

# Proyecto Fin de Grado Ingeniería de la Energía

Aplicación informática para redes de vapor complejas.

Autor: Fco. Javier Gómez Correa

Tutor: David Velázquez Alonso

**Dep. de Ingeniería Energética  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2016





Proyecto Fin de Grado  
Ingeniería de la Energía

# **Aplicación informática para redes de vapor complejas.**

Autor:

Fco. Javier Gómez Correa

Tutor:

David Velázquez Alonso

Profesor titular

Dep. de Ingeniería energética  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018



Proyecto Fin de Carrera: Aplicación informática para redes de vapor complejas.

Autor: Fco. Javier Gómez Correa

Tutor: David Velázquez Alonso

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2018

El Secretario del Tribunal



*A mi familia*

*A mis maestros*





# Agradecimientos

---

Este proyecto es el fin de una etapa más de la vida, una etapa en la que me he enfrentado a grandes batallas y he tenido siempre a buenos camaradas dispuestos a darme un motivo por el que seguir adelante. Es por ello que quería agradecer:

A David Velázquez Alonso por darme la oportunidad de introducirme en su barco llamado DVA y conocer a su magnífica tripulación.

A mis compañeros en primera línea de batalla Lete, Velasco, los Mellis, las Mellis, Isa, Elena...

A mis amigos de la infancia Carlos y Samuel.

A mi padre, por esos días de monte, jara y ladras.

A mi madre, por ser la piedra angular de mi vida.

A mi hermana Alioli, por darme consejos de hermana mayor.

A mi hermana Marta, por ser mi ejemplo de dedicación y esfuerzo.

A mis dos otras "hermanas" Jara y Chispa, gracias por vuestra compañía todos estos años, os echo de menos.

*Fco. Javier Gómez Correa*

*Sevilla, 2018*



El funcionamiento óptimo de las redes de vapor en la industria se está convirtiendo en una parte cada vez más importante de cualquier estrategia comercial exitosa a medida que aumentan las presiones ambientales, legislativas y comerciales. Un modelo de vapor fidedigno permite una comprensión clara del sistema y de cualquier restricción operativa. También se puede usar para determinar el verdadero coste de los proyectos de mejora, relacionando cualquier cambio en la demanda de vapor con las utilities y combustible comprados. Los proyectos de ejemplo podrían incluir aislamiento mejorado, mejor retorno de condensado, mayor integración de proceso, nuevas turbinas de vapor o incluso la instalación de cogeneración a base de turbina de gas. Este enfoque permite a los sitios desarrollar un plan de implementación por etapas para los proyectos de inversión de capital y operativos en el sistema de utilities.



# ÍNDICE

|   |             |
|---|-------------|
| <b>Agradecimientos</b>  | <b>ix</b>   |
| <b>Resumen</b>  | <b>xi</b>   |
| <b>Índice de Tablas</b>   | <b>xv</b>   |
| <b>Índice de Figuras</b>  | <b>xvii</b> |
| <b>1 Introducción</b>   | <b>21</b>   |
| 1.1 <i>Orígenes históricos del empleo del vapor.</i>  | 21          |
| 1.2 <i>El vapor como fluido caloportador.</i>   | 25          |
| 1.2.1 <i>Aplicaciones industriales del vapor.</i>   | 26          |
| 1.3 <i>Redes de vapor.</i>  | 30          |
| 1.3.1 <i>Generación de vapor.</i>   | 30          |
| 1.3.2 <i>Redes de distribución.</i>   | 32          |
| 1.4 <i>Principales equipos de las redes de vapor.</i>   | 32          |
| 1.4.1 <i>Calderas.</i>  | 32          |
| 1.4.2 <i>Turbinas.</i>  | 35          |
| 1.4.3 <i>Compresores.</i>   | 37          |
| 1.4.4 <i>Intercambiadores de calor.</i>   | 37          |
| 1.4.5 <i>Botellón flash.</i>  | 37          |
| 1.4.6 <i>Desgasificador.</i>  | 38          |
| <b>2 Objetivos</b>  | <b>40</b>   |
| 2.1 <i>Desarrollo de la herramienta informática.</i>  | 40          |
| 2.2 <i>Aplicación de la herramienta informática a una plantilla generalizada aplicable a cualquier industria.</i> | 40          |
| <b>3 Herramienta informática</b>  | <b>41</b>   |
| 3.1 <i>Turbinas de vapor</i>  | 42          |
| 3.1.1 <i>Turbina de vapor de una etapa (conocido el caudal de vapor).</i>   | 42          |
| 3.1.2 <i>Turbina de vapor de una etapa (conocida la potencia generada).</i>                                       | 43          |
| 3.1.3 <i>Turbina de vapor dos cuerpos (conocido el caudal de vapor)</i>   | 44          |
| 3.1.4 <i>Turbina de vapor dos cuerpos (conocida la potencia generada)</i>   | 46          |
| 3.1.5 <i>Turbina de vapor tres cuerpos (conocido el caudal de vapor)</i>  | 48          |
| 3.1.6 <i>Turbina de vapor tres cuerpos (conocida la potencia generada)</i>  | 50          |
| 3.2 <i>Intercambiadores de calor.</i>   | 52          |
| 3.2.1 <i>Intercambiador de calor agua/vapor (se conocen las condiciones del fluido de servicio)</i>               | 52          |
| 3.2.2 <i>Intercambiador de calor agua/vapor (se conoce el calor transferido)</i>                                  | 54          |
| 3.2.3 <i>Intercambiador de calor conocido el UA y temperaturas del fluido.</i>                                    | 56          |
| 3.2.4 <i>Economizador de la caldera. (Intercambiador proceso/agua)</i>  | 57          |
| 3.2.5 <i>Generador de vapor de la caldera (intercambiador proceso/agua-vapor)</i>                                 | 59          |
| 3.3 <i>Calderas.</i>  | 61          |
| 3.3.1 <i>Caldera modelo simplificado</i>  | 61          |
| 3.3.2 <i>Caldera modelo simplificado (Con eficiencia)</i>   | 62          |
| 3.3.3 <i>Caldera con limitación de purga en TDS.</i>  | 63          |
| 3.4 <i>Compresores</i>  | 64          |
| 3.4.1 <i>Termocompresor</i>   | 64          |
| 3.4.2 <i>Compresor de un cuerpo (conocido el cuadal)</i>  | 65          |
| 3.4.3 <i>Compresor de un cuerpo (conocida la potencia)</i>  | 66          |
| 3.5 <i>Otros equipos.</i>   | 67          |
| 3.5.1 <i>Desgasificador.</i>  | 67          |
| 3.5.2 <i>Válvula atemperadora (Conocida la corriente de vapor de entrada).</i>                                    | 68          |
| 3.5.3 <i>Válvula atemperadora (Conocida la corriente de vapor de salida).</i>                                     | 69          |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 3.5.4    | Botellón Flash.                             | 70        |
| 3.5.5    | Bomba.                                      | 71        |
| 3.5.6    | Válvula reductora.                          | 72        |
| <b>4</b> | <b>Casos reales evaluados</b>               | <b>73</b> |
| 4.1      | <i>Red de vapor con un solo colector.</i>   | 73        |
| 4.2      | <i>Red de vapor con grados de libertad.</i> | 76        |
| 4.2.1.   | Coste marginal de la energía.               | 77        |
| 4.2.2.   | Grados de libertad.                         | 78        |
| <b>5</b> | <b>Conclusiones</b>                         | <b>83</b> |
|          | <b>Referencias</b>                          | <b>84</b> |

# ÍNDICE DE TABLAS

---

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| Tabla 4-1 Caso Base            | 74 |
| Tabla 4-2. Proyectos de ahorro | 75 |
| Tabla 4-3 Caso 1.              | 78 |
| Tabla 4-4 Caso 2.              | 80 |
| Tabla 4-5 Caso 3.              | 81 |
| Tabla 4-6 Caso 4.              | 82 |





# ÍNDICE DE FIGURAS

---

|   |    |
|---|----|
| Figura 1-1 Intercambiador de calor con cambio de fase                     | 27 |
| Figura 1-2 Turbina de vapor   | 28 |
| Figura 1-3 Quemador   | 29 |
| Figura 1-4 Conductos de aire  | 30 |
| Figura 1-5 Caldera acuotubular  | 33 |
| Figura 1-6 Caldera pirotubular  | 34 |
| Figura 1-7 Turbinas a contrapresión y con extracción.                     | 36 |
| Figura 1-8 Botellón Flash   | 38 |
| Figura 1-9 Desgasificador   | 39 |
| Figura 3-1 Turbina de vapor, conocido el caudal de vapor.                 | 42 |
| Figura 3-2 Turbina de vapor conocida la potencia                          | 43 |
| Figura 3-3 Turbina de vapor de dos cuerpos, conocido el caudal de vapor.  | 44 |
| Figura 3-4 Turbina de vapor de dos cuerpos, conocida la potencia.         | 46 |
| Figura 3-5 Turbina de vapor de tres cuerpos, conocido el caudal de vapor. | 48 |
| Figura 3-6 Turbina de tres cuerpos conocida la potencia.                  | 50 |
| Figura 3-7 Intercambiador de vapor agua/vapor                             | 52 |
| Figura 3-8 Intercambiador de calor, conocido el calor transferido         | 54 |
| Figura 3-9 Intercambiador de calor conocido UA y temperaturas del fluido. | 56 |
| Figura 3-10 Intercambiador de calor proceso/agua                          | 57 |
| Figura 3-11 Intercambiador de calor, generador de vapor.                  | 59 |
| Figura 3-12 Caldera de vapor, modelo simplificado.                        | 61 |
| Figura 3-13 Caldera de vapor, modelo simplificado con eficiencia.         | 62 |
| Figura 3-14 Caldera de vapor, TDS.  | 63 |
| Figura 3-15 Termocompresor.   | 64 |
| Figura 3-16 Compresor de un cuerpo conocido el caudal.                    | 65 |
| Figura 3-17 Compresor de un cuerpo, conocida la potencia                  | 66 |
| Figura 3-18 Desgasificador.   | 67 |
| Figura 3-19 Valvula atemperadura, conocido el vapor de entrada.           | 68 |
| Figura 3-20 Válvula atemperadora, conocido el vapor de salida.            | 69 |
| Figura 3-21 Botellón Flash.   | 70 |
| Figura 3-22 Bomba de agua.  | 71 |
| Figura 3-23 Válvula reductora.  | 72 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 4-1 Red de vapor 1 (Sin proyectos de ahorro)  | 75 |
| Figura 4-2. Red de vapor 1 (Con proyectos de ahorro) | 76 |
| Figura 4-3 Camino marginal del vapor                 | 78 |
| Figura 4-4 Caso 1                                    | 79 |
| Figura 4-5 Caso 2.                                   | 80 |
| Figura 4-6 Caso 3                                    | 81 |
| Figura 4-7 Caso 4.                                   | 82 |





# 1 INTRODUCCIÓN

---

*"Sólo cuando el último árbol esté muerto, el último río envenenado, y el último pez atrapado, te darás cuenta que no puedes comer dinero."  
Sabiduría indoamericana*

El cambio climático, la inestabilidad de los precios de los combustibles fósiles o las nuevas políticas energéticas<sup>1</sup> hacen que las industrias presten cada vez más atención a su gestión energética, intentando reducir sus consumos con proyectos y medidas de ahorro y eficiencia energética.

Básicamente hay dos tipos de energía convencional que se utiliza en el sector industrial, por un lado, energía eléctrica y por otro energía térmica, ésta última en forma de agua caliente, aire caliente o vapor de agua.

El vapor de agua en la industria es un producto muy utilizado por sus características energéticas, dado que en una unidad pequeña tenemos gran contenido energético, ahora bien, los costes de producción y distribución en las naves de producción son elevados. Por este motivo es importante prestar atención en su producción, en su transporte hasta los puntos de consumo y en su utilización, con objeto de que su utilización sea lo más eficaz y eficiente posible.

Este proyecto tiene como objetivo la simulación energética de una red de vapor, simulando una a uno todos sus equipos y obteniendo un caso base que será el del estado actual de la red. Gracias a este software se podrá evaluar económicamente los cambios de operación y proyectos de eficiencia energética que se quieran llevar a cabo sobre ésta como pueden ser recuperación de condensados, instalación de intercambiadores y botellones flash o el cambio de combustible.

## 1.1 Orígenes históricos del empleo del vapor.

Aunque se suele señalar a James Watt, a finales del siglo XVIII, como padre de la máquina de vapor, el empleo de esta fuente de energía se remonta a la Antigüedad. Así, se puede considerar al cañón de vapor de Arquímedes de Siracusa (287-212 a. de C.), el architrónito, como la primera aplicación práctica de su uso, en este caso para la defensa de Siracusa contra el asedio romano. Sin embargo, es a Herón de

---

1.1.1 <sup>1</sup> Directiva 2012/27/ue del parlamento europeo y del consejo, Real Decreto 56/2016

Alejandro (s. I) a quien debemos la invención de la primera máquina de vapor rotativa, el aelopilo, una turbina de reacción diseñada para uso sagrado. En esta cosmopolita ciudad la competencia entre la práctica totalidad de religiones entonces conocidas hacía que los juguetes de este ingeniero fuesen muy estimados por los sacerdotes para atraer al mayor número de fieles posible, asombrados por la magia de estos artificios. Con esta finalidad, Herón desarrolló otros múltiples mecanismos como el que empleaba la fuerza del vapor para abrir las puertas del templo de Isis.

Genera vértigo pensar cómo en una época tan temprana el desarrollo de la energía del vapor pudo adelantar la Revolución Industrial en dieciséis siglos, desapareciendo la Edad Media, si bien la limitación en el conocimiento de materiales, de técnicas de fabricación y de principios teóricos impidieron dar este avance trascendental.

Hay que dar un salto hasta Leonardo da Vinci (1452-1519) para encontrar una continuación en el desarrollo de la energía del vapor. Leonardo era conocedor de los escritos de Arquímedes y Herón, al igual que los inventores italianos Vannocio Biringuccio (1480-1539) y Giovanni Battista della Porta (1538-1615) o el francés Salomón de Caus (1576-1626) que utilizó la presión del vapor para impulsar el chorro de agua de fuentes en las que existían estatuillas que danzaban como las de Herón.

Simultáneamente, en Inglaterra, Thomas Savery (1650-1715) construía una bomba de vapor no atmosférica, aplicada a la extracción de agua de las minas, conocida como la amiga del minero, aunque su uso seguía siendo peligroso y poco eficaz.

Thomas Newcomen (1663-1729) fue el primero que diseñaría una máquina de vapor atmosférica, un motor primario que utilizaba el poder de la nada y que fue conocido como la máquina de fuego y aire. Su diseño incluía el movimiento de un pistón en el interior de un cilindro y mejoraba la eficiencia mediante inyección de agua fría, ya que hasta entonces el vapor se condensaba enfriando externamente el cilindro. Distintos científicos, como el sueco Marten Triewald (1671-1747), que dio la primera interpretación teórica del funcionamiento, y el inglés John Smeaton (1724-1792), que diseñó el prototipo de la mandriladora para mejorar el acabado de los cilindros, incrementaron la eficiencia de la máquina de Newcomen, de la que se decía que necesitaba una mina de hierro para construirla y otra de carbón para alimentarla.

Sin embargo, sería el escocés James Watt (1736-1819) quién introduciría las mayores mejoras. Constructor de herramientas matemáticas para la Universidad de Glasgow, al reparar una máquina de Newcomen llegó a la conclusión de que su alto consumo se debía a las pérdidas motivadas por la inyección de agua fría en el cilindro. Así, optó por realizar la condensación en una cámara independiente, el condensador, lo que, unido al calentamiento exterior del cilindro mediante el vapor, multiplicó el rendimiento por tres. Para conseguir un mejor ajuste entre el cilindro y el pistón, evitando las pérdidas en los inevitables juegos de fabricación, Watt pidió colaboración a John Wilkinson (1728-1808), un fabricante de máquinas-herramienta al que había instalado una de sus dos primeras máquinas de vapor

en los fuelles de su alto horno. Éste perfeccionó la mandriladora de Smeaton, una máquina para el mecanizado de diámetros interiores, en la que se hacía girar un eje en cuyo extremo se fijaba un filo de acero, aumentando notablemente la precisión. Mejoras mecánicas como el alineamiento del pistón, su enlace con un cigüeñal para convertir el movimiento en rotativo, el empleo del regulador centrífugo para controlar la velocidad y la conversión de la máquina original en una de doble acción, hicieron que el uso de su máquina de vapor se extendiera rápidamente en todas las aplicaciones industriales, como nueva fuente de energía motriz y posibilitando la Revolución Industrial.

Sorprende el paralelismo entre la evolución de la máquina de vapor y la mandriladora, concatenando causalidades que generarían un gran cambio en la historia de la humanidad. La lectura de los escritos de Herón y Arquímedes impulsaron a Leonardo y Biringuccio tanto en el estudio de las máquinas de vapor como en el diseño inicial del torno perforador, origen de la mandriladora, retomada por Smeaton y perfeccionada por Wilkinson para reducir el juego de los cilindros de Watt.

Las máquinas-herramienta de Wilkinson se expandieron fuertemente al abaratarle su fabricación con la nueva energía y por el incremento de precisión que consiguió Joseph Whitworth (1803-1887), lo que a su vez permitió la intercambiabilidad de los componentes y la fabricación en serie, reduciendo costes y permitiendo aumentar el consumo. En paralelo, la misma mandriladora facilitó la fabricación de los cañones ligeros que utilizaron los ejércitos de Napoleón y que generaron un cambio profundo en el entorno político de Europa, con la desaparición del Antiguo Régimen y el surgimiento del liberalismo y las posteriores democracias occidentales.

Así, de forma independiente, el norteamericano Oliver Evans (1755-1819) y el británico Richard Trevithick (1771-1833) trataron de reducir el tamaño de las grandes máquinas de vapor, usualmente integradas en edificios, para convertirlas en portátiles, de forma que incluso pudiesen impulsar un vehículo. Para ello trabajaron a mayores presiones mediante motores más compactos.

Aunque la idea de utilizar el vapor para mover a un vehículo la expresara ya Isaac Newton (1642-1727) cien años atrás, no sería hasta 1769 cuando Nicolas Joseph Cugnot (1725-1804) construyera el primer vehículo autopropulsado por encargo del ejército francés, consistente en un tractor de artillería de tres ruedas.

Aunque fue el norteamericano John Fitch (1743-1798) quién botó el primer vapor funcional dotado de paletas, el mérito suele atribuirse injustamente a su compatriota Robert Fulton (1765-1815), debido al éxito comercial de sus barcos de vapor, que navegaron por el Hudson y el Sena desde 1802. Igualmente construyó un prototipo de submarino, el Nautilus, en el que se basaría Julio Verne en una de sus más célebres novelas de ciencia ficción. El Savanna fue el primer barco a vapor que cruzó el atlántico, en 1819, si bien el rendimiento mejoró al cambiar las ruedas de palas por la propulsión mediante hélices, a partir de 1830, sustituyendo rápidamente al uso de la vela y liberando a la navegación de los caprichos del viento.

Si bien los avances de las máquinas de vapor se desarrollaron a través de la experimentación y la perspicacia de los inventores, es en esta época cuando se inician los primeros estudios teóricos del calor. La teoría básica de la máquina de vapor la establece Sadi Carnot (1796-1832), físico francés que se adelanta a su tiempo. Debido a su carácter matemático, no sería bien entendida, siendo el ingeniero francés Benoît Clapeyron (1799-1864) quien la amplió e hizo más accesible a los técnicos que empezaban a salir de las recién creadas escuelas de ingeniería. Julius Robert Mayer (1814-1878), médico alemán, introdujo la teoría de la termodinámica aplicada, siendo sus ideas desarrolladas por su compatriota Rudolf Clausius (1812-1888) y por el físico inglés James Prescott Joule (1818-1889), cerrándose el ciclo cuando el también físico británico William Thomson (1824-1907), también conocido como Lord Kelvin, retoma la obra de Carnot para formular las leyes de la termodinámica. Esta nueva base teórica permitió comprender los fundamentos de los fenómenos que se generaban en las máquinas de vapor, facilitando los desarrollos prácticos posteriores. Así, la idea del ingeniero germano Gustav Adolf Hirn (1815-1890) de emplear vapor sobrecalentado para mejorar la eficacia fue utilizada por el inglés Charles Brown (1827-1905) en la construcción de una máquina de 5 atm para la Exposición Mundial de París. También surgen innovaciones de diseño, como los engranajes de válvulas cilíndricas oscilantes del norteamericano George Henry Corliss (1817-1888), que ahorran vapor al permitir regular la cantidad de vapor según la necesidad de cada trabajo.

La aparición de los motores a gas y a gasolina, durante las últimas décadas del siglo XIX, así como el creciente empleo de la energía eléctrica, abrieron un debate sobre el previsible abandono de las máquinas de vapor. Sin embargo, esta fuente tomaría incluso más fuerza con la aparición de la turbina de vapor. En ella se sustituía el movimiento alternante del pistón por el giratorio de la turbina, incrementándose el rendimiento al quedar eliminados los mecanismos intermedios.

Carl Gustaf Patrik de Laval (1845-1913) que construiría tanto la primera turbina de vapor de reacción con aplicaciones prácticas como la primera turbina de vapor de acción.

En la misma línea, el ingeniero británico Charles Algernon Parson (1854-1953) desarrollaría el empleo de una turbina de flujo axial específica para impulsar un generador eléctrico de 10 CV y posteriormente la primera turbina de flujo radial que incrementaba sustancialmente la potencia producida hasta 100 kW. Su aplicación al campo naval supuso igualmente una importante mejora. Fue antológica la sorpresa que causó el buque Turbinia al pasar rápida y silenciosamente en la parada que la armada británica realizó durante el Jubileo de la reina Victoria, acelerando la sustitución de sus máquinas por turbinas de vapor en un plazo muy breve. Por su parte el inventor norteamericano Charles Gordon Curtis (1860-1953) patentaría una combinación de turbina de acción y reacción que, utilizada por la General Electric Company, alcanzaría los 5000 kW. Las sucesivas innovaciones en su diseño cerraron el debate sobre la posible desaparición del vapor como fuente de energía ya que a partir de 1950 la turbina de vapor se convertiría en la principal fuente de energía para generar electricidad.



Puede concluirse, pues, que el vapor no es una energía del pasado, su uso sigue vigente en un sector tan estratégico como el de la generación de energía eléctrica. Por otra parte, la aplicación del vapor como fuente de energía no sólo ha supuesto el advenimiento de la Revolución Industrial, sino que también generó el rápido desarrollo de los transportes, tanto terrestres como marítimos, en una evolución que hizo al mundo cada vez más pequeño y accesible, en lo que podría igualmente considerarse como una revolución del transporte. Con el incremento de la producción, la mejora de la precisión y la calidad, se redujeron no sólo los costes de fabricación de un producto sino también los de su transporte, lo cual condujo a una reducción del coste total y de su precio, posibilitando un aumento de la demanda que incrementaría el nivel de vida de la sociedad.

## **1.2 El vapor como fluido caloportador.**

El calor es conocido principalmente por sus aplicaciones como fluido caloportador, utilizado tanto de forma directa como indirecta.

La utilización del agua como fluido caloportador se basa, entre otras razones, en que es un fluido barato, abundante y perfectamente conocido; de forma que es posible controlar perfectamente su temperatura y presión.

El vapor es uno de los fluidos más comúnmente utilizados para calentar equipos o instalaciones en cualquier tipo de industria: química, petroquímica, alimentación, farmacéutica, en procesos como el de producción de papel, lavandería, humidificación, generación y en todos aquellos procesos en los que se requiera transportar calor a cortas distancias.

Las razones por las que se usa vapor como fluido transportador de energía son las siguientes:

- La producción de vapor es un proceso relativamente sencillo: requiere calentarlo por medio de cualquier tipo de combustible.
- No necesita bombas para ser transportado desde el generador de vapor en adelante.
- No es combustible, y, por lo tanto, no tiene peligro de incendio.
- Es un fluido muy conocido y mediante válvulas es posible controlar de forma muy precisa la presión y la temperatura en cualquier punto de la instalación.
- A alta presión almacena gran cantidad de energía en forma de energía potencial, que puede transformarse en energía mecánica. Ese potencial energético puede ser utilizado para producir trabajo en turbinas acopladas a un alternador (producir energía eléctrica) o bombas (producir energía mecánica).
- El vapor tiene un elevado calor específico.

a. Calentamiento directo.

El calentamiento directo se refiere al proceso en el cual el vapor está en contacto directo con el producto que está siendo calentado.

Este proceso se utiliza principalmente en la industria alimentaria, donde el vapor es utilizado para varias funciones como pueden ser el cocinado, la hidratación o la esterilización del producto.

b. Calentamiento indirecto.

El calentamiento indirecto de vapor se refiere a los procesos en donde el vapor no entra en contacto directo con el producto a calentar. Es ampliamente utilizado en la industria ya que provee un calentamiento rápido y parejo. Este método generalmente utiliza un intercambiador de calor para calentar el producto.

La ventaja que ofrece este método sobre el calentamiento directo de vapor es que las gotas de agua formadas durante el calentamiento no afectaran al producto. Por lo tanto, el vapor puede ser usado en una variedad de aplicaciones tales como secado, derretimiento, hervimiento etc.

El calentamiento indirecto de vapor es usado en un gran rango de procesos como la preparación de alimentos y bebidas, neumáticos, papel, cartón, combustibles como la gasolina y para medicina por solo nombrar algunos.

### 1.2.1 Aplicaciones industriales del vapor.

El vapor es utilizado en la mayoría de las industrias. Las aplicaciones que más suele desarrollar son:

1. El calentamiento de procesos en fábricas y plantas.

a. Vapor de presión positiva para calentamiento.

Generalmente el vapor es generado y distribuido a una presión positiva. En la mayoría de los casos, esto significa que es suministrado a los equipos a presiones mayores de 0 bar y a temperaturas mayores de 100 °C.

Las aplicaciones de calentamiento para vapor a presión positiva se pueden encontrar en plantas procesadoras de alimentos, plantas químicas, y refinerías solo por nombrar algunas. El vapor saturado es utilizado como la fuente de calentamiento para fluido de proceso en intercambiadores de calor, reactores, reboilers, precalentadores de aire de combustión, y otros tipos de equipos de transferencia de calor.

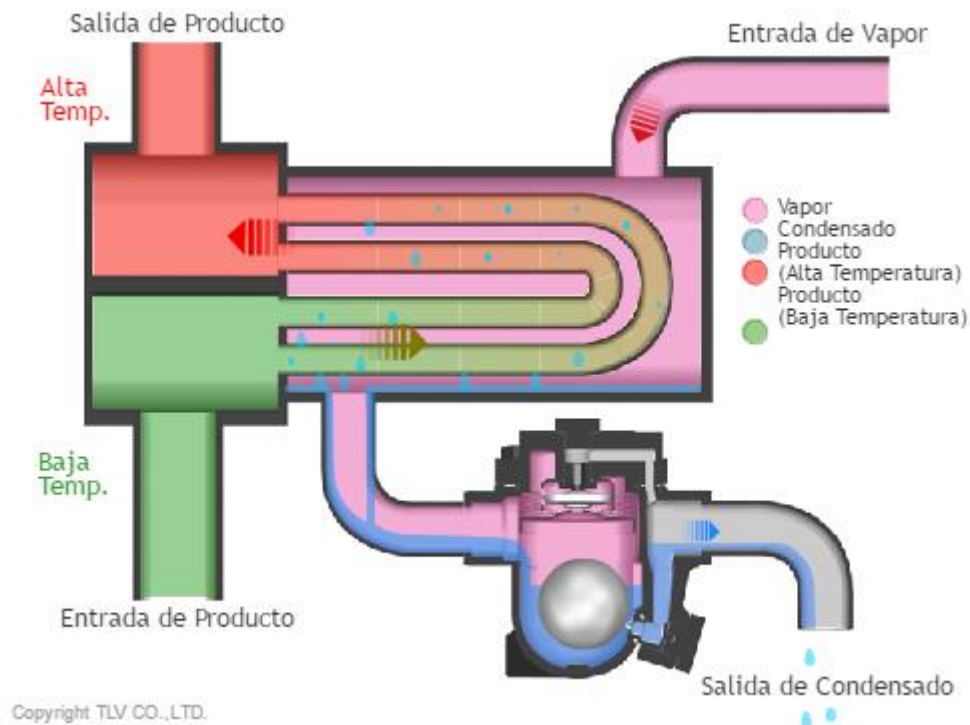


Figura 1-1 Intercambiador de calor con cambio de fase

En un intercambiador de calor, el vapor eleva la temperatura del producto por transferencia de calor, el cual después se convierte en condensado y es descargado a través de una trampa de vapor.

b. Vapor al vacío para calentamiento.

El uso de vapor para el calentamiento a temperaturas por debajo de 100°C (212°F), tradicionalmente el rango de temperatura en el cual se utiliza agua caliente, ha crecido rápidamente en los últimos años.

Cuando vapor saturado al vacío es utilizado en la misma forma que el vapor saturado a presión positiva, la temperatura del vapor puede ser cambiada rápidamente con solo ajustar la presión, haciendo posible el controlar la temperatura de manera más precisa que las aplicaciones que usan agua caliente. Sin embargo, en conjunto con el equipo se debe utilizar una bomba de vacío, para que la presión disminuya por debajo de la presión atmosférica.

2. Vapor para impulso o movimiento.

El vapor es utilizado habitualmente para aplicaciones que puedan implicar un impulso o movimiento como son las turbinas de vapor.

La turbina de vapor es uno de los equipos principales que conforman una planta termoeléctrica. Suele emplearse vapor sobrecalentado, con el objetivo de prevenir los daños causados por el condensado. Sin embargo, en ciertas plantas nucleares, el uso del vapor sobrecalentado está restringido debido a que puede ocasionar daños en el material utilizado en las turbinas, por lo que se turbinará vapor saturado a

alta temperatura, instalándose generalmente separadores en la línea de suministro de vapor para remover el condensado del flujo de vapor.

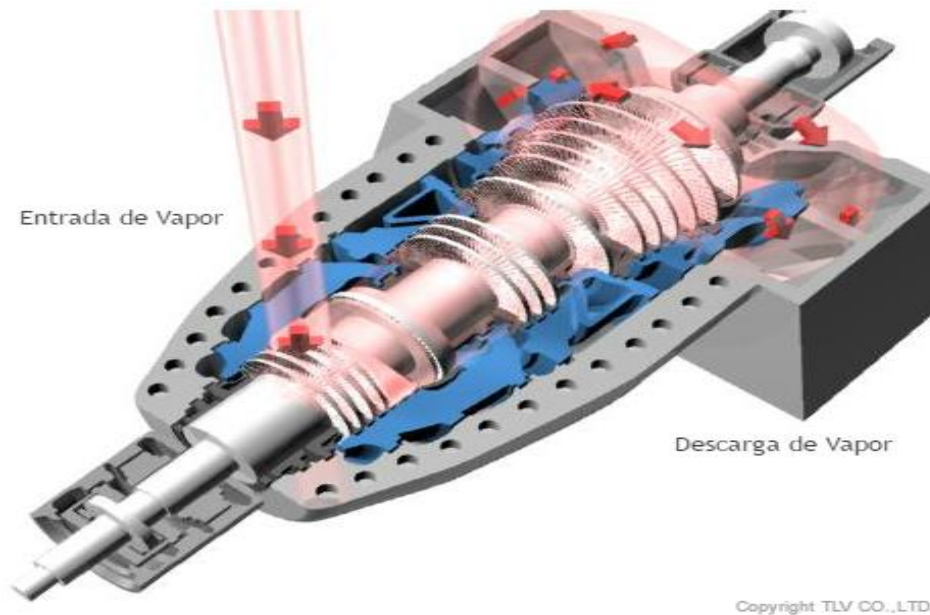


Figura 1-2 Turbina de vapor

Además de la generación de energía, otras aplicaciones típicas de impulso/movimiento son los compresores movidos por turbinas o las bombas, ej. compresor de gas, bombas para las torres de enfriamiento, etc.

### 3. Vapor como fluido motriz.

Otra de las funciones que desempeña el vapor en la industria es la de fuerza motriz para mover flujos de líquido o gas en una tubería.

Los eyectores de vapor son utilizados para crear el vacío en equipos de proceso tales como torres de destilación, principales equipos de una refinería, donde son utilizados para purificar y separar los diferentes productos que contiene la materia prima.

Los eyectores también pueden ser utilizados para la remoción continua del aire de los condensadores de superficie, esto para mantener una presión de vacío deseada en las turbinas de condensación (vacío).

### 4. Vapor para atomización.

La atomización de vapor es un proceso donde el vapor es usado para separar mecánicamente un fluido. Por ejemplo, en algunos quemadores, el vapor es inyectado en el combustible para maximizar la eficiencia de combustión y minimizar la producción de hidrocarburos (hollín). Calderas y generadores de vapor que utilizan combustibles derivados del petróleo utilizaran este método para romper el aceite viscoso en

pequeñas gotas con el objetivo de conseguir una combustión más eficiente. también los quemadores (elevados) comúnmente utilizaran la atomización de vapor para reducir los contaminantes a la salida.

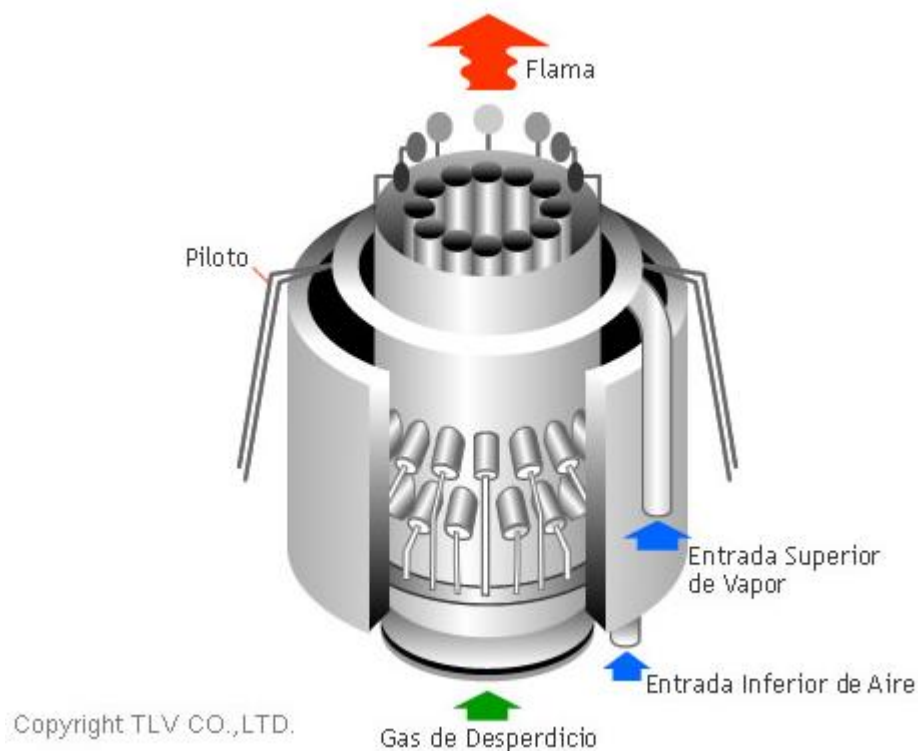


Figura 1-3 Quemador

##### 5. Vapor para limpieza.

El vapor es usado para limpiar un gran rango de superficies. Un ejemplo de la industria es el uso del vapor en los sopladores de hollín. Las calderas que usan carbón o petróleo como fuente de combustible deben estar equipadas con sopladores de hollín para una limpieza cíclica de las paredes del horno y remover los depósitos de la combustión de las superficies de convención para mantener la eficiencia, capacidad y confiabilidad de la caldera. El vapor liberado fuera de la tobera del soplador de hollín desaloja la ceniza y suciedad seca, la cual caerá en las tolvas o será arrastrado y expulsado con los gases de combustión.

##### 6. Vapor para hidratación.

Algunas veces el vapor es usado para hidratar el proceso mientras se suministra calor al mismo tiempo. Por ejemplo, el vapor es utilizado para la hidratación en la producción del papel, así que ese papel que se mueve en los rollos a gran velocidad no sufra rupturas microscópicas. Otro ejemplo son los molinos de pienso. Continuamente los molinos que producen las bolitas del pienso de para animales utilizan inyección-directa de vapor tanto para calentar como para proporcionar contenido de agua adicional al que es suministrado en la sección de acondicionamiento del molino.

La hidratación del alimento lo suaviza y gelatiniza parcialmente el almidón contenido en los ingredientes, resultando en bolitas más firmes.

#### 7. Vapor para humificación.

Con elevada frecuencia, grandes instalaciones industriales y comerciales, especialmente en climas muy fríos, utilizan vapor saturado a baja presión como fuente de calor predominante para conseguir las condiciones de confort dentro del local. Al calentar el aire frío en las baterías es posible que la humedad relativa disminuya, saliéndonos de las condiciones de confort, pudiendo utilizar vapor de agua saturado a baja presión con dos objetivos. Aumentar la temperatura de impulsión disminuyendo la demanda de energía en la batería y conseguir el confort térmico gracias al aumento de la humedad relativa.

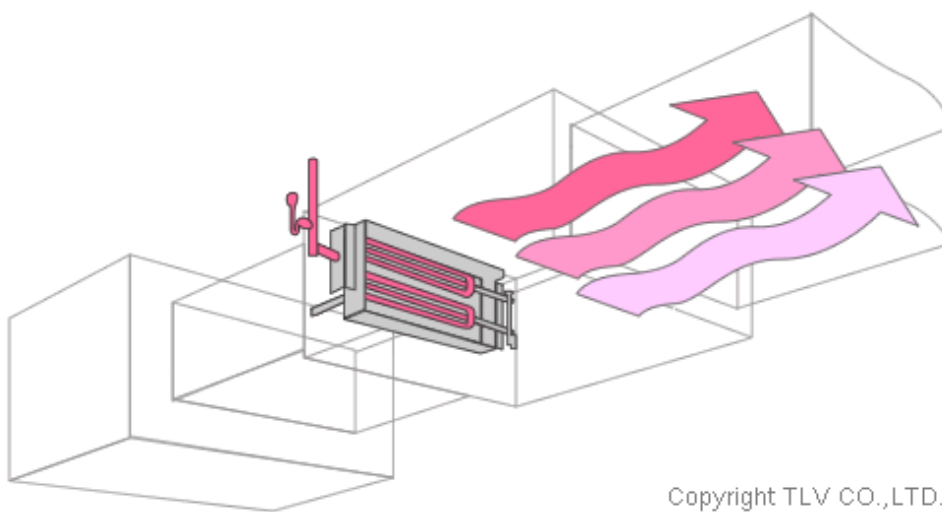


Figura 1-4 Conductos de aire

### 1.3 Redes de vapor.

El objetivo fundamental de las redes de vapor es generar vapor para utilizarlos en procesos que consuman energía térmica, generar energía eléctrica a través de la expansión de vapor en turbinas o un proceso de cogeneración, combinación de las dos anteriores.

Podemos dividir las instalaciones de vapor en 3 grandes grupos, generación de vapor, distribución de vapor y red de retorno de condensados.

#### 1.3.1 Generación de vapor.

Normalmente, se dice que la producción de vapor es a baja presión cuando se genera de 4 bar a 10 bar, de media presión si es de 10 bar a 40 bar y de alta si es de 40 bar a 100 bar.

Dependiendo de la aplicación a la que este destinado el vapor se producirá a alta presión (generación de energía eléctrica y cogeneración [100 bar,]) o a baja presión (transferencia de calor, vapor saturado [15

bar, 200 °C]). Aunque a la hora del diseño de las redes de tubería se debe de tener en cuenta que, a presiones inferiores a 5 bar, el volumen específico del vapor crece exponencialmente, aumentando el diámetro de tuberías de la red y por tanto su coste.

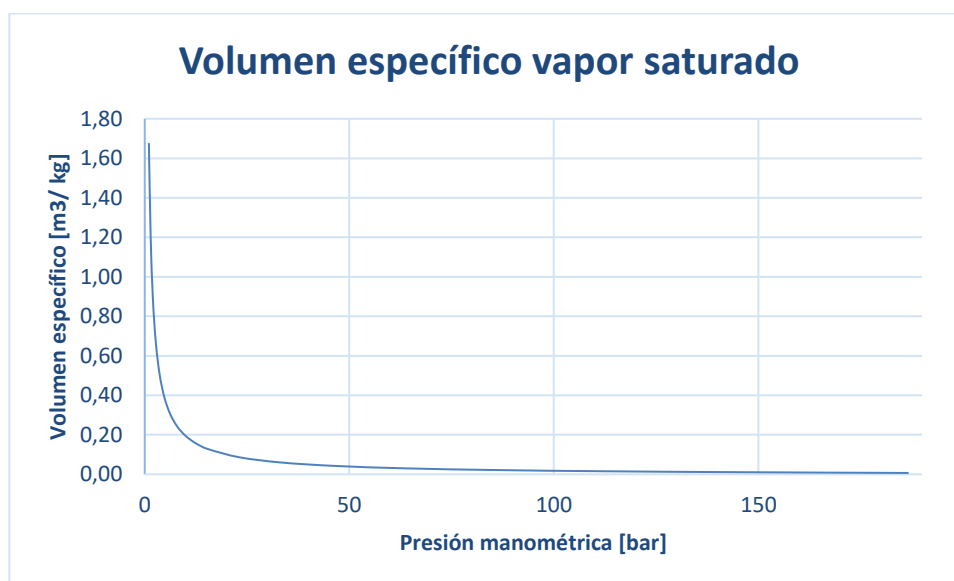


Figura 1-5 Gráfica Volumen específico Vapor saturado

Se podrá proceder a alimentar la caldera de tres formas diferentes, con condensados, con agua tratado o con vapor flash procedente de la purga.

El agua con el que se alimenta la caldera debe de ser tratada para eliminar las impurezas que pueda contener. Estas impurezas son principalmente:

- Sólidos disueltos y en suspensión.
- Gases disueltos.
- Sustancias que formen espuma.

La caldera también debe de tener un sistema de purga que permita eliminar el agua de caldera con un alto contenido en sólidos disueltos y en suspensión que es sustituido por agua de alimentación. Estos sólidos disueltos dificultan la transferencia de calor, disminuyendo el rendimiento de la caldera.

Habitualmente se encuentran dos tipos de purga:

1. Purga de nivel, cuyo objetivo es controlar la cantidad de sólidos disueltos, su control puede ser manual o automático y puede ir acompañada de un tanque flash que genere vapor para reutilizarse.
2. Purga de fondo, su función es la de eliminar los lodos del fondo de la caldera, los cuales, debido a la gran concentración de impurezas que contienen son desechados sin ningún tipo de recuperación energética.

También se debe de contemplar un sistema de combustibles para que llegue limpio evitando ensuciamientos con el objetivo de lograr una mezcla homogénea. Para conseguirlo es necesaria la instalación de filtros que permitan la limpieza en continuo sin la interrupción del suministro.

### 1.3.2 Redes de distribución.

La red de distribución de vapor es la conexión que existe entre generadores y consumidores con el objetivo de proporcionar vapor en las condiciones de presión, temperatura y calidad requeridas, minimizando las pérdidas de calor y necesidades del mantenimiento.

Es de vital importancia el calorifugado de válvulas, tuberías y accesorias de la red de vapor.

El accesorio que presenta mayores pérdidas habitualmente son los purgadores debido a su mal funcionamiento, permaneciendo cerrados no drenando o abiertos dejando escapar el vapor.

Un correcto diseño de la red de tuberías evitará un sobredimensionado y subdimensionado de la red de vapor y los problemas que conllevan.

- Sobredimensionado:
  - a. Aumento de costes.
  - b. Aumento de la cantidad de condensados.
  - c. Aumento de pérdidas térmicas.
  - d. Disminución de la calidad del vapor.
- Subdimensionado:
  - a. Aumento de pérdida de carga
  - b. Disminución de la presión en puntos de consumo.
  - c. Aumento de ruidos, erosión...
  - d. Red de retorno de condensados.

## 1.4 Principales equipos de las redes de vapor.

Entre los equipos conectados a una red de vapor se pueden destacar:

### 1.4.1 Calderas.

El principal objetivo de la caldera será la producción del vapor demandado a las condiciones necesarias en cada colector.



Se pueden hacer diferentes clasificaciones de los tipos de calderas atendiendo al fluido térmico que circula por ellas (agua sobrecalentada, aceite térmico o vapor), disposición del fluido (acuotubular o piro-tubular) o al tipo de quemador que utiliza (combustible sólido, combustible líquido o combustible gaseoso). A continuación, se verá una distinción sobre la clasificación más habitual de las calderas a nivel industrial, piro-tubulares y acuotubulares.

a. Acuotubular.

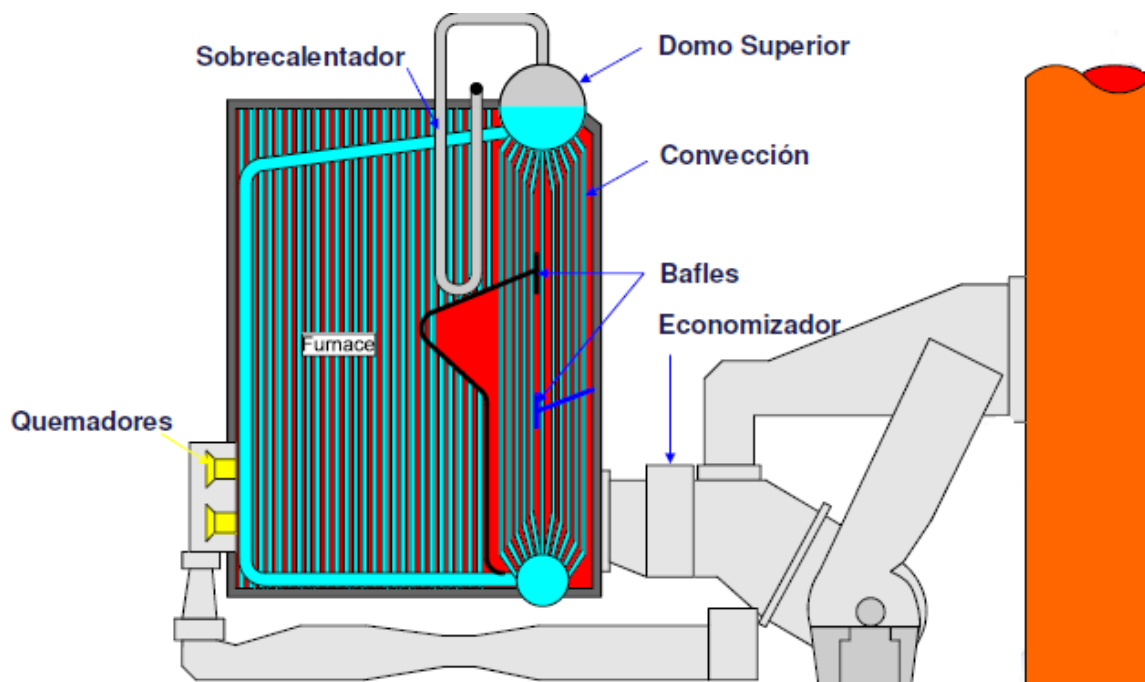


Figura 1-6 Caldera acuotubular

El funcionamiento en calderas acuotubulares es el siguiente:

- Se introduce el combustible junto al comburente en los quemadores para realizar la combustión.
- El agua recorre los tubos gracias a la diferencia de densidades.
- En la parte superior del calderín se extrae el vapor directamente (vapor saturado) o se extrae hacia una zona de recalentamiento (vapor sobrecalentado).

Las calderas acuotubulares tienen un rango de potencias que va desde 8 MW a 20 MW en calderas para consumos de proceso y que pueden llegar hasta los 2000 MW en plantas de potencia con presiones de 60 bar y temperaturas de 450 °C. El rendimiento medio de estas calderas es bastante alto (80%) gracias al gran área de transferencia que nos ofrece.

Las aplicaciones a las que está orientado el uso de calderas acuotubulares son las grandes producciones de vapor de 6 a 100 tn/h (normalmente sobrecalentado para el uso en turbinas de vapor) y para plantas de cogeneración.

b. Piro-tubular.

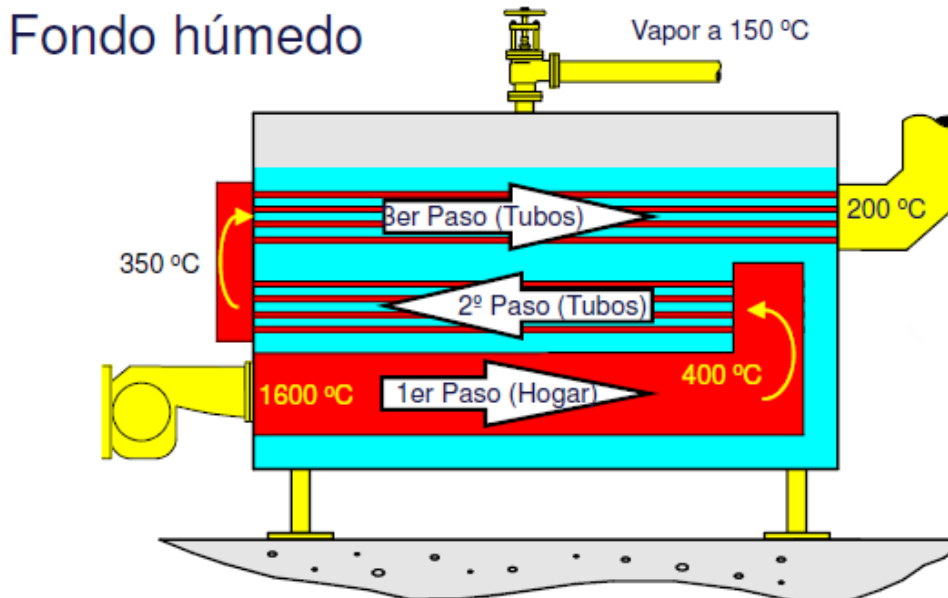


Figura 1-7 Caldera piro-tubular

En las calderas piro-tubulares, la cámara de combustión se encuentra inmersa en el agua de la caldera, lo más común es que nos encontremos tres pasos, siendo la de cuatro pasos más eficiente, aunque pudiendo presentar problemas de condensación de los gases de salida al alcanzar éstos su punto de rocío.

La temperatura del hogar puede llegar a alcanzar los 1300 °C, obteniendo un rango de potencias de 2 MW a 20 MW con un caudal de vapor de 3 tn/h a 30 tn/h. Un buen indicador de que la transferencia de calor se está llevando a cabo satisfactoriamente es la temperatura de los gases de salida. Mientras este entre 150 °C y 200 °C, se está transfiriendo bien el calor del combustible al vapor en ausencias de pérdidas importantes de calor debido al mal estado del calorifugado de la caldera. Las presiones de funcionamiento varían entre 20 bar y 25 bar consiguiendo rendimiento del 85%.

Las ventajas del uso de calderas piro-tubulares respecto a acuotubulares son:

- Mayor simplicidad en la instalación.
- Menor coste de inversión y mantenimiento.
- Buena adaptación a la carga.

Entre los inconvenientes se pueden encontrar:

- Limitación en tamaño y presión debido a la resistencia de la carcasa.

- El riesgo de explosión debido a tensiones térmicas e incrustaciones.
- La dificultad del acceso para la limpieza.
- La dificultad del cambio de combustible.

#### 1.4.2 Turbinas.

Las turbinas que se pueden encontrar en las redes de vapor son máquinas térmicas, conjunto de elementos mecánicos que permite intercambiar energía mecánica con el exterior (generalmente a través de un eje), a partir de la energía contenida en el fluido que lo atraviesa.

Las turbinas térmicas se distinguen de las hidráulicas en que el volumen del fluido que las atraviesa es variable.

Según la naturaleza del fluido se pueden encontrar dos tipos de turbinas:

##### 1. Turbinas de vapor.

Una turbina de vapor es una turbomáquina motora, que transforma la energía de un flujo de vapor en energía mecánica a través de un intercambio de cantidad de movimiento entre el fluido de trabajo (entiéndase el vapor) y el rodete, órgano principal de la turbina, que cuenta con palas o álabes los cuales tienen una forma particular para poder realizar el intercambio energético. Las turbinas de vapor están presentes en diversos ciclos de potencia que utilizan un fluido que pueda cambiar de fase, entre éstos el más importante es el ciclo de Rankine, el cual genera el vapor en una caldera, de la cual sale en unas condiciones de elevada temperatura y presión. En la turbina se transforma la energía interna del vapor en energía mecánica que, normalmente, se transmite a un generador para producir electricidad. En una turbina se pueden distinguir dos partes, el rotor y el estátor. El rotor está formado por ruedas de álabes unidas al eje y que constituyen la parte móvil de la turbina. El estátor también está formado por álabes, no unidos al eje sino a la carcasa de la turbina.

Las turbinas de vapor pueden ser clasificadas de diferentes formas:

##### a. Según sean de acción o reacción

- Turbinas de acción: El cambio o salto entálpico o expansión es realizada en los álabes directores o las toberas de inyección si se trata de la primera etapa de un conjunto de turbinas, estos elementos están sujetos al estátor. En el paso del vapor por el rotor la presión se mantendrá constante y habrá una reducción de la velocidad.
- Turbinas de reacción: La expansión, es decir, el salto entálpico del vapor puede realizarse tanto en el rotor como en el estátor, cuando este salto ocurre únicamente en el rotor la turbina se conoce como de reacción pura neta.

- b. Según el abastecimiento del vapor a la turbina y las condiciones de escape.
- **Turbina a contrapresión:** son más ampliamente usadas para aplicaciones de vapor en procesos. La presión de salida es controlada por una válvula reguladora para satisfacer las necesidades de presión en el vapor del proceso. Se encuentran comúnmente en refinerías, plantas de papel y pulpa y en instalaciones de desalinización, donde se dispone de grandes cantidades de vapor de proceso a baja presión. La instalación de una turbina a contrapresión tendrá varios beneficios, entre ellos evitará tener que laminar el vapor en una válvula reductora, aportará un beneficio económico al generar energía mecánica que se podrá aprovechar tanto para convertirla en energía eléctrica o para mover algún equipo mecánico que exista en la planta y además aumentará el rendimiento y eficiencia del proceso.



Figura 1-8 Turbinas a contrapresión y con extracción.

- **Turbina a condensación:** se encuentran comúnmente en plantas de potencia eléctrica. Estas turbinas expulsan vapor en estado parcialmente saturado, generalmente con una calidad del mayor al 90 % (para evitar problemas de corrosión de los álabes), a una presión bastante inferior a la atmosférica hacia un condensador.

También se podrán clasificar las turbinas según tenga extracción o no. Las turbinas de extracción se encuentran en una gran variedad de tipos de aplicaciones. En una turbina de extracción, el vapor es liberado en diversas etapas y aprovechado en distintos procesos industriales, también puede ser enviado a calentadores de agua para mejorar la eficiencia del ciclo.

## 2. Turbinas de gas.

La turbina de gas, al igual que la turbina de vapor, es una turbomáquina motora, con la diferencia que el fluido que atraviesa la turbina en vez de ser vapor de agua son gases de combustión con elevada energía térmica.

Las turbinas de gas se encuentran siempre en redes de vapor formando parte de un sistema de cogeneración, donde los gases de salida de la turbina de gas serán introducidos en una caldera de recuperación para aprovechar al alto contenido energético de los gases de combustión a la salida de la TG y poder generar vapor de forma eficiente.

### 1.4.3 Compresores.

Los compresores son máquinas de fluidos construidas con el objetivo de aumentar la presión y desplazar fluidos compresibles. Esto es posible gracias al aporte de energía mecánica, normalmente a través de un eje, que se comunica al rotor o pistón del compresor, lo que deriva en un intercambio de energía entre la máquina y el fluido en el cual el trabajo ejercido por el compresor es transferido a la sustancia que pasa por él convirtiéndose en energía de flujo, aumentando su presión y energía cinética impulsándola a fluir.

Se pueden clasificar los compresores en dos grandes grupos:

- En las volumétricas, conocidas también como de desplazamiento positivo, existe una cierta masa bien definida de fluido que evoluciona en la máquina en cada instante.
- En las turbomáquinas, también llamadas máquinas dinámicas, por el contrario, el volumen o la masa desplazada no está materializada por un contorno definido, sino que el flujo es continuo. En las turbomáquinas el intercambio de energía entre el fluido y el eje se basa en el Teorema del Momento de la Cantidad de Movimiento (Teorema del Momento Cinético), que conduce a la Ecuación de Euler o Ecuación Fundamental de las Turbomáquinas.

### 1.4.4 Intercambiadores de calor.

El objetivo de los intercambiadores de calor en las redes de vapor es la de transferir calor entre dos fluidos, normalmente vapor, agua o fluidos de procesos.

Los más utilizados en el sector industrial son los carcasa y tubos, que están compuestos por tubos cilíndricos, montados dentro de una carcasa también cilíndrica, con el eje de los tubos paralelos al eje de la carcasa. Un fluido circula por dentro de los tubos, y el otro por el exterior (fluido del lado de la carcasa).

Los componentes básicos de este intercambiador son: El haz de tubos (o banco de tubos), carcasa, cabezal fijo, cabezal removible (o trasero), deflectores, y la placa tubular.

### 1.4.5 Botellón flash.

El objetivo del botellón flash será el de recuperar la energía de los condensados, obteniendo vapor flash.

Vapor Flash es un nombre dado al vapor que se forma a partir del condensado caliente cuando existe una reducción en la presión.

El vapor flash nos es tan diferente del vapor normal, simplemente es un nombre que es utilizado para explicar cómo se forma el vapor. Mientras que el vapor normal o "vivo" se genera en la caldera, o en un generador de vapor por recuperación de calor, el vapor flash se genera cuando condensado de alta temperatura/presión se expone a una gran caída de presión tal como la descarga de un purgador de vapor.

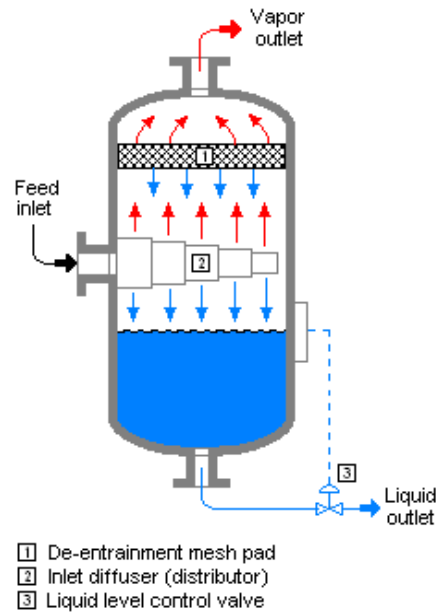


Figura 1-9 Botellón Flash

El condensado de alta temperatura contiene una gran energía que no puede permanecer en forma líquida a presiones menores debido a que existe mayor energía que la requerida para obtener agua saturada a una menor presión. El resultado es que algo de este exceso de energía genera del condensado un % de vapor flash.

El vapor flash se genera debido a que el punto de saturación del agua varía de acuerdo a la presión. Por ejemplo, el punto de saturación del agua a presión atmosférica es de 100 °C (212 °F), pero a 1.0 MPaG (145 psig) es de 184°C (323 °F).

Por ejemplo, si descargásemos a la atmosfera un condensado que se ha mantenido bajo presión a 184 °C, el condensado contendría demasiada energía (entalpía) para permanecer solamente como líquido, por lo que una porción del condensado se evapora, ocasionando que la temperatura del condensado restante se reduzca a una presión de saturación (Ej., 100°C o 212 °F si es descargado a la atmosfera). Este fenómeno se conoce como evaporación flash.

En otras palabras, cuando el condensado caliente es descargado a una presión menor, su entalpía (energía total) permanece constante, pero no su punto de saturación (la temperatura a la cual el condensado puede existir tanto en estado líquido como gaseoso). Para compensar la cantidad excesiva de energía, parte de las moléculas del agua absorben el exceso de energía como calor latente y se evaporan en forma de vapor.

#### 1.4.6 Desgasificador.

El desgasificador es un elemento que debe estar implementado en toda red de vapor porque actúa como protector

directo del resto de equipos al evitar el deterioro de la instalación.

Existen diferentes tipos de desgasificadores que se pueden clasificar según su método de desgasificación en:

- Desgasificación por vacío
- Desgasificación química
- Desgasificación Térmica

La caldera siempre será alimentada desde la salida del desgasificador, las entradas al desgasificador suelen ser la recuperación de condensados, el agua de red, recuperaciones de vapor flash de la red y vapor de la red en el caso de la desgasificación térmica.

El desgasificador tiene diversas funciones, de las que cabe destacar:

- Eliminación de gases, aprovechando la insolubilidad inversa de los gases, siendo estos menos solubles en aguas a alta temperatura.
- Precalentamiento del agua, gracias a vapor extraído del colector de baja presión.
- Tanque de agua, en el que se acumula el agua que va a alimentar a las bombas de alta presión que dirigirá el agua a la caldera.
- Evita la cavitación, gracias al aumento de la presión hidrostática.

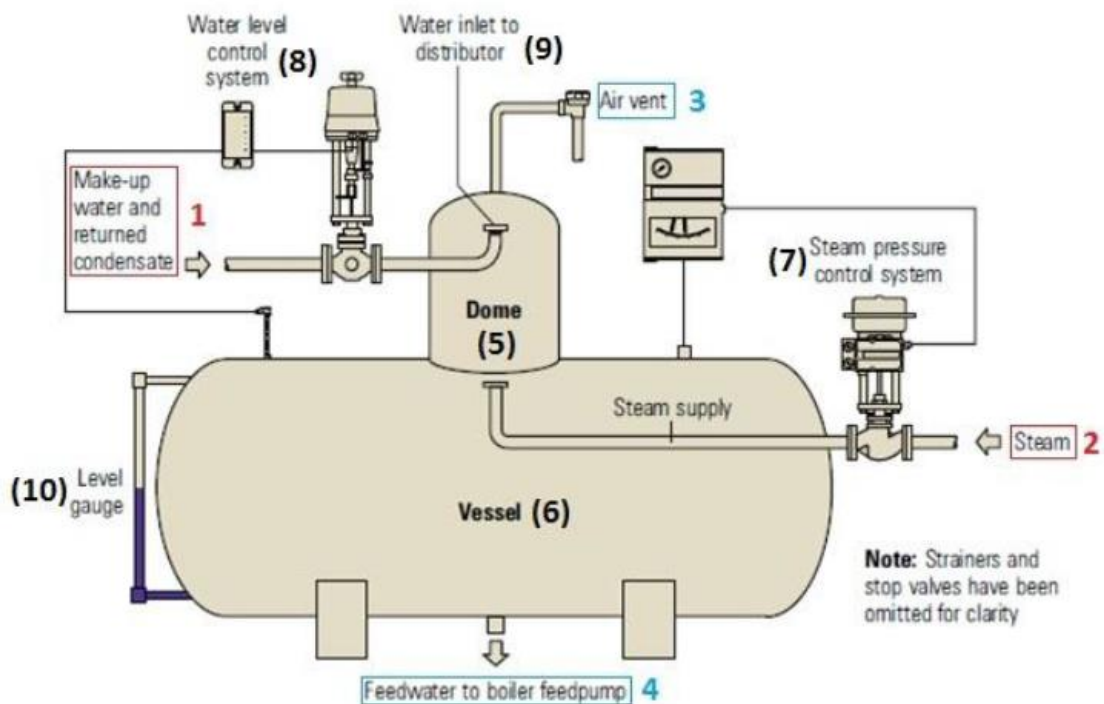


Figura 1-10 Desgasificador

## 2 OBJETIVOS

---

Una vez conocidas la importancia del vapor como fluido caloportador, su aplicación en la industria y las diferentes partes de una red de vapor, el presente trabajo tiene como objetivo el desarrollo de una herramienta informática en Excel que permita la simulación energética y económica de cualquier red de vapor industrial, pudiendo realizar cambios virtuales en ella, evaluando los ahorros económicos y energéticos que éstos implican.

### 2.1 Desarrollo de la herramienta informática.

La herramienta informática desarrollada para el análisis de la red de vapor cuenta con la programación de todos los equipos que se pueden encontrar en la red de vapor, utilizando el programa STEAMTAB para conocer el estado del vapor y con dos pestañas que permiten al usuario la introducción de datos como la composición de los combustibles con los que se alimenten las calderas y turbinas de gas de la red de vapor.

### 2.2 Aplicación de la herramienta informática a una plantilla generalizada aplicable a cualquier industria.

Una vez presentados todos los equipos que contiene el programa se procederá a realizar un ejemplo de su utilización en una plantilla que será aplicable a cualquier red de vapor industrial que se pueda encontrar el usuario.

Esta red cuenta con tres colectores a diferentes niveles de presión, una cogeneración, una caldera de vapor, turbinas a condensación y a contrapresión, botellones flash, compresores, consumidores, válvulas reductoras, desgasificador y bombas.



## 3 HERRAMIENTA INFORMÁTICA

---

**E**l software desarrollado en este trabajo de fin de grado ha sido programado en su integridad en el lenguaje de programación Visual Basic for Application (VBA).

Microsoft VBA (Visual Basic for Applications) es el lenguaje de macros de Microsoft Visual Basic que se utiliza para programar aplicaciones Windows y que se incluye en varias aplicaciones Microsoft. VBA permite a usuarios y programadores ampliar la funcionalidad de programas de la suite Microsoft Office. Visual Basic para Aplicaciones es un subconjunto casi completo de Visual Basic 5.0 y 6.0.

Microsoft VBA viene integrado en aplicaciones de Microsoft Office, como Word, Excel, Access y Powerpoint. Prácticamente cualquier cosa que se pueda programar en Visual Basic 5.0 o 6.0 se puede hacer también dentro de un documento de Office, con la sola limitación que el producto final no se puede compilar separadamente del documento, hoja o base de datos en que fue creado; es decir, se convierte en una macro (o más bien súper macro). Esta macro puede instalarse o distribuirse con sólo copiar el documento, presentación o base de datos.

Su utilidad principal es automatizar tareas cotidianas, así como crear aplicaciones y servicios de bases de datos para el escritorio.

A continuación, se presentarán los diferentes equipos programados, con sus entradas y salidas, incluyendo los balances de materia y energía realizados en VBA.

### 3.1 Turbinas de vapor

#### 3.1.1 Turbina de vapor de una etapa (conocido el caudal de vapor).

Formato de la función:

**Trbn\_A (H\_in, P\_in, m\_v, ren\_isen, P\_out, var\_out)**

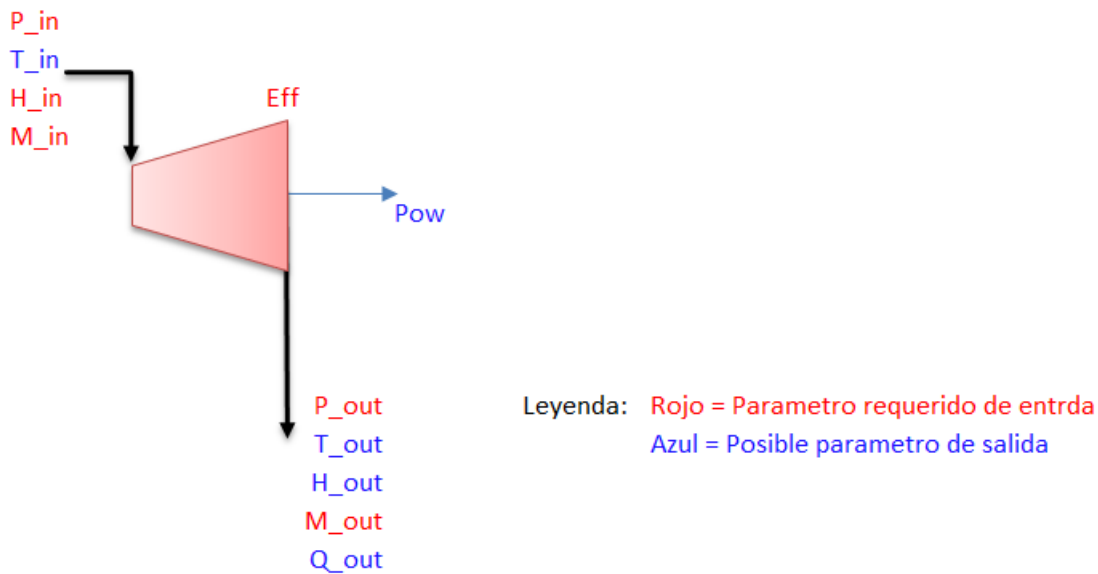


Figura 3-1 Turbina de vapor, conocido el caudal de vapor.

#### Descripción

Este modelo calcula la potencia generada y las condiciones de salida del vapor en una turbina de vapor de una sola etapa. Las propiedades y caudal del vapor a la entrada deben de ser especificadas junto a la presión de salida y la eficiencia isentrópica.

#### Parámetros de entrada

- H\_in [kJ/kg], Entalpía de entrada
- P\_in [bara], Presión de entrada
- m\_v [tn/h], Caudal de vapor
- ren\_isen [0-1], Eficiencia isentrópica
- P\_out [bara], Presión de salida
- var\_out, Variable de salida.

#### Parámetros de salida

- H\_out\_real [kJ/kg], Entalpía de salida
- T\_out [°C], Temperatura de salida
- X\_out [0-1] 1 vapor 0 liquido, Calidad del vapor a la salida
- W\_out [kW] Potencia generada por la turbina.

### 3.1.2 Turbina de vapor de una etapa (conocida la potencia generada).

Formato de la función:

**Trbn\_B (H\_in, P\_in, W\_out, ren\_isen, P\_out, var\_out)**

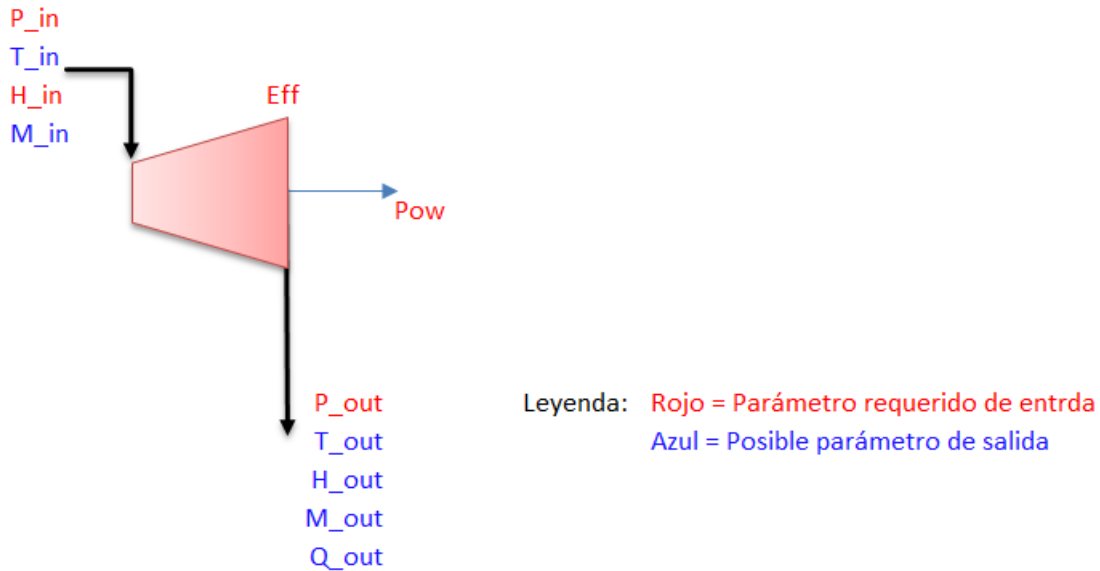


Figura 3-2 Turbina de vapor conocida la potencia

#### Descripción

Este modelo calcula el caudal de vapor necesario para generar la potencia deseada y las condiciones de salida del vapor en una turbina de vapor de una sola etapa. Las propiedades y caudal del vapor a la entrada deben de ser especificadas junto a la presión de salida y la eficiencia isentrópica.

#### Parámetros de entrada

- H\_in [kJ/kg], Entalpía de entrada
- P\_in [bara], Presión de entrada
- W\_out [kW] Potencia generada por la turbina.
- ren\_isen [0-1], Eficiencia isentrópica
- P\_out [bara], Presión de salida

- var\_out, Variable de salida.

#### Parámetros de salida

- H\_out\_real [kJ/kg], Entalpía de salida
- T\_out [°C], Temperatura de salida
- X\_out [0-1] 1 vapor 0 liquido, Calidad del vapor a la salida
- m\_v [tn/h], Caudal de vapor

### 3.1.3 Turbina de vapor dos cuerpos (conocido el caudal de vapor)

Formato de la función:

**Trbn\_A2 (H\_in, P\_in, m\_v1, m\_v2, ren\_isen1, ren\_isen2, P\_out1, Pout2, var\_out)**

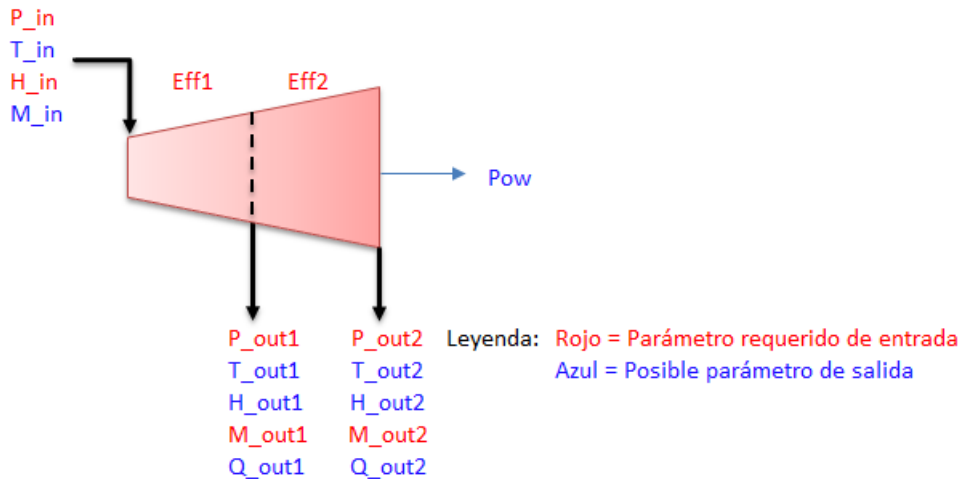


Figura 3-3 Turbina de vapor de dos cuerpos, conocido el caudal de vapor.

#### Descripción

Este modelo calcula la potencia generada y las condiciones del vapor a la salida de cada cuerpo de la turbina donde el caudal de vapor turbinado es conocido. Las propiedades y caudal del vapor a la salida de cada cuerpo deben de ser especificadas junto a la presión de salida y la eficiencia isentrópica.

#### Parámetros de entrada

- H\_in [kJ/kg], Entalpía de entrada
- P\_in [bara], Presión de entrada
- m\_v1 [tn/h], Caudal de vapor cuerpo 1
- m\_v2 [tn/h], Caudal de vapor cuerpo 2
- ren\_isen1 [0-1], Eficiencia isentrópica cuerpo 1
- ren\_isen2 [0-1], Eficiencia isentrópica cuerpo 2
- P\_out 1[bara], Presión de salida cuerpo 1
- P\_out 2 [bara], Presión de salida cuerpo 2

- var\_out, Variable de salida.

#### Parámetros de salida

- H\_out1\_real [kJ/kg], Entalpía de salida cuerpo 1
- T\_out1 [°C], Temperatura de salida cuerpo 1
- X\_out1 [0-1] 1 vapor 0 liquido, Calidad del vapor a la salida del cuerpo 1
- H\_out2\_real [kJ/kg], Entalpía de salida cuerpo 2
- T\_out2 [°C], Temperatura de salida cuerpo 2
- X\_out2 [0-1] 1 vapor 0 liquido, Calidad

del vapor a la salida del cuerpo 2

- $W_{out}$  [kW] Potencia generada por la turbina.

### 3.1.4 Turbina de vapor dos cuerpos (conocida la potencia generada)

Formato de la función:

**Trbn\_B2 (H\_in, P\_in, W\_out, m\_v1, ren\_isen1, ren\_isen2, P\_out1, Pout2, var\_out)**

#### Descripción

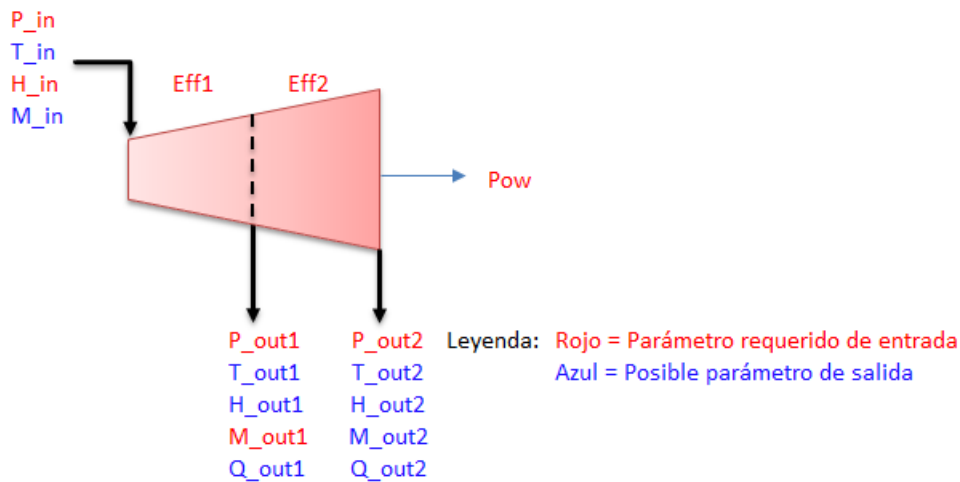


Figura 3-4 Turbina de vapor de dos cuerpos, conocida la potencia.

Este modelo calcula el caudal turbinado por el segundo cuerpo de la turbina conocida la potencia generada de la turbina. Las propiedades y caudal del vapor a la salida de cada cuerpo deben de ser especificadas junto a la presión de salida del vapor y la eficiencia isentrópica de la turbina.

#### Parámetros de entrada

- H\_in [kJ/kg], Entalpía de entrada
- P\_in [bara], Presión de entrada
- W\_out [kW] Potencia generada por la turbina.
- m\_v1 [tn/h], Caudal de vapor cuerpo 2
- ren\_isen1 [0-1], Eficiencia isentrópica cuerpo 1
- ren\_isen2 [0-1], Eficiencia isentrópica cuerpo 2
- P\_out 1[bara], Presión de salida cuerpo

1

- P\_out 2 [bara], Presión de salida cuerpo 2
- var\_out, Variable de salida.

#### Parámetros de salida

- H\_out1\_real [kJ/kg], Entalpía de salida cuerpo 1
- T\_out1 [°C], Temperatura de salida cuerpo 1
- X\_out1 [0-1] 1 vapor 0 liquido, Calidad del vapor a la salida del cuerpo 1

- $H_{out2\_real}$  [kJ/kg], Entalpía de salida cuerpo 2
  - $T_{out2}$  [°C], Temperatura de salida
  - $m_{v2}$  [tn/h], Caudal de vapor cuerpo 2
- $X_{out2}$  [0-1] 1 vapor 0 liquido, Calidad del vapor a la salida del cuerpo 2

### 3.1.5 Turbina de vapor tres cuerpos (conocido el caudal de vapor)

Formato de la función:

Trbn\_A3 (H\_in, P\_in, m\_v1, m\_v2, m\_v3, ren\_isen1, ren\_isen2, ren\_isen3, P\_out1, P\_out2, P\_out3, var\_out)

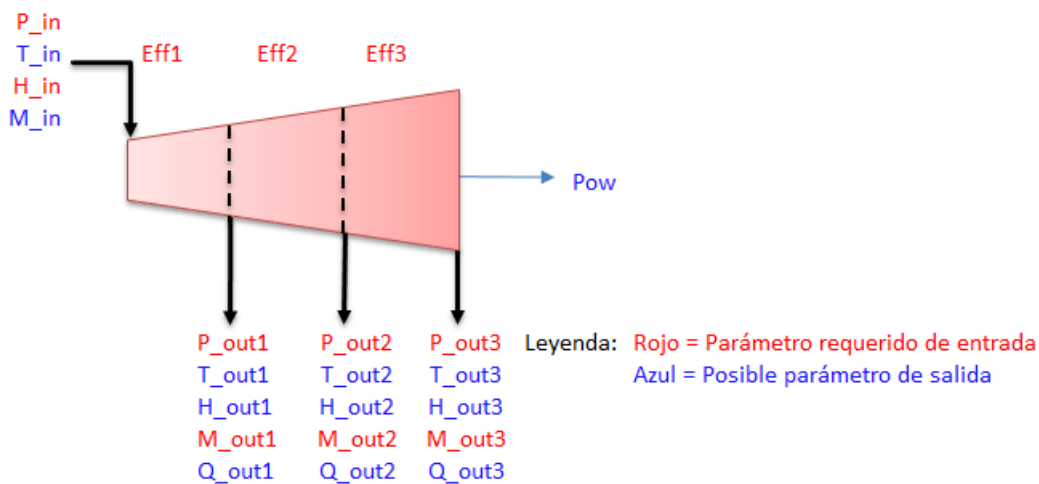


Figura 3-5 Turbina de vapor de tres cuerpos, conocido el caudal de vapor.

#### Descripción

Este modelo calcula la potencia generada y las condiciones del vapor a la salida de cada cuerpo de la turbina donde el caudal de vapor turbinado es conocido. Las propiedades y caudal del vapor a la salida de cada cuerpo deben de ser especificadas junto a la presión de salida y la eficiencia isentrópica.

#### Parámetros de entrada

- H\_in [kJ/kg], Entalpía de entrada
- P\_in [bara], Presión de entrada
- m\_v1 [tn/h], Caudal de vapor cuerpo 1
- m\_v2 [tn/h], Caudal de vapor cuerpo 2
- m\_v3 [tn/h], Caudal de vapor cuerpo 3
- ren\_isen1 [0-1], Eficiencia isentrópica cuerpo 1
- ren\_isen2 [0-1], Eficiencia isentrópica cuerpo 2
- ren\_isen3 [0-1], Eficiencia isentrópica cuerpo 3

- P\_out 1 [bara], Presión de salida cuerpo 1
- P\_out 2 [bara], Presión de salida cuerpo 2
- P\_out 3 [bara], Presión de salida cuerpo 3
- var\_out, Variable de salida.

#### Parámetros de salida

- H\_out1\_real [kJ/kg], Entalpía de salida cuerpo 1
- T\_out1 [°C], Temperatura de salida cuerpo 1



- $X_{out1}$  [0-1] 1 vapor 0 liquido, Calidad del vapor a la salida del cuerpo 1
- $H_{out2\_real}$  [kJ/kg], Entalpía de salida cuerpo 2
- $T_{out2}$  [°C], Temperatura de salida cuerpo 2
- $X_{out2}$  [0-1] 1 vapor 0 liquido, Calidad del vapor a la salida del cuerpo 2
- $W_{out}$  [kW] Potencia generada por la turbina.
- $H_{out3\_real}$  [kJ/kg], Entalpía de salida cuerpo 3
- $T_{out3}$  [°C], Temperatura de salida cuerpo 3
- $X_{out3}$  [0-1] 1 vapor 0 liquido, Calidad del vapor a la salida del cuerpo 3

### 3.1.6 Turbina de vapor tres cuerpos (conocida la potencia generada)

Formato de la función:

Trbn\_B3 (H\_in, P\_in, m\_v1, m\_v2, W\_out, ren\_isen1, ren\_isen2, ren\_isen3, P\_out1, P\_out2, P\_out3, var\_out)

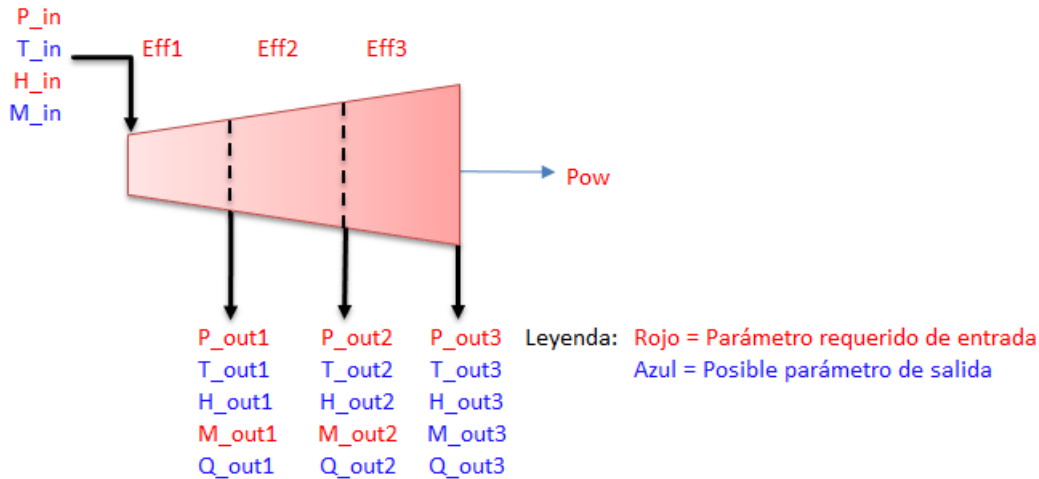


Figura 3-6 Turbina de tres cuerpos conocida la potencia.

#### Descripción

Este modelo calcula el caudal turbinado por el tercer cuerpo de la turbina conocida la potencia generada de la turbina. Las propiedades y caudal del vapor a la salida de cada cuerpo deben de ser especificadas junto a la presión de salida del vapor y la eficiencia isentrópica de la turbina.

#### Parámetros de entrada

- H\_in [kJ/kg], Entalpía de entrada
- P\_in [bara], Presión de entrada
- W\_out [kW] Potencia generada por la turbina.
- m\_v1 [tn/h], Caudal de vapor cuerpo 1
- m\_v2 [tn/h], Caudal de vapor cuerpo 2
- ren\_isen1 [0-1], Eficiencia isentrópica cuerpo 1
- ren\_isen2 [0-1], Eficiencia isentrópica cuerpo 2
- ren\_isen3 [0-1], Eficiencia isentrópica

#### cuerpo 3

- P\_out 1[bara], Presión de salida cuerpo 1
- P\_out 2 [bara], Presión de salida cuerpo 2
- P\_out 3 [bara], Presión de salida cuerpo 3
- var\_out, Variable de salida.

#### Parámetros de salida

- H\_out1\_real [kJ/kg], Entalpía de salida cuerpo 1
- T\_out1 [°C], Temperatura de salida

cuerpo 1

- $X_{out1}$  [0-1] 1 vapor 0 liquido, Calidad del vapor a la salida del cuerpo 1
- $H_{out2\_real}$  [kJ/kg], Entalpía de salida cuerpo 2
- $T_{out2}$  [°C], Temperatura de salida cuerpo 2
- $X_{out2}$  [0-1] 1 vapor 0 liquido, Calidad
- $m_{v3}$  [tn/h], Caudal de vapor cuerpo 3

del vapor a la salida del cuerpo 2

- $H_{out3\_real}$  [kJ/kg], Entalpía de salida cuerpo 3
- $T_{out3}$  [°C], Temperatura de salida cuerpo 3
- $X_{out3}$  [0-1] 1 vapor 0 liquido, Calidad del vapor a la salida del cuerpo 3

## 3.2 Intercambiadores de calor.

### 3.2.1 Intercambiador de calor agua/vapor (se conocen las condiciones del fluido de servicio)

Formato de la función:

**HtXchngr\_A(M\_c\_in, P\_c\_in, C\_DP, T\_c\_in, T\_c\_out, Q\_c\_in, Q\_c\_out, P\_h\_in, H\_DP, T\_h\_in, T\_h\_out, Q\_h\_in, Q\_h\_out, Var\_out)**

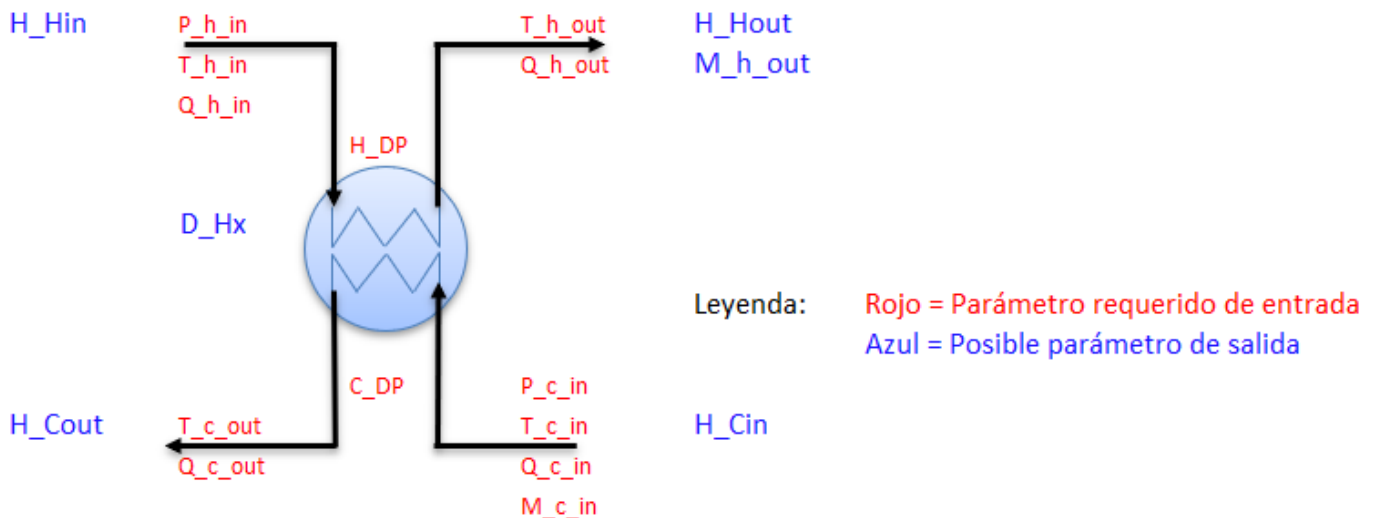


Figura 3-7 Intercambiador de vapor agua/vapor

#### Descripción

Este modelo calcula el calor transferido y el flujo másico de la corriente caliente para un intercambiador de agua/vapor. También calcula las entalpías de entrada y salida de las corrientes frías y calientes.

#### Parámetros de entrada

- $M_{c\_in}$  [tn / h], Caudal de la corriente fría
- $P_{c\_in}$  [bar], Presión de entrada de la corriente fría
- $C_{DP}$  [bar], Caída de presión de la corriente fría.
- $T_{c\_in}$  [°C], Temperatura de entrada de la corriente fría
- $T_{c\_out}$  [°C], Temperatura de salida la

#### corriente fría

- $Q_{c\_in}$ , [0-1] 1 vapor 0 liquido -2 vapor recalentado - 3 líquido subenfriado, Calidad de la corriente fría a la entrada
- $Q_{c\_out}$ , [0-1] 1 vapor 0 liquido -2 vapor recalentado - 3 líquido subenfriado, Calidad de la corriente fría a la salida
- $P_{h\_in}$  [bar] Presión de entrada de la corriente caliente
- $H_{DP}$  [bar], caída de presión de la

corriente caliente

- T\_h\_in [°C], Temperatura de entrada de la corriente caliente
- T\_h\_out [°C], Temperatura de salida de la corriente caliente
- Q\_h\_in, [0-1] 1 vapor 0 líquido -2 vapor recalentado - 3 líquido subenfriado, Calidad de la corriente fría a la entrada
- Q\_h\_out, [0-1] 1 vapor 0 líquido -2 vapor recalentado - 3 líquido subenfriado, Calidad de la corriente fría a la salida
- Var\_out Variable de salida

#### **Parámetros de salida**

- H\_Cout [kJ/kg], Entalpía de salida del fluido frío
- H\_Cin [kJ/kg], Entalpía de entrada del fluido frío
- H\_Hout [kJ/kg], Entalpía de salida del fluido caliente
- H\_Hin [kJ/kg], Entalpía de entrada del fluido caliente
- M\_h\_out [tn/h], Masa de la corriente caliente
- D\_HX [kW] Calor intercambiado

### 3.2.2 Intercambiador de calor agua/vapor (se conoce el calor transferido)

Formato de la función:

**HtXchngr\_B(M\_c\_in, P\_c\_in, C\_DP, T\_c\_in, D\_HX, Q\_c\_in, Q\_c\_out, P\_h\_in, H\_DP, T\_h\_in, T\_h\_out, Q\_h\_in, Q\_h\_out, Var\_out)**

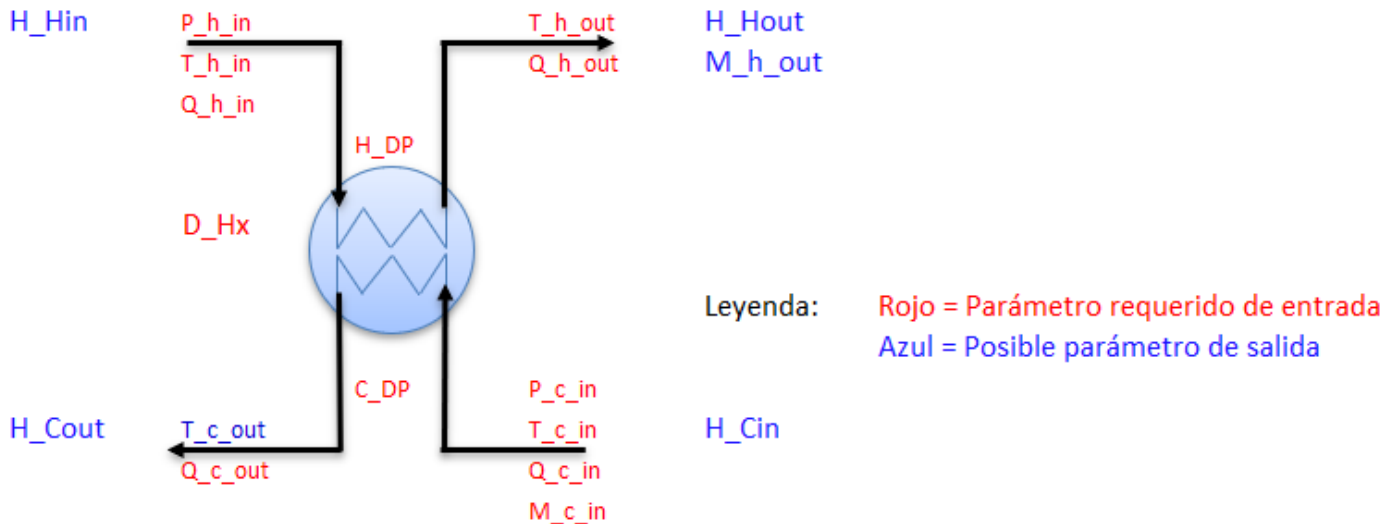


Figura 3-8 Intercambiador de calor, conocido el calor transferido

#### Descripción

Este modelo calcula las condiciones de salida del fluido frío y el flujo másico de la corriente caliente para un intercambiador de agua/vapor. También calcula las entalpías de entrada y salida de las corrientes frías y calientes.

#### Parámetros de entrada

- $M_{c\_in}$  [tn / h], Caudal de la corriente fría
- $P_{c\_in}$  [bar], Presión de entrada de la corriente fría
- $C_{DP}$  [bar], caída de presión de la corriente fría.
- $T_{c\_in}$  [°C], Temperatura de entrada de la corriente fría
- $D_{HX}$  [kW] Calor intercambiado
- $Q_{c\_in}$ , [0-1] 1 vapor 0 líquido -2 vapor recalentado - 3 líquido subenfriado, Calidad de la corriente fría a la entrada
- $Q_{c\_out}$ , [0-1] 1 vapor 0 líquido -2 vapor recalentado - 3 líquido subenfriado, Calidad de la corriente fría a la salida
- $P_{h\_in}$  [bar] Presión de entrada de la corriente caliente
- $H_{DP}$  [bar], caída de presión de la

corriente caliente

- T\_h\_in [°C], Temperatura de entrada de la corriente caliente
- T\_h\_out [°C], Temperatura de salida de la corriente caliente
- Q\_h\_in, [0-1] 1 vapor 0 líquido -2 vapor recalentado - 3 líquido subenfriado, Calidad de la corriente fría a la entrada
- Q\_h\_out, [0-1] 1 vapor 0 líquido -2 vapor recalentado - 3 líquido subenfriado, Calidad de la corriente fría a la salida
- Var\_out Variable de salida

#### **Parámetros de salida**

- H\_Cout [kJ/kg], Entalpía de salida del fluido frío
- H\_Cin [kJ/kg], Entalpía de entrada del fluido frío
- H\_Hout [kJ/kg], Entalpía de salida del fluido caliente
- H\_Hin [kJ/kg], Entalpía de entrada del fluido caliente
- M\_h\_out [tn/h], Masa de la corriente caliente
- T\_c\_out [°C], Temperatura de salida la corriente fría

### 3.2.3 Intercambiador de calor conocido el UA y temperaturas del fluido.

Formato de la función:

**HX\_UA\_Exchanger** (U, A, T\_h\_in, T\_h\_out, T\_c\_in, T\_c\_out, Nshells, var\_out)



Figura 3-9 Intercambiador de calor conocido UA y temperaturas del fluido.

#### Descripción

Esta función simula el funcionamiento de un intercambiador de proceso, conociendo las temperaturas de los fluidos del proceso a la entrada y salida del intercambiador, la transmitancia térmica del intercambiador, el área y el número de carcasas.

#### Parámetros de entrada

- U, Coeficiente global de transferencia de calor del intercambiador.
- A, Área total de transferencia del intercambiador.
- T\_h\_in, Temperatura del fluido caliente a la entrada. (Fluido que se enfría).
- T\_h\_out, Temperatura del fluido caliente a la salida.
- T\_c\_in, Temperatura del fluido frío a la entrada. (Fluido que se calienta)
- T\_c\_out, Temperatura del fluido frío a la

salida.

- Nshells, Número de carcasas en serie.
- Var\_out, Variables de salida.

#### Parámetros de salida

- LMTD, Diferencia de temperatura media logarítmica.
- D\_Hx, Calor útil transferido.
- Ft, factor corrector



### 3.2.4 Economizador de la caldera. (Intercambiador proceso/agua)

Formato de la función:

**HX\_BFWHeater** (P, T\_c\_in, M\_w, T\_h\_in, M\_h, U, A, NShells, Hot\_CpCoeff1, Hot\_CpCoeff2, Hot\_CpCoeff3, Hot\_CpCoeff4, Hot\_CpCoeff5, Var\_out)

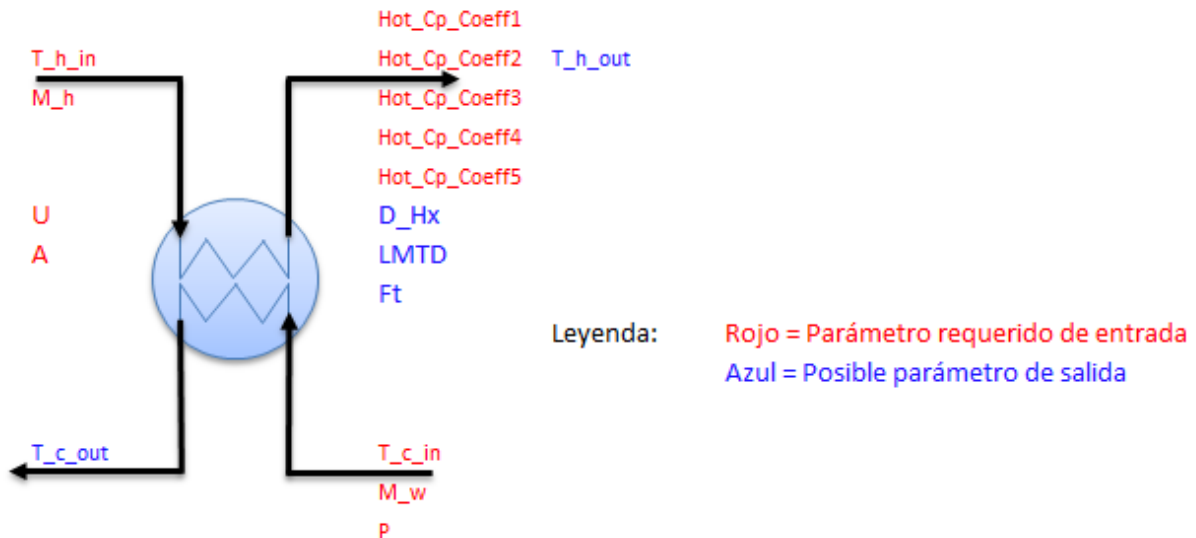


Figura 3-10 Intercambiador de calor proceso/agua

#### Descripción

Esta función simula el funcionamiento del economizador de una caldera desconocidas sus temperaturas de salida, y con transmitancia, área y Cp de la corriente caliente especificados.

#### Parámetros de entrada

- P, Presión de la caldera
- T\_c\_in, Temperatura del agua de alimentación.
- M\_w, Caudal de agua de alimentación a la caldera.
- T\_h\_in, Temperatura del fluido caliente a la entrada.
- M\_h, Caudal de la corriente caliente.
- U, Coeficiente global de transferencia de calor del intercambiador.
- A, Área total de transferencia del intercambiador.
- Hot\_CpCoeff1, Constante (a) en el polinomio  $Cp = a + bT + cT^2 + dT^3 + eT^4$  para calcular la capacidad térmica específica del fluido caliente.
- Hot\_CpCoeff2, Constante (b) en el

polinomio  $Cp = a + bT + cT^2 + dT^3 + eT^4$  para calcular la capacidad térmica específica del fluido caliente.

- Hot\_CpCoeff3, Constante (c) en el polinomio  $Cp = a + bT + cT^2 + dT^3 + eT^4$  para calcular la capacidad térmica específica del fluido caliente.
- Hot\_CpCoeff4, Constante (d) en el polinomio  $Cp = a + bT + cT^2 + dT^3 + eT^4$  para calcular la capacidad térmica específica del fluido caliente.
- Hot\_CpCoeff5, Constante (e) en el polinomio  $Cp = a + bT + cT^2 + dT^3 + eT^4$  para calcular la capacidad térmica específica del fluido caliente.
- Var\_out, Variables de salida.
- Parámetros de salida
- T\_c\_out, Temperatura del agua a la salida del economizador.

- $T_{h\_out}$ , Temperatura del fluido caliente a la salida.
- LMTD, Diferencia de temperatura media
- logarítmica.
- $D_{Hx}$ , Calor útil transferido.
- $F_t$ , factor corrector

### 3.2.5 Generador de vapor de la caldera (intercambiador proceso/agua-vapor)

Formato de la función:

**HX\_SteamGenerator** (P, T\_c\_in, M\_w, T\_h\_in, M\_h, U, A, Hot\_CpCoeff1, Hot\_CpCoeff2, Hot\_CpCoeff3, Hot\_CpCoeff4, Hot\_CpCoeff5, Var\_out)

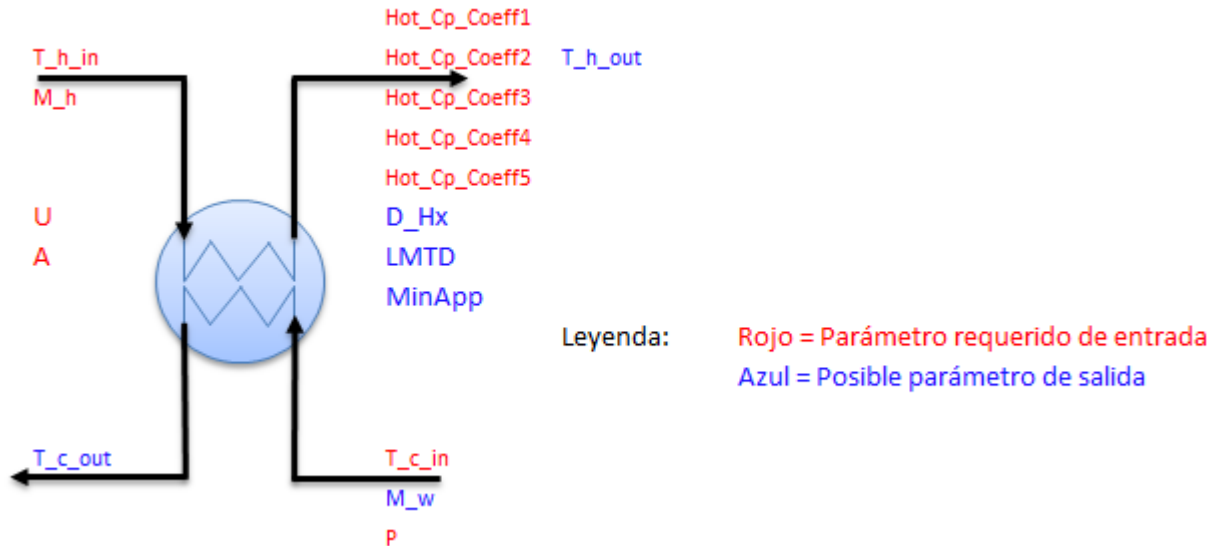


Figura 3-11 Intercambiador de calor, generador de vapor.

#### Descripción

Esta función simula el funcionamiento del generador de vapor de una caldera con el caudal de vapor y temperatura de la corriente caliente como incógnitas y con transmitancia, área del intercambiador y Cp de la corriente caliente como datos.

#### Parámetros de entrada

- P, Presión de la caldera
- T\_c\_in, Temperatura del agua de alimentación.
- M\_w, Caudal de vapor generado.
- T\_h\_in, Temperatura del fluido caliente a la entrada.
- M\_h, Caudal de la corriente caliente.
- U, Coeficiente global de transferencia de calor del intercambiador.
- A, Área total de transferencia del intercambiador.
- Hot\_CpCoeff1, Constante (a) en el polinomio  $Cp = a + bT + cT^2 + dT^3 + eT^4$  para calcular la capacidad térmica específica del fluido caliente.
- Hot\_CpCoeff2, Constante (b) en el polinomio  $Cp = a + bT + cT^2 + dT^3 + eT^4$  para calcular la capacidad térmica específica del fluido caliente.
- Hot\_CpCoeff3, Constante (c) en el polinomio  $Cp = a + bT + cT^2 + dT^3 + eT^4$  para calcular la capacidad térmica específica del fluido caliente.
- Hot\_CpCoeff4, Constante (d) en el polinomio  $Cp = a + bT + cT^2 + dT^3 + eT^4$  para calcular la capacidad térmica específica del fluido caliente.
- Hot\_CpCoeff5, Constante (e) en el polinomio  $Cp = a + bT + cT^2 + dT^3 + eT^4$  para calcular la capacidad térmica específica del fluido caliente.
- Var\_out, Variables de salida.

**Parámetros de salida**

- T\_h\_out, Temperatura del fluido caliente a la salida.
- LMTD, Diferencia de temperatura media logarítmica.
- D\_Hx, Calor útil transferido.
- M\_w, Caudal de agua.
- MinApp, Temperatura mínima de acercamiento

### 3.3 Calderas.

#### 3.3.1 Caldera modelo simplificado

Formato de la función:

**Blr\_A (H\_in, m\_v, T\_out, P\_out, rat\_purg, var\_out)**

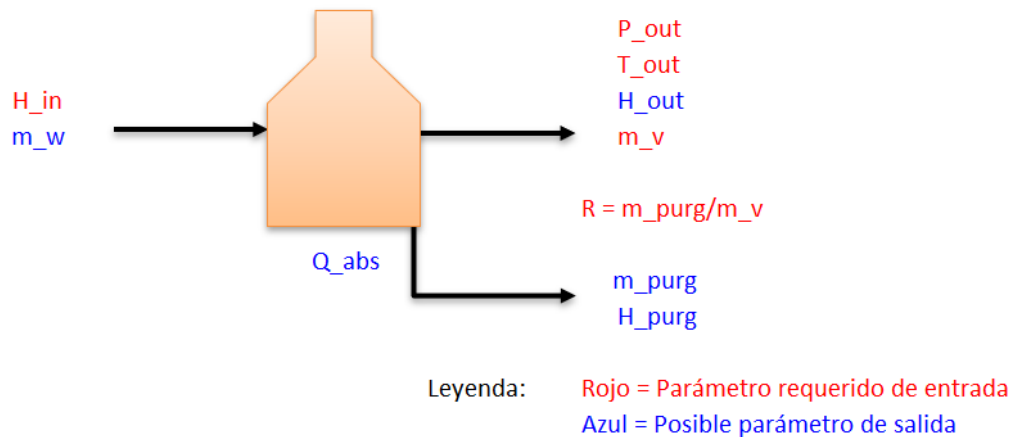


Figura 3-12 Caldera de vapor, modelo simplificado.

#### Descripción

Este modelo representa una caldera de vapor en la cual conocemos la demanda y las condiciones de éste. El ratio de purga es solicitado para calcular el caudal de agua y el caudal de purga. Este modelo calcula el calor absorbido y las demás propiedades desconocidas de las corrientes de la caldera

#### Parámetros de entrada

- H\_in [kJ/kg], Entalpía de entrada del vapor.
- P\_out [bara], Presión de servicio de la caldera.
- T\_out [°C] Temperatura de servicio de la caldera.
- m\_v [tn/h], Caudal de vapor
- R, Ratio de purga [adimensional]
- var\_out, Variable de salida.

#### Parámetros de salida

- m\_w [tn/h], Caudal de agua de alimentación de la caldera
- H\_out [kJ/kg], Entalpía de salida del vapor
- m\_purg [tn/h], Caudal de purga
- H\_purg [kJ/kg], Entalpía de la purga
- Q\_abs [kW], Calor absorbido por la caldera

### 3.3.2 Caldera modelo simplificado (Con eficiencia)

Formato de la función:

**Blr\_B** ( $H_{in}$ ,  $m_w$ ,  $T_{out}$ ,  $P_{out}$ ,  $rat_{purg}$ ,  $eff_{cald}$ ,  $var_{out}$ )

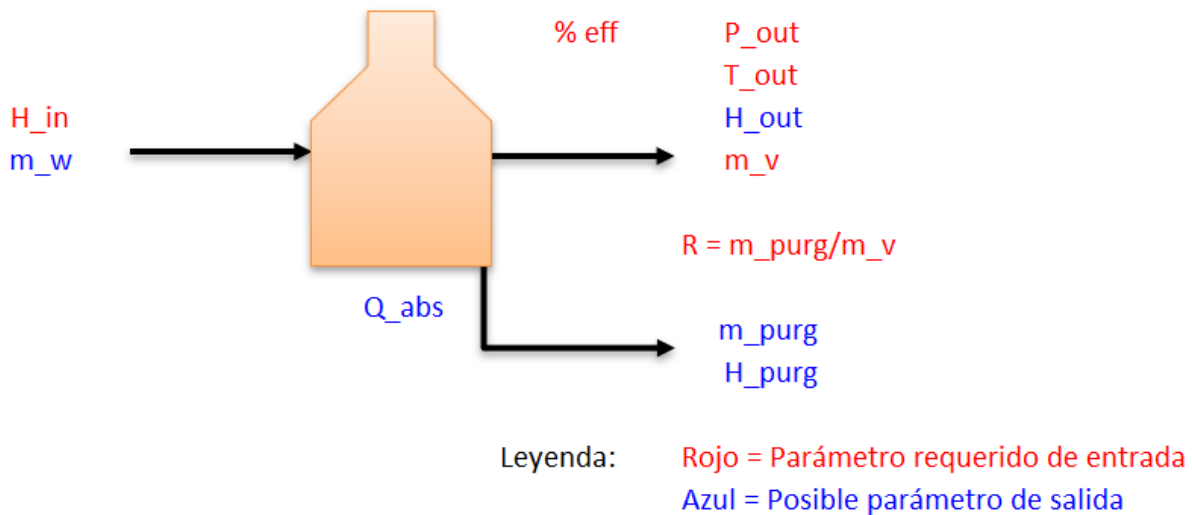


Figura 3-13 Caldera de vapor, modelo simplificado con eficiencia.

#### Descripción

Este modelo es el mismo que el anterior, pero con un parámetro más de entrada, eficiencia de la caldera, y una nueva salida, calor generado, que es el calor total del combustible.

#### Parámetros de entrada

- $H_{in}$  [kJ/kg], Entalpía de entrada del vapor.
- $P_{out}$  [bara], Presión de servicio de la caldera.
- $T_{out}$  [°C] Temperatura de servicio de la caldera.
- $m_w$  [tn/h], Caudal de vapor
- $eff_{cald}$  [adimensional], Eficiencia de la caldera
- $R$  [adimensional], Ratio de purga

- $var_{out}$ , Variable de salida.

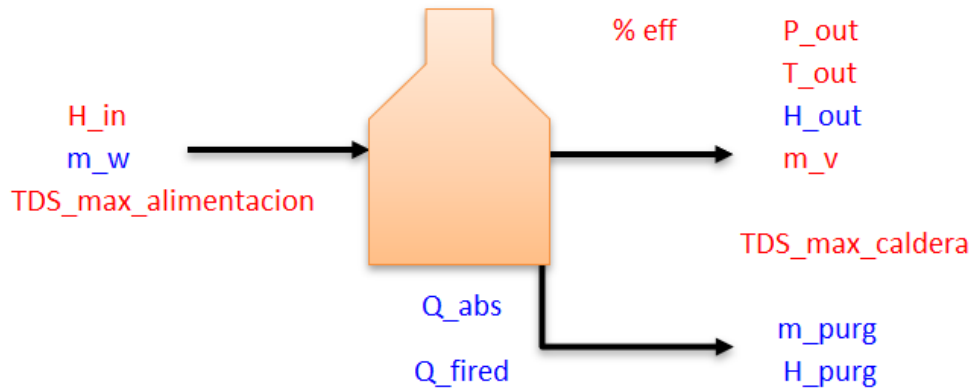
#### Parámetros de salida

- $m_w$  [tn/h], Caudal de agua de alimentación de la caldera
- $H_{out}$  [kJ/kg], Entalpía de salida del vapor
- $m_{purg}$  [tn/h], Caudal de purga
- $H_{out}$  [kJ/kg], Entalpía de la purga
- $Q_{abs}$  [kW], Calor absorbido por la caldera
- $Q_{fired}$  [kW], Calor del combustible.

### 3.3.3 Caldera con limitación de purga en TDS.

Formato de la función:

**Blr\_C (H\_in, m\_w, T\_out, P\_out, TDS\_max\_caldera, TDS\_alimentacion, var\_out)**



Leyenda: Rojo = Parámetro requerido de entrada  
Azul = Posible parámetro de salida

Figura 3-14 Caldera de vapor, TDS.

#### Descripción

Este modelo es el mismo que el anterior pero el control de la purga será limitado por los sólidos en suspensión máximos admisibles en la caldera y del agua tratada.

#### Parámetros de entrada

- H\_in [kJ/kg], Entalpía de entrada del vapor.
- P\_out [bara], Presión de servicio de la caldera.
- T\_out [°C] Temperatura de servicio de la caldera.
- m\_v [tn/h], Caudal de vapor
- TDS\_max\_alimentación[ppm], concentración máxima de sólidos disueltos en la caldera.
- TDS\_alimentación[ppm], concentración de sólidos disueltos en la alimentación.

- R [adimensional], ratio de purga
- var\_out, Variable de salida.

#### Parámetros de salida

- m\_w [tn/h], caudal de agua de alimentación de la caldera
- H\_out [kJ/kg], Entalpía de salida del vapor
- m\_purg [tn/h], Caudal de purga
- H\_purg [kJ/kg], Entalpía de la purga
- Q\_abs [kW], Calor absorbido por la caldera
- Q\_fired [kW], Calor del combustible

## 3.4 Compresores

### 3.4.1 Termocompresor

Formato de la función:

**Thermocomp (H\_motive, P\_motive, H\_suction, P\_suction, P\_out, Cn\_rat, var\_out)**

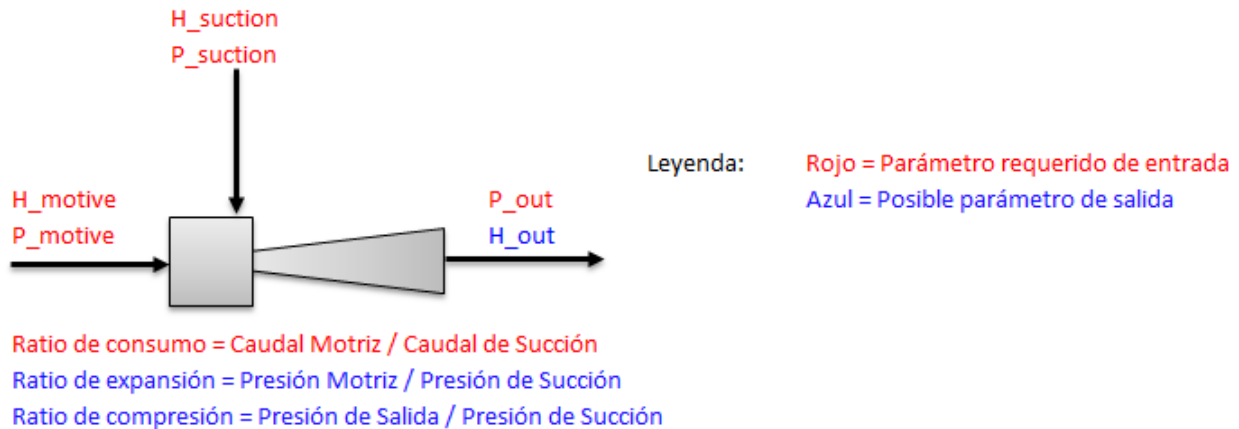


Figura 3-15 Termocompresor.

#### Descripción

Esta función simula el funcionamiento de un termocompresor del que se conocen las condiciones de entrada tanto del fluido motriz como el de succión, calculando la entalpía de salida y el ratio de expansión y compresión.

#### Parámetros de entrada

- $H_{motive}$  [kJ/kg]. Entalpía de la corriente motriz.
- $P_{motive}$  [bara], Presión de la corriente motriz.
- $H_{suction}$  [kJ/kg], Entalpía de la corriente de succión.
- $P_{suction}$  [bara], Presión de la corriente de succión.
- $P_{out}$  [bara], Presión de salida

- $Cn_{rat}$ , Ratio de consumo
- $Var_{out}$ , Variables de salida.

#### Parámetros de salida

- $H_{out}$  [kJ/kg], Entalpía de salida.
- $E_{ratio}$ , Ratio de expansión.
- $C_{ratio}$ , Ratio de compresión.



### 3.4.2 Compresor de un cuerpo (conocido el caudal)

Formato de la función:

**Cmprsr\_A (H\_in, P\_in, m\_v, ren\_isen, P\_out, var\_out)**

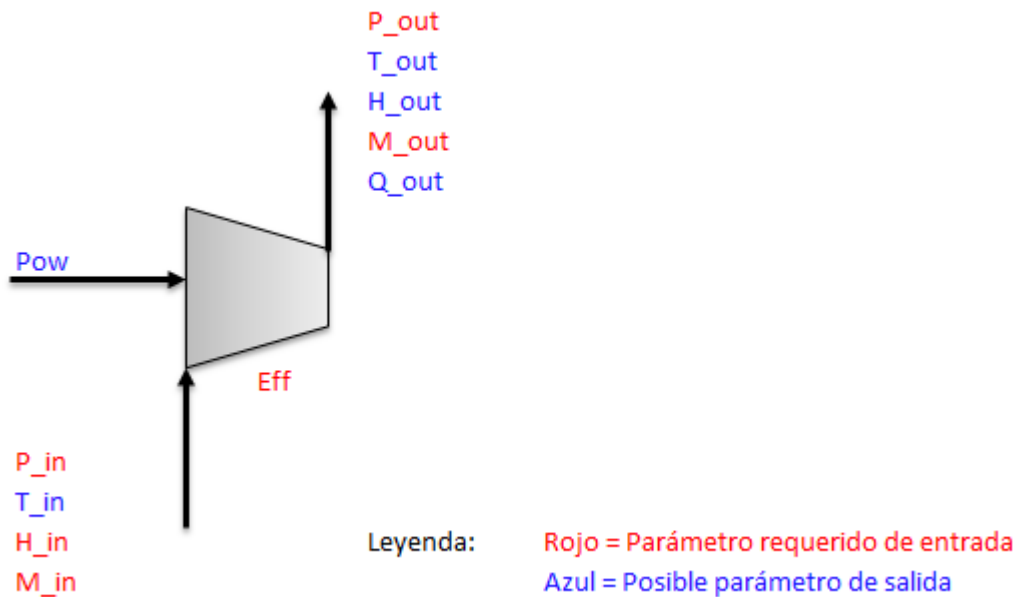


Figura 3-16 Compresor de un cuerpo conocido el caudal.

#### Descripción

El modelo predice la potencia del requerida por el compresor de vapor de un solo cuerpo dadas las condiciones de entrada del vapor, la presión de salida y el rendimiento isentrópico

#### Parámetros de entrada

- $H_{in}$  [kJ/kg], Entalpía de entrada
- $P_{in}$  [bara], Presión de entrada.
- $P_{out}$  [bara], Presión de salida.
- $Eff$ , Rendimiento isentrópico.
- $M_{in}$  [tn/h], Caudal de vapor.
- $Var_{out}$ , Variables de salida.

#### Parámetros de salida

- $H_{out}$  [kJ/kg], Entalpía de salida.
- $T_{out}$  [°C], Temperatura de salida.
- $Q_{out}$ , Calidad de vapor de salida.
- $Pow$  [kW], Potencia demandada.

### 3.4.3 Compresor de un cuerpo (conocida la potencia)

Formato de la función:

**Cmprsr\_A (H\_in, P\_in, Pow, ren\_isen, P\_out, var\_out)**

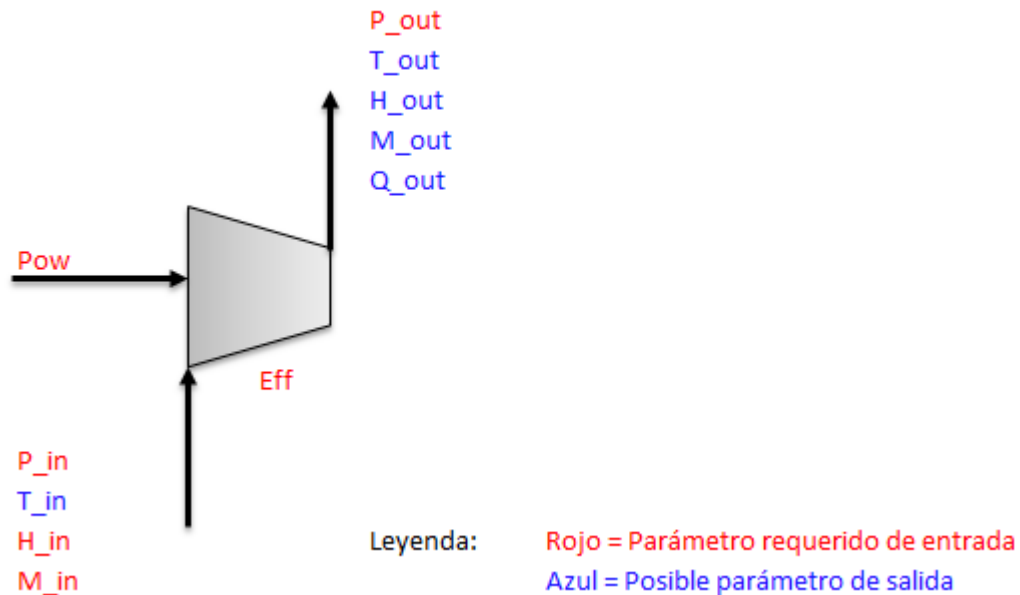


Figura 3-17 Compresor de un cuerpo, conocida la potencia

#### Descripción

El modelo del compresor calcula el flujo de vapor que atraviesa en compresor de una sola etapa conocidas las condiciones de entrada, la presión de salida, el rendimiento isentrópico y la potencia consumida.

#### Parámetros de entrada

- H\_in [kJ/kg], Entalpía de entrada
- P\_in [bara], Presión de entrada.
- P\_out [bara], Presión de salida.
- Pow [kW], Potencia demandada.
- Eff, Rendimiento isentrópico.
- Var\_out, Variables de salida.

#### Parámetros de salida

- H\_out [kJ/kg], Entalpía de salida.
- T\_out [°C], Temperatura de salida.
- Q\_out, Calidad de vapor de salida.
- M\_in [tn/h], Caudal de vapor.

## 3.5 Otros equipos.

### 3.5.1 Desgasificador.

Formato de la función:

$Drt\_A(P\_op, H\_st, T\_w, M\_out, R\_vent, Var\_out)$

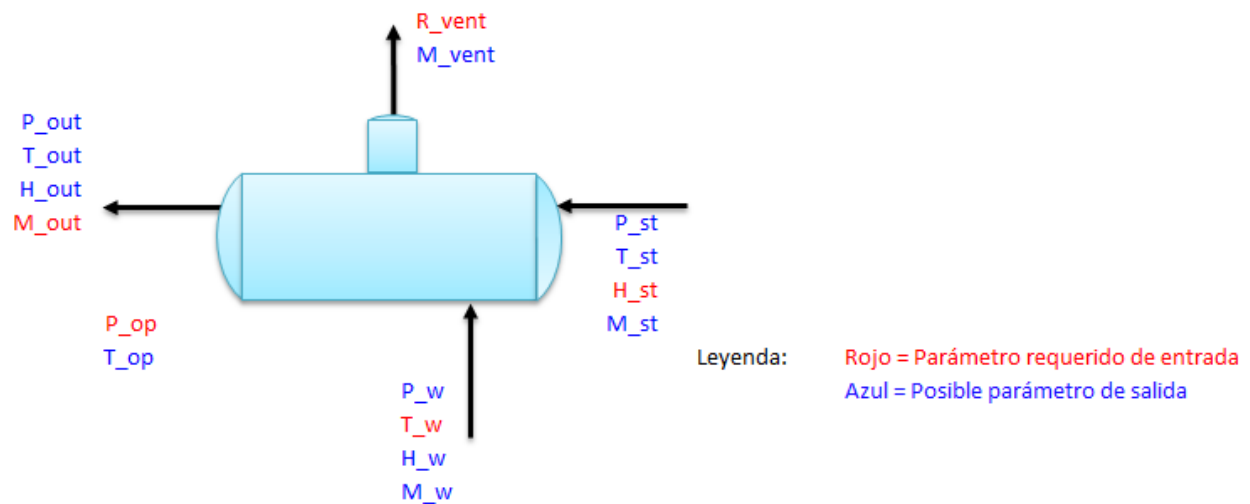


Figura 3-18 Desgasificador.

#### Descripción

El modelo permite el cálculo del vapor demandado por el desgasificador que alimenta la caldera, conociendo las condiciones de entrada del agua de alimentación y el vapor de agua

#### Parámetros de entrada

- $H\_st$  [kJ/kg], Entalpía del vapor
- $T\_w$  [°C], Temperatura del agua a la entrada.
- $P\_op$  [bara], Presión de operación del desgasificador.
- $M\_out$  [tn/h], Caudal de salida del desgasificador.
- $R\_vent$ , Ratio de venteo.
- $Var\_out$ , Variables de salida.

#### Parámetros de salida

- $H\_out$  [kJ/kg], Entalpía del agua de salida del desgasificador.
- $T\_out$  [°C], Temperatura del agua de salida del desgasificador.
- $M\_w$  [tn/h], Caudal de agua de alimentación.
- $M\_st$  [tn/h], Caudal de vapor de entrada al Desgasificador.

### 3.5.2 Válvula atemperadora (Conocida la corriente de vapor de entrada).

Formato de la función:

**DSprHt\_A (H\_st\_in, H\_w, P\_op, T\_op, M\_st\_in, Var\_out)**

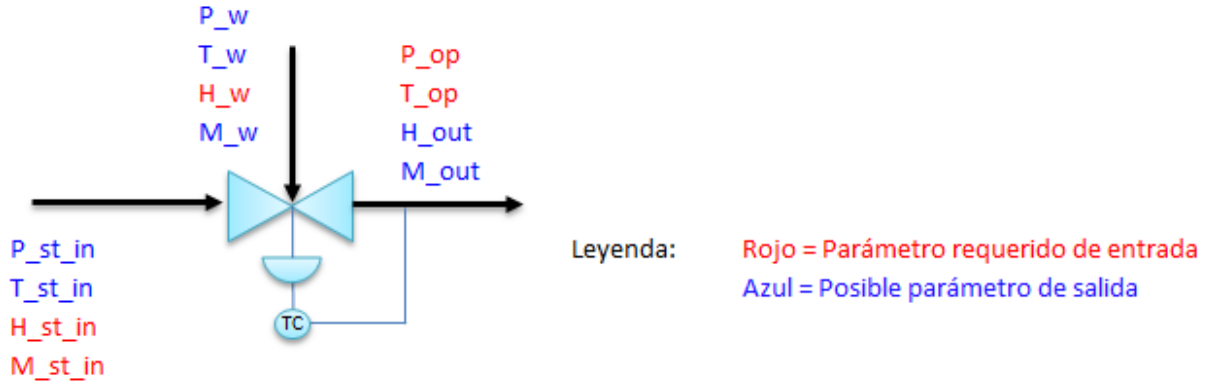


Figura 3-19 Válvula atemperadora, conocido el vapor de entrada.

#### Descripción

El modelo atemperador calcula el caudal de agua necesaria para el desrecalentamiento de vapor de una alta presión a una presión más baja. Se conocen las condiciones de las corrientes de entrada junto con el caudal másico de vapor de entrada. El modelo devuelve el caudal másico de agua requerida junto con el caudal de vapor de salida.

#### Parámetros de entrada

- $M_{st\_in}$  [tn/h], Caudal de vapor a la entrada de la válvula atemperadora.
- $H_{st\_in}$  [kJ/kg], Entalpía del vapor a la entrada de la válvula atemperadora.
- $H_w$  [kJ/kg], Entalpía del agua
- $P_{op}$  [bara], Presión de operación de la válvula.
- $T_{op}$  [°C], Temperatura de control de la válvula atemperadora.
- $Var_{out}$ , Variable de salida.

#### Parámetros de salida

- $H_{out}$  [kJ/kg], Entalpía del vapor de salida.
- $M_w$  [tn/h], Caudal del agua de alimentación.
- $M_{out}$  [tn/h], Caudal de salida de vapor de la válvula atemperadora

### 3.5.3 Válvula atemperadora (Conocida la corriente de vapor de salida).

Formato de la función:

DSprHt\_B (H\_st\_in, H\_w, P\_op, T\_op, M\_out, Var\_out)

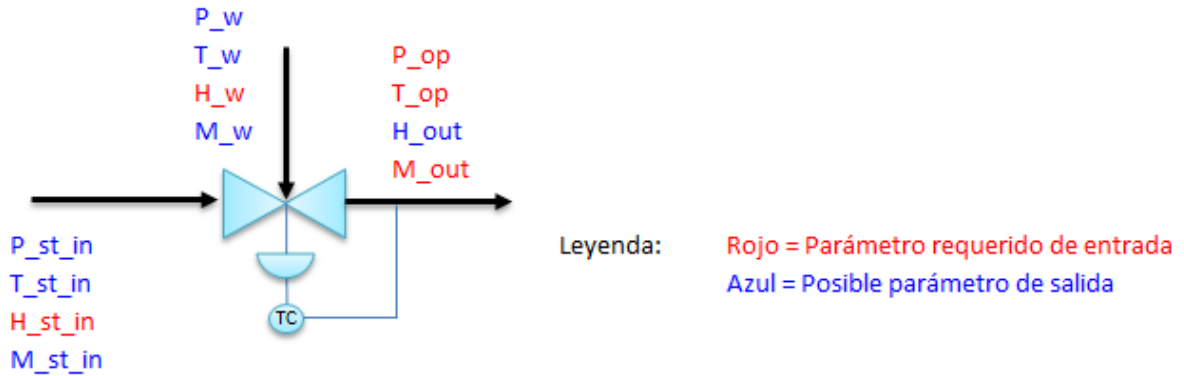


Figura 3-20 Válvula atemperadora, conocido el vapor de salida.

#### Descripción

El modelo atemperador calcula el caudal de agua necesaria para el desrecalentamiento de vapor de una alta presión a una presión más baja. Se conocen las condiciones de las corrientes de entrada junto con el caudal másico de vapor a la salida de la válvula atemperadora. El modelo devuelve el caudal másico de agua requerida junto con el caudal de vapor de entrada.

#### Parámetros de entrada.

- $H_{st\_in}$  [kJ/kg], Entalpía del vapor a la entrada de la válvula atemperadora.
- $H_w$  [kJ/kg], Entalpía del agua
- $P_{op}$  [bara], Presión de operación de la válvula.
- $T_{op}$  [°C], Temperatura de control de la válvula atemperadora.
- $M_{out}$  [tn/h], Caudal másico de vapor a la salida de la válvula atemperadora.
- $Var_{out}$ , Variable de salida.

#### Parámetros de salida

- $H_{out}$  [kJ/kg], Entalpía del vapor de salida.
- $M_w$  [tn/h], Caudal del agua de alimentación.
- $M_{out}$  [tn/h], Caudal de salida de vapor de la válvula atemperadora

### 3.5.4 Botellón Flash.

Formato de la función:

**FlshVssl\_A (M\_in, H\_in, P\_op, var\_out)**

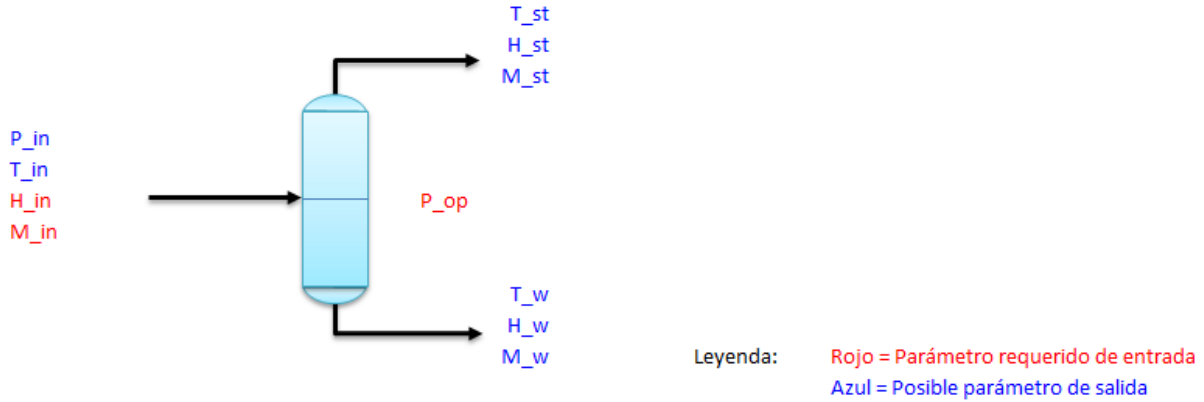


Figura 3-21 Botellón Flash.

#### Descripción

El modelo del botellón flash permite calcular el caudal de vapor flasheado y el caudal de agua de salida del botellón, conociendo las condiciones de operación del botellón flash y su caudal de entrada.

#### Parámetros de entrada.

- $M_{in}$  [tn/h], Caudal de agua de entrada al botellón flash.
- $H_{in}$  [kJ/kg], Temperatura de entrada del agua
- $P_{op}$  [bara], Presión de operación del botellón flash.
- $Var_{out}$ , Variable de salida.

#### Parámetros de salida

- $T_{st}$  [°C], Temperatura del vapor

saturado de salida del botellón flash.

- $M_{st}$  [tn/h], Corriente de salida del vapor saturado del botellón flash.
- $M_w$  [tn/h], Masa de agua de salida del botellón flash.
- $H_{st}$  [kJ/kg], Entalpía del vapor saturado de salida del botellón flash
- $H_w$  [kJ/kg], Entalpía del agua de salida del botellón flash.

### 3.5.5 Bomba.

Formato de la función:

**WaterPump\_A (H\_in, P\_in, P\_out, M\_W, Eff, var\_out)**

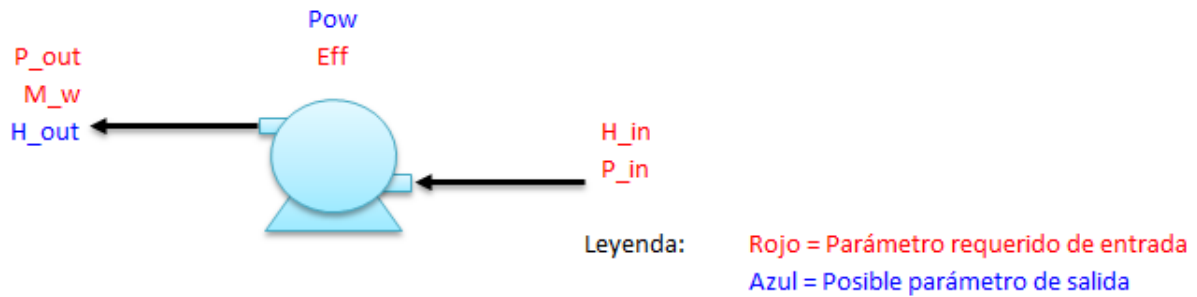


Figura 3-22 Bomba de agua.

#### Descripción

El modelo de la bomba de agua simula el funcionamiento de una bomba conociendo las condiciones de entrada del fluido, el gradiente de presiones, el caudal bombeado y la eficiencia de la bomba. Las salidas de este modelo serán la entalpía a la salida de la bomba y la potencia consumida.

#### Parámetros de entrada.

- $H_{in}$  [kJ/kg], Entalpía de entrada del caudal de agua
- $P_{in}$  [bara], Presión de entrada del caudal de agua
- $P_{out}$  [bara], Presión de salida del caudal de agua.
- $M_w$  [tn/h], Caudal de agua.
- $Eff$ , Eficiencia de la bomba.

- $Var_{out}$ , variable de salida

#### Parámetros de salida

- $Pow$  [kW], Potencia consumida por la bomba
- $H_{out}$  [kJ/kg], Entalpía de salida del caudal de agua.

### 3.5.6 Válvula reductora.

Formato de la función:

**LtDwnVlv\_A (H\_in, P\_in, P\_op, Var\_out)**

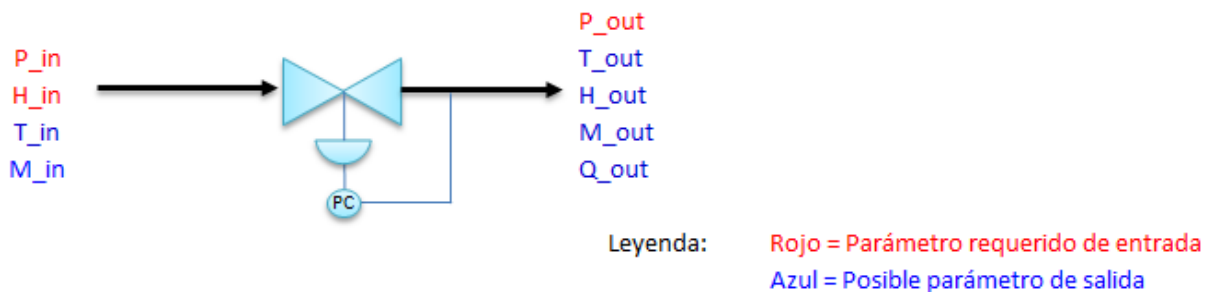


Figura 3-23 Válvula reductora.

#### Descripción

El modelo de válvula reductora permite calcular las condiciones de salida del vapor que fluye por una válvula reductora, conociendo las condiciones de entrada del caudal de vapor a la entrada y la presión de consigna.

#### Parámetros de entrada.

- H\_in [kJ/kg], Entalpía de entrada del vapor.
- P\_in [bara], Presión de entrada del vapor.
- P\_op [bara], Presión de consigna de la válvula.
- Var\_out, Variable de salida.

#### Parámetros de salida

- T\_out [°C], Temperatura de salida
- H\_out [kJ/kg], Entalpía de salida del vapor.
- M\_out [tn/h], Caudal de vapor a la salida de la válvula.
- Q\_out, Calidad del vapor.



# 4 CASOS REALES EVALUADOS

---

En este cuarto capítulo, se simularán 3 casos reales de redes de vapor, en los que, gracias al uso de la herramienta podrá ser observado su funcionamiento en el caso base, obteniendo cuales deberían de ser los flujos máxicos y energéticos.

Las razones principales por las que es interesante que una industria construya su modelo de vapor son las siguientes:

1. Evaluar el coste del vapor real en los colectores de más baja presión.
2. Identificar pérdidas energéticas actuales.
3. Evaluar con precisión los ahorros de los proyectos.
4. Pronosticar la futura demanda de vapor vs producción
5. Identificar las áreas críticas, las sensibilidades y los cuellos de botella.
6. Identificar las mejoras operacionales sin ningún coste asociado.
7. Evaluar tarifas y gestión de contratos de energía
8. Controlar las emisiones
9. Para formar la base de un plan de inversión consistente para la red de vapor.

Una vez evaluados estos casos base, se verán cuáles serían las posibles mejoras de operación observando el camino marginal del vapor más favorable económicamente.

Por último, se analizará la introducción de nuevos equipos para aprovechar flujos energéticos que sean desaprovechados o mal gestionados.

## 4.1 Red de vapor con un solo colector.

El primer caso es una red de vapor simple que cuenta con un solo colector, lo primero que se hará será simular el caso base de la planta de vapor.

En la Tabla 4-1 Caso Base, se puede observar el caso base de la red de vapor 1, en la cual hay un coste asociado a las utilities de 530k\$ aprox. en combustible y 57k\$ en agua. Es fácil contemplar que hay varios

proyectos de mejoras en el caso base, los que hemos implementado en la red son los siguientes:

- Incremento en la recuperación del condensado del 50% al 80%.
- Aumento de la permisividad de la caldera en solidos disueltos de 2000 ppm a 3500 ppm.
- Incorporación de un botellón flash en la purga para recuperar parte de la energía de ésta.
- Incorporación de un intercambiador de calor para recuperar parte de la energía del condensado de la purga.
- Incremento de la eficiencia de la caldera de un 80% a un 85%.

#### Parámetros del caso base

|                                |            |
|--------------------------------|------------|
| Presión generación de vapor    | 11,0 bara  |
| Presión del colector           | 2,0 bara   |
| Demanda de Vapor               | 10 tn/h    |
| Eficiencia de la caldera       | 80,00%     |
| TDS admisible en la caldera    | 2000 ppm   |
| Retorno del condensado         | 50,00%     |
| Temperatura del condensado     | 80 °C      |
| Tª de agua de alimentación     | 10 °C      |
| TDS agua de alimentación       | 300 ppm    |
| Presión tanque de alimentación | 1,0 bara   |
| Incremento TDS proceso químico | 69 ppm     |
| Horas de operación al año      | 6000 h/año |
| Coste del combustible          | 9,47 \$/MW |
| Coste del agua                 | 1,5 \$/tn  |

Tabla 4-1 Caso Base

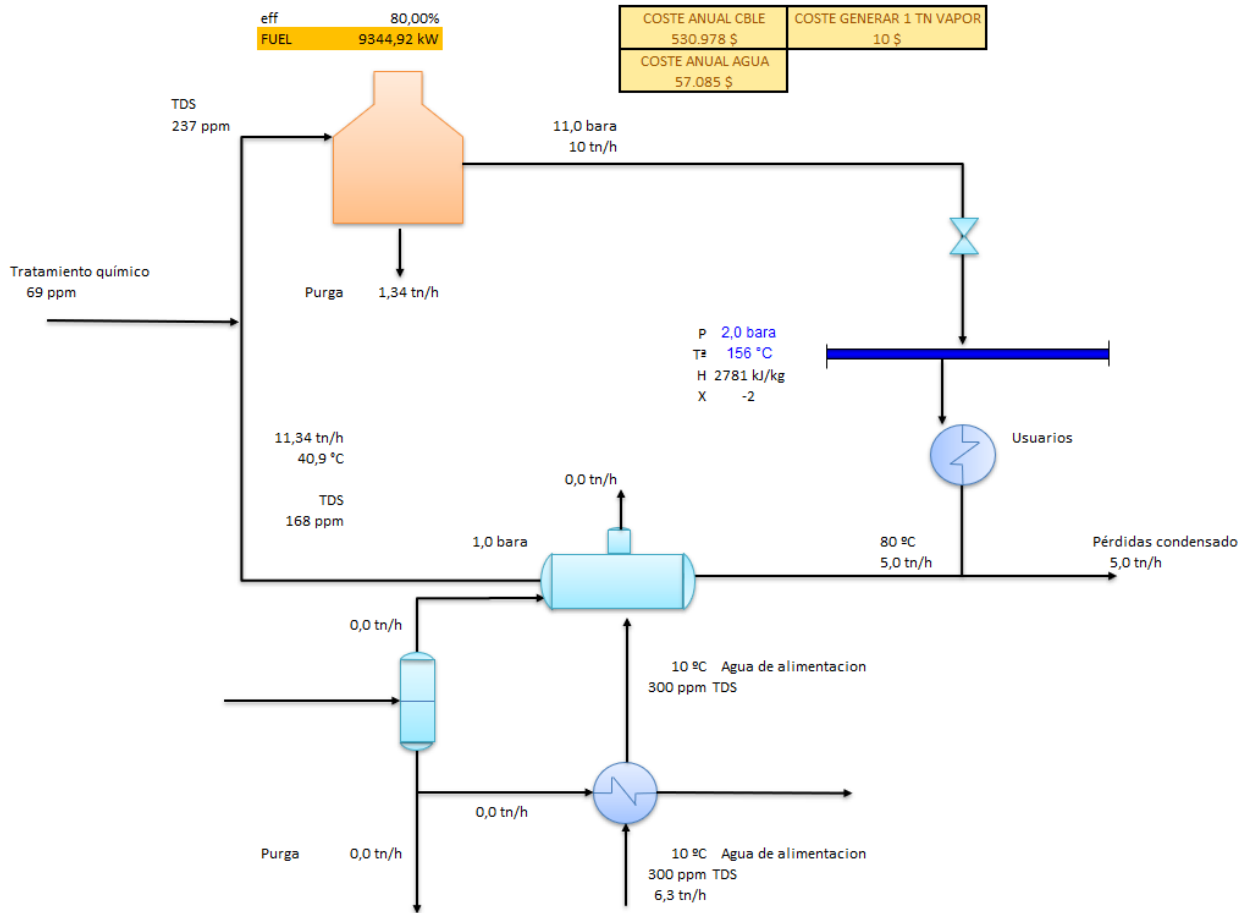


Figura 4-1 Red de vapor 1 (Sin proyectos de ahorro)

Para activar los proyectos de ahorro se ha implementado en la hoja de cálculo una tabla con los proyectos anteriores y una pestaña en la que indicamos ON u OFF dependiendo si el proyecto de ahorro esta activo o no.

### Proyectos potenciales de mejora

|                             |                |    |
|-----------------------------|----------------|----|
| Retorno del condensado      | 80,00%         | ON |
| TDS admisible en la caldera | 3500 ppm       | ON |
| Flash de purga              | 1,0 bara       | ON |
| Intercambiador purga        | 10 °C approach | ON |
| Eficiencia de la caldera    | 85,00%         | ON |

Tabla 4-2. Proyectos de ahorro

La forma de activar estos proyectos es usando un condicional en la tabla Excel para que este recuadro interactúe con la red cada vez que se activa o desactiva un proyecto de ahorro.

Gracias a esto, se pueden evaluar los ahorros que conlleva cada proyecto por separado, combinados y en su conjunto.

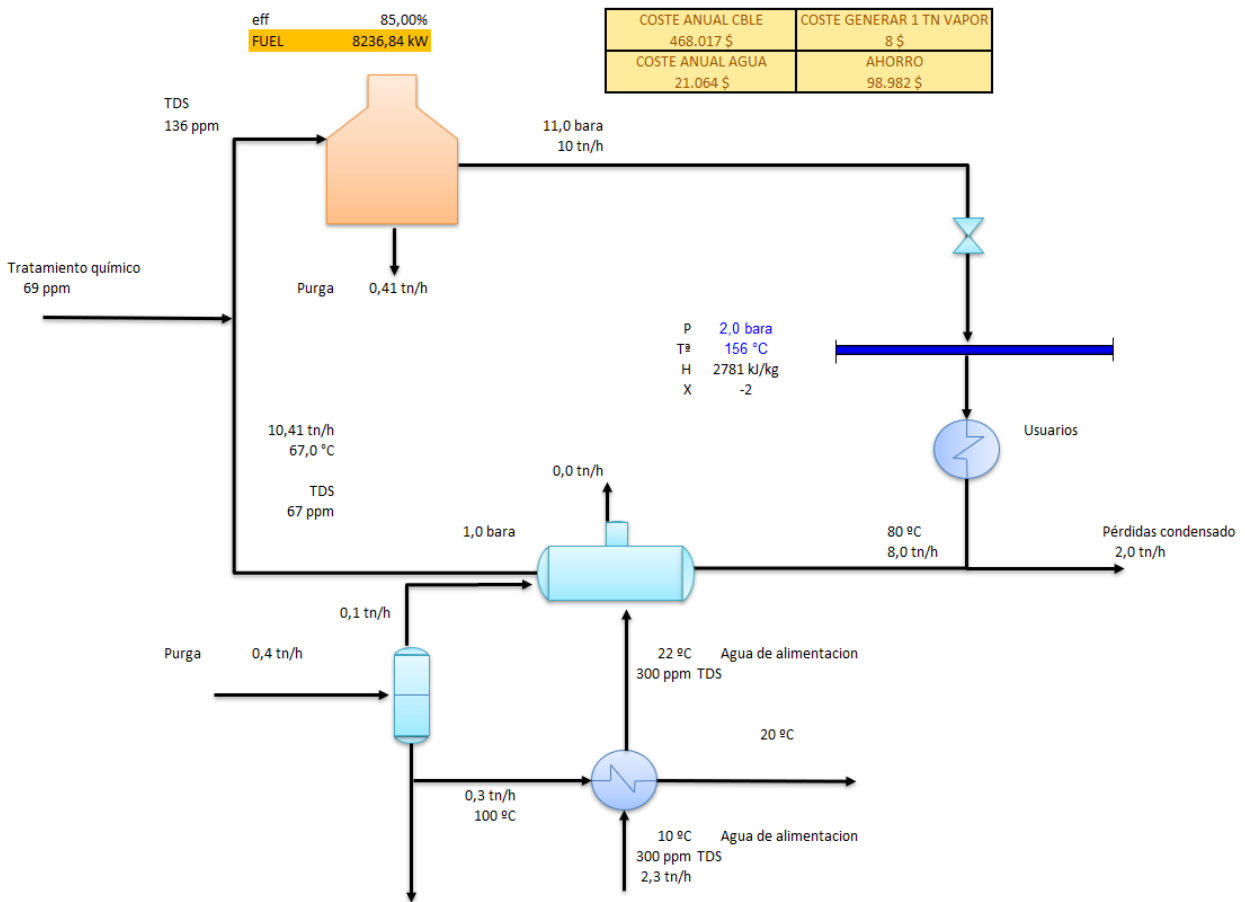


Figura 4-2. Red de vapor 1 (Con proyectos de ahorro)

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se muestra la red de vapor 1 con todos los proyectos de ahorro activados. Si los ahorros del proyecto se calcularan individualmente para cada proyecto, la suma de los ahorros sería mayor que 99k\$/año, porque algunos de estos proyectos compiten por aprovechar energías de las mismas corrientes de energías-

Por lo tanto, el modelo nos permite calcular los ahorros acumulados verdaderos y, lo que es más importante, elaborar un plan de inversión por etapas para que los proyectos se clasifiquen por orden de atractivo y constituyan la base de un plan de inversión coherente.

### 4.2 Red de vapor con grados de libertad.

El modelo de vapor anterior es típico en la planificación fuera de línea de la red de vapor de una industria. Básicamente, dice cómo reaccionará el sistema ante determinados escenarios operativos futuros, ya sean proyectos futuros, nuevas demandas de procesos o nuevos precios de la energía. El modelo esencialmente funciona como un simulador para reflejar el comportamiento del sistema tal como está configurado actualmente.

Si hay un número de grados de libertad disponibles para el operador del sistema (turbina de vapor o accionamiento de motor eléctrico, turbogeneradores de carga variable o incluso ventilación intencional de vapor), entonces se puede construir un modelo de la red de vapor que no solo prediga el comportamiento del sistema existente en una configuración particular, sino que además indique cuál es la configuración óptima del sistema que deberíamos emplear.

En el siguiente modelo se van a analizar dos conceptos claves en una red de vapor:

#### 4.2.1. Coste marginal de la energía.

Las decisiones energéticas en una industria son de carácter económico, no termodinámico, por ello se deberá de tener en cuenta el camino que sigue el vapor en nuestra red, limitaciones de equipo y precio de la energía.

El mecanismo marginal es el procedimiento de respuesta de una red de vapor ante un cambio que afecte al sistema energético, que puede ser una variación en el precio del combustible, la demanda de vapor o precio de la energía eléctrica.

La identificación de este camino se realiza en el momento que varía la producción de vapor en cualquiera de los colectores y debe de ser el camino que afecte más favorablemente a nivel económica a nuestra red de vapor, activando los equipos o caminos que deban abastecer estas variaciones en la red.

El coste marginal es el coste asociado al mecanismo marginal.

En la red siguiente se va a ver un ejemplo de cual debería de ser el mecanismo marginal del vapor dependiendo de las limitaciones y el precio de la energía.

Si hubiese un incremento en la demanda del vapor en los usuarios de baja, se puede hacer llegar de tres maneras diferentes.

1. Turbinando el vapor necesario en el colector de baja.
2. Produciendo el vapor en la caldera que esta conectada al colector de baja.
3. Laminando el vapor del colector de baja al colector de alta.

El caso más favorable siempre sería turbinar el vapor, ya que se obtendría una energía en la turbina que se podrá usar en beneficio de la red o venderla.

En el caso de que la turbina esté funcionando con su caudal máximo, se debe de producir el vapor en la caldera de baja, esto es porque cuesta menos generar una tn de vapor a 6 baras que producirlo a 41 baras.

En el caso de que la turbina este a su máximo caudal y la caldera de baja también, se deberá de laminar el vapor por la válvula, esta es la última opción ya que sería la forma menos eficiente de hacerle llegar el

vapor.

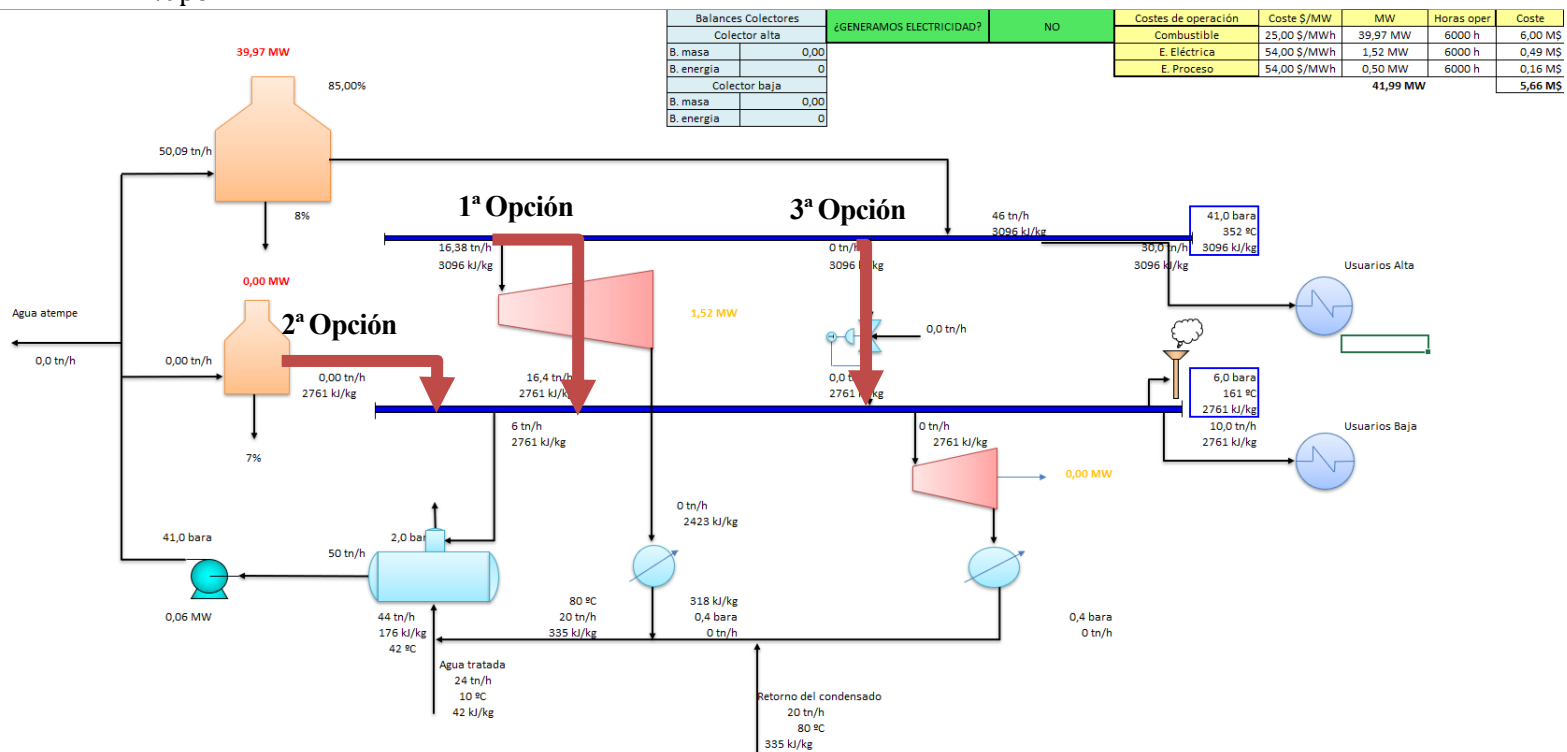


Figura 4-3 Camino marginal del vapor

4.2.2. Grados de libertad.

Hay redes de vapor en las que el operador deberá decidir que equipos activar o desactivar para abastecer las demandas de energía de la industria a la que esté conectada.

La forma en la que se abastece la red puede variar dependiendo de parámetros como el precio de la energía eléctrica, de los combustibles y de las demandas de vapor. En el siguiente caso se verá la misma red anterior. El modelo de vapor creado le ayudará a decidir si generar la energía eléctrica o comprarla dependiendo del precio que tenga ese día en el mercado el MWh.

En la red existen dos turbinas, una turbina a condensación en el colector de baja y una turbina de dos cuerpos, uno a contrapresión descargando al colector de baja y el segundo cuerpo de la turbina a condensación.

En la siguiente tabla se ven los precios que realmente estamos pagando por cada MWh de electricidad que producimos si pagamos el MWh de combustible a 10\$ y a 50\$ el MWh.

|   |              |
|---|--------------|
| Coste MWht cble                         | 10,00 \$/MWh |
| COSTE MWhe comprarlo                    | 50,00 \$/MWh |
| COSTE MWhe generarlo a contrapresión    | 92,76 \$/MWh |
| COSTE MWh generarlo a condensación alta | 46,13 \$/MWh |
| COSTE MWh turbina condensación baja     | 65,21 \$/MWh |

Tabla 4-3 Caso 1.

| Balances Colectores |      | Coste MWht cable                         |  | 10,00 \$/MWh | Costes de operación |  | Coste \$/MW  | MW               | Horas oper | Coste           |
|---------------------|------|--|--|--------------|---------------------|--|--------------|------------------|------------|-----------------|
| Colector alta       |      | COSTE MWhe comprarlo                     |  | 50,00 \$/MWh | Combustible         |  | 10,00 \$/MWh | 98,93 MW         | 6000 h     | 5,94 M\$        |
| B. masa             | 0,00 | COSTE MWhe generarlo a contrapresion     |  | 92,76 \$/MWh | E. Eléctrica        |  | 50,00 \$/MWh | 9,76 MW          | 6000 h     | 2,93 M\$        |
| B. energía          | 0    | COSTE MWhe generarlo a condensacion alta |  | 46,13 \$/MWh | E. Proceso          |  | 50,00 \$/MWh | 0,50 MW          | 6000 h     | 0,15 M\$        |
| Colector baja       |      | COSTE MWhe turbina condensacion baja     |  | 65,21 \$/MWh |                     |  |              |                  |            |                 |
| B. masa             | 0,00 |  |  |              |                     |  |              |                  |            |                 |
| B. energía          | 0    |  |  |              |                     |  |              |                  |            |                 |
|                     |      |  |  |              |                     |  |              | <b>109,18 MW</b> |            | <b>3,16 M\$</b> |

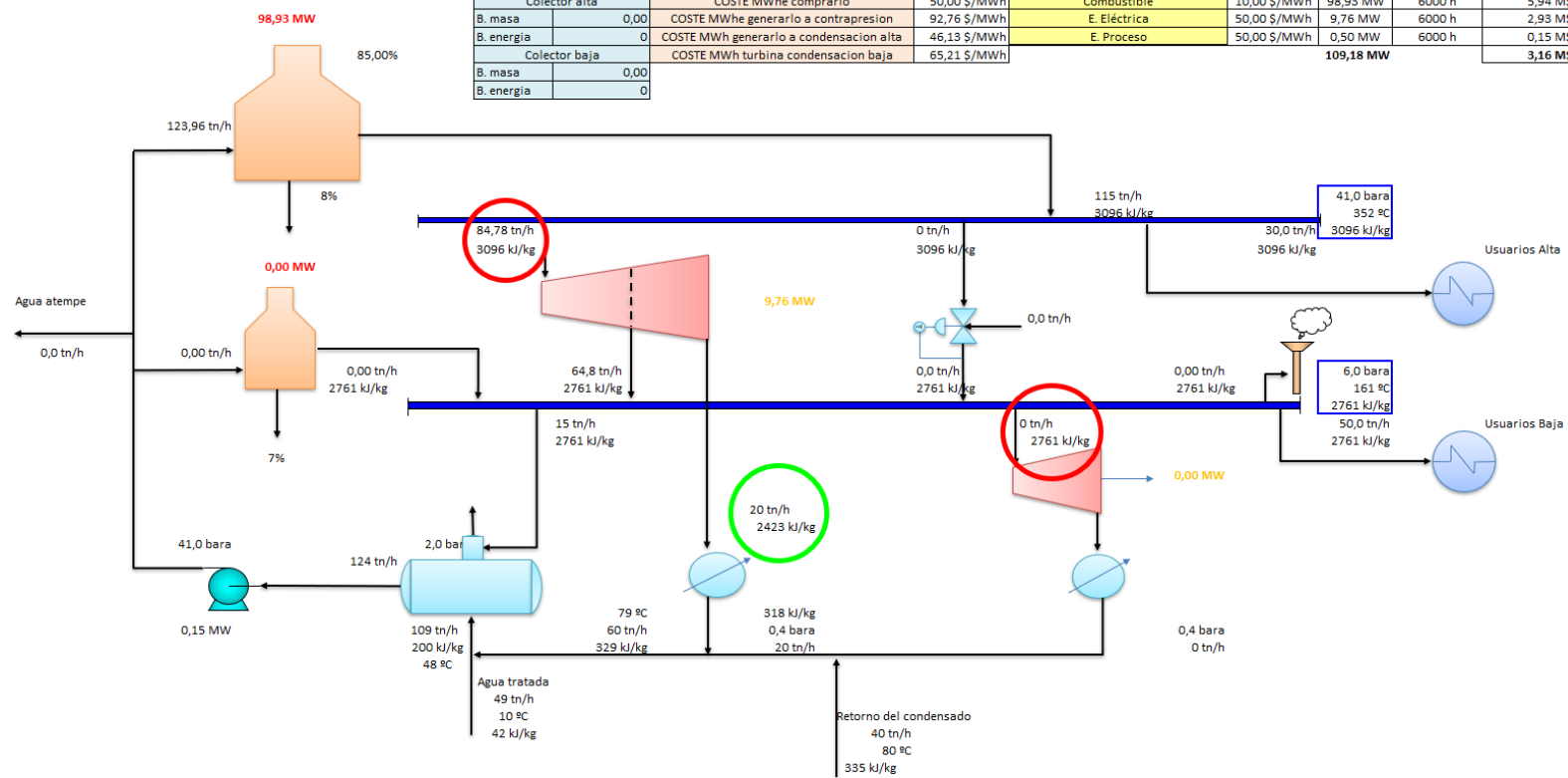


Figura 4-4 Caso 1

Simulando con la función turbina, se puede calcular las tn/h de vapor que cuesta producir 1 MWhe, con la función caldera podemos valorar en dinero cuanto cuesta producir esas tn/h de vapor en combustible y comparar si interesa comprar electricidad o producirla en la red.

El coste de generar 1MWhe en la turbina a contrapresión, para luego ventearlo en el colector de baja es de 92,76\$/MWhe.

El coste de generar 1MWhe en la turbina a condensación que está conectada al colector de alta es de 46,13\$ el MWhe.

El coste de generar 1MWhe en la turbina de condensación conectada al colector de baja sería de 65,21\$/MWhe, siempre y cuando se respetara el camino marginal del vapor y pasara por la opción uno antes señalada, ya que se aprovecharía la energía generada por la laminación del vapor en ésta. Si el vapor se le hiciese llegar por la válvula laminando, el precio del MWhe sería de 141,47\$/MWhe.

En este caso es rentable generar energía eléctrica por la turbina de alta a condensación, pero no es rentable generarla ni a condensación por la turbina conectada al colector de baja ni a contrapresión por la turbina conectada al colector de alta.

Este algoritmo está implementado en la red de forma que se cambien automáticamente los equipos según

este el mercado energético, con funciones IF, que activan o desactivan los equipos dependiendo de éste. A continuación, se muestran dos ejemplos más en los que los equipos activos dependen del precio de la energía.

|   |              |
|---|--------------|
| Coste MWht cable                        | 10,00 \$/MWh |
| COSTE MWhe comprarlo                    | 40,00 \$/MWh |
| COSTE MWhe generarlo a contrapresión    | 92,76 \$/MWh |
| COSTE MWh generarlo a condensación alta | 46,13 \$/MWh |
| COSTE MWh turbina condensación baja     | 80,46 \$/MWh |

Tabla 4-4 Caso 2.

Como vemos en la tabla anterior, el precio de la compra de un MWhe es de 40\$, más barato que lo que costaría producirla en cualquier turbina de nuestra red. Lo más lógico entonces sería no producirla y consumirla de la red.

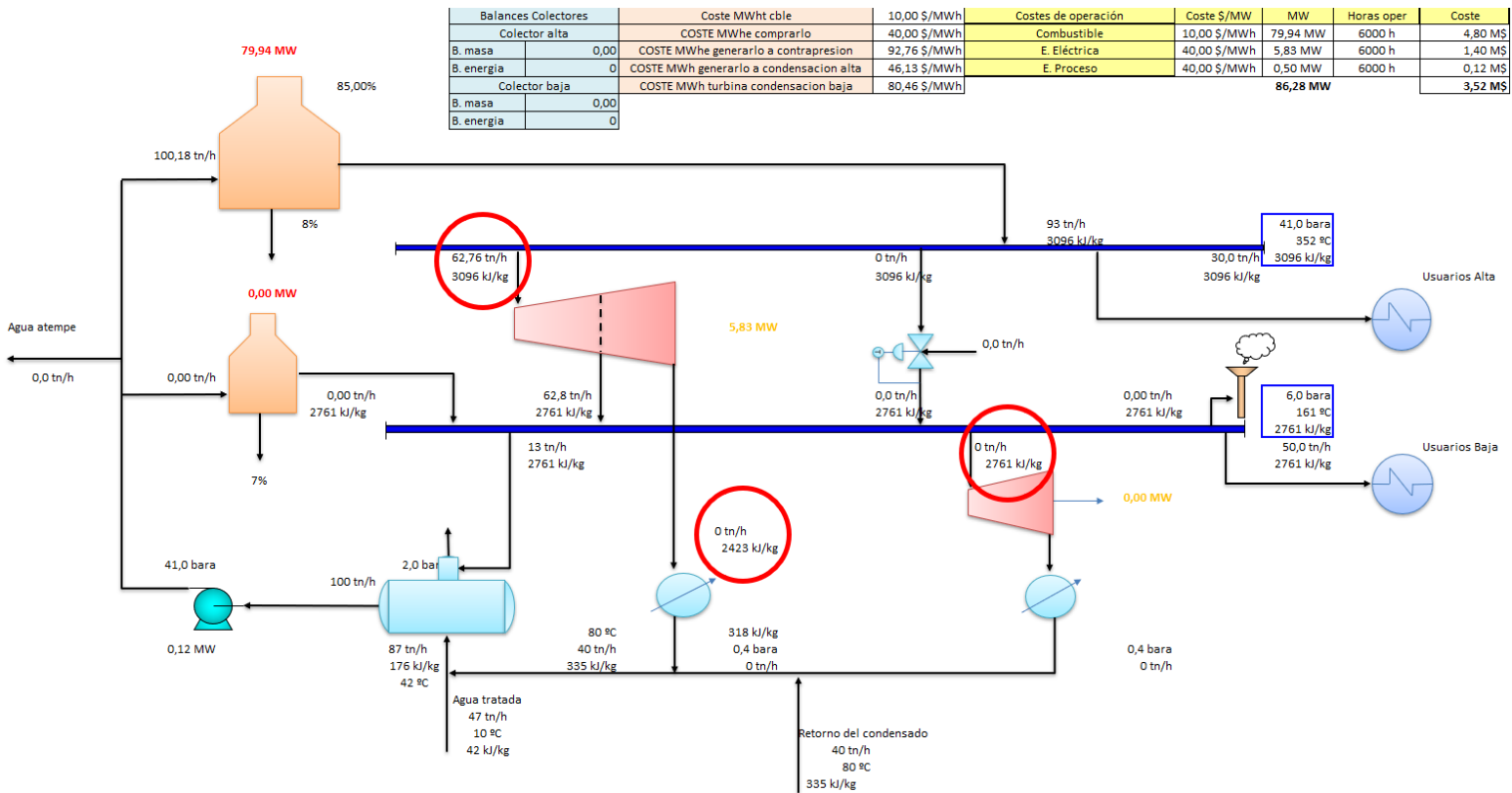


Figura 4-5 Caso 2.

En el siguiente ejemplo, vemos una subida del precio de la luz a 60\$/MWhe, lo que hará que el operario deba de cambiar el modo de operar la red.



|   |              |
|---|--------------|
| Coste MWht cble                         | 10,00 \$/MWh |
| COSTE MWhe comprarlo                    | 60,00 \$/MWh |
| COSTE MWhe generarlo a contrapresión    | 92,76 \$/MWh |
| COSTE MWh generarlo a condensación alta | 46,13 \$/MWh |
| COSTE MWh turbina condensación baja     | 49,96 \$/MWh |

Tabla 4-5 Caso 3.

En este caso es rentable producir energía eléctrica en las turbinas a condensación.

| Balances Colectores | Coste MWht cble                         | 10,00 \$/MWh | Costes de operación | Coste \$/MW  | MW               | Horas oper | Coste           |
|---------------------|---|--------------|---------------------|--------------|------------------|------------|-----------------|
| Colector alta       | COSTE MWhe comprarlo                    | 60,00 \$/MWh | Combustible         | 10,00 \$/MWh | 106,72 MW        | 6000 h     | 6,40 M\$        |
| B. masa             | COSTE MWhe generarlo a contrapresion    | 92,76 \$/MWh | E. Eléctrica        | 60,00 \$/MWh | 10,60 MW         | 6000 h     | 3,81 M\$        |
| B. energia          | COSTE MWh generarlo a condensacion alta | 46,13 \$/MWh | E. Proceso          | 60,00 \$/MWh | 0,00 MW          | 6000 h     | 0,00 M\$        |
| Colector baja       | COSTE MWh turbina condensacion baja     | 49,96 \$/MWh |                     |              | <b>117,31 MW</b> |            | <b>2,59 M\$</b> |
| B. masa             |   |              |                     |              |                  |            |                 |
| B. energia          |   |              |                     |              |                  |            |                 |

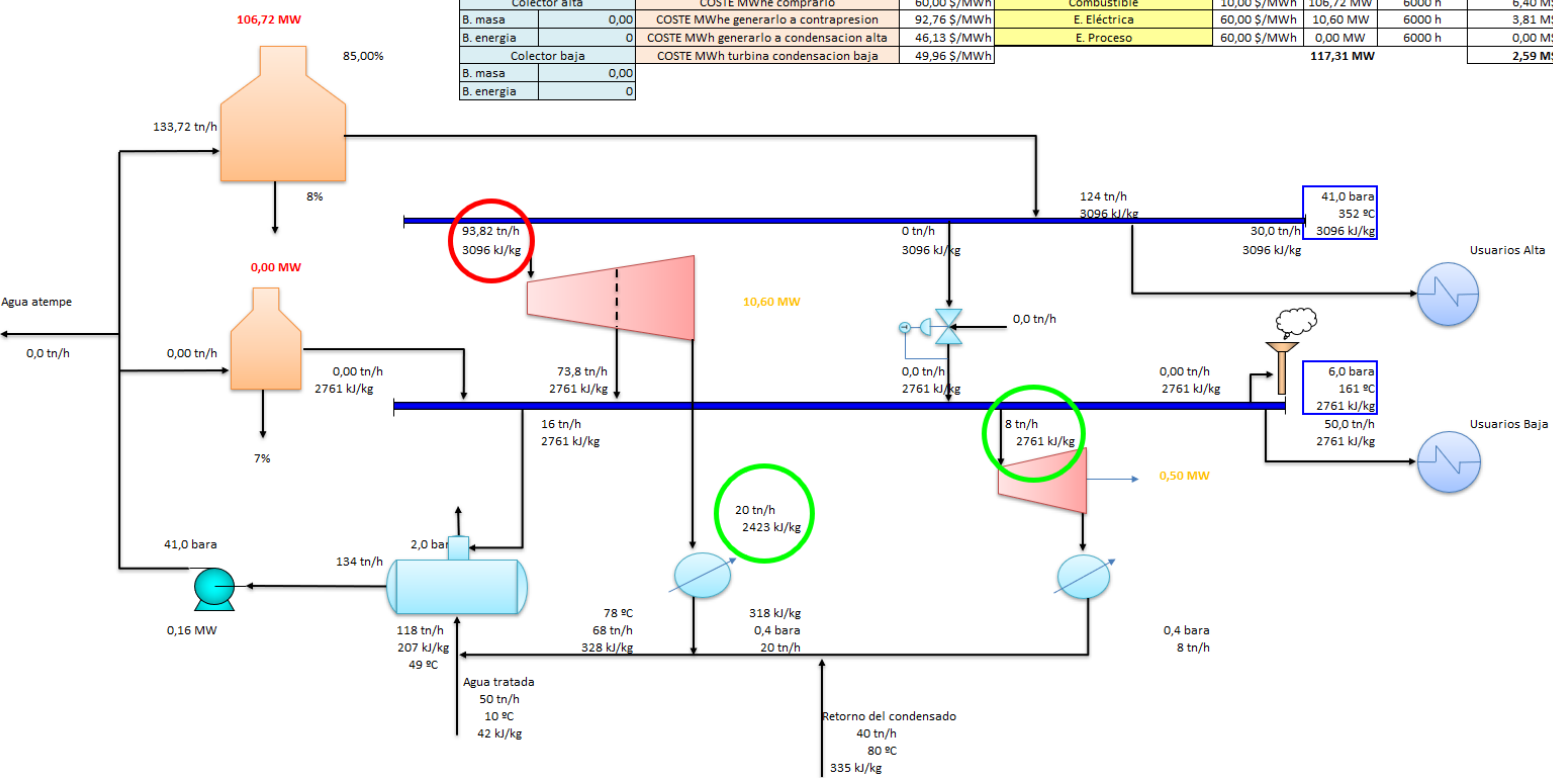


Figura 4-6 Caso 3

En el tercer y último caso el precio del MWh se disparará a 95\$, dándose el caso de que será rentable generar vapor con la turbina a contrapresión para después ventearlo.

|   |              |
|---|--------------|
| Coste MWht cble                         | 10,00 \$/MWh |
| COSTE MWhe comprarlo                    | 95,00 \$/MWh |
| COSTE MWhe generarlo a contrapresión    | 92,76 \$/MWh |
| COSTE MWh generarlo a condensación alta | 46,13 \$/MWh |
| COSTE MWh turbina condensación baja     | -3,42 \$/MWh |

Tabla 4-6 Caso 4.

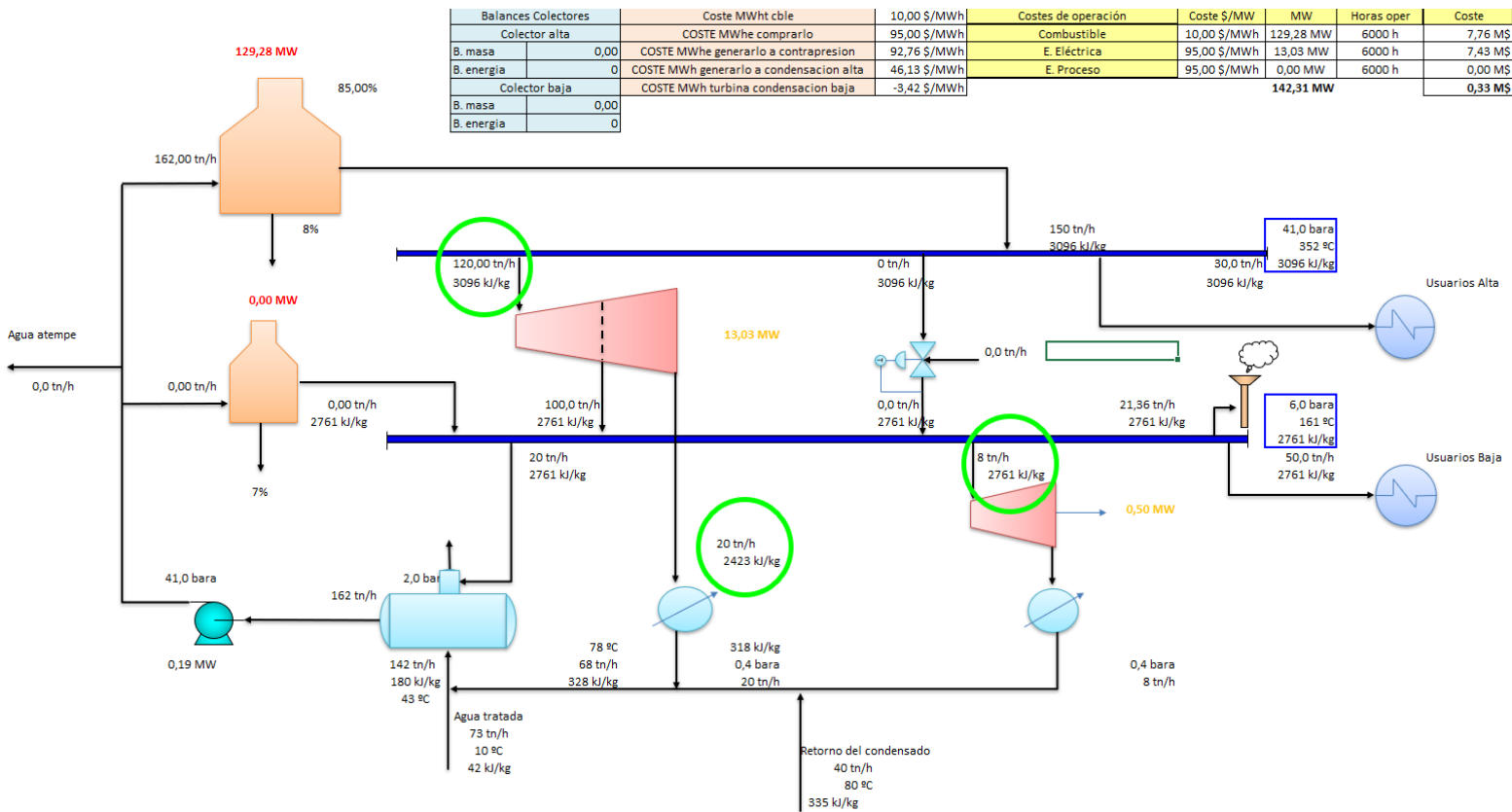


Figura 4-7 Caso 4.

# 5 CONCLUSIONES

---

La mayoría de los beneficios de una red de vapor bien simulada ya han sido descritos en este documento.

En resumen, algunos de estos beneficios serían:

- Identificación más real de los costes de utilities.
- Identificación de proyectos de ahorro.
- Mejor conocimiento de la red de vapor, mediante la identificación de los parámetros claves.
- Identificación de mejoras operacionales sin costo.
- Base para una inversión estratégica "RoadMaps"
- Validación y reconciliación de datos.
- Funcionamiento optimizado de compra/venta de utilities.
- Control de rendimiento de la planta.

Acumulativamente, estos beneficios pueden ahorrar hasta un 15 % en los costes asociados a la utilities actuales. Esta cifra claro está, es dependiente del punto de partida de la red, pero a mayores grados de libertad, mayor es la probabilidad de encontrar un ahorro de hasta un 5% en redes sofisticadas.

Los modelos de sistemas de vapor basados en hojas de cálculo con una base de datos de propiedades físicas incorporada son una forma muy rentable de reducir el coste operativo de la generación y distribución de vapor y formar una base constante para las estrategias de inversión futuras.

Dado que los beneficios potenciales pueden ser varios millones de dólares por año en una industria grande y compleja, estos modelos se amortizarán en cuestión de semanas, si no días. Dichas herramientas deberían ser adoptadas más ampliamente por la industria para mejorar la contabilidad de los costes de energía y reducir los costos de operación con la consiguiente reducción en la emisión de gases de efecto invernadero al medio ambiente.

# REFERENCIAS

---

- [1] L. S. Hurtado, «Orígenes históricos del empleo tecnológico del vapor,» *interempresas*, 2004.
- [2] SpiraxSarco, «<http://www.spiraxsarco.com/>,» [En línea].
- [3] TLV, «<https://www.tlv.com/>,» 2018. [En línea].
- [4] José Eugenio Vázquez Gómez, *Análisis de Equipos de Desgasificación en Instalaciones de Vapor*, Marzo, 2004.
- [5] chemicalogic, *steamtab*.
- [6] S. Walas, *Chemical Process Equipment - Selection and Design*, Butterworth-Heinemann, 1990.
- [7] E. Ludwig, *Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants*, Gulf Publishing Co., 1999.
- [8] D. V. Alonso, *Apuntes de la Asignatura Eficiencia Energética en la Industria*.
- [9] D. Velazquez, L.P.- Lombard y R. Gonzalez, *Eficiencia energética en instalaciones de vapor*, Sevimex, 2005.
- [10] L. March, *ProSteam*.

