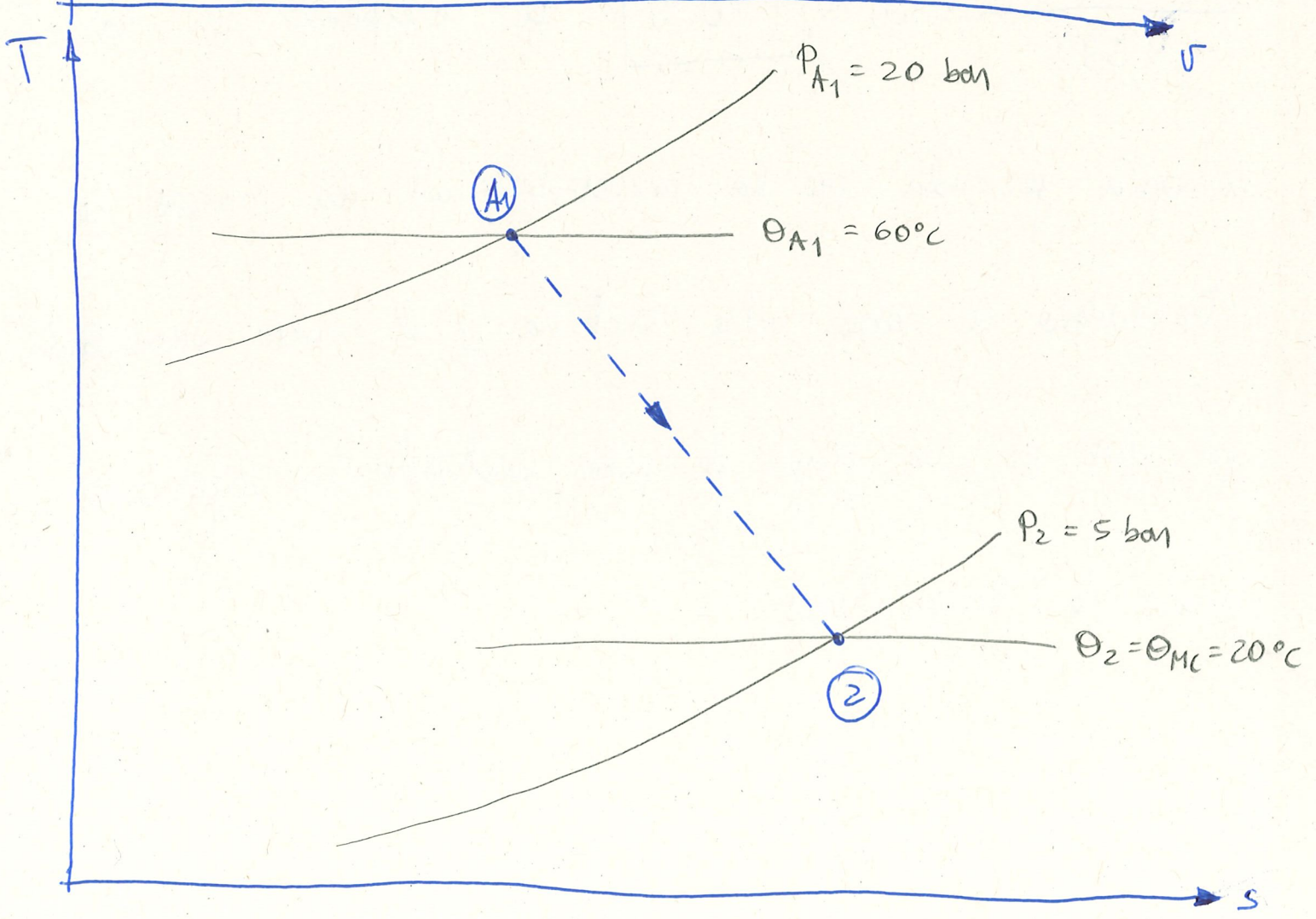
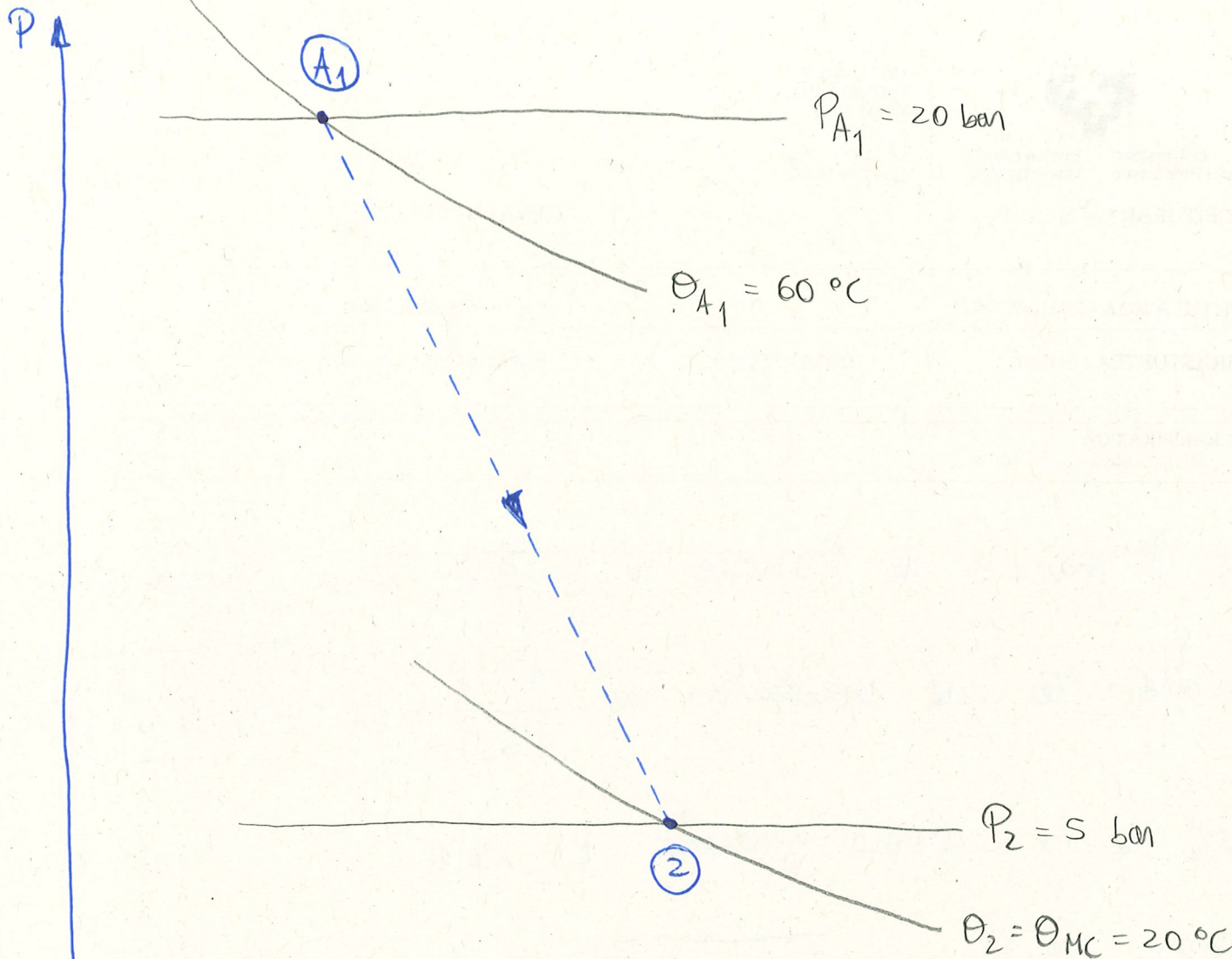
KALIFIKAZIOA
CALIFICACIÓN

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

por el proceso de trasvase de materia de un depósito a otro, lo que representa un $\frac{1'511}{1'537} \times 100 = \boxed{98'30\%}$ del total de la entropía generada. El resto

$$\frac{(1'537 - 1'511)}{1'537} \times 100 = \boxed{1'70\%}$$
 se corresponde con la

entropía generada por la irreversibilidad del proceso de intercambio de calor entre sistema y el medio circundante, ya que es un flujo de calor motivado por diferencia finita de temperaturas

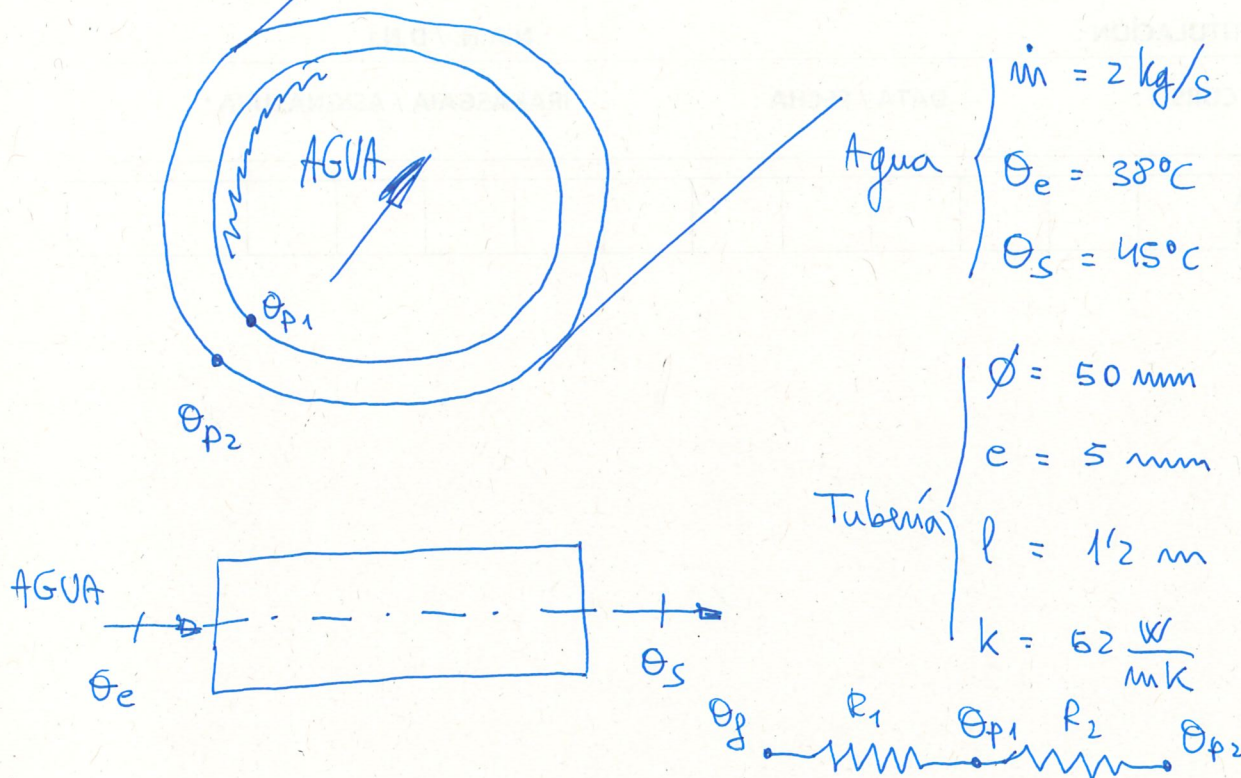


Ejercicio 3

Datos:

$$\text{Agua} \left\{ \begin{array}{l} \dot{m} = 2 \text{ kg/s} \\ \theta_e = 38^\circ\text{C} \\ \theta_s = 45^\circ\text{C} \end{array} \right.$$

$$\text{Tubería} \left\{ \begin{array}{l} \phi = 50 \text{ mm} \\ e = 5 \text{ mm} \\ l = 1\frac{1}{2} \text{ m} \\ k = 62 \frac{\text{W}}{\text{mK}} \end{array} \right.$$



El agua que atraviesa la tubería se calienta. Esto significa que recibe calor a través de la tubería. Por lo tanto, la temperatura de la tubería debe ser superior a la del agua.

El intercambio de calor entre el agua y la superficie interna de la tubería se produce por convección, que será forzada. En la tubería, el intercambio de calor entre las dos superficies se produce por conducción.

$$\dot{m} = \rho \cdot A \cdot c \rightarrow c = \frac{\dot{m}}{\rho \cdot A} \Rightarrow \text{para calcular la velocidad del agua es necesario conocer su densidad}$$

Para calcular la densidad utilizaremos la temperatura características¹⁴ del agua, que en este caso será:

$$\theta_c = \frac{\theta_e + \theta_s}{2} = 41.5^\circ\text{C}$$

De tablas:

$$\left. \begin{array}{l} c_p = 4.179 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \\ \rho = 991.5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \\ k = 0.6328 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \\ \nu = 6.4135 \cdot 10^{-7} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \\ Pr = 4.197 \end{array} \right\} \text{Agua}$$

Por lo tanto $C = 1.027 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ es la velocidad del agua en el interior de la tubería.

Calculamos el número de Reynolds:

$$Re = \frac{C \cdot D}{\nu} = 80090.74 \text{ [-]} \text{ (flujo turbulento)}$$

Dittus - Boelter : $Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4}$ ($n = 0.4$ porque se calienta el fluido)
 $Re > 10000 \rightarrow$ Es aplicable

$$Nu = 371.71 \text{ [-]}$$

$$Nu = \frac{h \cdot D}{k} \rightarrow h = \frac{Nu \cdot k}{D} = 4327.7 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$$

El calor que recibe el agua por convección es:

$$\dot{Q} = h \cdot A (\theta_{p1} - \theta_f) \quad \text{siendo } \theta_f = \theta_c$$

Aplicando un balance de energía a la tubería, considerando estado estacionario y sabiendo que $\dot{W} = 0$

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c \cdot (\theta_s - \theta_e) \quad \text{será el calor que recibe el agua.}$$

Por lo que $\rightarrow \dot{m} \cdot c \cdot (\theta_s - \theta_e) = h \cdot A (\theta_{p1} - \theta_f)$

donde $c = c_p = 4179 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$

Por lo tanto $\theta_{p1} = 113.3^\circ \text{C}$

Sabiendo la temperatura de la superficie interna de la tubería, y el calor que atraviesa ésta, es posible calcular la temperatura de la superficie externa.

$$\dot{Q} = \frac{\theta_{p2} - \theta_{p1}}{R_2} = \frac{\theta_{p2} - \theta_{p1}}{\frac{1}{2\pi k \cdot L} \ln \frac{r_2}{r_1}} = \dot{m} \cdot c (\theta_s - \theta_e) = h \cdot A (\theta_{p1} - \theta_f)$$

$\theta_{p2} = 140.5^\circ \text{C}$