

# SIMULACIÓN DE LA EXTRACCIÓN DE PETRÓLEO Y GAS NATURAL MEDIANTE INYECCIÓN CONTINUA DE GAS

Alejandro Cabero Barba  
C/ Juan José Cuadros 5, bajo (34004) Palencia  
alejandrocaberobarba@hotmail.com

## Resumen

*El petróleo es una sustancia orgánica formada principalmente por carbono e hidrógeno junto con impurezas como nitrógeno, azufre y oxígeno.*

*Se cree que el proceso de formación del petróleo se inicia cuando una cantidad suficiente de materia orgánica, vegetal y/o animal, comienza a depositarse junto con sedimentos finos en un emplazamiento en el que existen aguas tranquilas.*

*Tras una serie de procesos físico-químicos, el petróleo se encuentra con una roca porosa que acumulará el petróleo en la zona de reserva.*

*Durante décadas, el petróleo se ha utilizado como materia prima para la producción de lubricantes, aceites de motor y fuel-oil, y en los últimos años se utiliza en la fabricación de combustibles (tanto gaseosos como líquidos) así como naftas y ceras parafínicas. Debido a sus innumerables usos, es necesario extraer dicho petróleo de la Naturaleza.*

*Este fenómeno puede ocurrir de forma natural (por diferencia de presión, el flujo asciende hasta la superficie) o por forma artificial (bien con inyección de gas o bien bombeando el petróleo desde la zona de reserva hasta la superficie).*

*Sin embargo, llegará un momento en el que en el flujo de producción aparezcan burbujas de mayor tamaño y el líquido de la columna se rompa o bien las burbujas de gas se mezclen con las del petróleo formándose una película que provoca que el líquido se separe en gotas y por lo tanto la producción se verá afectada. Es en este momento se hace necesario utilizar un método de elevación artificial, de cara a recuperar la producción perdida. El método elegido es el de inyección continua de gas (gas-lift)*

*Este método consiste en inyectar el gas (LPG), normalmente proveniente del mismo pozo, en una zona intermedia localizada entre la zona de reserva y la cabeza del pozo para disminuir la densidad media del fluido producido y consecuentemente la presión ejercida en la zona perforada. Al recuperarse la diferencia de presión entre el punto de inyección y la*

*zona de reserva, el flujo de producto se recuperará y así la producción.*

*Por lo tanto, el objetivo del proyecto es simular en el programa denominado Ecosim los elementos implicados en la inyección continua de gas. El principal problema reside resolver un sistema de ecuaciones diferenciales parciales (que se ha resuelto mediante el método de las líneas y el colocación ortogonal) y de esta manera obtener la respuesta del sistema ante cambios en las condiciones de contorno.*

**Palabras Clave:** simulación no-estacionario, extracción petróleo y gas natural, gas-lift, Ecosim.

## 1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

Tras detectar en la naturaleza la existencia de una roca madre en la que han quedado atrapados petróleo (OIL), gas (LPG) y agua (H<sub>2</sub>O) se procede a realizar una perforación.

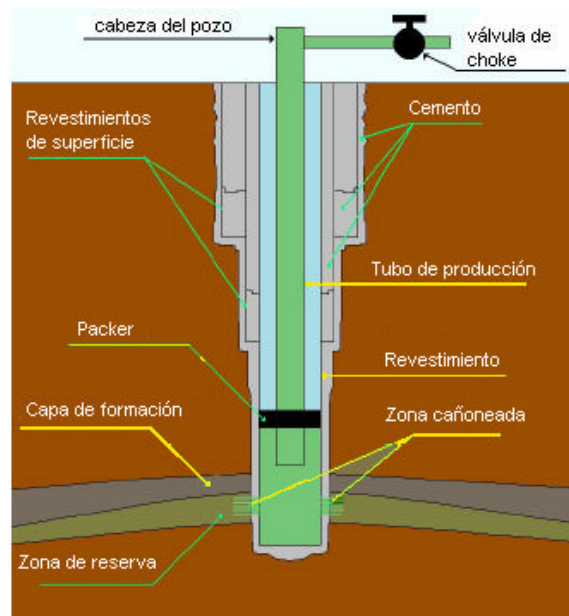


Figura 1: Esquema de pozo de extracción

Tras cimentar y reforzar toda la zona afectada, se introduce un tubo concéntrico por cuyo tubo interior se extraerán los tres productos citados.

Debido a que existe una diferencia de presión entre la zona de reserva (reservoir) y la cabeza del tubo (aproximadamente 20 bara) se consigue obtener una corriente de LPG, de agua y petróleo que ascenderá hasta la superficie a través del tubo interior (tubo de producción).

Sin embargo, cuando la diferencia de presión existente no sea necesaria para vencer el rozamiento y la columna, será necesario inyectar gas (LPG), (que proviene de la etapa de tratamiento del propio gas) en la zona anular existente entre el revestimiento o carcasa (casing) y el tubo de producción.

Al entrar en contacto dicho gas con la corriente de producción (a través de una válvula situada en el fondo del tubo de inyección), la diferencia de presión se reestablecerá y la producción se recuperará.

Esta corriente atravesará una válvula de “choke” (o de estrangulamiento) y dicha corriente será enviada a proceso donde en la etapa de separación se dividirá en tres corrientes distintas.

Por otra parte, la corriente de LPG que proviene de la etapa de separación, atraviesa la torre de adsorción en la que se elimina el agua existente.

Tras atravesar dicha torre, la corriente de LPG llega a un compresor, que provocará un aumento de presión suficiente (de una bar hasta nueve bares) para vencer el rozamiento existente en el tubo de inyección. La temperatura de esta corriente es de 40 °C.

La corriente de LPG atravesará el tanque pulmón (que se utiliza para asegurar un caudal continuo de gas y cuya presión de operación es de 9 bar) y mediante la válvula de “choke” de inyección, la corriente entra en el tubo de inyección.

## 2 OBJETIVO DE LA SIMULACIÓN

### 2.1 PLANTEAMIENTO

De cara a un mejor tratamiento del problema, se podría dividir el proceso de la extracción de petróleo mediante inyección de gas en varios elementos:

- 1- Compresor – tanque
- 2- Válvula de inyección
- 3- Tubo de inyección
- 4- Válvula reguladora
- 5- Zona cañoneada
- 6- Flujo de formación (carcasa)
- 7- Flujo de formación (tubo)
- 8- Tubo de formación
- 9- Zona de separación

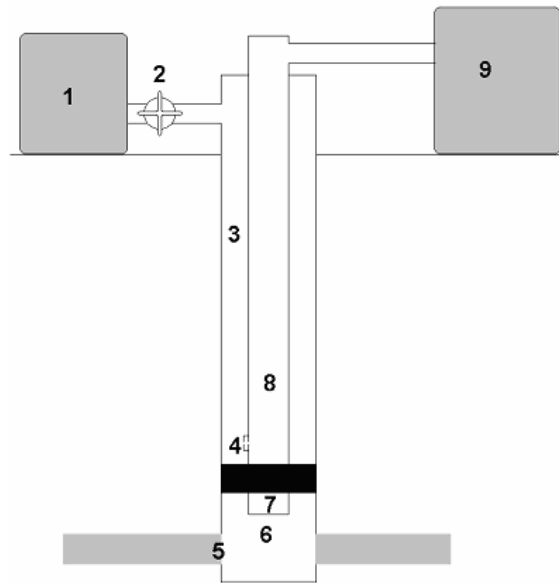


Figura 2: Esquema de la inyección de gas

Si se pretendiera simular todo el proceso, sería necesario ir modelando cada una de las nueve zonas para, posteriormente, unir cada segmento y de esta manera poder tener una noción global de todo el proceso de inyección continua de gas.

En el caso que nos ocupa únicamente se simulará los cuatro primeros segmentos, es decir, compresor-tanque, válvula de choke de inyección, tubo de inyección y válvula de inyección.

Por lo tanto, el sistema se puede considerar de la siguiente manera:

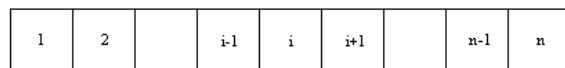


Figura 3: Linealización del sistema a estudiar

La zona n° uno corresponde al compresor (tanque).

La zona que abarca desde el número 2 hasta n-1 corresponde al tubo.

La zona “n” corresponde a la válvula de inyección.

#### 2.1.1 Compresor-Tanque

En el tanque se supone que no existe acumulación, es decir que todo el flujo que entra proveniente del compresor sale. Por lo tanto, tanto la presión como la temperatura en el tanque vendrán prefijadas por las condiciones de salida del compresor.

Así, a partir de unos valores de presión y temperatura ambientales ( $T_{AMB}$  y  $P_{AMB}$ ) y fijando la presión de descarga ( $P_{COMP}$ ) así como la temperatura de descarga ( $T_{SAL}$ ), que es distinta a la temperatura que tendría el gas si no existiera refrigeración ( $P_{COMP}$ ).

De esta manera, se fijan las primeras condiciones de contorno (boundaries) en el extremo denominado "zona número 1"  $\rightarrow T_1 = T_{SAL}$  y  $P_1 = P_{COMP}$

### 2.1.2 Válvula de choke de inyección

Se asume que todo el gas que sale del tanque entra en el tubo de inyección. Por lo tanto se asume que la válvula está abierta. No se tiene en cuenta la pérdida de carga que suele provocar una válvula (0.7 bar).

En una futura revisión, se añadirían las ecuaciones de dicha válvula así como la pérdida de carga.

### 2.1.3 Tubo de inyección

Para simular este modelo, se tendrá en cuenta las leyes de conservación (continuidad, cantidad de movimiento, gas ideal y energía).

Las ecuaciones utilizadas son las siguientes:

Ecuación de energía:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right) = -\left(\frac{1}{r \cdot c_v}\right) + c_p \cdot r \cdot v \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \left[ \begin{array}{l} \left(c_v \cdot T + \frac{v^2}{2}\right) \left(\frac{\partial r}{\partial t}\right) + \\ r \cdot v \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial t}\right) + \\ \left(\frac{c_p \cdot r \cdot T}{+ \frac{3 \cdot r \cdot v^2}{2}}\right) \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right) + \\ \left(\frac{c_p \cdot v \cdot T}{+ \frac{v^3}{2}}\right) \left(\frac{\partial r}{\partial x}\right) \end{array} \right] \quad (1)$$

Ecuación de continuidad

$$\frac{\partial r}{\partial t} + \frac{\partial(r \cdot v)}{\partial x} = 0 \Rightarrow \frac{\partial r}{\partial t} + \left[ r \cdot \frac{\partial v}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial r}{\partial x} \right] = 0 \quad (2)$$

Ecuación del gas ideal:

$$P \cdot Mm = r \cdot R \cdot T \quad (3)$$

Ecuación de cantidad de movimiento:

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{1}{r} \left\{ \begin{array}{l} \left[ v \cdot \left(\frac{\partial r}{\partial t}\right) \right]_{[1]} + \left[ 2 \cdot r \cdot v \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right) \right] \\ + v^2 \cdot \frac{\partial r}{\partial x} \\ \left[ \frac{\partial P}{\partial x} \right] + \\ + \left[ \frac{2 \cdot r \cdot f}{D} \cdot v \cdot |v| \right] - [r \cdot g_x] \end{array} \right\} \quad (4)$$

### 2.1.4 Válvula de inyección

En este caso, se asume que todo el gas de inyección entra en el tubo de producción (es decir que está continuamente abierta).

### 2.1.5 Parámetros del sistema

Datos atmosféricos:

- Presión atmosférica = 101325 Pa
- Temperatura atmosférica = 293 K

Datos del compresor

- Presión de descarga = 911925 Pa =  $P_{COMP}$
- Temperatura de descarga = 401 K =  $T_{COMP}$
- Temperatura salida de refrigeración = 313 K =  $T_{SAL}$
- Eficacia = 0.69

Datos del tubo

- Longitud = 1524 m
- Diámetro interior = 0.14 m
- Diámetro exterior = 0.25 m
- Factor de fricción = 0.05

Datos del gas LPG

- Masa molecular = 17,41 kg/mol
- $\gamma = 1.11$  cociente entre los calores específicos

Datos de la válvula de inyección

- Presión = 506625 bar =  $P[n]$  (boundarie)

## 3 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DEL PROCESO

### 3.1 SIMULACIÓN INICIAL

A continuación se presentan las gráficas obtenidas asumiendo que la presión en el tanque es de 9 bares y en la válvula de inyección de 5 bares.

### 3.1.1 Método de las líneas (n=100)

Se muestran las gráficas de presión, temperatura, densidad, velocidad y caudal para el tiempo que tarda en alcanzar el estado estacionario.

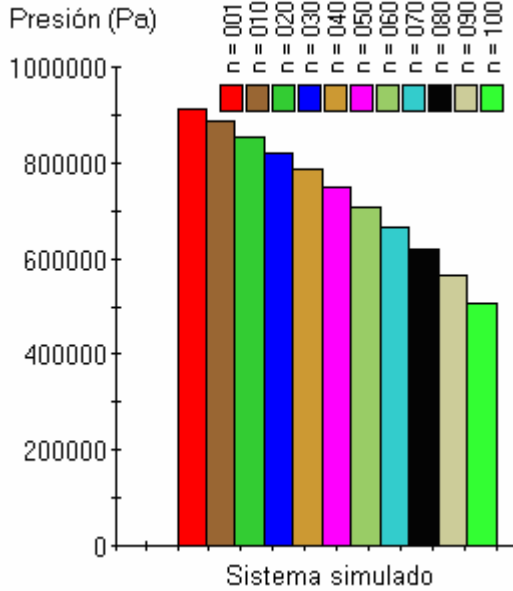


Figura 3: Distribución de la presión

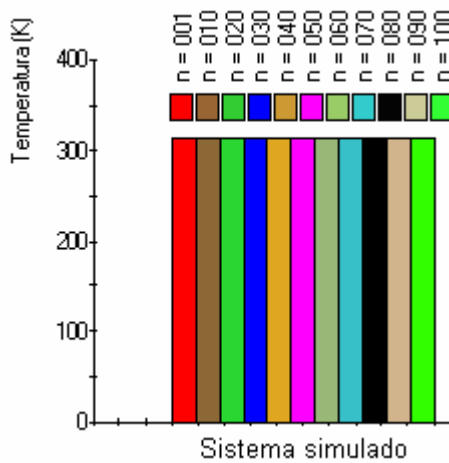


Figura 4: Distribución de la temperatura

Si en lugar de plasmar las gráficas se pudiera mostrar la evolución de las variables, se apreciaría cómo evoluciona el frente de onda a lo largo del tubo de inyección.

También se podrían apreciar efectos de flujo en sentido contrario al habitual.

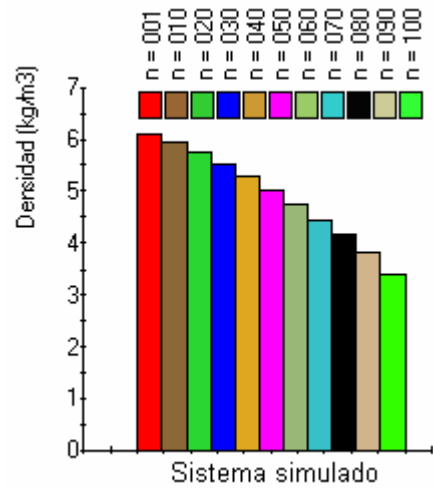


Figura 5: Distribución de la densidad

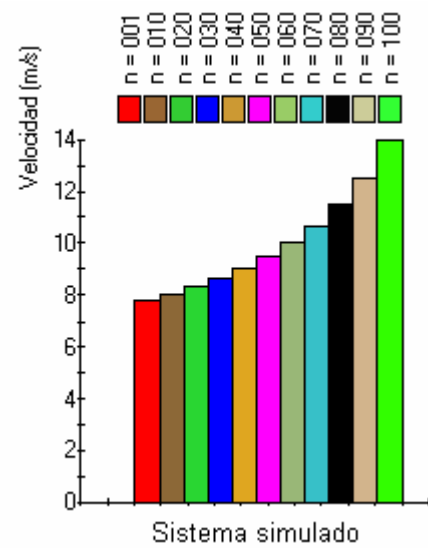


Figura 6: Distribución de la velocidad

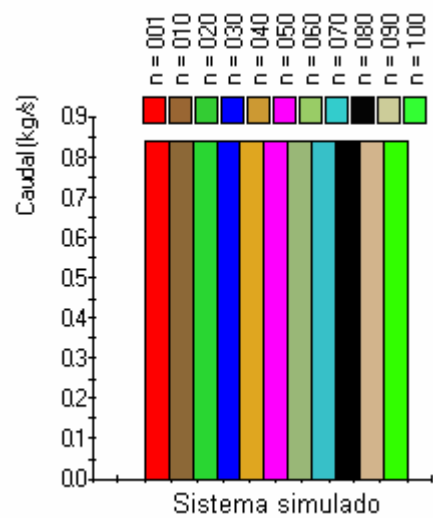


Figura 7: Distribución del caudal

### 3.1.2 Colocación ortogonal (n=8)

Se muestran las gráficas de presión, temperatura, densidad, velocidad y caudal para el tiempo que tarda en alcanzar el estado estacionario.

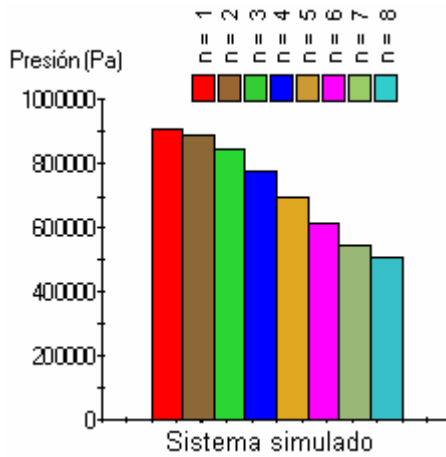


Figura 8: Distribución de la presión

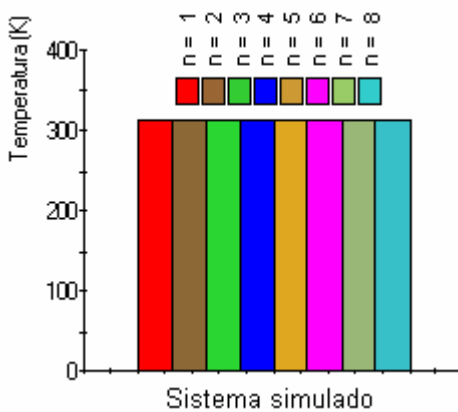


Figura 9: Distribución de la temperatura

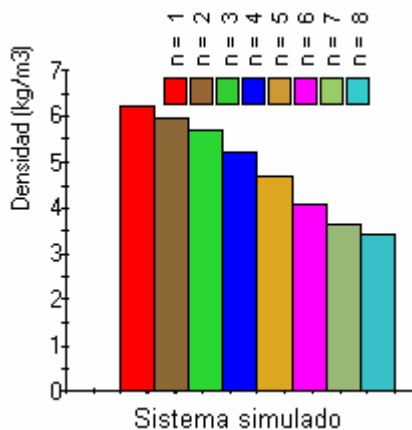


Figura 10: Distribución de la densidad

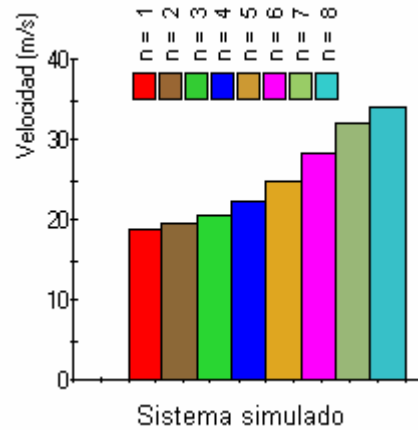


Figura 11: Distribución de la velocidad

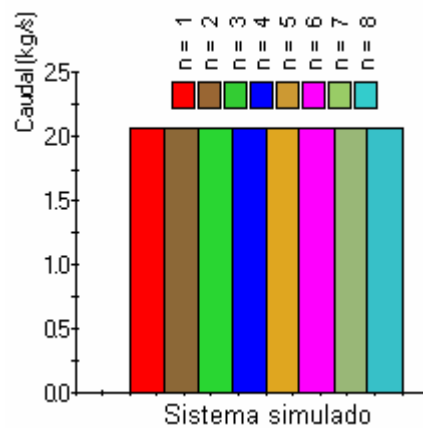


Figura 12: Distribución de la caudal

## 3.2 SIMULACIÓN REALIZANDO CAMBIOS EN LOS EXTREMOS

A continuación se muestra la evolución del sistema cuando, en mitad del tiempo de simulación, se produce un cambio en uno de los extremos.

Se mostrarán las gráficas de presión y temperatura (por ser las variables características) hasta el instante en el que ninguna variable de los extremos ha sufrido cambio alguno, las gráficas mientras se estabiliza el sistema y las gráficas cuando el sistema ya se ha estabilizado.

### 3.2.1 Método de las líneas (n=100)

Se ha elegido variar la presión de la válvula de inyección hasta el valor de la presión atmosférica ( $P[n]=101325$ ).

Por lo tanto se intentará apreciar cómo se recupera el sistema de un cambio en las condiciones de contorno.

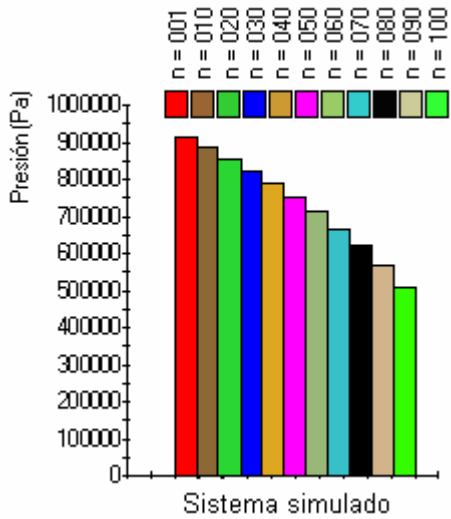


Figura 13: Presión para t = 110 segundos

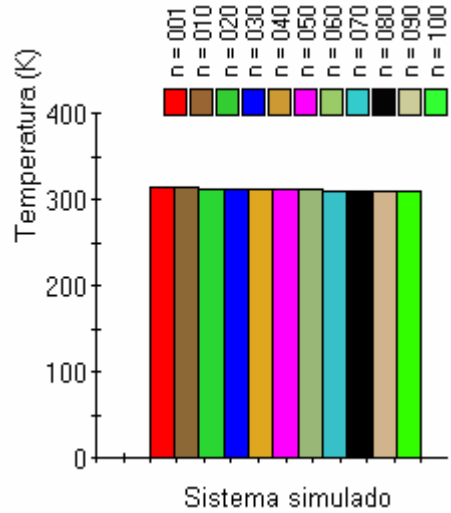


Figura 15: Temperatura para t = 165 segundos, una vez realizado un cambio en P[n]

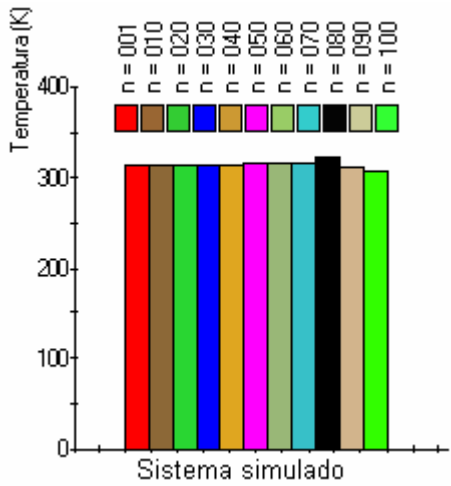


Figura 14: Temperatura para t = 110 segundos

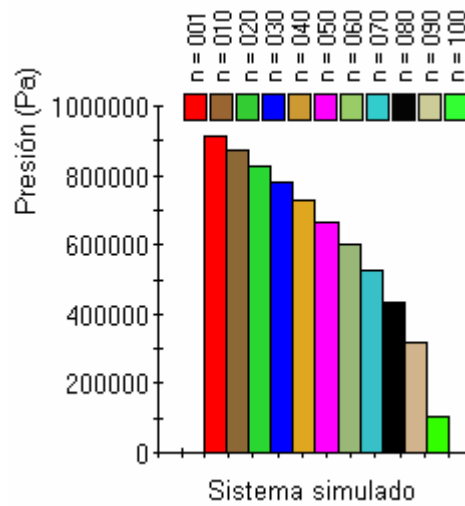


Figura 16: Presión para t = 300 segundos, cuando el sistema se ha recuperado del cambio en P[n]

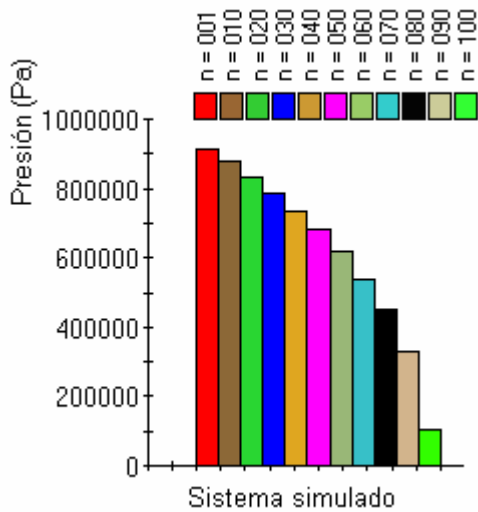


Figura 14: Presión para t = 165 segundos, una vez realizado un cambio en P[n]

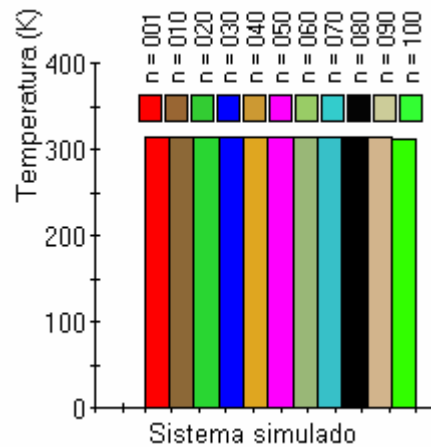


Figura 17: Temperatura para t = 300 segundos, cuando el sistema se ha recuperado del cambio en P[n]

### 3.2.2 Colocación ortogonal (n=8)

Se ha elegido variar la presión de la válvula de inyección hasta el valor de la presión atmosférica ( $P[n]=101325$ ).

Por lo tanto se intentará apreciar cómo se recupera el sistema de un cambio en las condiciones de contorno.

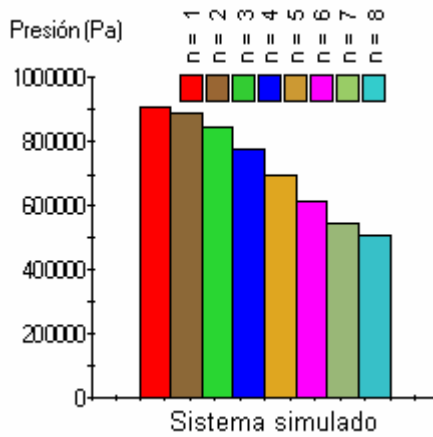


Figura 18: Presión para  $t = 6$  segundos

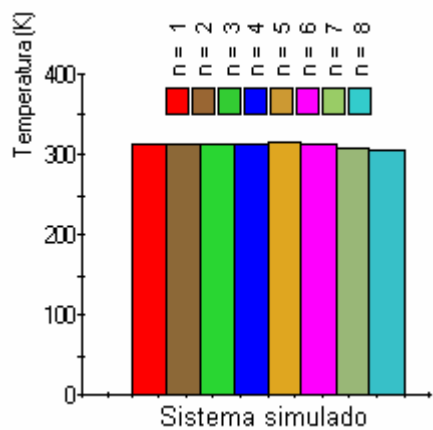


Figura 19: Temperatura para  $t = 6$  segundos

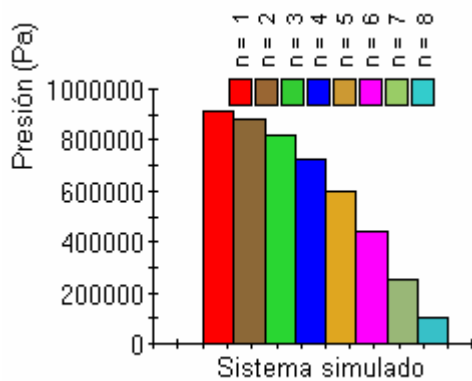


Figura 20: Presión para  $t = 9$  segundos, una vez realizado un cambio en  $P[n]$

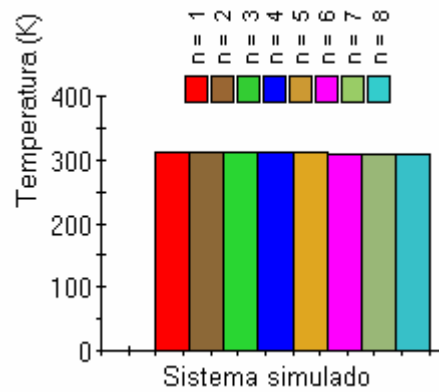


Figura 21: Temperatura para  $t = 9$  segundos, una vez realizado un cambio en  $P[n]$

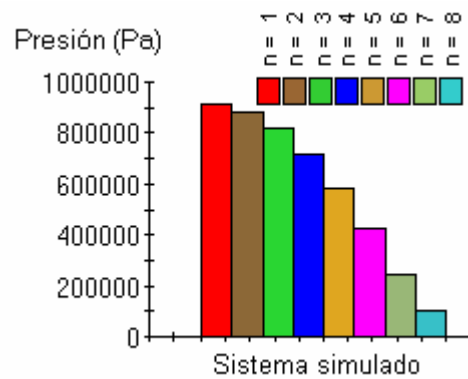


Figura 22: Presión para  $t = 15$  segundos, cuando el sistema se ha recuperado del cambio en  $P[n]$

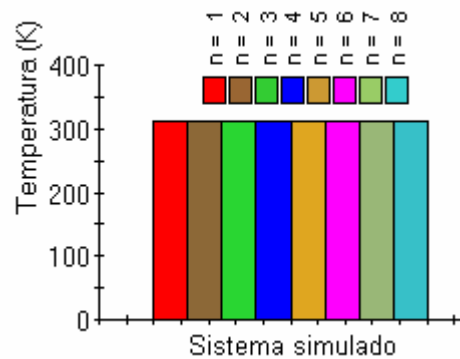


Figura 23: Temperatura para  $t = 15$  segundos, cuando el sistema se ha recuperado del cambio en  $P[n]$

## 4 IMPLEMENTACIÓN EN ECOSIM

Se ha elegido resolver el sistema de ecuaciones diferenciales parciales mediante el método de las líneas con cien puntos (se comprobó que para cinco puntos el resultado era similar) así como colocación ortogonal con ocho puntos (existe la posibilidad de resolver el sistema para cuatro, cinco, seis, siete y ocho puntos)

### 3.1 MÉTODO DE LAS LÍNEAS (n=100)

USE MATH

```
CONST REAL MW = 17.41e-3 -- "peso molecular (kg/mol)"
CONST REAL RGAS = 8.314 -- "constante universal de los gases
(J/mol*K)"
CONST REAL gamma = 1.11 -- "cociente de calor específico ()"
CONST REAL cp = ( gamma / ( gamma - 1 ) ) * RGAS / MW -- "calor
específico a presión constante (J/kg*K)"
CONST REAL cv = cp/gamma -- "calor específico a volumen constante
(J/Kg*K)"
```

-----  
COMPONENT metodo\_lineas (INTEGER n=100)  
-- "n = número de elementos"

DATA -- Datos globales

```
REAL L = 1524.0 -- "longitud del tubo (m)"
REAL D = 0.15 -- "diámetro del tubo (m)"
REAL f = 0.05 -- "factor de fricción"

REAL Pamb = 101325 -- "Presión atmosférica"
REAL Tamb = 293 -- "Temperatura atmosférica"

REAL Pcomp = 9*101325 -- "Presión proveniente del compresor"
REAL Tsal = 273 + 40 -- "Temperatura después del cambiador"

REAL Ptube = 5*101325 -- Presión en el tubo de producción

REAL Ep = 0.69 -- "tomado de la gráfica 3.6"

REAL gx = 1*9.8 -- "componente de la gravedad"

REAL z = 0.998 -- factor de compresibilidad
```

DECLS

```
REAL Tcomp -- "Temperatura proveniente del compresor"

REAL rho [n] -- "densidad del gas (kg/m^3)"
REAL v [n] -- "velocidad del gas (m/s)"
REAL P [n] -- "presión del gas (Pa)"
REAL T [n] -- "temperatura del gas (K)"
REAL coefm -- "coeficiente m del gas del compresor"
REAL coefn -- "coeficiente n del gas del compresor"

REAL DX -- "tamaño del elemento (m)"
REAL W[n] -- "caudal másico"
```

INIT -- inicialización de los elementos

```
FOR (i IN 1,n)

T[1] = Tsal
P[1] = Pcomp
rho [1] = P[1]*MW/(RGAS*T[1])
v[i] = 0

FOR (i IN 2,n)
T[i] = 288
P[i] = Ptube
rho [i] = P[i]*MW/(RGAS*T[i])

END FOR
END FOR
```

CONTINUOUS

```
DX=L/(n-1)
```

-- Ecuaciones del Compresor

```
coefm = (gamma - 1)/(gamma*Ep)
coefn = 1/(1-coefm)
```



```

Tcomp= Tamb*(Pcomp/Pamb)**coefm

-- Boundaries
P[1]=Pcomp
T[1]=Tsal
P[n]=Ptube

-- Ecuación continuidad
-- primer elemento (n=1)
rho[1]' + ( rho[1]*(-3*v[1]+4*v[2]-v[3]) / (2*DX) ) + \
(v[1]*(-3*rho[1]+4*rho[2]-rho[3]) / (2*DX) ) = 0

-- último elemento (n=100)
rho[n]' + ( rho[n] * (3*v[n] - 4*v[n-1] + v[n-2]) / (2*DX) ) + \
(v[n]* (3*rho[n] - 4*rho[n-1] + rho[n-2]) / (2*DX) ) = 0

-- Cantidad de movimiento
-- primer elemento (n=1)
v[1]' + (1/rho[1]) * ( (v[1]*rho[1]') + ( (2*rho[1]*v[1]*(-
3*v[1]+4*v[2]-v[3]) / (2*DX) ) \
+ ( (-3*rho[1]+4*rho[2]-rho[3]) / (2*DX) * (v[1] **2) ) ) + ( (-
3*P[1]+4*P[2]-P[3]) / (2*DX) ) \
(rho[1]*gx)+ (2*rho[1]*f/D * abs(v[1])* v[1]) )= 0

-- último elemento (n=100)
v[n]' + (1/rho[n])*((v[n]*rho[n]') + ( (2*rho[n]*v[n]* (3*v[n]-4*v[n-
1]+v[n-2]) / (2*DX) ) \
+ ( (3*rho[n]-4*rho[n-1]+rho[n-2]) / (2*DX) * (v[n] **2) ) ) \
+ ( (3*P[n]-4*P[n-1]+P[n-2]) / (2*DX) ) - (rho[n]*gx) + (2*rho[n]*f/D
* abs(v[n])* v[n]) )=0

-- Energía
-- primer elemento (n=1) → no hace falta definirla pues he impuesto una
boundarie en T[1]

```

```

-- último elemento (n=100)
T[n]' + ( 1 / (rho[n]*cv) ) * ( rho[n]* (cv*T[n] + ((v[n]**2)/2) ) ) +
(rho[n]* v[n]*v[n]') + (cp*rho[n]*v[n]* ((3*T[n]-4*T[n-1]+T[n-2]) /
(2*DX) ) ) \+ ( (cp*rho[n]*T[n] + 3/2*rho[n]*v[n]**2) * ((3*v[n]-
4*v[n-1]+v[n-2]) / (2*DX) ) ) + ( (cp*v[n]*T[n] + (1/2)*v[n]**3) *
((3*rho[n]-4*rho[n-1]+rho[n-2]) / (2*DX) ) ) = 0

-- para los elementos internos (desde n=2 a n=99)
EXPAND_BLOCK (i IN 2,n-1) -- elementos 2 a n-1

-- Continuidad
rho[i]' + ( rho[i]*(v[i+1]-v[i-1]) / (2*DX) ) + (v[i]*(rho[i+1]-rho[i-1]) /
(2*DX) ) = 0

-- Cantidad de movimiento
v[i]' + (1/rho[i]) * ( (v[i]*rho[i]') + ( (2*rho[i]*v[i]*(v[i+1]-v[i-1]) /
(2*DX) ) \
+ ( (rho[i+1]-rho[i-1]) / (2*DX) * (v[i] **2) ) ) \
+ ( (P[i+1]-P[i-1]) / (2*DX) ) - (rho[i]*gx) + (2*rho[i]*f/D * abs(v[i])*
v[i]) ) = 0

-- Energía
T[i]' + ( 1 / (rho[i]*cv) ) * ( rho[i]* (cv*T[i] + ((v[i]**2)/2) ) ) +
(rho[i]* v[i]*v[i]') + ( cp*rho[i]*v[i]* ((T[i+1]-T[i-1]) / (2*DX) ) ) \
+ ( (cp*rho[i]*T[i] + 3/2*rho[i]*v[i]**2) * ((v[i+1]-v[i-1]) / (2*DX) ) )
+ ( (cp*v[i]*T[i] + (1/2)*v[i]**3) * ((rho[i+1]-rho[i-1]) / (2*DX) ) ) ) =
0 -- energía

-- ecuación de estado
P[i]*MW / rho[i] = z * RGAS*T[i]
END EXPAND_BLOCK

EXPAND_BLOCK (i IN 1,n) -- caudal másico
W[i]=(3.1416/4*D**2)*v[i]*rho[i]
END EXPAND_BLOCK

END COMPONENT

```

### 3.2 MÉTODO DE COLOCACIÓN ORTOGONAL (n=8)

USE MATH

```
CONST REAL MW = 17.41e-3  --"peso molecular (kg/mol)"
CONST REAL RGAS = 8.314  --"constante universal de los gases
(J/mol*K)"
CONST REAL gamma = 1.11  --"cociente de calor específico ()"
CONST REAL cp = ( gamma / ( gamma - 1 ) ) * RGAS / MW  -- "calor
específico a presión constante (J/kg*K)"
CONST REAL cv = cp/gamma  --"calor específico a volumen constante
(J/Kg*K)"
```

-----  
COMPONENT ortogonal (INTEGER n=8) -- "n = número de elementos"  
DATA -- Datos globales

```
REAL L = 1524.0  -- "longitud del tubo (m)"
REAL D = 0.15  -- "diámetro del tubo (m)"
REAL f = 0.05  -- "factor de fricción"

REAL Pamb = 101325  -- "Presión atmosférica"
REAL Tamb = 293  -- "Temperatura atmosférica"
REAL Pcomp = 9*101325  -- "Presión proveniente del compresor"
REAL Tsal = 273 + 40  -- "Temperatura después del cambiador"

REAL Ptube = 5*101325  -- Presión en el tubo de producción

REAL Ep = 0.69  -- "tomado de la gráfica 3.6"
REAL gx = 1*9.8  -- "componente de la gravedad"
REAL z = 0.998  -- factor de compresibilidad
```

```
-- REAL A[4,4] = {{-6.0000,8.0902,-3.0902,1.0000},\
--               {-1.6180,0.0000,2.2361,-0.6180},\
--               {0.6180,-2.2361,0.0000,1.6180},\
--               {-1.0000,3.0902,-8.0902,6.0000}}
```

```
--REAL A[5,5] = {{-10.0000,13.5130,-5.3333,2.8203,-1},\
--               {-2.4820,0.0000,3.4915,-1.5275,0.51800},\
--               {0.7500,-2.6732,0.0000,2.6732,-0.7500},\
--               {-0.5180,1.5275,-3.4915,0.0000,2.4820},\
--               {1.0000,-2.8203,5.3333,-13.5130,10.0000}}
```

```
--REAL A[6,6] = {{-15.0000,20.2828,-8.0724,4.4894,-2.6998,1.0000},\
--               {-3.5727,-0.0000,5.0469,-2.3057,1.3071,-0.4756},\
--               {0.9699,-3.4425,-0.0000,3.5059,-1.5727,0.5394},\
--               {-0.5394,1.5727,-3.5059,0.0000,3.4425,-0.9699},\
--               {0.4756,-1.3071,2.3057,-5.0469,-0.0000,3.5727},\
--               {-1.0000,2.6998,-4.4894,8.0724,-20.2828,15.0000}}
```

```
-- REAL A[7,7] = \
--{{-21.0000, 28.4032,-11.3380,6.4000,-4.0999,2.6347,-1.0000},\
--{-4.8859, -0.0000,6.9117,-3.1972,1.9227,-1.2045,0.4532},\
--{1.2505,-4.4316,0.0000,4.5334,-2.1329,1.2328,-0.4522},\
--{-0.6250,1.8151,-4.0139,-0.0000,4.0139, -1.8151,0.6250},\
--{0.4522,-1.2328,2.1329,-4.5334,0.0000,4.4316,-1.2505},\
--{-0.4532,1.2045,-1.9227,3.1972,-6.9117,-0.0000,4.8859},\
--{1.0000,-2.6347,4.0999,-6.4000,11.3380,-28.4032,21.0000}}
```

```
REAL A[8,8] = \
{{-28.0000,37.8752,-15.1386,8.5958,-5.6204,3.8833,-2.5954,1.0000},\
{-6.4198,-0.0000,9.0872,-4.2241,2.5885,-1.7389,1.1471,-0.4399},\
{1.5850,-5.6130,-0.0000,5.7510,-2.7456,1.6900,-1.0741,0.4066},\
{-0.7443,2.1579,-4.7564,-0.0000,4.7778,-2.2707,1.3223,-0.4867},\
{0.4867,-1.3223,2.2707,-4.7778,0.0000,4.7564,-2.1579,0.7443},\
{-0.4066,1.0741,-1.6900,2.7456,-5.7510,-0.0000,5.6130,-1.5850},\
{0.4399,-1.1471,1.7389,-2.5885,4.2241,-9.0872,0.0000,6.4198},\
{-1.0000,2.5954,-3.8833,5.6204,-8.5958,15.1386,-37.8752,28.0000}}
```

DECLS

REAL Tcomp -- "Temperatura proveniente del compresor"

REAL rho [n] -- "densidad del gas (kg/m^3)"

REAL v [n] -- "velocidad del gas (m/s)"

REAL P [n] -- "presión del gas (Pa)"

REAL T [n] -- "temperatura del gas (K)"

REAL coefm -- del gas

REAL coefn -- del gas

REAL DX -- "tamaño del elemento (m)"

REAL W[n] -- "caudal másico"

INIT -- inicialización dos elementos

FOR (i IN 1,n)

T[1] = Tsal

P[1] = Pcomp

rho [1] = P[1]\*MW/(RGAS\*T[1])

v[i] = 0

FOR (i IN 2,n)

T[i] = 288

P[i] = Ptube

rho [i] = P[i]\*MW/(RGAS\*T[i])

END FOR

END FOR

CONTINUOUS

DX=L/(n-1)

-- Ecuaciones del Compresor

coefm = (gamma - 1)/(gamma\*Ep)

coefn = 1/(1-coefm)

Tcomp= Tamb\*(Pcomp/Pamb)\*\*coefm

-- Boundaries

P[1]=Pcomp

T[1]=Tsal

P[n]=Ptube

EXPAND\_BLOCK (i IN 1,n) -- elementos 1 a n

-- Continuidad

$\rho[i]' + ((\rho[i]*(\text{SUM}(k \text{ IN } 1,8; A[i,k]*v[k])) / \text{DX}) + (v[i]*(\text{SUM}(k \text{ IN } 1,8; A[i,k]*\rho[k])) / \text{DX})) = 0$

-- Cantidad de movimiento

$v[i]' + (1/\rho[i]) * ((v[i]*\rho[i]') + ((2*\rho[i]*v[i]*(\text{SUM}(k \text{ IN } 1,8; A[i,k]*v[k])) / \text{DX}) \setminus + ((\text{SUM}(k \text{ IN } 1,8; A[i,k]*\rho[k])) / \text{DX} * (v[i]**2))) \setminus + ((\text{SUM}(k \text{ IN } 1,8; A[i,k]*P[k])) / \text{DX}) - (\rho[i]*g_x) + (2*\rho[i]*f/D * \text{abs}(v[i])* v[i])) = 0$

-- caudal

W[i]=(3.1416/4\*D\*\*2)\*v[i]\*rho[i]

END EXPAND\_BLOCK

EXPAND\_BLOCK (i IN 2,n-1)

P[i]\*MW / rho[i] = z \* RGAS\*T[i]

END EXPAND\_BLOCK

EXPAND\_BLOCK (i IN 2,n)

-- Energía

$T[i]' + (1 / (\rho[i]*c_v)) * ((\rho[i]* (c_v*T[i] + ((v[i]**2)/2)) + (\rho[i]* v[i]*v[i]') + (c_p*\rho[i]*v[i]* ((\text{SUM}(k \text{ IN } 1,8; A[i,k]*T[k])) / \text{DX})) \setminus + ((c_p*\rho[i]*T[i] + 3/2*\rho[i]*v[i]**2) * ((\text{SUM}(k \text{ IN } 1,8; A[i,k]*v[k])) / \text{DX})) + ((c_p*v[i]*T[i] + (1/2)*v[i]**3) * ((\text{SUM}(k \text{ IN } 1,8; A[i,k]*\rho[k])) / \text{DX})) = 0$  -- energía

END EXPAND\_BLOCK

END COMPONENT