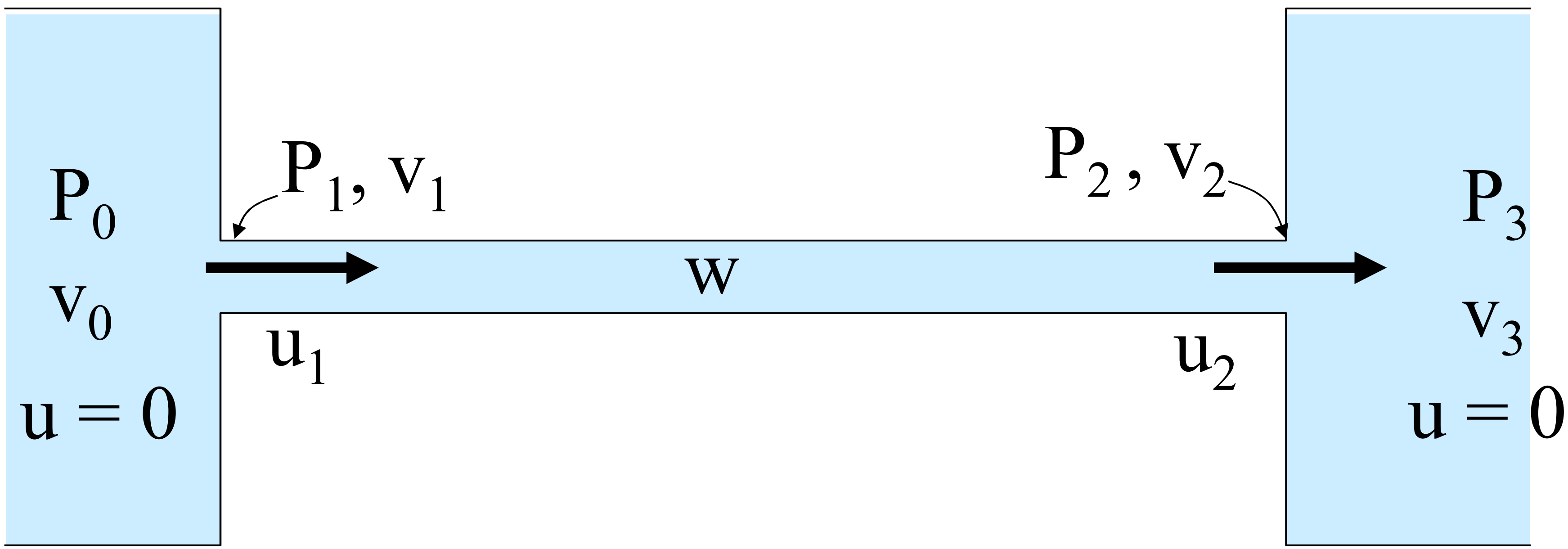
Flujo de fluidos compresibles

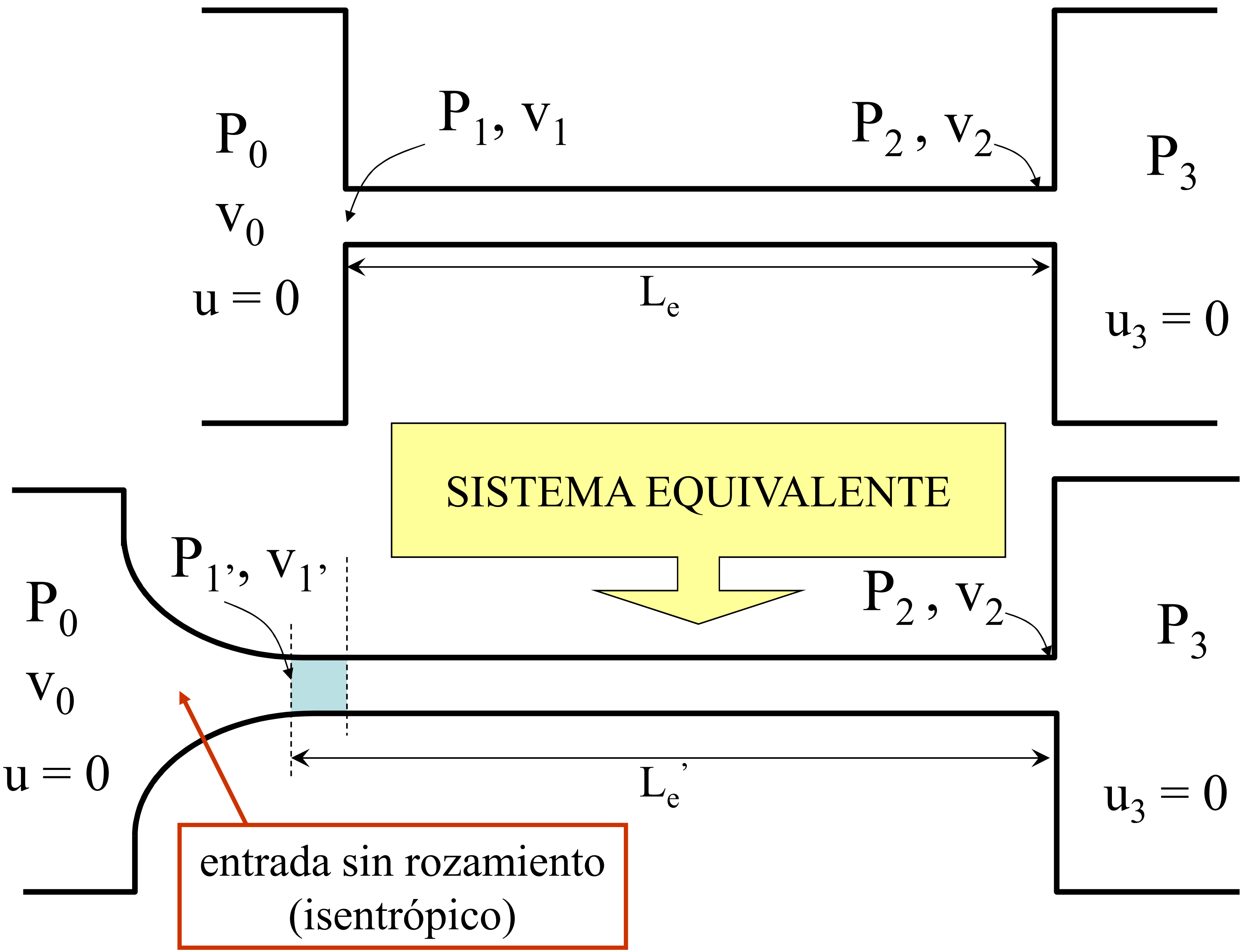
- Generalidades
- Flujo estacionario a través de conducción horizontal de sección constante
- Flujo estacionario entre dos reservorios a través de conducción horizontal de sección constante

Flujo estacionario entre dos reservorios a través de conducción horizontal de sección constante

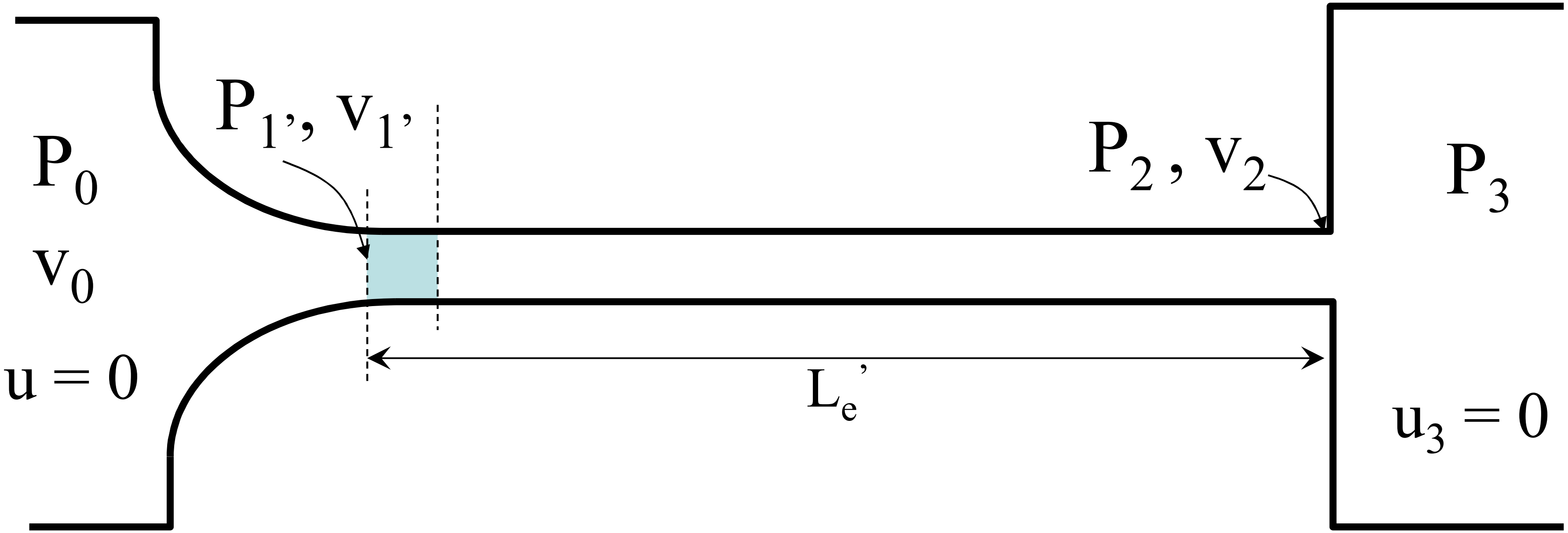
Consideremos ahora la siguiente geometría.

La tubería toma de un reservorio estanco y descarga en otro reservorio estanco.





P0
v0
u = 0
P1, v1
P2 , v2
P3
Le
u3 = 0
SISTEMA EQUIVALENTE
P1', v1'
P0
v0
u = 0
P2 , v2
P3
Le'
u3 = 0
entrada sin rozamiento
(isentrópico)



<u>Relación entre propiedades en 0 y 1'</u>

Ecuaciones en **Entrada a tubería a través de boquilla sin fricción**.

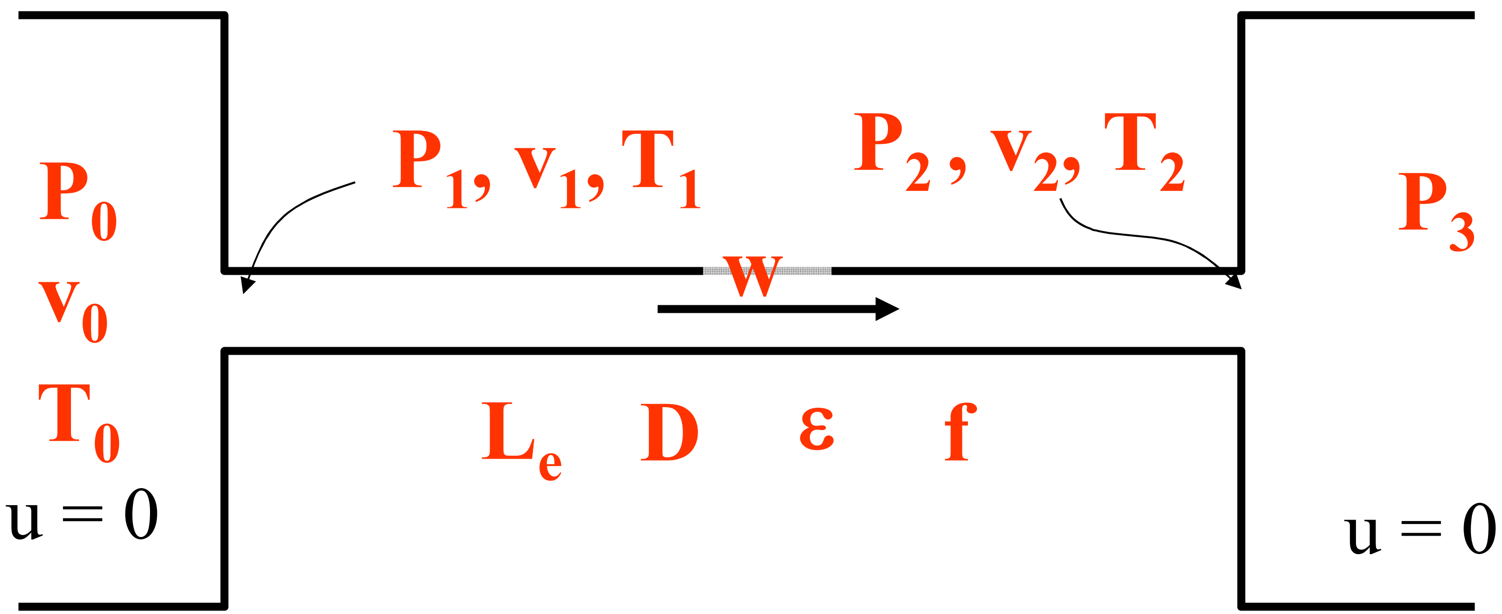
<u>Relación entre propiedades en 1' y 2</u>

Ecuaciones en **Conducción horizontal de sección constante.**
La longitud equivalente debe incluir un término para dar cuenta del tipo de entrada.

<u>Relación entre propiedades en 2 y 3</u>

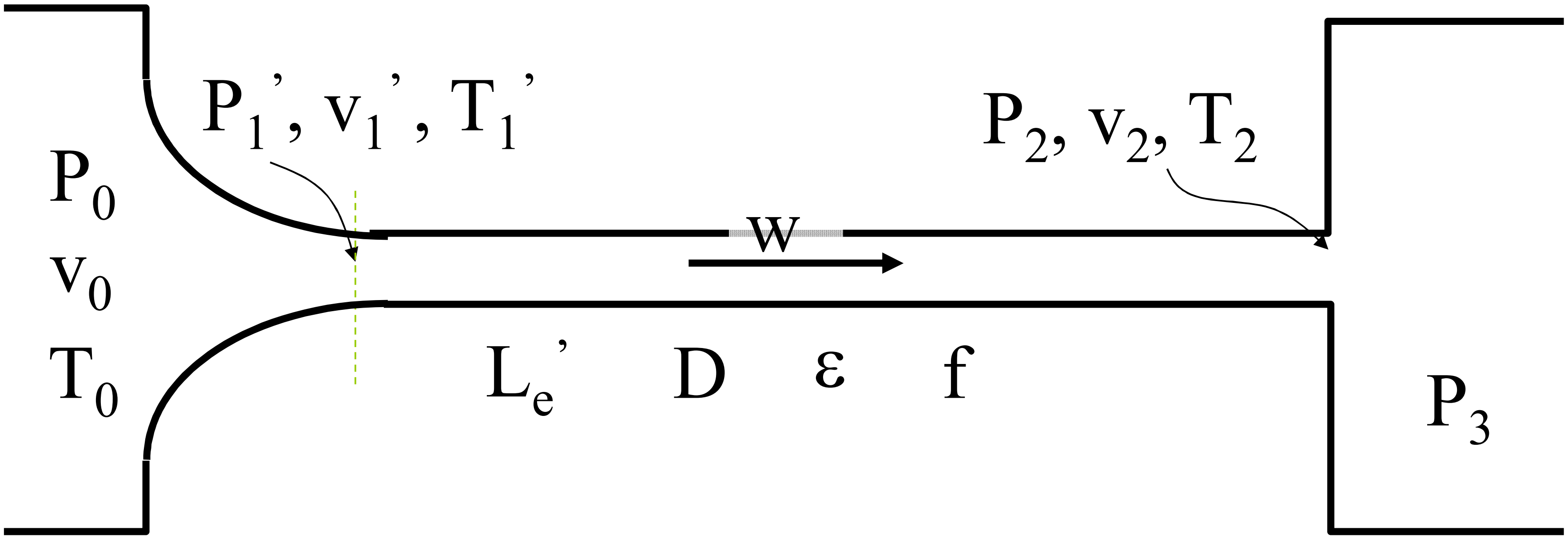
Descarga en Reservorio Estanco: Condición de flujo sónico o subsónico ("RELACIÓN ENTRE LAS PROPIEDADES DE ② Y ③")

Propiedades de interés

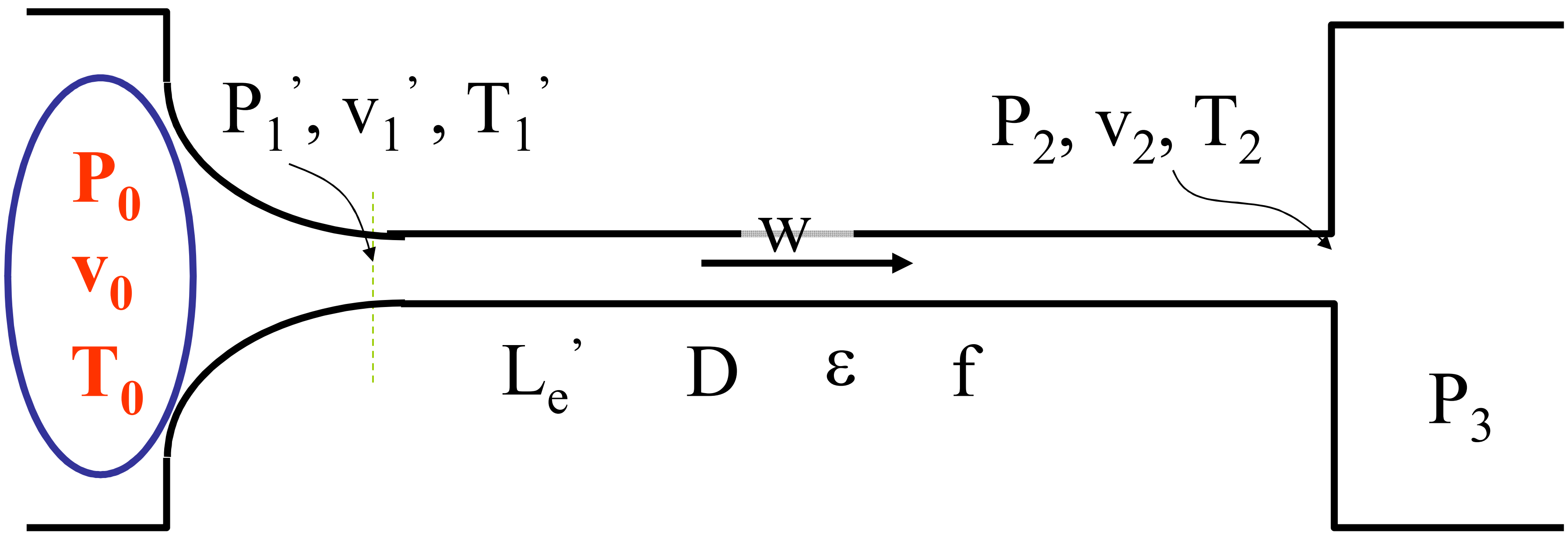


Además las características de flujo dependen de μ y γ

17 propiedades !!!

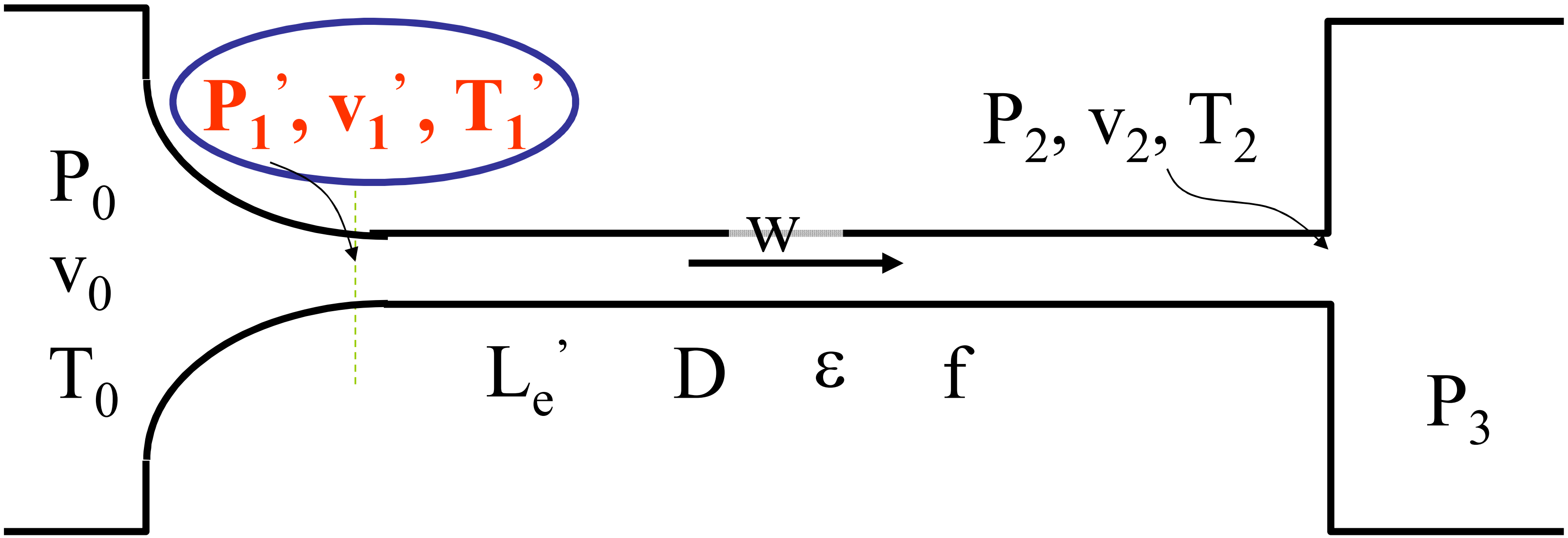


¿Cómo se relacionan estas variables?



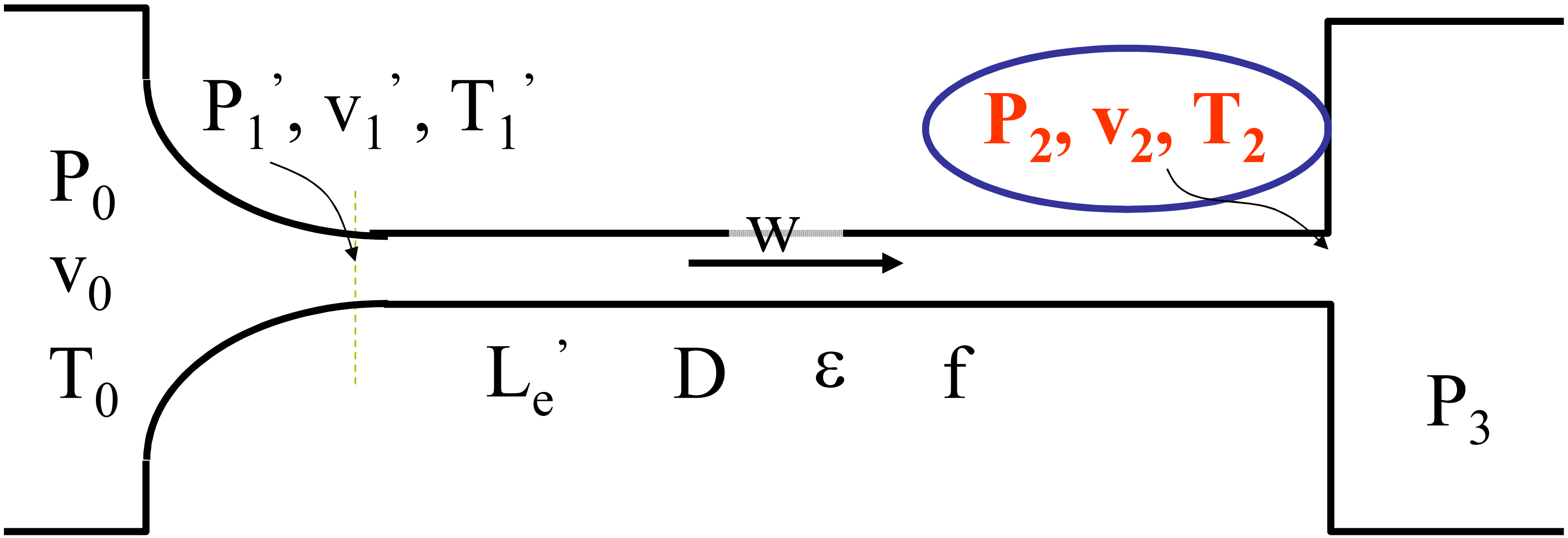
Existe una relación entre P_0, v_0, T_0

Total de relaciones 1



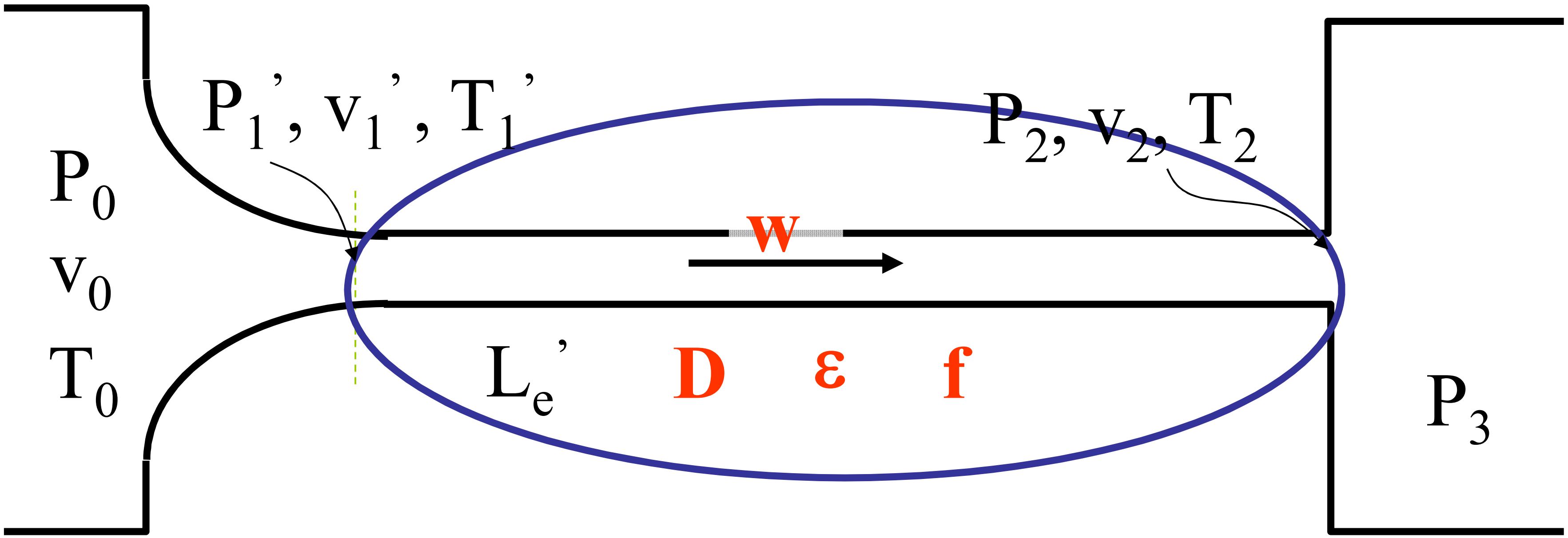
Existe una relación entre P_1', v_1', T_1'

Total de relaciones 2



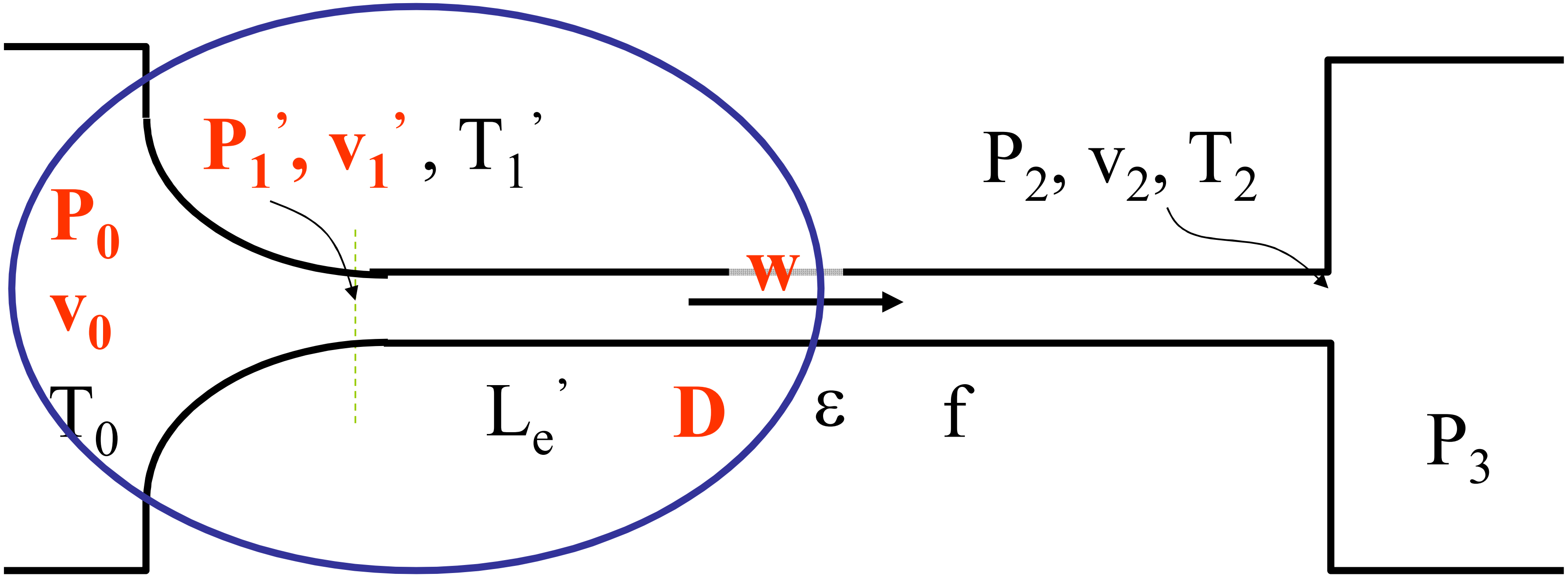
Existe una relación entre P_2, v_2, T_2

Total de relaciones 3



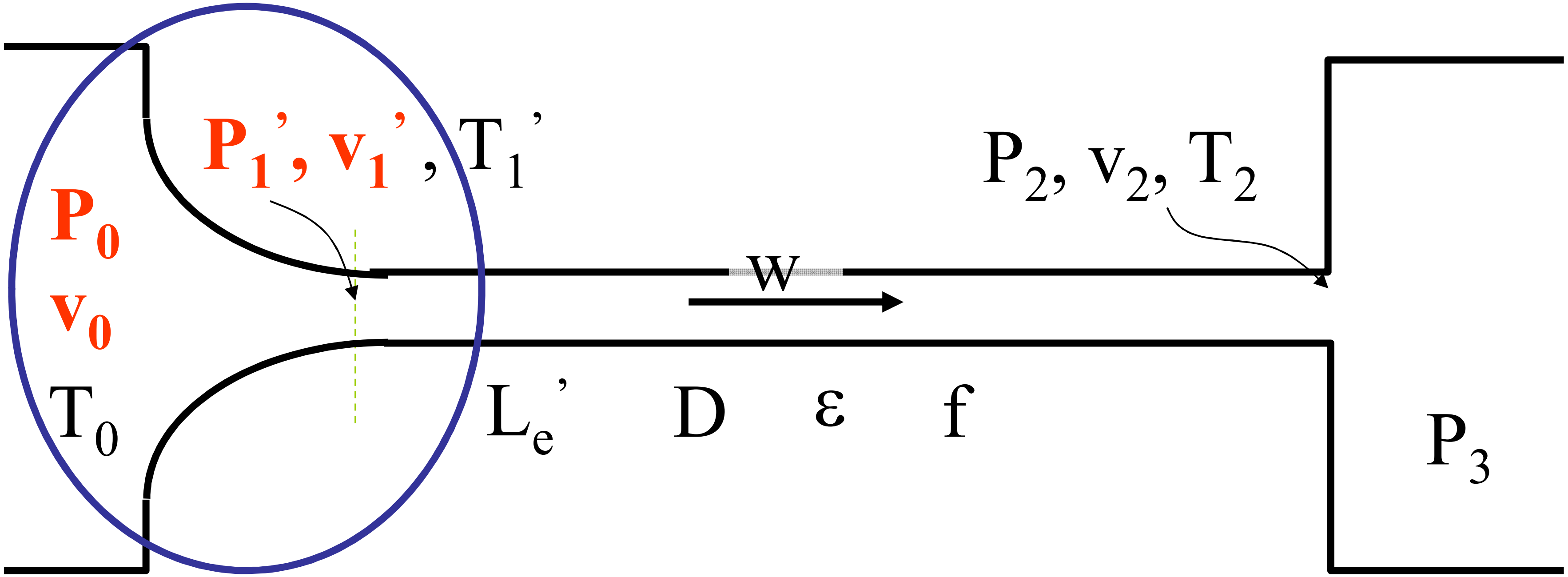
f depende de w, D, ε y la viscosidad

Total de relaciones 4



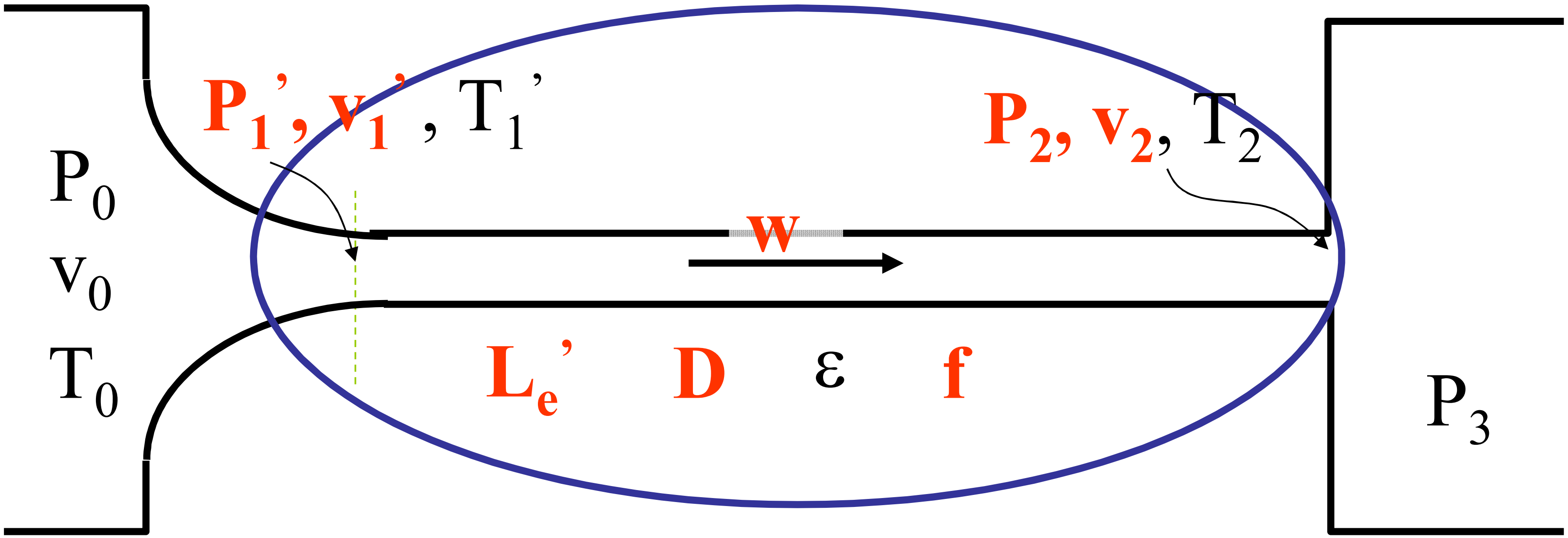
Ecuación de B.E.M. para la boquilla ideal

Total de relaciones 5



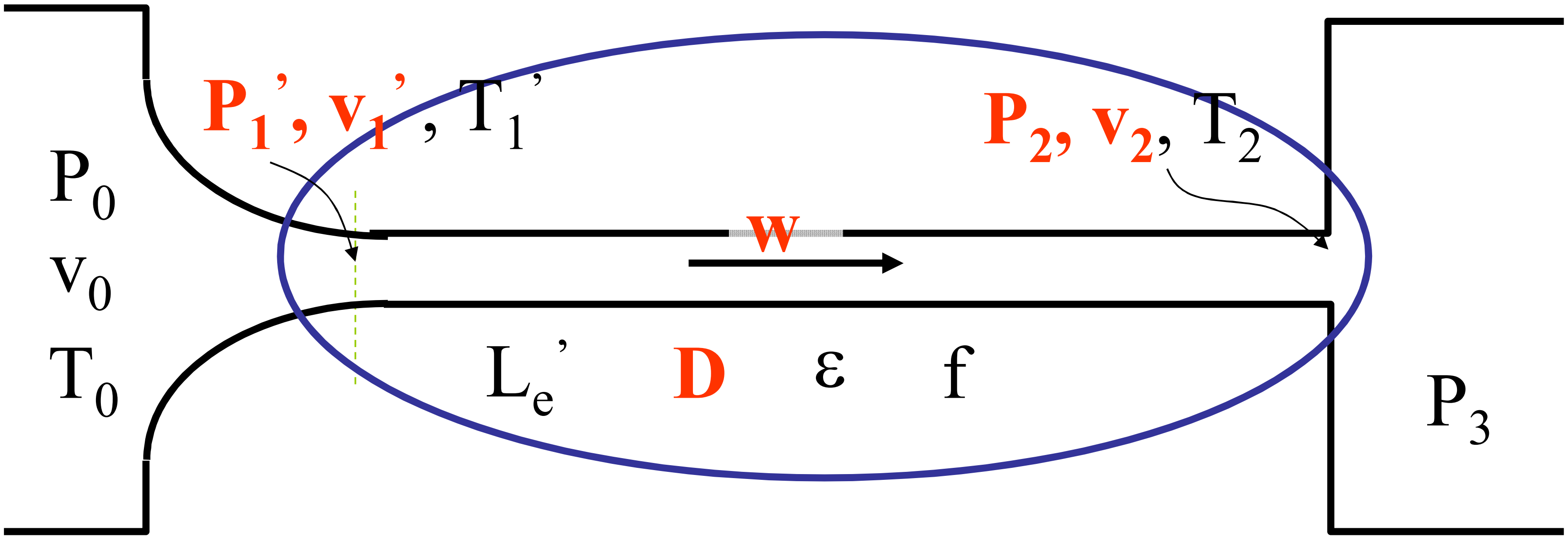
Relación entre P_0 , v_0 , P_1', v_1' proceso isentrópico

Total de relaciones 6



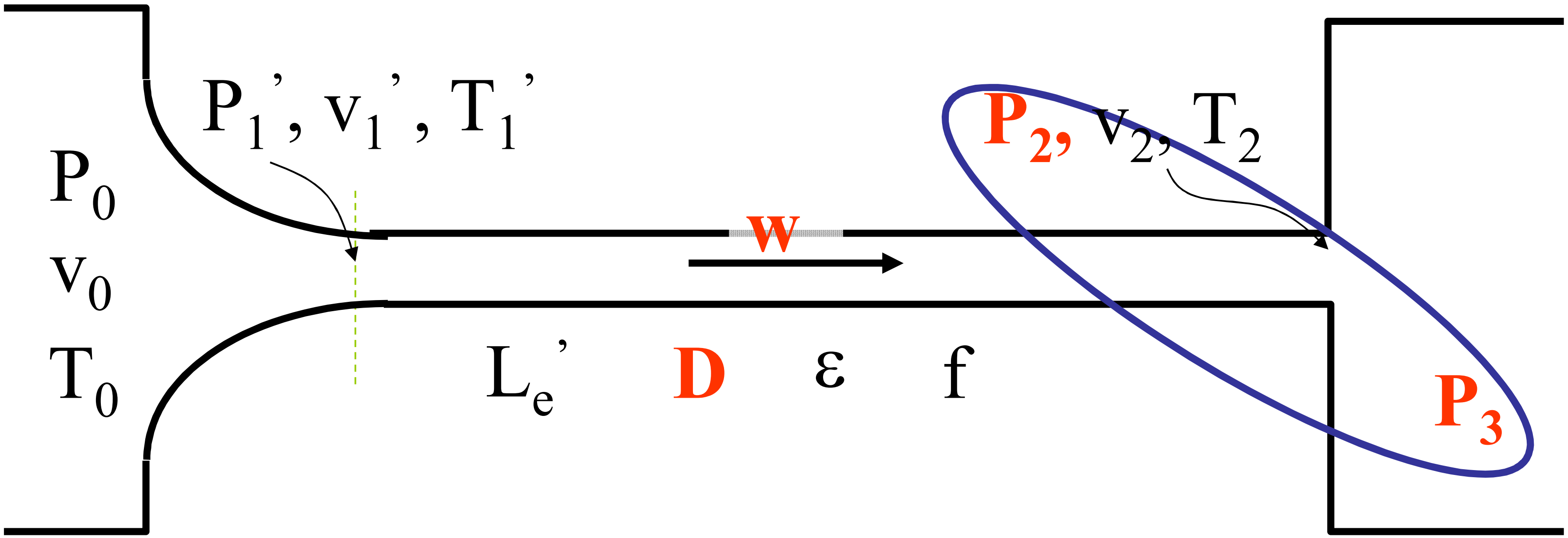
Ecuación de B.E.M. para la tubería

Total de relaciones 7



Ecuación de proceso para la tubería

Total de relaciones 8



Condición de descarga

Total de relaciones 9

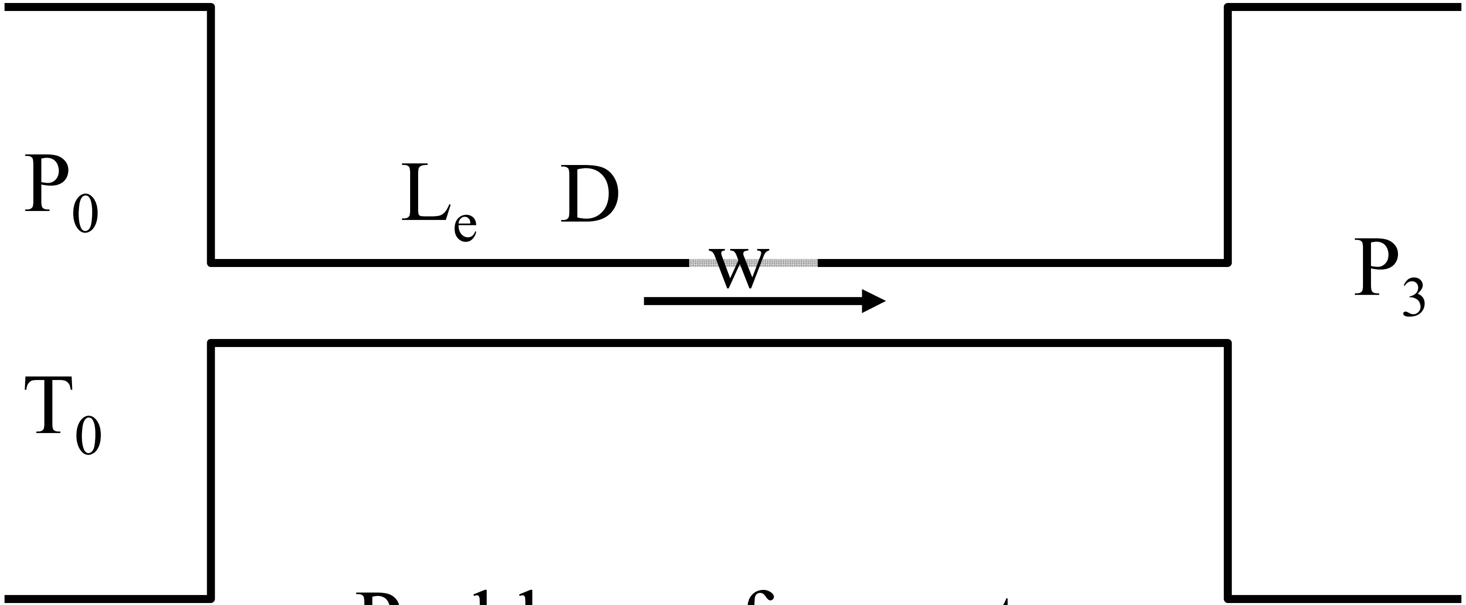
17 propiedades

Relaciones

Generalmente se conocen o estiman μ, ε , γ

Se necesitan como dato 5 propiedades

incógnitas
17
- 9
- 3
5



Problemas frecuentes:

L_e D P_0 T_0 P_3	w
L_e D P_0 T_0 w	P_3
P_0 P_3 D T_0 w	L_e
P_0 P_3 L_e T_0 w	D

Casos de mayor interés

Tipo de fluido

- Gas Ideal
- Fluido Real

Proceso térmico

- Adiabático
- Isotérmico
- Otros

Condiciones "aguas arriba"

- Reservorio (u = 0)
- Dentro del tubería

Resolución de problemas

por vía analítica

Gas Ideal - Flujo adiabático

ECUACIONES DEL PROCESO...

- Entrada a la tubería
- Proceso dentro de la tubería
- Condiciones en la descarga

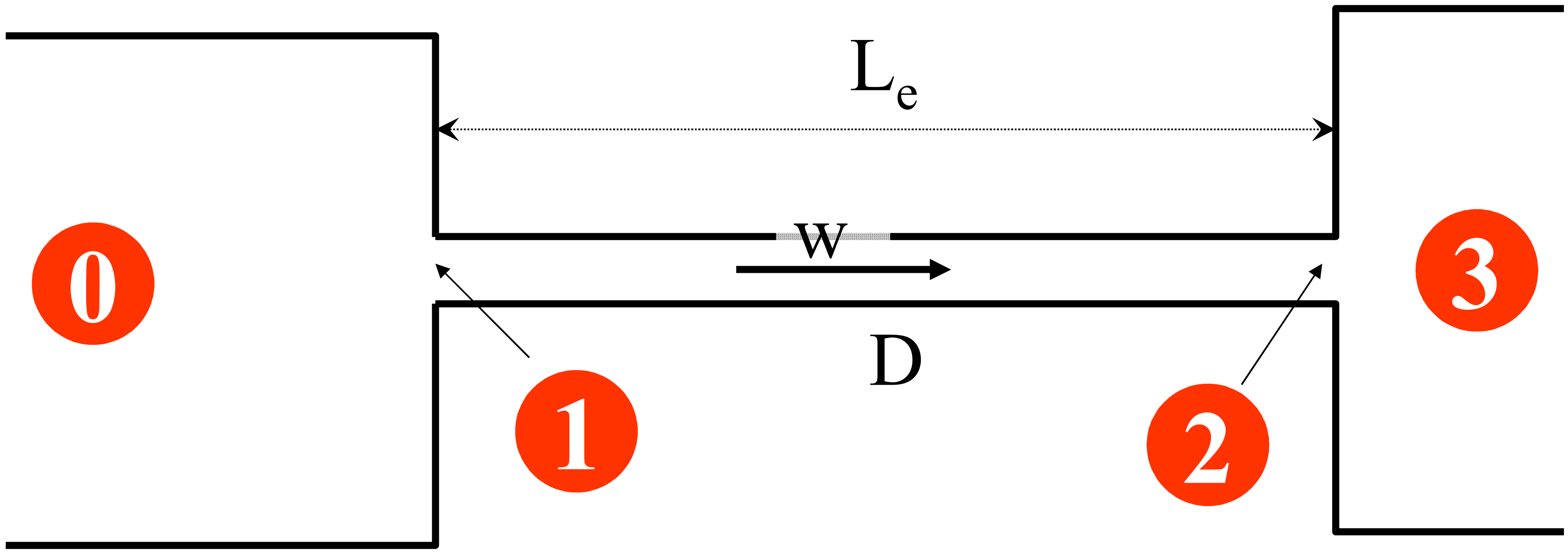
ENTRADA A LA TUBERÍA

Consideramos dos casos:

- El fluido entra a la tubería desde un reservorio estanco
- Las condiciones “aguas arriba” corresponden al interior del ducto

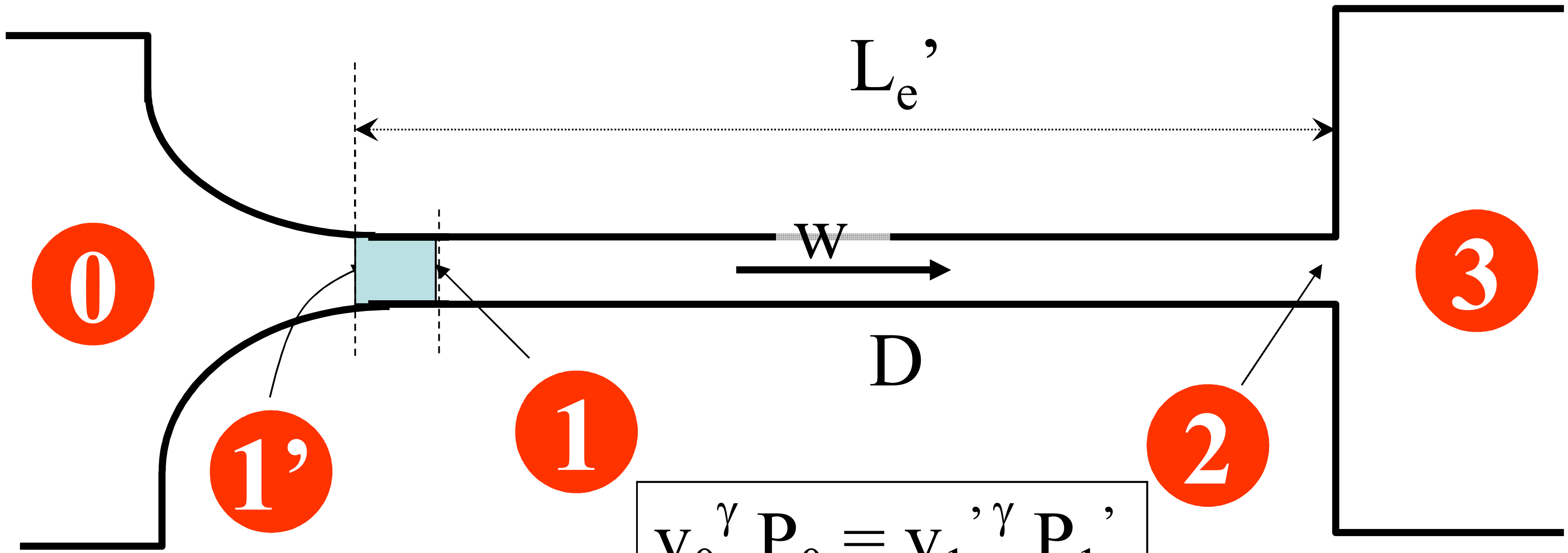
ENTRADA A LA TUBERÍA

CASO: Entrada desde reservorio estanco



ENTRADA A LA TUBERÍA

CASO: Entrada desde reservorio estanco



$$v_0^{\gamma} P_0 = v_1'^{\gamma} P_1'$$

$$\left(\frac{w}{A}\right)^2 \frac{v_1'}{P_1'} = \frac{2\gamma}{\gamma - 1}\left(\left(\frac{P_0}{P_1'}\right)^{(\gamma-1)/\gamma} - 1\right)$$

ENTRADA A LA TUBERÍA

CASO: Entrada desde reservorio estanco

$$\boxed{v_0^{\gamma} P_0 = v_1'^{\gamma} P_1'}$$

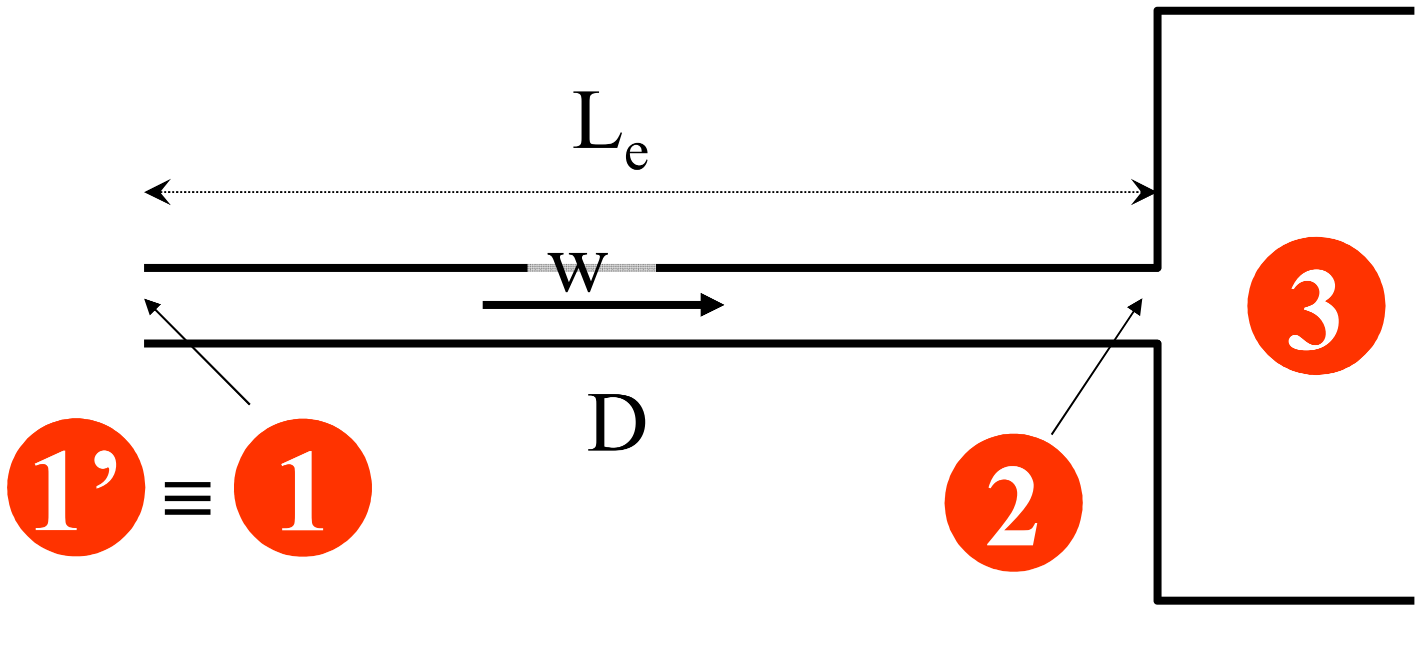
$$\boxed{\left(\frac{w}{A}\right)^2 \frac{v_1'}{P_1'} = \frac{2\gamma}{\gamma - 1}\left(\left(\frac{P_0}{P_1'}\right)^{(\gamma-1)/\gamma} - 1\right)}$$

... y agregamos el efecto de entrada a la L_e

ENTRADA A LA TUBERÍA

CASO: Condiciones aguas arriba son en el ducto

No existe entrada desde reservorio. Podemos considerar que los puntos 1' y 1 son el mismo.



PROCESO DENTRO DE LA TUBERÍA

Ecuaciones para flujo estacionario y adiabático en tuberías horizontales de sección constante:

$$\boxed{\left(\frac{\gamma - 1}{2\gamma} + \frac{P_1'}{v_1'}\left(\frac{A}{w}\right)^2\right)\left(1 - \left(\frac{v_1'}{v_2}\right)^2\right) - \frac{\gamma + 1}{\gamma}\ \ln\frac{v_2}{v_1'} = \frac{4\ f\ L_e}{D}}$$

$$\boxed{\frac{1}{2}\left(\frac{w}{A}\right)^2 v_2^{\ 2} + \frac{\gamma}{\gamma - 1}\ P_2\, v_2 = \frac{1}{2}\left(\frac{w}{A}\right)^2 v_1'^{\,2} + \frac{\gamma}{\gamma - 1} P_1' v_1'}$$

$$\boxed{f = f\,(W, L_e, D, \mu, \varepsilon\,)}$$

CONDICIONES EN LA DESCARGA

CASO: Flujo en condiciones subsónicas

$$\boxed{P_2 = P_3}$$

CASO: Condiciones sónicas

$$\boxed{(w/A)^2 = \gamma\, P_2 / v_2}$$

P_3 no queda determinado por las condiciones aguas arriba

ENTRADA A LA TUBERÍA

PROCESO DENTRO DE LA TUBERÍA

CONDICIONES EN LA DESCARGA

Desde reservorio

$$v_0^{\gamma} P_0 = v_1'^{\gamma} P_1'$$

$$\left(\frac{w}{A}\right)^2 \frac{v_1'}{P_1'} = \frac{2\gamma}{\gamma - 1}\left(\left(\frac{P_0}{P_1'}\right)^{(\gamma-1)/\gamma} - 1\right)$$

ó

En tubo

$$P_1' = P_1$$

$$v_1' = v_1$$

$$\left(\frac{\gamma - 1}{2\gamma} + \frac{P_1'}{v_1'}\left(\frac{A}{w}\right)^2\right)\left(1 - \left(\frac{v_1'}{v_2}\right)^2\right) - \frac{\gamma + 1}{\gamma} \ln\frac{v_2}{v_1'} = \frac{4 f L_e}{D}$$

$$\frac{1}{2}\left(\frac{w}{A}\right)^2 v_2^{\,2} + \frac{\gamma}{\gamma - 1} P_2 v_2 = \frac{1}{2}\left(\frac{w}{A}\right)^2 v_1'^{\,2} + \frac{\gamma}{\gamma - 1} P_1' v_1'$$

$$f = f\,(W, D, \mu, \varepsilon)$$

$$P_2 = P_3$$

Flujo subsónico

ó

Flujo sónico

$$(w/A)^2 = \gamma\, P_2 / v_2$$

Desde reservorio

$$v_0^{\gamma} P_0 = v_1'^{\gamma} P_1'$$

$$\left(\frac{w}{A}\right)^2 \frac{v_1'}{P_1'} = \frac{2\gamma}{\gamma - 1}\left[\left(\frac{P_0}{P_1'}\right)^{(\gamma-1)/\gamma} - 1\right]$$

ó

En tubo

$$P_1' = P_1$$

$$v_1' = v_1$$

SISTEMA DE 6 ECUACIONES NO LINEALES

$$\left(\frac{\gamma - 1}{2\gamma} + \frac{P_1'}{v_1'}\left(\frac{A}{w}\right)^2\right)\left(1 - \left(\frac{v_1'}{v_2}\right)^2\right) - \frac{\gamma + 1}{\gamma}\ln\frac{v_2}{v_1'} = \frac{4 f L_e}{D}$$

$$\frac{1}{2}\left(\frac{w}{A}\right)^2 v_2^{2} + \frac{\gamma}{\gamma - 1} P_2 v_2 = \frac{1}{2}\left(\frac{w}{A}\right)^2 v_1'^{2} + \frac{\gamma}{\gamma - 1} P_1' v_1'$$

$$f = f(W, D, \mu, \varepsilon)$$

$$P_2 = P_3$$

Flujo subsónico

ó

Flujo sónico

$$(w/A)^2 = \gamma P_2 / v_2$$

Desde reservorio

Desde reservorio

$$v_0^{\gamma} P_0 = v_1'^{\gamma} P_1' \quad \text{(a)}$$

$$\left(\frac{w}{A}\right)^2 \frac{v_1'}{P_1'} = \frac{2\gamma}{\gamma - 1}\left(\left(\frac{P_0}{P_1'}\right)^{(\gamma-1)/\gamma} - 1\right) \quad \text{(b)}$$

$$\left(\frac{\gamma - 1}{2\gamma} + \frac{P_1'}{v_1'}\left(\frac{A}{w}\right)^2\right)\left(1 - \left(\frac{v_1'}{v_2}\right)^2\right) - \frac{\gamma + 1}{\gamma} \ln \frac{v_2}{v_1'} = \frac{4 f L_e}{D} \quad \text{(c)}$$

$$\frac{1}{2}\left(\frac{w}{A}\right)^2 v_2^{\,2} + \frac{\gamma}{\gamma - 1} P_2 v_2 = \frac{1}{2}\left(\frac{w}{A}\right)^2 v_1'^{\,2} + \frac{\gamma}{\gamma - 1} P_1' v_1' \quad \text{(d)}$$

$$f = f\,(W, D, \mu, \varepsilon)$$

$$P_2 = P_3$$

Flujo subsónico

ó

Flujo sónico

$$(w/A)^2 = \gamma\, P_2 / v_2$$

Reducción de ecuaciones:para flujo **desde reservorio**:

Despejamos P_1' de (a) :

$$\boxed{P_1' = (v_0 / v_1')^{\gamma} P_0}$$

y sustituimos P_1' en (b), (c) y (d)

$$P_1' = (v_0 / v_1')^{\gamma} P_0 \quad \text{(a)}$$

Desde reservorio

$$\left(\frac{w}{A}\right)^2 \frac{v_1'}{P_1'} = \frac{2\gamma}{\gamma - 1}\left[\left(\frac{P_0}{P_1'}\right)^{(\gamma-1)/\gamma} - 1\right] \quad \text{(b)}$$

$$\left(\frac{\gamma - 1}{2\gamma} + \frac{P_1'}{v_1'}\left(\frac{A}{w}\right)^2\right)\left(1 - \left(\frac{v_1'}{v_2}\right)^2\right) - \frac{\gamma + 1}{\gamma}\ln\frac{v_2}{v_1'} = \frac{4 f L_e'}{D} \quad \text{(c)}$$

$$\frac{1}{2}\left(\frac{w}{A}\right)^2 v_2^{\,2} + \frac{\gamma}{\gamma - 1} P_2 v_2 = \frac{1}{2}\left(\frac{w}{A}\right)^2 v_1'^{\,2} + \frac{\gamma}{\gamma - 1} P_1' v_1' \quad \text{(d)}$$

$$f = f(W, D, \mu, \varepsilon)$$

$P_2 = P_3$

Flujo subsónico

ó

Flujo sónico

$(w/A)^2 = \gamma P_2 / v_2$

Reducción de ecuaciones para flujo **desde reservorio**:

Agrupamos variables físicas en variables adimensionales:

$v_0/v_1' \equiv r$ $\qquad$ $v_0/v_2 \equiv z$

$P_2/P_0 \equiv F$ $\qquad$ $(w/A)^2\,(v_0/P_0) \equiv X$

y reemplazamos

Desde reservorio

$$\boxed{\left(\frac{\gamma - 1}{2\gamma}\right) X = r^2 - r^{\gamma+1}} \quad (1)$$

$$\boxed{\left(\frac{\gamma - 1}{2\gamma} + \frac{r^{\gamma+1}}{X}\right)\left(1 - \left(\frac{z}{r}\right)^2\right) - \frac{\gamma + 1}{\gamma} \ln\frac{r}{z} = \frac{4\, f\, L_e'}{D}} \quad (2A)_R$$

$$\boxed{\left(\frac{\gamma - 1}{2\gamma}\right) X = \frac{r^{\gamma-1} - F/z}{1/z^2 - 1/r^2}} \quad (3A)_R$$

$$\boxed{f = f(W, D, \mu, \varepsilon)} \quad \text{(Moody)}$$

Flujo subsónico $\boxed{F = P_3/P_0}$ (4)

Flujo sónico $\boxed{X = \gamma\, z\, F}$ (4AS)

Sistema de ecuaciones reducidas para flujo adiabático de un gas ideal en ducto con entrada desde un reservorio

$$\boxed{\left(\frac{\gamma - 1}{2\gamma}\right) X = r^2 - r^{\gamma+1}} \quad \text{(1)}$$

o bien

$$\boxed{r = \left(1 - \frac{(\gamma - 1)X}{2\gamma r^2}\right)^{\left[1/(\gamma - 1)\right]}} \quad \text{(1')}$$

De $(2A)_R$ y (1)

$$\boxed{\frac{r^2 - z^2}{X} - \frac{\gamma + 1}{\gamma} \ln \frac{r}{z} = \frac{4 f L_e'}{D}} \quad (2A')_R$$

De $(3A)_R$ y (1)

$$\boxed{\left(\frac{\gamma - 1}{2\gamma}\right) X = z^2 - F z} \quad (3A')_R$$

$$\boxed{f = f(W, D, \mu, \varepsilon)}$$

(Moody)

Flujo subsónico

$$\boxed{F = P_3/P_0} \quad (4)$$

Flujo sónico

$$\boxed{X = \gamma z F} \quad (4AS)$$

Sistema de ecuaciones reducidas para flujo adiabático de un gas ideal en ducto con entrada desde un reservorio

Simplificaciones bajo condiciones sónicas

De $(3A')_R$ y $(4AS)$

$$\boxed{\left(\frac{\gamma + 1}{2\,\gamma}\right) X = z^2} \qquad (3AS)_R$$

Definiendo

$$U \equiv \left(\frac{2\,\gamma\; r^2}{(\gamma + 1)\; X}\right)$$

de $(2A')_R$ y $(3AS)_R$ se obtiene:

$$\boxed{U = \frac{8\,\gamma\;\; f\;\; L_e}{(\gamma + 1)\; D} + 1\;\; + ln\; U} \qquad (2AS)_R$$

y de (1) y $(3AS)_R$ se llega a:

$$\boxed{r = \left(1 - \frac{(\gamma - 1)}{(\gamma + 1)\, U}\right)^{\left[1/(\gamma - 1)\right]}} \qquad (1'')$$

Datos de entrada en tubería

En tubo

$$P_1' = P_1$$

$$v_1' = v_1$$

$$\left(\frac{\gamma - 1}{2\gamma} + \frac{P_1'}{v_1'}\left(\frac{A}{w}\right)^2\right)\left(1 - \left(\frac{v_1'}{v_2}\right)^2\right) - \frac{\gamma + 1}{\gamma}\ln\frac{v_2}{v_1'} = \frac{4\,f\,L_e}{D}$$

$$\frac{1}{2}\left(\frac{w}{A}\right)^2 v_2^{\,2} + \frac{\gamma}{\gamma - 1}P_2 v_2 = \frac{1}{2}\left(\frac{w}{A}\right)^2 v_1'^{\,2} + \frac{\gamma}{\gamma - 1}P_1' v_1'$$

$$f = f\,(W, D, \mu, \varepsilon)$$

$$P_2 = P_3$$

Flujo subsónico

ó

Flujo sónico

$$(w/A)^2 = \gamma\, P_2 / v_2$$

Reducción de ecuaciones:para flujo con datos **en tubería**:

Agrupamos variables físicas en variables adimensionales:

$$v_1/v_2 \equiv z$$

$$P_2/P_1 \equiv F \qquad (w/A)^2 (v_1/P_1) \equiv X$$

y reemplazamos

Sistema de ecuaciones reducidas para flujo adiabático de un gas ideal con datos en ducto

$$\left(\frac{\gamma - 1}{2\gamma} + \frac{1}{X}\right)\left(1 - z^2\right) - \frac{\gamma + 1}{\gamma} \ln \frac{1}{z} = \frac{4 f L_e'}{D} \qquad (2A)_D$$

$$\left(\frac{\gamma - 1}{2\gamma}\right) X = \frac{z^2 - F z}{1 - z^2} \qquad (3A)_D$$

$$f = f(W, D, \mu, \varepsilon) \qquad \text{(Moody)}$$

Flujo subsónico

$$F = P_3/P_1 \qquad (4)$$

Flujo sónico

$$X = \gamma z F \qquad (4AS)$$

Sistema de ecuaciones reducidas para flujo adiabático de un gas ideal dentro de ducto

Simplificaciones bajo condiciones sónicas

De (4AS) $X = \gamma\, z\, F$ y $(3A)_D$

$$\left(\frac{\gamma + 1}{2\,\gamma}\right) X = \left(\frac{z^2}{1 - \left(\frac{\gamma - 1}{\gamma + 1}\right) z^2}\right) \qquad (3AS)_D$$

A su vez eliminando z entre $(2A)_D$ y (4AS) se obtiene:

$$\frac{1}{X} - \frac{1}{\gamma} - \left(\frac{\gamma + 1}{2\,\gamma}\right) \ln\left(\left(\frac{\gamma - 1}{\gamma + 1}\right) + \left(\frac{2\,\gamma}{(\gamma + 1) X}\right)\right) = \frac{4\, f\, L_e'}{D} \qquad (2AS)_D$$

Gas Ideal - Flujo isotérmico

El flujo isotérmico es una aproximación bastante buena para los casos en que las velocidades son bajas, las tuberías muy largas, no aisladas térmicamente, y sin calentamiento o enfriamiento forzado.

De todas maneras, el ingreso a la tubería desde un reservorio es aproximado mejor por un proceso adiabático.

Gas Ideal - Flujo isotérmico

Procediendo de la misma manera que para el caso de flujo adiabático se llega al siguiente sistema de ecuaciones reducidas...

Sistema de ecuaciones reducidas para flujo isotérmico de un gas ideal en ducto con entrada desde un reservorio

$$\boxed{\left(\frac{\gamma-1}{2\gamma}\right) X = r^2 - r^{\gamma+1}} \quad (1)$$

o bien

$$\boxed{r = \left(1 - \frac{(\gamma-1)X}{2\gamma r^2}\right)^{\left[1/(\gamma-1)\right]}} \quad (1')$$

$$\boxed{\left(\frac{r^2 - z^2}{X}\right) r^{\gamma-1} - 2 \ln\frac{r^\gamma}{z} = \frac{4 f L_e'}{D}} \quad (2I')_R$$

$$\boxed{F = z\, r^{\gamma-1}} \quad (3I)_R$$

$$\boxed{f = f(W, D, \mu, \varepsilon)} \quad \text{(Moody)}$$

Flujo subsónico $\boxed{F = P_3/P_0}$ (4)

FISICAMENTE NO FACTIBLE

Flujo sónico $\boxed{X = z\,F}$ (4IS)

Sistema de ecuaciones reducidas para flujo isotérmico de un gas ideal dentro de ducto

$$\boxed{\left(\frac{1 - z^2}{X}\right) - 2 \ln \frac{1}{z} = \frac{4 f L_e'}{D}} \qquad (2I')_D$$

$$\boxed{z = F} \qquad (3I)_D$$

$$\boxed{f = f\,(W, D, \mu, \varepsilon)} \qquad \text{(Moody)}$$

Flujo subsónico

$$\boxed{F = P_3/P_1} \qquad (4)$$

Flujo sónico

$$\boxed{X = \gamma\, z\, F} \qquad (4c)$$

FISICAMENTE NO FACTIBLE

Resolución de problemas por Diagramas de Lapple – Levenspiel

Para Flujo adiabático de gas ideal
por un ducto horizontal de sección constante
con entrada desde un reservorio

Sistema de ecuaciones reducidas para flujo adiabático de un gas ideal en ducto con entrada desde un reservorio

$$\boxed{\left(\frac{\gamma-1}{2\gamma}\right) X = r^2 - r^{\gamma+1}} \qquad (1)$$

$$\boxed{\frac{r^2 - z^2}{X} - \frac{\gamma+1}{\gamma} \ln \frac{r}{z} = \frac{4 f L_e'}{D}} \qquad (2A')_R$$

N

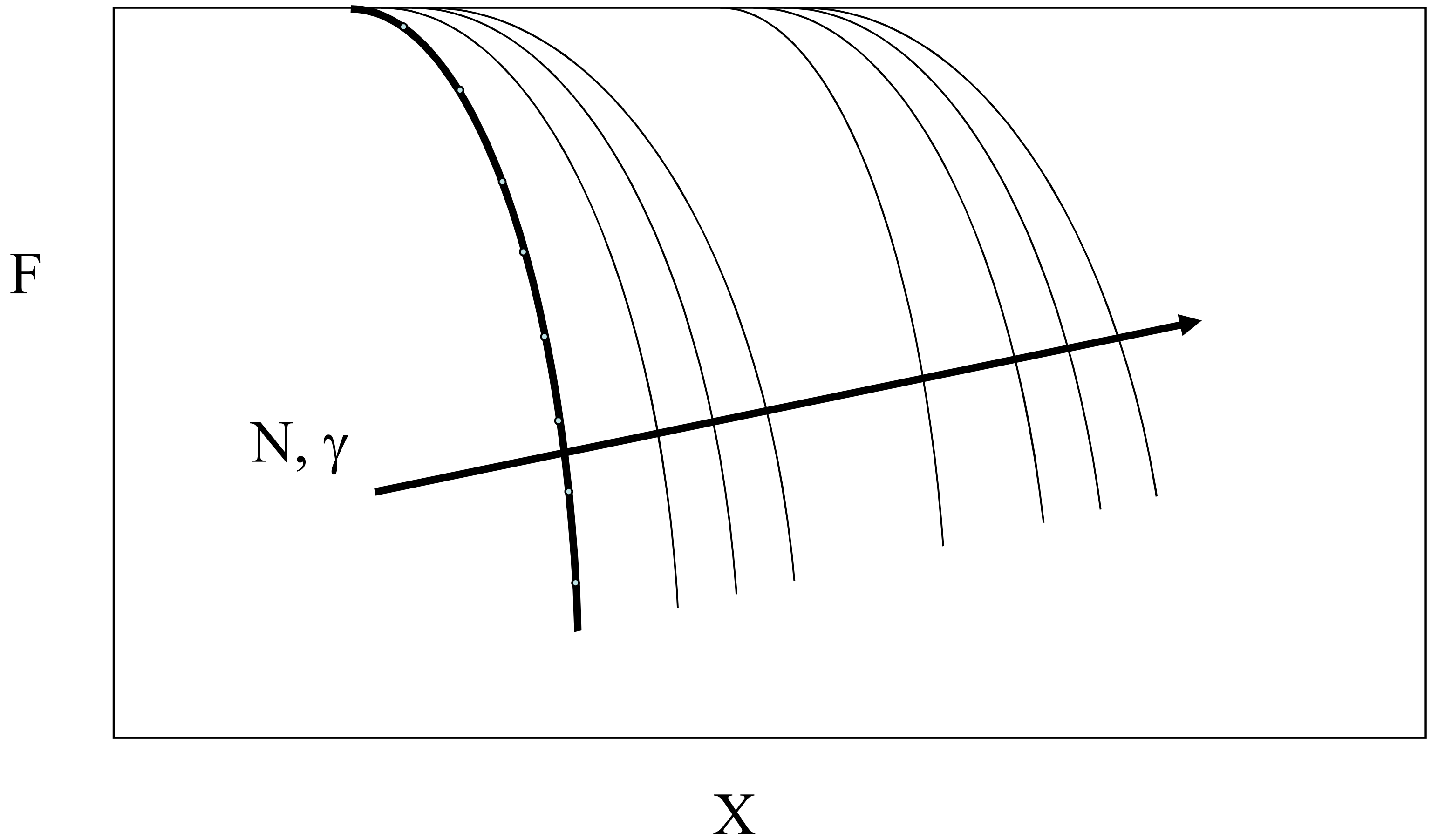
$$\boxed{\left(\frac{\gamma-1}{2\gamma}\right) X = z^2 - F z} \qquad (3A')_R$$

3 ecuaciones con 6 variables (**N**, **γ**, **F**, **X**, **r** y **z**) Para que el sistema quede determinado hay que fijar 3 variables ej.**N**, **γ** y **F**

Si el flujo es sónico se agrega (4AS) y alcanza con fijar 2 variables. ej.N y γ.

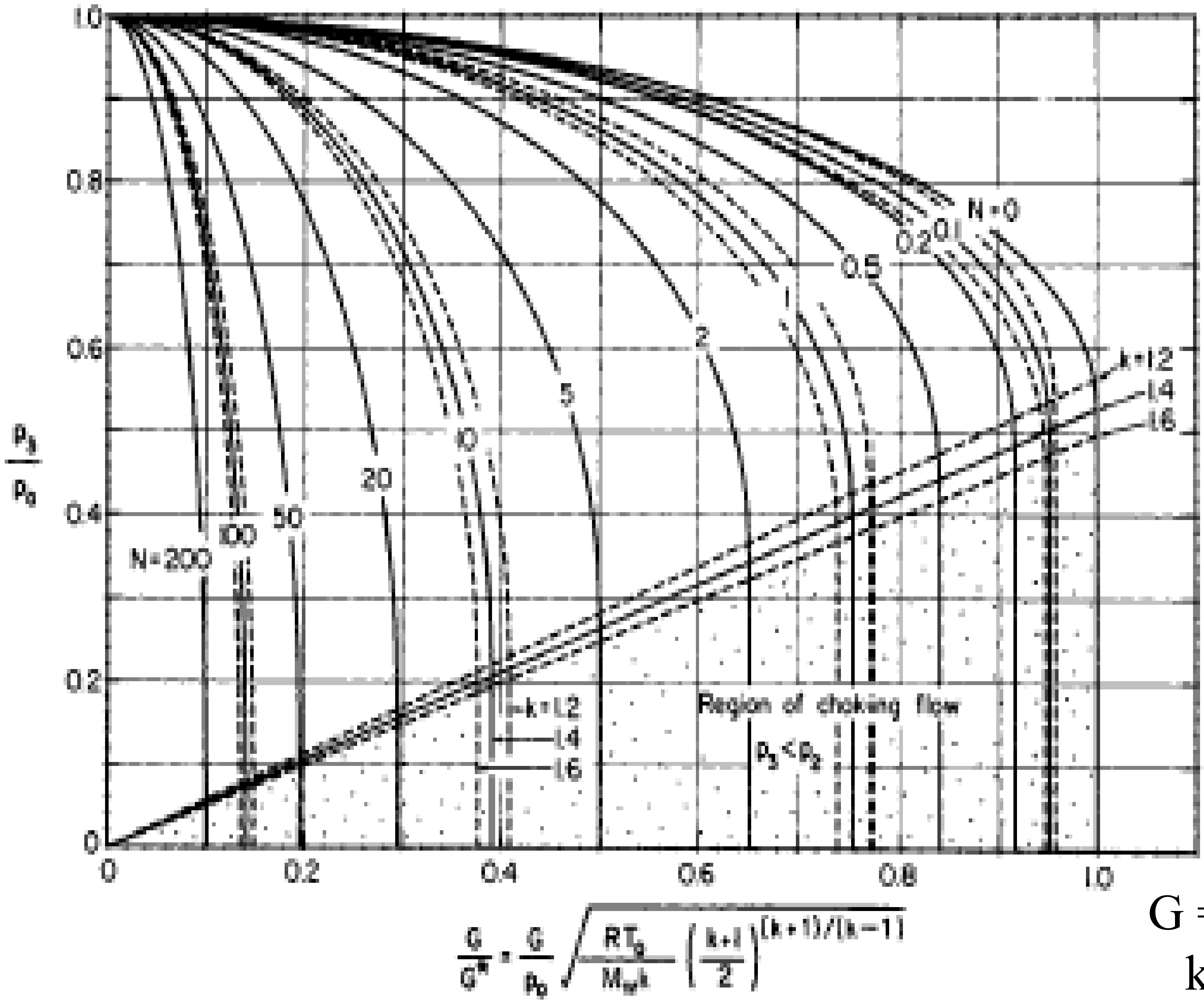
Flujo subsónico $\boxed{F = P_3/P_0}$ (4)

Flujo sónico $\boxed{X = \gamma z F}$ (4AS)



Cada punto del gráfico da la solución **X**, para los valores fijados de **F**, **γ** y **N**. Cada curva corresponde a un par de valores **N**,**γ**.

Para condiciones subsónicas $F=P_3/P_0$ y para condiciones sónicas X solo depende de **γ** y **N**



(a)

$G = w/A$

$k = \gamma$

P_w / P_0 = función de (γ, N)

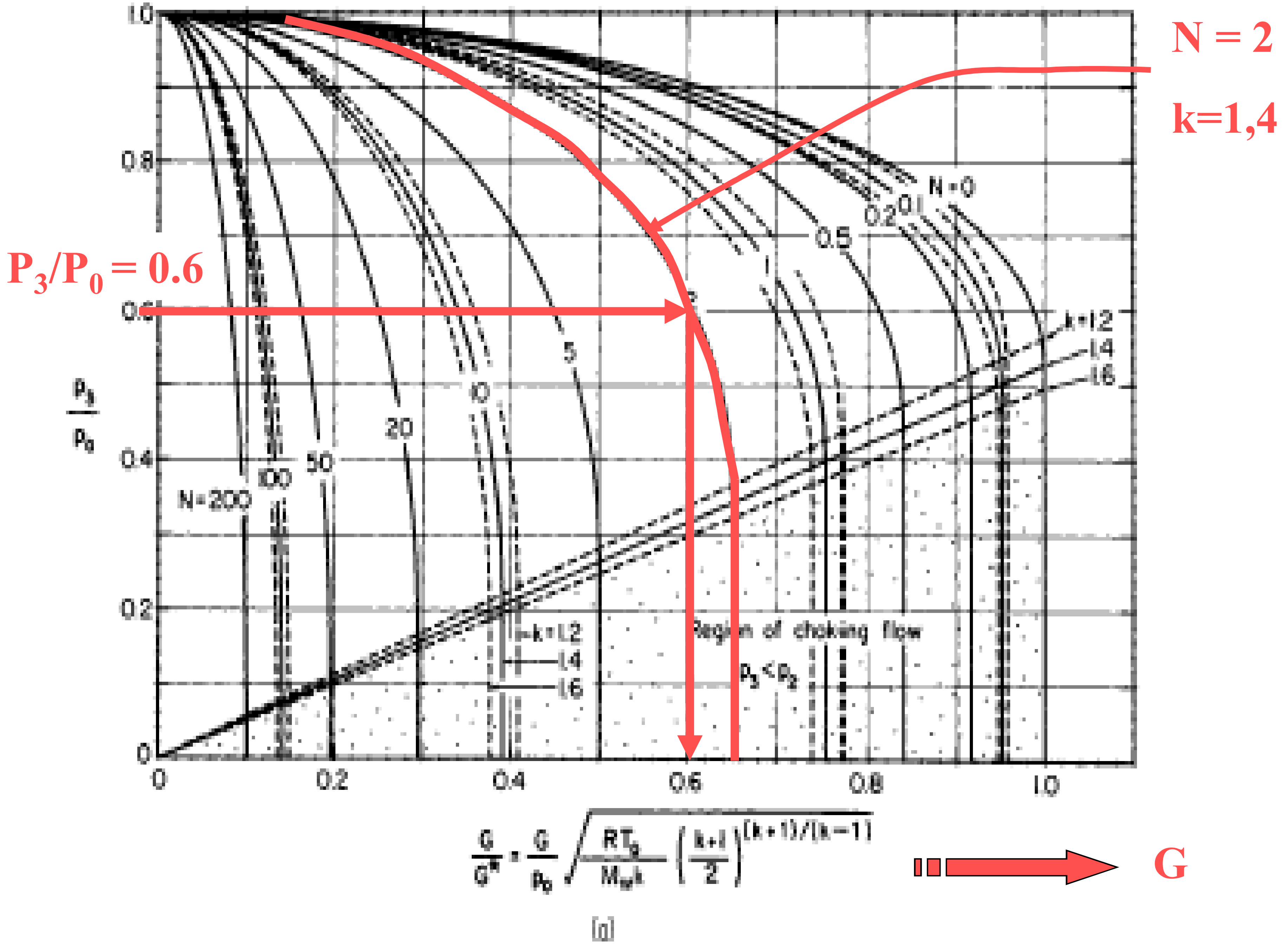
Ejemplo:

- Se purga hacia la atmósfera un tanque de aire a 20ºC, comprimido a 0.68bar manométricos a través de una conducción de Le’=5m, D=5cm y e/D=0.001. (γ_{aire}=1.4)
- Determine el flujo másico de salida y la presión en la punta de la tubería, asumiendo que la presión en el tanque se mantiene constante.

e/D=.001. Entonces si hay RCT 4f=0.02

$$N = 4fLe'/D = 0.02x5/0.05 = 2$$

$$P_3/P_0 = 1.01/(0.68+1.01) = 0.6$$



N = 2
k=1,4
P3/P0 = 0.6
N=0
0.1
0.2
0.5
5
10
20
50
100
N=200
k=1.2
1.4
1.6
Region of choking flow
P3<P2
G/G* = G/P0 √(RT0/(Mw k) ((k+1)/2)^((k+1)/(k-1)))
G
(a)

P2 = P3 = 1.01×10^5 Pa (porque el flujo es subsónico)

$$G/G^* = 0.6 \Longrightarrow G = \frac{0.6 \times P_0}{\sqrt{\dfrac{RT_0}{PM\gamma}\left(\dfrac{\gamma+1}{2}\right)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)}}}$$

$$\left.\begin{array}{l} P_0 = 1.69 \times 10^5 \text{ Pa} \\ R = 8.314 \text{ m}^3\text{.Pa/(mol.K)} \\ T_0 = 293\text{K} \\ PM = 28.8 \times 10^{-3} \text{ kg/mol} \\ \gamma = 1.4 \end{array}\right\} G = w/A = 238 \text{ kg/(s.m}^2\text{)}$$

$$A = 1.96 \times 10^{-3} \text{ m2} \Longrightarrow \color{red}{w = 0.47 \text{ kg/s}}$$

$$\left.\begin{array}{r} Re = u\rho D/\mu = w/A.D/\mu = 6.6 \times 10^5 \\ e/D = 0.001 \end{array}\right\} 4f = 0.02 \checkmark$$

Ejemplo:

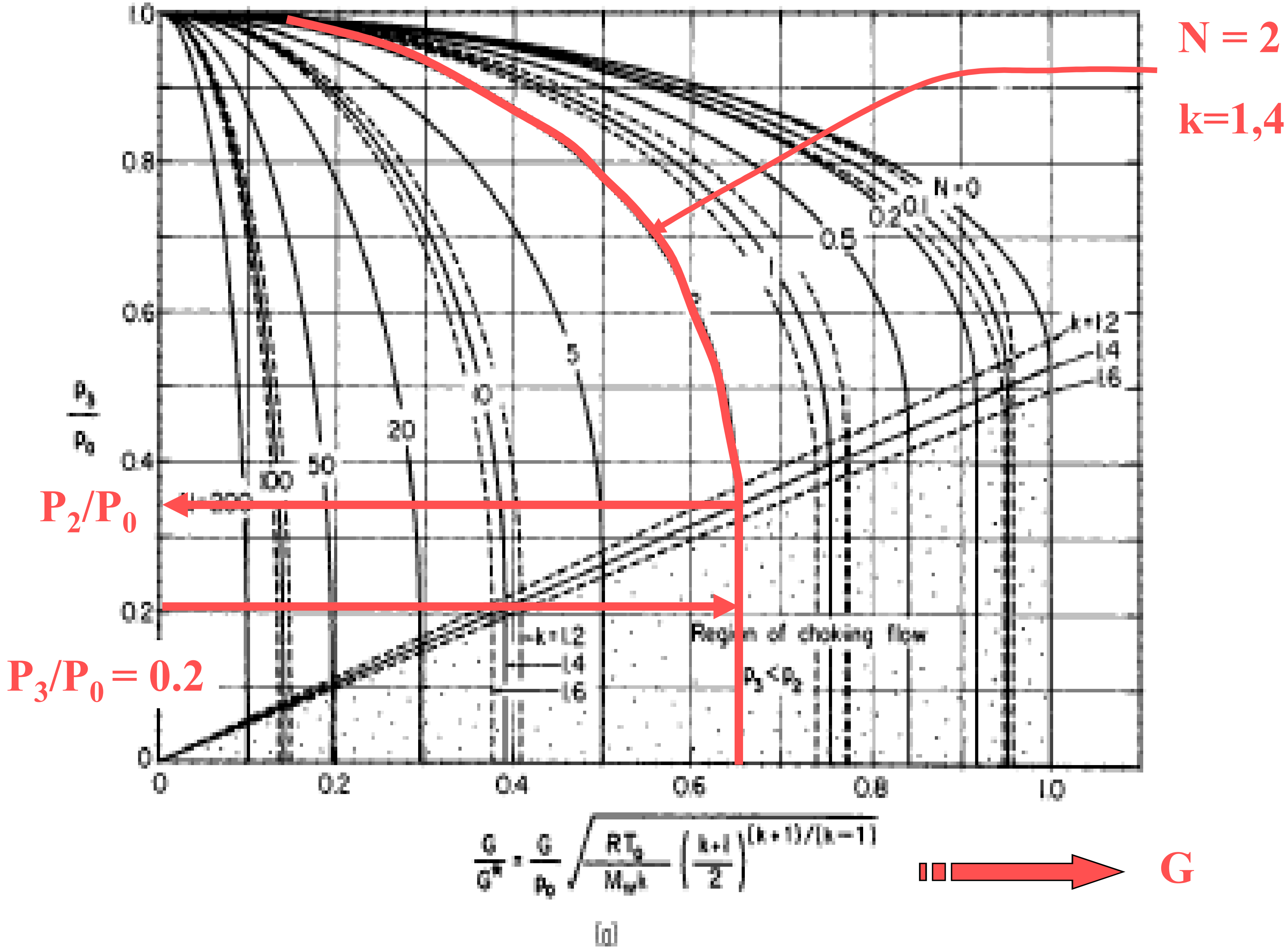
- Para el caso anterior determine el flujo masa y la presión en la punta de la tubería, asumiendo que ahora la presión en el tanque esta a 4 atmósfera manométricas.

Como en el caso anterior:

e/D=.001. Entonces si hay RCT 4f=0.02

$$N = 4fL/D = 0.02x5/0.05 = 2$$

Pero ahora $P_3/P_0 = 1/5 = 0.2$



N = 2
k=1,4
P_2/P_0
$P_3/P_0 = 0.2$
G
N=0
0.1
0.2
0.5
5
10
20
50
100
N=200
k=1.2
1.4
1.6
Region of choking flow
$p_3 < p_2$
$\frac{P_3}{P_0}$
$\frac{G}{G^*} = \frac{G}{P_0}\sqrt{\frac{RT_0}{M_w k}\left(\frac{k+1}{2}\right)^{(k+1)/(k-1)}}$
(a)

$P_3 < P_2 = 0.34 x P_0 \Longrightarrow P_2 = 1.72x10^5$ Pa

$$G/G^* = 0.65 \Longrightarrow G = \frac{0.65 \text{ x } P_0}{\sqrt{\dfrac{RT_0}{PM\gamma}\left(\dfrac{\gamma+1}{2}\right)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)}}}$$

$$\left.\begin{array}{l} P_0 = 5.05x10^5 \text{ Pa} \\ R = 8.314 \text{ m}^3\text{.Pa/(mol.K)} \\ T_0 = 293\text{K} \\ PM = 28.8x10^{-3} \text{ kg/mol} \\ \gamma = 1.4 \end{array}\right\} G = w/A = 773 \text{ kg/(s.m}^2\text{)}$$

A = 1.96x10-3 m2 $\Longrightarrow$ w = 1.51 kg/s

Ejemplo:

- Para el caso anterior determine cual debería ser la presión manométrica en el tanque, para que el flujo masa sea de 0,8 kg/s

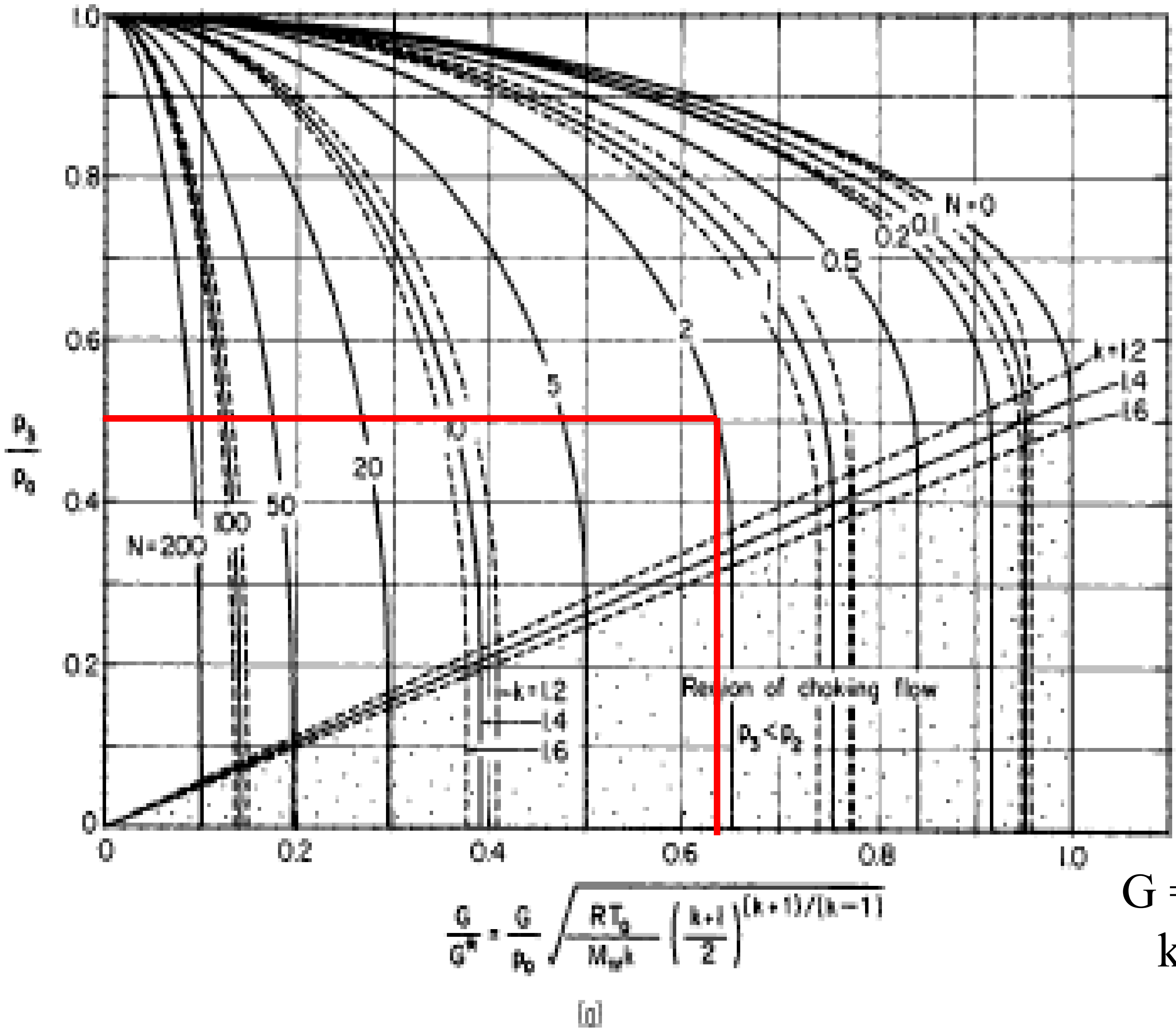
Como en el caso anterior:

e/D=.001. Entonces si hay RCT 4f=0.02

$$N = 4fL/D = 0.02x5/0.05 = 2$$

Pero ahora P_3/P_0 ?

Supongo P_0	P_2/P_0	G/G^*	P_0



N=0
0.1
0.2
0.5
1
2
5
10
20
50
100
N=200
k=1.2
1.4
1.6
Region of choking flow
$p_3 < p_2$
$\frac{p_2}{p_0}$
$\frac{G}{G^*} = \frac{G}{p_0}\sqrt{\frac{RT_0}{M_w k}\left(\frac{k+1}{2}\right)^{(k+1)/(k-1)}}$
(a)

G = w/A

k = γ

$$\text{Supongo } P_0 \Longrightarrow P_2/P_0 \Longrightarrow G/G^* \Longrightarrow P_0$$

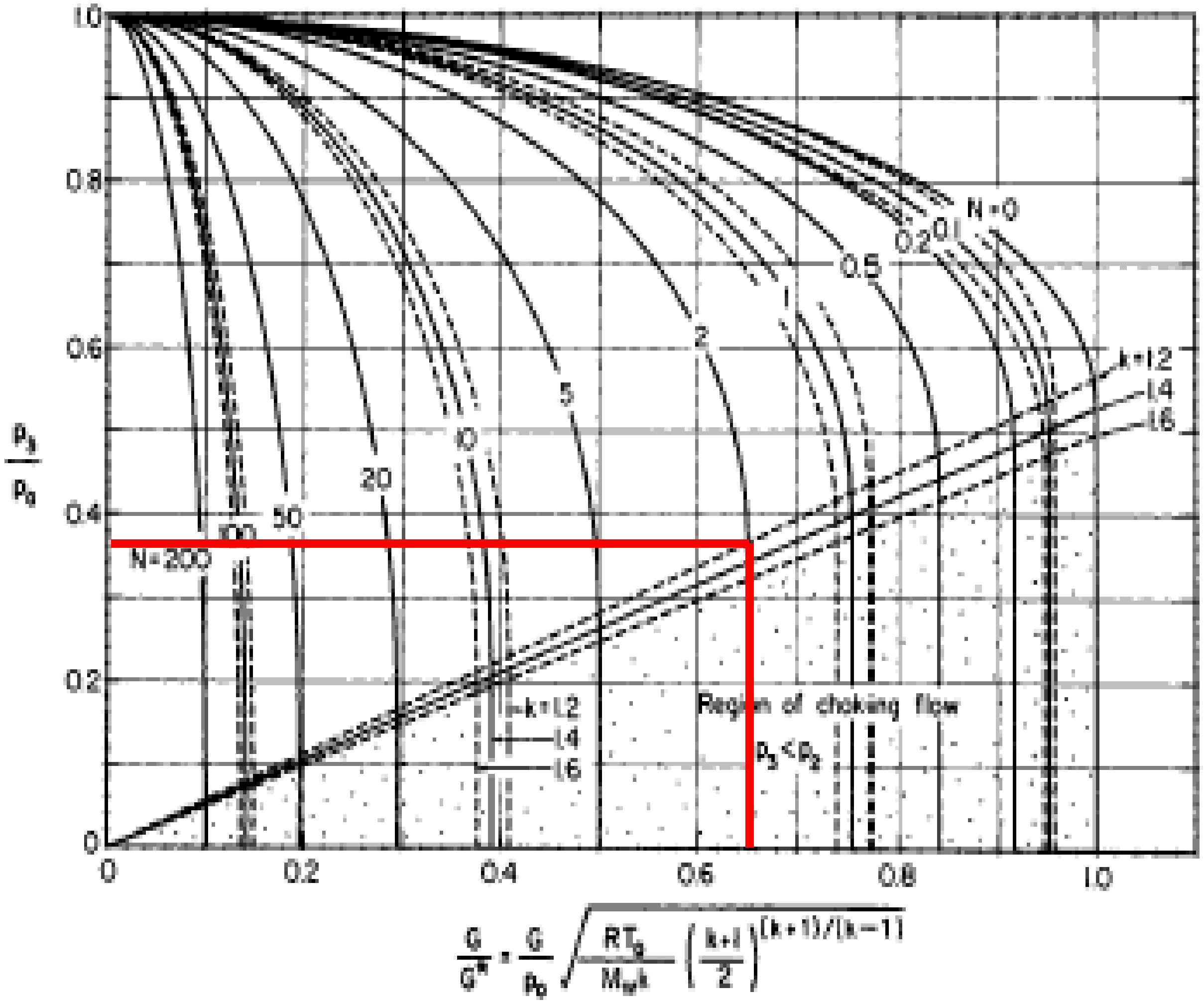
$$2\times10^5 \qquad 0{,}50 \qquad 0{,}64 \qquad ?$$

Primera iteración:

$$G/G^*=0.64 \Longrightarrow P_0 = \frac{G}{0.64}\sqrt{\frac{RT_0}{PM\,\gamma}\left(\frac{\gamma+1}{2}\right)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)}}$$

$$\left.\begin{array}{l} G = w/A = \dfrac{0{,}8 \text{ kg/s}}{1.96\times10^{-3}\text{ m}^2} \\ R = 8.314 \text{ m}^3\text{.Pa/(mol.K)} \\ T_0 = 293 \text{ K} \\ PM = 28.8\times10^{-3} \text{ kg/mol} \\ \gamma = 1.4 \end{array}\right\} \Longrightarrow P_0 = 2{,}71\times10^5 \text{Pa}$$

Supongo P_0 $\Rightarrow$	P_2/P_0 $\Rightarrow$	G/G^* $\Rightarrow$	P_0
$2x10^5$	0,50	0,64	$2,71x10^5$
$2,71x10^5$	0,37	?	?



Supongo P_0	$\Rightarrow P_2/P_0$	$\Rightarrow G/G^*$	$\Rightarrow P_0$
$2x10^5$	0,50	0,64	$2,71x10^5$
$2,71x10^5$	0,37	0,65	?

Segunda iteración:

$$G/G^*=0.65 \Longrightarrow P_0 = \frac{G}{0.65}\sqrt{\frac{RT_0}{PM\gamma}\left(\frac{\gamma+1}{2}\right)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)}}$$

$$\left.\begin{array}{l} G = w/A = \dfrac{0,8\ kg/s}{1.96x10^{-3}\ m^2} \\ R = 8.314\ m^3.Pa/(mol.K) \\ T_0 = 293\ K \\ PM = 28.8x10^{-3}\ kg/mol \\ \gamma = 1.4 \end{array}\right\} \Longrightarrow \begin{array}{l} P_0 = 2,67x10^5 Pa \\ P_0 = 1,67\ barg \end{array}$$

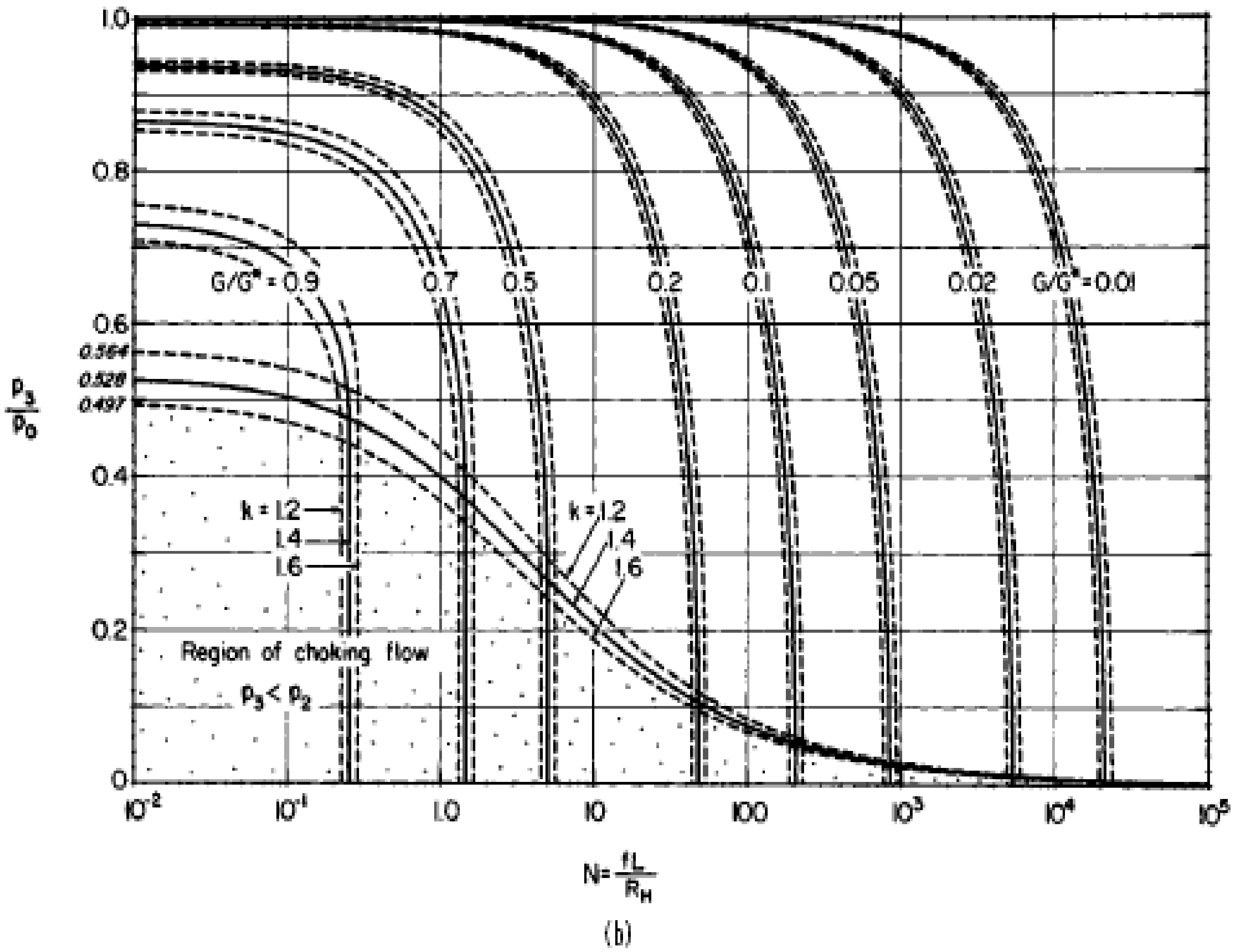


FIG. 6-21 Design charts for adiabatic flow of gases; (*a*) useful for finding the allowable pipe length for given flow rate; (*b*) useful for finding the discharge rate in a given piping system. (*From Levenspiel*, Am. Inst. Chem. Eng. J., *23, 402* [*1977*].)

Preguntas de autoevaluación:

1) ¿Cuál es la utilidad de las variables reducidas?

2) ¿Cuál es el dominio de cada una de ellas?

3) Si se alcanza el flujo sónico ¿Es posible calcular el flujo másico sin iterar entre ecuaciones? ¿Cómo?

4) ¿Qué relación existe entre el Sistema de ecuaciones reducidas para flujo adiabático de un gas ideal en ducto con entrada desde un reservorio y el Diagrama de Lapple?

5) ¿Es posible aplicar los sistema de ecuaciones reducidas si el punto 2 no está en el extremo de la tubería?