TOBERAS Y DIFUSORES

VELOCIDAD DEL SONIDO EN UN GAS

$$\kappa_s = -\frac{1}{v}\left(\frac{dv}{dp}\right)_s$$

$$\boxed{a = \sqrt{\frac{v}{\kappa_s}} = \sqrt{-v^2 \cdot \left(\frac{dp}{dv}\right)_s}}$$

$v = volumen\ específico$

$\kappa_s = coeficiente\ de\ compresibilidad\ isoentrópico$

$$\left(\frac{dp}{dv}\right)_s = -K \cdot \gamma \cdot v^{-\gamma-1} = -\gamma \cdot v^{-1} \cdot K \cdot v^{-\gamma} = -\gamma \cdot \frac{p}{v}$$

gas perfecto

$$\boxed{a = \sqrt{\gamma \cdot p \cdot v}} \qquad \boxed{a = \sqrt{\gamma \cdot R \cdot T}}$$

La velocidad del sonido es una función de estado, o propiedad.

Primer principio para sistemas abiertos

RECORDATORIO

ecuación de la energía

$$Q = h_2 - h_1 + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + W_t$$

$$dQ = dh + c \cdot dc + dW_t$$

trabajo técnico

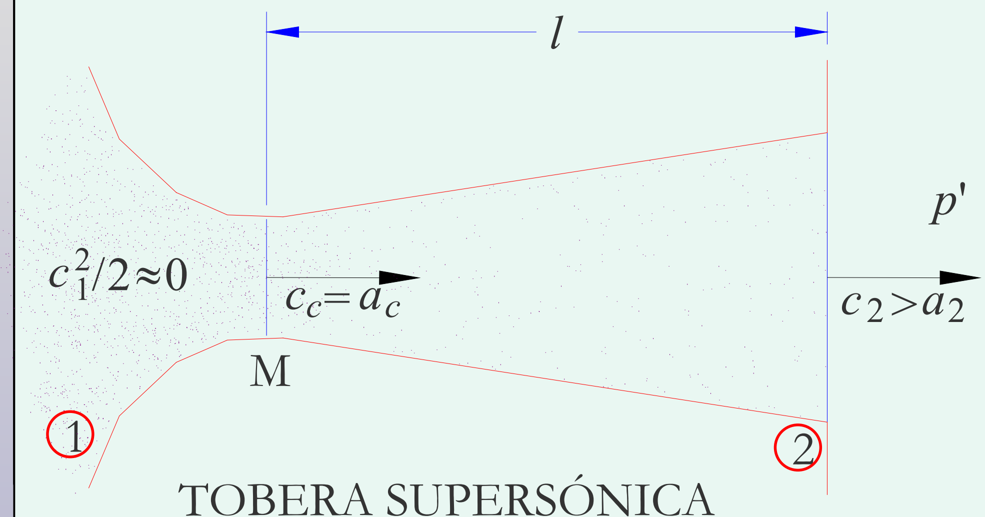
$$W_t = \frac{c_1^2 - c_2^2}{2} - \int_1^2 v \cdot dp - |W_r|$$

$$dW_t = -c \cdot dc - v \cdot dp - |dW_r|$$

TOBERAS Y DIFUSORES

Una tobera es un dispositivo diseñado para transformar entalpía en energía cinética. Por el contrario, un difusor transforma energía cinética en entalpía.

$$\cancel{Q} = h_2 - h_1 + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + \cancel{W_t}$$



$$\boxed{\frac{c_2^2 - c_1^2}{2} = h_1 - h_2}$$

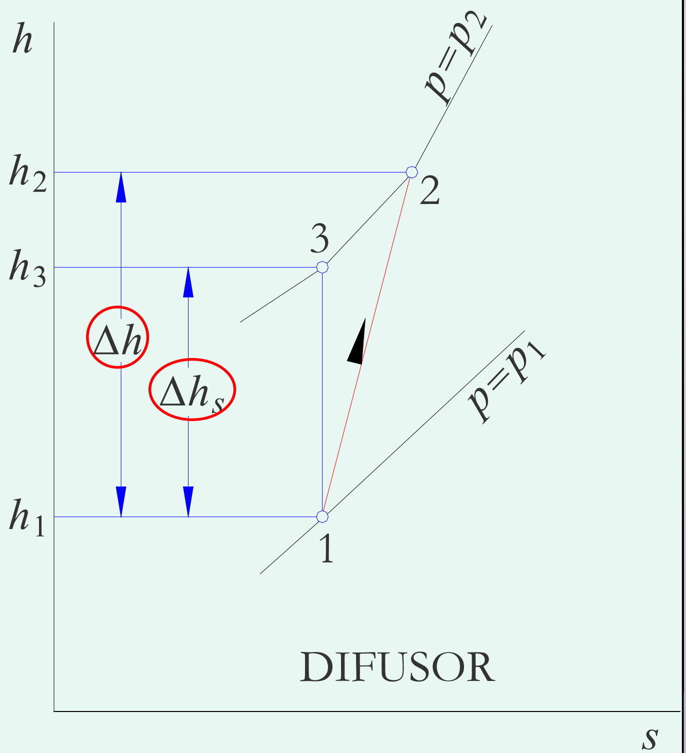
haya o no W_r $(W_r \geq 0)$

Rendimiento adiabático de la tobera

$$\eta = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_3} = \frac{\Delta h}{\Delta h_s}$$

Rendimiento adiabático del difusor

$$\eta = \frac{h_3 - h_1}{h_2 - h_1} = \frac{\Delta h_s}{\Delta h}$$



Eficiencia

$$\psi = \frac{e_{f2}}{e_{f1}}$$

Diseño de toberas y difusores

$$W_t = \frac{c_1^2 - c_2^2}{2} - \int_1^2 v \cdot dp - |W_r| \quad \Big| \quad d\cancel{W}_t = -c \cdot dc - v \cdot dp - |d\cancel{W}_r|$$

Derrame isoentrópico ($W_r = 0$)

$$c \cdot (dc)_s + v \cdot (dp)_s = 0 \quad \Big| \quad c.(dc)_s = -v \cdot (dv)_s \cdot \left(\frac{dp}{dv}\right)_s$$

$$\underline{c^2 \cdot \frac{(dc)_s}{c}} = -v^2 \cdot \left(\frac{dp}{dv}\right)_s \cdot \frac{(dv)_s}{v} = \underline{a^2 \cdot \frac{(dv)_s}{v}}$$

$$Ma^2 \cdot \frac{(dc)_s}{c} = \frac{(dv)_s}{v}$$

$$Ma^2 \cdot \frac{(dc)_s}{c} = \frac{(dv)_s}{v}$$

$$\dot{m} = \frac{c \cdot A}{v}; \quad \ln \dot{m} + \ln v = \ln c + \ln A$$

$$\frac{dv}{v} = \frac{dc}{c} + \frac{dA}{A}$$

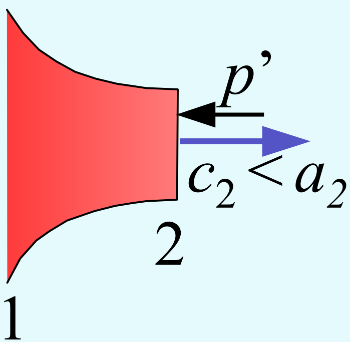
$$\boxed{\frac{(dA)_s}{A} = (Ma^2 - 1) \cdot \frac{(dc)_s}{c}}$$

$$\frac{(dA)_s}{A} = (Ma^2 - 1)\cdot\frac{(dc)_s}{c}$$

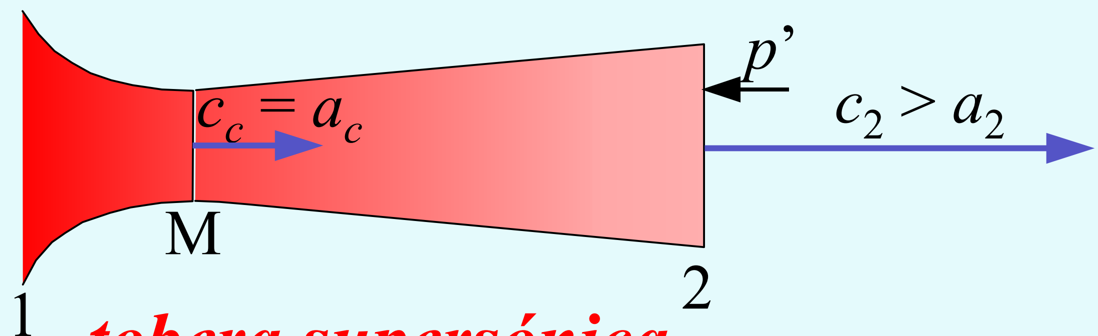
Toberas ($dc > 0$)

Si $Ma < 1$, dA negativo. ***Tobera convergente***

Si $Ma > 1$, dA positivo. ***Tobera divergente***



tobera subsónica

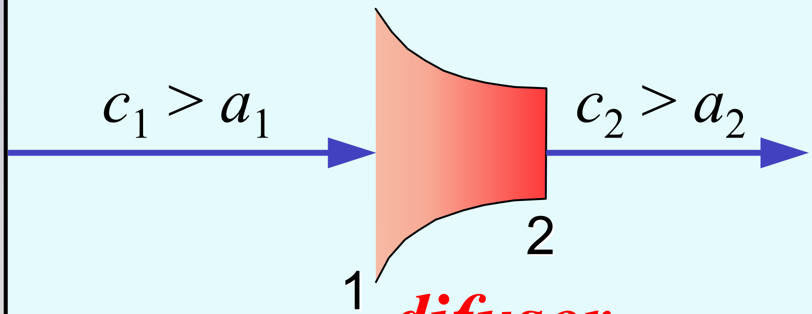


tobera supersónica

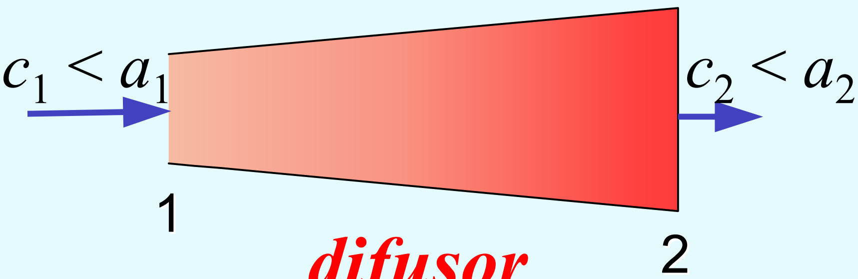
tobera de cohete

$$\frac{(dA)_s}{A} = (Ma^2 - 1) \cdot \frac{(dc)_s}{c}$$

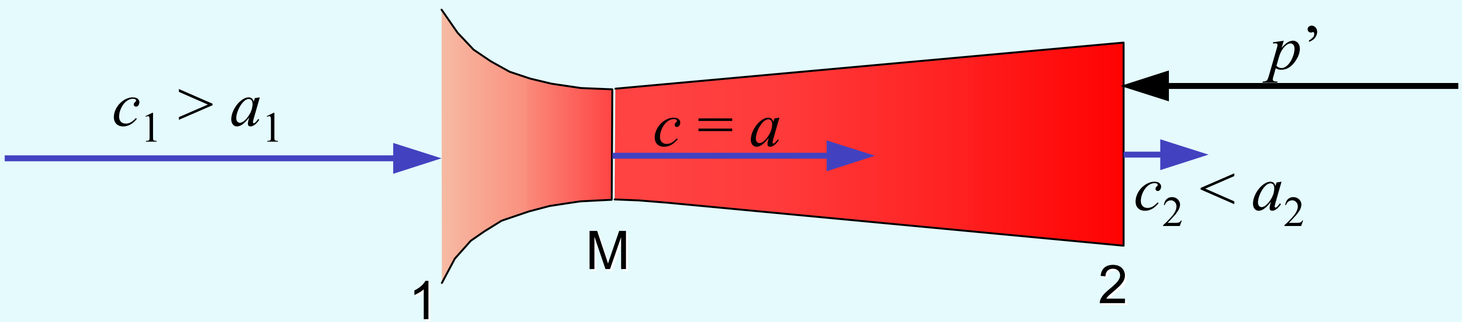
Difusores ($dc < 0$)



difusor supersónico

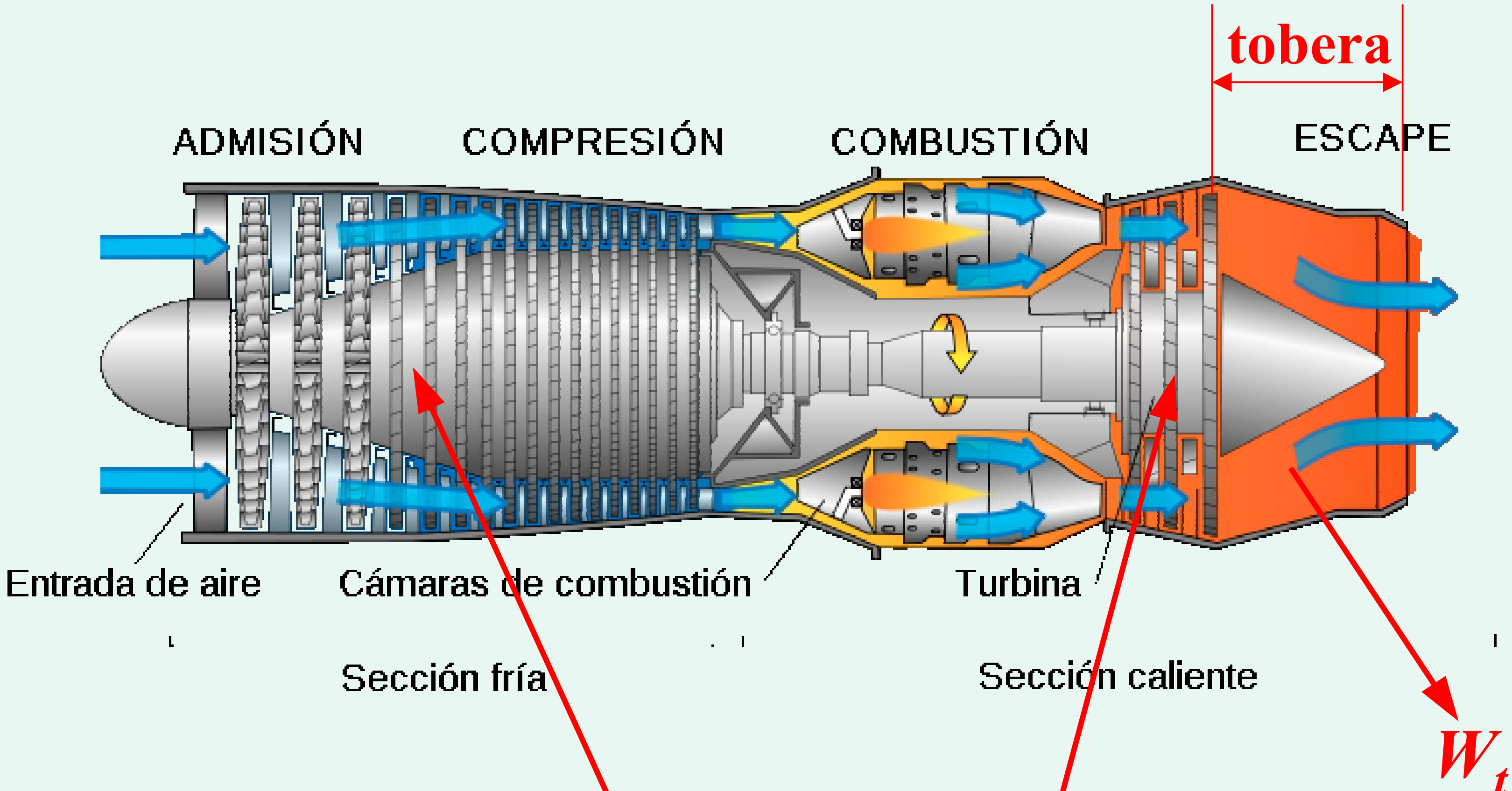


difusor subsónico



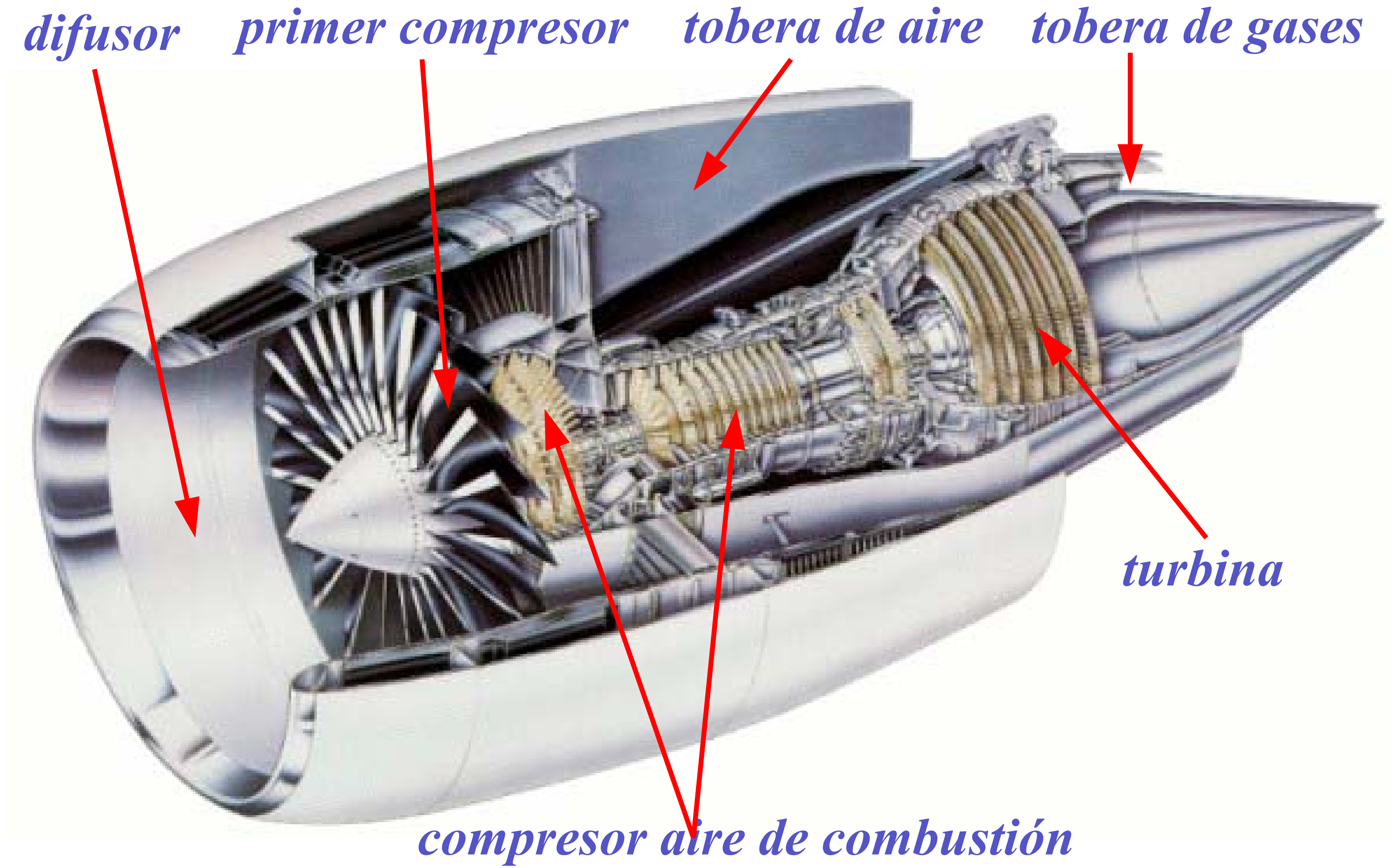
difusor supersónico-subsónico

Turborreactor

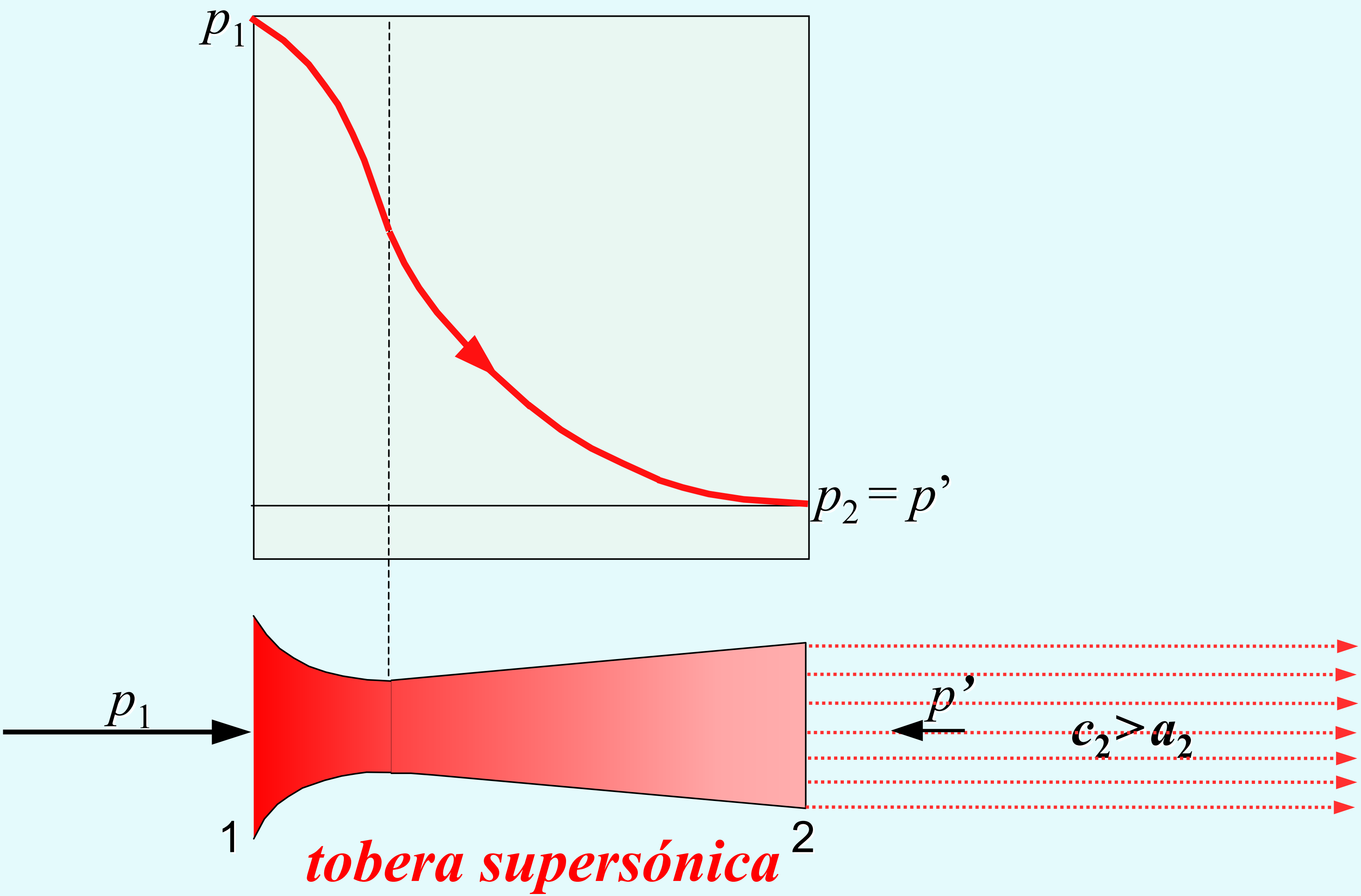


W_t (compresor) = W_t (turbina)

Turborreactor de doble flujo



Funcionamiento de tobera en condiciones de diseño



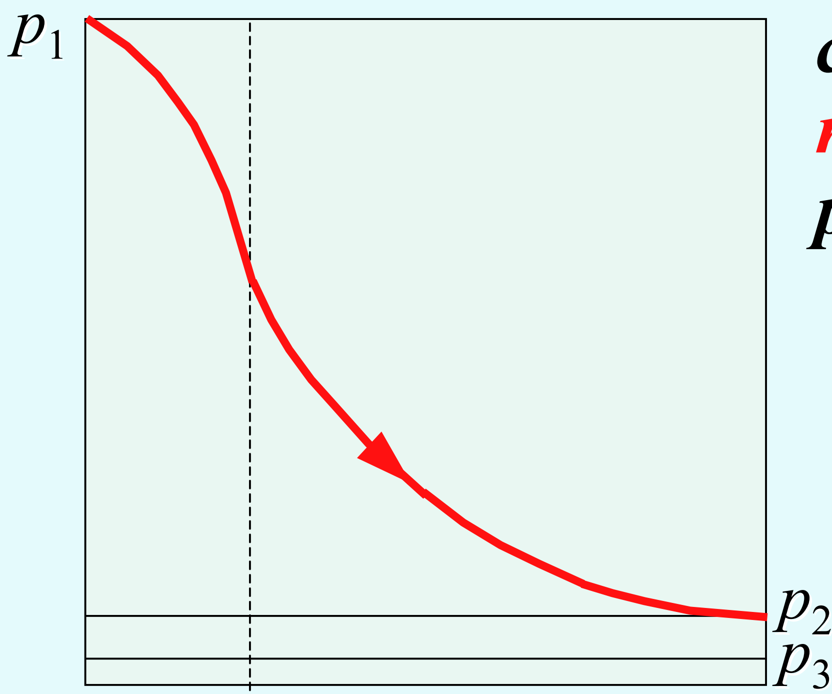
En condiciones fuera de diseño

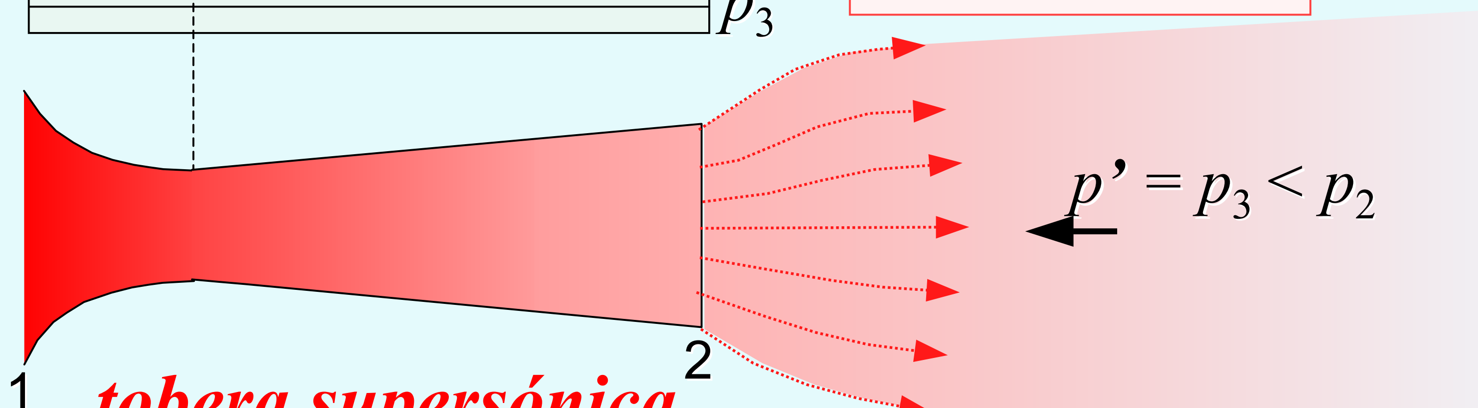
contrapresión p' menor que la p_2 de diseño

mismo caudal

p_2 y c_2 no varían

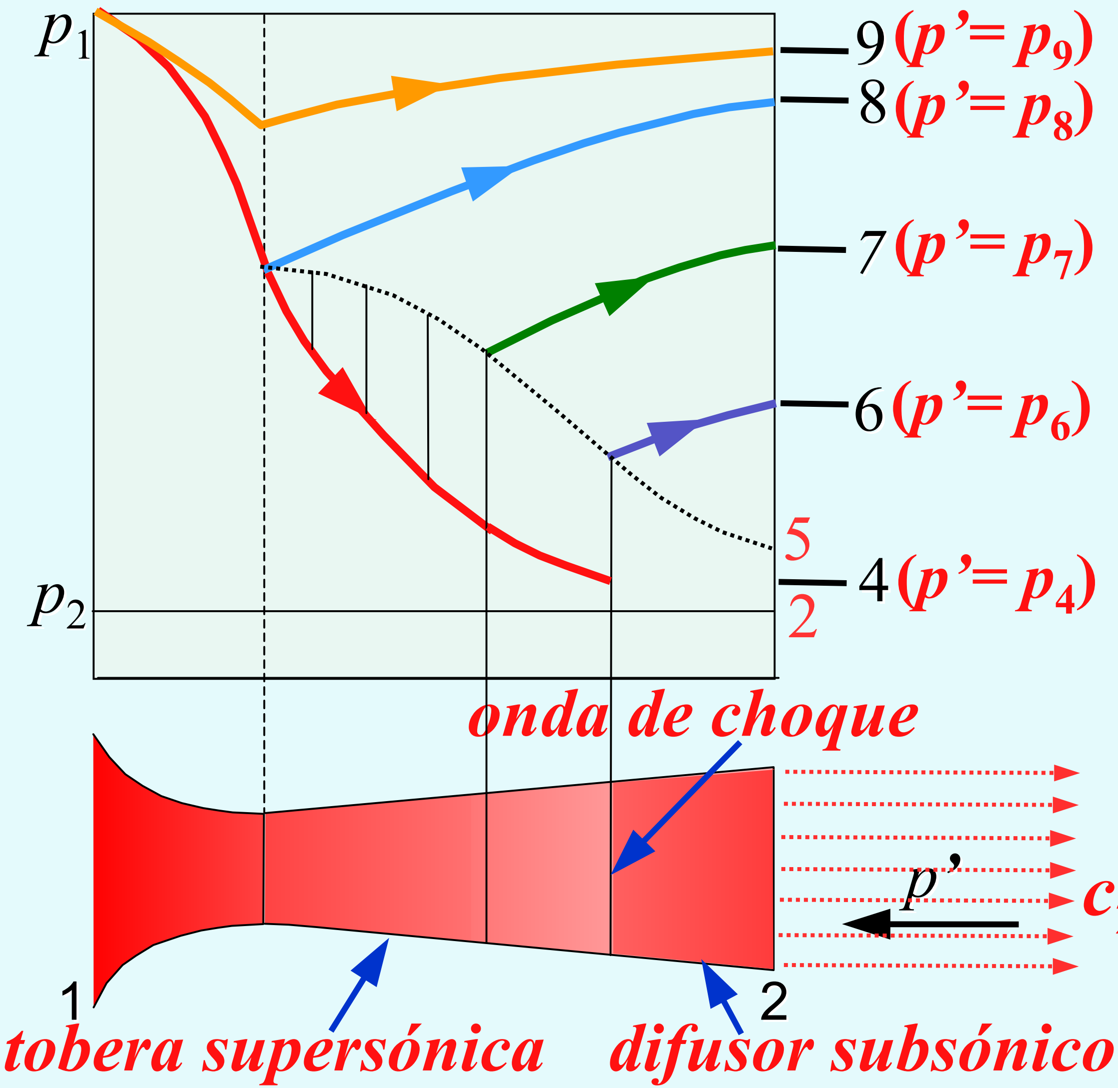
libre expansión de p_2 a p_3





tobera supersónica

En condiciones fuera de diseño



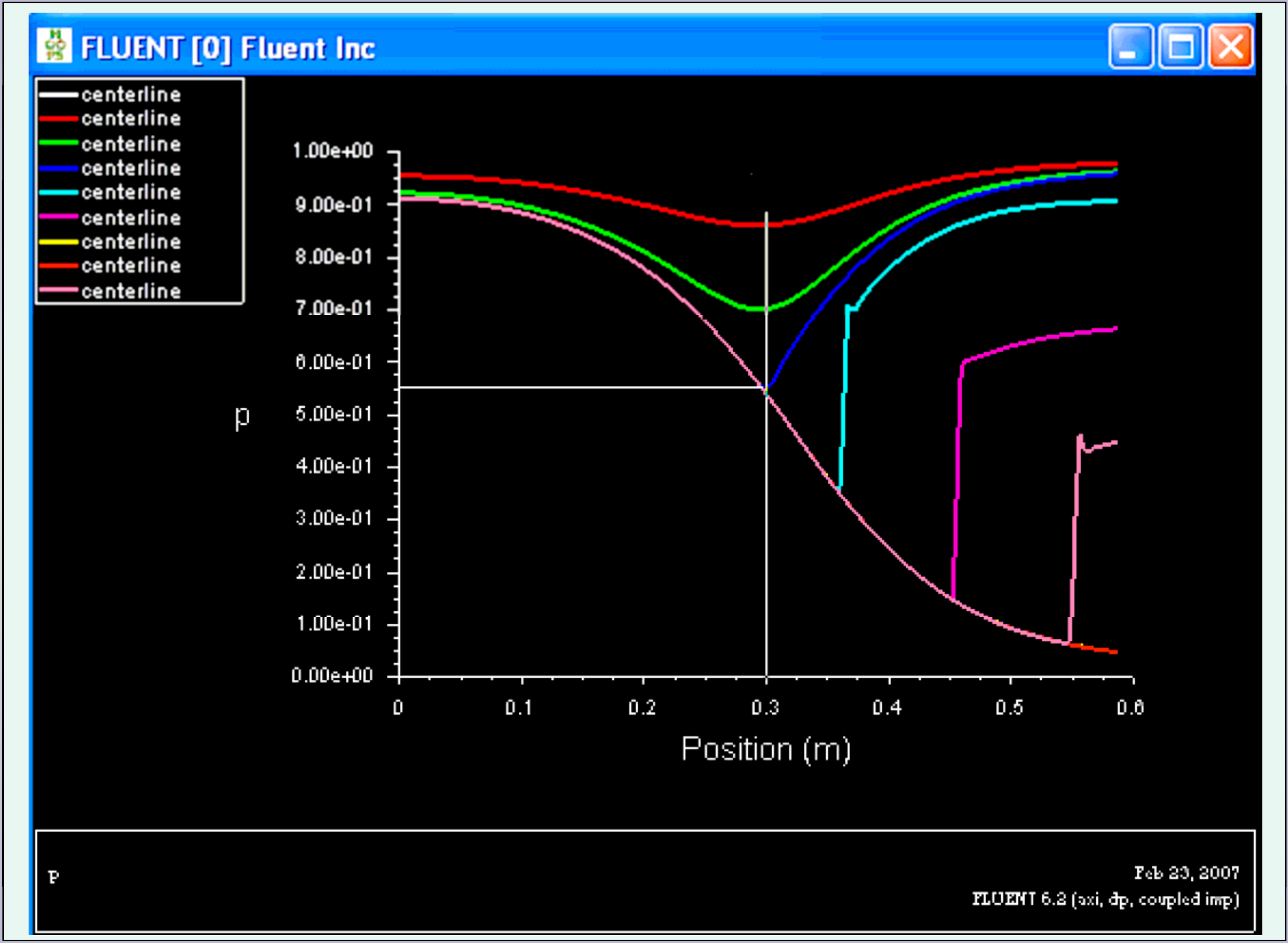
c_2 subsónica

contrapresión p' mayor que la p_2 de diseño

$p' = p_5 \; p_6 \; p_7 \; p_8$
mismo caudal

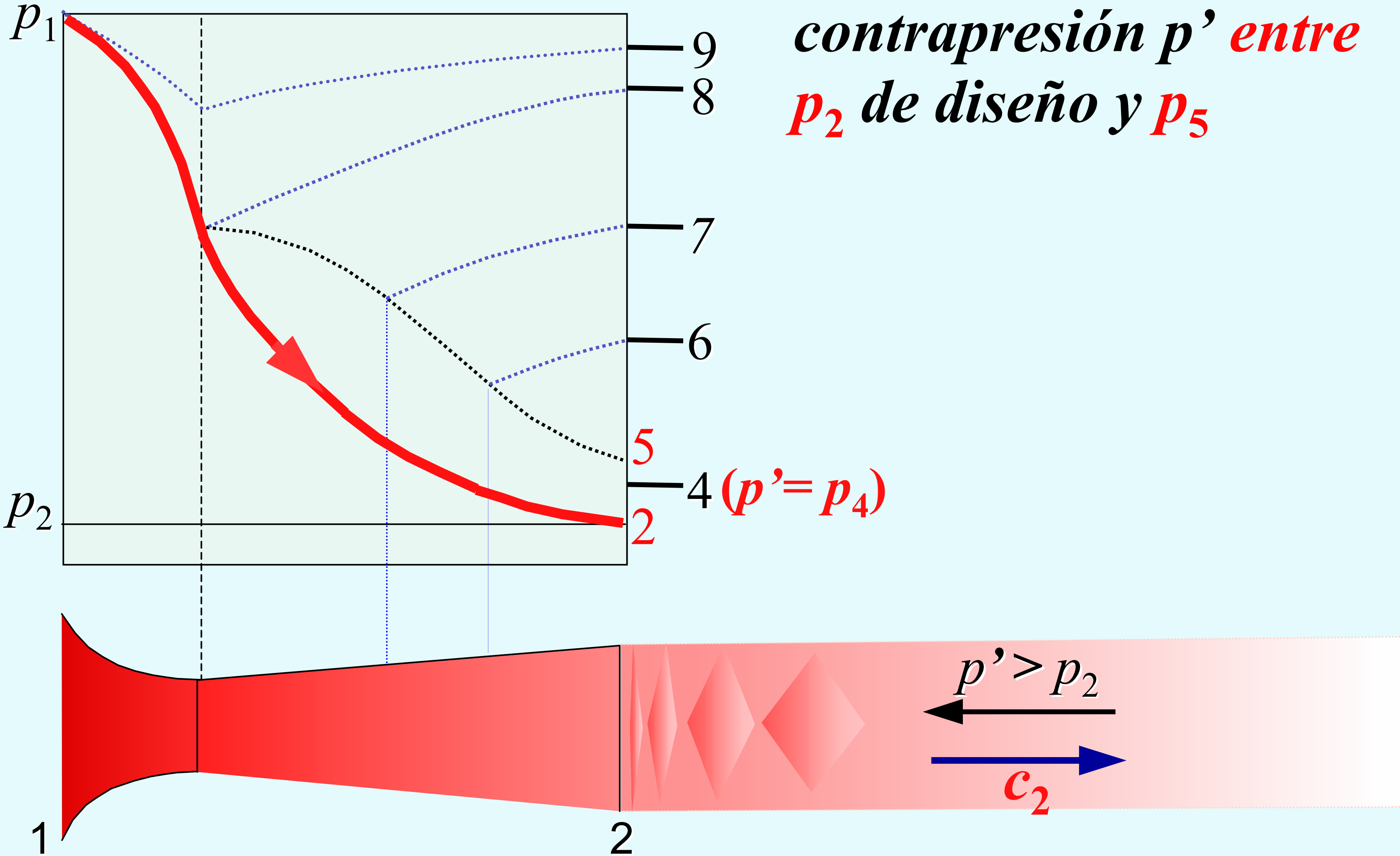
$p' = p_9$
menor caudal
(tubo Venturi)

En esta sección, el flujo pasa de supersónico a subsónico.


FLUENT [0] Fluent Inc
centerline
centerline
centerline
centerline
centerline
centerline
centerline
centerline
centerline
1.00e+00
9.00e-01
8.00e-01
7.00e-01
6.00e-01
5.00e-01
4.00e-01
3.00e-01
2.00e-01
1.00e-01
0.00e+00
p
0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
Position (m)
p
Feb 23, 2007
FLUENT 6.2 (axi, dp, coupled imp)

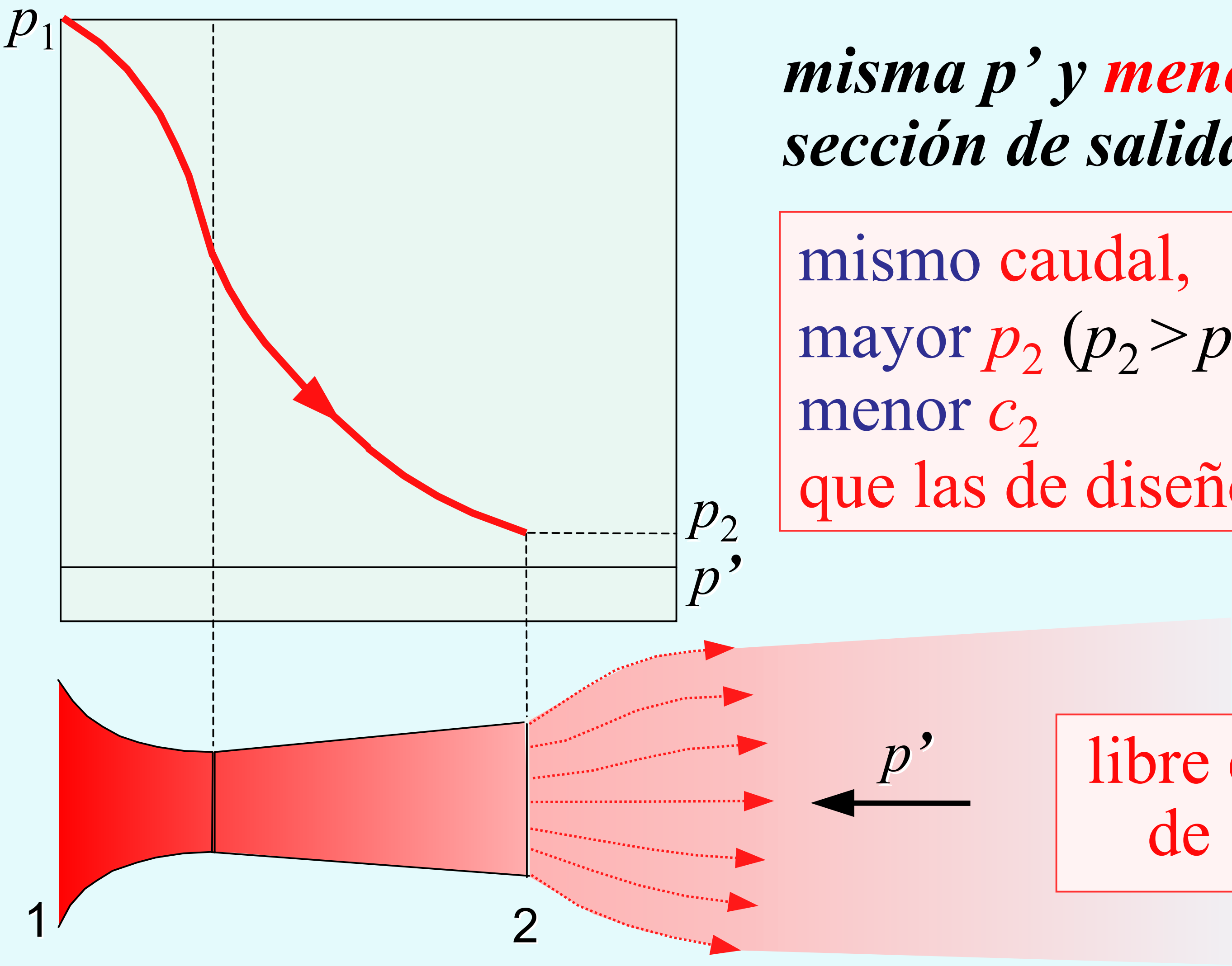
En condiciones fuera de diseño

contrapresión p' entre p_2 de diseño y p_5



Onda de choque oblicua

En condiciones fuera de diseño

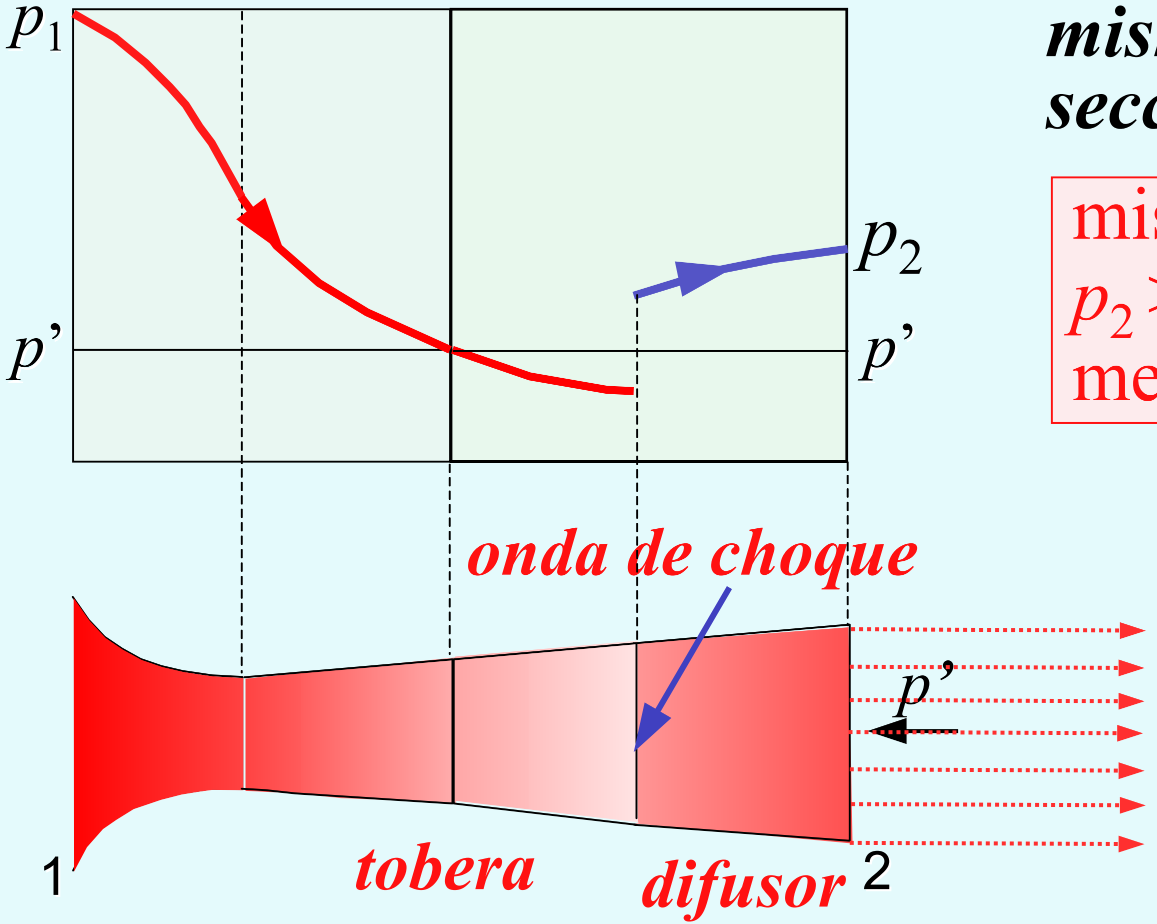


misma p' y menor sección de salida

mismo caudal,
mayor p_2 $(p_2 > p')$
menor c_2
que las de diseño

libre expansión de p_2 a p'

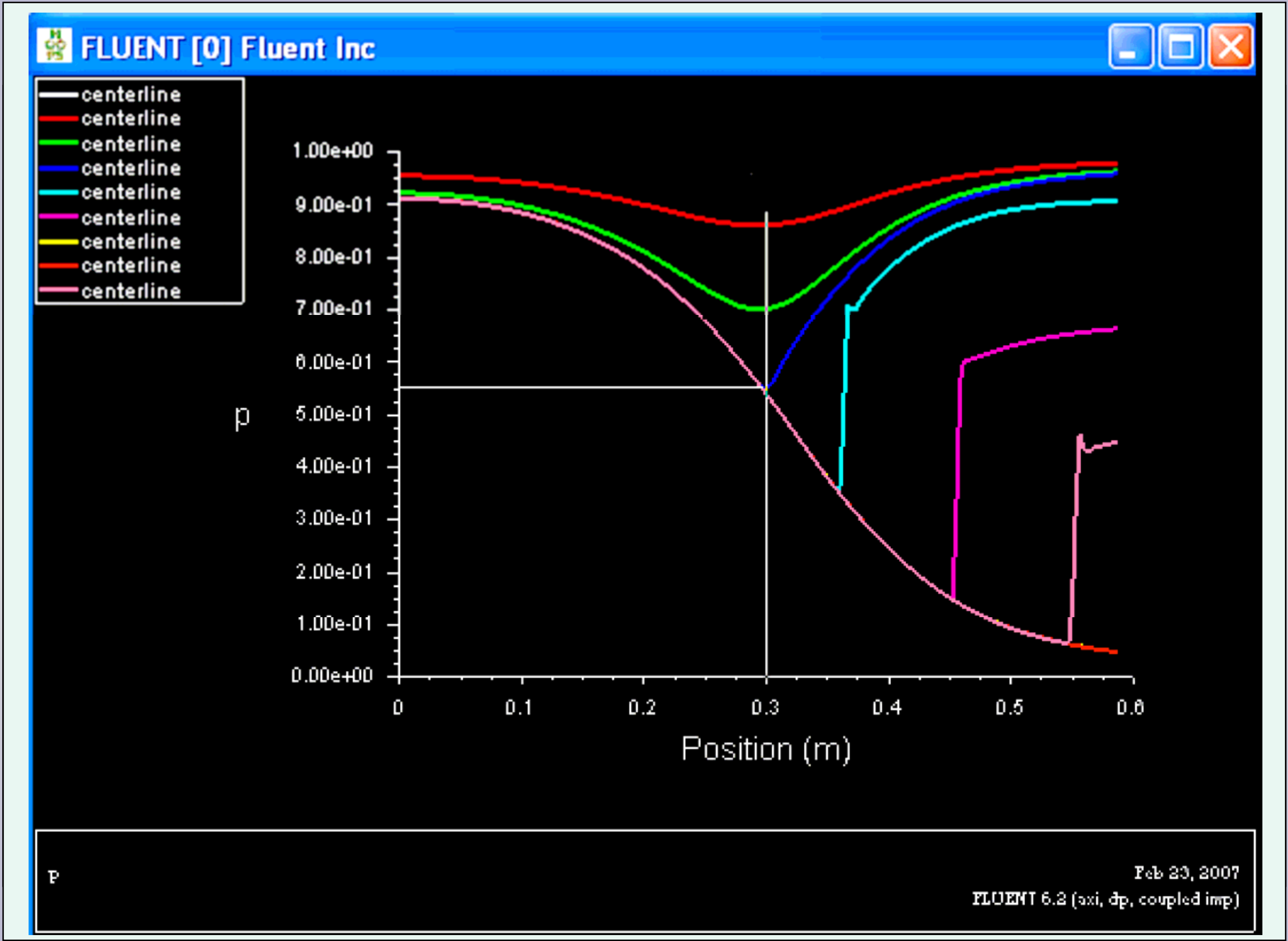
En condiciones fuera de diseño



misma p' y mayor sección de salida

mismo caudal
$p_2 > p'$
menor c_2

c_2 subsónica


FLUENT [0] Fluent Inc
centerline
centerline
centerline
centerline
centerline
centerline
centerline
centerline
centerline
1.00e+00
9.00e-01
8.00e-01
7.00e-01
6.00e-01
5.00e-01
4.00e-01
3.00e-01
2.00e-01
1.00e-01
0.00e+00
p
0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
Position (m)
p
Feb 20, 2007
FLUENT 6.2 (axi, dp, coupled imp)

Toberas de geometría variable

Toberas de geometría variable

Toberas de geometría variable y orientables

Valores críticos, o reversibles en el cuello

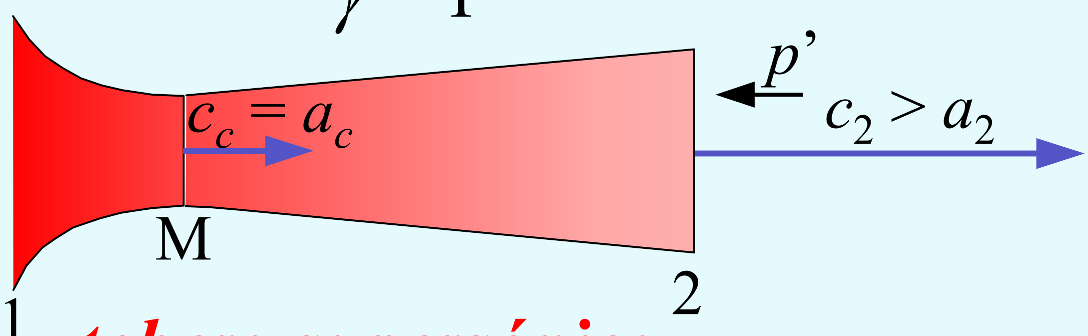
$$c \cdot (dc)_s + v \cdot (dp)_s = 0$$

$$\int_1^{\mathrm{M}} c \cdot (dc)_s = -\int_1^{\mathrm{M}} v \cdot (dp)_s$$

$$\int_1^{\mathrm{M}} c \cdot (dc)_s = \frac{a_c^2}{2} = \frac{\gamma_c \cdot p_c \cdot v_c}{2}$$

$$-\int_1^{\mathrm{M}} v \cdot (dp)_s = \gamma \cdot \frac{p_1 \cdot v_1 - p_c \cdot v_c}{\gamma - 1}$$

subíndice c = valores críticos

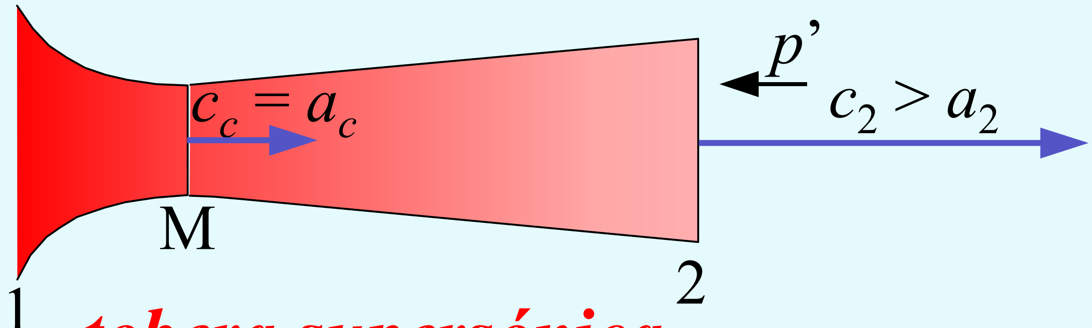


tobera supersónica

Valores críticos, o reversibles en el cuello

$$\frac{p_c \cdot v_c}{2} = \frac{p_1 \cdot v_1 - p_c \cdot v_c}{\gamma - 1}; \qquad \frac{\gamma - 1}{2} = \frac{p_1 \cdot v_1}{p_c \cdot v_c} - 1$$

$$\boxed{\frac{p_c \cdot v_c}{p_1 \cdot v_1} = \frac{2}{\gamma + 1}}$$

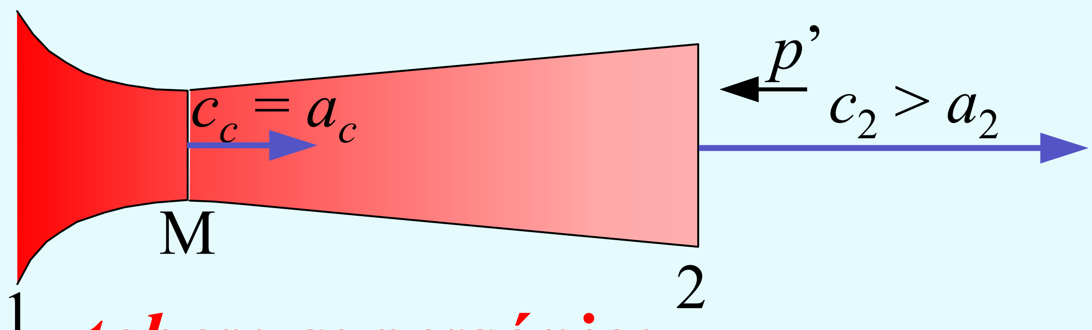


tobera supersónica

Valores críticos, o reversibles en el cuello

$$\underline{\frac{p_c \cdot v_c}{p_1 \cdot v_1} = \frac{2}{\gamma + 1}} \qquad \frac{p_c}{p_1} \cdot \left(\frac{p_1}{p_c} \right)^{\frac{1}{\gamma}} = \frac{2}{\gamma + 1}; \qquad \left(\frac{p_c}{p_1} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} = \frac{2}{\gamma + 1}$$

$$\boxed{\frac{p_c}{p_1} = \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}} \qquad \boxed{\frac{v_1}{v_c} = \frac{\rho_c}{\rho_1} = \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{1}{\gamma - 1}}}$$



tobera supersónica

Valores críticos, o reversibles en el cuello

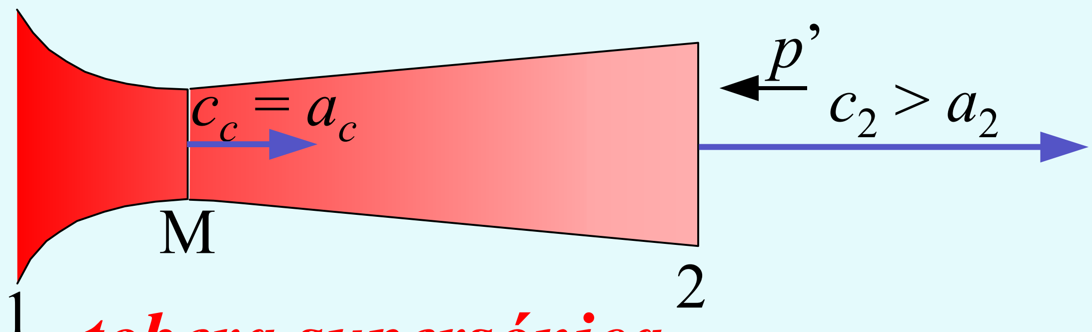
$$\frac{p_c \cdot v_c}{p_1 \cdot v_1} = \frac{2}{\gamma + 1}$$

$$\frac{v_1}{v_c} = \frac{\rho_c}{\rho_1} = \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{1}{\gamma - 1}}$$

Gases perfectos

$$\boxed{\frac{T_c}{T_1} = \frac{2}{\gamma + 1}}$$

$$\boxed{\frac{p_c}{v_c} = \frac{p_1}{v_1} \cdot \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}}}$$

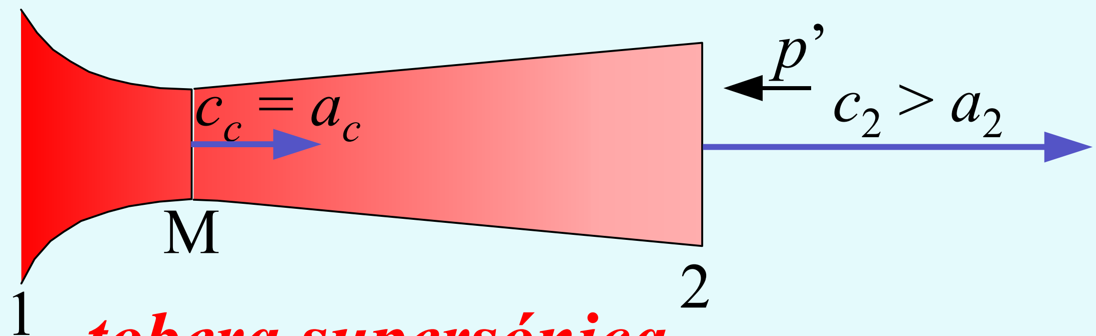


tobera supersónica

Valores críticos orientativos

$$\frac{p_c}{p_1}=\left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \qquad \frac{\rho_c}{\rho_1}=\left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{1}{\gamma-1}} \qquad \frac{T_c}{T_1}=\frac{2}{\gamma+1}$$

gas	γ	p_c	ρ_c	T_c
monoatómicos	1,66	$0{,}488\cdot p_1$	$0{,}649\cdot \rho_1$	$0{,}752\cdot T_1$
biatómicos	1,40	$0{,}528\cdot p_1$	$0{,}634\cdot \rho_1$	$0{,}833\cdot T_1$
triatómicos	1,33	$0{,}540\cdot p_1$	$0{,}629\cdot \rho_1$	$0{,}858\cdot T_1$

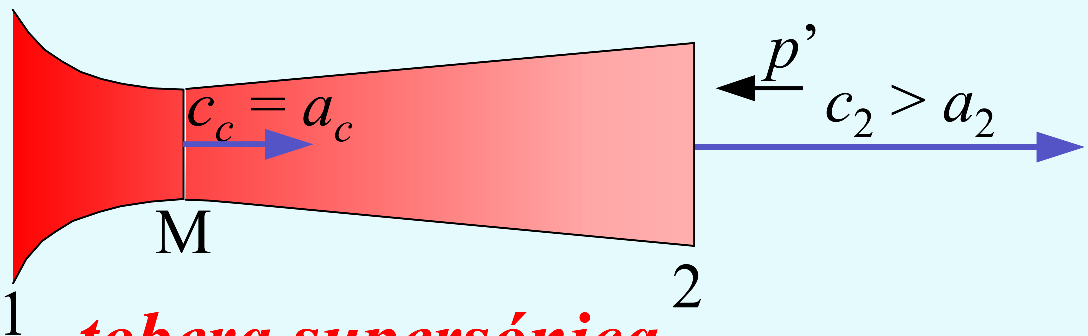


tobera supersónica

Valores críticos orientativos

gas	γ	p_c	ρ_c	T_c
monoatómicos	1,66	$0{,}488 \cdot p_1$	$0{,}649 \cdot \rho_1$	$0{,}752 \cdot T_1$
biatómicos	1,40	$0{,}528 \cdot p_1$	$0{,}634 \cdot \rho_1$	$0{,}833 \cdot T_1$
triatómicos	1,33	$0{,}540 \cdot p_1$	$0{,}629 \cdot \rho_1$	$0{,}858 \cdot T_1$

- si $p_c \leq p'$, tobera convergente
- si $p_c > p'$, tobera convergente-divergente



tobera supersónica

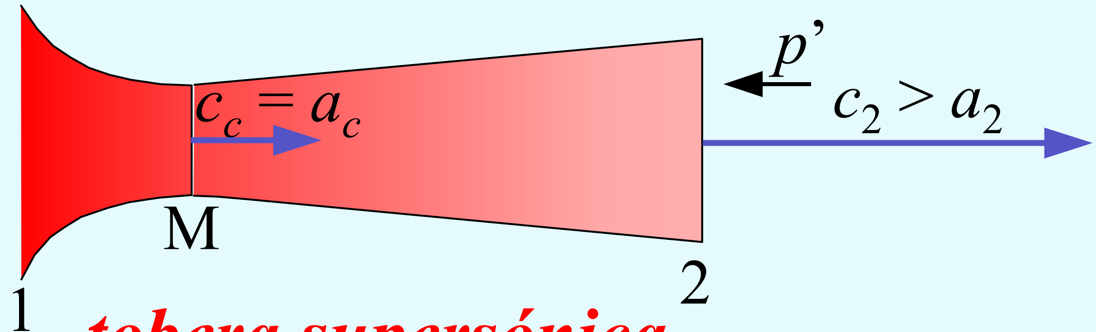
Velocidad crítica

$$a = \sqrt{\gamma \cdot p \cdot v}$$

$$\frac{p_c \cdot v_c}{p_1 \cdot v_1} = \frac{2}{\gamma + 1}$$

$$c_c = a_c = \sqrt{\gamma \cdot p_c \cdot v_c} = \sqrt{\gamma \cdot \frac{2}{\gamma + 1} \cdot p_1 \cdot v_1}$$

$$\boxed{c_c = a_c = \sqrt{\frac{2 \cdot \gamma}{\gamma + 1}} \cdot \sqrt{p_1 \cdot v_1}}$$



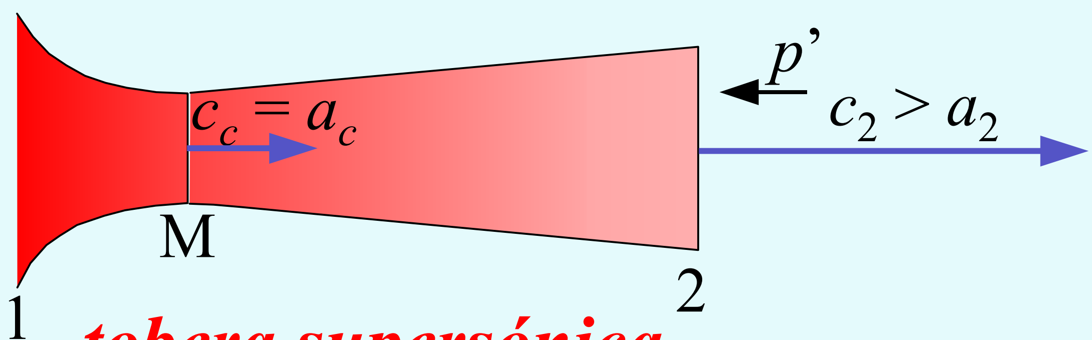
tobera supersónica

Relación $\dot{m}/A_{\mathrm{m}}$

$$\frac{\dot{m}}{A_{\mathrm{m}}} = \frac{c_c}{v_c} = \frac{\sqrt{\gamma \cdot p_c \cdot v_c}}{v_c} = \sqrt{\gamma \cdot \frac{p_c}{v_c}}$$

$$\frac{p_c}{v_c} = \frac{p_1}{v_1} \cdot \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}$$

$$\boxed{\frac{\dot{m}}{A_{\mathrm{m}}} = \sqrt{\gamma \cdot \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \cdot \sqrt{\frac{p_1}{v_1}}}$$



tobera supersónica

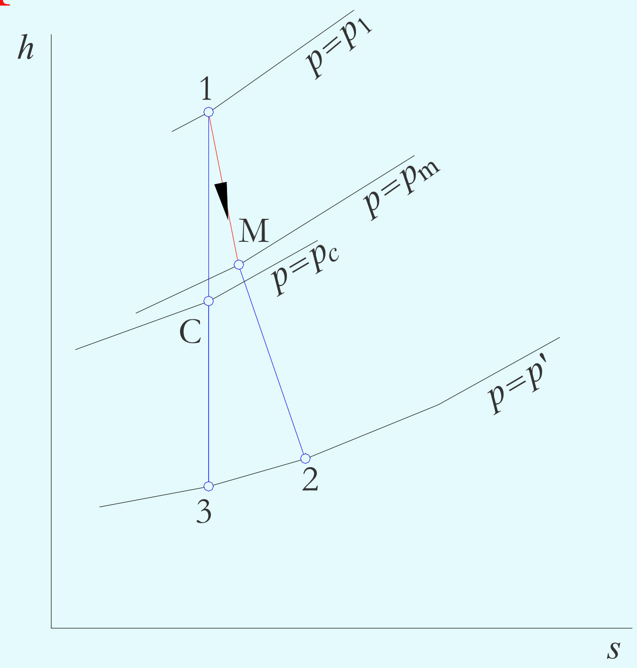
Valores reales en el cuello de la tobera

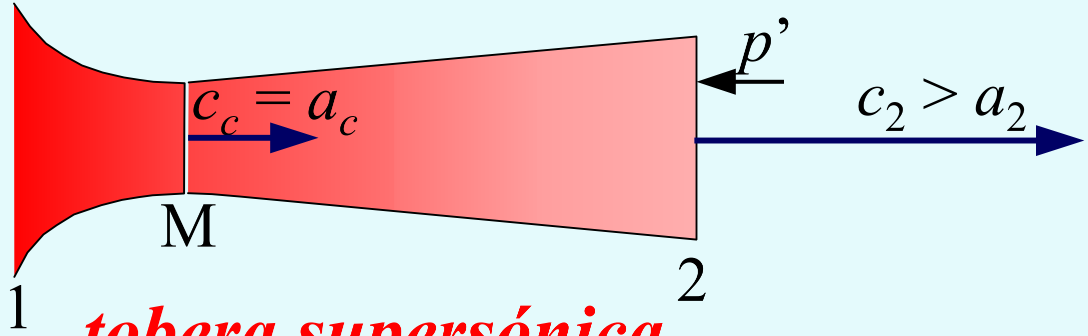
Exponente politrópico entre 1 y M

$$p \cdot v^n = K$$

$$\boxed{n = \frac{\gamma + 1 + \eta \cdot (\gamma - 1)}{\gamma + 1 - \eta \cdot (\gamma - 1)}}$$

Entre 1 y M, $\eta = 0{,}95$





tobera supersónica

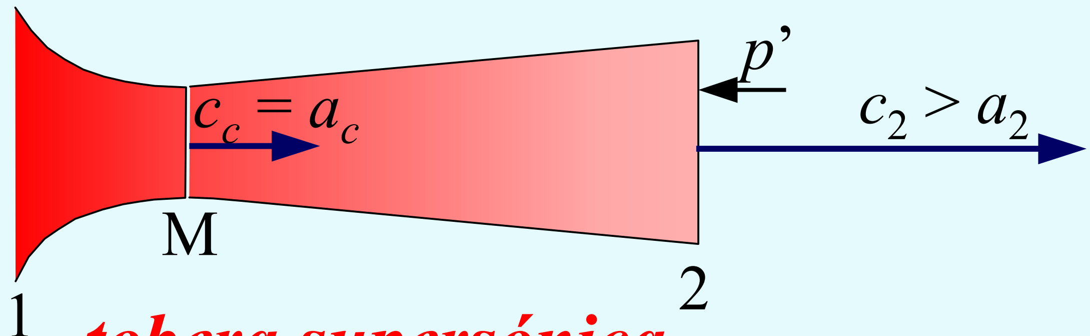
Valores reales en el cuello de la tobera

Temperatura, presión y volumen específico

$$\frac{T_m}{T_1} = \frac{2}{n+1}$$

$$\frac{p_m}{p_1} = \left(\frac{2}{n+1}\right)^{\frac{n}{n-1}}$$

$$\frac{v_1}{v_m} = \frac{\rho_m}{\rho_1} = \left(\frac{2}{n+1}\right)^{\frac{1}{n-1}}$$



tobera supersónica

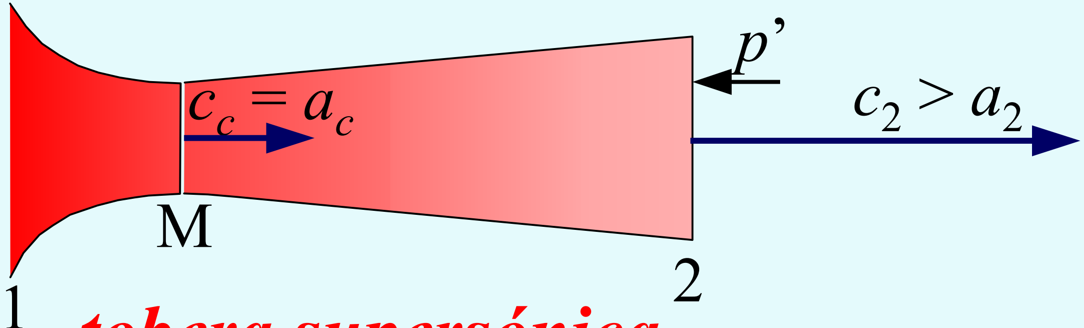
Valores reales en el cuello de la tobera

Velocidad en función del estado inicial

$$c_{\mathrm{m}} = \sqrt{\frac{2\cdot\gamma}{n+1}\cdot\frac{n-1}{\gamma-1}}\cdot\sqrt{p_1\cdot v_1}$$

$$K = \sqrt{\frac{2\cdot\gamma}{n+1}\cdot\frac{n-1}{\gamma-1}} \qquad \text{(tabla 15)}$$

$$\boxed{c_{\mathrm{m}} = K\cdot\sqrt{p_1\cdot v_1}}$$



tobera supersónica

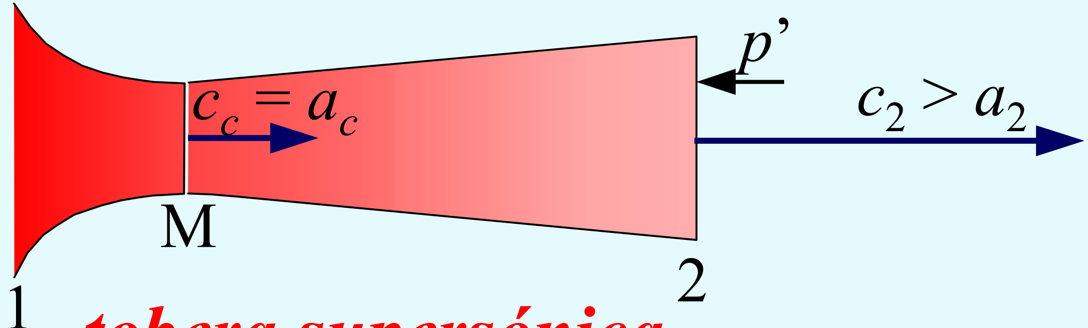
Valores reales en el cuello de la tobera

Área

$$\frac{\dot m}{A_m}=\left(\frac{2}{n+1}\right)^{\frac{1}{2}\cdot\frac{n+1}{n-1}}\sqrt{\gamma\cdot\frac{n-1}{\gamma-1}}\cdot\sqrt{\frac{p_1}{v_1}}$$

$$C=\left(\frac{2}{n+1}\right)^{\frac{1}{2}\cdot\frac{n+1}{n-1}}\sqrt{\gamma\cdot\frac{n-1}{\gamma-1}}$$ (tabla 15)

$$\boxed{\frac{\dot m}{A_m}=C\cdot\sqrt{\frac{p_1}{v_1}}}$$



tobera supersónica

Valores reales en el cuello de la tobera

Tabla 15

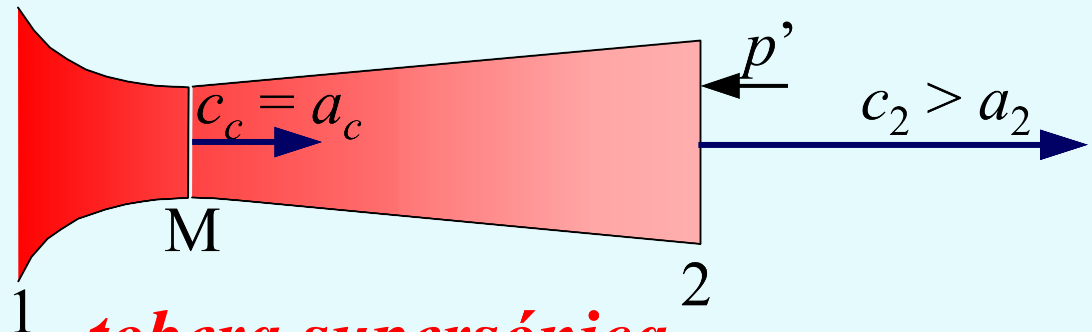
γ = exponente adiabático medio entre T_1 y T_m

n = exponente politrópico, para $\eta = 0{,}95$

p_m/p_1 = relación de presiones

K = coeficiente de la ec. 5.43

C = coeficiente de la ec. 5.46



tobera supersónica

EJERCICIO

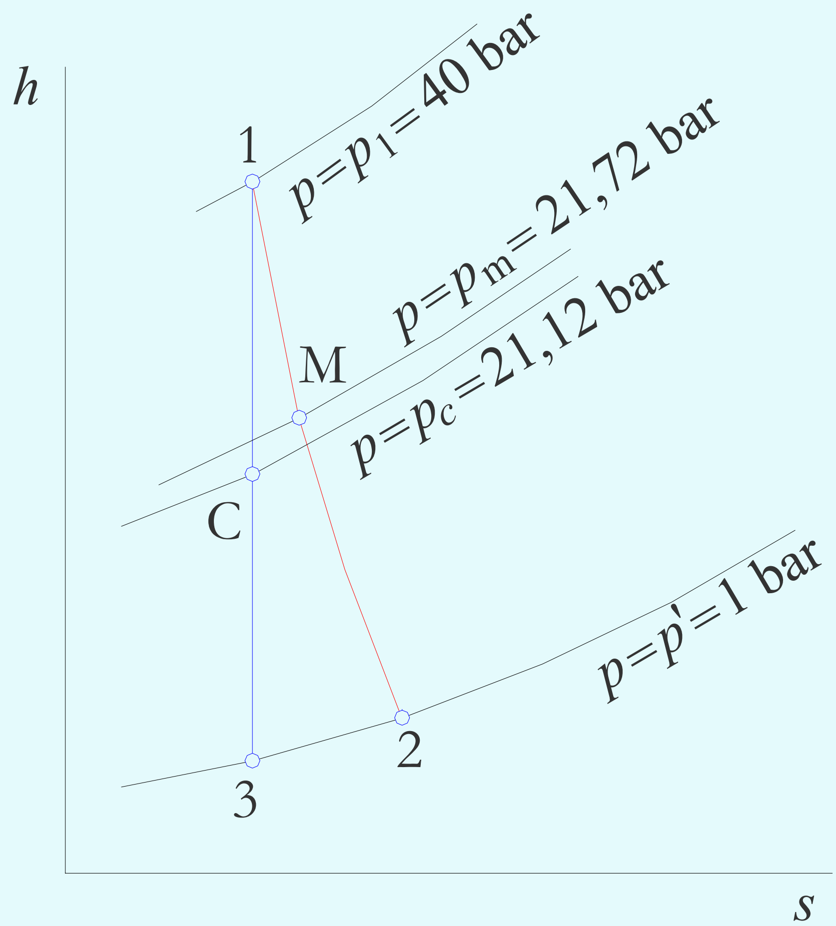
Calcúlese presión, temperatura y velocidad reales, y el área de la sección mínima:

$$\dot{m} = 0{,}5 \text{ kg/s}$$

$$T_1 = 1130 \text{ K}$$

$$p_1 = 40 \text{ bar}$$

$$p' = 1 \text{ bar}$$



Solución (tabla 15)

$$\gamma = 1{,}333$$

$$n = 1{,}314$$

$$p_m/p_1 = 0{,}543$$

$$K = 1{,}042$$

$$C = 0{,}655$$

Presión en el cuello (p_c= 21,12 bar)

$$p_\mathrm{m} = 0{,}543 \cdot p_1 = 0{,}543 \cdot 40 = 21{,}72 \text{ bar}$$

Temperatura en el cuello (T_c= 941 K)

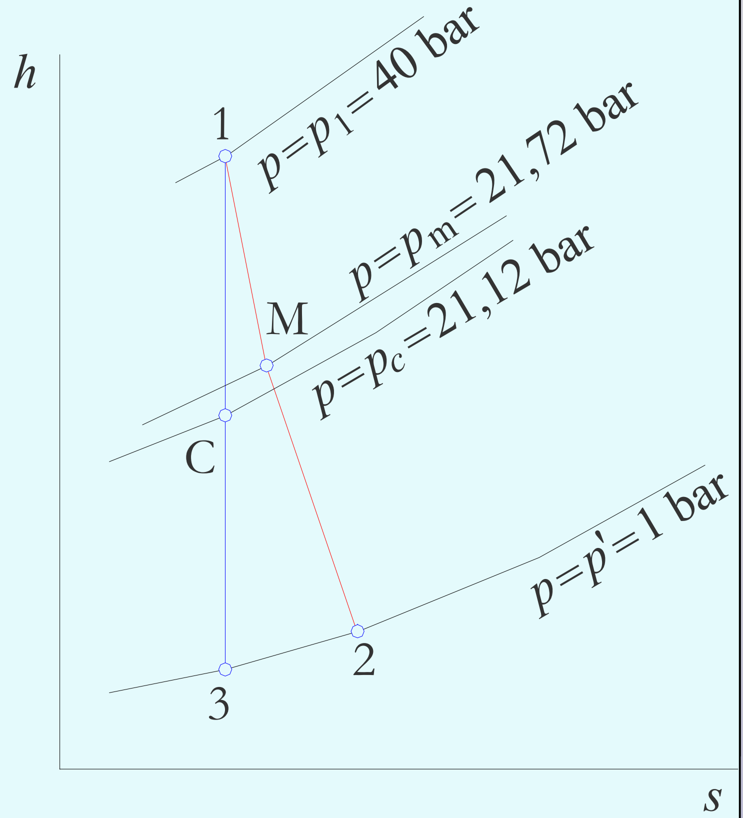
$$T_\mathrm{m}/T_1 = 2/(n + 1)$$

$$T_\mathrm{m} = 1130 \cdot 2/2{,}314 = 977 \text{ K}$$

Velocidad en el cuello

$$c_\mathrm{m} = K \cdot \sqrt{R \cdot T_1} = 1{,}042 \cdot \sqrt{\frac{8314{,}3 \cdot 1130}{28{,}964}}$$

$$c_\mathrm{m} = 593 \text{ m/s} \; (c_c = 615 \text{ m/s})$$

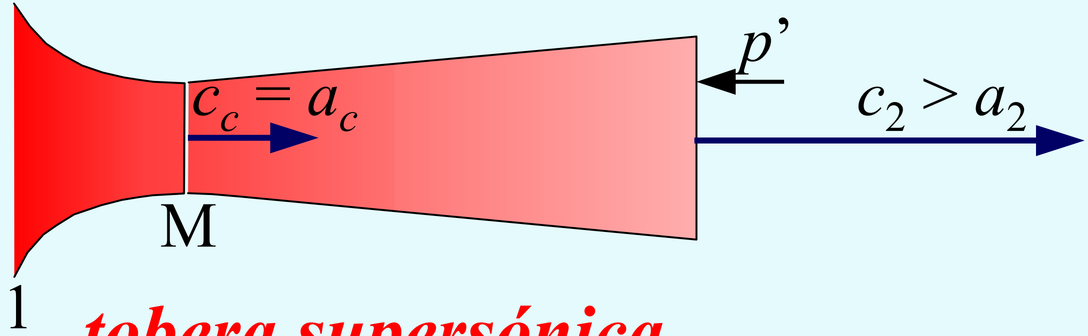


Sección del cuello $(A_{ms} = 1{,}04\ \text{cm}^2)$

$$\frac{\dot{m}}{A_m} = C \cdot \frac{p_1}{\sqrt{R \cdot T_1}}$$

$$\frac{0{,}5}{A_m} = 0{,}655 \cdot \frac{40 \cdot 10^5}{\sqrt{8314{,}3 \cdot 1130 / 28{,}964}}$$

$$A_m = 1{,}09\ \text{cm}^2$$



tobera supersónica

Cálculo de una tobera

Datos:

estado inicial p_1, T_1

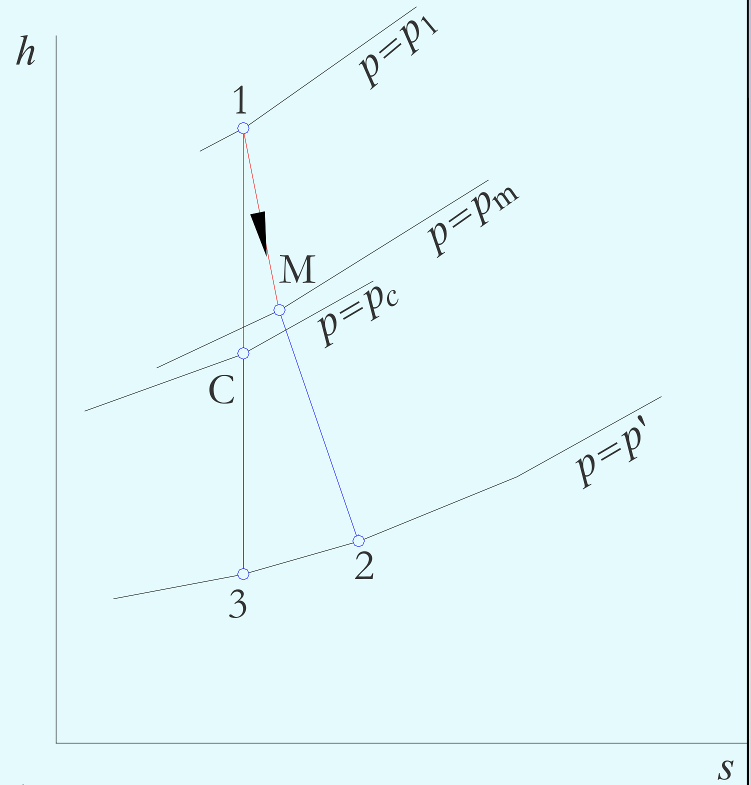
caudal másico $\dot{m}$

contrapresión $p' = p_2$

Tobera supersónica ($p' < p_c$)

1. Área A_m del cuello

$$\frac{\dot{m}}{A_\mathrm{m}} = C \cdot \sqrt{\frac{p_1}{v_1}}$$



2. Entropía y entalpía iniciales, s_1 y h_1.

3. Entalpía h_3: p_3 ($p_3 = p'$), s_3 ($s_3 = s_1$).

4. Entalpía h_2

$$\eta = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_3}$$

(η entre 0,95 y 0,90)

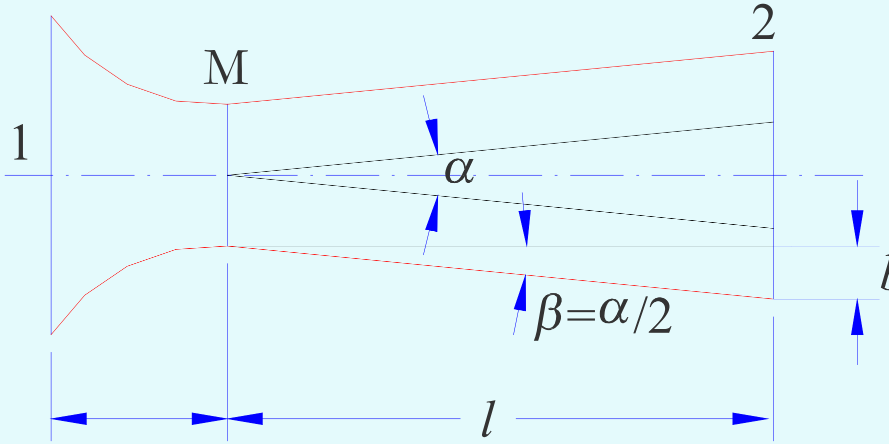
5. Velocidad de salida c_2 $(c_1^2/2 \approx 0)$

$$\frac{c_2^2 - c_1^2}{2} = h_1 - h_2; \quad c_2 = \sqrt{2 \cdot (h_1 - h_2)}$$

6. Volumen específico v_2

7. Área A_2 final

$$\dot{m} = \frac{A_2 \cdot c_2}{v_2}$$



8. Longitud *l de la parte divergente*

$\boxed{\text{Fijar ángulo } \alpha \text{ de divergencia}}$

Tobera sónica ($p' = p_c$; $A_2 = A_m$)

$$\frac{\dot{m}}{A_{\mathrm{m}}} = C \cdot \sqrt{\frac{p_1}{v_1}}$$

Tobera subsónica ($p' > p_c$)

Mismo procedimiento que para la supersónica:

- el paso 1 lógicamente no procede
- en el paso 4, $\eta = 0{,}95$ para $Ma_2 = 1$,
  $\eta = 1$ para Ma_2.muy pequeños

EJERCICIO

Datos:

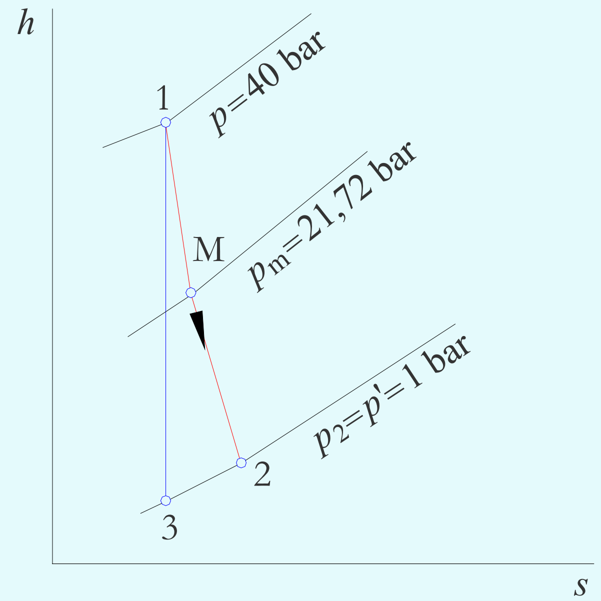
$\dot{m} = 0{,}5$ kg/s (aire)

$T_1 = 1130$ K

$p_1 = 40$ bar

$p' = 1$ bar

Tómese $\eta = 90\%$ y $\alpha = 10^{\circ}$.



Solución

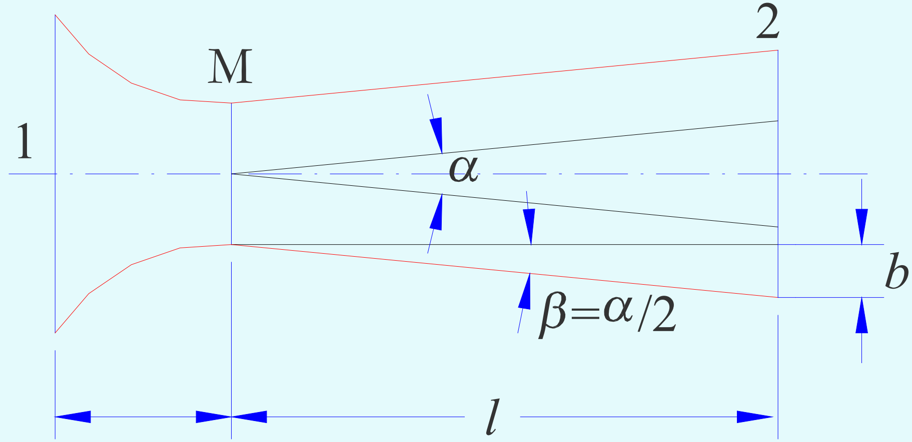
$p_m = 21{,}72$ bar

$T_m = 977$ K

$c_m = 593$ m/s

$A_m = 1{,}09$ cm²

(ejercicio anterior)



Resultados de PROGASES

PROPIEDADES DE ESTADOS INTRODUCIDOS

GAS: Aire (*M* = 28,964 kg/kmol)

Exergías referidas a t_a = 20 °C y p_a = 1 bar

est. n°	presión absoluta p bar	temp. absoluta T K	energía interna u kJ/kmol	entalpía específica h kJ/kmol	entropía específ. s kJ/kmolK	exergía entálpica e kJ/kmol	volumen específico v m³/kmol
1	40,00	1130,00	25360,6	34755,7	208,225	23071,0	2,3488
2	1,00	499,62	10456,8	14610,8	213,048	1512,3	41,5402
3	1,00	424,29	8844,8	12372,5	208,225	687,8	35,2772

	p	T	u	h	s	e	v
1	40,00	1130,00	25360,6	34755,7	208,225	23071,0	2,3488
2	1,00	499,62	10456,8	14610,8	213,048	1512,3	41,5402

Velocidad de salida

$$c_2 = \sqrt{2\cdot(h_1 - h_2)} = \sqrt{2\cdot(34757{,}1 - 14618{,}4)\cdot 10^3 / 28{,}964} = 1179\ \mathrm{m/s}$$

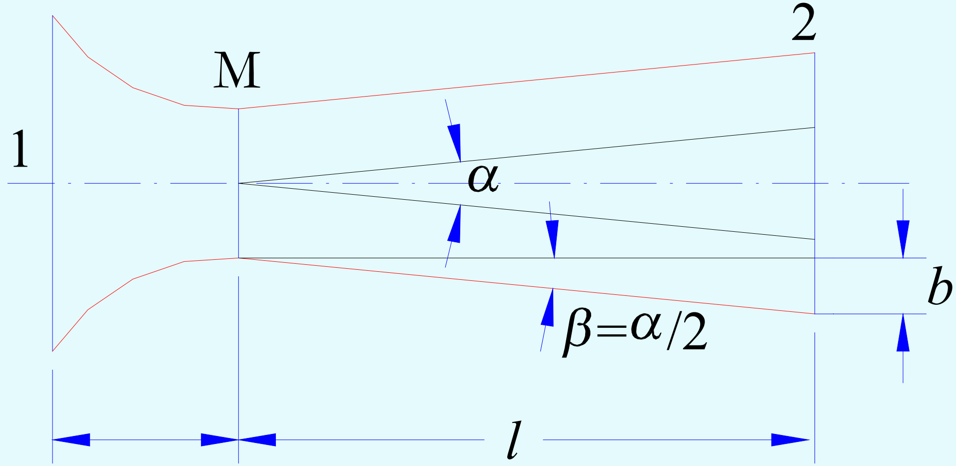
Sección final

$$\dot{m} = \frac{A_2\cdot c_2}{v_2};\quad 0{,}5 = \frac{A_2\cdot 1179}{1{,}4353}\qquad A_2 = 6{,}09\ \mathrm{cm}^2;\quad D_2 = 2{,}78\ \mathrm{cm}$$

Longitud l

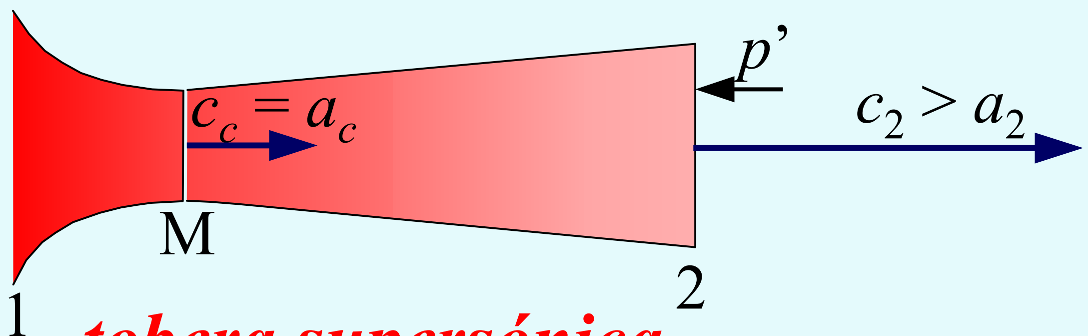
$$l = \frac{b}{tg\beta} = \frac{(D_2 - D_m)/2}{tg\ \beta};$$

$$l = \frac{2{,}78 - 1{,}18}{2\cdot tg5^{o}} = 9{,}14\ \mathrm{cm}$$



Potencia cinética de salida

$$\underline{P} = \dot{m}\cdot\frac{c_2^2}{2} = 0{,}5\cdot\frac{1179^2}{2} = 347{,}5\cdot 10^3\ \text{W} = \underline{347{,}5\ \text{kW}\ (472{,}5\ \text{CV})}$$



tobera supersónica

EJERCICIO

Calcúlese tobera y su eficiencia (tómese $\eta = 92\%$ y $\alpha = 10º$):

$\dot{m} = 15$ kg/s vapor de agua

$t_1 = 540$ ºC

$p_1 = 160$ bar

$p' = \;\; 40$ bar

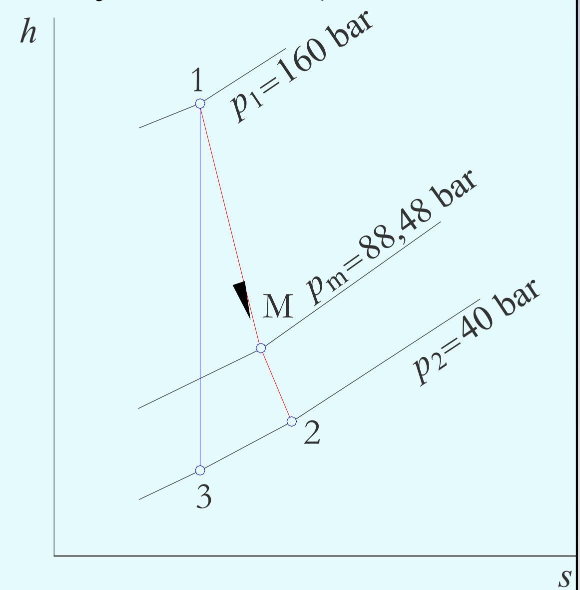


tabla 15

$\gamma = 1{,}277$

$n = 1{,}261$

$p_m/p_1 = 0{,}553$

$K = 1{,}032$

$C = 0{,}645$

Presión en el cuello

$$p_m = 0{,}553 \cdot 160 = 88{,}48 \text{ bar}$$

Velocidad en el cuello

$$c_m = K \cdot \sqrt{p_1 \cdot v_1} = 1{,}032 \cdot \sqrt{160 \cdot 10^5 \cdot 20{,}928 \cdot 10^{-3}} = 597 \text{ m/s}$$

Sección del cuello

$$\frac{\dot{m}}{A_m} = C \cdot \sqrt{\frac{p_1}{v_1}}; \quad \frac{15}{A_m} = 0{,}645 \cdot \sqrt{\frac{160 \cdot 10^5}{20{,}928 \cdot 10^{-3}}}$$

$$A_m = 8{,}411 \text{ cm}^2; \quad D_m = 3{,}27 \text{ cm}$$

Resultados de PROPAGUA

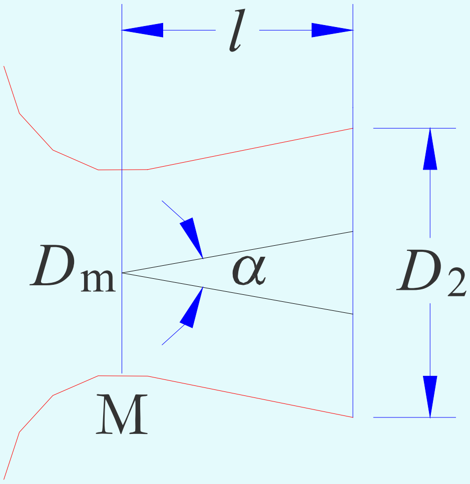
Agua (líquido y/o vapor): Propiedades de estados introducidos

est.	título	presión absoluta	tempe- ratura	entalpía específica	entropía específica	volumen específico	exergía entálpica
	x	p	t	h	s	v	e
		bar	°C	kJ/kg	kJ/kg K	dm³/kg	kJ/kg
1	V	160,000	540,00	3410,30	6,44810	20,9280	1522,90
2	V	40,000	329,55	3042,81	6,50162	63,4448	1139,72
3	V	40,000	317,54	3010,85	6,44810	61,616	1123,45

	x	p bar	t °C	h kJ/kg	s kJ/kg K	v dm³/kg	e kJ/kg
1	V	160,000	540,00	3410,30	6,44810	20,9280	1522,90
2	V	40,000	329,55	3042,81	6,50162	63,4448	1139,72

Velocidad final

$$c_2 = \sqrt{2\cdot(h_1 - h_2)} = \sqrt{2\cdot\underline{(3410,3-3042,9)\cdot 10^3}} = 857,2 \text{ m/s}$$



Sección final

$$\dot{m} = \frac{A_2\cdot c_2}{v_2};\quad 15 = \frac{A_2\cdot 857,2}{\underline{63,45\cdot 10^{-3}}}$$

$$A_2 = 11,10 \text{ cm}^2;\quad D_2 = 3,76 \text{ cm}$$

Longitud l

$$l = \frac{b}{tg\,(\alpha/2)} = \frac{(D_2 - D_m)/2}{tg\,(\alpha/2)} = \frac{(3,76-3,27)/2}{tg\,5^o} = 2,80 \text{ cm}$$

	x	p	t	h	s	v	e
		bar	°C	kJ/kg	kJ/kg K	dm³/kg	kJ/kg
1	V	160,000	540,00	3410,30	6,44810	20,9280	1522,90
2	V	40,000	329,55	3042,81	6,50162	63,4448	1139,72

Exergías del flujo

$$e_{f2} = e_2 + c_2^2/2 = e_2 + (h_1 - h_2) = \underline{1139{,}7 + (3410{,}3 - 3042{,}8)} = 1507{,}2 \text{ kJ/kg}$$

$$e_{f1} = e_1 = \underline{1522{,}9 \text{ kJ/kg}}$$

Exergía destruida

$$e_d = e_{f1} - e_{f2} = 1522{,}9 - 1507{,}2 = 15{,}7 \text{ kJ/kg}$$

Eficiencia, o rendimiento exergético

$$\psi = \frac{e_{f2}}{e_{f1}} = \frac{1507{,}2}{1522{,}9} = 0{,}990 \qquad (\eta = 920\%)$$