

# **Parte II**

# **Anexos**



## Anexo A: Análisis de programas comerciales de cálculo de flujo compresible en conductos

---

Se muestra a continuación un breve análisis de los programas de simulación más interesantes que se han encontrado para el cálculo de flujo compresible en conductos. En el último capítulo se muestra una breve comparación entre ellos.

### 1. Pipe-Flo Compressible

Programa que simula la operación en estado estacionario de sistemas y redes complejas de tuberías por las cuales circulan fluidos compresibles, tanto gases como vapores. No permite el uso de líquidos. *Pipe-Flo* no pone límite a las configuraciones posibles, y permite todo tipo de diseños.

Único programa de los analizados en el cual se ha podido acceder a un manual en el que se explica el método de cálculo empleado para su resolución [1]. Es por ello que se dispone de mayor información referente a *Pipe-Flo* que a cualquier otro programa.

#### 1.1 Suposiciones

- Estado estacionario.
- Gas ideal ( $Z=1$ ) con coeficiente de dilatación adiabática ( $\gamma$ ) constante
- Siempre considera flujo adiabático, sin efectos de transmisión de calor. En función del tipo de elemento se aplica uno de los siguientes modelos de cálculo:
  - Flujo de Fanno (adiabático con fricción) para elementos de sección transversal constante.
  - Flujo adiabático sin fricción (es decir, isoentrópico) para elementos en los que haya un cambio de sección transversal. Es decir, considera los cambios de sección como ideales, sin pérdidas irreversibles.
- No calcula flujos supersónicos
- No converge una solución para una tubería si hay bloqueo sónico antes de la salida de ésta (es decir, si se alcanza  $Ma=1$  en medio de una tubería y no en su desembocadura).

#### 1.2 Bases de datos

*Pipe-Flo* dispone de varias bases de datos para su funcionamiento:

- Base de datos de tuberías estandarizadas. Estas tablas se pueden modificar o ampliar.
- Base de datos de válvulas y accesorios del *Crane Technical Paper 410*. El usuario selecciona una válvula o accesorio y el programa calcula el correspondiente coeficiente de pérdidas. Esta base de datos puede modificarse o ampliarse con los datos introducidos por el usuario.

-Base de datos de gases: se dispone de tablas de propiedades para 100 gases y vapor de agua. También es posible introducir datos para nuevos fluidos.

### 1.3 Funcionamiento

El programa resuelve el problema mediante la aplicación de distintos métodos de convergencia (Newton-Raphson, Hardy Cross...) que hacen que la solución obtenida para la red de la instalación mediante las leyes de Kirchoff cumpla también con las cuatro ecuaciones que gobiernan el proceso (conservación de masa, cantidad de movimiento, energía y ecuación de estado).

### 1.4 Características

-Sin límite en el número de nodos y tuberías: sirve para resolver configuraciones complejas. Da asimismo la posibilidad de incorporar compresores, ventiladores, válvulas de control, así como codos y todo tipo de accesorios.

-Posee una herramienta para dimensionar tuberías, así como para seleccionar válvulas o caudalímetros.

-Una vez diseñada la planta, el programa permite todas las configuraciones operacionales posibles: encender/apagar compresores, abrir/cerrar tuberías, modificar el set point de las válvulas de control, etc.

-Muestra un esquema de la planta donde se puede observar el funcionamiento global de la instalación, así como las propiedades de cada elemento (ver Figura 1.1).

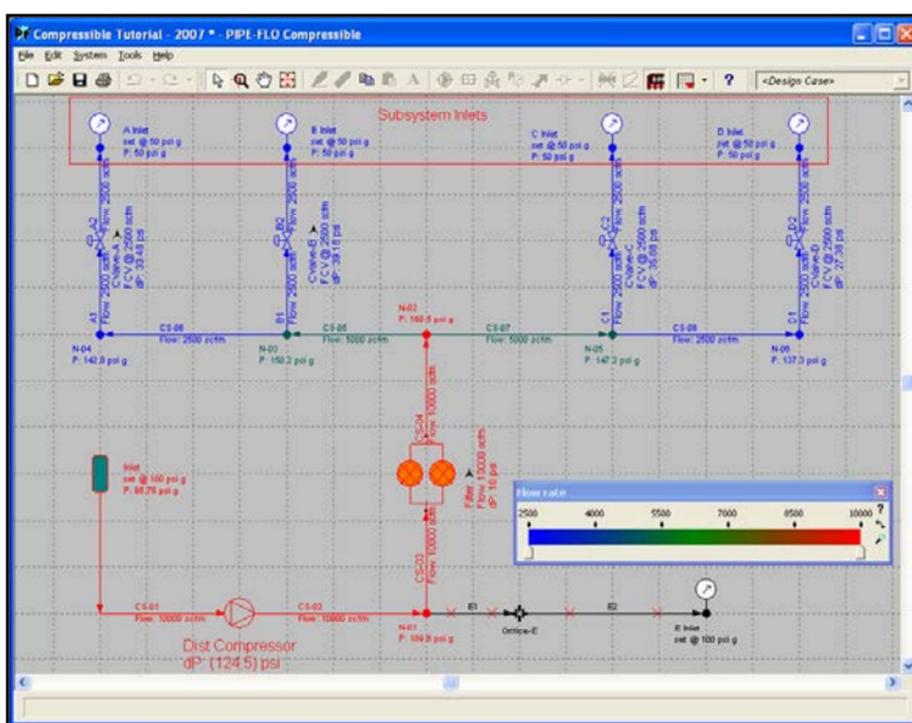


Figura 1.1: Interfaz de Pipe-Flo

-A la hora de mostrar los resultados, estos pueden verse tanto en el esquema de la planta como en un informe (“Flo-Sheet”) donde se resaltan los posibles problemas que hayan podido aparecer en la planta: tuberías con bloqueo sónico, velocidades o presiones demasiado altas o demasiado bajas, cuellos de botella, etc.

## **2. AFT Arrow**

Simulador de sistemas y redes de tuberías por las cuales circulan fluidos compresibles (gases y vapores), no permitiendo el cálculo con líquidos. Permite todo tipo de diseños.

### **1.1 Suposiciones**

- Estado estacionario
- Gas ideal o real, a elección del usuario.
- Posibilidad de flujo adiabático, isotermo o con condiciones de transmisión de calor.
- Modela flujos con bloqueo sónico.
- Tiene en cuenta la energía potencial del gas, por lo que modela el impacto de los cambios de cota, no despreciables para estructuras de gran altura.

### **2.2 Bases de datos**

AFT Arrow utiliza varias bibliotecas para su funcionamiento:

- Base de datos de tuberías, basadas en estándares y ampliables por el usuario
- Base de datos de válvulas y componentes
- Bibliotecas para las propiedades termodinámicas de gases y vapor, que pueden ser extendidas y personalizadas. Posee además el llamado “Chempack”, una base de datos opcional con propiedades termofísicas de unos 600 gases, permitiendo la simulación de mezclas no reactantes.

### **2.3 Funcionamiento**

Utiliza un método iterativo modificado de Newton-Raphson junto con métodos desarrollados por AFT. Con estas herramientas el programa resuelve para la instalación completa las ecuaciones que gobiernan el proceso (conservación de masa, cantidad de movimiento, energía y ecuación de estado).

### **2.4 Características**

- Sirve tanto para el diseño y modelaje de una planta como para simular su operación
- Permite todas las configuraciones operacionales posibles: encender/apagar compresores, abrir/cerrar tuberías, modificar el set point de las válvulas de control, etc.
- Además de un esquema interactivo en el que se puede observar el funcionamiento y características de la planta, permite en la misma ventana observar propiedades en formato hoja de datos y generar gráficos (ver Figura 2.1).

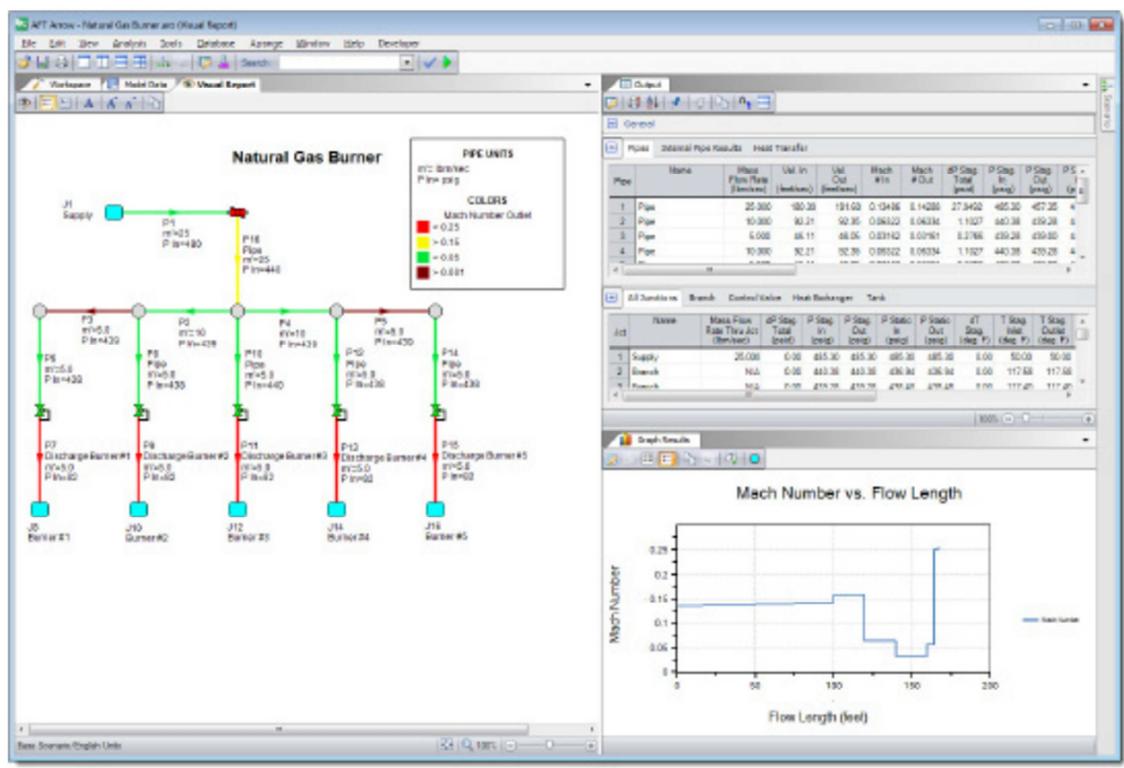


Figura 2.1: Interfaz de AFT Arrow

-Posee el módulo adicional GSC (“Goal Seek and Control Module”), que da de forma automática las condiciones necesarias a la entrada del sistema para lograr unas condiciones de salida determinadas por el usuario.

Para mayor información acerca de AFT Arrow se recomienda la consulta de [2].

### 3. Fluid Flow

Programa muy completo que realiza la simulación de flujos en conductos cerrados, tanto para líquidos como para gases y vapor. Las simulaciones pueden referirse tanto a un estado estacionario como a un transitorio, lo que añade complejidad al programa.

El programa está conformado por diferentes módulos: flujo incompresible, flujo compresible, flujo de mezcla bifásica, flujo de fluidos no newtonianos... de esta forma permite simular en un único entorno de trabajo el flujo de fluidos de muy diversas características. Posee un gran número de módulos, por lo que da la posibilidad de adquirirlos por separado.

Concretamente para el módulo de flujo compresible, se indican las siguientes características:

- Posibilidad de modelar tanto flujos adiabáticos como con transferencias de calor
- Preciso tanto para bajas como para elevadas velocidades
- Auto detección de condiciones de flujo estrangulado. No se indica sin embargo cómo se trata el flujo bloqueado, únicamente que se detecta.
- Útil tanto para pequeñas como para grandes instalaciones industriales (en su lista de clientes figuran grandes multinacionales de la industria química como BASF, Linde, DOW o Shell)

Posee una interfaz gráfica en la que es posible mostrar los datos y características de cada localización y equipo del sistema, así como generar gráficos (ver Figuras 3 y 4). Asimismo, como se ha dicho anteriormente, Fluid-Flow no solo permite la simulación de flujo estacionario, sino que mediante el módulo "Dynamic Analysis and Scripting" también puede simular flujo dinámico, colocando los datos resultantes de la simulación en una hoja Excel para su posterior evaluación.

Respecto a sus bibliotecas, posee extensas bases de datos de tuberías, válvulas, compresores y accesorios comerciales, así como de propiedades de una gran variedad de fluidos.

Fluid-Flow no muestra mucha más información acerca de su funcionamiento y método de cálculo, aunque parece ser un software de simulación preciso y avanzado, con gran cantidad de posibilidades y herramientas.

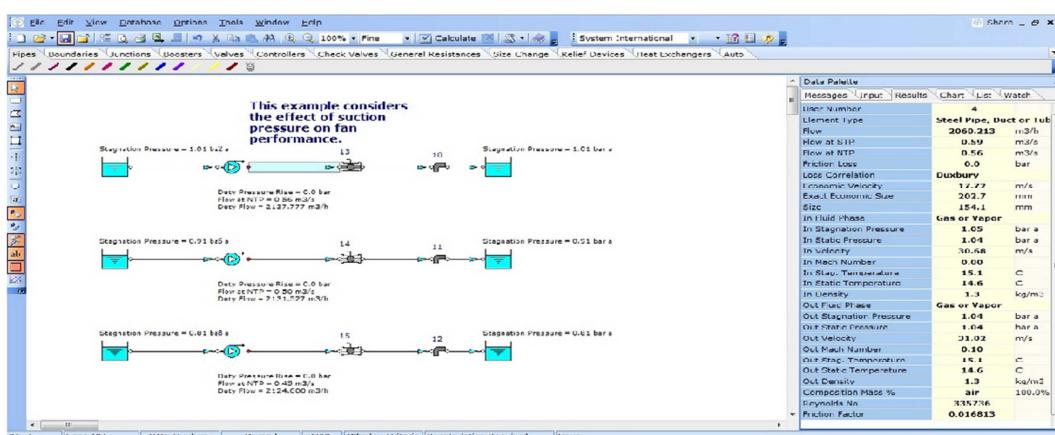


Figura 3.1: Interfaz con visor de propiedades de Fluid-Flow

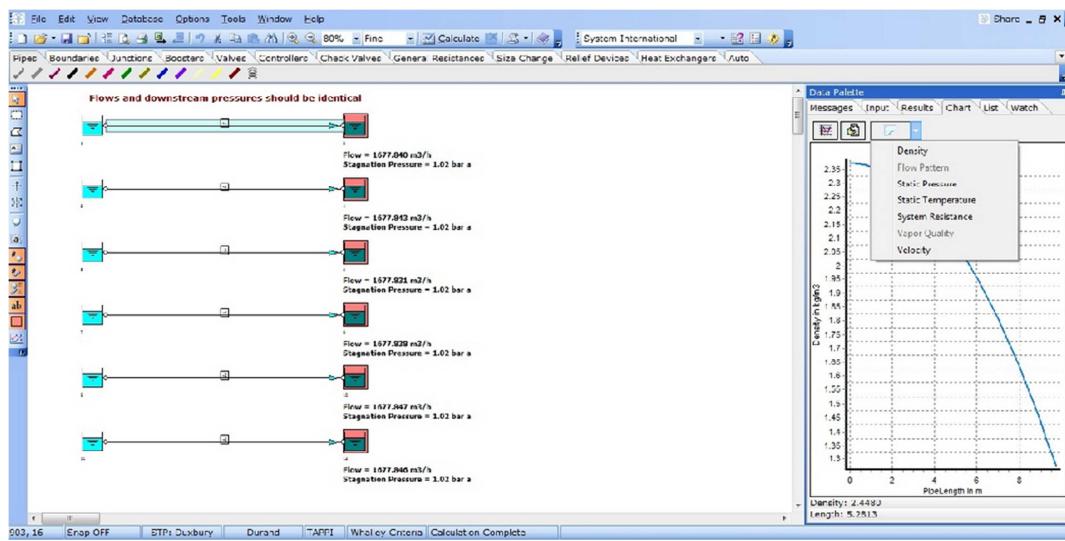


Figura 3.2: Interfaz con visor de gráficos de Fluid-Flow

Para mayor información acerca de Fluid Flow se recomienda la consulta de [3].

#### 4. Compressible Flow CFD Project

El *Proyecto CFCFD* está formado por un grupo de investigadores postdoctorales, profesores y estudiantes de la Universidad de Queensland (Australia), cuyo interés es la simulación de flujo compresible. Su actividad se usa como apoyo para centros de investigación de dicha universidad, y se centra principalmente en el estudio de flujo no estacionario [4].

El *Proyecto CFCFD* ha desarrollado gran cantidad de códigos y simuladores para la resolución de problemas de flujo compresible con características muy distintas: flujo supersónico, flujo viscoso tanto en 1 como en 2 y en 3 dimensiones, flujos de mezclas sin equilibrio químico, flujos de rarefacción, etc. Dichos códigos están diseñados específicamente para ajustarse a sus necesidades, por lo que aunque poseen capacidades que actualmente no se dan en los códigos CFD comerciales, la simulación muchas veces no es de aplicación directa a otro problema sin una modificación del código.

Al realizar unos cálculos tan avanzados, el volumen de control donde se realiza el cómputo del CFD suele ser pequeño (una tobera o una válvula por ejemplo), por lo que no tiene aplicación directa a la resolución de redes, sino más bien a la simulación de flujos en zonas críticas (como por ejemplo, a la entrada de un compresor).

Los códigos de los diversos simuladores desarrollados por el *Proyecto CFCFD* son de libre acceso, aunque en la página web del proyecto se advierte que para poder realizar los cálculos necesarios para la simulación son necesarios ordenadores de gran potencia, preferiblemente la conexión a un superordenador.

Algunos de los diversos códigos disponibles en la página web son los siguientes:

- **Eilmer3:** simulador dinámico para flujos compresibles en 2D y 3D. Especialmente útil para flujos en los cuales la geometría del contorno no sea excesivamente compleja. Eilmer está desarrollado en C++, y dispone de un manual del usuario.



Figura 4.1: Simulación en Eilmer de flujo subsónico en torno a un álabe de compresor

- **L1d3:** simulador especializado en dinámica de gases compresibles quasi-1D. Su aplicación es la simulación de tubos sónicos.

- **Imoc:** simulador para flujo compresible irrotacional de un gas ideal. Posee la característica de poder especificar el flujo aguas arriba y aguas debajo de un conducto, y calcular las propiedades del flujo entre esos dos puntos.
- **Poshak 3:** código que proporciona la variación espacial de las propiedades de un flujo unidimensional no viscoso tras el paso de una onda de choque.

En conclusión, los simuladores desarrollados por el *Proyecto CFCFD* poseen una complejidad y exactitud mayores a los presentes en los softwares comerciales, pero tienen una aplicación más limitada, así como unas necesidades de potencia de cálculo muy superiores. Los códigos son de libre acceso, aunque de gran complejidad.

## 5. GASWorkS

Es un programa de simulación y modelaje de instalaciones de tuberías con gas natural o cualquier otro tipo de fluido compresible, permitiendo el uso de compresores, válvulas y todo tipo de accesorios. Está principalmente orientado al diseño de grandes instalaciones de hidrocarburos.

### 5.1 Suposiciones

- Estado estacionario
- Gas real: calcula los factores de compresibilidad (Z) para cualquier mezcla de hidrocarburos mediante la norma AGA8.
- Flujo adiabático o con transmisión de calor, según condiciones de entorno especificadas por el usuario.
- No muestra información acerca de si es capaz o no de manejar líneas en las que se dé el fenómeno del bloqueo sónico.

### 5.2 Funcionamiento

El método de solución es un método iterativo basado en Newton-Raphson, y la rutina del solver proporciona una solución eficiente para prácticamente cualquier tamaño de la instalación (probado hasta 250 000 nodos).

### 5.3 Características

-Orientado al diseño de redes (tanto domésticas como industriales) de transporte y distribución de gas natural así como de otros hidrocarburos compresibles.

-Permite la simulación de mezclas de fluidos no reactantes.

-Interfaz gráfica en la que se puede diseñar y observar el funcionamiento de la instalación, tal y como se ve en la figura 6. Además, GASWorkS permite la superposición del esquema de la instalación a un plano, que puede ser por ejemplo, el de una ciudad.

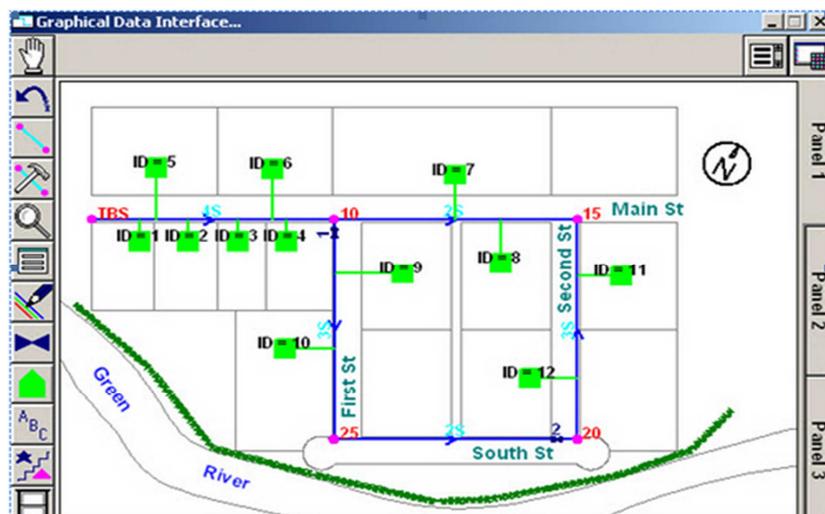


Figura 5.1: Interfaz del programa GASWorkS

-Posee bases de datos con tuberías y componentes estandarizados para el diseño de la instalación.

-Dispone de rutinas para importar y exportar datos fácilmente a través de Excel, Access o CAD. Los informes de resultados pueden ser impresos tanto en Word como en Excel.

Para mayor información acerca de GASWorkS se recomienda la consulta de [5].

## 6. Design Net

Simulador de sistemas de tuberías (hasta 9000 segmentos), con cualquier combinación posible de válvulas y accesorios. Sirve tanto para flujo compresible como para incompresible, y su método de resolución implica la resolución diferencial del teorema de Bernoulli junto con integración numérica.

Tiene la posibilidad de incluir transferencia de calor para el flujo compresible, y su aplicabilidad llega hasta flujo sónico.

Posee bibliotecas para las propiedades de hasta 50 fluidos (líquidos y gases), así como de tuberías, válvulas y accesorios. Posee asimismo una interfaz gráfica donde se puede diseñar fácilmente la instalación y ver los resultados de la operación (ver Figura 7).

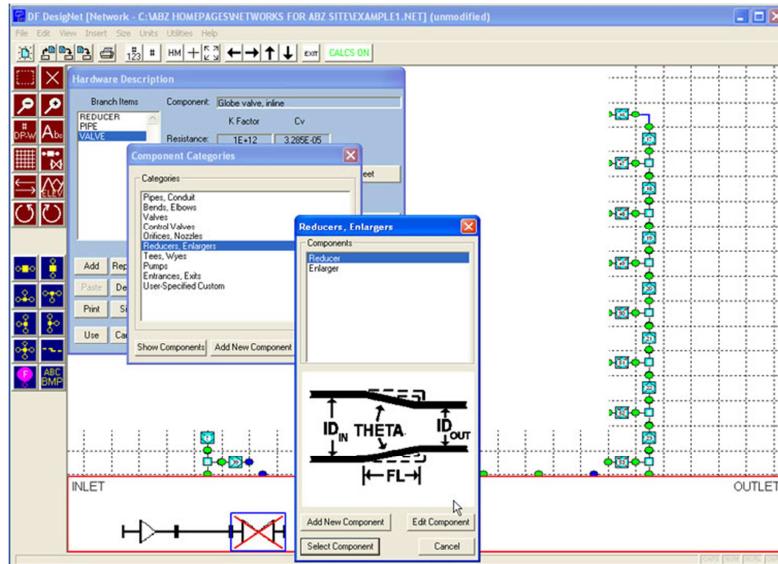


Figura 6.1: Interfaz de Design Net

Se trata en definitiva de un programa de simulación 1D de flujo compresible en instalaciones, no demasiado complejo, en la línea de Pipe-Flo, con la diferencia de que Design Net permite considerar flujo con transmisión de calor.

Para mayor información acerca de Design Net se recomienda la consulta de [6].

## **7. Otros softwares**

Además de los programas ya explicados, se han encontrado los siguientes softwares de interés:

- **Flowmaster V7:** programa CFD para la simulación 1D tanto de redes de tuberías como de diversos sistemas. Útil tanto para flujo compresible como para incompresible, y con posibilidad de simular tanto estado estacionario como transitorios.  
Flowmaster V7 considera gas real y permite la modelar transmisión de calor. La página web no da mucha más información acerca del método de cálculo y de las suposiciones que se llevan a cabo, pero parece ser un software bastante complejo, permitiendo modelar efectos de transmisión de calor.  
Dispone de diversas versiones independientes para la aplicación en problemas concretos: Flowmaster V7 para Aeronáutica, para Energía, para Turbina de Gas, etc. Consultar [7] para mayor información.
- **FreeCalc:** programa on-line muy sencillo que permite realizar cálculos rápidamente y de forma simplificada. Dispone de una aplicación para flujo compresible que, a partir de las condiciones de entrada del gas y especificando las características de la línea (que ha de ser una línea simple, sin recirculaciones), proporciona la caída de presión a la salida de la tubería. A pesar de su simplicidad y poca flexibilidad puede resultar útil a la hora de hacer cálculos rápidos en líneas simples. Sin embargo no muestra las simplificaciones consideradas ni el método de cálculo empleado. Consultar [8] para mayor información.
- **Helix delta-Q:** software útil tanto para flujos estacionarios compresibles como para incompresibles. Fácil de usar y aplicable a grandes instalaciones. Permite el cálculo sobre compresores, válvulas y todo tipo de accesorios y configuraciones.  
Supone flujo adiabático o isotermo, y tiene en cuenta el efecto del bloqueo sónico en caso de que éste se produzca, reduciendo automáticamente el gasto másico circulante. Consultar [9] para mayor información.
- **KYPipe:** software modular con gran número de aplicaciones dentro del transporte de fluidos, tanto compresibles como incompresibles. Mediante su módulo “*Pipe2012: Gas*” permite simular flujo compresible en redes de distribución para condiciones estacionarias. Supone flujo 1D isotermo, y permite elegir entre gas ideal o gas real. Soporta grandes instalaciones y posee una interfaz gráfica avanzada y fácil de usar. No presenta información accesible acerca del tratamiento del fenómeno del bloqueo sónico. Consultar [10] para mayor información.
- **PDrop:** útil herramienta para un dimensionado rápido de instalaciones de tuberías, tanto para líquidos como para fluidos compresibles. Su principal característica es que realiza los cálculos de acuerdo a seis normas distintas (Weymouth, IGT, AGA, Darcy, Panhandle A, Panhandle B), permitiendo al usuario comparar los distintos resultados para un diseño más seguro. Una de las pocas características mostradas en su web es que permite el uso de gas real. Consultar [11] para mayor información.

## 8. Conclusión y comparación de los distintos programas

Se ha creado una tabla para comparar rápidamente los distintos softwares expuestos:

Tabla 8.1. Comparación de los programas estudiados

|  | FreeCalc | PipeFlo | DesignNet | PDrop | Helix Delta Q | KYPipe | Flowmaster V7 | GASworks | AFT Arrow | FluidFlow | CFCFD Project |
|--|----------|---------|-----------|-------|---------------|--------|---------------|----------|-----------|-----------|---------------|
| Gratis   | ✓        | ✗       | ✗         | ✗     | ✗             | ✗      | ✗             | ✗        | ✗         | ✗         | ✓             |
| Grandes sistemas de tuberías                                   | ✗        | ✓       | ✓         | ✓     | ✓             | ✓      | ✓             | ✓        | ✓         | ✓         | ✗             |
| Gas real   | ✗        | ✗       | ✗         | ✓     | ?             | ✓      | ✓             | ✓        | ✓         | ✓         | ✓             |
| Permite elegir tubería isoterma o adiabática                   | ✗        | ✗       | ✓         | ✓     | ✓             | ✗      | ?             | ✗        | ✓         | ✓         | ✓             |
| Permite modelar transmisión de calor                           | ✗        | ✗       | ✓         | ✗     | ?             | ?      | ✓             | ✓        | ✓         | ✓         | ✓             |
| Maneja la restricción al gasto máxico debido al bloqueo sónico | ✗        | ✗       | ?         | ?     | ✓             | ?      | ?             | ✗        | ✓         | ?         | ✓             |
| Permite analizar transitorios                                  | ✗        | ✗       | ✗         | ✗     | ✗             | ✗      | ✓             | ✗        | ✗         | ✓         | ✓             |
| Permite 2-3 D  | ✗        | ✗       | ✗         | ✗     | ✗             | ✗      | ✗             | ✗        | ✗         | ✗         | ✓             |
| Interfaz gráfica interactiva                                   | ✗        | ✓       | ✓         | ✓     | ✓             | ✓      | ✓             | ✓        | ✓         | ✓         | ✗             |

De entre los programas investigados, se ha llegado a la conclusión de que hay un tipo de software de simulación de flujos compresibles con un perfil bastante común, de pago y condiciones relativamente simplificadas, aunque de aplicación directa a la mayoría de problemas de la industria: resuelve grandes redes de tuberías de transporte de gas suponiendo flujo 1D estacionario, con posibilidad de gas ideal o real, flujo isoterma o adiabático, y a veces incluso con posibilidad de modelar transferencia de calor. Tienen una interfaz gráfica interactiva y sencilla de usar. Estos programas poseen extensas bases de datos para obtener las propiedades del fluido, así como bibliotecas con tuberías, válvulas, compresores y accesorios comerciales. Algunas están más enfocadas al diseño y otras a la simulación de la operación, pero las diferencias son pequeñas ya que con cualquier software de este tipo se pueden realizar ambas tareas. En este perfil se encuentran programas como PipeFlo, DesignNet, PDrop, Helix Delta Q, KYPipe, AFT Arrow, etc.

Otro perfil de software de más complejidad sería FluidFlow o Flowmaster V7, que aunque siguen suponiendo flujo 1D, realizan los cálculos de una forma más compleja y con menos simplificaciones, incluyendo módulos para el análisis de transitorios. Permiten además una mayor flexibilidad para ajustarse mejor al problema del cliente, y Flowmaster V7 incluso dispone de softwares específicos para aplicaciones concretas (por ejemplo, para turbina de gas).

Caso aparte son los programas desarrollados por CFCFD Project. Son códigos de libre acceso, muy técnicos y difíciles de interpretar, y con una complejidad mucho mayor que cualquier otro

de la lista. Su precisión es mucho mayor que la de los programas comerciales, y analiza problemas en 2D y 3D, así como casos específicos que los softwares comerciales no pueden simular (flujos supersónicos, flujos de rarefacción, etc.).

Por último mencionar el programa online FreeCalc. Pese a ser extremadamente sencillo y rígido (solo permite una línea simple, con los accesorios ya predefinidos y sin poder acceder al código ni al método de resolución) puede resultar útil para calcular pérdidas de presión en líneas simples.

## **9. Bibliografía Anexo A**

Se muestra a continuación la bibliografía empleada en el presente Anexo:

- [1] <http://kb.eng-software.com/display/ESKB/PIPE-FLO> (22/05/2015)
- [2] <http://www.aft.com/products/arrow> (22/05/2015)
- [3] <http://www.fluidflowinfo.com/> (22/05/2015)
- [4] <http://cfcfd.mechmining.uq.edu.au/> (22/05/2015)
- [5] [http://www.b3pe.com/gasworks\\_info.html](http://www.b3pe.com/gasworks_info.html) (22/05/2015)
- [6] <http://www.abzinc.com/details.php> (22/05/2015)
- [7] <http://www.mentor.com/products/mechanical/flowmaster/flowmaster-general-systems/> (22/05/2015)
- [8] <http://www.freecalc.com/gasfric.htm> (22/05/2015)
- [9] <http://www.helixtech.com.au/prod01.htm> (22/05/2015)
- [10] <http://kypipe.com/> (22/05/2015)
- [11] <http://www.flowphase.com/pdrop.html> (22/05/2015)

## Anexo B: Método de cálculo de los distintos elementos

---

En el presente anexo se explica detalladamente el método de resolución escogido para cada uno de los elementos implementados en el programa (Tramo Recto, Codo, Cambio de Sección, Válvula, Compresor y Orificios) en condiciones de flujo compresible. Se muestran asimismo las fuentes bibliográficas que han servido de apoyo.

Debido a las características del programa respecto al tratamiento del bloqueo sónico, antes de resolver un elemento que tenga la posibilidad de bloquear (tramo recto, cambio de sección, válvula y orificios), se calcula su gasto máscico de bloqueo para las condiciones de presión y temperatura de entrada, con el objetivo de comprobar si el gasto máscico circulante es menor a éste. En caso contrario, se deduce que el elemento considerado se encuentra bloqueado.

### 1. Tramo Recto

En la resolución del cálculo de un tramo recto para flujo compresible, lo primero que hay que tener en cuenta es que la densidad varía considerablemente con la presión. Para simplificar la resolución, se suele utilizar uno de los siguientes casos:

- **Flujo Adiabático:**

Considera que no hay ningún tipo de transmisión de calor entre la tubería y el flujo circulante. Este método de cálculo es por lo tanto muy usado en casos en los que la tubería esté bien aislada, y preferiblemente para longitudes cortas.

- **Flujo Isotermo:**

Se cumple la relación:  $P \cdot V = cte$

La suposición de flujo isotermo es ampliamente utilizada para grandes instalaciones de gases, ya que suele ajustarse bastante bien cuando la longitud de la tubería es elevada (el caso extremo sería una línea de gas natural con varios kilómetros de longitud).

Las relaciones para flujo isotermo proporcionan unos valores más conservadores (mayores caídas de presión para el mismo gasto máscico, o menor gasto máscico para la misma caída de presión) que los obtenidos mediante flujo adiabático.

Se ha implementado la opción de escoger entre *Flujo Adiabático* y *Flujo Isotermo* a la hora de resolver un tramo recto en el programa. A la hora de escoger entre un caso u otro, se recomienda utilizar *Flujo Adiabático* para tuberías cortas con grandes caídas de presión, y *Flujo Isotermo* para tuberías de gran longitud.

A continuación se muestra el método de resolución para ambos modelos.

## 1.1 Flujo Adiabático

Para la resolución de flujo compresible en un tramo recto suponiendo flujo adiabático, se ha utilizado la información que se detalla a continuación [1]:

Se parte de las siguientes suposiciones:

1. Conducto recto, de sección constante.
2. Flujo adiabático estacionario unidimensional.
3. Gas perfecto, con  $C_p$  y  $C_v$  constantes en el tramo a resolver.
4. Trabajo mecánico y variaciones de energía potencial despreciables.
5. El esfuerzo en la pared responde a correlaciones de coeficiente de fricción de *Moody*. Esta suposición es correcta para flujo subsónico, pero no para flujo supersónico, donde el coeficiente de fricción de *Moody* resulta hasta un 50% mayor que los valores experimentales medidos.
6. Flujo no supersónico.

Este tipo de problema es también conocido como *Flujo de Fanno* [1].

Para su resolución se aplican las ecuaciones de continuidad, cantidad de movimiento, energía y la ley de los gases ideales en forma diferencial. Estas ecuaciones se integran desde la entrada, donde se conocen todas las variables del flujo, hacia el punto crítico, en el que, a causa de las pérdidas de presión por fricción, se alcanzan las condiciones de bloqueo sónico. Resolviendo se obtiene la Ecuación (1.1):

$$\frac{\bar{f} \cdot L^*}{D} = \frac{1 - Ma^2}{\gamma \cdot Ma^2} + \frac{\gamma + 1}{2 \cdot \gamma} \cdot \ln \left( \frac{(\gamma + 1) \cdot Ma^2}{2 + (\gamma - 1) \cdot Ma^2} \right) \quad (1.1)$$

$\bar{f}$  es el coeficiente de fricción medio entre el comienzo de la tubería y el punto crítico. Al ser el flujo de gases normalmente totalmente turbulento, en la práctica el tomar un valor medio de  $f$  no supone un error apreciable ya que apenas depende del número de Reynolds [1].

$L^*$  es la longitud necesaria para que un flujo con cierto número de Mach al ingreso de la tubería alcance condiciones sónicas.

$D$  es el diámetro de la tubería. En caso de tratarse de un conducto no circular, sustituir por su diámetro hidráulico.

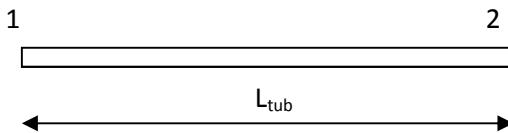
$Ma$  es el número de Mach a la entrada de la tubería.

$\gamma$  es el coeficiente de dilatación adiabática del gas.

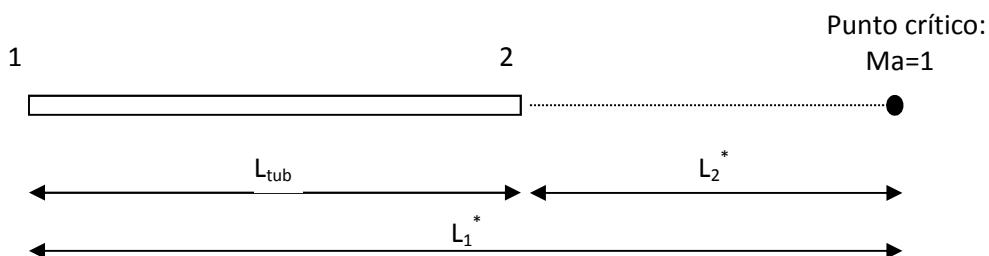
Así pues, se tiene que el cociente  $\frac{\bar{f} \cdot L^*}{D}$ , llamado distancia sónica, depende únicamente del número de Mach a la entrada y del coeficiente de dilatación adiabática del gas. La distancia

sónica es de gran utilidad, ya que permite obtener las condiciones a la salida de la tubería (que no tienen porqué ser sónicas) gracias a la siguiente estrategia:

Se considera el siguiente problema:



Se tiene una tubería de sección constante, con una longitud  $L_{tub}$ , diámetro  $D$  y factor de fricción medio  $\bar{f}$ . Se conocen los datos del estado 1:  $P_1$ ,  $T_1$ ,  $Ma_1$ , etc. y se desea obtener los relativos al estado 2 al final de la tubería. Para ello se hace uso de las distancias sónica:



El gráfico anterior muestra que, puesto que las condiciones finales son iguales (críticas) tanto para la situación de partida 1 como para la 2, la longitud de la tubería es igual a la diferencia entre las longitudes críticas de ambos estados. Puesto en una ecuación:

$$\left(\frac{\bar{f} \cdot L^*}{D}\right)_2 = \left(\frac{\bar{f} \cdot L^*}{D}\right)_1 - \frac{\bar{f} \cdot L_{tub}}{D} \quad (1.2)$$

Al disponer de  $Ma_1$  y  $\gamma$ , se puede calcular fácilmente el valor de  $\left(\frac{\bar{f} \cdot L^*}{D}\right)_1$  mediante la ecuación (1.1), mientras que el valor de  $\frac{\bar{f} \cdot L_{tub}}{D}$  se obtiene sustituyendo con los datos de la tubería. Se tiene pues el valor de la distancia sónica 2:  $\left(\frac{\bar{f} \cdot L^*}{D}\right)_2$ . Esta únicamente depende de  $Ma_2$  y  $\gamma$ , por lo que, conocido el  $\gamma$  característico del gas, se puede obtener  $Ma_2$  a partir de la Ecuación (1.1) mediante un método de resolución de ecuaciones implícitas.

Con esto se consigue calcular el  $Ma$  a la salida de la tubería, pero no se dispone de ninguna otra propiedad del flujo en ese punto. Para calcular el resto de propiedades se hace uso de las propiedades críticas. Estas propiedades son las que presenta un gas cuando su  $Ma$  es igual a 1 (a continuación se denotarán tales propiedades con un asterisco como superíndice):

$$\frac{P}{P^*} = \frac{1}{Ma} \cdot \left( \frac{\gamma + 1}{2 + (\gamma - 1) \cdot Ma^2} \right)^{1/2} \quad (1.3)$$

$$\frac{T}{T^*} = \frac{1}{Ma} \cdot \frac{(\gamma + 1)}{2 + (\gamma - 1) \cdot Ma^2} \quad (1.4)$$

$$\frac{\rho}{\rho^*} = \frac{1}{Ma} \cdot \left( \frac{2 + (\gamma - 1) \cdot Ma^2}{\gamma + 1} \right)^{1/2} \quad (1.5)$$

Como se puede observar de las ecuaciones anteriores, para obtener el ratio entre las propiedades de un fluido en unas condiciones cualesquiera y las correspondientes a su estado crítico, basta con conocer el número de Mach y el  $\gamma$  del fluido.

Puesto que conocemos todas las condiciones a la entrada y el número de Mach a la salida, el resto de propiedades en la salida se obtienen de la siguiente forma:

$$P_2 = P_1 \cdot \frac{P_2}{P^*} \cdot \frac{P^*}{P_1} \quad (1.6)$$

$$T_2 = T_1 \cdot \frac{T_2}{T^*} \cdot \frac{T^*}{T_1} \quad (1.7)$$

$$\rho_2 = \rho_1 \cdot \frac{\rho_2}{\rho^*} \cdot \frac{\rho^*}{\rho_1} \quad (1.8)$$

De esta forma se resuelve el tramo recto, obteniéndose todas las propiedades del flujo a la salida de la tubería.

#### Cálculo del factor de fricción:

En [1] se recomienda utilizar el diagrama de Moody con el Reynolds medio, o su equivalente ecuación de Colebroook-White (ecuación implícita) para el cálculo del factor  $\bar{f}$ .

En [2] se propone el uso de la Ecuación (1.9), que es explícita y presenta un margen de error menor al 1% respecto de Colebrook-White. Esta última ecuación será la utilizada para calcular el factor de fricción.

$$f = \frac{1.325}{\left( \ln \left( \frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right)^2} \quad (1.9)$$

### Cálculo del bloqueo por fricción:

En un tramo recto con fricción existe la posibilidad de que las pérdidas de presión sufridas a lo largo del conducto aceleren el flujo hasta la velocidad del sonido, causando el bloqueo sónico. Hay que tener en cuenta la posibilidad de que se alcancen condiciones sónicas antes de la salida de la tubería, es decir:  $L_{tub} > L^*(Ma_1)$ . En este caso, el flujo se ralentizará hasta que se alcance un número de Mach a la entrada tal que  $L^*(Ma'_1) = L_{tub}$ , es decir, tal que el bloqueo sónico se produzca exactamente en la salida de la tubería.  $Ma'_1$  es lógicamente inferior al  $Ma_1$  anterior, por lo que el gasto másico se reduce para llevar el punto de bloqueo a la desembocadura de la tubería. La tubería está pues restringiendo el gasto másico circulante por la línea, impidiendo que éste supere el valor que hace que se alcance la condición de bloqueo en su desembocadura.

Para evitar este tipo de situaciones, antes de ejecutar la resolución del elemento el programa calculará su gasto másico de bloqueo a partir de las condiciones de presión y temperatura de entrada. Esto se consigue imponiendo  $Ma_2=1$ , por lo que  $\left(\frac{\bar{f} \cdot L^*}{D}\right)_2 = 0$ . Si la distancia sónica de las condiciones de salida vale cero, se tiene que, según la ecuación (1.2), para tener un flujo bloqueado exactamente a la salida de la tubería evaluada basta con cumplir:

$$\frac{\bar{f} \cdot L_{tub}}{D} = \frac{1 - Ma_{1B}^2}{\gamma \cdot Ma_{1B}^2} + \frac{\gamma + 1}{2 \cdot \gamma} \cdot \ln \left( \frac{(\gamma + 1) \cdot Ma_{1B}^2}{2 + (\gamma - 1) \cdot Ma_{1B}^2} \right) \quad (1.10)$$

Puesto que se conocen los parámetros geométricos de la tubería, la única incógnita de la ecuación anterior es  $Ma_{1B}$ , el Mach que haría falta a la entrada para que la tubería bloquease en su desembocadura. Una vez se obtiene  $Ma_{1B}$ , el cálculo del gasto másico de bloqueo del tramo recto evaluado es inmediato:

$$\dot{m}_{bloqueo} = \rho_1 \cdot A_1 \cdot v_{1B} = \rho_1 \cdot A_1 \cdot v_{1B} = \rho_1 \cdot A_1 \cdot Ma_{1B} \cdot \sqrt{\gamma \cdot R \cdot T_1} \quad (1.11)$$

## 1.2 Flujo Isotermo

Para la resolución de flujo compresible en un tramo recto suponiendo flujo isotermo, se utilizan las mismas suposiciones y prácticamente los mismos cálculos que para el caso adiabático.

La diferencia principal es que en este caso:  $T_1 = T_2 = cte$ , lo cual simplifica algunas expresiones, y provoca algunos cambios relevantes. El flujo isotermo no tiende a  $Ma=1$  como lo hacía el flujo adiabático, sino que tiende a  $Ma_{límite} = 1/\gamma^{0.5} = 0.845$  para el aire ( $\gamma = 1.4$ ).

Así pues, la salida isotérmica bloqueada no es sónica, sino que el bloqueo se produce para un  $Ma$  inferior a la unidad [1].

La ecuación para obtener la distancia sónica para el caso isotermo resulta de la siguiente forma:

$$\frac{\bar{f} \cdot L_{max}}{D} = \frac{1 - \gamma \cdot Ma^2}{\gamma \cdot Ma^2} + \ln(\gamma \cdot Ma^2) \quad (1.12)$$

Nótese que en lugar de  $L^*$  ahora se utiliza  $L_{max}$  para evitar confusiones, ya que en el caso isotermo no se llega a condiciones críticas.

Con las ecuaciones (1.2) y (1.12) se resuelve el problema análogamente al caso adiabático para obtener  $Ma_2$ . Con  $Ma_2$  y las condiciones a la entrada se pueden obtener el resto de propiedades a la salida mediante el uso de las siguientes relaciones de propiedades en el punto de bloqueo (ya que ahora no se pueden utilizar las relaciones críticas):

$$\frac{P}{P'} = \frac{\rho}{\rho'} = \frac{1}{Ma \cdot \sqrt{\gamma}} \quad (1.13)$$

$$P_2 = P_1 \cdot \frac{P_2}{P'} \cdot \frac{P'}{P_1} \quad (1.14)$$

$$\rho_2 = \rho_1 \cdot \frac{\rho_2}{\rho'} \cdot \frac{\rho'}{\rho_1} \quad (1.15)$$

$$T_2 = T_1 \quad (1.16)$$

De esta forma se resuelve el tramo recto isotermo, obteniéndose todas las propiedades del flujo a la salida de la tubería.

**Bloqueo por fricción:**

El bloqueo por fricción se calcula análogamente a como se explicó en el apartado anterior para el caso adiabático, pero teniendo en cuenta que ahora el bloqueo no ocurre cuando se alcanza la velocidad del sonido, sino que se da para  $Ma_{límite} = 1/\gamma^{0.5}$ .

## 2. Codo

### 2.1 Resolución

En la resolución del elemento *Codo* se parte de las siguientes suposiciones:

- Flujo adiabático estacionario unidimensional.
- Gas ideal.
- Codo de sección cilíndrica constante.

Para la determinación de las pérdidas de carga producidas para flujo compresible en codos, se ha utilizado la información proporcionada por [3].

La pérdida de carga producida en el codo se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \cdot K_{codo} \cdot \rho_1 \cdot v_1^2 \quad (2.1)$$

Donde:

- $P_1$  corresponde a la presión a la entrada del codo.
- $P_2$  corresponde a la presión a la salida del codo.
- $K_{codo}$  corresponde al coeficiente de pérdidas del codo.
- $\rho_1$  corresponde a la densidad del gas a la entrada del codo.
- $v_1$  corresponde a la velocidad del gas a la entrada del codo.

Tras aplicar la caída de presión al gas, queda por calcular su nueva temperatura. Esto se hace mediante un balance de energía:

$$C_p \cdot (T_2 - T_1) = \frac{1}{2} \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad (2.2)$$

Si se considera gas ideal, y se conoce que circula un gasto máscico  $\dot{m}$ , la velocidad a la salida ( $v_2$ ) se puede calcular como:

$$v_2 = \frac{\dot{m}}{\rho_2 \cdot A} = \frac{\dot{m} \cdot R \cdot T_2}{P_2 \cdot A} \quad (2.3)$$

Combinando las dos ecuaciones anteriores se obtiene el valor de  $T_2$ .

Como se ha visto, el método de cálculo no presenta una gran complicación, y únicamente hay que conseguir el valor de  $K_{codo}$  para aplicar la Ecuación (2.1), como se explica en el apartado siguiente.

## 2.2 Obtención de $K_{codo}$

El valor de  $K_{codo}$  se obtiene como se comentó anteriormente de la referencia [3]. Para el caso de codo de paredes concéntricas y sin cambio de sección se distinguen dos casos en función del cociente entre el radio de curvatura y el diámetro hidráulico del codo:

- $0.5 < R_0/D_H < 1.5$

➤ **Paredes lisas:** si se tienen paredes lisas, y  $Re > 2 \cdot 10^5$  entonces:

$$K_{codo} = K_m + K_f = A_1 \cdot B_1 \cdot C_1 + 0.00035 \cdot \frac{R_0}{D_H} \cdot \delta^\circ \quad (2.4)$$

Con los siguientes parámetros:

$A_1$  depende del ángulo de curvatura ( $\delta^\circ$ ) de la siguiente forma:

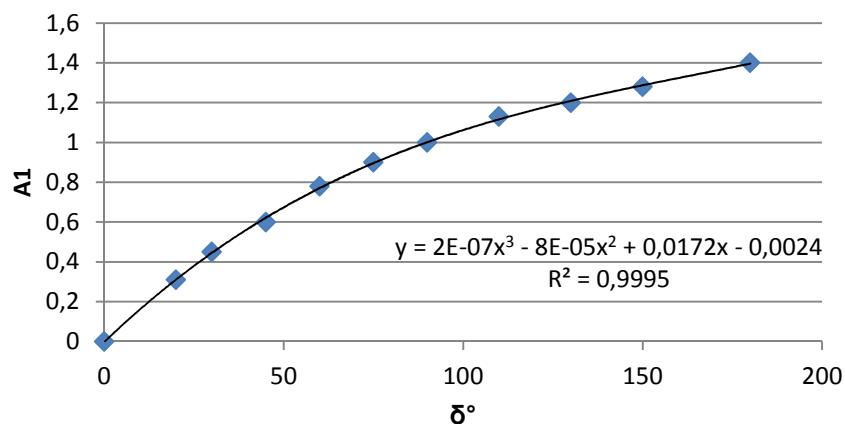


Figura 2.1. Ajuste del coeficiente A1 en función del ángulo de curvatura del codo

Se han ajustado los valores proporcionados por [3] para valores de  $\delta$  desde 0 a 180°, de forma que se pueda crear una función continua que implementar en el programa:

$$A_1 = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \delta^3 - 8 \cdot 10^{-5} \cdot \delta^2 + 0.0172 \cdot \delta - 0.0024 \quad (2.5)$$

$B_1$  depende del cociente  $R_0/D_H$ :

$$B_1 = \frac{0.21}{\left(\frac{R_0}{D_H}\right)^{2.5}} \quad \text{si } 0.5 \leq R_0/D_H \leq 1.0 \quad (2.6)$$

$$B_1 = \frac{0.21}{\left(\frac{R_0}{D_H}\right)^{0.5}} \quad \text{si } R_0/D_H > 1.0 \quad (2.7)$$

$C_1$  depende de la forma de la sección transversal del codo. Para una sección circular:  $C_1 = 1$ .

- **Paredes rugosas:** si se tienen paredes rugosas, para cualquier valor del número de Reynolds se tiene que:

$$K_{codo} = k_\varepsilon \cdot k_{Re} \cdot K_m + K_f \quad (2.8)$$

Donde  $K_m$  y  $K_f$  se calculan de forma idéntica a como se explica en el apartado anterior, mientras que  $k_\varepsilon$  y  $k_{Re}$  se obtienen de la siguiente tabla:

Tabla 2.1. Obtención de  $k_\varepsilon$  y  $k_{Re}$

| $\bar{\varepsilon}$ | $R_0 / D_H$                   |          |                  |                           |                               |          |                               |                            |                  |                            |
|---------------------|-------------------------------|----------|------------------|---------------------------|-------------------------------|----------|-------------------------------|----------------------------|------------------|----------------------------|
|                     | 0.5 – 0.55                    |          |                  |                           | 0.55 – 1.5                    |          |                               |                            |                  |                            |
|                     | $Re$                          |          |                  |                           |                               |          |                               |                            |                  |                            |
|                     | $3 \cdot 10^3 - 4 \cdot 10^4$ |          | $> 4 \cdot 10^4$ |                           | $3 \cdot 10^3 - 4 \cdot 10^4$ |          | $4 \cdot 10^4 - 2 \cdot 10^5$ |                            | $> 2 \cdot 10^5$ |                            |
| $k_{Re}$            | $k_\varepsilon$               | $k_{Re}$ | $k_\varepsilon$  | $k_{Re}$                  | $k_\varepsilon$               | $k_{Re}$ | $k_\varepsilon$               | $k_{Re}$                   | $k_\varepsilon$  | $k_{Re}$                   |
| 0                   | $45 \cdot \lambda_{Re}$       | 1.0      | 1.0              | 1.0                       | $64 \cdot \lambda_{Re}$       | 1.0      | $64 \cdot \lambda_{Re}$       | 1.0                        | 1.0              | 1.0                        |
| 0-0.001             | $45 \cdot \lambda_{Re}$       | 1.0      | 1.0              | $1+500 \cdot \varepsilon$ | $64 \cdot \lambda_{Re}$       | 1.0      | $64 \cdot \lambda_{Re}$       | $\lambda_{Re} / \lambda_l$ | 1.0              | $1+1000 \cdot \varepsilon$ |
| >0.001              | $45 \cdot \lambda_{Re}$       | 1.0      | 1.0              | $\approx 1.5$             | $64 \cdot \lambda_{Re}$       | 1.0      | $64 \cdot \lambda_{Re}$       | $\approx 2.0$              | 1.0              | $\approx 2.0$              |

Los valores de  $\lambda_{Re}$ ,  $\lambda_\varepsilon$  y  $\lambda_l$  se toman de la referencia [3]. Los valores de los coeficientes en cuestión han sido implementados en el programa mediante un árbol lógico que separa los distintos casos.

- **$R_0/D_H > 1.5$**

Método análogo al utilizado para  $0.5 < R_0/D_H < 1.5$ , únicamente cambian los valores numéricos de las tablas y diagramas, que pueden ser consultados en la referencia [3].

### 3. Cambio de sección

La resolución del elemento “Cambio de sección” ha sido dividida en dos partes:

- **Resolución isoentrópica:** se calculan la presión y temperatura a la salida del cambio de sección despreciando la fricción del elemento, y suponiendo por tanto un proceso isoentrópico.
- **Resolución real:** se aplican las pérdidas por fricción sobre la solución isoentrópica calculada en la parte anterior.

En el código el elemento *Cambio de Sección* se resuelve siempre teniendo en cuenta las pérdidas por fricción, pero como la resolución real hace uso de la isoentrópica, se explicarán ambas.

#### 3.1 Resolución isoentrópica

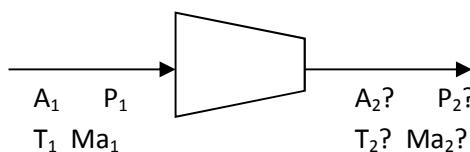
Para obtener una solución isoentrópica del elemento *Cambio de Sección* se aplican las suposiciones utilizadas en el programa *Pipe-Flo*, consistentes en despreciar la fricción del elemento, muy pequeña comparada con el efecto del cambio de área, y suponer un proceso adiabático sin fricción, es decir, isoentrópico.

Se parte pues de las siguientes simplificaciones:

1. Flujo isoentrópico
2. Flujo estacionario 1D
3. Gas perfecto, con  $\gamma$  constante en el elemento a resolver

Para un proceso isoentrópico, se conoce que tanto la temperatura como la presión de remanso ( $T_0, P_0$ ) se mantienen constantes [1].

Se dispone de las condiciones en el punto inicial, así como del gasto másico, y se desea conocer las propiedades del flujo a la salida del cambio de sección. Para ello se aplica el siguiente método de cálculo:



En primer lugar se calcula el área crítica ( $A^*$ ), es decir, la sección para la cual el flujo se volvería crítico [3]:

$$\frac{A}{A^*} = \frac{1}{Ma} \cdot \left[ \frac{1 + 0.5 \cdot (\gamma - 1) \cdot Ma^2}{0.5 \cdot (\gamma + 1)} \right]^{\frac{\gamma+1}{2 \cdot (\gamma-1)}} \quad (3.1)$$

Puesto que se dispone del  $Ma_1$ , la relación obtenida sería  $A_1/A^*$  y, conociendo el valor de la sección a la entrada, se puede calcular el área crítica  $A^*$ .

Con  $A^*$  conocida, se sustituye su valor en la ecuación 3.1 para las condiciones de salida. Al conocer  $A_2$ , y resolviendo la ecuación implícita se obtiene el valor de  $Ma_2$ .

Conociendo  $Ma_2$  se pueden obtener el resto de propiedades a la salida del cambio de sección mediante el uso de las relaciones de propiedades de remanso, que, como se ha dicho anteriormente, se mantienen constantes al ser el elemento isoentrópico:

$$T_0 = T_1 \cdot \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} \cdot Ma_1^2\right) = T_2 \cdot \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} \cdot Ma_2^2\right) \quad (3.2)$$

$$P_0 = P_1 \cdot \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} \cdot Ma_1^2\right)^{\gamma/(\gamma-1)} = P_2 \cdot \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} \cdot Ma_2^2\right)^{\gamma/(\gamma-1)} \quad (3.3)$$

Para calcular  $T_2$  y  $P_2$  basta con aplicar las ecuaciones (3.2) y (3.3). Al conocerse  $T_1$ ,  $P_1$ ,  $Ma_1$  y  $Ma_2$  la obtención de  $T_2$  y  $P_2$  es automática.

**Caso de bloqueo en el cambio de sección:**

Se da por hecho que se parte de un flujo subsónico a la entrada del elemento ( $Ma_1 < 1$ ), por lo que el único cambio de sección en el que se podría producir un bloqueo es en un estrechamiento ( $A_2 < A_1$ ).

El cálculo del bloqueo en el caso del cambio de sección es directo mediante la siguiente ecuación [1].

$$\dot{m}_{bloqueo} = \sqrt{\gamma} \cdot \left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{\frac{\gamma+1}{2\cdot(\gamma-1)}} \cdot A^* \cdot \rho_0 \cdot \sqrt{R \cdot T_0} \quad (3.4)$$

Calculando  $A^*$  mediante la ecuación (3.1) y siendo  $\rho_0$  y  $T_0$  la densidad y temperatura de remanso respectivamente, que al ser la resolución isoentrópica, se mantienen constantes durante el proceso y por tanto pueden ser calculadas a partir de las condiciones de entrada.

### 3.2 Resolución real

A pesar de que algunos programas comerciales como *Pipe-Flo* se quedan en la resolución isoentrópica, ha parecido interesante incluir los efectos de pérdida de presión irreversibles en el elemento *Cambio de Sección*. Para ello se aplica la siguiente ecuación [3]:

$$P_2 = P_{2s} - K \cdot \rho \cdot v^2 \quad (3.5)$$

Refiriéndose  $K$ ,  $\rho$  y  $v$  siempre a la sección de menor diámetro, es decir:

- La sección de salida si es un cambio de sección convergente:  $K_2$ ,  $\rho_2$ ,  $v_2$
- La sección de entrada si es un cambio de sección divergente:  $K_1$ ,  $\rho_1$ ,  $v_1$

El parámetro  $K$  se obtiene, como se ha comentado anteriormente, a partir de la siguiente información [3]:

- Tipo de cambio de sección (convergente o divergente)
- Ángulo del cambio de sección (0-180°)
- Relación de diámetros del cambio de sección:  $D_2/D_1$
- Factor de fricción del cambio de sección:  $f$

Con esta información se obtiene, a través de tablas, el valor de la  $K$  correspondiente al cambio de sección introducido. Dichas tablas han sido incluidas en el código informático, junto con una función de interpolación para calcular el  $K$  correspondiente a cualquier cambio de sección introducido por el usuario.

Una vez se tiene el valor de  $K$  comienza la resolución del elemento, que presenta grandes diferencias entre el caso divergente y el convergente, este último considerablemente más complejo.

#### 3.2.1 Cambio de sección divergente

Si se tiene un ensanchamiento, el método de cálculo es casi inmediato ya que:

- a) No hay posibilidad de bloqueo sónico.
- b) La  $K$  obtenida en tablas corresponde a la sección de entrada, de la que se conoce  $\rho_1$ ,  $v_1$ .

Se calcula pues  $P_2$  directamente mediante la ecuación (3.5), y únicamente queda por calcular  $T_2$ , que estrictamente no será igual a la  $T_2$ , obtenida en la resolución isoentrópica. Para calcular  $T_2$  se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$T_0 = T_1 \cdot \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} \cdot Ma_1^2\right) = T_2 \cdot \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} \cdot Ma_2^2\right) = cte \quad (3.6)$$

$$Ma_2 = \frac{v_2}{\sqrt{\gamma \cdot R \cdot T_2}} = \frac{\dot{m}}{\rho_2 \cdot A_2 \cdot \sqrt{\gamma \cdot R \cdot T_2}} = \frac{\dot{m} \cdot \sqrt{R \cdot T_2}}{P_2 \cdot A_2 \cdot \sqrt{\gamma}} \quad (3.7)$$

Sustituyendo el valor de  $Ma_2$  despejado en la ecuación (3.7) en la ecuación (3.6) se obtiene una ecuación en la cual la única variable desconocida es  $T_2$ :

$$T_2 = \frac{T_0}{1 + \frac{\gamma - 1}{2} \cdot \frac{\dot{m}^2 \cdot R \cdot T_2}{P_2^2 \cdot A_2^2 \cdot \gamma}} \quad (3.8)$$

Resolviendo la ecuación anterior se obtiene el valor de  $T_2$  que cumple que la temperatura de remanso se mantiene constante en el elemento, indicador de un proceso perfectamente adiabático.

### 3.2.2 Cambio de sección convergente

El cambio de sección convergente presenta una mayor complejidad que el caso divergente. Esto es debido a que:

- a) Se puede producir bloqueo sónico, por lo que hay que ser capaces de calcular el gasto máscico de bloqueo del elemento. Este cálculo se detalla en el apartado 3.2.2.2.
- b) La  $K$  considerada corresponde a la sección de salida, de la que se desconoce  $\rho_2$  y  $v_2$ .

Se ha desarrollado un método de cálculo propio para este caso, de forma que se consiga un proceso adiabático (temperatura de remanso constante) en el que, además se cumpla la ecuación (3.5).

#### 3.2.2.1 Resolución del elemento

En un cambio de sección convergente existe la posibilidad de que se produzca un estrangulamiento del flujo, por lo que antes de resolver el elemento se procede a calcular su gasto máscico de bloqueo (cálculo detallado en el siguiente subapartado), con el objeto de comprobar que el gasto máscico con el que se desea calcular el elemento es menor o igual a dicho valor limitante.

Si se comprueba que  $\dot{m} \leq \dot{m}_{bloqueo}$  se procede a calcular el elemento. Para ello se siguen los siguientes pasos:

1. Cálculo de la resolución isoentrópica, tal y como se detalló en el apartado 3.1. De esta resolución se obtienen los siguientes parámetros:  $P_{2s}$ ,  $T_{2s}$  y  $Ma_{2s}$ .
2. Una vez obtenida la solución isoentrópica se plantean las ecuaciones que se han de cumplir para calcular la solución real:

$$P_2 = P_{2s} - K_2 \cdot \rho_2 \cdot v_2^2 = P_{2s} - K_2 \cdot \frac{P_2}{R \cdot T_2} \cdot Ma_2^2 \cdot \gamma \cdot R \cdot T_2 = P_{2s} - K_2 \cdot P_2 \cdot \gamma \cdot Ma_2^2 \quad (3.9)$$

$$T_0 = T_1 \cdot \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} \cdot Ma_1^2\right) = T_2 \cdot \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} \cdot Ma_2^2\right) = cte \quad (3.10)$$

$$Ma_2 = \frac{v_2}{\sqrt{\gamma \cdot R \cdot T_2}} = \frac{\dot{m} \cdot \sqrt{R \cdot T_2}}{P_2 \cdot A_2 \cdot \sqrt{\gamma}} \quad (3.11)$$

Observando las ecuaciones (3.9), (3.10) y (3.11) se tiene que, de todas las variables que en ellas aparecen, las únicas incógnitas son  $T_2$ ,  $P_2$  y  $Ma_2$ . Se tiene pues un sistema de 3 ecuaciones con 3 incógnitas, y por lo tanto, con una única solución.

Tras resolver el sistema se obtienen los valores de  $T_2$ ,  $P_2$  de la solución real, y por tanto, el elemento queda resuelto.

### 3.2.2.2 Cálculo del gasto másico de bloqueo

El primer paso antes de la resolución del elemento *Cambio de Sección*, al igual que en otros elementos con posible bloqueo (tramo recto, válvula y orificios), es calcular su gasto másico de bloqueo para conocer si el flujo circulante por la línea es posible o no. Esto evita gran cantidad de errores de ejecución, dando robustez al programa.

El cálculo del gasto másico de bloqueo del cambio de sección convergente se consigue siguiendo los siguientes pasos:

1. Cálculo del  $\dot{m}_{b,s}$ , el gasto másico de bloqueo obtenido con la resolución isoentrópica (véase Ecuación (3.4)), valor que va a ser siempre superior al buscado, ya que al introducir las pérdidas irreversibles de presión se tiene que  $\dot{m}_b < \dot{m}_{b,s}$ . El gasto másico de bloqueo buscado estará por tanto comprendido entre 0 y  $\dot{m}_{b,s}$ , por lo que se fija dicho intervalo como intervalo de búsqueda de la solución.
2. Se crea una función en *Matlab* que converja a un valor de  $\dot{m}_b$  utilizando una herramienta de *Matlab* de búsqueda de mínimos relativos con la solución acotada entre dos valores ("*fminbnd*"), siguiendo la siguiente estrategia:
  - Entrada de un gasto másico ( $\dot{m}_{in}$ ) comprendido entre 0 y  $\dot{m}_{b,s}$
  - Resolución del elemento con el gasto másico  $\dot{m}_{in}$  siguiendo los pasos explicados en el apartado anterior.
  - Una vez resuelto el elemento con  $\dot{m}_{in}$ , se obtiene  $P_2$  y  $T_2$  reales a la salida del cambio de sección convergente. Con dichas propiedades se obtiene  $\rho_2$  mediante la ecuación de estado, y es inmediato el cálculo del gasto másico que se tendría si  $v_2$  fuese la velocidad del sonido, es decir, el gasto másico de bloqueo ( $\dot{m}_{b,calc}$ ) calculado a partir de  $P_2$  y  $T_2$ :

$$\dot{m}_{b,calc} = \rho_2 \cdot A_2 \cdot v_{sonido} = \frac{P_2}{R \cdot T_2} \cdot A_2 \cdot \sqrt{\gamma \cdot R \cdot T_2} \quad (3.12)$$

- El  $\dot{m}_{b,calc}$ , como es lógico, tendrá un valor distinto de  $\dot{m}_{in}$  a no ser que dicho gasto másico introducido sea exactamente el gasto másico de bloqueo. Así pues, se define el error como:

$$error = \frac{|\dot{m}_{b,calc} - \dot{m}_{in}|}{\dot{m}_{b,calc}} \quad (3.13)$$

Se envía el parámetro *error* a la herramienta de *Matlab* *fminbnd* que, mediante sus algoritmos internos, irá modificando el valor de  $\dot{m}_{in}$  de forma que se minimice el error. Cuando éste sea igual o inferior a  $10^{-4}$  se considera que la solución es lo bastante buena, y se extrae el valor de  $\dot{m}_{in}$  que hace que, tras aplicar la resolución real (incluyendo pérdidas irreversibles de presión), la velocidad a la salida del estrechamiento sea la velocidad del sonido.

3. A la salida de la función detallada se obtiene el gasto mástico de bloqueo del elemento:

$$\dot{m}_b = \dot{m}_{in} \quad (3.14)$$

#### 4. Válvula

A la hora de caracterizar el elemento “Válvula” se ha decidido utilizar la formulación encontrada en [4], que a su vez está basada en las normas *ISA Standard S75.01* así como *IEC Standard 534-2*. La Ecuación (4.1) presenta dicha formulación, de uso común en válvulas por las que circule un fluido compresible (gas o vapor):

$$C_v = \frac{\dot{m}}{N_8 \cdot F_p \cdot P_1 \cdot Y} \cdot \sqrt{\frac{T_1 \cdot Z}{x \cdot M}} \quad (4.1)$$

Donde:

$C_v$  es el coeficiente de flujo de la válvula (unidades británicas)

$\dot{m}$  es el flujo másico que atraviesa la válvula

$N_8$  es una constante numérica dependiente de las unidades utilizadas:

Tabla 4.1. Unidades a utilizar en el elemento válvula y correspondiente valor de  $N_8$

| $N_8$ | $\dot{m}$ | $P, \Delta P$ | $T_1$ |
|-------|-----------|---------------|-------|
| 0.948 | kg/h      | kPa           | K     |
| 94.8  | kg/h      | bar           | K     |
| 19.3  | lb/h      | psia          | R     |

$F_p$  es un factor que tiene en cuenta las pérdidas debidas a la geometría de la válvula, y por tanto, característico para cada caso. Si el usuario no introduce su valor se considerará  $F_p = 1$ .

$P_1$  es la presión a la entrada de la válvula, en unidades consecuentes con las escogidas en la elección del factor  $N_8$ .

$Y$  es el factor de expansión del gas, y se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$Y = 1 - \frac{x}{3 \cdot F_k \cdot x_T} \quad (4.2)$$

Donde:

$F_k = \frac{\gamma}{1.40}$  siendo  $\gamma$  el coeficiente de dilatación adiabática del gas.

$x$  es el ratio de pérdida de presión en la válvula:

$$x = \frac{\Delta P}{P_1} \quad (4.3)$$

$x_T$  es el ratio de pérdida de presión requerido para producir flujo crítico en la válvula cuando  $F_k = 1$ . Es un dato a introducir por el usuario.

Es importante resaltar que cuando  $x \geq F_k \cdot x_T$  se tiene flujo crítico en la válvula. En ese caso, para una  $P_1$  dada, una disminución de  $P_2$  (o un aumento

de  $\Delta P$ ) no van a causar ningún efecto en el flujo másico circulante, que será el máximo. Es por esta razón que valores de  $x$  superiores a  $F_k \cdot x_T$  no deben ser sustituidos en la ecuación 27. Dicho de otra forma, el factor de expansión  $Y$  no puede ser menor de  $1 - \frac{1}{3} = 0.667$ .

$T_1$  es la temperatura absoluta a la entrada de la válvula, en unidades concordantes con las escogidas en la elección del factor  $N_8$ .

$Z$  es el factor de compresibilidad del gas en las condiciones de trabajo. Puesto que se va a trabajar con gas ideal, se supone  $Z=1$ . Según [4], es correcto suponer  $Z=1$  para presiones por debajo de 7 bar, pero empiezan a aparecer errores para presiones mayores.

$x$  es el ratio de pérdida de presión en la válvula, tal y como se ha explicado mediante la ecuación (4.2). Tener en cuenta que si la válvula está bloqueada, se ha de imponer  $x = F_k \cdot x_T$  para mantener el gasto másico constante.

$M$  es el peso molecular del gas, en unidades concordantes con las escogidas en la elección del factor  $N_8$ .

Sustituyendo en la ecuación (4.1) el parámetro  $Y$  por su fórmula mostrada en la ecuación (4.2), se puede observar cómo la única incógnita es el parámetro  $x$ , por lo que para un gasto másico  $\dot{m}$ , y un  $C_v$ ,  $x_t$  y  $F_p$  fijados por el usuario únicamente existe un valor de  $x$  válido. Una vez se haya calculado  $x$ , la presión a la salida de la válvula es de obtención inmediata:

$$P_2 = P_1 \cdot (1 - x) \quad (4.4)$$

La temperatura a la salida se calcula realizando un balance de energía (proceso adiabático irreversible):

$$C_p \cdot (T_2 - T_1) = \frac{1}{2} \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad (4.5)$$

### Cálculo del bloqueo sónico:

El primer paso que se lleva a cabo antes de la resolución del elemento *Válvula*, al igual que en otros elementos con posible bloqueo (tramo recto, cambio de sección y orificios), es calcular su gasto másico de bloqueo para conocer si el flujo circulante por la línea es posible o no. Esto evita gran cantidad de errores de ejecución, dando robustez al programa.

El  $\dot{m}_{bloqueo}$  en la válvula se puede calcular directamente de la ecuación (4.1) al aplicar:

$$x = x_{bloqueo} = F_k \cdot x_t \quad (4.5)$$

Por lo que  $Y = 2/3$  de acuerdo con la ecuación (4.2) y el gasto másico de bloqueo se calcula como:

$$\dot{m}_{bloqueo} = C_v \cdot N_8 \cdot F_p \cdot P_1 \cdot \frac{2}{3} \cdot \sqrt{\frac{F_k \cdot x_t \cdot M}{T_1 \cdot Z}} \quad (4.6)$$

## 5. Compresor

A la hora de modelar el compresor, se ha decidido dar al usuario dos formas de implementarlo:

- Suponiendo un ratio de presión y un rendimiento isoentrópico constantes
- Introduciendo las curvas características del compresor, de forma que dependiendo del gasto másico que circule por la línea se obtenga un ratio de presión y un rendimiento isoentrópico diferente.

Ambos métodos de implementación se explican detalladamente a continuación.

### 5.1 Ratio de presión y rendimiento constantes

Si el elemento *Compresor* se decide implementar a partir de un ratio de presión ( $RP$ ) y un rendimiento isoentrópico ( $\eta_{is}$ ) constantes, el cálculo de sus propiedades de salida en función de las propiedades de entrada es inmediato:

$$P_2 = P_1 \cdot RP \quad (5.1)$$

$$T_2 = T_1 \cdot \left( 1 + \frac{1}{\eta_{is}} \cdot \left( RP^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right) \right) \quad (5.2)$$

Además, en este caso el compresor no presenta limitaciones al gasto másico debido a un posible bombeo o bloqueo, como se verá que puede ocurrir en el caso siguiente.

### 5.2 Uso de las curvas características

La segunda opción pasa por implementar el elemento *Compresor* a través de sus curvas características. Existen dos tipos de mapas para definir el funcionamiento del compresor:

- Mapa de ratio de presión frente a gasto másico corregido

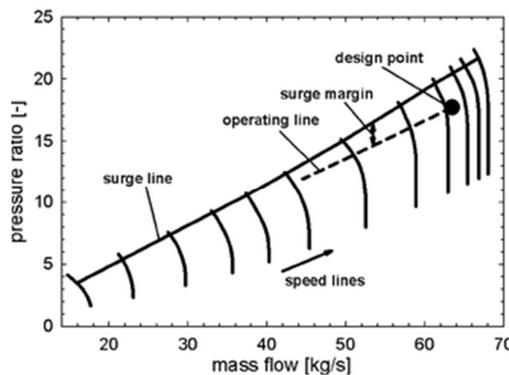


Figura 5.1. Mapa de ratio de presión frente a gasto másico corregido

El mapa mostrado en la figura anterior muestra distintas curvas de funcionamiento del compresor, cada una correspondiente a un valor de velocidad corregida constante. El gasto másico corregido y la velocidad corregida se definen respectivamente como:

$$\dot{m}_c = \dot{m} \cdot \frac{\sqrt{T_1}}{P_1} \quad (5.3)$$

$$N_c = \frac{N (r.p.m.)}{\sqrt{T_1}} \quad (5.4)$$

Así pues, si el usuario conoce el valor de  $N_c$  al que está trabajando el compresor, puede introducir al programa la curva característica correspondiente a dicho valor de  $N_c$ , y éste dispondrá de un rango de gasto másico dentro del cual el compresor puede operar.

Partiendo del gasto másico circulante por la línea y de las condiciones de presión y temperatura de entrada al compresor, el programa calcularía el  $\dot{m}_c$  mediante la ecuación (5.3), y a partir de dicho valor, el ratio de presión (RP) correspondiente según la ecuación de la curva introducida por el usuario. Una vez obtenido el RP,  $P_2$  se calcularía a través de la ecuación (5.1).

- **Mapa de rendimiento isoentrópico frente a gasto másico corregido**

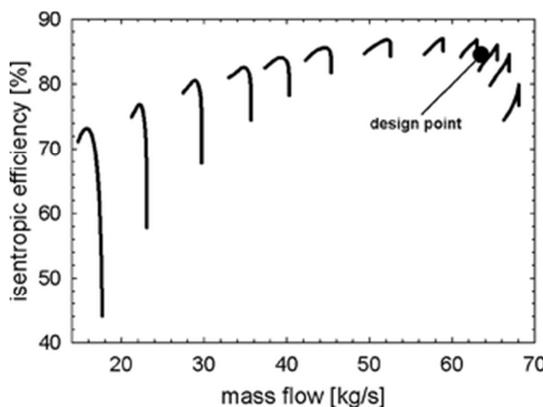


Figura 5.2. Mapa de rendimiento isoentrópico frente a gasto másico corregido

Análogamente a lo visto en el mapa de presiones, para cada valor de  $N_c$  se dispone de una curva que proporciona el rendimiento isoentrópico del compresor en función del gasto másico corregido, calculado a partir del gasto másico, la presión y temperatura de entrada al compresor según la ecuación (5.3).

Una vez se obtiene el valor del rendimiento isoentrópico ( $\eta_{is}$ ) correspondiente según la curva característica, se calcula  $T_2$  a través de la ecuación (5.2).

El uso de las curvas características conlleva la existencia de unos gastos másicos corregidos mínimo y máximo, correspondientes respectivamente a los límites de bombeo y bloqueo del compresor, tal y como se muestra en la siguiente figura:

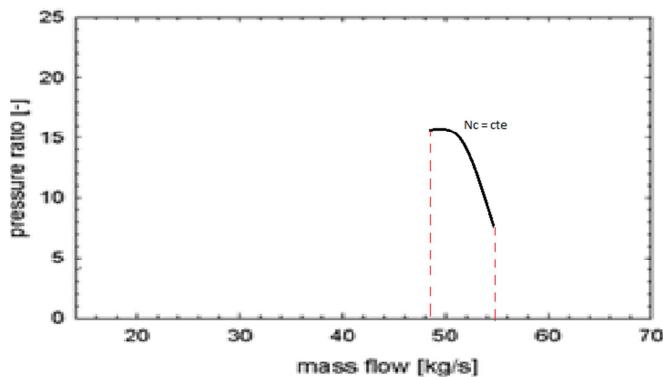


Figura 5.3. Curva de  $N_c = \text{cte}$ . En rojo se muestran los límites de bombeo y bloqueo

En la figura anterior se puede observar cómo existe un límite inferior de gasto máscico corregido en el cual el ratio de presión obtenido en el compresor es máximo. Dicho punto es conocido como límite de bombeo, y el compresor no puede operar para gastos corregidos inferiores a él. Análogamente, el límite de bloqueo restringe el caudal máscico que puede circular por el compresor.

De esto se deduce que, si una línea posee un compresor con unos límites de bombeo y de bloqueo ( $\dot{m}_{c,min}$  y  $\dot{m}_{c,max}$  respectivamente) el gasto máscico que puede circular por dicha línea deberá estar comprendido en el intervalo de funcionamiento del compresor, actuando éste como un elemento que puede restringir el flujo.

## 6. Orificios

El elemento “*Orificios*” representa un tipo de elemento en el que, desde una tubería, el flujo pasa a través de unos pequeños agujeros (que pueden estar o no bloqueados) para ser descargado en unas condiciones distintas, bien en otro conducto o bien en un depósito o ambiente.

La implementación de este elemento se ha basado en la teoría encontrada en [5]. Suponiendo flujo isoentrópico en el orificio, se propone la siguiente ecuación:

$$\dot{m} = C_d \cdot A \cdot \frac{P_1^0}{\sqrt{R \cdot T_1^0}} \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\gamma}{\gamma - 1} \cdot \left[ \left( \frac{P_2}{P_1^0} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left( \frac{P_2}{P_1^0} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]} \quad (6.1)$$

Siendo:

- $C_d$  el coeficiente de descarga del orificio
- $A$  el área de paso del orificio
- $P_1^0$  la presión de remanso a la entrada del orificio
- $T_1^0$  la temperatura de remanso a la entrada del orificio
- $R$  la constante del gas
- $\gamma$  el coeficiente de dilatación adiabática

El coeficiente de descarga ( $C_d$ ) puede ser:

- a) Introducido por el usuario
- b) Estimado por el programa en función de las dimensiones del orificio, en concreto, de su relación de aspecto: espesor / diámetro. Más adelante, dentro de este capítulo, se explicará en detalle cómo se calcula el  $C_d$ .

Tras la salida del flujo del orificio, se supone que éste presenta una pérdida irreversible de presión debida a que la deceleración que sufre el flujo no se corresponde con un aumento de su presión estática.

Respecto a la temperatura de salida, ésta se calcula mediante un balance de energía suponiendo flujo adiabático.

### Cálculo del bloqueo sónico:

El primer paso que se lleva a cabo antes de la resolución del elemento *Orificios*, al igual que en otros elementos con posible bloqueo (tramo recto, cambio de sección y válvula), es calcular su gasto másico de bloqueo para conocer si el flujo circulante por la línea es posible o no. Esto evita gran cantidad de errores de ejecución, dando robustez al programa.

El  $\dot{m}_{bloqueo}$  en los orificios se puede calcular sustituyendo en la ecuación (6.1) el valor de presión a la salida ( $P_2$ ) por su valor crítico:

$$P_{2,crit} = P_1^0 \cdot \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (6.2)$$

Tras la sustitución de  $P_2$  por  $P_{2,crit}$ , se obtiene:

$$\dot{m}_{bloqueo} = C_d \cdot A \cdot \frac{P_1^0}{\sqrt{R \cdot T_1^0}} \cdot \sqrt{\gamma \cdot \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (6.3)$$

### Obtención de $C_d$ :

El  $C_d$  o coeficiente de descarga es un parámetro que se encarga de corregir la sección del orificio, reduciéndola a una sección eficaz inferior a la geométrica, teniendo así en cuenta el efecto de la vena contracta.

El  $C_d$  es un parámetro muy importante a la hora de modelar el elemento *Orificios*, por lo que en caso de que el usuario disponga de él, se recomienda su introducción en lugar de dejar que el programa lo estime. En caso contrario, se ha encontrado que para el modo de funcionamiento habitual de los orificios en muchas de sus aplicaciones (flujo bloqueado), el coeficiente de descarga del orificio puede estimarse en base a la relación anchura/diámetro del mismo [6]:

Tabla 6.1. Estimación del coeficiente de descarga para el caso de bloqueo de orificios

| Ratio anchura/diámetro | Coeficiente de descarga (bloqueo)      |
|------------------------|--|
| 0                      | 1                                      |
| 0 a 1                  | 1 a 0.81                               |
| 1 a 7                  | 0.81                                   |
| Mayor que 7            | Menor de 0.81 (flujo de <i>Fanno</i> ) |

En el programa se ha implementado la información de la tabla anterior, y en función del ratio anchura/diámetro de los orificios introducidos por el usuario, se estima un  $C_d$  interpolando entre los valores de dicha tabla. Hay que tener en cuenta que, si los orificios introducidos presentasen un ratio anchura/diámetro mayor que 7, comenzarían a producirse efectos de fricción considerables (flujo de *Fanno*), y el elemento no podría ser considerado estrictamente como un orificio.

Hay que tener en cuenta que los valores de  $C_d$  estimados de esta forma son válidos únicamente para el caso de bloqueo de los orificios, pudiendo ser muy distintos si la velocidad del flujo a través de los orificios es baja. En este caso el usuario debería introducir el valor de  $C_d$  adecuado al programa.

## **Bibliografía Anexo B**

Se muestra a continuación la bibliografía empleada en el presente Anexo:

- 1] White F.M.; *Fluid Mechanics*; McGraw-Hill; 1994.
- 2] *Pipe-Flo*; [22/05/2015]; <http://kb.eng-software.com/display/ESKB/PIPE-FLO>
- 3] Idel'chik, I. E.; *Memento des pertes de charge*; Eyrolles; 1986.
- 4] Masoneilan; *Control Valve Sizing Handbook*; 2000.
- 5] Mallamo F.; *Appunti del corso di Macchine*; Politecnico di Torino; [27/05/2015]; [http://corsiadistanza.polito.it/corsi/pdf/08BNIDN/Cap4\\_moto\\_in\\_condotti.pdf](http://corsiadistanza.polito.it/corsi/pdf/08BNIDN/Cap4_moto_in_condotti.pdf)
- 6] *AFT Arrow*; [22/05/2015]; <http://www.aft.com/documents/AFT-Modeling-Choked-Flow-Through-Orifice.pdf>



## Anexo C: Método de cálculo de *Línea Simple*

---

En el presente anexo se explica el método de resolución desarrollado para la configuración *Línea Simple*, que constituye la base del funcionamiento del programa. Existen dos modos de cálculo para esta configuración:

- *Modo A*: el usuario fija el gasto másico circulante, por lo que el programa debe calcular la caída de presión producida en dicha línea partiendo de sus condiciones de presión y temperatura de entrada.
- *Modo B*: el usuario fija las condiciones de entrada y salida de la línea (que pueden ser estáticas o de remanso), y el programa deberá calcular el gasto másico circulante por la línea.

Debido a las diferencias de funcionamiento entre ambos modos de cálculo, éstos se explicarán de forma separada.

### 1. Línea Simple: Modo de cálculo A

El método de resolución de *Línea Simple A* parte de la siguiente información introducida por el usuario:

- Presión y temperatura de entrada de línea (propiedades estáticas):  $P_1, T_1$ .
- Gasto másico circulante:  $\dot{m}$

Tiene como objetivo calcular las propiedades estáticas de salida de la línea:  $P_2, T_2$ . El método de resolución es simple: ir resolviendo secuencialmente elemento a elemento con el gasto másico fijado por el usuario, asignando la presión y temperatura de salida de un elemento como presión y temperatura de entrada del siguiente.

La resolución se complica si se tiene en cuenta la posibilidad de que se produzca bloqueo sónico en alguno de los elementos de la línea, o que el gasto másico corregido a la entrada de un compresor caiga fuera de su rango operativo. Se ha decidido crear una herramienta de cálculo robusta frente a posibles restricciones del gasto másico: en caso de que se detecte que el gasto másico introducido por el usuario es superior (o inferior) al permitido por la línea, el programa no sólo indicará al usuario la imposibilidad de calcular la línea con los datos introducidos, sino que además informará del valor del gasto másico límite que puede circular por la línea introducida. Para ello es de gran importancia el hecho de poder calcular el gasto másico de bloqueo para cada tipo de elemento como paso previo a su resolución, tal y como se explicó en el Anexo B.

## 1.1 Caso de bloqueo sónico

En este apartado se explica el método de cálculo de una línea simple en el caso en el que el gasto másico introducido por el usuario resulte ser superior al gasto másico de bloqueo de alguno de los elementos de la línea. Debido a la relativa complejidad del código no se entrará a describir éste en detalle, sino que se ha preferido explicar de una forma general su método de funcionamiento.

Póngase por ejemplo el caso en que el elemento  $i$  de la línea se bloquease con el gasto másico  $\dot{m}_{in}$  introducido por el usuario. En ese caso, previamente a resolver el elemento  $i$ , se calcularía su gasto másico de bloqueo  $\dot{m}_b$ , cumpliéndose que  $\dot{m}_{in} > \dot{m}_b$ . Se detectaría por tanto que el elemento  $i$  se encuentra bloqueado, y que el gasto másico impuesto a la línea es superior al máximo que ésta puede soportar. Al conocerse esto antes del cálculo del elemento en cuestión, se protege al programa frente a posibles fallos de ejecución ( $Ma$  supersónicos, presiones negativas, etc.).

Una vez se sabe que el gasto másico introducido por el usuario ( $\dot{m}_{in}$ ) no puede circular por la línea simple analizada debido al bloqueo del elemento  $i$ , comienza el proceso de cálculo del gasto másico máximo que puede circular por la línea,  $\dot{m}_{sol}$ , que corresponderá al  $\dot{m}$  que bloquee exactamente el elemento  $i$ . Para ello se sigue la siguiente estrategia:

- Si el elemento bloqueado es el primero ( $i = 1$ ), el gasto másico que bloquea dicho elemento es directamente el calculado en el paso anterior ( $\dot{m}_b$ ), ya que un cambio de gasto másico no altera su presión y temperatura de entrada, que están fijadas por el usuario:  $\dot{m}_{sol} = \dot{m}_b$ .
- En caso contrario ( $i > 1$ ), el gasto másico que bloquea exactamente dicho elemento ( $\dot{m}_{sol}$ ) será:
  - Inferior al gasto másico inicial ( $\dot{m}_{in}$ ), ya que en caso contrario al resolver la línea con  $\dot{m} = \dot{m}_{in}$  no habría aparecido bloqueo en el elemento  $i$ , como es obvio:  $\dot{m}_{sol} < \dot{m}_{in}$ .
  - Superior al  $\dot{m}_b$  calculado en el paso anterior, ya que como se sabe con certeza que  $\dot{m}_{sol} < \dot{m}_{in}$ , se sabe que la presión de entrada del elemento  $i$  cuando la línea se resuelva con  $\dot{m} = \dot{m}_{sol}$  será mayor que la presión de entrada de dicho elemento cuando la línea se resuelva con  $\dot{m} = \dot{m}_{in}$ , lo cual implica que:

$$\dot{m}_b(\dot{m} = \dot{m}_{sol}) = \dot{m}_{sol} > \dot{m}_b(\dot{m} = \dot{m}_{in}) \quad (1.1)$$

Esto se puede observar más claramente en el siguiente gráfico, en el cual se representa en el eje de abscisas el gasto másico circulante por la línea, y en el de ordenadas el gasto másico de bloqueo calculado para el elemento  $i$ :

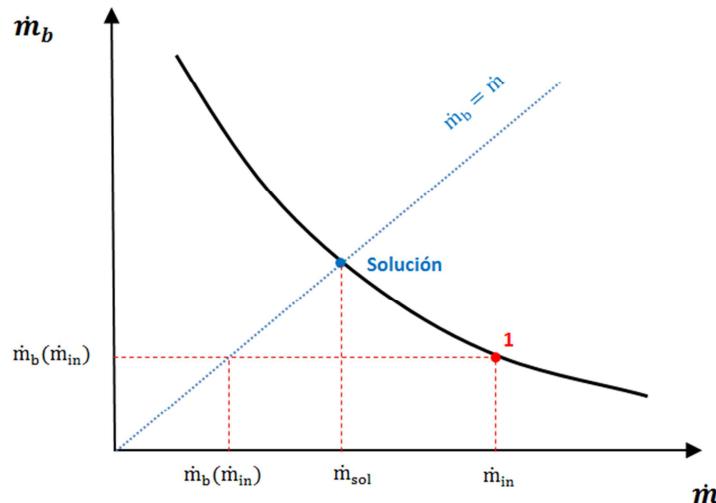


Figura 1.1. Evolución del gasto másico de bloqueo con el gasto másico de la línea

En la figura anterior se observa cómo al aumentar el gasto másico que circula por la línea ( $\dot{m}$ ), el gasto másico de bloqueo del elemento  $i$  ( $\dot{m}_b$ ) disminuye, debido a la menor presión disponible a la entrada de dicho elemento. Esta menor presión conlleva una menor densidad, lo que implica que, para el mismo elemento, el gasto másico de bloqueo sea inferior.

Se ha partido de la situación indicada en el punto 1 de la figura 1.1: se ha resuelto la línea aguas arriba del elemento  $i$  con un gasto másico  $\dot{m}_{in}$ . Cuando se ha llegado al elemento  $i$ , se tiene que  $\dot{m}_{in} > \dot{m}_b(\dot{m} = \dot{m}_{in})$ , por lo que se sabe que el elemento  $i$  se encuentra bloqueado. Se quiere encontrar la solución que cumple:

$$\dot{m}_{sol} = \dot{m}_b(\dot{m} = \dot{m}_{sol}) \quad (1.2)$$

Indicada en la figura 1.1 como el corte entre la curva característica de bloqueo del elemento  $i$  y la bisectriz ( $\dot{m}_b = \dot{m}$ ).

Dicha solución  $\dot{m}_{sol}$  debe estar necesariamente comprendida, por los motivos comentados anteriormente, entre el gasto másico introducido  $\dot{m}_{in}$  y  $\dot{m}_b(\dot{m}_{in})$ , por lo que se tiene acotado el problema. Para encontrar la solución se aplica un método iterativo en el cual se resuelve la línea simple desde su comienzo con un gasto másico:

$$\dot{m}_{in}' = \frac{\dot{m}_{in} + \dot{m}_b(\dot{m} = \dot{m}_{in})}{2} \quad (1.3)$$

Al ser dicho caudal inferior a  $\dot{m}_{in}$  no va a causar bloqueos en elementos anteriores al elemento  $i$ . Una vez se llega al elemento  $i$  se evalúa:

a) Si  $\dot{m}_b(\dot{m} = \dot{m}'_{in}) = \dot{m}'_{in}$  con una tolerancia de  $10^{-4}$  respecto al error relativo se ha encontrado la solución:  $\dot{m}_{sol} = \dot{m}'_{in}$

b) Si  $\dot{m}_b(\dot{m} = \dot{m}'_{in}) < \dot{m}'_{in}$  el  $\dot{m}'_{in}$  introducido aún es demasiado elevado para la línea. Visto sobre la figura 1.1, seguimos estando en la situación representada:  $\dot{m}'_{in}$  está situado a la derecha de  $\dot{m}_{sol}$ . Se vuelve a repetir el proceso:

$$\dot{m}_{in}'' = \frac{\dot{m}_{in}' + \dot{m}_b(\dot{m} = \dot{m}_{in}')}2 \quad (1.4)$$

c) Si  $\dot{m}_b(\dot{m} = \dot{m}'_{in}) > \dot{m}'_{in}$  el  $\dot{m}'_{in}$  introducido es demasiado pequeño: el programa detecta que el elemento  $i$  no está bloqueando, cuando realmente se está buscando su gasto másico de bloqueo. Visto sobre la figura 1.1,  $\dot{m}'_{in}$  estaría situado a la izquierda de  $\dot{m}_{sol}$ . Para la resolución esto da igual, ya que se vuelve aplicar el mismo proceso con:

$$\dot{m}_{in}'' = \frac{\dot{m}_{in}' + \dot{m}_b(\dot{m} = \dot{m}_{in}')}2 \quad (1.5)$$

Este proceso ha sido implementado en un bucle en el que se resuelve la línea simple introducida tantas veces como sea necesario hasta alcanzar el gasto másico solución ( $\dot{m}_{sol}$ ) que hace que el elemento  $i$  se bloquee exactamente con un gasto másico  $\dot{m}_{sol}$ . En el código informático, además del algoritmo explicado, se han tenido en cuenta las siguientes problemáticas:

- En caso de que se bloquee más de un elemento en serie: guardar los gastos másicos de bloqueo de cada elemento, de forma que el gasto másico reim puesto a la línea nunca pueda ser superior al mínimo de dichos valores. Por ejemplo, si antes del elemento  $i$  se tiene que el elemento  $i - j$  (con  $j < i$ ) se había bloqueado con un  $\dot{m}_{sol}(i - j)$ , comprobar cada vez que se recalcule la línea que el gasto másico asignado nunca sea superior a  $\dot{m}_{sol}(i - j)$ , ya que en caso contrario el elemento  $i - j$  se bloquearía, entrando en un bucle sin fin en el que se alternaría la resolución de ambos elementos.
- En caso de que se tenga un compresor que impone un gasto másico mínimo a la línea (como se explicará en el siguiente apartado), comprobar que el gasto másico reim puesto a la línea nunca pueda ser inferior a dicho gasto mínimo. Esto puede dar pie a líneas simples imposibles de resolver si el gasto mínimo fijado por el compresor fuese superior al gasto másico de bloqueo de alguno de los elementos de la línea. En este caso, el programa detectaría esta incompatibilidad y avisaría de ella al usuario.

## 1.2 Caso de caer fuera de rango en un compresor

La segunda causa de que el gasto másico introducido por el usuario ( $\dot{m}_{in}$ ) no sea viable una vez se comienza a resolver la línea es que, aplicando dicho  $\dot{m}_{in}$ , el gasto másico corregido a la entrada de un compresor ( $\dot{m}_c$ ) caiga fuera de su rango de operación estable. Para más información acerca del elemento *Compresor*, la variable  $\dot{m}_c$  y el rango de operación estable de un compresor se recomienda acudir al capítulo 5 del Anexo B.

Hay dos posibles casos por los que el compresor se puede detectar fuera de rango:

- Si  $\dot{m}_c(\dot{m}_{in}) > \dot{m}_{c,max}$  el compresor se encuentra por encima de su límite de bloqueo. Se debe encontrar un  $\dot{m}_{sol} < \dot{m}_{in}$  tal que el compresor se encuentre exactamente en su límite de bloqueo. Para ello se sigue exactamente la misma estrategia que la descrita en el apartado anterior para el caso de bloqueo del resto de elementos, hasta obtener un  $\dot{m}_{sol}$  tal que:

$$\dot{m}_c(\dot{m}_{sol}) = \dot{m}_{c,max} \quad (1.6)$$

Y el compresor se encuentre exactamente en su límite de bloqueo.

- Si  $\dot{m}_c(\dot{m}_{in}) < \dot{m}_{c,min}$  el compresor se encuentra por debajo de su límite de bombeo. Este caso es diferente al anterior, ya que ahora el compresor demanda un mayor gasto másico de la línea:  $\dot{m}_{sol} > \dot{m}_{in}$ . El hecho de iterar con gastos másicos superiores a  $\dot{m}_{in}$  implica la posibilidad de que se bloqueen elementos aguas arriba del compresor que antes no se habían bloqueado. Esto se tiene en cuenta a la hora de asignar nuevos caudales a la línea, y nunca se asigna un gasto másico a la línea que bloquee algún elemento aguas arriba del compresor.

Si aplicando esta restricción se tiene que, aun calculando la línea con su gasto másico máximo ( $\dot{m}_{in,max}$ ), en la entrada del compresor se comprueba que  $\dot{m}_c(\dot{m}_{in,max}) < \dot{m}_{c,min}$  es evidente que la línea propuesta no tiene solución: un elemento aguas arriba del compresor limita el gasto másico a  $\dot{m}_{in,max}$ , valor con el cual el compresor se sitúa por debajo de su límite de bombeo. Para entrar en su rango de operación estable el compresor debería aumentar el caudal que lo atraviesa, pero el elemento bloqueado aguas arriba se lo impide. El programa notifica al usuario de este hecho y finaliza su ejecución.

Si por el contrario se comprueba que  $\dot{m}_c(\dot{m}_{in,max}) > \dot{m}_{c,min}$ , la línea puede aumentar el gasto másico de forma que se consiga encontrar una solución sin bloquear ningún elemento aguas arriba del compresor. Se sigue una estrategia análoga a la explicada en el caso de bloqueo, hasta obtener un  $\dot{m}_{sol}$  tal que:

$$\dot{m}_c(\dot{m}_{sol}) = \dot{m}_{c,min} \quad (1.7)$$

Y el compresor se encuentre exactamente en su límite de bombeo.

Otro caso a tener en cuenta es la posibilidad de que, tras encontrar una solución tal que el compresor se encuentre exactamente en su límite de bombeo, al continuar el cálculo de la línea aguas abajo del compresor, se produzca el bloqueo de un elemento. Esto provoca que automáticamente la línea introducida no tenga solución, ya que si se restringiese el gasto másico para acomodarlo al bloqueo del nuevo elemento, el compresor pasaría inmediatamente a trabajar fuera de su zona de operación estable.

## 2. Línea Simple: Modo de cálculo B

El método de resolución de *Línea Simple B* parte de la siguiente información introducida por el usuario:

- Presión y temperatura de entrada de línea (propiedades estáticas o de remanso):  $P_1, T_1$ .
- Presión y temperatura de salida de línea (propiedades estáticas o de remanso):  $P_2, T_2$ .

Y tiene como objetivo calcular el gasto másico circulante. El método de resolución es más complejo que el de *Línea Simple A*, aunque se ayuda continuamente de ésta última herramienta.

La resolución de *Línea Simple B* se divide en dos casos totalmente distintos:

### B1. Caso en el que no se produce bloqueo sónico en la línea:

Si no se produce bloqueo en ningún elemento de la línea, el problema se reduce a la búsqueda de un  $\dot{m}$  tal que la presión a la salida de la línea coincida (dentro de una tolerancia) con la presión objetivo introducida por el usuario.

### B2. Caso en el que se produce bloqueo sónico en la línea:

Si se produce bloqueo sónico en algún elemento de la línea, el gasto másico circulante es fijo:  $\dot{m}_{bloqueo}$ , por lo que el tipo de problema a resolver cambia totalmente: con un gasto másico  $\dot{m}_{bloqueo}$  constante, y partiendo de unas condiciones  $P_1$  y  $T_1$ , se deben calcular las ondas de choque producidas a la salida del elemento bloqueado tales que la presión de salida de la línea coincida con el valor de  $P_2$  objetivo.

Por supuesto, a priori el programa no conoce en cuál de los dos casos se encuentra, por lo que se utilizará una estrategia para determinar el tipo de problema introducido antes de pasar a la resolución. Esta estrategia se explica en el siguiente apartado.

### 2.1 Determinación del tipo de problema a resolver

Como se ha dicho anteriormente, antes de resolver la línea simple tipo B se ha de determinar a qué tipo de problema se enfrenta el programa (B1 o B2). Para ello se sigue la siguiente estrategia:

#### 1. Cálculo del gasto másico mínimo ( $\dot{m}_{min}$ ) de la línea: comprobación de que existe solución

El programa comprueba si la línea simple introducida posee un compresor con una curva característica introducida cuyo  $\dot{m}_{c,min} > 0$ :

- En caso de que no sea así, se sabe que  $\dot{m}_{min} = 0$ , y se pasa al punto siguiente.

- En caso contrario, se calcula el  $\dot{m}_{min}$  de la línea, resolviéndola para dicho gasto másico. Se comprueba la presión de salida de la línea obtenida:
  - Si  $P_2(\dot{m} = \dot{m}_{min}) < P_{2,obj}$  la línea introducida no tiene solución: aun aplicando el gasto másico mínimo posible a la línea (y situando por tanto al compresor en su límite de bombeo), se tiene que la presión calculada al final de la línea es inferior a la  $P_2$  objetivo. No es posible disminuir aún más el gasto másico debido al compresor, por lo que no se puede aumentar la presión de salida de ningún modo.
  - Si  $P_2(\dot{m} = \dot{m}_{min}) \geq P_{2,obj}$  se pasa al punto siguiente.

## 2. Cálculo del gasto másico máximo ( $\dot{m}_{max}$ ) de la línea

Se calcula el gasto másico máximo ( $\dot{m}_{max}$ ) que puede circular físicamente por la línea introducida: para ello se va calculando la línea simple con gastos másicos cada vez mayores hasta que uno de sus elementos bloquee, guardando el valor de gasto másico para el cual esto ocurre. También se guarda si el elemento que ha bloqueado es un compresor (dicho de una forma más correcta, el compresor ha alcanzado su límite de bloqueo) o cualquier otro tipo de elemento (tramo recto, cambio de sección, válvula u orificios).

## 3. Resolución de la línea con su $\dot{m}_{max}$ : clasificación por casos

Se resuelve la línea simple aplicando un gasto másico  $\dot{m} = \dot{m}_{max}$ . Se obtiene de esta forma la presión de salida de la línea cuando el gasto másico es el máximo posible:  $P_{2,bloqueo}$ . Se sabe que esta presión es la mínima alcanzable en la salida de la línea, ya que no se puede aumentar el gasto másico por encima de  $\dot{m}_{max}$ . De esta forma, se puede clasificar el problema:

- Si  $P_2(\dot{m} = \dot{m}_{max}) < P_{2,obj}$  el gasto másico solución ( $\dot{m}_{sol}$ ) es inferior a  $\dot{m}_{max}$ . Se sabe con certeza entonces que el problema a resolver es de tipo B1: la línea no se encuentra bloqueada, por lo que se puede ajustar la presión de salida a su valor objetivo modificando el gasto másico entre sus extremos conocidos:  $\dot{m}_{min}$  y  $\dot{m}_{max}$ .
- Si  $P_2(\dot{m} = \dot{m}_{max}) > P_{2,obj}$  se tiene que, aun aplicando el gasto másico máximo posible a la línea (el de bloqueo), la presión a su salida es superior a la indicada por el usuario. Este caso es físicamente posible, y se debe a la aparición de ondas de choque a la salida de los elementos bloqueados. Estas ondas de choque producen caídas bruscas e irreversibles en la presión del flujo.

Se determina pues que el problema a resolver es de tipo B2: la línea se encuentra bloqueada con un gasto másico  $\dot{m}_{max}$ , y el problema consiste en calcular las caídas de presión irreversibles (debidas a las ondas de choque)

necesarias para que la presión a la salida de la línea sea la introducida por el usuario.

## 2.2 Resolución del problema tipo B1

Si el programa ha determinado que el problema introducido por el usuario es de tipo B1, la resolución es casi inmediata: se tiene que buscar un gasto másico  $\dot{m}_{sol}$  tal que:

$$P_2(\dot{m} = \dot{m}_{sol}) = P_{2,obj} \quad (2.1)$$

Se acepta un error relativo de  $10^{-4}$  entre  $P_2$  calculada y  $P_{2,obj}$  para dar la solución por correcta.

Se sabe que  $\dot{m}_{sol}$  se encuentra acotada entre  $\dot{m}_{min}$  y  $\dot{m}_{max}$ , por lo que se utiliza la herramienta de Matlab “fminbnd” para conseguir de forma rápida el valor de  $\dot{m}_{sol}$ .

## 2.3 Resolución del problema tipo B2

Si el programa ha determinado que el problema introducido por el usuario es de tipo B2, la resolución es más compleja que en el caso anterior, ya que, aunque en este caso se disponga del gasto másico de la línea ( $\dot{m}_{sol} = \dot{m}_{max}$ ), hay que calcular las caídas de presión irreversibles (debidas a las ondas de choque) que hacen que la presión a la salida de la línea valga lo indicado por el usuario ( $P_{2,obj}$ ).

En primer lugar se comprueba que el elemento limitante de la línea no sea un compresor, ya que en caso contrario no sería viable la aplicación de ondas de choque y el problema no tendría solución.

Si por el contrario el elemento bloqueado no fuese un compresor, sería posible añadir pérdidas de presión adicionales por onda de choque a la salida del elemento bloqueado, de forma que se alcance la presión objetivo a la salida de la línea. El problema a resolver en este caso se plantea de la siguiente forma:

1. Se calcula la línea aguas arriba del elemento bloqueado, incluyéndolo. La resolución de estos elementos no va a modificarse, por lo que se guardan sus resultados como correctos. La presión a la salida del elemento bloqueado será  $P_{crit}$ .
2. Si el elemento bloqueado es el último de la línea, se le aplica una caída de presión por onda de choque  $\Delta P_{onda}$  a su salida tal que  $P_{2,calc} = P_{crit} - \Delta P_{onda} = P_{2,obj}$  finalizando de este modo la resolución.

Si por el contrario el elemento bloqueado no fuese el último, la resolución es más compleja. El método utilizado es disminuir poco a poco la presión de salida del elemento bloqueado: partiendo de  $P_{crit}$  se le van restando pequeños diferenciales de presión hasta que:

- a) Se alcanza la consigna de presión a la salida de la línea:  $P_{2,calc} = P_{2,obj}$

Caso resuelto: se guarda el valor de  $\Delta P_{onda}$  necesario y se guarda en la matriz de resultados la línea aguas abajo calculada tras imponer en la salida del elemento bloqueado una presión:  $P_{crit} - \Delta P_{onda}$  .

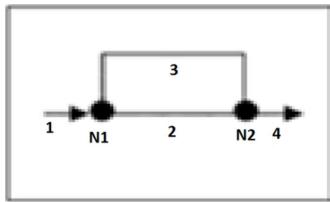
- b) Se bloquea otro elemento aguas abajo. Se calcula con precisión la  $\Delta P_{onda}$  necesaria en el primer elemento bloqueado para que el nuevo elemento bloquee exactamente para el mismo gasto máscio de bloqueo ( $\dot{m}_{sol}$ , fijado en este tipo de problema como se ha visto).

El tramo comprendido entre los dos elementos bloqueados se resuelve tras aplicar la  $\Delta P_{onda}$  calculada a la salida del primer elemento bloqueado, y se guarda en la matriz de resultados. Se vuelve a ejecutar todo el procedimiento descrito en el punto 2, actualizando al nuevo elemento bloqueado, y por tanto, acercándose la resolución al final de línea.

El efecto de una onda de choque no implica tan sólo una caída de presión, sino que la temperatura estática también se ve afectada. En el código, cada vez que se aplica una  $\Delta P_{onda}$  al flujo, se calcula la temperatura estática a la salida de la onda de choque considerando un proceso adiabático (temperatura de remanso constante).

## Anexo D: Método de cálculo de la configuración *Malla*

En el presente anexo se explica el método de resolución desarrollado para la configuración *Malla*, que como se recuerda, está conformada por cuatro líneas simples y dos nodos, dispuestos según el siguiente esquema:



A priori se desconoce el sentido del flujo en los ramales en paralelo (líneas simples 2 y 3), pudiendo presentarse dos casos distintos:

- **Bifurcación:** el flujo en ambos ramales lleva el mismo sentido: desde el primer nodo (N1) hacia el segundo (N2). El reparto de caudales debe cumplir que:  $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 + \dot{m}_3$ .
- **Recirculación:** en uno de los ramales (que posee un compresor) el flujo va del N1 al N2, mientras que en el otro ramal (conocido como línea de recirculación) el flujo se dirige del N2 al N1. El reparto de caudales debe cumplir que:  $\dot{m}_{comp} = \dot{m}_1 + \dot{m}_{recirc}$ , siendo  $\dot{m}_{comp}$  el gasto másico de la línea del compresor, y  $\dot{m}_{recirc}$  el gasto másico de la línea de recirculación.

Ambos casos presentan métodos de resolución totalmente distintos, por lo que el primer paso en la resolución de la configuración *Malla* es detectar en cuál de los dos casos se encuentra el problema introducido por el usuario.

### 1. Detección del caso de aplicación: *Bifurcación* o *Recirculación*

El método implementado para distinguir en qué caso se encuentra la configuración *Malla* introducida por el usuario se detalla a continuación.

En primer lugar se detecta si hay compresores introducidos en las líneas 2 y 3:

- a) Si no hay compresores en ninguna de las líneas, o los hay en ambas, se sabe con seguridad que el caso es *Bifurcación*, por lo que se finaliza la comprobación y se pasa a la resolución del caso *Bifurcación* (capítulo 2 del presente Anexo).
- b) Si una de las líneas presenta un compresor y la otra no, la configuración *Malla* puede trabajar en cualquiera de los dos casos (*Bifurcación* o *Recirculación*). Para poder determinar en cuál de los dos casos se trabaja, se sigue la siguiente estrategia:

- Se resuelve la línea simple 1 con el gasto másico introducido por el usuario, de forma que se pueda obtener la presión y temperatura de remanso en el nodo 1:  $P_{N1}^0, T_{N1}^0$ .
- Se calcula el gasto másico mínimo ( $\dot{m}_{min}$ ) que puede circular por la línea del compresor partiendo de las propiedades calculadas en el nodo 1. El  $\dot{m}_{min}$  de dicha línea será aquel que haga exactamente que el gasto corregido a la entrada del compresor sea igual a su gasto corregido mínimo, es decir, que el compresor se sitúe exactamente en su límite de bombeo. En caso de que el compresor introducido por el usuario no presente un gasto corregido mínimo, se asignará  $\dot{m}_{min} = 0$ .
- Se calcula el gasto másico máximo ( $\dot{m}_{max}$ ) que puede circular por la línea del compresor partiendo de las propiedades calculadas en el nodo 1. El  $\dot{m}_{max}$  de dicha línea será aquel para el cual el elemento más limitante de la línea bloquee.
- Se calcula la línea del compresor con su  $\dot{m}_{min}$  (si éste no es cero), y con su  $\dot{m}_{max}$  obteniendo la presión de remanso calculada para en nodo 2 en ambos casos:  $P_{N2}^0(\dot{m} = \dot{m}_{min})$  y  $P_{N2}^0(\dot{m} = \dot{m}_{max})$ . La presión obtenida con el gasto másico mínimo corresponde a la máxima presión alcanzable en el nodo 2, mientras que la obtenida tras aplicar el gasto másico máximo a la línea corresponde a la mínima presión alcanzable en el nodo 2.

Una vez se dispone de todos los parámetros descritos anteriormente, se clasifica el tipo de problema utilizando el siguiente árbol lógico:

- Si  $\dot{m}_{min} > \dot{m}_1$ : Por el compresor debe necesariamente circular un gasto másico superior al gasto másico de la línea 1. Esto solamente puede ocurrir en el caso *Recirculación*, en el que, como se dijo anteriormente:  $\dot{m}_{comp} = \dot{m}_1 + \dot{m}_{recirc}$
- Si  $\dot{m}_{max} < \dot{m}_1$ : El gasto másico máximo que puede circular por la línea del compresor es inferior al gasto másico de la línea 1. Eso solamente puede ocurrir en el caso *Bifurcación*, en el que, como se dijo anteriormente:  $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 + \dot{m}_3$
- Si por el contrario  $\dot{m}_{min} \leq \dot{m}_1 \leq \dot{m}_{max}$ , la línea del compresor puede trabajar en un rango de caudales tal que, atendiendo al balance de materia, ambos casos serían posibles. En este caso se pasa a comparar presiones:
  - Si  $P_{N2}^0(\dot{m} = \dot{m}_{max}) > P_{N1}^0$ : La mínima presión que se puede alcanzar a la salida de la línea del compresor (aplicando a dicha línea su  $\dot{m}_{max}$ ) es mayor que la presión calculada en el nodo 1. El caso introducido únicamente puede ser una *Recirculación*, ya que la presión del nodo 2 siempre va a ser superior a la presión del nodo 1.

- Si  $P_{N2}^0(\dot{m} = \dot{m}_{min}) < P_{N1}^0$ : La máxima presión que se puede alcanzar a la salida de la línea del compresor (aplicando a dicha línea su  $\dot{m}_{min}$ ) es menor que la presión calculada en el nodo 1. El caso introducido únicamente puede ser una *Bifurcación*, ya que la presión del nodo 2 siempre va a ser inferior a la presión del nodo 1.
- Si por el contrario  $P_{N2}^0(\dot{m} = \dot{m}_{max}) \leq P_{N1}^0 \leq P_{N2}^0(\dot{m} = \dot{m}_{min})$  se tiene que, dependiendo del gasto másico que circule por la línea del compresor, se puede tener una presión de remanso en el nodo 2 superior o inferior a la presión del nodo 1, por lo que en función del gasto másico circulante se puede tener un caso *Bifurcación* o uno *Recirculación*, tal y como se muestra en la siguiente figura:

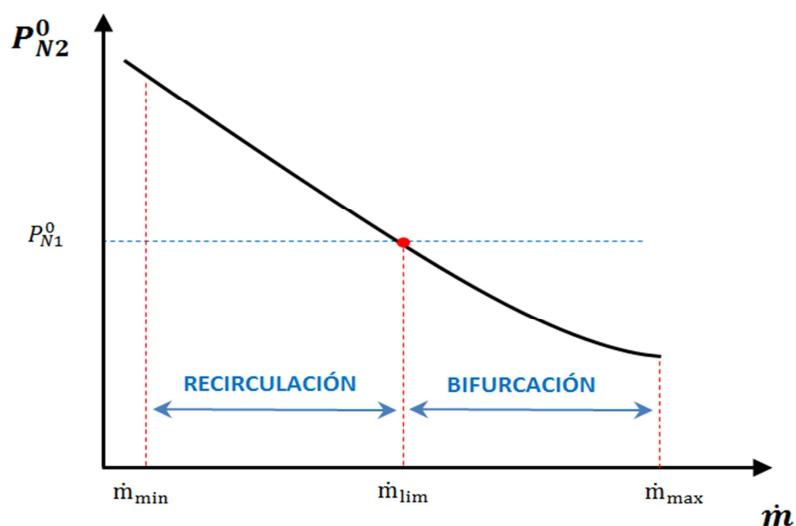


Figura 1.1. Variación de la presión del nodo 2 en función del gasto másico circulante por la línea del compresor

Si el problema introducido es de este tipo, se utilizará la siguiente estrategia: calcular el *gasto másico límite* ( $\dot{m}_{lim}$ ) tal que la presión en ambos nodos sea exactamente igual:  $P_{N2}^0(\dot{m} = \dot{m}_{lim}) = P_{N1}^0$ .

Puesto que se conoce que  $\dot{m}_{lim}$  se encuentra acotada entre  $\dot{m}_{min}$  y  $\dot{m}_{max}$ , y no siendo posible la existencia de bloqueo o bombeo en dicho intervalo, se utiliza la herramienta de *Matlab* “*fminbnd*” para conseguir de forma rápida el valor de  $\dot{m}_{lim}$ , imponiendo como condición de convergencia que la presión de entrada sea igual a la presión de salida.

Una vez se dispone del valor de  $\dot{m}_{lim}$  se evalúa:

- Si  $\dot{m}_{lim} > \dot{m}_1$ : El gasto másico para el cual la Malla pasaría a trabajar como *Bifurcación* es mayor que el gasto másico de la línea 1 ( $\dot{m}_1$ ), haciendo imposible que un caso Bifurcación fuese

possible debido al balance de materia. El caso introducido solamente puede ser una *Recirculación*.

- Si  $\dot{m}_{lim} < \dot{m}_1$ : El gasto másico para el cual la *Malla* pasaría a trabajar como *Recirculación* es menor que el gasto másico de la línea 1 ( $\dot{m}_1$ ), haciendo imposible que un caso *Recirculación* fuese posible debido al balance de materia. El caso introducido solamente puede ser una *Bifurcación*.

Tras la aplicación de la estrategia de clasificación de casos explicada en este capítulo, se tiene que sea cual sea la configuración *Malla* introducida por el usuario, el programa detectará si dicha malla se comporta como una *Bifurcación* o como una *Recirculación*. En los siguientes apartados se detalla el método de cálculo empleado para ambos casos.

## 2. Método de cálculo del caso *Bifurcación*

Una vez el programa ha detectado que la configuración *Malla* se comporta como una *Bifurcación*, se conoce con certeza que el sentido del flujo de las líneas 2 y 3 es desde el nodo 1 hacia el nodo 2, y que el balance de materia a aplicar en el nodo 1 es:  $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 + \dot{m}_3$ .

Para la resolución de este caso se sigue la siguiente estrategia:

### 2.1 Resolución de la línea simple 1

En primer lugar se resuelve la *Línea Simple 1* aplicando el gasto másico  $\dot{m}_1$  introducido por el usuario.

En caso de que el programa detecte que se produce una limitación al flujo, se avisará al usuario, indicando qué tipo de restricción se ha producido (bloqueo sónico, bombeo del compresor o bloqueo del compresor). Se ofrecerá al usuario la opción de reimponer  $\dot{m}_1$  al valor del gasto másico límite calculado por el programa, pudiendo éste aceptar o rechazar la corrección, en cuyo caso la ejecución finalizaría.

Tras la resolución de la línea 1 con el gasto másico  $\dot{m}_1$  se calcula la presión y temperatura de remanso en el nodo 1:  $P_{N1}^0, T_{N1}^0$ .

### 2.2 Resolución de las líneas simples 2 y 3

Para resolver las líneas simples 2 y 3 se dispone de la siguiente información:

- La presión y temperatura de remanso a la entrada de ambas líneas es  $P_{N1}^0$  y  $T_{N1}^0$  respectivamente.
- El gasto másico de ambas líneas debe valer:

$$\dot{m}_2 + \dot{m}_3 = \dot{m}_1 \quad (2.1)$$

- La presión de remanso en la salida de ambas líneas debe ser la misma ( $P_{N2}^0$ ).

La resolución puede implicar la aparición de bloqueo sónico en una, ambas o ninguna línea simple, por lo que si se quiere que el programa sea capaz de calcular de una forma robusta todas las posibles posibilidades, será necesario detectar y separar por casos:

- Ni la línea 2 ni la 3 bloquean.
- La línea 2 bloquea, pero la 3 no.
- La línea 3 bloquea, pero la 2 no.
- Ambas líneas bloquean.

En primer lugar se calculará el gasto másico máximo de las líneas 2 y 3:  $\dot{m}_{max,2}$  y  $\dot{m}_{max,3}$ . Estos gastos másicos máximos son aquellos para los cuales las líneas simples 2 y 3 bloquean respectivamente. Además del uso que más adelante se dará a estos parámetros, éstos sirven también para comprobar si el problema introducido por el usuario tiene solución:

Si  $\dot{m}_{max,2} + \dot{m}_{max,3} < \dot{m}_1$  el problema no tiene solución: no es posible que circule un gasto másico  $\dot{m}_1$  por la configuración *Malla*, ya las líneas 2 y 3 no son capaces de asimilar tal gasto másico. Se avisa al usuario y se finaliza la ejecución.

Si por el contrario se detecta que el problema tiene solución, se evalúa:

- Para la línea simple 2:
  - Si  $\dot{m}_{max,2} > \dot{m}_1$ , la línea 2 no puede bloquear, ya que aunque todo el gasto másico fuese por dicha línea, no se alcanzaría su gasto másico de bloqueo. Se asigna la variable *puede\_bloquear(L2)*=0.
  - Si  $\dot{m}_{max,2} \leq \dot{m}_1$ , la línea 2 podría teóricamente bloquear, por lo que asigna *puede\_bloquear(L2)*=1.
- Para la línea simple 3:
  - Si  $\dot{m}_{max,3} > \dot{m}_1$ , la línea 3 no puede bloquear, ya que aunque todo el gasto másico fuese por dicha línea, no se alcanzaría su gasto másico de bloqueo. Se asigna la variable *puede\_bloquear(L3)*=0.
  - Si  $\dot{m}_{max,3} \leq \dot{m}_1$ , la línea 3 podría teóricamente bloquear, por lo que asigna *puede\_bloquear(L3)*=1.

Con el valor obtenido de las variables *puede\_bloquear(L2)* y *puede\_bloquear(L3)* se tiene una primera información acerca de la posibilidad de que se produzca bloqueo sónico en cada una de las líneas: si por ejemplo *puede\_bloquear(L2)* vale 1, la línea 2 podría o no estar bloqueada, pero si vale 0, se conoce con seguridad que no lo está.

Para conocer con seguridad si las líneas 2 y 3 se encuentran o no bloqueadas, se crean las variables *bloquea(L2)* y *bloquea(L3)*, a las que se asigna su valor mediante la siguiente estrategia:

- Si *puede\_bloquear(L2)*=0 y *puede\_bloquear(L3)*=0  
Ninguna de las dos líneas puede bloquear, por lo que se sabe con seguridad que ninguna lo hace: *bloquea(L2)*=0, *bloquea(L3)*=0.
- Si *puede\_bloquear(L2)*=1 y *puede\_bloquear(L3)*=0  
Se sabe que la línea 3 no puede bloquear, pero la línea 2 podría estar bloqueada. Para comprobarlo se utiliza el siguiente razonamiento:

Se calcula la línea 2 con su gasto másico de bloqueo ( $\dot{m}_{max,2}$ ), obteniendo así la presión de remanso de salida:  $P_{out,L2}^0 (\dot{m}_2 = \dot{m}_{max,2})$ . Dicha presión es la mínima que se puede alcanzar a la salida de la línea 2 sin la aplicación de ondas de choque.

Asimismo se calcula la línea 3 con un gasto másico de  $\dot{m}_3 = \dot{m}_1 - \dot{m}_{max,2}$ , obteniendo la presión de remanso de salida:  $P_{out,L3}^0 (\dot{m}_3 = \dot{m}_1 - \dot{m}_{max,2})$ . Dicha

presión es la máxima que se puede alcanzar a la salida de la línea 3, ya que  $\dot{m}_3$  no puede bajar por debajo del gasto másico considerado en este caso.

Se comparan ambas presiones:

- Si:  $P_{out,L2}^0(\dot{m}_2 = \dot{m}_{max,2}) > P_{out,L3}^0(\dot{m}_3 = \dot{m}_1 - \dot{m}_{max,2})$   
Aun aplicando el gasto másico máximo posible en la línea 2 y el mínimo en la línea 3, la presión de salida de la línea 2 es mayor que la presión de salida de la línea 3. La única opción es que la línea 2 se encuentre bloqueada, y se produzcan ondas de choque que bajen su presión de salida:  
 $bloquea(L2)=1, bloquea(L3)=0$ .

- Si:  $P_{out,L2}^0(\dot{m}_2 = \dot{m}_{max,2}) < P_{out,L3}^0(\dot{m}_3 = \dot{m}_1 - \dot{m}_{max,2})$   
La línea 2 no está bloqueada, ya que existirá un valor de  $\dot{m}_2$  inferior a  $\dot{m}_{max,2}$  tal que la presión a la salida de la línea 2 coincida con la presión a la salida de la línea 3.  
 $bloquea(L2)=0, bloquea(L3)=0$ .

- Si  $puede\_bloquear(L2)=0$  y  $puede\_bloquear(L3)=1$

Caso análogo al explicado en el caso anterior: se calculan las presiones de salida de ambas líneas aplicando unos gastos másicos de  $\dot{m}_3 = \dot{m}_{max,3}$  en la línea 3, y  $\dot{m}_2 = \dot{m}_1 - \dot{m}_{max,3}$  en la línea 2:

- Si:  $P_{out,L3}^0(\dot{m}_3 = \dot{m}_{max,3}) > P_{out,L2}^0(\dot{m}_2 = \dot{m}_1 - \dot{m}_{max,3})$   
 $bloquea(L2)=0, bloquea(L3)=1$ .
- Si:  $P_{out,L3}^0(\dot{m}_3 = \dot{m}_{max,3}) < P_{out,L2}^0(\dot{m}_2 = \dot{m}_1 - \dot{m}_{max,3})$   
 $bloquea(L2)=0, bloquea(L3)=0$ .

- Si  $puede\_bloquear(L2)=1$  y  $puede\_bloquear(L3)=1$

En este caso se tiene que considerar la posibilidad de que ambas líneas bloqueen. Se sigue la siguiente estrategia:

- Si  $\dot{m}_1 = \dot{m}_{max,2} + \dot{m}_{max,3}$  (aplicando cierta tolerancia), se tiene que el usuario ha introducido exactamente el gasto másico que hace que ambas líneas se encuentren bloqueadas:  
 $bloquea(L2)=1, bloquea(L3)=1$ .
- Si  $\dot{m}_1 < \dot{m}_{max,2} + \dot{m}_{max,3}$ , se tiene que una o ninguna de las líneas está realmente bloqueada. Para poder determinarlo realiza lo siguiente:

Se supone inicialmente que solamente la línea 2 puede bloquear, y se ejecuta el caso descrito anteriormente para  $puede\_bloquear(L2)=1$  y

*puede\_bloquear(L3)=0*. De dicho caso se obtienen las variables *bloquea(L2)* y *bloquea(L3)*:

- Si *bloquea(L2)=1* se tiene el caso resuelto, y se sabe que solamente bloquea una de las dos líneas, en este caso, la línea 2:  
 $bloquea(L2)=1, bloquea(L3)=0$ .
- Si *bloquea(L2)=0* se tiene que la línea 2 no bloquea, pero la línea 3 podría bloquear. Se evalúa análogamente la línea 3, ejecutándose el caso descrito cuando *puede\_bloquear(L2)=0* y *puede\_bloquear(L3)=1*. De dicho caso se obtienen las variables *bloquea(L2)* y *bloquea(L3)*:
  - Si *bloquea(L3)=1* se tiene el caso resuelto, y se sabe que solamente bloquea una de las dos líneas, en este caso, la 3:  
 $bloquea(L2)=0, bloquea(L3)=1$ .
  - Si *bloquea(L3)=0* se tiene que ninguna de las dos líneas bloquea:  
 $bloquea(L2)=0, bloquea(L3)=0$ .

El programa sale en este punto con las variables *bloquea(L2)* y *bloquea(L3)* asignadas, por lo que se conoce con seguridad si la solución implica o no el bloqueo de alguna línea (o de las dos).

El siguiente paso es resolver cada uno de los casos que se podrían producir:

- Si *bloquea(L2)=0* y *bloquea(L3)=0*: Ninguna de las líneas bloquea.  
 Si se ha detectado que ninguna de las dos líneas debe bloquear para encontrar la solución, se tiene que resolver el problema de obtener unos valores de  $\dot{m}_2$  y  $\dot{m}_3$  tales que las presiones de remanso calculadas a la salida de ambas líneas coincida.

Para ello se ha utilizado la herramienta de *Matlab* “*fminbnd*”. Esta herramienta se encarga de introducir valores de  $\dot{m}_2$  (acotados entre  $\dot{m}_2 = 0$  y  $\dot{m}_2 = \dot{m}_{2,max}$ ) a una función del programa que, a partir del valor del  $\dot{m}_2$  introducido, resuelve las líneas 2 y 3 con  $\dot{m}_2$  y  $\dot{m}_3 = \dot{m}_1 - \dot{m}_2$  respectivamente. Se define el parámetro *error* como la diferencia relativa entre las presiones de remanso a la salida de ambas líneas. La herramienta “*fminbnd*” tiene como objetivo minimizar dicho parámetro, por lo que, siguiendo un algoritmo interno, va asignando a la función valores de  $\dot{m}_2$  hasta que encuentra uno tal que el parámetro *error* sea inferior a  $10^{-4}$ , momento en el cual se considera que la solución es lo bastante buena.

Con los valores obtenidos de  $\dot{m}_2$  y  $\dot{m}_3$  se resuelven las líneas 2 y 3 y se guardan los resultados en la matriz que guarda la solución.

- Si  $bloquea(L2)=1$  y  $bloquea(L3)=0$ : La línea 2 bloquea, la línea 3 no.

En este caso el problema a resolver es totalmente distinto al anterior, ya que los gastos máscicos están fijados:

- Por la línea 2 circula  $\dot{m}_{2,max}$
- Por la línea 3 circula  $\dot{m}_3 = \dot{m}_1 - \dot{m}_{2,max}$

Se resuelve la línea 3 con el  $\dot{m}_3$  asignado, calculándose su presión de remanso a la salida:  $P_{out,L3}^0(\dot{m}_3)$ .

De la línea 2, que se sabe bloqueada, se conoce su presión de entrada ( $P_{N1}^0$ ), su gasto máscico circulante ( $\dot{m}_{2,max}$ ), y la presión que debe alcanzar mediante la aplicación de ondas de choque ( $P_{out,L2}^0(\dot{m}_2)$ ). Se resuelve como una *Línea Simple tipo B* (método de cálculo explicado en el Anexo C).

- Si  $bloquea(L2)=0$  y  $bloquea(L3)=1$ : La línea 3 bloquea, la línea 2 no.

Este caso es totalmente análogo al anterior. En él se tiene que:

- Por la línea 3 circula  $\dot{m}_{3,max}$
- Por la línea 2 circula  $\dot{m}_2 = \dot{m}_1 - \dot{m}_{3,max}$

Se resuelve la línea 2 con el  $\dot{m}_2$  asignado, calculándose su presión de remanso a la salida:  $P_{out,L2}^0(\dot{m}_2)$ .

De la línea 3, que se sabe bloqueada, se conoce su presión de entrada ( $P_{N1}^0$ ), su gasto máscico circulante ( $\dot{m}_{3,max}$ ), y la presión que debe alcanzar mediante la aplicación de ondas de choque ( $P_{out,L3}^0(\dot{m}_3)$ ). Se resuelve como una *Línea Simple tipo B* (método de cálculo explicado en el Anexo C).

- Si  $bloquea(L2)=1$  y  $bloquea(L3)=1$ : Ambas líneas se encuentran bloqueadas.

Si ambas líneas se encuentran exactamente bloqueadas, se tiene que:

- Por la línea 2 circula  $\dot{m}_{2,max}$
- Por la línea 3 circula  $\dot{m}_{3,max}$

En este caso se resuelven ambas líneas con sus gastos máscicos de bloqueo, calculando ambas presiones de remanso en la salida:  $P_{out,L2}^0(\dot{m}_{2,max})$  y  $P_{out,L3}^0(\dot{m}_{3,max})$ .

La línea que posea una menor presión a su salida se considera que no presenta ondas de choque, por lo que se guarda su resolución en la matriz de solución. A la otra línea se le aplican caídas de presión irreversibles (debidas a las ondas de choque) de forma que su presión a la salida se reduzca hasta el valor calculado para la primera, finalizándose con esto la resolución.

### 2.3 Resolución de la línea simple 4

Tras finalizar la resolución de las líneas simples 2 y 3, se tiene que en el nodo 2 vuelven a converger los caudales de ambas líneas, teniéndose de nuevo que:

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_2 + \dot{m}_3 = \dot{m}_1 \quad (2.2)$$

Las propiedades del nodo 2 se pueden calcular a partir de los resultados obtenidos en la salida de las líneas 2 y 3:

- La presión de remanso de salida de ambas líneas es, por definición del caso *Bifurcación*, igual (dentro de la tolerancia especificada), por lo que se asigna dicho valor como presión de remanso del nodo 2:

$$P_{out,L2}^0 = P_{out,L3}^0 = P_{N2}^0 \quad (2.3)$$

- Por el contrario, la temperatura de remanso de salida de ambas líneas no tiene porqué ser igual, por lo que será necesario aplicar un balance de energía para obtener la temperatura de remanso del nodo 2 ( $T_{N2}^0$ ). En dicho balance de energía se ha despreciado el efecto de la temperatura en el calor específico:

$$\dot{m}_2 \cdot T_{out,L2}^0 + \dot{m}_3 \cdot T_{out,L3}^0 = (\dot{m}_2 + \dot{m}_3) \cdot T_{N2}^0 \quad (2.4)$$

Una vez se tienen calculadas las propiedades del nodo 2 ( $P_{N2}^0$  y  $T_{N2}^0$ ) y conociendo el gasto másico circulante por la línea ( $\dot{m}_4$ ), se resuelve la línea 4 normalmente.

En caso de que se encontrase algún tipo de restricción al flujo en la línea 4 (por bloqueo sónico, o por bombeo/bloqueo de un compresor), toda la resolución anterior quedaría invalidada, y se avisaría al usuario de la imposibilidad de calcular la configuración con el gasto másico que se ha introducido.

Si por el contrario no se encontrase ningún tipo de restricción al flujo, el cálculo de la configuración *Malla* se tendría completado.

### 3. Método de cálculo del caso *Recirculación*

Una vez el programa ha detectado que la configuración *Malla* se comporta como una *Recirculación*, se conoce con certeza que el sentido del flujo en las líneas 2 y 3 es distinto, siendo:

- Para la línea del compresor: el flujo va desde el nodo 1 hacia el nodo 2, con un gasto másico  $\dot{m}_{comp}$
- Para la línea que no posee compresor (denominada línea de recirculación): el flujo va desde el nodo 2 hacia el nodo 1, con un gasto másico  $\dot{m}_{recirc}$ . Puesto que en la interfaz de entrada el usuario introduce todos los elementos de la línea simple de izquierda a derecha, el programa invertirá la disposición de los elementos que conforman la línea simple de recirculación.

Aplicando un balance de materia en el nodo 1:

$$\dot{m}_{comp} = \dot{m}_1 + \dot{m}_{recirc} \quad (3.1)$$

Para la resolución de este caso se sigue la siguiente estrategia:

#### 3.1 Resolución de la línea simple 1

En primer lugar se resuelve la *Línea Simple 1* aplicando el gasto másico  $\dot{m}_1$  introducido por el usuario.

En caso de que el programa detecte que se produce una limitación al flujo, se avisará al usuario, indicando qué tipo de restricción se ha producido (bloqueo sónico, bombeo del compresor o bloqueo del compresor). Se ofrecerá al usuario la opción de reimponer  $\dot{m}_1$  al valor del gasto másico límite calculado por el programa, pudiendo éste aceptar o rechazar la corrección, en cuyo caso la ejecución finalizaría.

Tras la resolución de la línea 1 con el gasto másico  $\dot{m}_1$  se calcula la presión y temperatura de remanso a su salida:  $P_{out,L1}^0$ ,  $T_{out,L1}^0$ . Téngase en cuenta que en este caso, al ser el nodo 1 un punto de mezcla, se va a cumplir que:

- La presión de remanso a la salida de la línea 1 va a ser igual a la presión de remanso de salida de la línea de recirculación y a la presión de remanso de entrada de la línea del compresor. Al ser estas tres presiones idénticas, se les puede llamar a las tres como  $P_{N1}^0$ :

$$P_{out,L1}^0 = P_{out,recirc}^0 = P_{in,comp}^0 = P_{N1}^0 \quad (3.2)$$

- La temperatura de remanso, sin embargo, sí que puede ser distinta en cada línea, y es necesario aplicar el siguiente balance de energía:

$$\dot{m}_1 \cdot T_{out,L1}^0 + \dot{m}_{recirc} \cdot T_{out,recirc}^0 = (\dot{m}_1 + \dot{m}_{recirc}) \cdot T_{in,comp}^0 \quad (3.3)$$

### 3.2 Resolución de las líneas simples 2 y 3

Para resolver las líneas simples 2 y 3 se dispone de la siguiente información:

- El gasto másico de ambas líneas debe cumplir:

$$\dot{m}_{comp} = \dot{m}_1 + \dot{m}_{recirc} \quad (3.4)$$

- La presión de remanso tanto en la entrada de la línea del compresor, como a la salida de la línea de recirculación vale  $P_{N1}^0$ .
- Las temperaturas de remanso de entrada de la línea del compresor ( $T_{in,comp}^0$ ) y de salida de la línea de recirculación ( $T_{out,recirc}^0$ ) deben cumplir el siguiente balance de energía:

$$\dot{m}_1 \cdot T_{out,L1}^0 + \dot{m}_{recirc} \cdot T_{out,recirc}^0 = \dot{m}_{comp} \cdot T_{in,comp}^0 \quad (3.5)$$

- El nodo 2 es un punto de división del flujo, por lo que:

$$P_{out,comp}^0 = P_{in,recirc}^0 = P_{N2}^0 \quad (3.6)$$

$$T_{out,comp}^0 = T_{in,recirc}^0 = T_{N2}^0 \quad (3.7)$$

Además, se dispone de la siguiente información proveniente de la detección del caso de aplicación (véase capítulo 1 del presente Anexo):

- El gasto másico máximo que puede circular por la línea del compresor:  $\dot{m}_{comp,max}$   
Este  $\dot{m}_{comp,max}$  puede ser:
  - El valor del gasto másico para el cual la presión del nodo 2 iguala a la presión del nodo 1 ( $\dot{m}_{lim}$  en el Capítulo 1), es decir el valor del gasto másico a partir del cual la *Malla* pasaría a comportarse como una *Bifurcación* en lugar de como una *Recirculación*.
  - El valor del gasto másico tal que algún elemento de la línea del compresor presente bloqueo sónico.

Si en la detección del caso de aplicación se llegó a calcular el valor de  $\dot{m}_{lim}$ , se tomará dicho valor como  $\dot{m}_{comp,max}$ , ya que no tiene sentido aplicar gastos másicos mayores porque la *Malla* pasaría a comportarse como una *Bifurcación*, caso que ha quedado descartado. Si por el contrario no se dispusiese del valor de  $\dot{m}_{lim}$ , se tomará  $\dot{m}_{comp,max}$  como el gasto másico que bloquea algún elemento de la línea del compresor.

- El gasto másico mínimo que puede circular por la línea del compresor:  $\dot{m}_{comp,min}$   
El  $\dot{m}_{comp,min}$  se asigna al gasto másico que hace que el compresor se sitúe exactamente en su límite de bombeo únicamente si dicho gasto másico es mayor que  $\dot{m}_1$ . En caso contrario se asigna  $\dot{m}_{comp,min} = \dot{m}_1$ , gasto másico mínimo que debería circular por la línea del compresor para cumplir el balance de materia del caso *Recirculación*.

Con los valores de  $\dot{m}_{comp,min}$  y  $\dot{m}_{comp,max}$  asignados, se tiene acotada la solución. Puesto que se va a trabajar con el gasto másico de la línea de recirculación en lugar de con la de la línea del compresor, se prefiere definir los límites de la solución como:

$$\dot{m}_{recirc,min} = \dot{m}_{comp,min} - \dot{m}_1 \quad (3.8)$$

$$\dot{m}_{recirc,max} = \dot{m}_{comp,max} - \dot{m}_1 \quad (3.9)$$

Hay que tener en cuenta que los valores de  $\dot{m}_{recirc,min}$  y  $\dot{m}_{recirc,max}$  vienen dados por los cálculos realizados sobre la línea del compresor, y no tienen nada que ver con la línea de recirculación (por ejemplo, la línea de recirculación podría no ser capaz de circular un gasto másico de  $\dot{m}_{recirc,max}$  debido a que ésta bloquease para un gasto másico inferior). Se debe considerar la posibilidad de que se produzca un bloqueo sónico en la línea de recirculación, ya que dicho bloqueo sónico podría conllevar la aparición de ondas de choque, cambiando totalmente el método de resolución, tal y como se ha visto en capítulos anteriores.

Considérese el caso en el que la línea de recirculación bloquea con un gasto másico  $\dot{m}_{recirc,b}$  inferior a la  $\dot{m}_{recirc,max}$ . Si se realiza un gráfico en el que se observe el comportamiento de la presión de remanso calculada al final de la línea de recirculación ( $P_{out,recirc}^0$ ) en función del gasto másico de la línea de recirculación ( $\dot{m}_{recirc}$ ) se tiene:

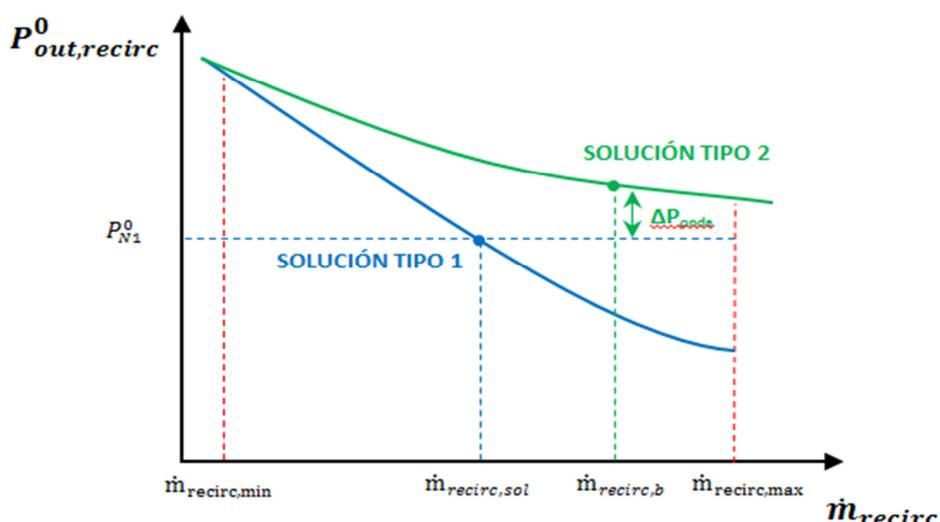


Figura 3.1. Muestra de las dos posibles soluciones a encontrar en el caso *Recirculación*

En la figura anterior se han representado las dos posibles soluciones a las que se podría llegar:

- **Solución tipo 1 (línea azul):** Existe un gasto másico  $\dot{m}_{recirc,sol}$  tal que se consigue que la presión calculada a la salida de la línea de recirculación ( $P_{out,recirc}^0$ ) sea igual a la presión del nodo 1 ( $P_{N1}^0$ ).
- **Solución tipo 2 (línea verde):** Se tiene que, para el gasto másico máximo que se puede aplicar sin que la línea de recirculación bloquee ( $\dot{m}_{recirc,b}$ ), la presión calculada a la salida de la línea de recirculación ( $P_{out,recirc}^0$ ) sigue siendo mayor que la presión del nodo 1 ( $P_{N1}^0$ ). Como no se puede aumentar más el gasto másico, se tiene que la única solución posible es la aplicación de ondas de choque a los elementos bloqueados en la línea de recirculación, convergiendo de esta forma al valor de  $P_{N1}^0$  requerido.

Para que lo representado en la figura 3.1 sea correcto, se tiene que cumplir que la curva característica del compresor presente una pendiente negativa para todo su rango de trabajo (como suele ser habitual). En caso contrario, podría tenerse en caso de que un aumento de  $\dot{m}_{recirc}$  no conllevara una caída de  $P_{out,recirc}^0$ .

### 3.2.1 Detección del tipo de solución

Una vez se ha comprobado que pueden existir dos tipos distintos de solución (con y sin bloqueo de la línea de recirculación), es fundamental que el programa pueda distinguir en qué caso se encuentra para poder resolverlo de una forma acorde. Para ello se sigue la siguiente estrategia:

#### 1. Comprobación de si la línea de recirculación puede o no bloquear:

Para ello se fija un gasto másico a la línea de recirculación de  $\dot{m}_{recirc,max}$ , por lo que se calcula la línea del compresor con:

$$\dot{m}_{comp,max} = \dot{m}_{recirc,max} + \dot{m}_1 \quad (3.10)$$

Con esto se obtiene el valor mínimo de presión en el nodo 2, que va a provocar el mínimo gasto másico de bloqueo de la línea de recirculación. Partiendo de los valores calculados de  $P_{N2}^0$  y  $T_{N2}^0$ , se trata de resolver la línea de recirculación con  $\dot{m}_{recirc,max}$ , presentándose dos posibilidades:

- a) La línea de recirculación no puede ser resuelta con  $\dot{m}_{recirc,max}$ , ya que bloquea para un gasto másico menor. En este caso se asegura que el problema tiene solución, que puede ser de tipo 1 (convergencia de presiones sin bloqueo) o de tipo 2 (aplicación de ondas de choque tras bloqueo). Se pasa al punto 2 para determinarlo.
- b) La línea de recirculación puede ser resuelta con  $\dot{m}_{recirc,max}$ : no bloquea. En este caso se asegura que la línea de recirculación no va a bloquear para ningún gasto másico (ya

que no lo ha hecho para el gasto másico máximo aplicable). Si existe solución, ésta únicamente puede ser de tipo 1.

Tras resolver la línea de recirculación con  $\dot{m}_{recirc,max}$  se obtiene el valor de la presión al final de dicha línea:  $P_{out,recirc}^0$ , valor mínimo alcanzable. Se evalúa:

b1) Si  $P_{out,recirc}^0(\dot{m}_{recirc,max}) < P_{N1}^0$ : Existe solución tipo 1 (véase figura 3.1). Hay que buscar el valor de gasto másico tal que ambas presiones se igualen. Se pasa a la resolución sabiendo que la solución buscada es de tipo 1.

b2) Si  $P_{out,recirc}^0(\dot{m}_{recirc,max}) > P_{N1}^0$ : No existe solución, ya que aun aplicando el gasto másico máximo posible a la línea de recirculación, no se consigue ni que ésta bloquee ni que su presión a la salida sea inferior a  $P_{N1}^0$ . Se avisa al usuario de que la instalación introducida no tiene solución, probablemente debido a los límites de operación introducidos para el compresor.

## 2. Si se sabe que puede haber bloqueo, determinar tipo de solución

Una vez se sabe que la línea de recirculación bloquea para un gasto másico de bloqueo ( $\dot{m}_{recirc,b}$ ) inferior a  $\dot{m}_{recirc,max}$ , el programa determina que se encuentra en una situación idéntica a la mostrada en la figura 3.1. Para determinar si la solución que busca implica el bloqueo (solución tipo 2) o no (solución tipo 1), se procede a buscar el valor de  $\dot{m}_{recirc,b}$  para el cual bloquea la línea de recirculación.

La búsqueda del gasto másico de bloqueo de la línea de recirculación ( $\dot{m}_{recirc,b}$ ) no es tan inmediato como en el resto de casos vistos hasta ahora, ya que la presión y temperatura de comienzo de dicha línea cambian cada vez que se modifica el valor del gasto másico ( $\dot{m}_{recirc}$ ). No obstante, si la curva característica del compresor presenta una pendiente negativa para todo su rango de operación, la presión de entrada a la línea de recirculación (y por tanto  $\dot{m}_{recirc,b}$ ) disminuirán siempre que se aumente el valor de  $\dot{m}_{recirc}$  como se puede observar en el siguiente gráfico:

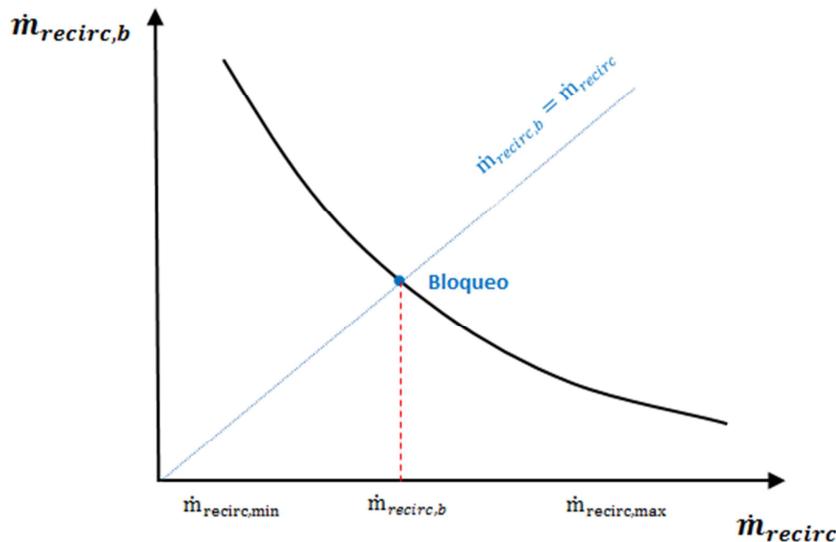


Figura 3.2. Obtención del gasto másico de bloqueo de la línea de recirculación

En el programa se implementa un bucle iterativo en el que se busca un valor de  $\dot{m}_{recirc}$  tal que:

$$\dot{m}_{recirc,b}(\dot{m}_{recirc}) = \dot{m}_{recirc} \quad (3.11)$$

Se dispone de  $\dot{m}_{recirc,min}$  y  $\dot{m}_{recirc,max}$  como valores que acotan la solución, por lo que se utiliza la siguiente estrategia:

- Como primer valor de  $\dot{m}_{recirc}$  se toma la media de  $\dot{m}_{recirc,min}$  y de  $\dot{m}_{recirc,max}$
- Con dicho  $\dot{m}_{recirc}$  se resuelve la línea del compresor:  $\dot{m}_{comp} = \dot{m}_{recirc} + \dot{m}_1$
- Partiendo de la presión y temperatura de salida de la línea del compresor, se calcula el gasto másico de bloqueo de la línea de recirculación ( $\dot{m}_{recirc,b}$ )
- Se comparan  $\dot{m}_{recirc}$  y  $\dot{m}_{recirc,b}$ :
  - o Si  $\dot{m}_{recirc,b} = \dot{m}_{recirc}$  (con un error relativo inferior a  $10^{-4}$ ), se considera que se ha encontrado el gasto másico de bloqueo de la línea de recirculación.
  - o Si  $\dot{m}_{recirc,b} > \dot{m}_{recirc}$  se tiene que la línea de recirculación no está bloqueando: el  $\dot{m}_{recirc}$  introducido es demasiado bajo. Se asigna como nuevo límite inferior el valor de  $\dot{m}_{recirc}$ , de forma que en la siguiente iteración se reduzca el rango de búsqueda al intervalo  $(\dot{m}_{recirc}, \dot{m}_{recirc,max})$ .
  - o Si  $\dot{m}_{recirc,b} < \dot{m}_{recirc}$  se tiene que la línea de recirculación bloquea para un gasto másico inferior al introducido: el  $\dot{m}_{recirc}$  introducido es demasiado elevado. Se asigna como nuevo límite superior el valor de  $\dot{m}_{recirc}$ , de forma que en la siguiente iteración se reduzca el rango de búsqueda al intervalo  $(\dot{m}_{recirc,min}, \dot{m}_{recirc})$ .

Tras la resolución del bucle, se obtiene el valor de  $\dot{m}_{recirc,b}$  tal que, al calcular la línea del compresor con un gasto másico  $\dot{m}_{comp} = \dot{m}_{recirc,b} + \dot{m}_1$  se obtienen unas propiedades de presión y temperatura al comienzo de la línea de recirculación tales que el gasto másico que bloquea dicha línea es exactamente  $\dot{m}_{recirc,b}$ .

Una vez se dispone del valor de  $\dot{m}_{recirc,b}$  se puede saber si la solución del problema introducido por el usuario es de tipo 1 o 2:

- a) Si  $P_{out,recirc}^0(\dot{m}_{recirc,b}) < P_{N1}^0$ : Existe solución tipo 1 (véase figura 3.1). Hay que buscar el valor de gasto másico tal que ambas presiones se igualen. Se pasa a la resolución sabiendo que la solución buscada es de tipo 1.
- b) Si  $P_{out,recirc}^0(\dot{m}_{recirc,b}) > P_{N1}^0$ : La solución debe ser de tipo 2 (véase figura 3.1), ya que aun aplicando el mayor gasto másico posible, la presión en la salida de la línea de recirculación es mayor que la presión del nodo 1. El gasto másico de recirculación será  $\dot{m}_{recirc,b}$  y se aplicarán ondas de choque al elemento bloqueado.

### 3.2.2 Resolución

Una vez se conoce con seguridad qué tipo de solución se busca (solución tipo 1 o solución tipo 2), se resuelven las líneas 2 y 3 en consecuencia:

#### 3.2.2.1 Solución tipo 1

Si se ha determinado que existe una solución tipo 1 (es decir, un  $\dot{m}_{recirc}$  inferior al de bloqueo y tal que la presión de salida de la línea de recirculación converja con la presión del nodo 1), se aplica la siguiente resolución:

Como en casos anteriores similares, se utiliza la herramienta de *Matlab* “*fminbnd*” para obtener el valor de  $\dot{m}_{recirc}$  que hace que  $P_{out,recirc}^0(\dot{m}_{recirc}) = P_{N1}^0$ . Puesto que se sabe que la  $\dot{m}_{recirc}$  objetivo debe estar comprendida entre  $\dot{m}_{recirc,min}$  y  $\dot{m}_{recirc,max}$  (o  $\dot{m}_{recirc,b}$  en el caso en el que se haya calculado), y se conoce con certeza que no se va a producir bloqueo sónico, el método obtendrá rápidamente el valor de  $\dot{m}_{recirc}$  solución.

Con el valor obtenido de  $\dot{m}_{recirc}$  se resuelven ambas líneas:

- La línea del compresor con  $\dot{m}_{comp} = \dot{m}_{recirc} + \dot{m}_1$
- La línea de recirculación con  $\dot{m}_{recirc}$

#### 3.2.2.2 Solución tipo 2

Si se ha determinado que se tiene una solución tipo 2 (es decir, que la línea de recirculación se encuentra bloqueada con un gasto másico  $\dot{m}_{recirc,b}$ , y aparecen ondas

de choque en los elementos bloqueados de dicha línea), se aplica la siguiente resolución:

Puesto que se conoce el gasto másico de recirculación ( $\dot{m}_{recirc,b}$ ), se puede resolver la línea del compresor (con  $\dot{m}_{comp} = \dot{m}_{recirc,b} + \dot{m}_1$ ), obteniendo la presión y temperatura de remanso del nodo 2 ( $P_{N2}^0$  y  $T_{N2}^0$ ).

La línea de recirculación se sabe bloqueada con un gasto másico  $\dot{m}_{recirc,b}$ , y puesto que se conocen tanto sus condiciones de entrada ( $P_{N2}^0$  y  $T_{N2}^0$ ) como la presión que debe tener en su salida ( $P_{N1}^0$ ), se resuelve como una *Línea Simple tipo B* (método de cálculo explicado en el Anexo C). Se devolverá el valor de las ondas de choque necesarias para que la presión a la salida de la línea de recirculación sea  $P_{N1}^0$ .

Llegado este punto, se tiene una solución que satisface el criterio de convergencia de presiones en el nodo 1 y el balance de materia, pero queda por evaluar que se cumpla el balance de energía en el nodo 1, es decir, que se cumpla la siguiente ecuación:

$$\dot{m}_1 \cdot T_{out,L1}^0 + \dot{m}_{recirc} \cdot T_{out,recirc}^0 = (\dot{m}_1 + \dot{m}_{recirc}) \cdot T_{in,comp}^0 \quad (3.12)$$

La resolución llevada a cabo hasta ahora ha partido de la premisa de que:

$$T_{in,comp}^0 = T_{out,L1}^0 \quad (3.13)$$

Lo cual solo es cierto si el gasto másico de la línea de recirculación es menor o igual a cero, es decir, si el caso estudiado es una *Bifurcación*. Como  $\dot{m}_{recirc} > 0$ , y debido al compresor,  $T_{out,recirc}^0 > T_{out,L1}^0$ , se tiene que la temperatura de remanso a la entrada de la línea del compresor va a ser superior a  $T_{out,L1}^0$ .

Se calcula el valor de  $T_{in,comp}^0$  que cumpliría el balance de energía y se vuelve a aplicar la resolución de las líneas 2 y 3 explicada en este capítulo, tras lo cual se volverá a evaluar el balance de energía en el nodo 1. El bucle se ejecutará hasta que el balance se cumpla con la tolerancia fijada ( $\pm 1^\circ \text{C}$  respecto de  $T_{in,comp}^0$ ).

### 3.3 Resolución de la línea simple 4

Tras finalizar la resolución de las líneas simples 2 y 3, se tiene que en el nodo 2 vuelven a converger los caudales de ambas líneas, teniéndose de nuevo que:

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_{comp} - \dot{m}_{recirc} = \dot{m}_1 \quad (3.14)$$

Al ser el nodo 2 un punto de división de flujo, las propiedades de presión y temperatura de remanso a la entrada de la línea 4 serán iguales a las propiedades de salida de la línea del compresor ( $P_{N2}^0$  y  $T_{N2}^0$ ). Conociendo la presión y temperatura de comienzo de línea y sabiendo el gasto másico circulante ( $\dot{m}_4$ ), se resuelve la línea 4 normalmente.

En caso de que se encontrase algún tipo de restricción al flujo en la línea 4 (por bloqueo sónico, o por bombeo/bloqueo de un compresor), toda la resolución anterior quedaría invalidada, y se avisaría al usuario de la imposibilidad de calcular la configuración con el gasto másico que se ha introducido.

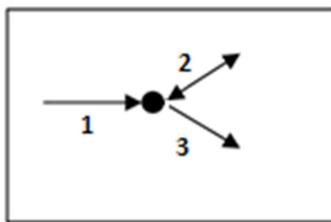
Si por el contrario no se encontrase ningún tipo de restricción al flujo, el cálculo de la configuración *Malla* se tendría completado.



## Anexo E: Método de cálculo de la configuración *División de Flujo*

### 1. Método de resolución

En el presente anexo se explica el método de resolución desarrollado para la configuración *División de Flujo*, que como se recuerda, está conformada por tres líneas simples y un nodo, dispuestos según el siguiente esquema:



Como se observa en el esquema anterior, de las tres líneas simples se conoce el sentido del flujo en dos de ellas (líneas 1 y 3). Sin embargo, a priori se desconoce el sentido del flujo de la línea 2, que puede actuar como alimentación o como descarga de nodo. Para poder determinarlo, el usuario debe introducir las propiedades de remanso en su extremo, lo que equivaldría introducir un depósito en el extremo derecho de la línea 2. Mediante la comparación de esta presión con la presión calculada en el nodo se determinará el sentido del flujo de la línea 2.

#### 1.1 Resolución de la línea simple 1

En primer lugar se resuelve la *Línea Simple 1* aplicando el gasto másico  $\dot{m}_1$  introducido por el usuario.

En caso de que el programa detecte que se produce una limitación al flujo, se avisará al usuario, indicando qué tipo de restricción se ha producido (bloqueo sónico, bombeo del compresor o bloqueo del compresor). Se ofrecerá al usuario la opción de reimponer  $\dot{m}_1$  al valor del gasto másico límite calculado por el programa, pudiendo éste aceptar o rechazar la corrección, en cuyo caso la ejecución finalizaría.

Tras la resolución de la línea 1 con el gasto másico  $\dot{m}_1$  se calcula la presión y temperatura de remanso en el nodo:  $P_N^0$ ,  $T_N^0$ .

#### 1.2 Resolución de las líneas simples 2 y 3

Para la resolución de las líneas 2 y 3 el primer paso es conocer el sentido del flujo en la línea 2. Para ello se compara la presión calculada en el nodo ( $P_N^0$ ) con la presión introducida por el usuario al final de la línea ( $P_{Dep}^0$ ):

- Si  $P_N^0 > P_{Dep}^0$ : La línea 2 actúa como descarga de nodo, y el sentido del flujo es desde el nodo hacia el depósito. Método de cálculo explicado en el apartado 2.1.
- Si  $P_N^0 < P_{Dep}^0$ : La línea 2 actúa como alimentación de nodo, y el sentido del flujo es desde el depósito hacia el nodo. Método de cálculo explicado en el apartado 2.2.

### 1.2.1 Línea 2 actúa como descarga de nodo

Tras determinar que el sentido del flujo en la línea 2 va desde el nodo hacia el depósito, se puede comenzar a resolver las líneas 2 y 3.

En primer lugar se comprueba si el problema introducido tiene solución, es decir, si es físicamente posible que se reparta un gasto másico  $\dot{m}_1$  entre las líneas 2 y 3. Para ello se calcula el gasto másico de bloqueo de ambas líneas:  $\dot{m}_{2,max}$  y  $\dot{m}_{3,max}$ :

- a) Si  $\dot{m}_1 > \dot{m}_{2,max} + \dot{m}_{3,max}$  se deduce que el problema introducido no posee solución, ya que el gasto másico que hay que repartir entre las dos líneas es superior a la suma de sus gastos másicos de bloqueo. Se detiene la ejecución del programa, avisando al usuario del motivo.
- b) Si  $\dot{m}_1 \leq \dot{m}_{2,max} + \dot{m}_{3,max}$  se puede continuar con la resolución del problema.

De la línea 2 se conoce la presión en sus extremos ( $P_N^0$  y  $P_{Dep}^0$ ), queriéndose conocer el gasto másico circulante ( $\dot{m}_2$ ). Para ello se ejecuta la función “Línea Simple B”, descrita en el Anexo C. Con esto queda resuelta la línea 2 en cualquiera de sus casos posibles (incluyendo el caso de bloqueo con adición de pérdidas de presión por ondas de choque).

Tras resolver la línea 2, se ha obtenido que su gasto másico vale  $\dot{m}_2$ . Por balance de materia en el nodo se tiene que:

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_1 - \dot{m}_2 \quad (1.1)$$

Se evalúa el valor de este gasto másico:

- a) Si  $\dot{m}_3 < 0$  se tiene que el problema introducido no se puede calcular, ya que la configuración *División de Flujo* ha sido creada considerando que la línea 3 siempre actuará como descarga de nodo. Se detiene la ejecución del programa, avisando al usuario del motivo.
- b) Si  $\dot{m}_3 \geq 0$  se tiene un valor de  $\dot{m}_3$  tal que la línea 3 actúa como descarga de nodo, y además  $\dot{m}_3$  no puede ser mayor al gasto másico de bloqueo de la línea. Conociendo esta información, y teniendo calculadas las condiciones de presión y temperatura al comienzo de la línea ( $P_N^0$  y  $T_N^0$ ), se calcula normalmente la línea 3, finalizando la resolución de la configuración *División de Flujo*.

### 1.2.2 Línea 2 actúa como alimentación de nodo

Tras determinar que el sentido del flujo en la línea 2 va desde el depósito hacia el nodo, se puede comenzar a resolver las líneas 2 y 3.

El primer paso es reordenar los elementos que conforman la línea simple 2: puesto que en la interfaz de entrada el usuario introduce todos los elementos de la línea simple de izquierda a derecha, el programa invertirá la disposición de los elementos que conforman la línea 2, de forma que se comience su resolución por el último elemento introducido por el usuario.

A continuación se calcula el gasto máscio circulante por la línea 2 ( $\dot{m}_2$ ). Puesto que se conoce la presión en sus extremos ( $P_{Dep}^0$  y  $P_N^0$ ), se ejecuta la función “Línea Simple B”, descrita en el Anexo C. Con esto queda resuelta la línea 2 en cualquiera de sus casos posibles (incluyendo el caso de bloqueo con adición de pérdidas de presión por ondas de choque).

Tras resolver la línea 2, se ha obtenido que su gasto máscio vale  $\dot{m}_2$ . Por balance de materia en el nodo se tiene que:

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_1 + \dot{m}_2 \quad (1.2)$$

El paso siguiente es comprobar si el problema introducido posee solución. Para ello se calcula el gasto máscio máximo que puede circular por la línea 3 ( $\dot{m}_{3,max}$ ) y se evalúa:

- a) Si  $\dot{m}_3 > \dot{m}_{3,max}$ : el problema introducido no tiene solución, ya que la única línea que actúa como descarga de nodo (la línea 3) no es capaz de hacer circular el gasto máscio que le viene de las otras dos líneas. Se detiene la ejecución del programa, avisando al usuario del motivo.
- b) Si  $\dot{m}_3 \leq \dot{m}_{3,max}$ : la línea 3 sí es capaz de absorber el gasto máscio  $\dot{m}_3$  impuesto, por lo que, teniendo calculadas las condiciones de presión y temperatura del nodo ( $P_N^0$  y  $T_N^0$ ), se calcula normalmente la línea 3, finalizando la resolución de la configuración *División de Flujo*.



## Anexo F: Interfaz de entrada: guía de utilización

Como se explicó en la Memoria, el programa desarrollado posee una interfaz de entrada de datos basada en *Microsoft Excel* con la asistencia de *Visual Basic for Applications* (VBA) para la creación de ventanas emergentes, cuadros de selección y otros controles de formulario. El programa ha sido bautizado como *CHIEF* (Cálculo Hidráulico de Elementos e Instalaciones de Flujo compresible).

La interfaz ha sido programada de tal forma que prevenga la aparición de posibles errores durante la posterior resolución en *Matlab* al no permitir la entrada de datos erróneos o que estén fuera de los límites de lo que el programa es capaz de resolver. Además, se ha intentado que la interfaz sea intuitiva y fácil de usar para cualquier usuario, al cual se guía paso a paso desde el principio hasta el final de la introducción de datos.

Se pretende a continuación realizar una breve guía de utilización para que el usuario pueda conocer cómo está diseñada la interfaz de entrada, y qué opciones ofrece para la introducción de datos.

### 1. Hoja de Datos Generales

Es la hoja de cálculo a la que es conducido por defecto el usuario una vez que éste abre el archivo Excel de entrada de datos (“*Entrada\_datos.xlsxm*”). Esta hoja presenta el siguiente aspecto:

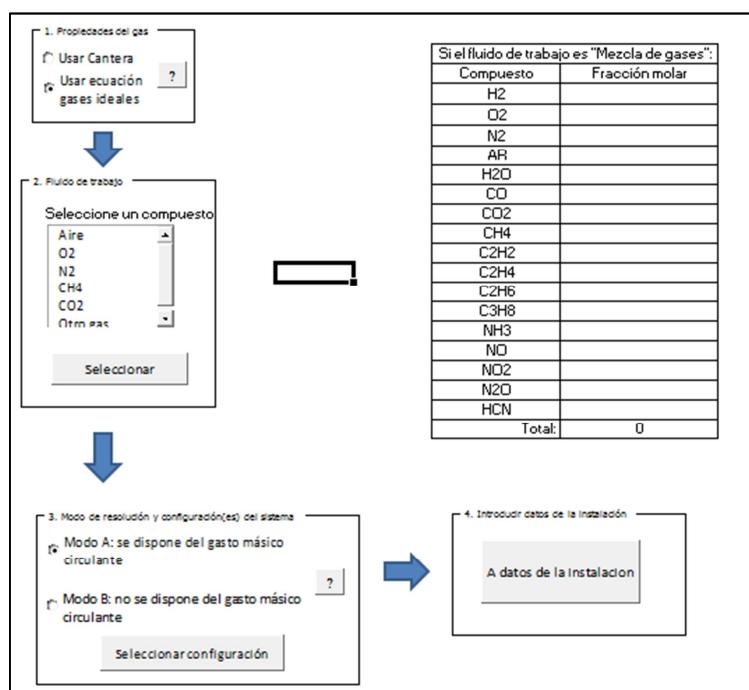


Figura 1.1 Aspecto de la hoja “1. Datos Generales”

Como se puede observar en la figura anterior, el usuario debe llenar en orden tres puntos de introducción de datos, separados mediante flechas, antes pulsar el botón “A datos de la instalación” situado en la esquina inferior derecha. Cuando el usuario haya completado la introducción de todos los datos de la hoja actual y pulse en dicho botón, el programa revisará si falta algún dato por introducir, y en caso contrario, trasladará al usuario a la siguiente hoja de cálculo.

A continuación se explica en detalle cada uno de los tres puntos de introducción de datos.

### 1.1 Propiedades del gas

Simple elección entre utilizar la herramienta *Cantera* [1] como fuente de propiedades termodinámicas del fluido o usar la ecuación de los gases ideales para tal efecto:

- **Ecuación de los gases ideales:** las propiedades del gas son obtenidas directamente de la ecuación de los gases ideales. Si se marca esta opción el calor específico a presión constante ( $C_p$ ), el calor específico a volumen constante ( $C_v$ ) y el coeficiente de dilatación adiabática del gas ( $\gamma$ ) se suponen constantes con la temperatura.
- **Cantera:** herramienta totalmente libre y gratuita que permite la resolución de problemas termodinámicos y/o cinéticos. Para poder ejecutar el programa con *Cantera* como base de datos es necesario tener instalada una versión igual o superior a la 2.1. Supone gas ideal, pero actualiza  $C_p$ ,  $C_v$  y  $\gamma$  con la temperatura.

### 1.2 Fluido de trabajo

En función de la elección realizada en el punto anterior sobre las propiedades termodinámicas del gas, la lista de selección del punto de introducción de datos 2 modifica los valores a escoger:

#### a) Ecuación de los gases ideales.

Se da al usuario la posibilidad de escoger entre 5 fluidos de trabajo: aire, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>, así como la opción de introducir un gas personalizado (opción “*Otro gas*”). Si se selecciona esta última opción aparecerá la siguiente ventana emergente:

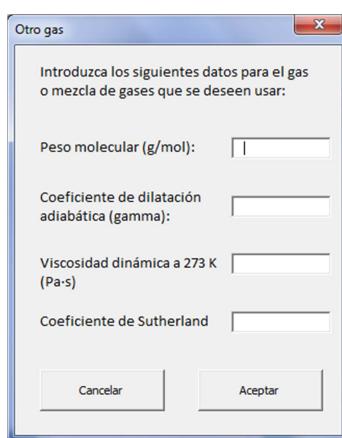


Figura 1.2. Ventana de introducción de “*Otro gas*”

Como se puede observar en la captura de pantalla anterior, el usuario deberá introducir el peso molecular, el coeficiente de dilatación adiabática, la viscosidad

dinámica a 273 K y el coeficiente de Sutherland del gas personalizado en cuestión. Si por el contrario, el usuario ha seleccionado aire, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> o CO<sub>2</sub>, no deberá introducir ningún tipo de dato, ya que el programa tiene guardadas sus propiedades.

**b) Cantera.**

En este caso se da al usuario la posibilidad de escoger entre 18 compuestos distintos: aire, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, Ar, H<sub>2</sub>O, CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, NH<sub>3</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O y HCN. Se dispone asimismo de la posibilidad de escoger una mezcla en cualquier proporción de cualquiera de estos gases, seleccionando la opción “*Mezcla de gases*”, en cuyo caso aparecerá la siguiente ventana:

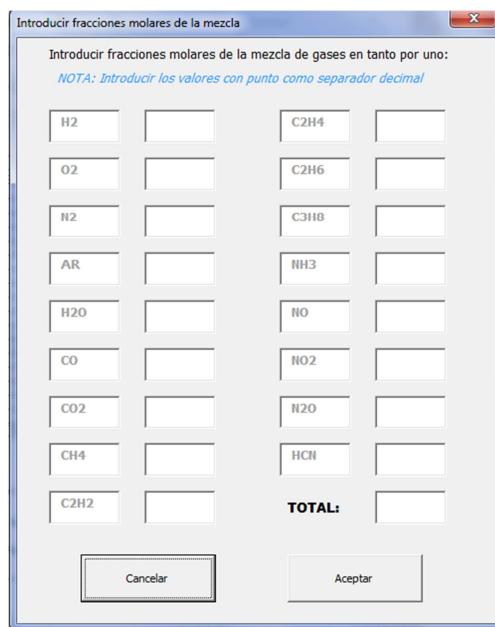


Figura 1.3. Ventana de introducción de fracciones molares en mezcla de gases

En dicha ventana el usuario deberá introducir las fracciones molares (en tanto por uno) de cada uno de los gases presentes en la mezcla, y pulsar el botón *Aceptar* para finalizar. El programa no dejará salir hasta que la suma de las fracciones molares valga exactamente la unidad.

### 1.3 Modo de resolución y configuración del sistema

El programa dispone de dos modos de resolución:

- **Modo A:** se calculan las condiciones de salida (presión y temperatura) de la instalación, tras fijar el usuario las condiciones de entrada y el gasto másico circulante.
- **Modo B:** se calcula el gasto másico circulante entre dos presiones fijadas por el usuario.

En el punto de introducción de datos número 3, el usuario debe seleccionar tanto el modo de resolución necesario para resolver su problema (“*Modo A: Se dispone del gasto másico circulante*” o “*Modo B: no se dispone del gasto másico circulante*”) como su configuración (*Línea Simple, Malla o División de Flujo*).

La interfaz de entrada toma dos direcciones distintas a partir de este punto en función del modo de funcionamiento seleccionado: si se selecciona el *Modo A* se mostrarán visibles las hojas de cálculo correspondientes a dicho modo de funcionamiento, tornándose invisibles las correspondientes al *Modo B*, y viceversa.

En cualquier caso, al clicar sobre el botón “*Seleccionar configuración*” del punto de introducción de datos 3 (véase la Figura 1.1 si se quiere recordar su localización en la hoja de cálculo), aparecerá la siguiente ventana emergente:

- Si se ha seleccionado el *Modo A*:

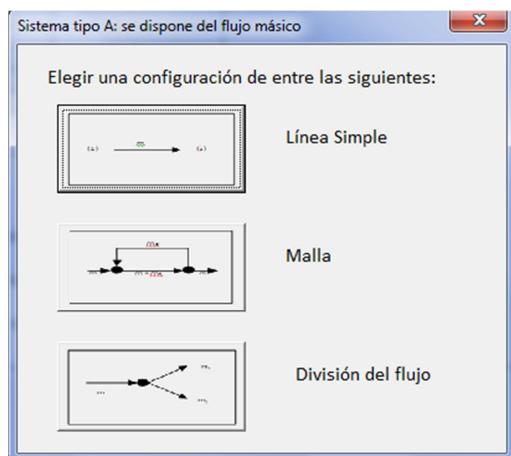


Figura 1.4. Ventana de selección de Configuración (*Modo A*)

Como se puede observar en la captura de pantalla anterior, se ofrece al usuario la posibilidad de escoger cualquiera de las tres configuraciones mostradas: *Línea Simple*, *Malla* o *División del Flujo* clicando sobre su imagen correspondiente.

- Si se ha seleccionado el *Modo B*:

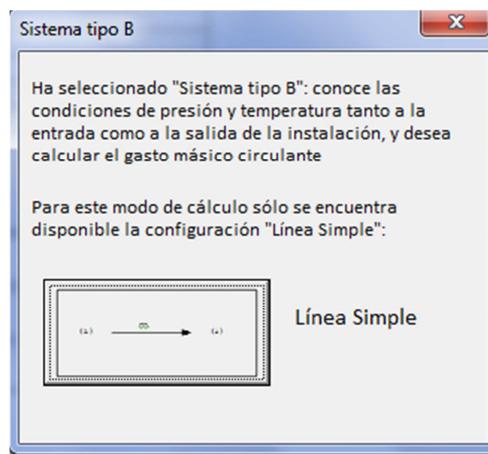


Figura 1.5. Ventana de selección de Configuración (*Modo B*)

Como se puede observar en la captura de pantalla anterior, si se ha seleccionado el *Modo B*, únicamente se ofrece al usuario la posibilidad de escoger la configuración *Línea Simple*.

### **1.3 A datos de la instalación**

Una vez completados los tres puntos anteriores, el usuario deberá clicar sobre el botón “A datos de la instalación” situado en la esquina inferior derecha de la Figura 1.1. El programa comprobará si falta por introducir alguna información importante, en cuyo caso mostrará un mensaje de aviso. En caso contrario, se conducirá al usuario a la segunda y última hoja de cálculo de introducción de datos. Esta hoja es, como se ha dicho anteriormente, distinta en función del modo de cálculo seleccionado:

- Si se ha seleccionado el *Modo A*: el programa conduce al usuario a la hoja de cálculo “2. *Datos instalación A*”. Esta hoja se describe en el capítulo siguiente de este Anexo.
- Si se ha seleccionado el *Modo B*: el programa conduce al usuario a la hoja de cálculo “2. *Datos instalación B*”. Esta hoja se describe en el capítulo 3 de este Anexo.

## 2. Hoja de datos de la instalación (Modo A)

Una vez el usuario ha sido conducido a esta hoja, esto implica que ha llenado correctamente toda la información de la primera hoja (“1. Datos generales”, explicada en el capítulo anterior), y se tiene que el usuario ha introducido una de las tres configuraciones posibles dentro del modo de cálculo A (*Línea Simple*, *Malla* o *División de flujo*).

La presente hoja de cálculo presenta la apariencia mostrada en la siguiente figura:

Figura 2.1. Aspecto de la hoja “2. Datos instalación A”

Como se puede observar en la figura anterior, en esta hoja se tienen tres cuadros numerados de 0 a 2. El usuario deberá pasar ordenadamente por estos tres cuadros:

- **“0. Borrar datos previos”**: una vez se guarda una instalación en el archivo *Excel* de interfaz de entrada, ésta queda guardada para posteriores cálculos. Si se desea introducir una nueva instalación se recomienda clicar sobre este botón, evitando tener que borrar los elementos uno a uno. Como es lógico, esto no borrará la información introducida en la hoja anterior.
- **“1. Introducir datos de partida”**: puesto que en la hoja anterior se ha seleccionado el modo de cálculo A, el usuario deberá introducir el flujo o gasto másico circulante, así como la presión y temperatura de entrada al comienzo de la instalación.
- **“2. Selección de la línea simple a modificar”**: cuerpo principal de la introducción de datos de la hoja actual. En este punto el usuario debe especificar la composición de cada una de las *Líneas Simples* presentes en la configuración escogida en la hoja anterior. En el ejemplo mostrado en la Figura 2.1 se tiene una configuración tipo *Malla*, por lo que el programa detecta que se tienen que llenar 4 líneas simples,

mostrándolas numeradas en la lista. La numeración de las líneas se hace de acuerdo con la notación indicada en las figuras que están inmediatamente debajo de la lista de selección de líneas simples.

Así pues, el usuario únicamente debe seleccionar cada una de las líneas simples que conforman su configuración y rellenarlas con los elementos (tramo recto, codo, cambio de sección, válvula, compresor, orificios) en los que están constituidas. Por su extensión, este tema será tratado en el siguiente subapartado.

- “**3. Importar datos**”: al clicar sobre este botón finaliza la introducción de datos en la interfaz de entrada. El programa comprueba que se hayan introducido correctamente todos los datos necesarios para la resolución del problema, y en caso afirmativo ofrece al usuario una última elección:
  - Guardar y cerrar el archivo *Excel* para ejecutar el código *Matlab* (recomendado).
  - Revisar el “*Informe de Entrada*”: tercera y última hoja, en la que se han ido almacenando todas las elecciones del usuario y de donde Matlab carga los datos.

Si el lector se fija en la parte inferior de la Figura 2.1 observará que hay una franja verde con el título “Muestra de la instalación introducida”. Bajo este título el usuario puede en todo momento comprobar rápidamente la composición de cada una de las líneas simples que ha introducido.

## 2.1 Modificación de una *Línea Simple*

En este subapartado se amplía, tal y como se avanzó previamente, el sistema de introducción y modificación de elementos de una línea simple una vez que ésta ha sido seleccionada en el cuadro 2 mediante el botón “*Seleccionar Línea Simple*”. Una vez se clica sobre dicho botón, aparece el menú de elementos de la línea simple seleccionada, tal y como se muestra en la siguiente figura:

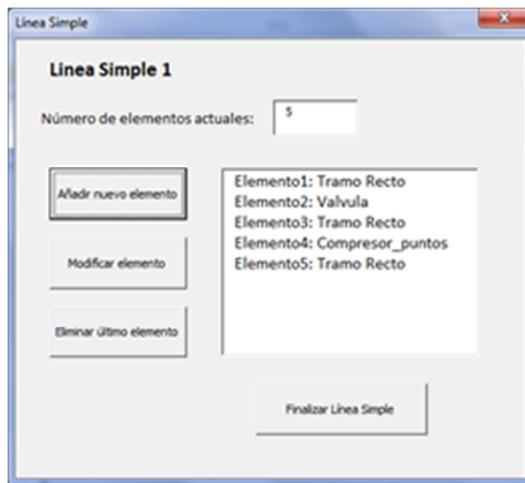


Figura 2.2. Menú de elementos de una línea simple

Como se puede observar en la figura anterior, al seleccionar una línea simple cualquiera, aparece un menú en el cual se muestra:

- El nombre de la línea simple atendiendo a la nomenclatura utilizada.
- El número total de elementos de los que está compuesta. En el ejemplo utilizado, la línea está formada por 5 elementos.
- Lista con el número y tipo de elementos que conforman la línea: tramo recto, válvula, etc.
- Botones de acción: “*Añadir nuevo elemento*”, “*Modificar elemento*” y “*Eliminar último elemento*”. Estos botones serán explicados en detalle a continuación.
- Botón “*Finalizar Línea Simple*”, que cierra el menú actual y sale de vuelta a la hoja “2. *Datos de la instalación A*”.

### 2.1.1 *Añadir nuevo elemento*

Al clicar sobre el botón “*Añadir nuevo elemento*” desde el menú mostrado en la Figura 2.2, aparecerá la siguiente ventana de selección:

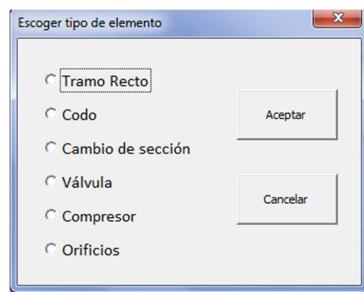


Figura 2.3. Selección de nuevo elemento

Como se observa en la figura anterior, el usuario dispone de 6 tipos de elemento para añadir a la línea simple seleccionada: tramo recto, codo, cambio de sección, válvula, compresor y orificios. En función de qué tipo de elemento se seleccione, aparecerá una ventana de introducción de datos u otra.

#### 2.1.1.1 *Añadir tramo recto*

Si se desea añadir un tramo recto a la línea simple seleccionada, aparecerá la siguiente ventana de introducción de datos:



Figura 2.4. Ventana de introducción del elemento Tramo Recto

Como se observa en la figura anterior, los datos requeridos al usuario para la definición del elemento Tramo Recto son cuatro: longitud, diámetro, rugosidad absoluta y método de cálculo (adiabático o isotermo). El programa está diseñado para calcular tramos rectos cilíndricos. En caso de desear calcular un tramo recto no cilíndrico, se debería introducir su diámetro hidráulico.

#### 2.1.1.2 *Añadir codo*

Si se desea añadir un codo a la línea simple seleccionada, aparecerá la siguiente ventana de introducción de datos:

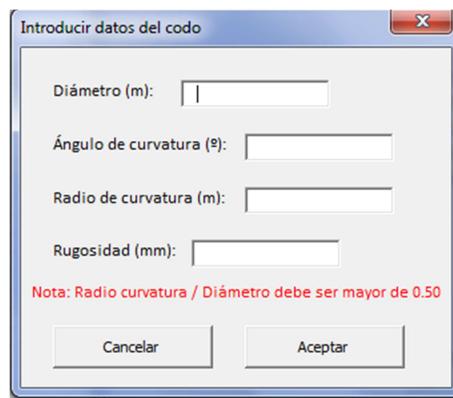


Figura 2.5. Ventana de introducción del elemento Codo

Como se observa en la figura anterior, para definir este elemento se deberán introducir: diámetro, ángulo de curvatura (0-180°), radio de curvatura y rugosidad absoluta. Se impone la condición de que el radio de curvatura dividido entre el diámetro sea mayor de 0.50, condición necesaria para poder obtener un coeficiente de pérdidas en la base de datos del programa (como se puede consultar en el Capítulo 2 del Anexo B).

#### 2.1.1.3 Añadir cambio de sección

Si se desea añadir un cambio de sección a la línea simple seleccionada, aparecerá la siguiente ventana de introducción de datos:

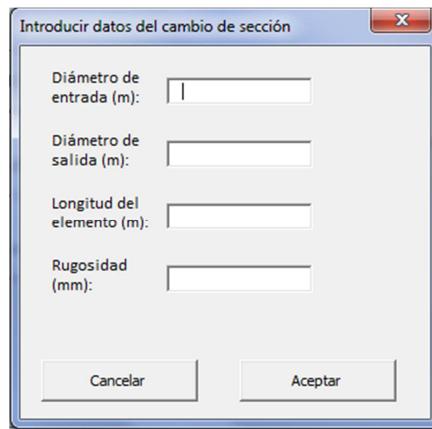


Figura 2.6. Ventana de introducción del elemento Cambio de Sección

Como se puede observar en la figura anterior, para definir este elemento el usuario deberá introducir: diámetro de entrada, diámetro de salida, longitud y rugosidad absoluta. Si el cambio de sección es brusco, la longitud deberá valer cero.

#### 2.1.1.4 Añadir válvula

Si se desea añadir una válvula a la línea simple seleccionada, aparecerá la siguiente ventana de introducción de datos:

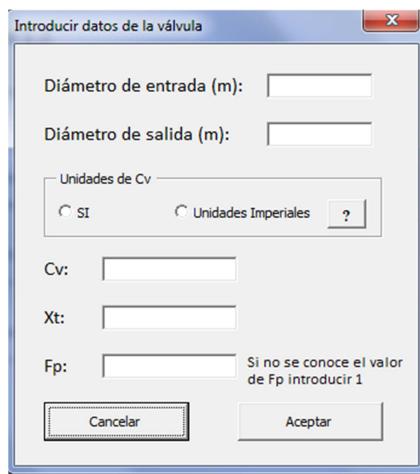


Figura 2.7. Ventana de introducción del elemento Válvula

Como se puede observar en la figura anterior, para definir este elemento se deberá introducir: diámetro de entrada,  $C_v$ , unidades del  $C_v$  (S.I. o Sistema Británico),  $X_t$ ,  $F_p$  y diámetro de salida. Si el usuario clica sobre el botón que presenta un signo de interrogación, el programa mostrará una ventana de información acerca del  $C_v$  y sus unidades:

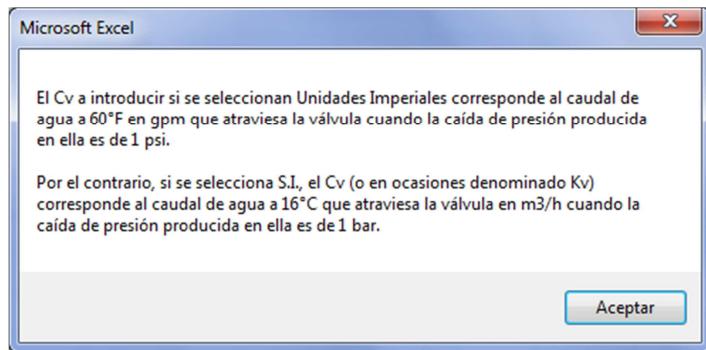


Figura 2.8. Ventana de información del  $C_v$  y sus unidades

Respecto del coeficiente  $X_t$ , éste se define como la máxima pérdida de presión (expresada como cociente: pérdida de presión entre presión de entrada) que puede soportar la válvula sin bloquearse. Por ejemplo, si se indica que la válvula posee un  $X_t = 0.50$ , esto significa que el gas pierde la mitad de su presión de entrada antes de bloquearse.

El coeficiente  $F_p$  por otra parte es un factor de pérdidas adicionales dependientes de la geometría de la válvula. En caso de desconocerse su valor, se recomienda introducir  $F_p=1$ .

#### 2.1.1.5 Añadir compresor

El elemento Compresor presenta la particularidad de poder ser introducido de distintas formas:

- b. **Introduciendo curvas características:** el usuario introduce las curvas características de salto de presión y rendimiento del compresor. A su vez tiene dos formas de hacerlo:
- Introducir coeficientes:** el usuario introduce directamente los coeficientes de la ecuación de cada una de las curvas, así como el gasto corregido máximo y mínimo que es capaz de soportar el compresor (el programa aproxima las curvas del compresor con ecuaciones de segundo grado).
  - Introducir puntos de funcionamiento:** el usuario introduce hasta 10 parejas de puntos de funcionamiento para cada una de las curvas, y el programa ajusta dichos puntos mediante mínimos cuadrados a una ecuación parabólica, tomando el valor del gasto corregido mínimo y máximo de los puntos extremos.
- c. **Introduciendo salto de presión y rendimiento constantes:** modo simplificado de implementar el elemento Compresor. El usuario introduce el salto de presión y el rendimiento del compresor, que el programa tomará como constantes.

Cada una de las tres formas de introducir el elemento Compresor explicadas posee su propia ventana-formulario de introducción de datos. Debido a su tamaño no se han incluido imágenes de las mismas.

#### 2.1.1.6 Añadir orificios

Si se desea añadir el elemento Orificios a la línea simple seleccionada, aparecerá la siguiente ventana de introducción de datos:

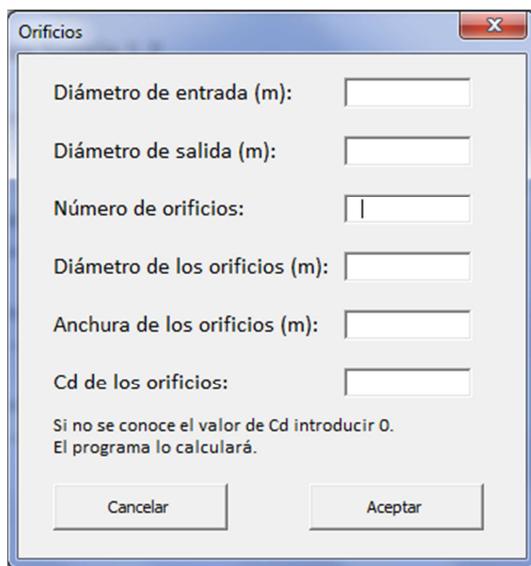


Figura 2.9. Ventana de introducción del elemento Orificios

Como se puede observar en la figura anterior, para definir este elemento se deberá introducir: diámetro de entrada, número de orificios, diámetro de los orificios, anchura de los orificios, coeficiente de descarga ( $C_d$ ) en caso de disponerse de dicho parámetro, y diámetro de salida.

### 2.1.2 Modificar elemento

Al clicar sobre el botón “Modificar elemento” desde el menú mostrado en la Figura 2.2, aparecerá una ventana en la cual el usuario podrá modificar los datos del elemento que estuviese seleccionado en el momento de clicar el botón “Modificar elemento”. En caso de que ningún elemento estuviese seleccionado se avisará al usuario.

La ventana emergente depende del tipo de elemento en cuestión, y es muy similar a las ventanas mostradas en el apartado anterior, aunque se elimina la opción de modificar el diámetro para evitar cambios de sección inesperados en la línea (esto es, sin su correspondiente elemento “Cambio de sección”).

La ventana muestra al comienzo los valores que posee actualmente el elemento seleccionado, y el usuario puede modificar si lo desea cualquiera de los campos. Como ejemplo, se muestra a continuación la ventana resultante de modificar una válvula:

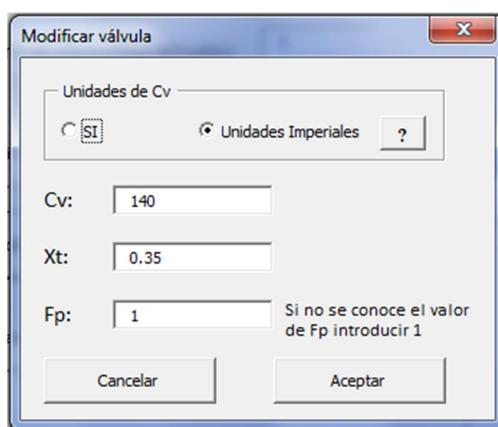


Figura 2.10. Ventana de modificación de una válvula. Nótese que aparece cargada con los valores que posee la válvula antes de la modificación.

### 2.1.3 Eliminar último elemento

Por último, al clicar sobre el botón “Eliminar último elemento” desde el menú mostrado en la Figura 2.2, el usuario borrará el último elemento presente en la línea simple. En caso de tener una línea vacía el programa avisará al usuario.

### 3. Hoja de datos de la instalación (Modo B)

Una vez el usuario ha sido conducido a esta hoja, esto implica que ha llenado correctamente toda la información de la primera hoja (“1. Datos generales”, explicada en el capítulo anterior), y se tiene que se ha seleccionado el modo de cálculo B, y por tanto, la configuración *Línea Simple* (la única disponible para este modo de cálculo).

La presente hoja de cálculo presenta una apariencia muy similar a la ya vista para el modo A en el capítulo anterior, aunque presenta algunas diferencias. En la siguiente figura se muestra un ejemplo de esta hoja:

| MUESTRA DE LA INSTALACIÓN INTRODUCIDA |                  |                          |              |                |                 |              |
|---------------------------------------|------------------|--------------------------|--------------|----------------|-----------------|--------------|
| Línea Simple introducida              |                  |                          |              |                |                 |              |
| Id                                    | Tipo de elemento | Propiedades del elemento |              |                |                 |              |
|                                       |                  | Longitud (m)             | Diámetro (m) | Rugosidad (mm) | Tipo de cálculo | Fp           |
| 1                                     | Tramo Recto      | 35                       | 0,12         | 0,01           | Adiabático      |              |
| 2                                     | Valvula          |                          |              |                |                 | 1 Británicas |

Figura 3.1. Aspecto de la hoja “2. Datos instalación B”

Como se observa en la figura anterior, en esta hoja se tienen cuatro cuadros numerados del 1 al 4. El usuario deberá pasar ordenadamente por estos cuatro cuadros:

- **“1. Introducir propiedades al comienzo de la línea”:** se debe fijar la presión y temperatura existentes al comienzo de la línea simple a calcular. Se puede indicar si las propiedades introducidas son estáticas o de remanso.
- **“2. Introducir propiedades a la salida de la línea”:** se debe fijar la presión y temperatura existentes a la salida de la línea simple a calcular. Se puede indicar si las propiedades introducidas son estáticas o de remanso.
- **“3. Introducción de la Línea Simple a calcular”:** análogo al método de introducción de elementos en una línea simple visto en el *Modo A*, por lo que no se profundizará en este tema, remitiendo al capítulo anterior.
- **“4. Importar datos”:** al clicar sobre este botón finaliza la introducción de datos en la interfaz de entrada. El programa comprueba que se hayan introducido correctamente todos los datos necesarios para la resolución del problema, y en caso afirmativo ofrece al usuario una última elección:

- Guardar y cerrar el archivo *Excel* para ejecutar el código *Matlab* (recomendado).
- Revisar el “*Informe de Entrada*”: tercera y última hoja, en la que se han ido almacenando todas las elecciones del usuario y de donde Matlab carga los datos.

Si el lector se fija en la parte inferior de la Figura 3.1 observará que, al igual que ocurría en el *Modo A* (Figura 2.1), existe una franja verde con el título “Muestra de la instalación introducida”. Bajo este título se muestra al usuario la composición de la línea simple introducida.

#### **4. Bibliografía Anexo F**

Se muestra a continuación la bibliografía empleada en el presente Anexo:

[1] *Cantera*; [22/05/2015]; <https://code.google.com/p/cantera/>

## Anexo G: Validación de los distintos elementos

---

En el anexo actual se muestran las validaciones llevadas a cabo para cada uno de los elementos implementados en el programa (tramo recto, codo, cambio de sección, válvula, compresor y orificios). La validación ha sido realizada a través del programa comercial *AFT Arrow*, cuyas principales características fueron brevemente expuestas en el anexo A.

El método de validación consistirá en resolver cada uno de los elementos estudiados tanto en el programa desarrollado (*CHIEF*) como en *AFT Arrow*, con diversas tipologías dentro de cada elemento, y con gastos básicos crecientes hasta llegar al caso de bloqueo sónico (en caso de que éste fuese posible). Para cada resolución se comparará la pérdida de presión obtenida en ambos programas, de forma que se pueda evaluar si éstos presentan o no un comportamiento similar.

A continuación se presentan una a una las validaciones llevadas a cabo para cada uno de los elementos. En todos los casos se ha utilizado aire ideal como fluido de trabajo, con unas condiciones de entrada de 8 bares absolutos y 400 K de temperatura (propiedades estáticas).

### 1. Tramo Recto

Tal y como se ha explicado anteriormente, el elemento *Tramo Recto* ha sido implementado con dos métodos de cálculo distintos: adiabático e isotermo, por lo que será necesaria la validación de ambos métodos por separado.

Para la validación del elemento *Tramo Recto* se han considerado dos tipologías distintas de tubería:

Tabla 1.1. Tipologías utilizadas para la validación de *Tramo Recto*

|                         | Tramo recto 1 | Tramo recto 2 |
|-------------------------|---------------|---------------|
| Longitud (m)            | 20            | 100           |
| Diámetro (cm)           | 10            | 20            |
| Rugosidad absoluta (mm) | 0,01524       | 0,01524       |

#### 1.1 Tramo Recto Adiabático

La metodología utilizada es resolver ambas tipologías de tramo recto con un gasto másico creciente hasta llegar al bloqueo sónico, tanto en *CHIEF* como en *AFT Arrow*. A continuación se muestran los resultados obtenidos en ambos casos.

##### 1.1.1 Resultados del tramo recto 1

El tramo recto 1 ha sido resuelto en ambos programas con cuatro gastos másicos distintos:

Tabla 1.2. Resultados del tramo recto 1 (CHIEF)

| G (kg/s)            | P <sub>1</sub> (bar) | T <sub>1</sub> (K) | Ma <sub>1</sub> | P <sub>2</sub> (bar) | T <sub>2</sub> (K) | Ma <sub>2</sub> |
|---------------------|----------------------|--------------------|-----------------|----------------------|--------------------|-----------------|
| 3                   | 8                    | 400                | 0,1367          | 7,7015               | 399,88             | 0,1420          |
| 5                   | 8                    | 400                | 0,2279          | 7,1041               | 398,91             | 0,2563          |
| 8                   | 8                    | 400                | 0,3646          | 4,5769               | 381,14             | 0,6221          |
| 8,3971<br>(bloqueo) | 8                    | 400                | 0,3827          | 2,8355               | 343,10             | 1               |

Tabla 1.3. Resultados del tramo recto 1 (AFT Arrow)

| G (kg/s) | P <sub>1</sub> (bar) | T <sub>1</sub> (K) | Ma <sub>1</sub> | P <sub>2</sub> (bar) | T <sub>2</sub> (K) | Ma <sub>2</sub> |
|----------|----------------------|--------------------|-----------------|----------------------|--------------------|-----------------|
| 3        | 8                    | 400                | 0,1367          | 7,699                | 399,9              | 0,1424          |
| 5        | 8                    | 400                | 0,2279          | 7,100                | 398,9              | 0,2570          |
| 8        | 8                    | 400                | 0,3646          | 4,566                | 381,1              | 0,6247          |
| 8,3971   | 8                    | 400                | 0,3827          | 2,860                | 344,1              | 0,9937          |

Como se puede observar en las dos tablas anteriores, el método que se ha seguido es comenzar por un gasto másico relativamente pequeño (3 kg/s, que hace un  $Ma_1=0.1367$ ) e ir aumentándolo progresivamente hasta lograr el bloqueo por fricción de la tubería, que según el programa desarrollado se consigue con un gasto másico de 8.3971 kg/s. En CHIEF, para obtener de una forma rápida el gasto másico de bloqueo de un elemento basta con imponerle un gasto másico superior al que éste puede soportar (por ejemplo, en el caso estudiado, fijarle 10 kg/s). El programa indicará que dicho caudal no es posible, devolviendo el gasto másico máximo, es decir, el de bloqueo (8,3971 kg/s en este caso).

El programa AFT Arrow, en el modo de cálculo utilizado (fijar gasto másico y calcular presión de salida) no soporta la introducción de gastos másicos que bloqueen la tubería por lo que lo más que se ha podido hacer es jugar con el gasto másico hasta lograr un  $Ma_2$  lo más cercano a 1.

Los resultados de ambos programas son muy similares, tal y como se puede apreciar en la siguiente figura, donde se ve cómo los puntos calculados prácticamente se solapan.

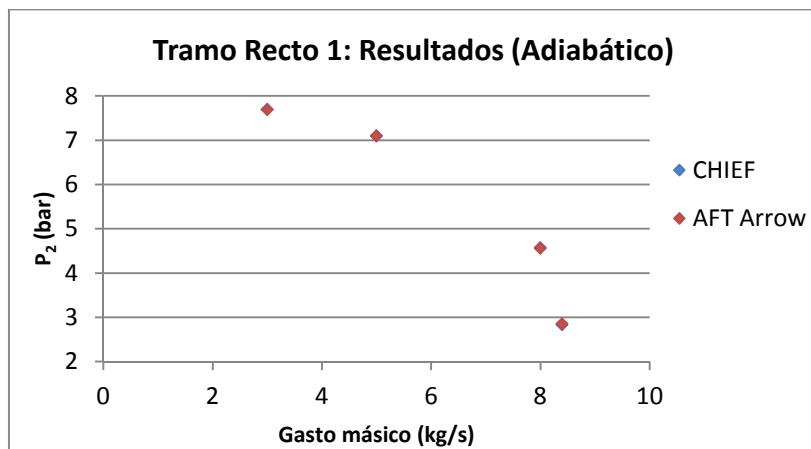


Figura 1.1. Comparación de resultados del tramo recto 1 (adiabático)

### 1.1.2 Resultados del tramo recto 2

Análogamente al tramo recto 1, se ha realizado la validación para el tramo recto 2 indicado en la tabla 1.1. Puesto que la metodología empleada es exactamente la misma explicada en el apartado anterior, se pasa directamente a presentar la gráfica de resultados:

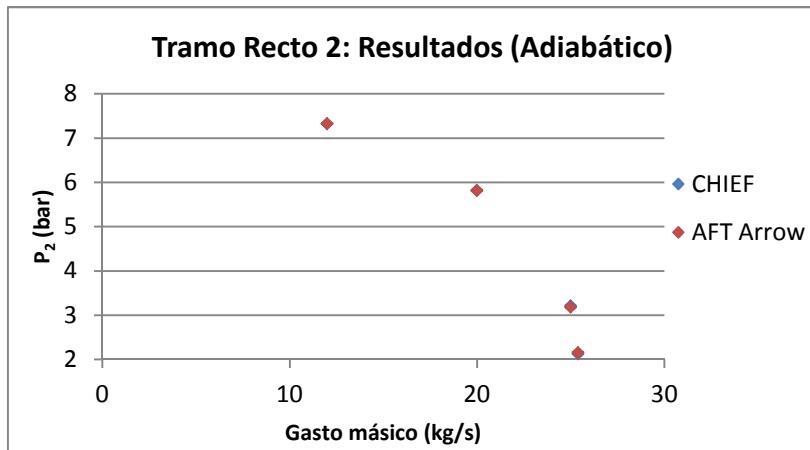


Figura 1.2. Comparación de resultados del tramo recto 2 (adiabático)

Como se puede observar en la figura anterior, los resultados obtenidos para el tramo recto 2 son prácticamente los mismos en ambos programas. Respecto del gasto másico de bloqueo, *CHIEF* calcula un  $\dot{m}_{bloqueo}$  de 25.395 kg/s, valor que al ser introducido en el *AFT Arrow* devuelve un  $Ma_2$  de 0.9901.

### 1.1.3 Comparación de todos los casos estudiados

Si se presentan en una misma gráfica los resultados obtenidos para ambos tramos rectos tanto en *CHIEF* como en el *AFT Arrow*, se puede observar claramente la buena correlación de los resultados calculados por ambos programas: los puntos se sitúan exactamente sobre la bisectriz (línea roja).

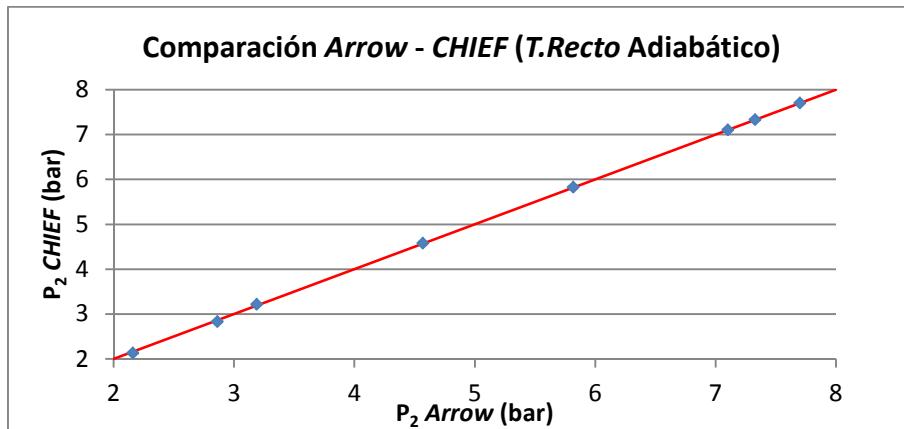


Figura 1.3. Comparación de resultados obtenidos mediante ambos programas para los dos tramos rectos estudiados

## 1.2 Tramo Recto Isotermo

La validación del método isotermo se ha realizado de forma análoga a lo visto en el apartado anterior para el método adiabático, por lo que presentan directamente las gráficas de resultados:

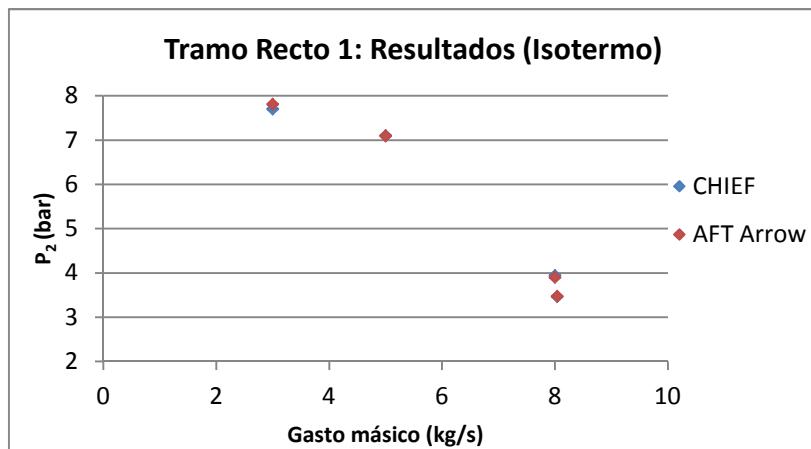


Figura 1.4. Comparación de resultados del tramo recto 1 (isotermo)

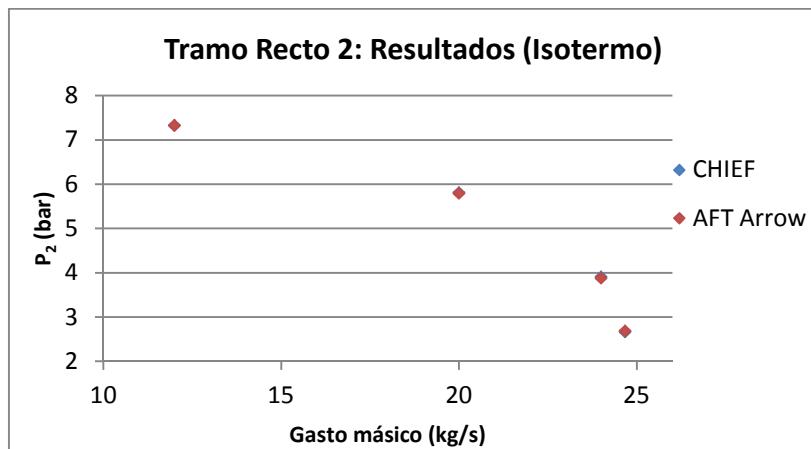


Figura 1.5. Comparación de resultados del tramo recto 2 (isotermo)

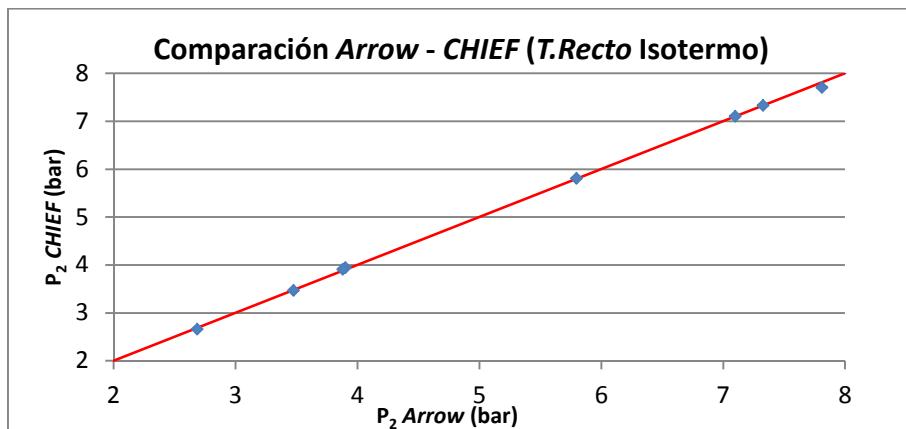


Figura 1.6. Comparación de resultados obtenidos mediante ambos programas para los dos tramos rectos estudiados

En las figuras anteriores se puede observar cómo los resultados proporcionados por ambos programas resultan prácticamente idénticos para todos los casos estudiados, situándose la mayoría de los puntos exactamente sobre la bisectriz. Respecto al cálculo del gasto másico de bloqueo, se tiene que:

- En el tramo recto 1 *CHIEF* calcula un  $\dot{m}_{bloqueo} = 8.041 \text{ kg/s}$ , valor que al ser introducido en *AFT Arrow* proporciona un  $Ma_2$  de 0.8474. Téngase en cuenta que, como se explicó en el Anexo B, en el tramo recto isotermo el bloqueo de la tubería no se produce al alcanzar la velocidad del sonido ( $Ma_2=1$ ), sino que se produce para un  $Ma_2 = 1/\sqrt{\gamma}$ , 0.845 aproximadamente para el aire.
- En el tramo recto 2 *CHIEF* calcula un  $\dot{m}_{bloqueo} = 24.675 \text{ kg/s}$ , valor que al ser introducido en *AFT Arrow* proporciona un  $Ma_2$  de 0.8419.

De estos datos se concluye que también para el tramo recto isotermo se obtienen gastos másicos de bloqueo similares en ambos programas.

## 2. Codo

Para la validación del elemento *Codo* se han considerado cuatro tipologías distintas, tal como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 2.1. Tipologías utilizadas para la validación de *Codo*

|                         | Codo de 90° |         | Codo de 57° |         |
|-------------------------|-------------|---------|-------------|---------|
|                         | Codo 1      | Codo 2  | Codo 1      | Codo 2  |
| Diámetro (cm)           | 10          | 10      | 10          | 10      |
| Radio de curvatura (cm) | 20          | 13.3    | 20          | 13.3    |
| Rugosidad (mm)          | 0.01524     | 0.01524 | 0.01524     | 0.01524 |

En la tabla anterior se observa que, para cada uno de los valores de ángulo de curvatura (90 y 57°) se han propuesto dos codos con una relación de aspecto distinta (modificando el radio de curvatura).

El elemento *Codo* es el único en el cual no se ha considerado el bloqueo sónico, por lo que la validación no llegará hasta el caso de  $Ma_2=1$ .

Cada uno de los cuatro codos estudiados se ha resuelto con tres gastos másicos distintos (6, 9 y 12 kg/s), con el objeto de calcular el elemento *Codo* en distintos rangos de velocidad del flujo. Al tener los cuatro codos el mismo diámetro, se tiene que en todos ellos los valores de  $Ma$  de entrada para cada gasto másico son 0.273, 0.410 y 0.547 respectivamente.

Se tiene pues que se calculan 4 codos distintos con 3 gastos másicos diferentes cada uno, tanto en *CHIEF* como en *AFT Arrow*. Esto proporciona 12 valores de presión de salida calculados por cada uno de los programas. Si se representan en un mismo gráfico:

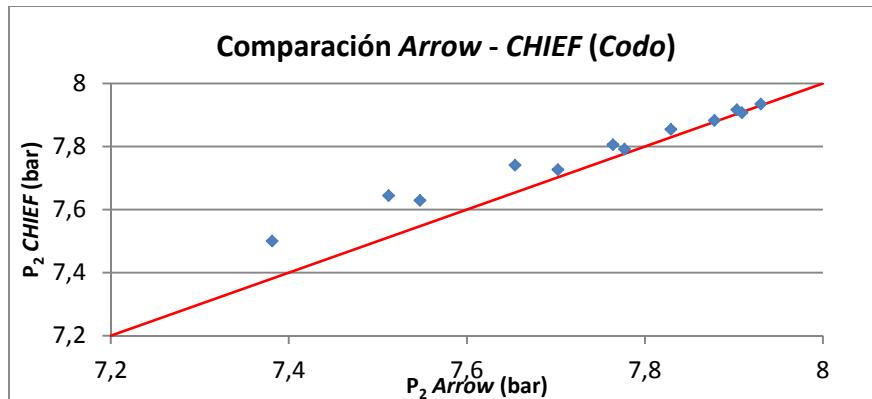


Figura 2.1. Comparación de resultados obtenidos mediante ambos programas para los cuatro codos estudiados

En la figura anterior se observa cómo los resultados obtenidos con ambos programas presentan las siguientes características:

- Muy buena correlación para velocidades del flujo bajas, es decir, para caídas de presión relativamente pequeñas.

- Conforme el  $Ma_1$  aumenta, la caída de presión calculada por *CHIEF* es inferior a la obtenida a través de *AFT Arrow*: en la figura 2.1 esto se puede observar en el hecho de que los puntos van quedando por encima de la bisectriz conforme  $P_2$  disminuye: la presión de salida calculada por *CHIEF* es superior a la calculada por *AFT Arrow*, o lo que es lo mismo, la caída de presión calculada es inferior.

Aun cuando los resultados de la validación del elemento *Codo* distan de los vistos para el elemento *Tramo Recto*, se consideran aceptables. Las diferencias observadas entre el comportamiento de los dos programas proviene de la distinta fuente bibliográfica utilizada para la obtención de la  $K_{codo}$  (véase anexo B). No se ha encontrado ninguna indicación acerca de cuál de las dos opciones es más fiable, por lo que estas discrepancias no pueden interpretarse como un error de ninguno de los dos programas.

### 3. Cambio de Sección

Para la validación del elemento *Cambio de sección* se han considerado cuatro tipologías distintas, tal como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 3.1 Tipologías utilizadas para la validación de Cambio de Sección

|                           | Cambio convergente |         | Cambio divergente |         |
|---------------------------|--------------------|---------|-------------------|---------|
|                           | C.S. 1             | C.S. 2  | C.S. 1            | C.S. 2  |
| <b>D<sub>1</sub> (cm)</b> | 10                 | 10      | 8                 | 8       |
| <b>D<sub>2</sub> (cm)</b> | 7.5                | 7.5     | 16                | 16      |
| <b>Ángulo (°)</b>         | 180 (brusco)       | 53      | 180 (brusco)      | 57      |
| <b>Rugosidad (mm)</b>     | 0.01524            | 0.01524 | 0.01524           | 0.01524 |

En la tabla anterior se observa cómo, para cada tipo de cambio de sección (convergente y divergente) se han propuesto dos cambios de sección distintos: cambio brusco ( $\alpha=180^\circ$ ) y cambio gradual ( $\alpha<180^\circ$ ).

Puesto que, tal y como se explicó en el Anexo B, el cambio de sección convergente presenta en el programa desarrollado un método de cálculo distinto al implementado en *AFT Arrow*, ha parecido de interés llevar a cabo un análisis algo más detallado de este elemento.

#### 3.1 Cambio Convergente

Las dos tipologías de *Cambio de Sección* convergente propuestas:  $\alpha=180^\circ$  y  $\alpha=53^\circ$  han sido calculadas tanto en *CHIEF* como en *AFT Arrow* con gastos máicos crecientes, hasta llegar al bloqueo sónico. A continuación se muestran los resultados obtenidos para ambas tipologías.

##### 3.1.1 Cambio Convergente brusco ( $\alpha=180^\circ$ )

El cambio de sección convergente con ángulo de  $180^\circ$  ha sido resuelto con cuatro gastos máicos en ambos programas:

Tabla 3.2. Resultados del cambio de sección convergente brusco (*CHIEF*)

| G (kg/s)           | P <sub>1</sub> (bar) | T <sub>1</sub> (K) | Ma <sub>1</sub> | P <sub>2</sub> (bar) | T <sub>2</sub> (K) | Ma <sub>2</sub> |
|--------------------|----------------------|--------------------|-----------------|----------------------|--------------------|-----------------|
| 3                  | 8                    | 400                | 0,137           | 7,687                | 396,46             | 0,252           |
| 6                  | 8                    | 400                | 0,273           | 6,485                | 380,01             | 0,584           |
| 7                  | 8                    | 400                | 0,319           | 5,589                | 364,39             | 0,775           |
| 7,572<br>(bloqueo) | 8                    | 400                | 0,345           | 4,533                | 341,28             | 1               |

Tabla 3.3. Resultados del cambio de sección convergente brusco (AFT Arrow)

| G (kg/s)           | P <sub>1</sub> (bar) | T <sub>1</sub> (K) | Ma <sub>1</sub> | P <sub>2</sub> (bar) | T <sub>2</sub> (K) | Ma <sub>2</sub> |
|--------------------|----------------------|--------------------|-----------------|----------------------|--------------------|-----------------|
| 3                  | 8                    | 400                | 0,137           | 7,686                | 396,5              | 0,2525          |
| 6                  | 8                    | 400                | 0,273           | 6,433                | 379,8              | 0,5902          |
| 7                  | 8                    | 400                | 0,319           | 5,311                | 361,0              | 0,8126          |
| 7,242<br>(bloqueo) | 8                    | 400                | 0,331           | 4,440                | 343,4              | 0,997           |

Para poder comparar rápidamente entre los resultados mostrados en las dos tablas anteriores, se ha realizado la siguiente gráfica:

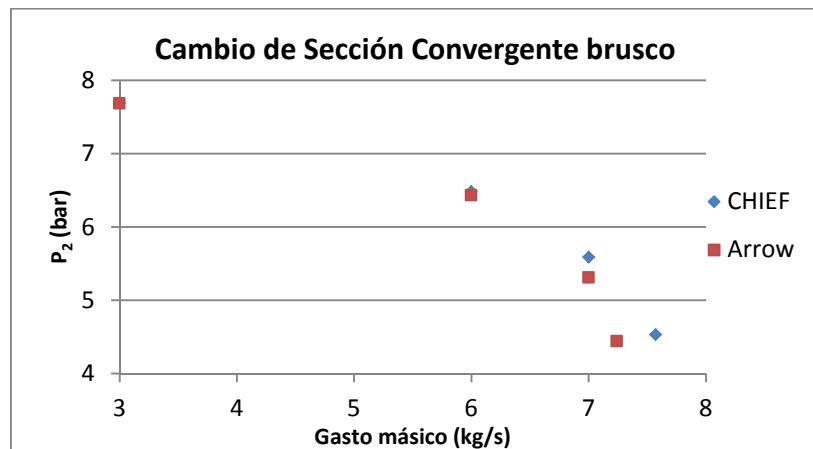


Figura 3.1. Comparación de resultados del cambio de sección convergente brusco

En la figura anterior se observa cómo los resultados obtenidos mediante *CHIEF* y *AFT Arrow* prácticamente se solapan para gastos másicos bajos, mientras que conforme el gasto másico aumenta, las diferencias van creciendo hasta llegar al punto que el estrechamiento se encuentra bloqueado en *CHIEF* con 7.572 kg/s, mientras que en *AFT Arrow* se bloquea con 7.242 kg/s. Se han realizado unos breves cálculos para comprobar si, efectivamente, en ambos casos la sección de salida del estrechamiento está bloqueada:

- En CHIEF:

La  $T_2$  indicada para el caso de bloqueo es 341.28 K, por lo que la velocidad del sonido se puede calcular como:

$$v_{sonido} = \sqrt{\gamma \cdot R \cdot T} = \sqrt{1.4 \cdot 287 \cdot 341.28} = 370.308 \text{ m/s}$$

Si la  $P_2$  indicada en la tabla 3.2 es de 4.533 bar, y el gas se considera como ideal, se puede calcular su densidad:

$$\rho = \frac{P}{R \cdot T} = \frac{4.533 \cdot 10^5}{287 \cdot 341.28} = 4.628 \text{ kg/m}^3$$

Y la sección de salida del estrechamiento:

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot D_2^2 = \frac{\pi}{4} \cdot 0.075^2 = 0.004418 \text{ m}^2$$

Por lo que, si se aplica la ecuación de continuidad para el caso de bloqueo:

$$\dot{m}_{bloqueo} = \rho \cdot A \cdot v_{sonido} = 4.628 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0.004418 \text{ m}^2 \cdot 370.308 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 7.572 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Que es exactamente el valor del gasto másico de bloqueo indicado en la tabla 3.2. Esto no demuestra que dicho valor sea el correcto, únicamente muestra la coherencia de los datos de  $P_2$ ,  $T_2$  y  $Ma_2$  proporcionados.

- En AFT Arrow:

Repetiendo el cálculo anterior con los datos de  $P_2$  y  $T_2$  de bloqueo proporcionados en la tabla 3.3 por AFT Arrow:

$$v_{sonido} = \sqrt{\gamma \cdot R \cdot T} = \sqrt{1.4 \cdot 287 \cdot 343.4} = 371.454 \text{ m/s}$$

$$\rho = \frac{P}{R \cdot T} = \frac{4.440 \cdot 10^5}{287 \cdot 343.4} = 4.505 \text{ kg/m}^3$$

$$\dot{m}_{bloqueo} = \rho \cdot A \cdot v_{sonido} = 4.505 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0.004418 \text{ m}^2 \cdot 371.454 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 7.393 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

El valor calculado presenta una significativa diferencia respecto de los 7.242 kg/s proporcionados como valor de bloqueo en la tabla 3.3, mostrando que en el cambio de sección aún no se ha alcanzado realmente la condición de bloqueo sónico.

### 3.1.2 Cambio Convergente gradual ( $\alpha=53^\circ$ )

Los resultados obtenidos para el cambio convergente con ángulo de  $53^\circ$  son muy similares a los del cambio convergente brusco, por lo que se pasa directamente a presentar su gráfico:

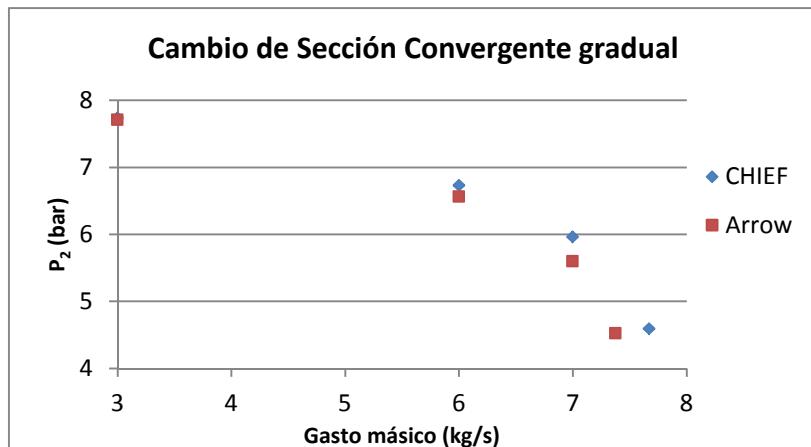


Figura 3.2. Comparación de resultados del cambio de sección convergente gradual

### 3.2 Cambio Divergente

Para el caso del cambio de sección divergente, como se explicó en el Anexo B, no se ha aplicado un modelo distinto del utilizado por *AFT Arrow*, por lo que en este caso los resultados se espera que sean similares. Además, el caso de un ensanchamiento no puede presentar el fenómeno de bloqueo sónico, lo cual simplifica la validación.

#### 3.2.1 Cambio divergente brusco ( $\alpha=180^\circ$ )

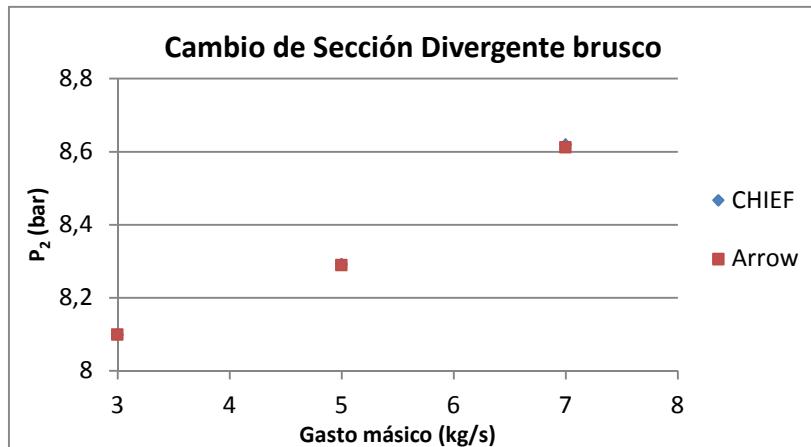


Figura 3.3. Comparación de resultados del cambio de sección divergente brusco

En este caso se observa cómo los resultados proporcionados por ambos programas son prácticamente idénticos, y los puntos de la figura anterior prácticamente se solapan.

Este resultado es esperable, ya que ambos programas utilizan el mismo método de cálculo, y la constante de pérdidas  $K$  que se está empleando es la misma en ambos casos ( $K=0.5625$ ).

#### 3.2.1 Cambio divergente gradual ( $\alpha=57^\circ$ )

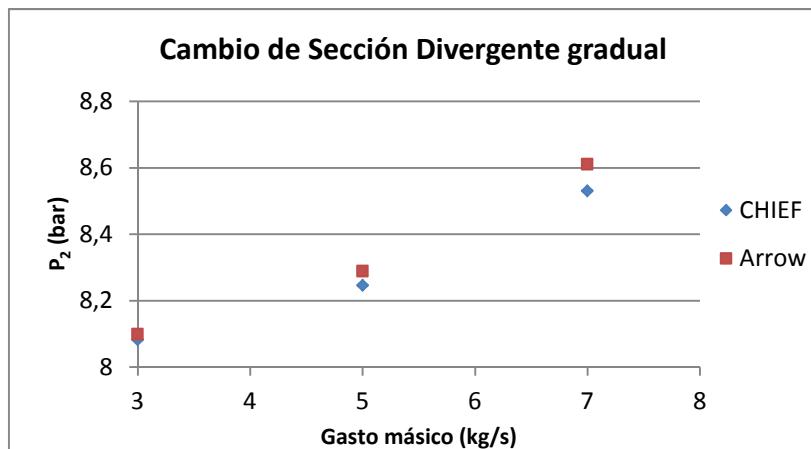


Figura 3.4. Comparación de resultados del cambio de sección divergente gradual

En la figura anterior se observa cómo, a pesar de utilizar el mismo método de cálculo, los resultados proporcionados por ambos programas difieren, especialmente al aumentar el gasto másico. Esto es debido al distinto valor de la constante de pérdidas obtenida en cada programa:

- $K=0.6265$  en *CHIEF*.
- $K=0.5625$  en *AFT Arrow*, mismo valor de  $K$  que se tenía para el caso de un ensanchamiento brusco ( $\alpha=180^\circ$ ), por lo que los resultados obtenidos en este caso mediante *AFT Arrow* son exactamente iguales a los que se expusieron en el apartado anterior para el ensanchamiento brusco.

En cualquier caso, si se observa la escala del eje de presiones de la figura 3.4, se puede concluir que la diferencia en los resultados, si bien apreciable, no es excesivamente elevada.

### 3.3 Comparación de todos los casos estudiados

Si se representa en un mismo gráfico la presión de salida calculada por ambos programas para cada uno de los casos estudiados (tanto para cambio de sección convergente como divergente):

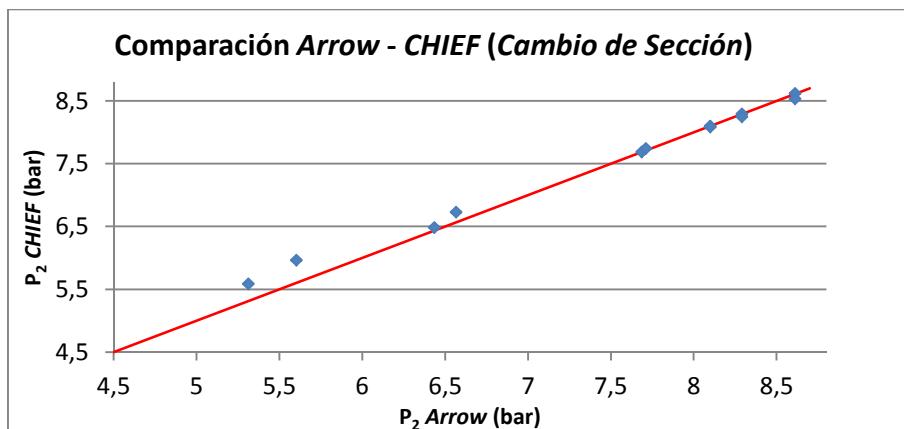


Figura 3.5. Comparación de resultados obtenidos con ambos programas para el elemento *Cambio de Sección*

En la figura anterior se puede observar cómo los resultados proporcionados por ambos programas resultan prácticamente idénticos para el caso divergente ( $P_2 > 8$  bar), y para el caso convergente ( $P_2 < 8$  bar) en casos en los que la caída de presión no sea muy acusada (situación lejana del bloqueo sónico). En estos casos los puntos se sitúan prácticamente sobre la bisectriz marcada por la línea roja.

Debido al diferente método de cálculo empleado, tal y como se explicó en este mismo capítulo, los resultados de ambos programas comienzan a distanciarse para casos cercanos al bloqueo ( $P_2$  bajas), obteniéndose presiones de salida ligeramente superiores en *CHIEF* a las proporcionadas por *AFT Arrow*.

No ha sido posible incluir los puntos correspondientes al bloqueo sónico ya que, como se ha visto anteriormente, los gastos másicos de bloqueo calculados por ambos programas no coinciden.

## 4. Válvula

La validación del elemento *Válvula* se ha llevado a cabo modificando sus dos parámetros característicos por separado:

- Modificando  $C_v$  y manteniendo  $X_t$  constante.
- Modificando  $X_t$  y manteniendo  $C_v$  constante.

### 4.1 Modificando $C_v$

Se han estudiado tres valores distintos de  $C_v$ : 150, 100 y 50, manteniendo el parámetro  $X_t$  constante en 0.48. Para cada valor de  $C_v$  se han calculado con ambos programas 4 puntos de funcionamiento con un gasto máscio ascendente, siendo el último punto calculado el correspondiente al bloqueo sónico de la válvula. Se presentan los resultados en la siguiente gráfica:

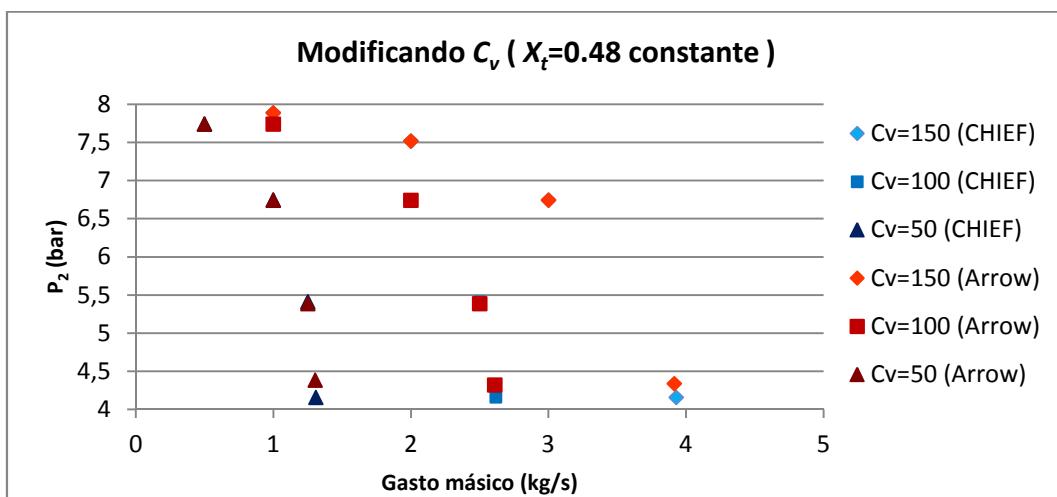


Figura 4.1. Comparación de resultados obtenidos para el elemento *Válvula* modificando el  $C_v$  para un  $X_t=0.48$

En la gráfica anterior se observa cómo los resultados obtenidos mediante ambos programas son prácticamente idénticos, y la mayoría de los puntos se solapan entre ellos. No obstante, hay que destacar cómo el último punto de cada serie de  $C_v$  (el punto correspondiente al bloqueo) presenta unos valores relativamente distintos en ambos programas. Eso se cree que pueda ser debido a que, en el modo de cálculo impuesto (fijar gasto máscio, calcular presión de salida), *AFT Arrow* no puede calcular casos de bloqueo, y las pequeñas diferencias entre alcanzar un  $Ma_2$  de exactamente la unidad (en *CHIEF*) y "cercano" a la unidad (en *AFT Arrow*) provoquen las diferencias observadas en  $P_2$ . Si, por ejemplo se toman los valores de  $P_2$  obtenidos para el caso de bloqueo en la serie  $C_v = 50$  se tiene que:

- En *CHIEF*:  $P_2$  (bloqueo) = 4.160 bar. Si se calcula la caída de presión relativa:

$$x = \frac{P_1 - P_2}{P_1} = \frac{8 - 4.160}{8} = 0.48 = X_t$$

La caída de presión relativa coincide exactamente con el  $X_t$  introducido, por lo que la válvula se encuentra bloqueada.

- En *AFT Arrow*:  $P_2$  (bloqueo) = 4.384 bar. Si se calcula la caída de presión relativa:

$$x = \frac{P_1 - P_2}{P_1} = \frac{8 - 4.384}{8} = 0.452 < X_t (0.48)$$

La caída de presión relativa es menor que el  $X_t$  introducido, por lo que la válvula aún no encuentra exactamente bloqueada.

En cualquier caso, se tiene que los gastos máicos de bloqueo calculados por ambos programas son muy similares:

Tabla 4.1. Comparación de los gastos máicos de bloqueo calculados por ambos programas para cada valor de  $C_v$

|             | $\dot{m}_{bloqueo}$ CHIEF (kg/s) | $\dot{m}_{bloqueo}$ AFT Arrow (kg/s) | Diferencia (%) |
|-------------|----------------------------------|--------------------------------------|----------------|
| $C_v = 150$ | 3.928                            | 3.914                                | 0.35           |
| $C_v = 100$ | 2.618                            | 2.609                                | 0.34           |
| $C_v = 50$  | 1.309                            | 1.304                                | 0.38           |

## 4.2 Modificando $X_t$

Análogamente, se han estudiado otros tres casos en los cuales, con un  $C_v$  fijo de 150, el  $X_t$  toma tres valores distintos: 0.24, 0.48 y 0.70. Los resultados se presentan a continuación:

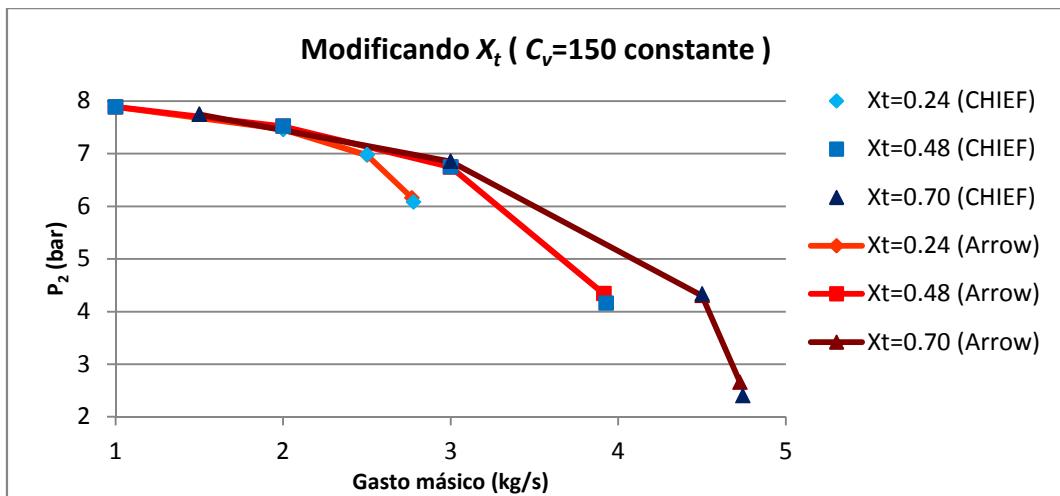


Figura 4.2. Comparación de resultados obtenidos para el elemento Válvula modificando el  $X_t$  para un  $C_v = 150$

Debido a la superposición de puntos producida en la figura anterior, se han incluido líneas que unan los puntos calculados por *AFT Arrow* de forma que se pueda comprender la gráfica con mayor facilidad. Como se observa, los puntos calculados por ambos programas prácticamente se superponen, diferenciándose ligeramente tan sólo en el último punto de cada serie (el de bloqueo), por las razones explicadas en el apartado anterior.

El gasto máscio de bloqueo calculado por ambos programas es muy similar:

Tabla 4.2. Comparación de los gastos básicos de bloqueo calculados por ambos programas para cada valor de  $X_t$

|              | $\dot{m}_{bloqueo} \text{ CHIEF (kg/s)}$ | $\dot{m}_{bloqueo} \text{ AFT Arrow (kg/s)}$ | Diferencia (%) |
|--------------|--|--|----------------|
| $X_t = 0.24$ | 2.777                                    | 2.768  | 0.33           |
| $X_t = 0.48$ | 3.928                                    | 3.914  | 0.35           |
| $X_t = 0.70$ | 4.743                                    | 4.727  | 0.33           |

#### 4.3 Comparación de todos los casos estudiados

Si se representa en un mismo gráfico la presión de salida calculada por ambos programas para cada uno de los casos estudiados:

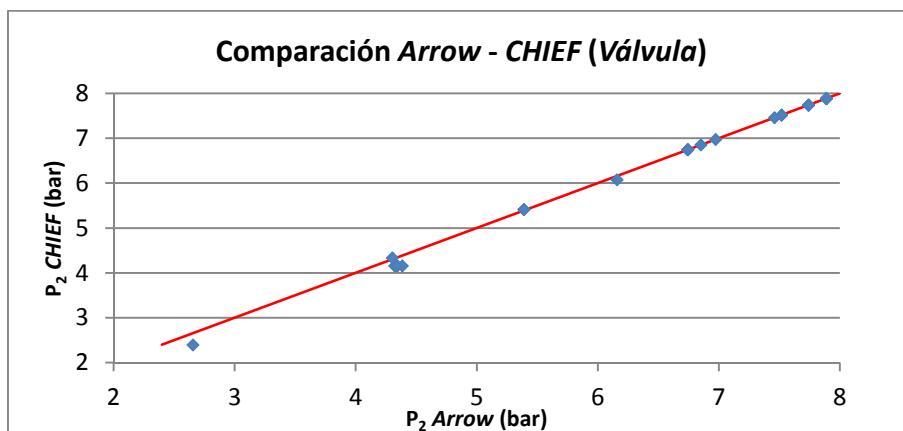


Figura 4.3.Comparación de los resultados obtenidos con ambos programas para el elemento *Válvula*

En la figura anterior se puede observar cómo los resultados proporcionados por ambos programas resultan prácticamente idénticos para todos los casos estudiados, situándose la mayoría de los puntos exactamente sobre la bisectriz marcada por la línea roja. Los puntos que quedan ligeramente por debajo de la bisectriz corresponden a los puntos de bloqueo de la válvula.

## 5. Compresor

Puesto que el elemento *Compresor* calcula las propiedades de salida ( $P_2$ ,  $T_2$ ) directamente a partir de los valores de ratio de presión y rendimiento isoentrópico introducidos directamente por el usuario, no tiene sentido realizar una validación de dicho elemento, ya que su resolución pasa simplemente por ejecutar dos simples ecuaciones una vez recibidos los parámetros necesarios (véase capítulo 5 del Anexo B).

## 6. Orificios

Para la validación del elemento *Orificios* se han considerado cuatro tipologías distintas, tal como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 6.1. Tipologías utilizadas para la validación de *Orificios*

|                                   | Un único orificio |       |      |     | Varios orificios |
|-----------------------------------|-------------------|-------|------|-----|------------------|
|                                   | O.1.              | O.2   | O.3  | O.4 |                  |
| Número de orificios               | 1                 | 1     | 1    | 5   |                  |
| Diámetro orificio (cm)            | 5                 | 2.5   | 7.5  | 1   |                  |
| Espesor orificio (cm)             | 0                 | 1.25  | 10   | 0   |                  |
| Coeficiente de descarga ( $C_d$ ) | 1                 | 0.905 | 0.81 | 1   |                  |

Los valores de  $C_d$  asignados a los orificios propuestos son los calculados por *CHIEF* como los adecuados para la geometría introducida en el caso de bloqueo sónico (consúltese anexo B), por lo que estrictamente, si los orificios no se encontrasen bloqueados, el  $C_d$  tendría un valor distinto. En cualquier caso, el  $C_d$  es un parámetro que en ambos programas debe ser introducido por el usuario, por lo que, independientemente de si se están utilizando valores apropiados de  $C_d$  o no, el objetivo de esta validación es únicamente comprobar que, para los mismos valores de  $C_d$  introducidos, ambos programas proporcionen resultados similares.

Las cuatro tipologías de orificios han sido resueltas con cuatro gastos máscicos crecientes hasta llegar a la condición de bloqueo sónico. Se tienen pues 16 casos calculados con ambos programas, cuyos resultados se muestran a continuación:

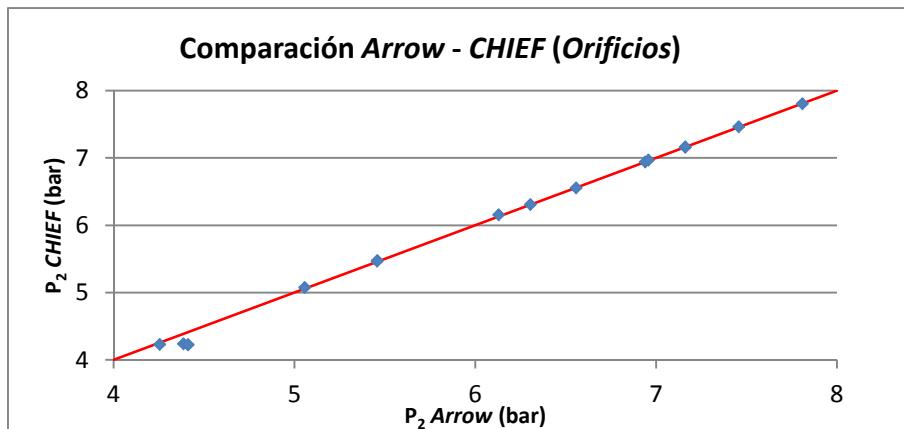


Figura 6.1. Comparación de los resultados obtenidos con ambos programas para el elemento *Orificios*

En la figura anterior se puede observar cómo los resultados proporcionados por ambos programas resultan prácticamente idénticos para todos los casos estudiados, situándose la mayoría de los puntos exactamente sobre la bisectriz marcada por la línea roja. Los puntos que quedan ligeramente por debajo de la bisectriz corresponden, al igual que ocurría en el elemento *Válvula*, a los puntos de bloqueo sónico.

Respecto al cálculo del gasto másico de bloqueo, se tiene que el  $\dot{m}_{bloqueo}$  calculado por ambos programas es muy similar:

Tabla 6.2. Comparación de los gastos másicos de bloqueo calculados por ambos programas para cada tipología de orificio

|      | $\dot{m}_{bloqueo}$ CHIEF (kg/s) | $\dot{m}_{bloqueo}$ AFT Arrow (kg/s) | Diferencia (%) |
|------|----------------------------------|--------------------------------------|----------------|
| O.1. | 3.178                            | 3.171                                | 0.22           |
| O.2. | 0.718                            | 0.716                                | 0.28           |
| O.3  | 5.802                            | 5.784                                | 0.31           |
| O.4. | 0.635                            | 0.633                                | 0.31           |



## Anexo H: Validación de configuraciones

En el presente anexo se especifican las características de las configuraciones utilizadas en las validaciones del capítulo 5 de la Memoria. Para ello se ha decidido estudiar un caso real de la industria: la línea del compresor de una central de ciclo combinado. En este tipo de centrales es común la existencia de una línea de recirculación conocida como línea IBH (*Inlet Bleed Heat*), cuyo cometido es tomar una fracción del aire que sale del turbocompresor y recircularlo a su entrada, tal y como se muestra en la siguiente figura:

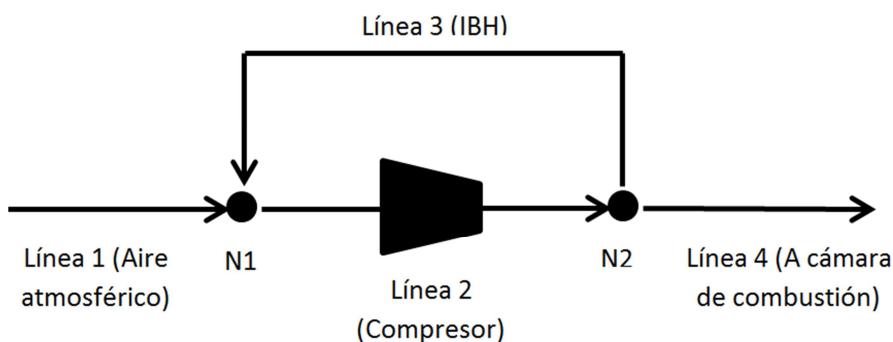


Figura 0.1. Línea del compresor junto con la línea IBH

Con esto se consigue disminuir el gasto másico que pasa a la cámara de combustión, permitiendo a la central operar a potencias bajas.

### 1. Descripción de la configuración utilizada

A continuación se detalla cada una de las líneas de la Figura 0.1:

- **Línea 1:** Toma de entrada del aire atmosférico. Consiste en un tramo recto de 25 metros de longitud y 6 metros de diámetro.
- **Línea 2:** línea del compresor. Está compuesta de:
  - Tramo recto de 10 metros de longitud y 6 metros de diámetro
  - Estrechamiento: cambio de sección, de 6 metros de diámetro a 2.5 metros. La longitud en la cual se efectúa este cambio de sección es de 6 metros, correspondiendo a un ángulo de estrechamiento de 32.5°.
  - Tramo recto de 1 metro de longitud y 2.5 metros de diámetro.
  - Compresor: se le supone un ratio de presión de 10 y un rendimiento isoentrópico de 0.90, independientemente del gasto másico circulante.
  - Tramo recto de 1 metro de longitud y 2.5 metros de diámetro.
- **Línea 3:** línea IBH. Por su mayor complejidad, se muestra un esquema de dicha línea en la Figura 1.1:

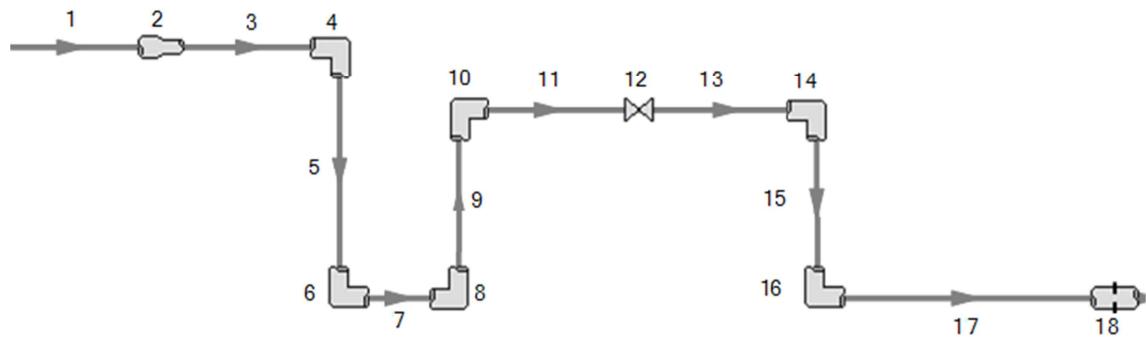


Figura 1.1. Esquema de la línea IBH

Siguiendo la numeración de la Figura 1.1, se detallan a continuación los 18 elementos de los que se compone la línea:

Tabla 1.1. Tramos rectos de la línea IBH

| ID de elemento | Diámetro (cm) | Longitud (m) |
|----------------|---------------|--------------|
| 1              | 30.48         | 1.5          |
| 3              | 25.40         | 1            |
| 5              | 25.40         | 3.4          |
| 7              | 25.40         | 0.3          |
| 9              | 25.40         | 1.25         |
| 11             | 25.40         | 3.5          |
| 13             | 25.40         | 2.7          |
| 15             | 25.40         | 0.5          |
| 17             | 25.40         | 4            |

Tabla 1.2. Codos de la línea IBH

| ID de elemento | Diámetro (cm) | Ángulo (°) | Radio de curvatura (cm) |
|----------------|---------------|------------|-------------------------|
| 4              | 25.40         | 90         | 38                      |
| 6              | 25.40         | 90         | 38                      |
| 8              | 25.40         | 90         | 38                      |
| 10             | 25.40         | 90         | 38                      |
| 14             | 25.40         | 90         | 38                      |
| 16             | 25.40         | 90         | 38                      |

Tabla 1.3. Cambios de sección de la línea IBH

| ID de elemento | Diámetro de entrada (cm) | Diámetro de salida (cm) | Ángulo de estrechamiento (°) |
|----------------|--------------------------|-------------------------|------------------------------|
| 2              | 30.48                    | 25.40                   | 14.47                        |

Tabla 1.4. Válvulas de la línea IBH

| ID de elemento | Diámetro de entrada (cm) | Diámetro de salida (cm) | $C_v$ (Unidades Británicas) | $X_t$ |
|----------------|--------------------------|-------------------------|-----------------------------|-------|
| 12             | 25.40                    | 25.40                   | 800                         | 0.36  |

Tabla 1.5. Orificios de la línea IBH

| ID de elemento | Diámetro de entrada (cm) | Diámetro de salida (cm) | Número de orificios | Diámetro de orificio (cm) | $C_d$ orificio |
|----------------|--------------------------|-------------------------|---------------------|---------------------------|----------------|
| 18             | 25.40                    | 25.40                   | 500                 | 1                         | 0.90           |

- **Línea 4:** línea de entrada a la cámara de combustión. Consiste en un tramo recto de 1 metro de longitud y 2.5 metros de diámetro.

La rugosidad absoluta de todos los tramos rectos y codos se ha tomado como 0.01524 mm, y debido a la escasa longitud de los conductos, se ha optado en todos ellos por el modo de cálculo adiabático.

## 2. Resultados obtenidos en la validación

Tal y como se explica en la Memoria, se ha partido de la instalación descrita en el apartado anterior para la validación de los siguientes casos:

- *Línea Simple A*
- *Línea Simple B*
- *Malla (Recirculación)*
- *División de flujo*

El único caso restante (*Malla (Bifurcación)*) ha sido evaluado con una instalación distinta, explicada en el Anexo I, por lo que se tratará de forma separada en dicho anexo. Se pasa a continuación a mostrar los resultados obtenidos para cada uno de los casos estudiados.

### 2.1 Línea Simple A

Se ha resuelto la línea IBH con 3 gastos máscicos diferentes. Para todos los casos se tiene al comienzo de la línea IBH una presión de 10 bares y una temperatura de 600 K, deseándose calcular la presión de salida. Los resultados obtenidos se muestran en la figura siguiente:

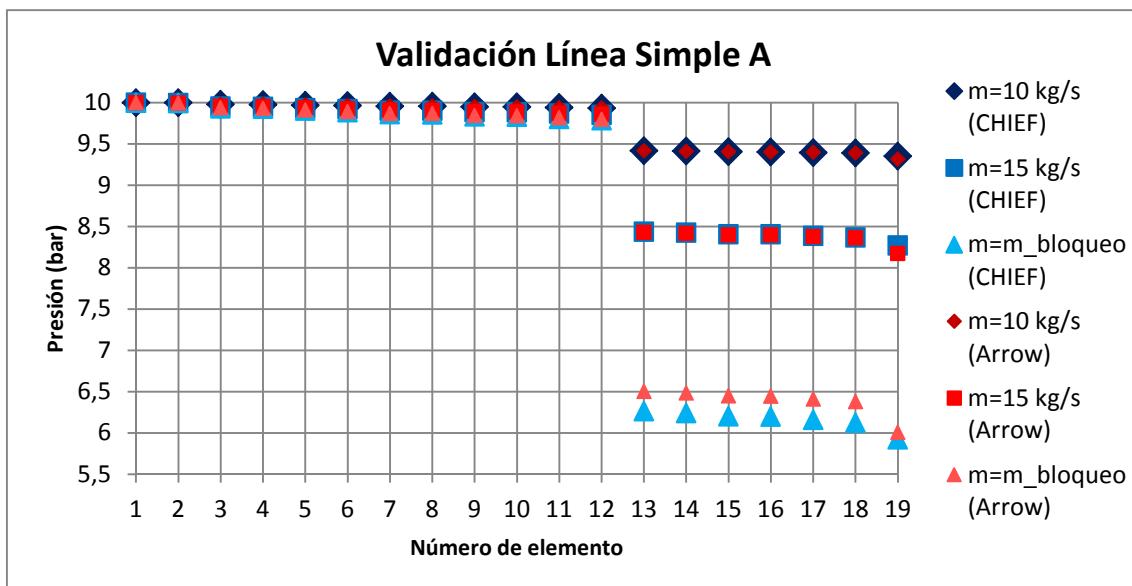


Figura 2.1. Perfil de presiones a lo largo de la línea IBH (*Línea Simple A*)

En la figura anterior se muestra la evolución de la presión estática a lo largo de la línea IBH según los cálculos de ambos programas. Para cada programa se ha resuelto la línea para 3 gastos máscicos diferentes:

- 10 kg/s
- 15 kg/s
- El gasto máscico máximo aplicable a la línea (su gasto máscico de bloqueo):
  - 18.13 kg/s en CHIEF
  - 17.97 kg/s en AFT Arrow

Como se puede observar en la Figura 2.1, ambos programas presentan un comportamiento muy similar, especialmente para los dos gastos máscicos inferiores al de bloqueo. No obstante,

para el caso de bloqueo sónico los resultados a partir de elemento número 12 (válvula) presentan una mayor diferencia. Esto es debido a que, como se mencionó en apartado anterior, para el modo de cálculo A (gasto másico fijado) *AFT Arrow* no puede llegar exactamente hasta el punto de bloqueo, siendo la caída de presión producida en la válvula inferior a la que debería producirse según el parámetro  $X_t$  de la válvula introducida: en *CHIEF* el valor de pérdida de presión relativa es exactamente 0.36 (valor de  $X_t$  de la válvula, como se puede comprobar en la Tabla 1.4), mientras que los resultados obtenidos con *AFT Arrow* indican que la pérdida de presión relativa en el caso de bloqueo es de 0.336, inferior a  $X_t$ . Esto provoca que, a la salida de la válvula la presión sea ligeramente superior para el caso del *AFT Arrow* que para *CHIEF*.

## 2.2 Línea Simple B

Se ha resuelto la línea IBH con 3 valores distintos de presión en su desembocadura. Para todos los casos se tiene al comienzo de la línea IBH una presión de 10 bares y una temperatura de 600 K, deseándose calcular el gasto másico circulante y la presión en cada elemento. Los resultados obtenidos se muestran en la figura siguiente:

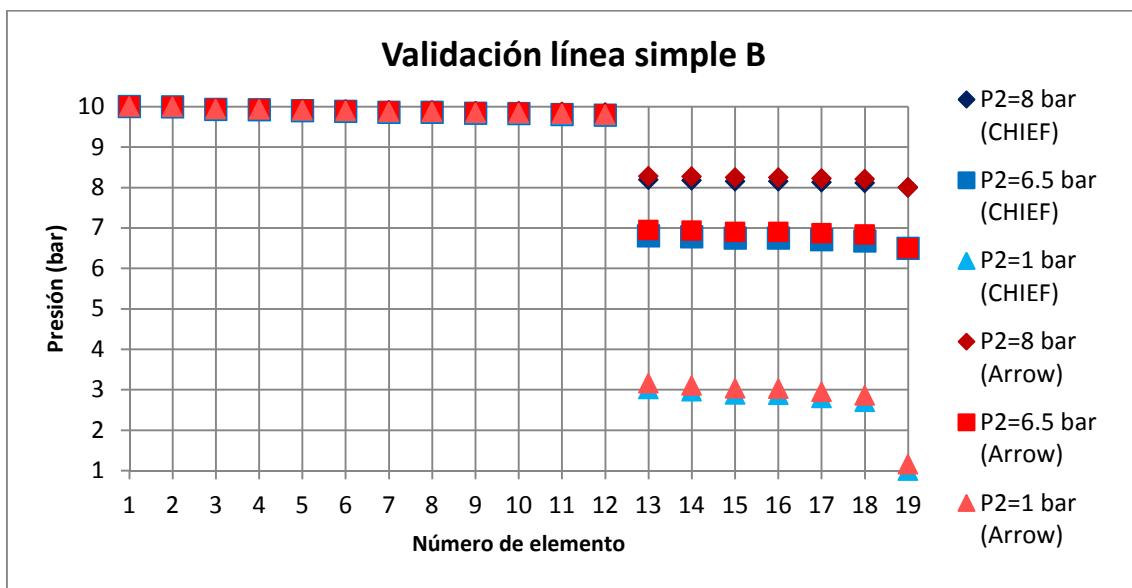


Figura 2.2. Perfil de presiones a lo largo de la línea IBH (Línea Simple B)

En la figura anterior se puede observar cómo para los tres casos estudiados, la evolución de la presión estática calculada a lo largo de la línea por ambos programas es muy similar. Respecto a los valores de gasto másico calculados, se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 2.1. Resultados de gasto másico calculados por ambos programas

| Valor fijado de $P_2$ | Gasto másico <i>CHIEF</i> | Gasto másico <i>Arrow</i> | Diferencia (%) |
|-----------------------|---------------------------|---------------------------|----------------|
| $P_2 = 8$ bar         | 15.76 kg/s                | 15.47 kg/s                | 1.87           |
| $P_2 = 6.5$ bar       | 17.97 kg/s                | 17.77 kg/s                | 1.12           |
| $P_2 = 1$ bar         | 18.13 kg/s                | 17.98 kg/s                | 0.83           |

### 2.3 Malla (Recirculación)

Se ha resuelto la configuración indicada en la Figura 0.1, partiendo de un gasto máscico de entrada a la línea 1 de 400 kg/s de aire atmosférico, a 300 K y 1 bar de presión absoluta, obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 2.2. Resultados de la validación de *Malla (Recirculación)*

|                       | <b>CHIEF</b> | <b>AFT Arrow</b> | <b>Diferencia (%)</b> |
|-----------------------|--------------|------------------|-----------------------|
| $\dot{m}_{L2}$ (kg/s) | 416.91       | 416.95           | 0.01                  |
| $\dot{m}_{L3}$ (kg/s) | 16.91        | 16.95            | 0.23                  |
| $P_{N1}^0$ (bar)      | 1.00         | 1.00             | 0.00                  |
| $T_{N1}^0$ (K)        | 312.4        | 313.4            | 0.32                  |
| $P_{N2}^0$ (bar)      | 9.643        | 9.638            | 0.05                  |
| $T_{N2}^0$ (K)        | 629.5        | 620.9            | 1.38                  |

En la tabla anterior se muestran los parámetros que se han considerado más interesantes para un rápido análisis de los resultados de la validación. Como se puede observar, las diferencias entre ambos programas son mínimas, siendo la mayor de ellas la temperatura de remanso del nodo 2. Esto es debido a que *AFT Arrow*, a diferencia de *CHIEF*, no desprecia los efectos de la temperatura en el calor específico del gas, causando la diferencia observada en las temperaturas de salida del compresor. Esto se considera como una futura mejora a llevar a cabo en el programa. En ambos programas se avisa que la línea 3 (línea IBH) se encuentra bloqueada, con caídas de presión irreversibles debidas a ondas de choque en dos de sus elementos (válvula y orificios).

Se muestra a continuación el perfil de presión estática calculada para la línea IBH:

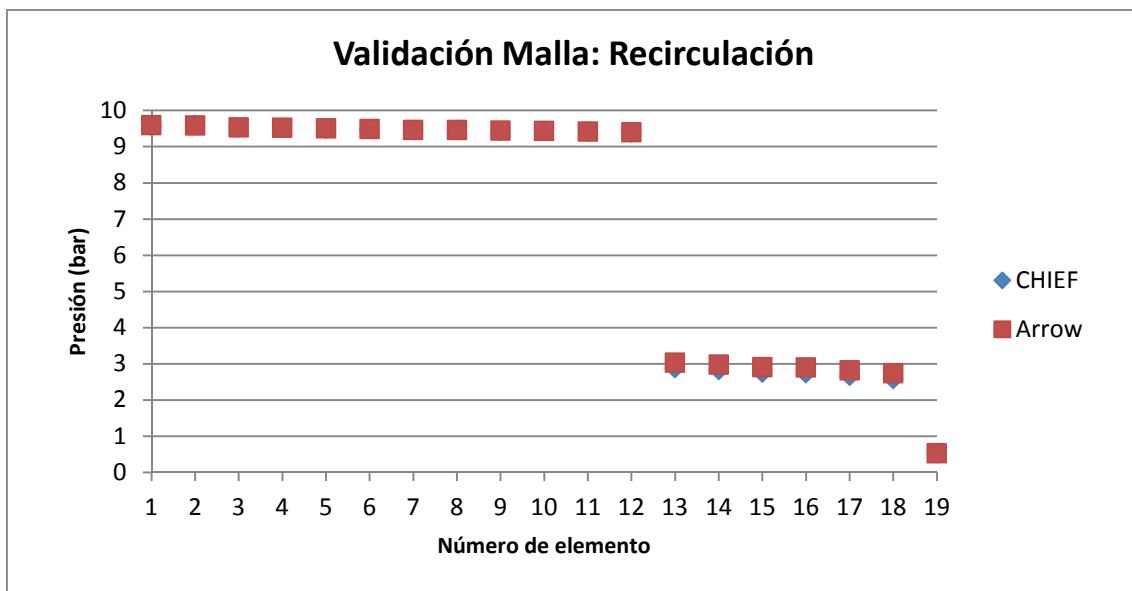


Figura 2.3. Perfil de presión obtenido en la línea IBH con ambos programas en la validación de Malla (Recirculación)

Como se observa en la Figura 2.3, la evolución de la presión estática calculada por ambos programas es prácticamente idéntica.

## 2.4 División de flujo

Para la validación de la configuración *División de Flujo* se ha modificado la instalación indicada en la Figura 0.1: la línea IBH, en lugar de recircularse al comienzo de la línea del compresor, se lleva a un depósito, tal y como se muestra en la siguiente figura:

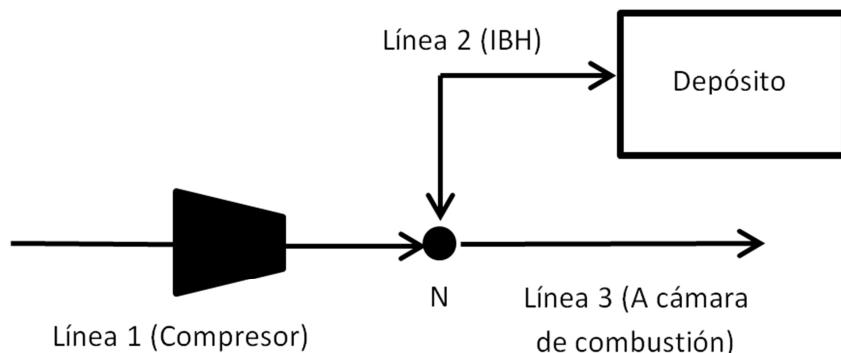


Figura 2.4. Instalación utilizada para la validación de *División de Flujo*

La línea 1 de la presente instalación corresponde a las dos primeras líneas de la instalación mostrada en la Figura 0.1. La línea IBH y la línea de entrada a la cámara de combustión no se modifican, permaneciendo igual.

Al igual que en el apartado anterior, el gas se toma al comienzo de la línea 1 con una presión de 1 bar, una temperatura de 300 K y un gasto másico de 400 kg/s.

Dependiendo del valor fijado de  $P_{Dep}^0$ , el flujo de gas de la línea 2 puede estar entrando o saliendo del depósito. Sabiendo que la presión de salida del compresor es de aproximadamente 10 bares, se evalúan los siguientes dos casos:

- **Caso 1:**  $P_{Dep}^0 = 5 \text{ bar}$ ,  $T_{Dep}^0 = 600 \text{ K}$ . Previsiblemente el flujo entrará al depósito.
- **Caso 2:**  $P_{Dep}^0 = 15 \text{ bar}$ ,  $T_{Dep}^0 = 600 \text{ K}$ . En principio el flujo abandonará el depósito.

Los resultados de ambos casos se muestran en las siguientes tablas:

Tabla 2.3. Resultados de la validación de *División de flujo* (Caso 1)

|                               | CHIEF  | AFT Arrow | Diferencia (%) |
|-------------------------------|--------|-----------|----------------|
| $P_N^0 \text{ (bar)}$         | 9.687  | 9.642     | 0.47           |
| $T_N^0 \text{ (K)}$           | 605.26 | 595.60    | 1.62           |
| $\dot{m}_{L1} \text{ (kg/s)}$ | 400.00 | 399.91    | 0.02           |
| $\dot{m}_{L2} \text{ (kg/s)}$ | 17.41  | 17.32     | 0.52           |
| $\dot{m}_{L3} \text{ (kg/s)}$ | 382.59 | 382.59    | 0.00           |

Tabla 2.4. Resultados de la validación de *División de flujo* (Caso 2)

|                       | <b>CHIEF</b> | <b>AFT Arrow</b> | <b>Diferencia (%)</b> |
|-----------------------|--------------|------------------|-----------------------|
| $P_N^0$ (bar)         | 9.687        | 9.642            | 0.47                  |
| $T_N^0$ (K)           | 604.65       | 595.60           | 1.52                  |
| $\dot{m}_{L1}$ (kg/s) | 400.00       | 399.90           | 0.02                  |
| $\dot{m}_{L2}$ (kg/s) | 26.75        | 26.35            | 1.51                  |
| $\dot{m}_{L3}$ (kg/s) | 426.75       | 426.75           | 0.00                  |

Respecto a los perfiles de presión a lo largo de los elementos de la línea IBH, se muestran a continuación para los dos casos estudiados:

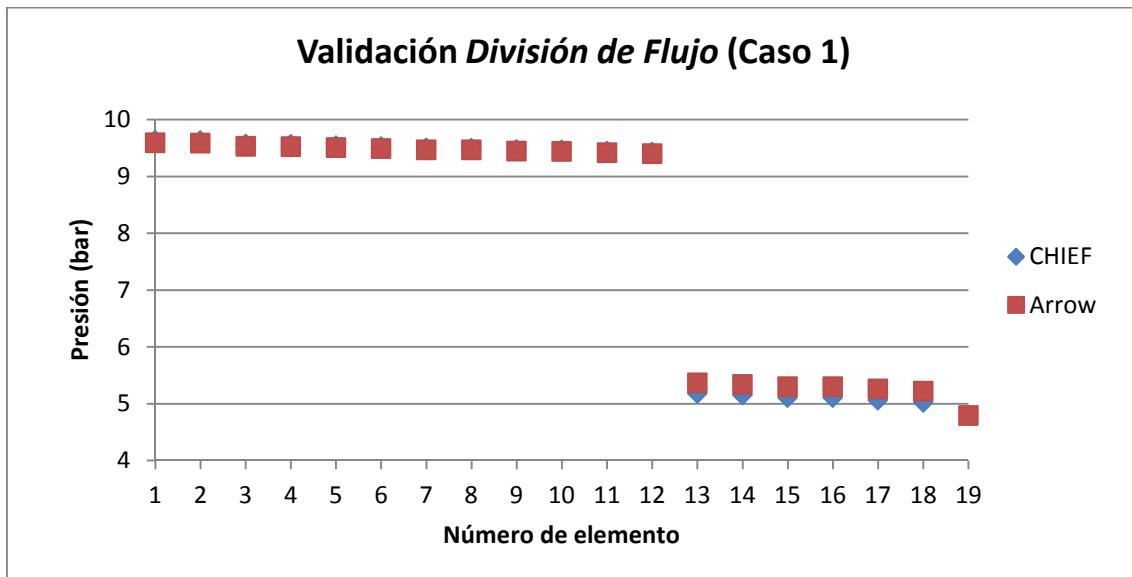


Figura 2.5. Perfil de presión obtenido en la línea IBH con ambos programas en la validación de *División de Flujo* (Caso 1)

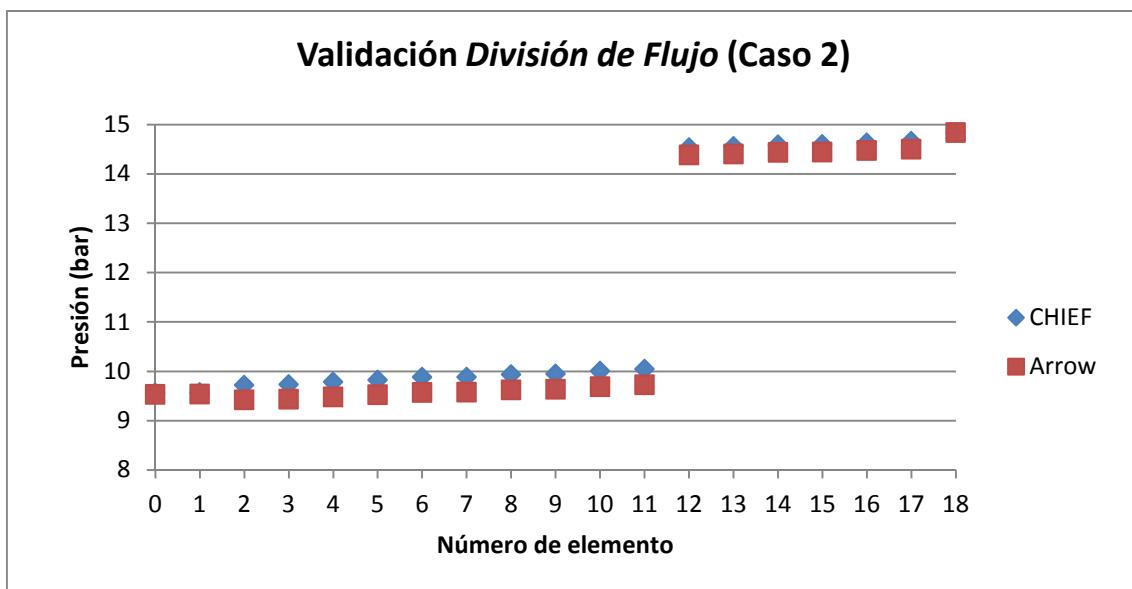


Figura 2.6. Perfil de presión obtenido en la línea IBH con ambos programas en la validación de *División de Flujo* (Caso 2)

## Anexo I: Validación de la configuración Malla (Bifurcación)

Como se ha mencionado en el Anexo H, la validación del caso *Malla (Bifurcación)* se ha realizado con una instalación distinta a la del resto de casos, razón por la cual se presenta en un anexo aparte. Se ha utilizado la instalación que se muestra a continuación:

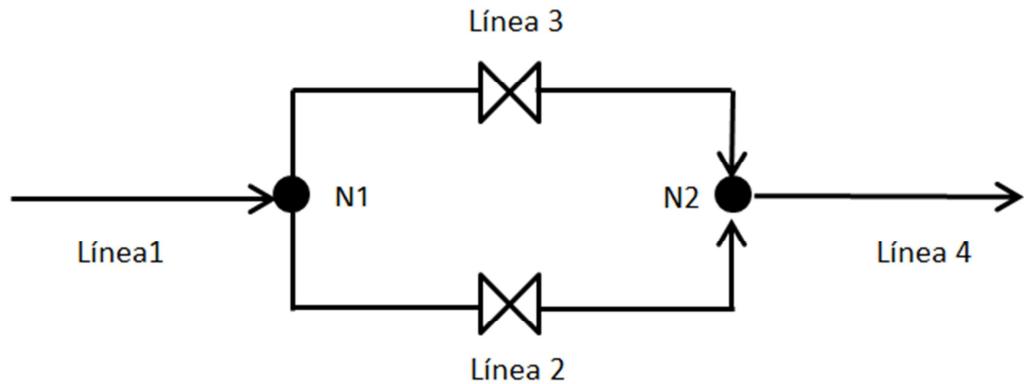


Figura 0.1. Instalación utilizada para la validación de *Malla (Bifurcación)*

Como se observa en la figura anterior, la instalación utilizada consta de:

- Línea 1: Tramo recto de 50 metros de longitud, 20 cm de diámetro y 0.025 mm de rugosidad.
- Línea 2:
  - Tramo recto de 35 metros de longitud, 12 cm de diámetro y 0.01 mm de rugosidad.
  - Válvula de  $C_v$  140 (Unidades Británicas) y  $X_t$  0.35.
  - Tramo recto de 35 metros de longitud, 12 cm de diámetro y 0.01 mm de rugosidad.
- Línea 3:
  - Tramo recto de 5 metros de longitud, 10 cm de diámetro y 0.01 mm de rugosidad.
  - Válvula de  $C_v$  200 (Unidades Británicas) y  $X_t$  0.48.
  - Tramo recto de 15 metros de longitud, 10 cm de diámetro y 0.01 mm de rugosidad.
- Línea 4: Tramo recto de 10 metros de longitud, 20 cm de diámetro y 0.01 mm de rugosidad.

La línea descrita ha sido calculada en ambos programas partiendo de unas condiciones de entrada a la línea 1 de 400 K y 8 bares de presión absoluta. Respecto al gasto máscico entrante por la línea 1, se han calculado dos casos distintos:  $\dot{m}_{L1} = 5 \text{ kg/s}$  (Caso 1) y  $\dot{m}_{L1} = 7 \text{ kg/s}$  (Caso 2). A continuación se muestran los resultados obtenidos para ambos casos.

Tabla 0.1. Resultados de la validación de Malla (Bifurcación) (Caso 1)

|                       | <b>CHIEF</b> | <b>AFT Arrow</b> | <b>Diferencia (%)</b> |
|-----------------------|--------------|------------------|-----------------------|
| $\dot{m}_{L1}$ (kg/s) | 5.000        | 5.000            | 0                     |
| $\dot{m}_{L2}$ (kg/s) | 2.095        | 2.094            | 0.05                  |
| $\dot{m}_{L3}$ (kg/s) | 2.905        | 2.906            | 0.03                  |
| $\dot{m}_{L4}$ (kg/s) | 5.000        | 5.000            | 0                     |
| $P_{N1}^0$ (bar)      | 7.957        | 7.957            | 0                     |
| $T_{N1}^0$ (K)        | 400.3        | 400.3            | 0                     |
| $P_{N2}^0$ (bar)      | 7.085        | 7.080            | 0.07                  |
| $T_{N2}^0$ (K)        | 400.3        | 400.3            | 0                     |

Tabla 0.2. Resultados de la validación de Malla (Bifurcación) (Caso 2)

|                       | <b>CHIEF</b> | <b>AFT Arrow</b> | <b>Diferencia (%)</b> |
|-----------------------|--------------|------------------|-----------------------|
| $\dot{m}_{L1}$ (kg/s) | 7            | 7                | 0                     |
| $\dot{m}_{L2}$ (kg/s) | 2.852        | 2.849            | 0.10                  |
| $\dot{m}_{L3}$ (kg/s) | 4.148        | 4.151            | 0.07                  |
| $\dot{m}_{L4}$ (kg/s) | 7            | 7                | 0                     |
| $P_{N1}^0$ (bar)      | 7.917        | 7.917            | 0                     |
| $T_{N1}^0$ (K)        | 400.5        | 400.5            | 0                     |
| $P_{N2}^0$ (bar)      | 5.777        | 5.760            | 0.29                  |
| $T_{N2}^0$ (K)        | 400.5        | 400.5            | 0                     |

Tanto para el Caso 1 ( $\dot{m}_{L1} = 5 \text{ kg/s}$ ) como para el Caso 2 ( $\dot{m}_{L1} = 7 \text{ kg/s}$ ) se tiene que los resultados obtenidos por ambos programas son prácticamente idénticos, por lo que se considera satisfactoria la validación del caso *Malla (Bifurcación)*.