

# Estudio de Transitorios de Vapor de Exportación en una Central Térmica de Ciclo Combinado

Alfonso Junquera Delgado  
Departamento Mecánico, Empresarios Agrupados  
c\ Magallanes 3 Madrid 28003  
ajd@empre.es

Almudena Travesí de los Santos  
Departamento Mecánico, Empresarios Agrupados  
c\ Magallanes 3 Madrid 28003  
atd@empre.es

## Resumen

*Una Central Térmica de Ciclo Combinado dispone de un sistema de cogeneración que proporciona vapor a una industria cercana. Debido a la necesidad contractual de asegurar el suministro de vapor a dicha industria, el Sistema de Vapor de Exportación del Ciclo Combinado se conecta con dos calderas auxiliares de respaldo que funcionarán cuando el ciclo no se encuentre disponible.*

*Mediante EcosimPro se han estudiado los transitorios que se producen ante sucesos no controlados que podrían originar una interrupción del suministro. El objeto del estudio es comprobar la idoneidad del sistema de control y determinar la carga inicial de las calderas auxiliares que garantice la continuidad del suministro de vapor.*

**Palabras Clave:** Transitorios vapor, cogeneración, EcosimPro, ciclos combinados, sistemas de control.

## 1 INTRODUCCION

Un Ciclo Combinado está constituido básicamente por tres elementos: una turbina de gas, una caldera de recuperación de calor y una turbina de vapor. La turbina de gas genera energía eléctrica mediante la combustión de gas natural. Los gases de escape procedentes de la combustión, se introducen en un intercambiador de calor que se conoce como caldera de recuperación. En ella el agua aprovecha el calor residual de los gases de escape de la turbina de gas para generar vapor que se expansiona en la turbina de vapor, incrementando la producción total de energía eléctrica.

El Ciclo Combinado estudiado, consta de una caldera de recuperación de calor con tres niveles de presión, cada uno de ellos constituido por un evaporador, un calderín y un sobrecalentador. El vapor principal procedente del sobrecalentador de alta presión, se expansiona en la sección de alta presión de la turbina de vapor. A su salida, el vapor recalentado frío, se

une con el vapor procedente del sobrecalentador de media presión y entran juntos en la zona de recalentamiento de la caldera. A la salida de la caldera, el vapor recalentado caliente alimenta la turbina de media presión. El vapor resultante de esta segunda expansión se une con el vapor procedente del sobrecalentador de baja y se introducen en la sección de baja presión de la turbina que lo descarga al condensador.

El Ciclo Combinado puede producir 390 MW de energía eléctrica cuando se turbinan todo el vapor producido en la caldera de recuperación. Si se exporta una parte del vapor generado, disminuye la potencia eléctrica hasta 350 MW para un máximo de 150 t/h de vapor de exportación. La mayor parte de esta cantidad (66 t/h) son consumidas por una única industria, situada en sus proximidades. El vapor de exportación debe cumplir una serie de requisitos de presión y temperatura en el punto de entrega que se recogen en la tabla 1:

Tabla 1: Condiciones del vapor de exportación

Parámetro	Mínimo	Medio	Máximo
Presión (barg)	23	25	30
Temperatura (°C)	230	234	243
Caudal actual	-	20	45
Caudal futuro	-	41	66

El vapor de exportación puede proceder de tres posibles fuentes: vapor principal, vapor recalentado frío y vapor de media presión. Según el caudal de vapor que se exporte y la carga del ciclo se utiliza una fuente u otra de vapor. La elección de la distinta fuente que alimenta el suministro se realiza según un criterio de presión.

Los estados transitorios que se producen en el sistema pueden deberse a dos causas diferentes: cambios en las condiciones del ciclo, como un disparo del grupo, rechazo de carga, transferencia a las calderas auxiliares, variaciones de carga del ciclo, etc.; o pueden estar causadas por variaciones en la demanda

de vapor de exportación. De todos los casos posibles aquellos más significativos por su implicación en las condiciones de operación del ciclo, son los elegidos para el estudio.

El principal objetivo del estudio consiste en establecer los niveles de carga de las calderas auxiliares y los parámetros del sistema de control para cada situación de operación de la central que garanticen un suministro continuo de vapor de exportación en las condiciones especificadas de presión y temperatura.

## 2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

### 2.1 EXTRACCIONES

Como se ha indicado anteriormente, el vapor de exportación del ciclo combinado puede proceder de tres fuentes diferentes:

- Vapor principal
- Vapor recalentado frío
- Vapor de media presión

Las tres extracciones tienen algunos elementos en común, como son las válvulas de aislamiento a la entrada de cada una de las líneas y las válvulas antiretorno a la llegada de cada línea al colector de vapor de exportación, y que evitan el reflujo de vapor a las extracciones.

La extracción de vapor principal está situada a la salida del sobrecalentador de alta presión. Durante la operación normal del ciclo, el vapor procedente del sobrecalentador de alta presión se divide entre la turbina de alta presión y la extracción de vapor de proceso.

El vapor principal se somete a una regulación de presión y de temperatura, mediante una laminación y una atemperación con agua de alimentación, que iguala sus condiciones a las del vapor recalentado frío.

El vapor recalentado frío se extrae a la salida de la turbina de alta presión, antes de la entrada al recalentador y no se somete a ningún proceso de adecuación de sus características térmicas. Por último la extracción de vapor de media presión se obtiene a la salida del sobrecalentador de media, después de la conexión del bypass y sufre únicamente una regulación de presión.

El vapor procedente de las tres extracciones se recoge en el colector de vapor de exportación. En esta línea

tiene lugar el ajuste final de las condiciones del vapor a las requeridas por el proceso. Este ajuste se realiza en dos etapas: una regulación de presión y una atemperación mediante agua de alimentación.

Por último en el colector se conecta la tubería que dirige el vapor hasta su destino final. En esta línea existe una conexión con las calderas auxiliares.

### 2.2 CALDERAS AUXILIARES

Existen dos calderas auxiliares en la instalación, cada una con capacidad de producir un máximo de 75 t/h. Su misión es garantizar el suministro del vapor de proceso sin transitorios que ocasionen la pérdida de suministro en caso de disparo u otra indisponibilidad de ciclo combinado.

Las calderas auxiliares disponen de un doble sistema de control dependiendo de que el ciclo se encuentre o no exportando vapor.

La curva de arranque de las calderas auxiliares es un dato proporcionado por el fabricante.

Debe tenerse en cuenta que las calderas auxiliares no pueden funcionar de forma garantizada por debajo de su mínimo técnico (aproximadamente 20 t/h).

### 2.3 SISTEMA DE CONTROL DE LAS EXTRACCIONES

Durante la operación normal, el sistema de control del ciclo combinado intercambia las distintas fuentes de vapor dependiendo del nivel de carga del ciclo y el caudal de vapor de exportación. Cuando aumenta la demanda se introduce el vapor procedente de una fuente de mayor presión hasta reemplazar a la fuente de menor presión. Este reemplazo se produce de forma automática manteniendo la presión aguas arriba de la válvula de control de exportación

Los posibles modos de extracción de las distintas fuentes son:

- Vapor recalentado frío (CRH)
- Vapor principal y vapor de media presión (HP+IP)
- Vapor principal (HP)

En el Mapa de Operación de las Extracciones (Figura 1), se muestran los distintos modos de funcionamiento esperados dependiendo del grado de carga del ciclo y la demanda de vapor de proceso.

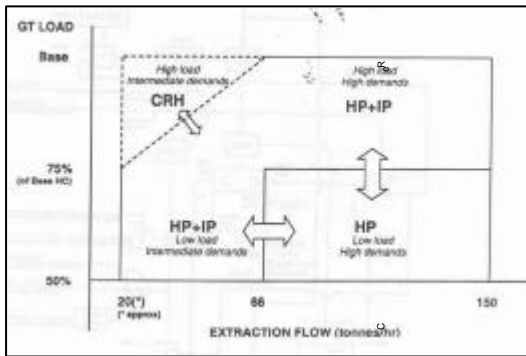


Figura 1

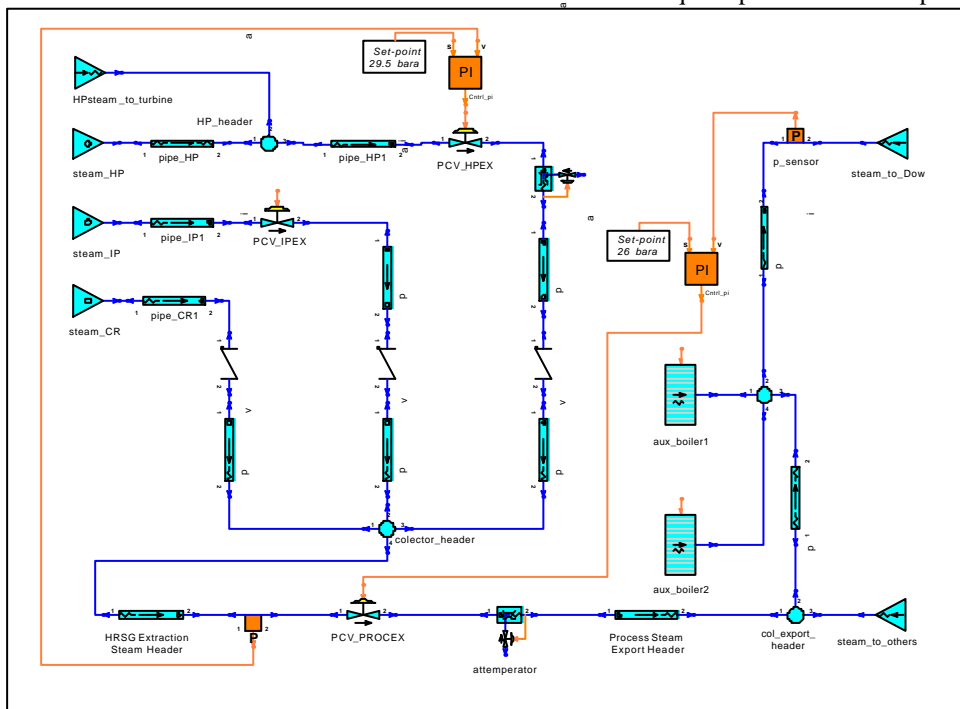
### 3 DESCRIPCIÓN DEL MODELO

Los transitorios del vapor de exportación han sido simulados con un modelo desarrollado en EcosimPro. El modelo incluye los siguientes componentes:

- Condiciones de contorno
- Tuberías
- Válvulas de control
- Válvulas antiretorno
- Atermpedores
- Controladores tipo PI
- Sensores de presión
- Calderas auxiliares

Existen dos tipos de puertos que conectan los distintos elementos: puertos fluidos, cuyas variables son presión, temperatura y caudal; y puertos de control, cuyas variables son señales analógicas.

El modelo desarrollado con EcosimPro se muestra en la figura 2.



Los límites del modelo son los siguientes:

- De entrada:
  - Salida del sobrecalentador de alta presión
  - Salida del sobrecalentador de media presión
  - Salida de vapor recalentado frío
- De salida:
  - Suministro de vapor de exportación
  - Conexión a otros consumidores
  - Vapor principal que entra a la turbina

#### 3.1 CONDICIONES DE CONTORNO

Existen dos tipos de condiciones de contorno:

- Capacitivas: donde el caudal, la presión y la temperatura son especificadas
- Resistivas: en este caso se especifican la presión y la entalpía

Las condiciones de contorno se deben definir para cada uno de los límites del modelo. En el caso de las extracciones de alta, media y recalentado frío estas condiciones son la presión y la entalpía; para el resto de los límites (suministro de vapor de exportación, suministro a otros consumidores, vapor principal a la turbina) se deben especificar la presión, la temperatura y el caudal de cada punto.

#### 3.2 TUBERIAS

Las ecuaciones que representan el comportamiento de

las tuberías incluyen los efectos de la pérdida de carga debido a la fricción y el almacenamiento del vapor en su interior. Por otro lado, también se tiene en cuenta la capacidad calorífica del metal, sin embargo, el intercambio de calor entre el metal y el exterior no se considera, ya que todas las tuberías están aisladas.

Cada tubería se considera dividida en un número de elementos iguales, alternando elementos resistivos (acumuladores de presión, tipo R) y capacitivos (acumuladores de masa, tipo S). El número de elementos depende del volumen de tubería y de la precisión que se requiera. Por regla general se dispone únicamente de un elemento resistivo y uno capacitivo por cada tubería, excepto en la línea de conexión con la industria consumidora (de unos 200 m de longitud) donde se divide en diez elementos. Además se evita la unión de dos elementos del mismo tipo para evitar que se generen lazos algebraicos en la resolución del sistema de ecuaciones.

Cada elemento de tubería debe cumplir los principios de conservación de la masa y la energía:

$$V \frac{d\rho}{dt} = \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} \quad (1)$$

$$\frac{dU}{dt} = q_{in} - q_{out} - q_{pared} \quad (2)$$

donde:

- $V$  es el volumen del elemento de tubería.
- $\rho$  es la densidad
- $\dot{m}$  es el caudal de entrada o de salida del elemento considerado
- $q$  es la energía que entra o sale del elemento, y se calcula como el producto del caudal de entrada o salida por la media de la entalpía en ese elemento
- $U$  es la energía interna del elemento de tubería.

La transferencia de calor entre la tubería y el vapor se calcula según la fórmula 3:

$$q_{pared} = h_c \cdot (T_v - T_{pared}) \cdot A_{pared} \quad (3)$$

donde:

- $h_c$  es el coeficiente de intercambio de calor por convección, calculado según la fórmula de Petukhov [Referencia 1]
- $T_v$  es la temperatura del vapor

$T_{pared}$  es la temperatura de la superficie interior de la tubería

$A_{pared}$  es área de la superficie interior del elemento de tubería

La evolución de la temperatura interna del metal con el tiempo se determina por la ecuación 4:

$$\frac{dT_{pared}}{dt} = \frac{q_{pared}}{M_{pared} \cdot c_{P\ pared}} \quad (4)$$

donde:

$M_{pared}$  es la masa del elemento de tubería

$c_{P\ pared}$  es el calor específico del metal

Expresando las ecuaciones de conservación de la masa y la energía en cada elemento de tubería (ecuaciones 1 y 2) en función de la presión y la entalpía y operando, se obtiene:

$$P' = \frac{\left( \rho + \frac{d\rho}{dh} h \right) (\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out}) - \frac{d\rho}{dh} (q_{in} - q_{out} - q_{pared})}{v \left( \rho \frac{d\rho}{dP} + \frac{d\rho}{dh} \right)} \quad (6)$$

$$h' = \frac{\left( \frac{\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out}}{v} \right) \frac{d\rho}{dP} P'}{\frac{d\rho}{dh}} \quad (7)$$

donde:

- $P$  es la presión del vapor
- $h$  es la entalpía
- $P'$  es la derivada de la presión con respecto al tiempo
- $h'$  es la derivada de la entalpía con respecto al tiempo
- $\frac{d\rho}{dh}$  es la derivada de la densidad con respecto a la entalpía a presión constante
- $\frac{d\rho}{dP}$  es la derivada de la densidad con respecto a la presión a entalpía constante

La caída de presión en cada elemento de tubería es función de la geometría y del coeficiente de fricción  $K$  y se calcula según la siguiente fórmula:

$$\frac{l}{A} \cdot \dot{m}^2 = (P_{in} + av_{in}) - (P_{out} + av_{out}) - K \frac{\dot{m}^2}{2\rho A^2} \quad (8)$$

donde:

- $l$  es la longitud del elemento de tubería
- 
- $m$  es el caudal de vapor
- $P$  es la presión de entrada o de salida
- $\nu$  es la viscosidad artificial
- $A$  es la sección de la tubería
- $\rho$  es la densidad

### 3.3 VALVULAS DE CONTROL

Existen tres válvulas de control de presión, dos situadas en las extracciones de alta y de media presión (PCV\_HPEX y PCV\_IPEX) y otra situada en el colector de vapor de exportación (PCV\_PROCEX). Utilizando el modelo en EcosimPro y partiendo de las condiciones estacionarias más desfavorables se han calculado la capacidad y la característica de las válvulas (Ver tabla 2). De esta manera las válvulas PCV\_PROCEX y PCV\_HPEX son de tipo isoporcentual, mientras que la válvula PCV\_IPEX es de característica lineal.

Por otro lado, se ha incorporado a cada válvula un actuador que proporciona los tiempos de apertura que se resumen en la tabla 2:

Tabla 2: Características de las válvulas de control.

Válvula	Tamaño	Cv	Apertura
PCV_PROCEX	10"	1260	5 s
PCV_IPEX	6"	400	2.5 s
PCV_HEX	8"	875	7 s

Las válvulas PCV\_PROCEX y PCV\_HPEX se posicionan de acuerdo con las señales que reciben de sus controladores PI, para mantener la presión en el punto de suministro de la industria y en la cabecera del colector de vapor de exportación respectivamente. La posición de la válvula PCV\_IPEX es una condición de contorno ya que su apertura se regula para mantener la presión en el calderín de media presión no incluido en el modelo.

La modelización del funcionamiento de las válvulas de control se hace siguiendo la referencia 2.

### 3.4 COLECTOR

El componente denominado colector, se utiliza para conectar distintos elementos. Es equivalente a un elemento de tipo S con la peculiaridad de que puede tener varias entradas y salidas y no incorpora pérdida de carga.

En el modelo existen cuatro colectores:

- Componente HP\_header: está situado a la entrada de la extracción de alta, y divide

el caudal en dos partes, una parte se dirige a la turbina y otra parte al colector de vapor de exportación.

- Componente Colector\_header: representa la unión de las tres extracciones de vapor en la cabecera del colector.
- Componente col\_export\_header. Está localizada al final del colector y consta de una entrada, procedente del colector y dos salidas, una hacia la tubería de exportación y otra hacia futuros consumidores.
- Componente col\_aux\_boiler: se encuentra en la tubería de exportación y representa la unión de esta línea con la procedente de las calderas auxiliares.

### 3.5 ATEMPERADORES

El sistema está equipado con dos atemperadores, uno situado en la extracción de alta presión y otro en el colector de vapor de exportación. Ambos se localizan aguas abajo de la correspondiente válvula de control de presión.

Cada atemperador está formado por los siguientes componentes:

- Válvula de control del caudal de agua
- Sensor de temperatura aguas abajo del atemperador
- Controlador tipo PI
- Colector

Los puntos de tarado de los atemperadores de alta presión y del colector de vapor de exportación son 420°C y 240°C respectivamente.

### 3.6 CALDERAS AUXILIARES

El control de las calderas auxiliares se realiza de dos formas distintas: un control del caudal a la descarga de las calderas y un control de presión en el punto de suministro del vapor de exportación.

Cuando el ciclo combinado está exportando vapor, las calderas auxiliares están produciendo un caudal constante de vapor de acuerdo con el grado de carga y el nivel de exportación. Sin embargo, cuando las calderas auxiliares se encargan del suministro de todo el vapor de exportación, son ellas las responsables de la presión de suministro.

Al producirse un disparo del ciclo combinado, las calderas auxiliares comienzan automáticamente a incrementar su grado de carga hasta alcanzar el nivel de vapor anterior al disparo. Durante este proceso, el

ciclo combinado es el encargado de mantener la presión del suministro hasta que la válvula PCV\_PROCEX ha cerrado completamente o las calderas auxiliares han alcanzado el nivel de vapor.

El modelo en Ecosim de las calderas auxiliares incluye los siguientes componentes:

- Condición de contorno de tipo capacitiva, donde se establecen la presión y la entalpía
- Válvula de control
- Actuador de la válvula
- Sensor de caudal
- Controlador de caudal de tipo PI
- Selector de señal de control del actuador de la válvula
- Retraso de la señal de entrada al colector

La señal de retraso simula el retardo que existe entre la señal de combustión y la producción de vapor en la caldera.

### 3.7 VALVULAS ANTIRETORNO

Las componentes que representan las válvulas antiretorno evitan el reflujos de vapor durante transitorios y cambios en todos los modos de operación. Su formulación incluye la correspondiente pérdida de carga.

## 4 CASOS DE ANALISIS DE TRANSITORIOS

Entre los transitorios que pueden producir variaciones en el funcionamiento de la exportación de vapor se incluyen los ocasionados por la transferencia del suministro entre las calderas auxiliares y el ciclo combinado, el rechazo de carga, el aumento o reducción de la carga del ciclo, etc.

Desde un punto de garantía del suministro de vapor de exportación, sólo son de interés aquellos transitorios desencadenados por sucesos no controlados. Fundamentalmente disparo del ciclo combinado y variaciones súbitas de la demanda de vapor de exportación.

### 4.1 DISPARO DEL CICLO COMBINADO

Todos los casos estudiados parten de un estado estacionario inicial del ciclo combinado correspondiente a los valores establecidos en los balances térmicos. A los 300 segundos ocurre el disparo del grupo y el vapor acumulado en las tuberías, sobrecalentadores y calderín de alta presión se envía al colector de vapor de exportación.

En el momento de producirse el disparo se da orden de arranque a una o ambas calderas auxiliares para cubrir la demanda de vapor. Durante el tiempo que dura este arranque se aprovecha el calor remanente de

la caldera de recuperación que permite continuar generando vapor a una presión y temperatura progresivamente menores. La evolución de esta presión y temperatura es un dato suministrado por el fabricante de la caldera.

Cuando no es posible mantener la presión de suministro dentro de los límites especificados en el apartado 1, se calculan transitorios adicionales con estados iniciales diferentes de las calderas auxiliares para determinar la mínima carga inicial de la caldera que permite mantener la presión de suministro.

### 4.2 VARIACION DE LA DEMANDA DE VAPOR DE EXPORTACION

Al igual que en los casos anteriores se parte de un estado estacionario con el ciclo funcionando con un nivel de carga y una exportación preestablecida. Al cabo de 300 segundos se produce una variación súbita del vapor demandado ocasionada por la pérdida o puesta en marcha de alguno de los consumidores de la industria receptora. Ya que el incremento de demanda es un proceso controlado se trata de determinar la máxima tasa de incremento admisible que no produzca una variación de presión fuera de los límites especificados. Como la reducción de demanda por el contrario no es un proceso controlado, se asume una disminución brusca en escalón.

## 5 RESULTADOS Y CONCLUSIONES

A continuación se muestran a modo de ejemplo los resultados obtenidos en un disparo del ciclo combinado. En este caso se parte de una situación inicial de 66 t/h de exportación al 100% de carga y con una de las calderas auxiliares al mínimo técnico. Cuando se produce el disparo se da la orden de subida de carga a la caldera auxiliar. Mientras la caldera alcanza el caudal de exportación previo al disparo, el defecto de vapor se compensa con el existente en la zona de alta presión de la caldera de recuperación del ciclo. Para ello se abre la válvula de control de alta presión (PCV\_HPEX) tras producirse el disparo, desviando el vapor que en condiciones normales iría al condensador a través del by-pass de turbina, hacia el colector de vapor de exportación.

En las figuras 3 y 4 se muestra la evolución de los caudales y presiones del sistema. Se observa un doble transitorio, el primero corresponde al disparo a los 300 segundos y el segundo al cambio del modo de control de la caldera auxiliar a los 700 segundos cuando se cierra la aportación de vapor del ciclo.

Para el ciclo combinado en estudio se concluye que para niveles de exportación por debajo de 66 t/h no es necesario mantener ninguna caldera auxiliar en funcionamiento. Para mayores exportaciones debe mantenerse una o las dos al mínimo técnico.

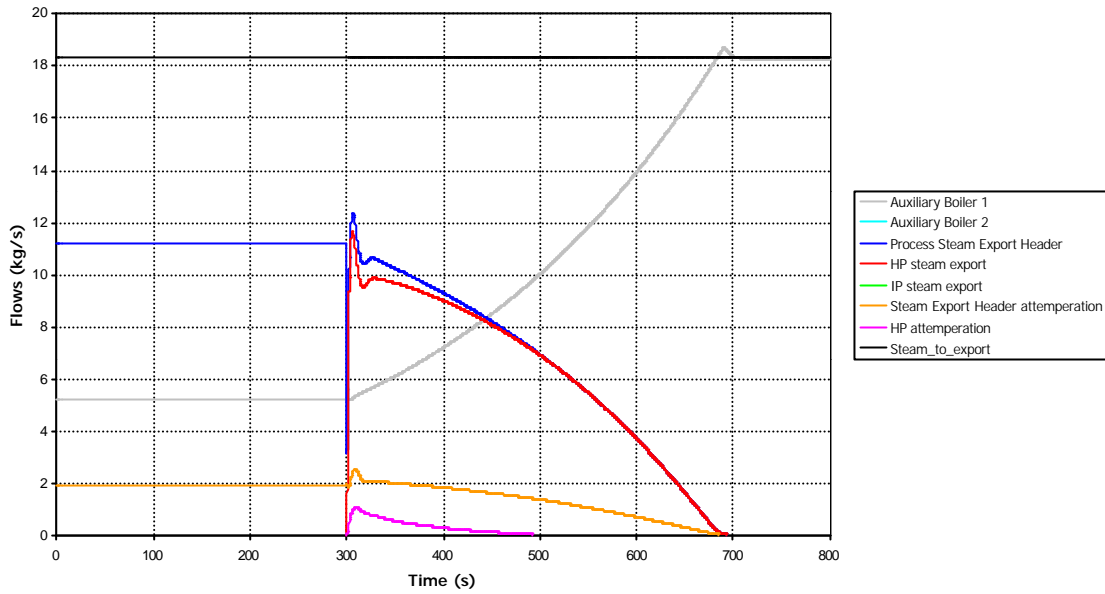


Figura 3

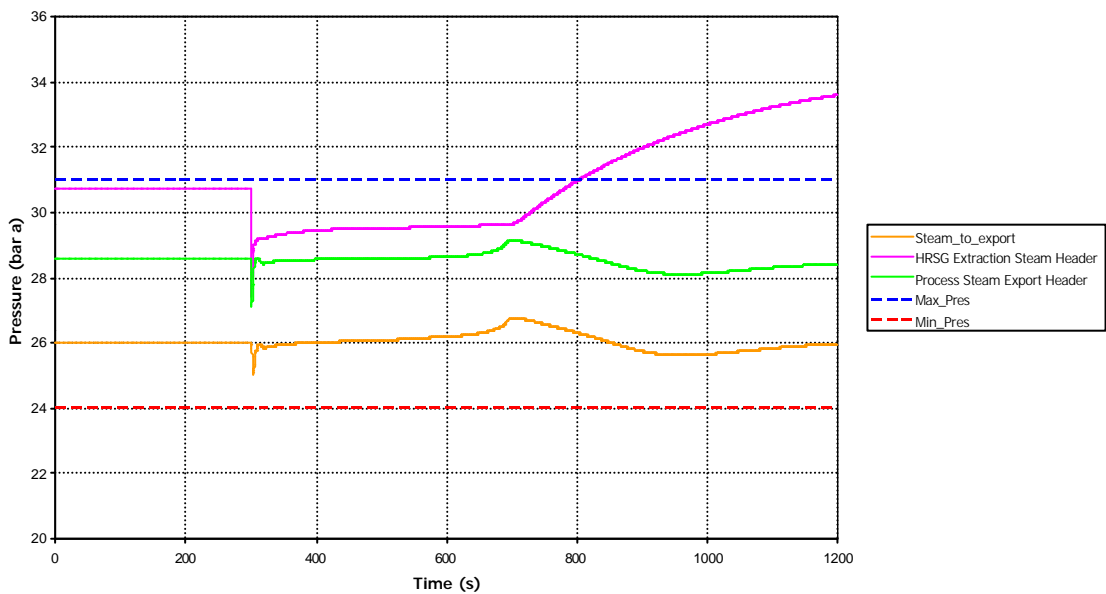


Figura 4

### Referencias

- [1] Chapman, A., (1984) "Heat Transfer" 4<sup>th</sup> Edition.
- [2] Instruments Society of America., (ANSI/ISA-S75-01-1985) "Flow Equations for Sizing Control Valves"