

**Núcleo de Excelência em
Geração Termelétrica e Distribuída**

Steam Boiler Calculations SBC

Prof. Electro Eduardo Silva Lora

electo@unifei.edu.br

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

Steam Boiler Calculations SBC

- Elaborado conjuntamente con el Prof. Dr. Alexander Pavlovich Paramonov de la Universidad Politécnica de San Petersburgo (Russia) durante dos visitas de intercambio académico por periodos de 4 meses a la Universidad Federal de Itajubá en 2003 y 2005.

TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN DEL NEST EN EL SECTOR AZUCARERO



- **Análisis termodinámico y exergo-económico de sistemas de cogeneración.**
- **Optimización de programas de diversificación.**
- **Elaboración de programas para cálculos de proyecto en calderas.**
- **Elaboración de programas para la selección de tecnologías de control de la contaminación atmosférica.**
- **Modelación de la producción de biogas por biodigestión anaeróbica de las vinazas y uso energético de este combustible.**
- **Análisis del ciclo de vida de diferentes productos (electricidad excedente, vinazas).**
- **Oportunidades de las nuevas tecnologías (obtención de etanol por hidrólisis del bagazo, BIG/GT, células a combustible).**

DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA STEAM BOILER CALCULATIONS SBC.

El programa Steam Boiler Calculations (SBC) permite la realización de los cálculos térmico y aerodinámico de calderas de circulación natural com capacidad entre 20 y 900 ton/h que utilizan cualquier tipo de combustible.

APLICACIONES DEL SBC.

- Diseño de nuevas calderas
- Definición de la eficiencia necesaria de la caldera para diferentes aplicaciones.
- Optimización del esquema térmico y aerodinámico de la caldera
- Investigación de los regimenes de operación de la caldera a cargas parciales
- Seleccionar los ventiladores de tiro forzado y de tiro inducido.
- Elaboración de datos de pruebas de balance térmico.

Ventajas del SBC

- Interface amigable que permite aprender rapidamente a utilizar este programa.
- Permite el montaje, a partir de elementos separados, de cualquier esquema térmico y aerodinámico de calderas industriales y energéticas.
- Evaluación de errores en el flujo de datos de entrada y en los resultados. Posee mas de 50 comunicaciones sobre posibles errores.

Vantagens do SBC

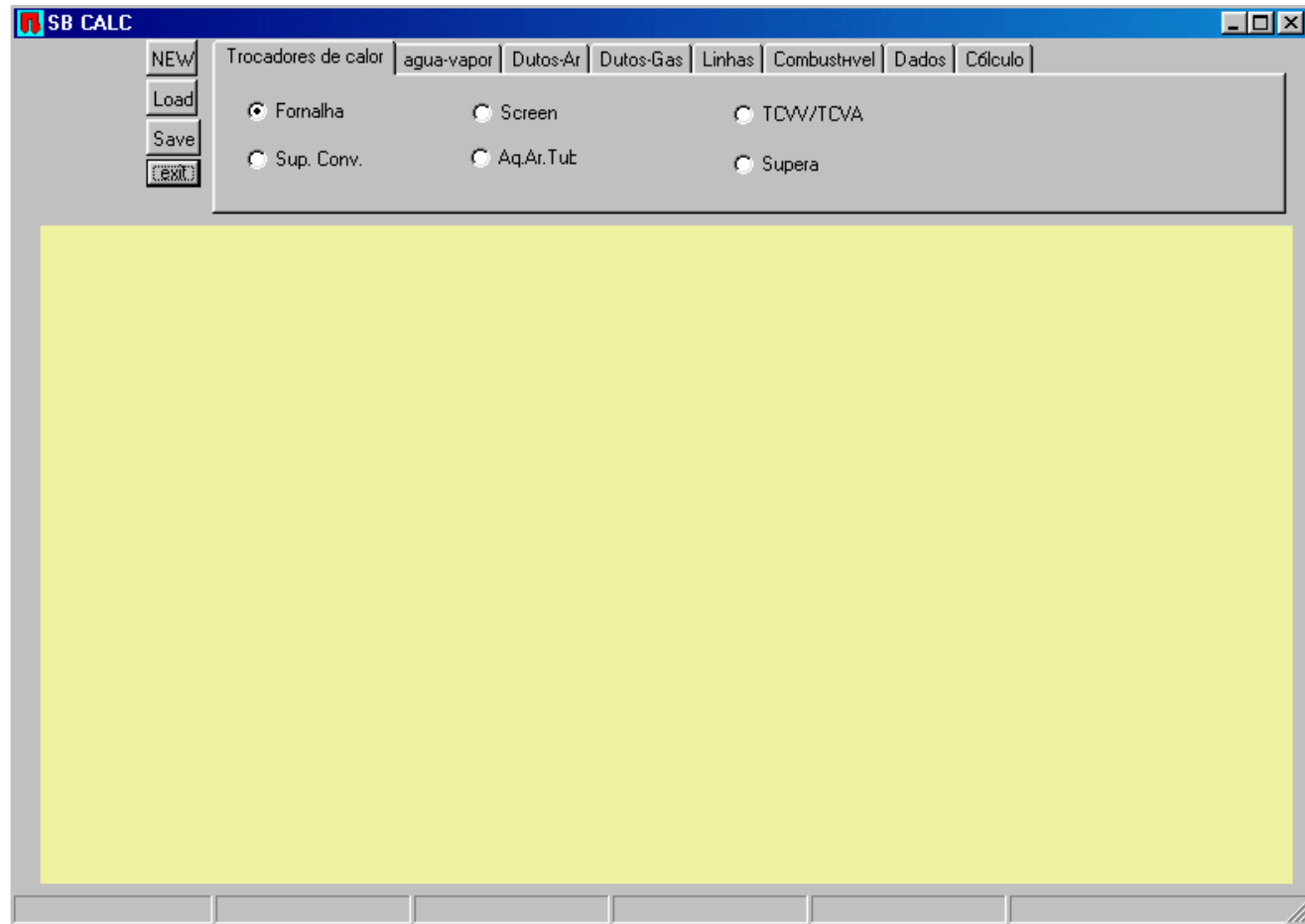
- Este programa fue desarrollado como parte del proyecto “Otimización de la utilización del potencial energético de la caña de azúcar con la minimización de los impactos ambientales” (CT COPERSUCAR/UNIFEI 2000-2005) lo que permitio que el grupo de energia del CT COPERSUCAR realizara la validación del programa con datos de pruebas de una caldera. La versión actual del programa incluye las sugerencias y recomendaciones realizadas en esta ocasión.
- Los creadores del SBC poseen mas de 20 años de experiencia en el diseño y evaluación de calderas para bagazo y otros combustibles.

Algo más sobre el SBC

- Libros y artículos publicados.
- Cursos.
- Los interesados en mayores detalles sobre el SBC pueden hacer el download del help do programa en www.nest.unifei.edu.br
- Consultas "on-line".
- Desarrollo posterior: Hidrodinamica, cálculos de resistencia, modelación aplicando CFD de los procesos de combustión y aerodinamica en el horno.

ENTRADA DE DADOS

En esta ventana se monta el esquema de la caldera a partir de 24 elementos independientes mostrados en el proximo slide



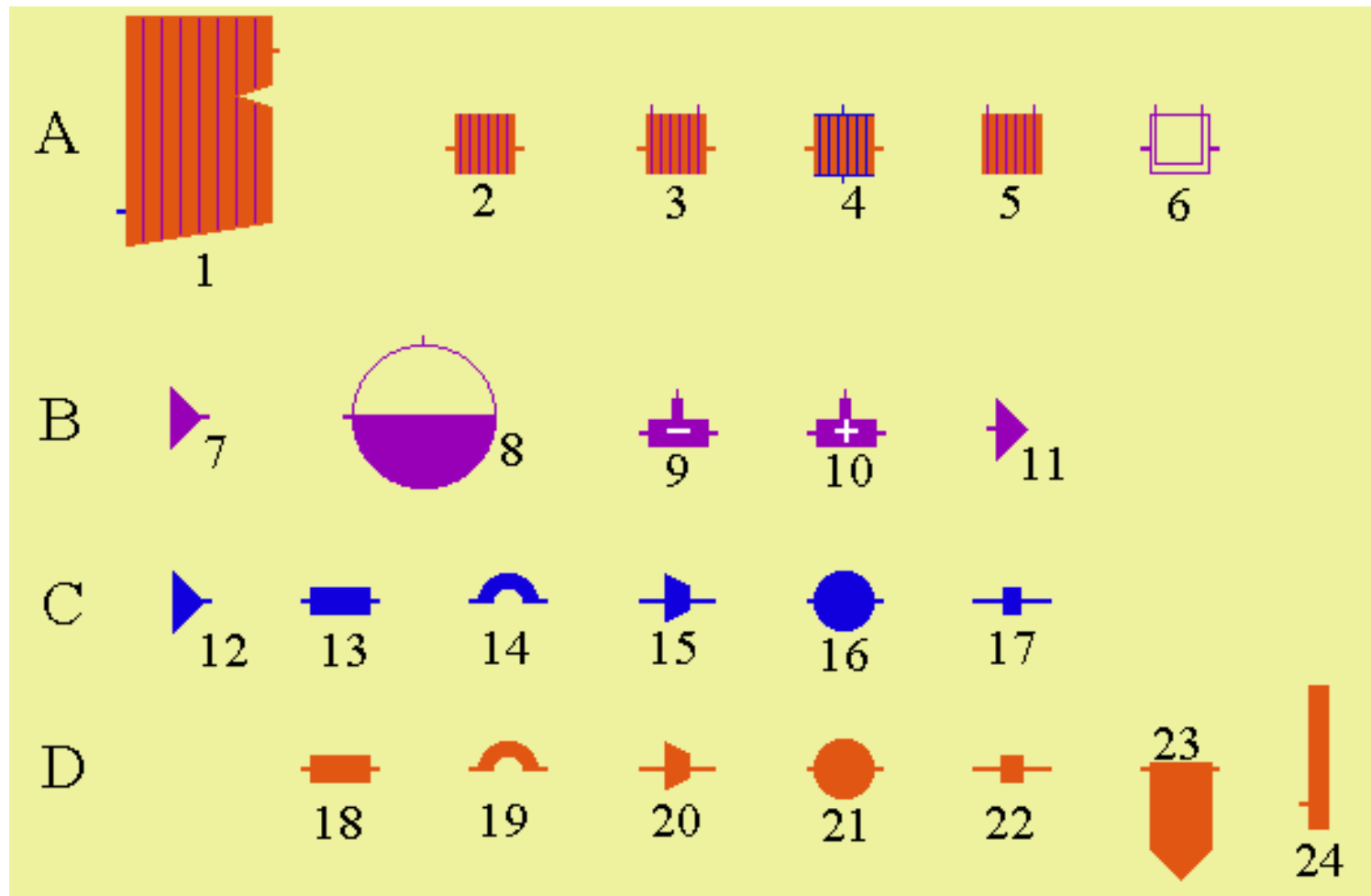
Los elementos disponibles están distribuidos en 4 grupos:

A- Intercambiadores de calor

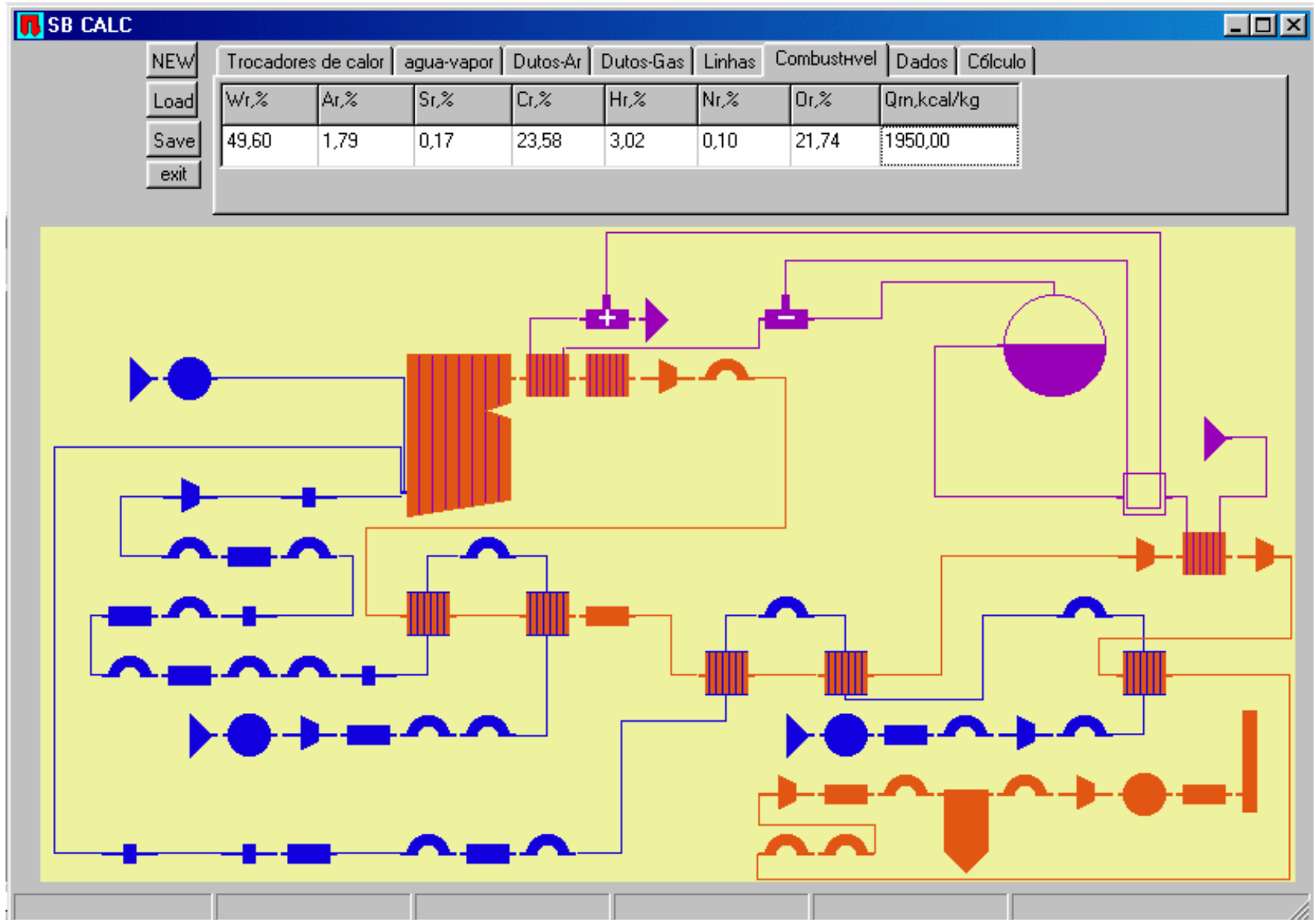
B- Elementos de los conductos de vapor y agua

C- Elementos de los conductos de aire

D- Elementos de los conductos de gases



Los elementos en la ventana de entrada de datos se conectan con líneas. Los datos sobre la composição del combustível y otros dados de la caldera son introducidos en tablas.



Haciendo clic encima de un elemento dado aparece una ventana con una tabla de entrada de datos e un esquema que escalarece el sentido de cada dado

qa/Qa=1
qg/Qg=1

Diagram showing a rectangular block with dimensions a_1 , a_2 , B , and dH . Forces F_{ok} and F_{zr} are indicated. A small inset shows a cross-section with $dH > 0$.

Name=	
a1=	0
a2=	0
B=	0
A=	0
Fok=	0
Fzr=	0
Fg=	0
V=	0
dH=	0

Retorno

B1=0
A=0
qg/Qg=1

Diagram showing a block with internal structure, dimensions B_1 , B_2 , d_{1b} , d_{2b} , s_1 , s_2 , Z_1 , Z_2 , and forces F_{zr} . A small inset shows a cross-section with $dH < 0$ and $dH > 0$.

Name=	
B2=	0
b1=	0
b2=	0
Dtb=	0
dtb=	0
S1=	0
S2=	0
Z1=	0
Z2=	0
H=	0
Npar=	0
KdT=	0
dH=	0

Retorno

☐ Longitudinal
☒ Transversal

☐ Cuadrado
☒ Triangular

☐ Concorrente
☒ Contracorrente

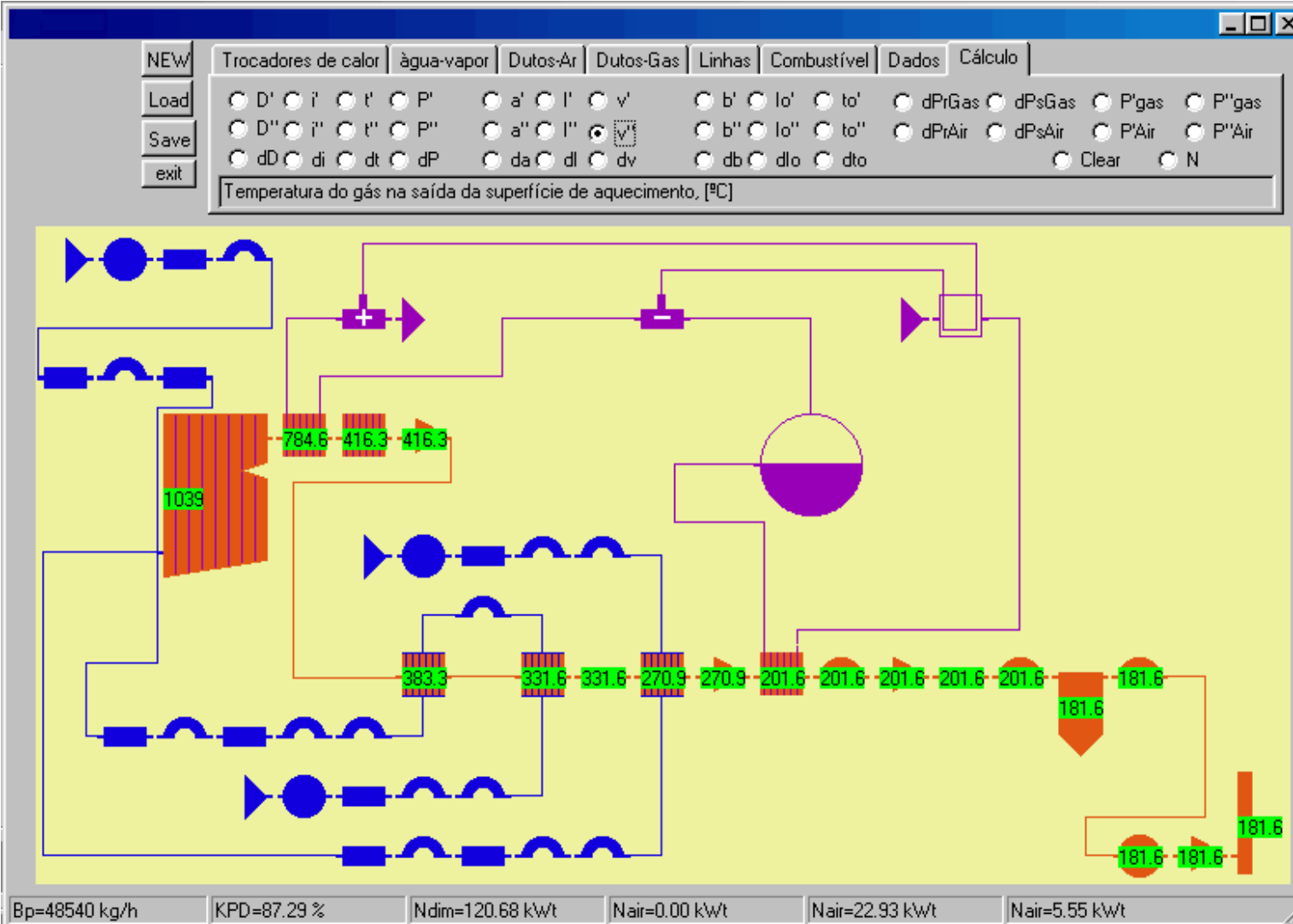
B1''=0
A1''=0
qa/Qa=0

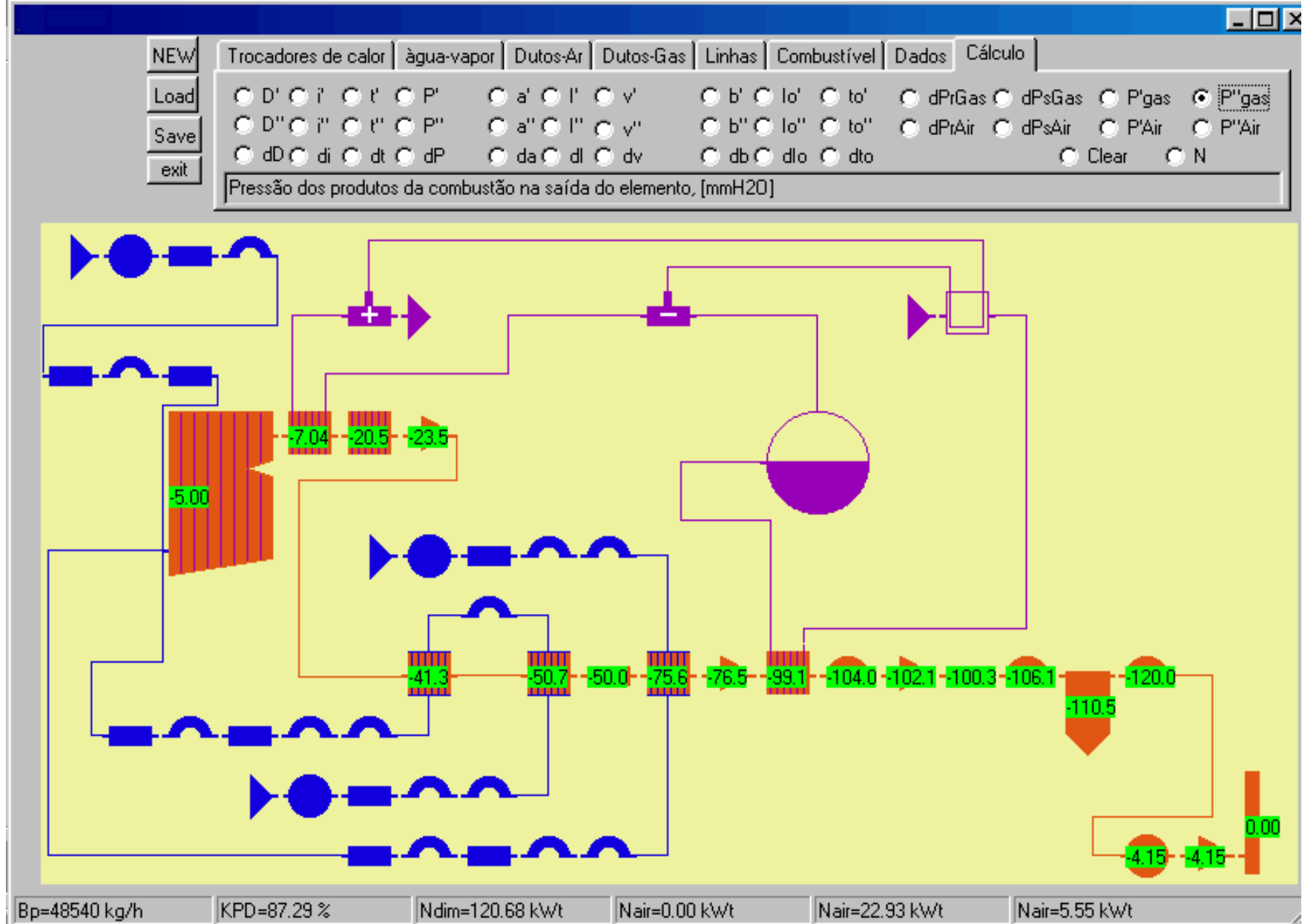
Diagram showing a block with dimensions B_1'' , A_1'' , B_2'' (A_2''), and forces F_{zr} .

Name=	
B2''=	0
A2''=	0

Retorno

Despues de la entrada de dados y apertando el botón “calculo”, el usuario dispone de los resultados de los cálculos directamente sobre el esquema de la caldera. Aqui por exemplo se muestran las temperaturas de los gases despues de cada superficie. Es posible disponer de esta manera de los resultados de 40 variables.



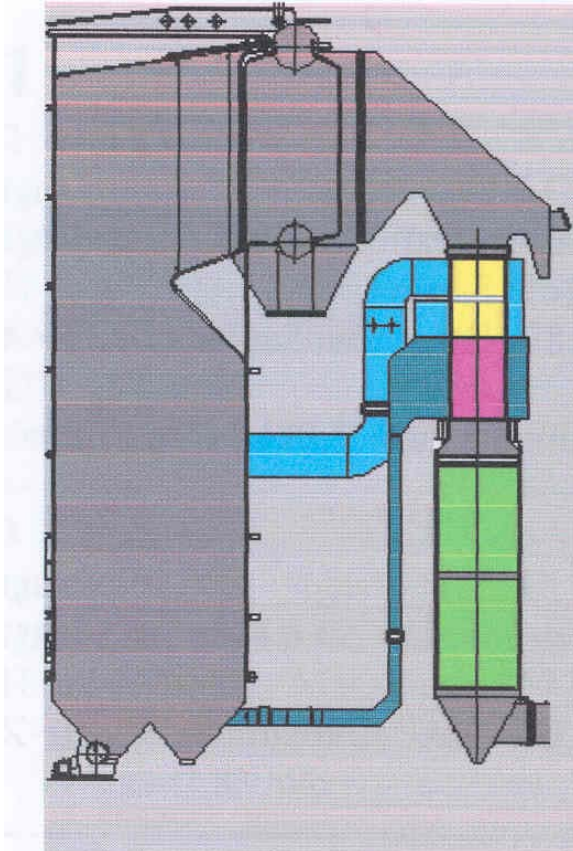


Los resultados pueden ser presentados tambien en forma de tabla exportada para el ambiente EXCEL.

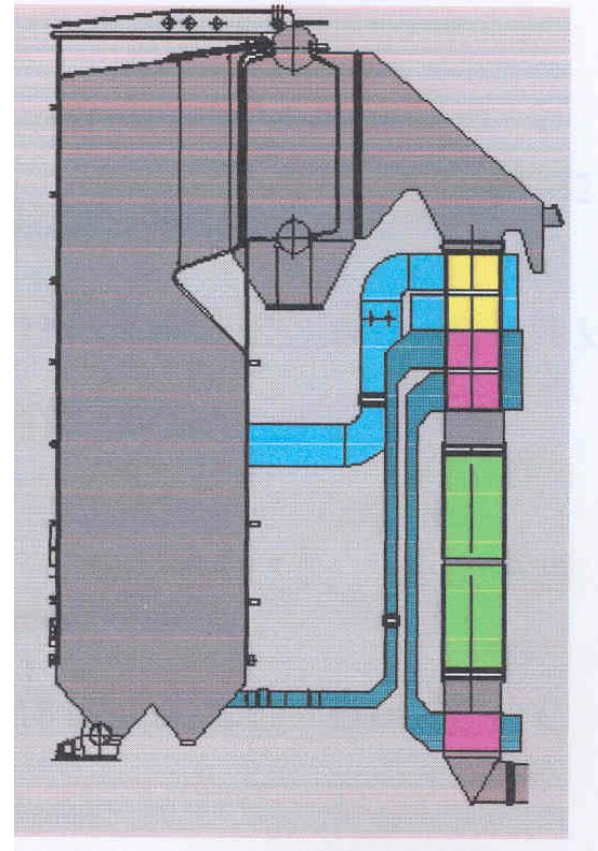
Ejemplo de utilización del SBC

- **Determinación de la temperatura optima de los gases de escape de calderas para aplicaciones de cogeneración**

Determinación de la temperatura optima de los gases de escape para aplicaciones de cogeneración



Caldera original



Caldera modificada

* Esquemas originais cedidos pela CALDEMA

Eficiencia en calderas para bagazo

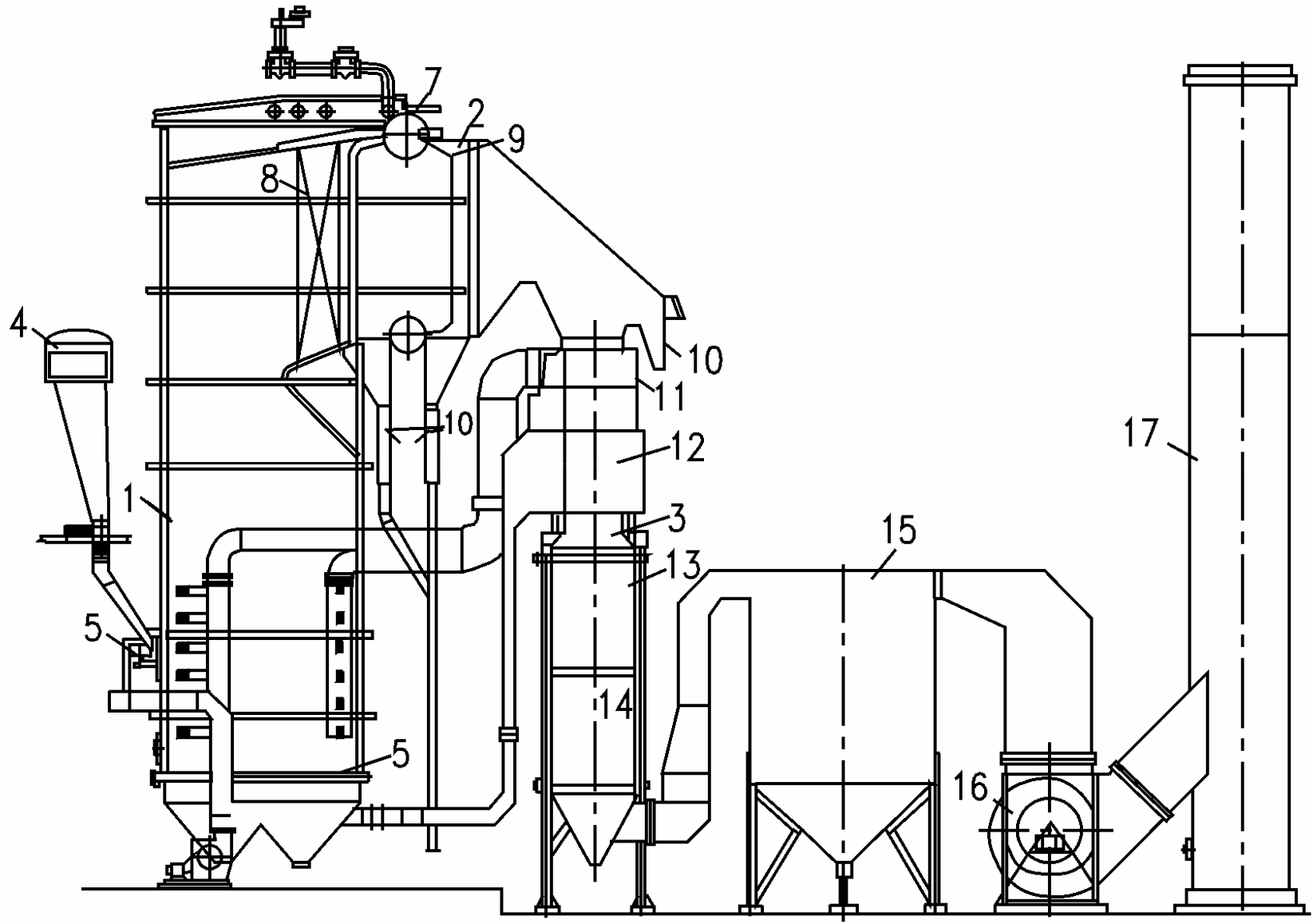
- 82-83%
- Potencial de aumento de eficiencia por reducción de la temperatura de los gases de escape, actualmente ~ 220 °C.
- Otra forma de mejorar la eficiencia es el uso de sistemas de combustión más eficientes. Aumento de la eficiencia en 1-2% como consecuencia de la disminución de los inquemados sólidos.

Abordajes del problema

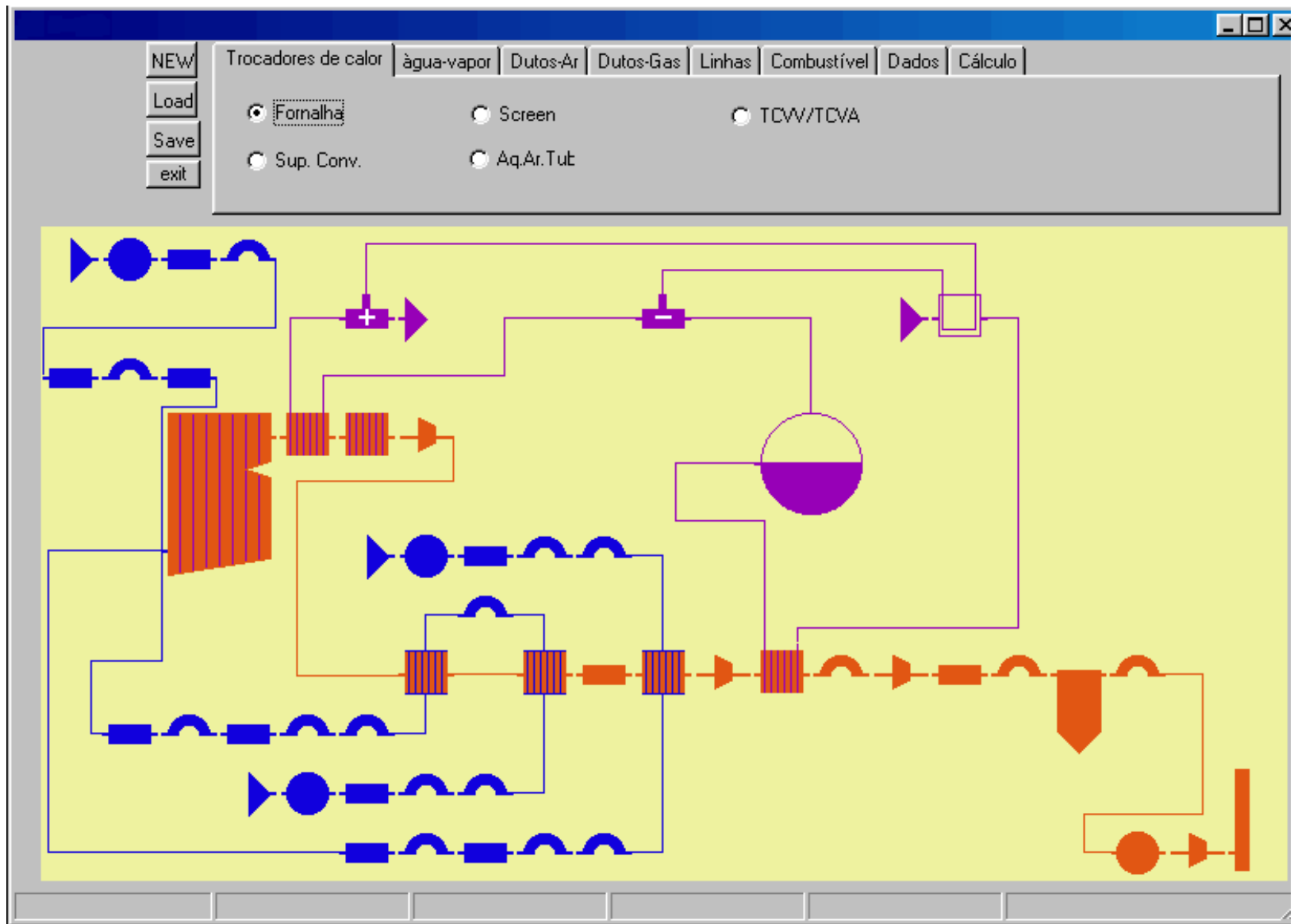
- Considerado el costo incremental anual de operación de la caldera (abordaje I)
- Comercialización del excedente de electricidad (abordaje II).

Estos resultados dan respuesta a la pregunta sobre cual seria la meta de eficiencia para las calderas a bagazo acopladas a sistemas de la cogeneración modernos, lo que constituye el objetivo principal de este trabajo.

Vista lateral de la caldera APU-50 utilizada como referencia en los cálculos



Esquema de la caldera APU 50 implementado en la pantalla del SBC



NEW

Trocadores de calor

agua-vapor

Dutos-Ar

Dutos-Gas

Linhas

Combustivel

Dados

Cálculo

Load

Selecione com o cursor o elemento necessário e preencha a tabela

Save

Denominazro da caldeira

CALDEMA

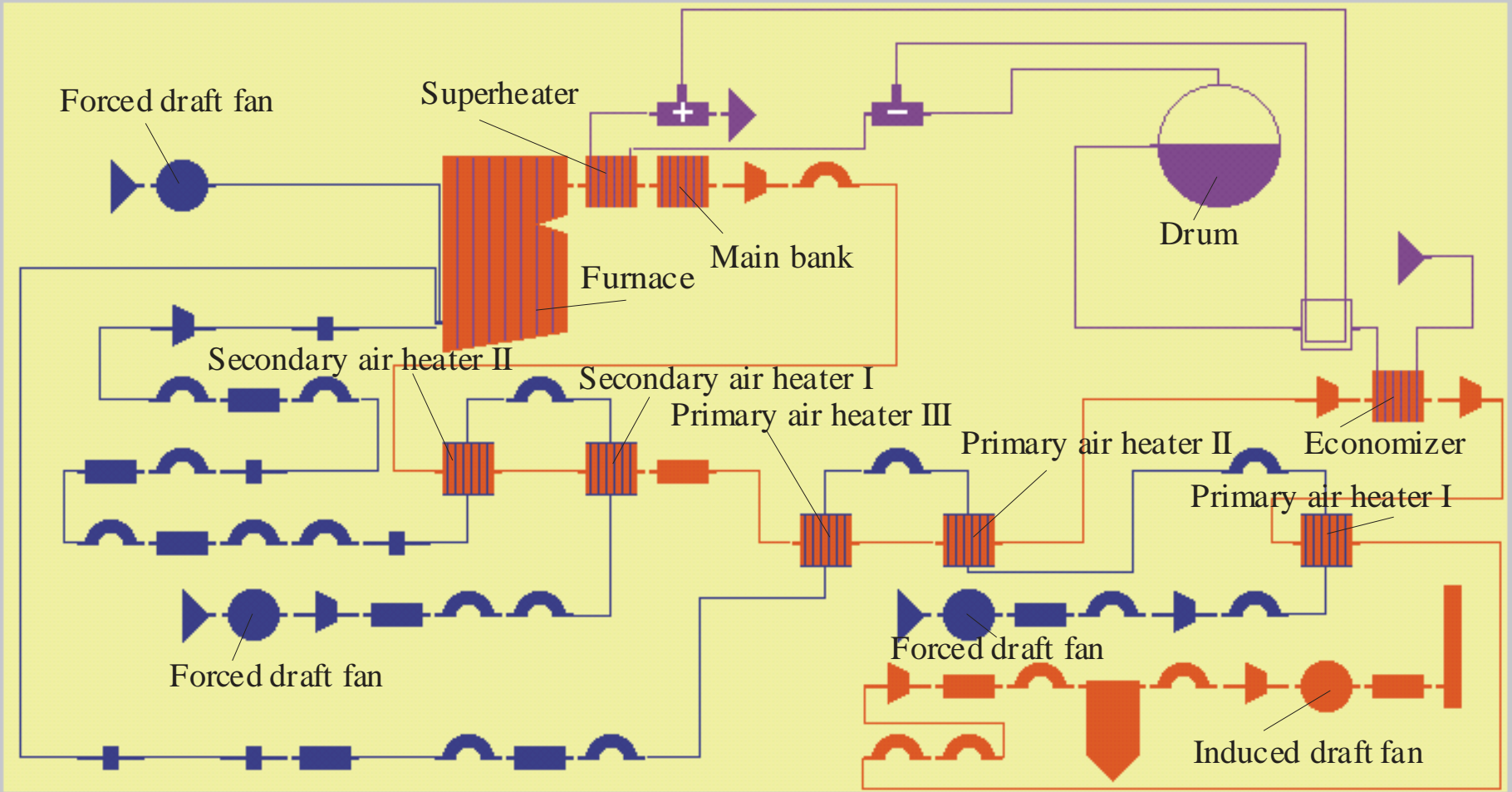
30,08,2004

Bagaso1

exit

Constantes principais

☐ Utilizar os valores normativos das infiltrasxes de ar - dAlfa



Bp=62709.1774 kg/h

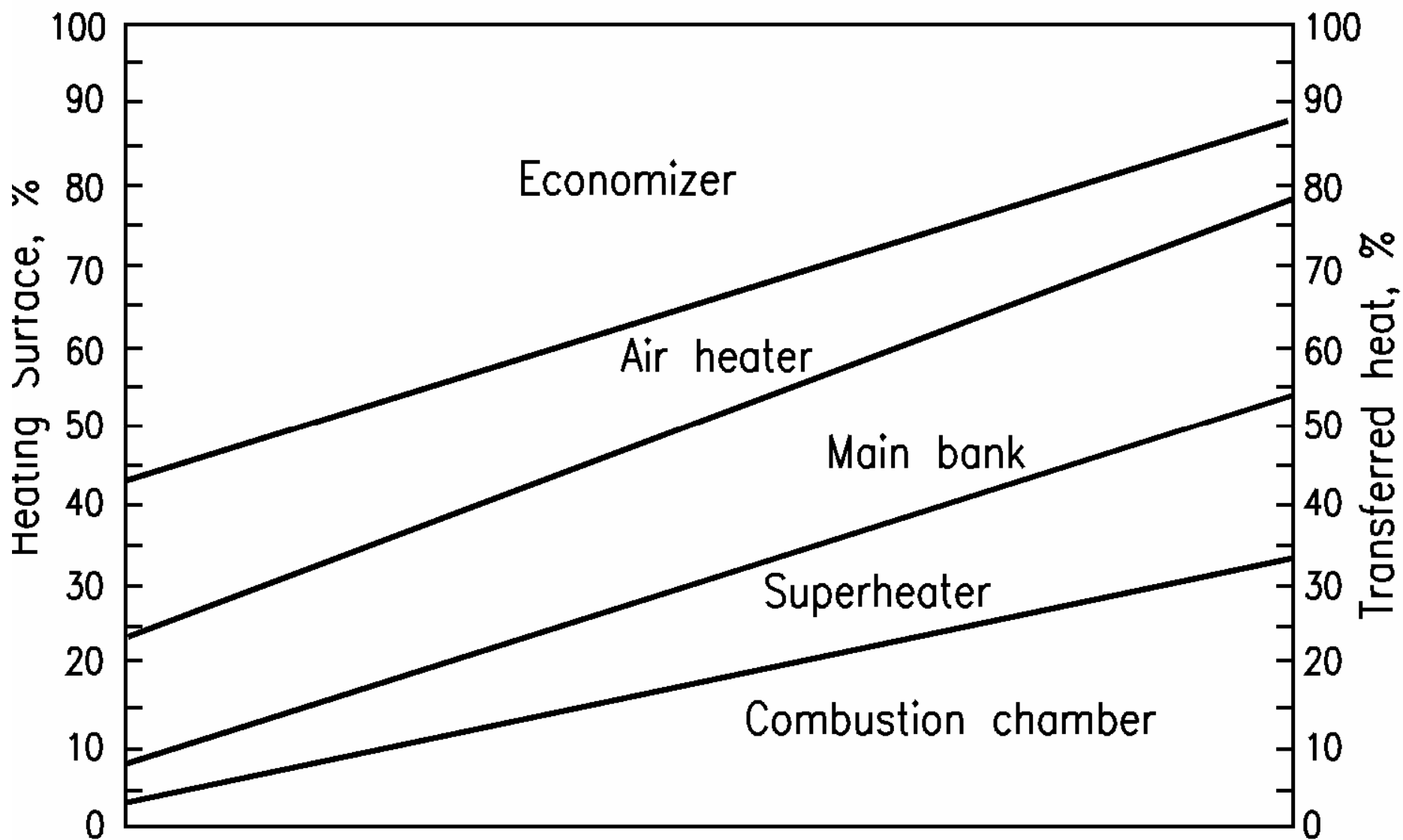
KPD=82.02 %

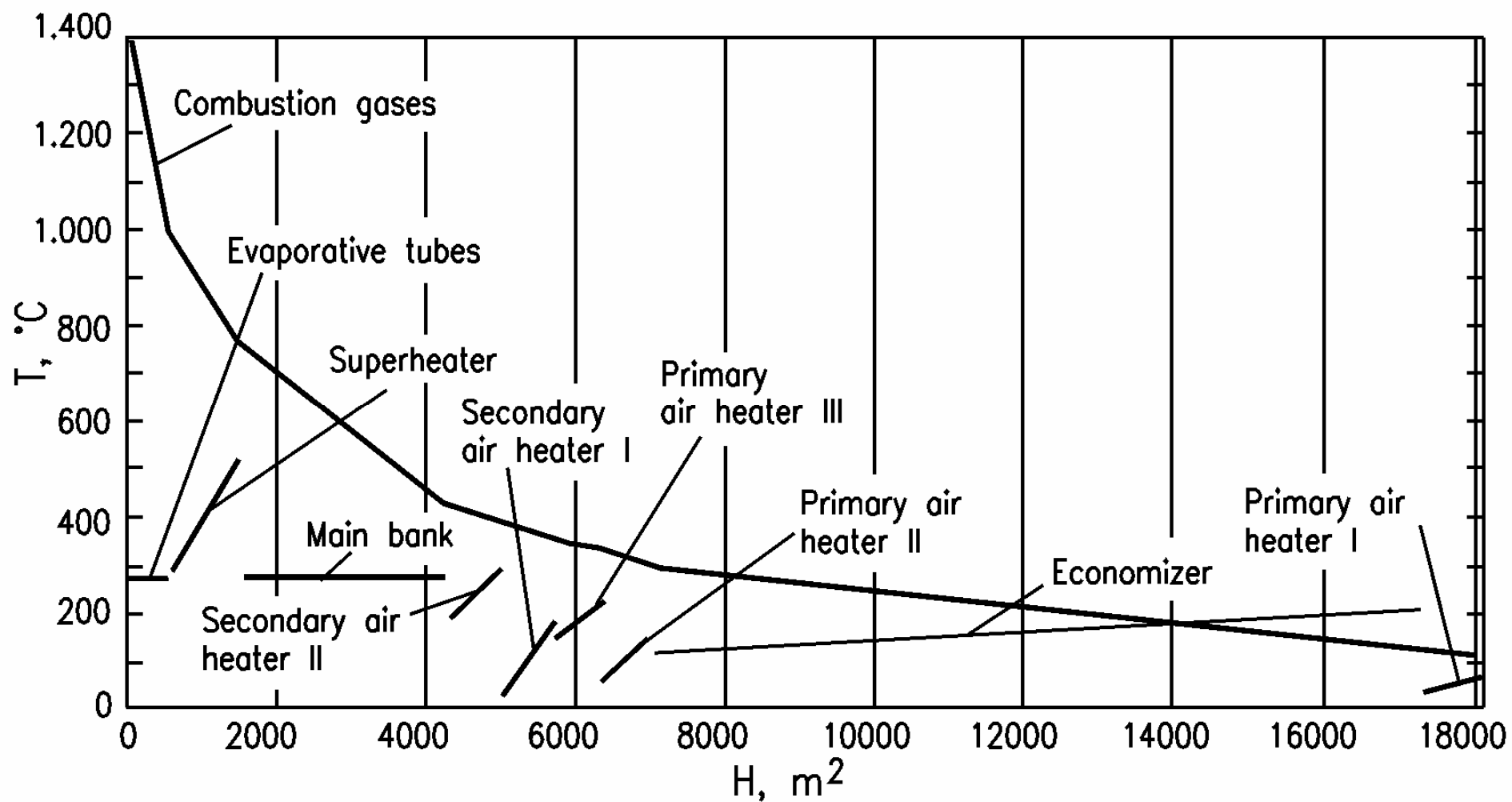
Ndim=281.59 kWt

Nair=69.02 kWt

Nair=77.24 kWt

Nair=0.00 kWt

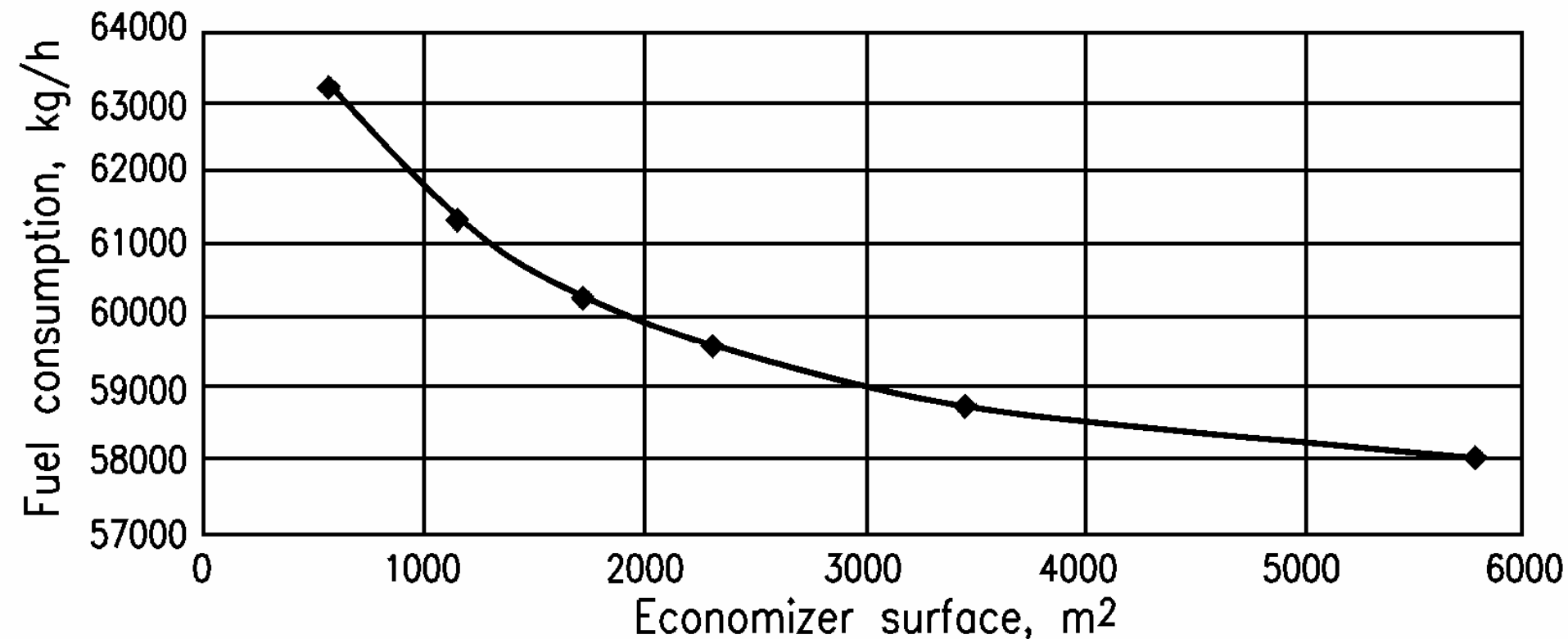




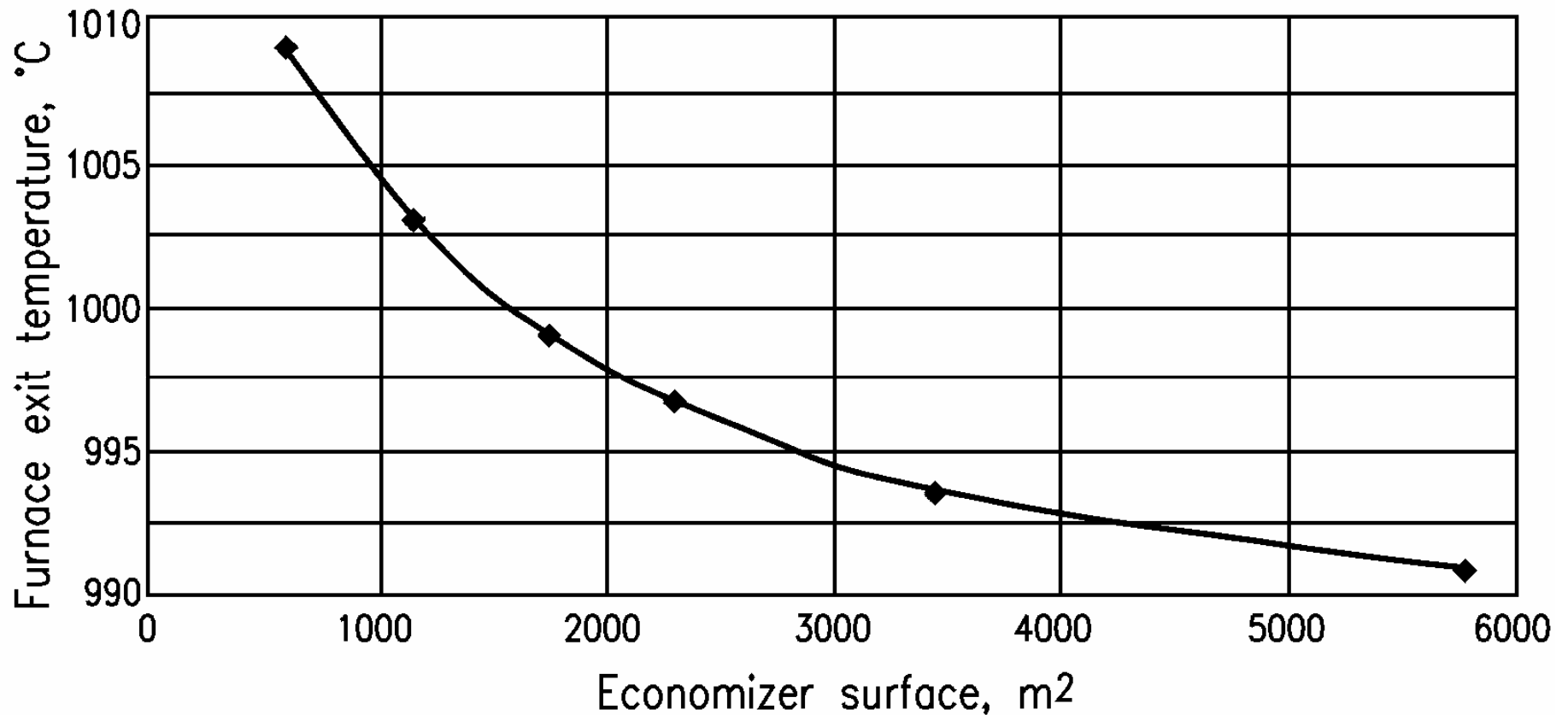
El porque no es posible dimensionar superficies convectivas por separado

- En el esquema térmico de la caldera el economizador está generalmente localizado despues del calentador de aire y por lo tanto no se espera que tenga ninguna influencia sobre la temperatura del aire.
- La disminución de la superficie economizadora provoca el aumento de la temperatura de los gases de escape, la reducción de la eficiencia de la caldera y un aumento en el consumo de combustible. Esto lleva a su vez al aumento del flujo y de la temperatura de los gases y en consecuencia al aumento de la temperatura del aire a la salida del calentador. .
- Estos resultados demuestran que no es correcto realizar el cálculo térmico de las superficies convectivas separadamente del resto de las superficies de la caldera. Es por esta razon que el SBC no considera esta posibilidad.

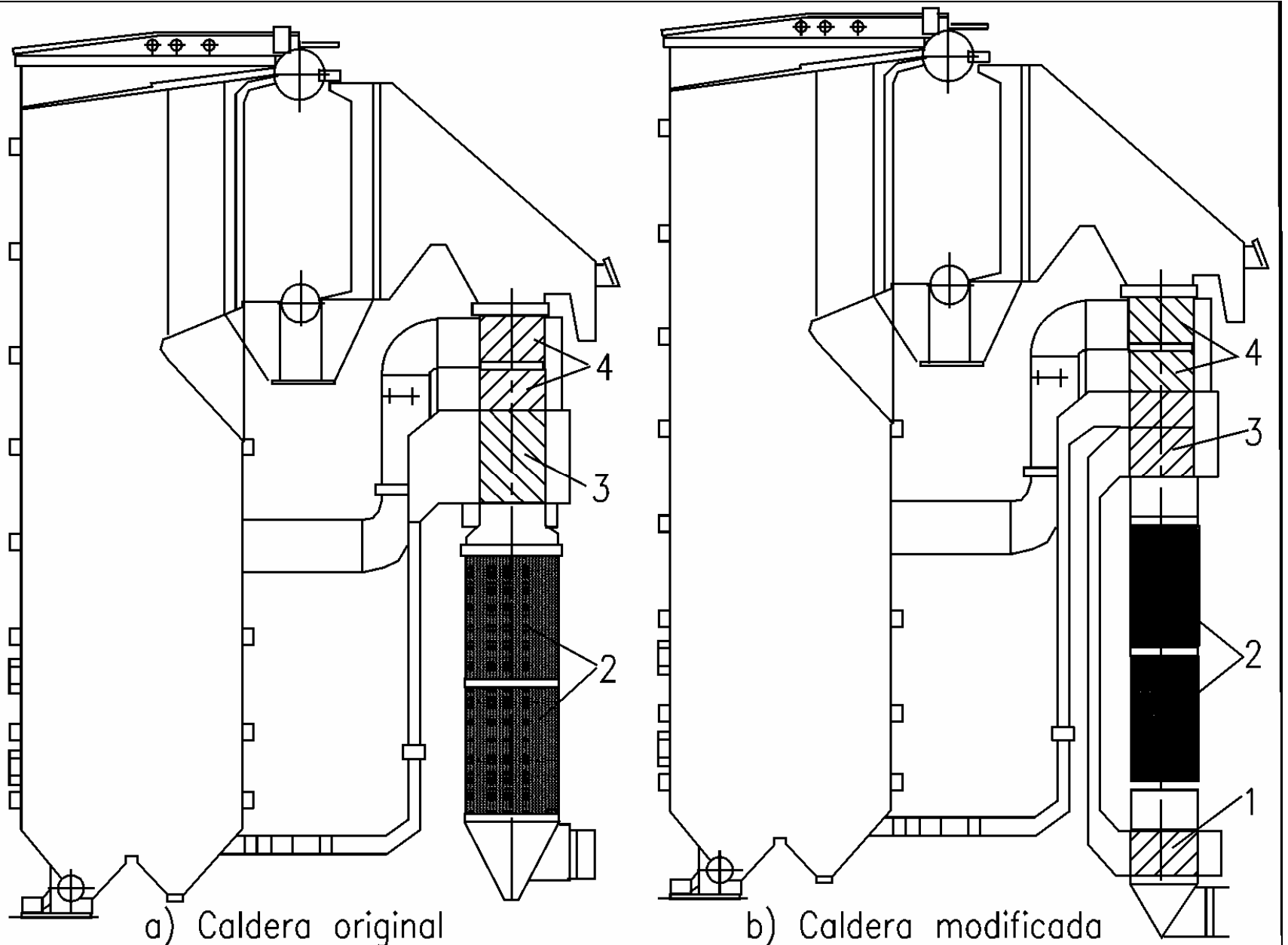
Relación entre el consumo de combustible y la superficie economizadora para la caldera APU-50



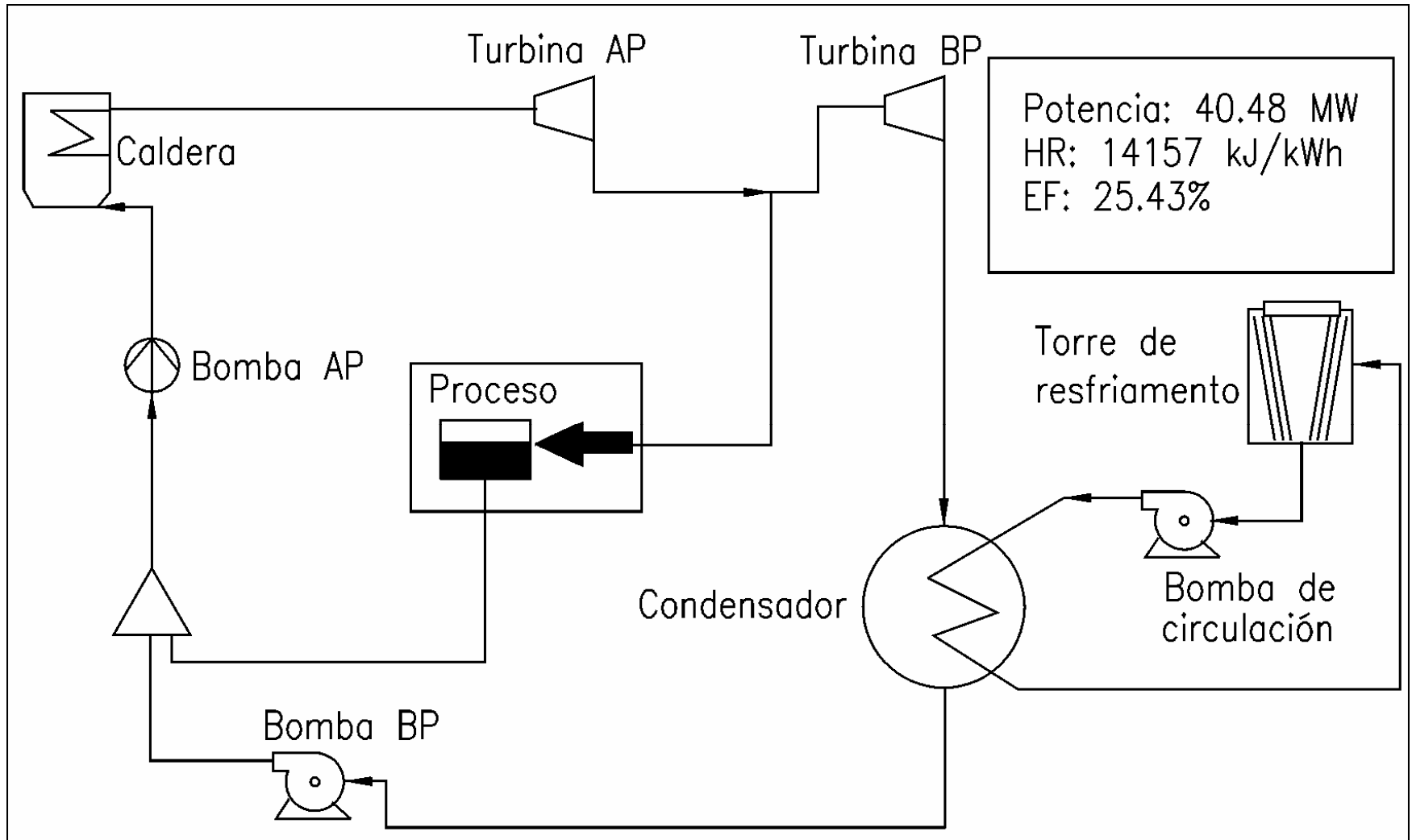
Relación entre la temperatura de salida de los gases del horno y la superficie economizadora para la caldera APU-50



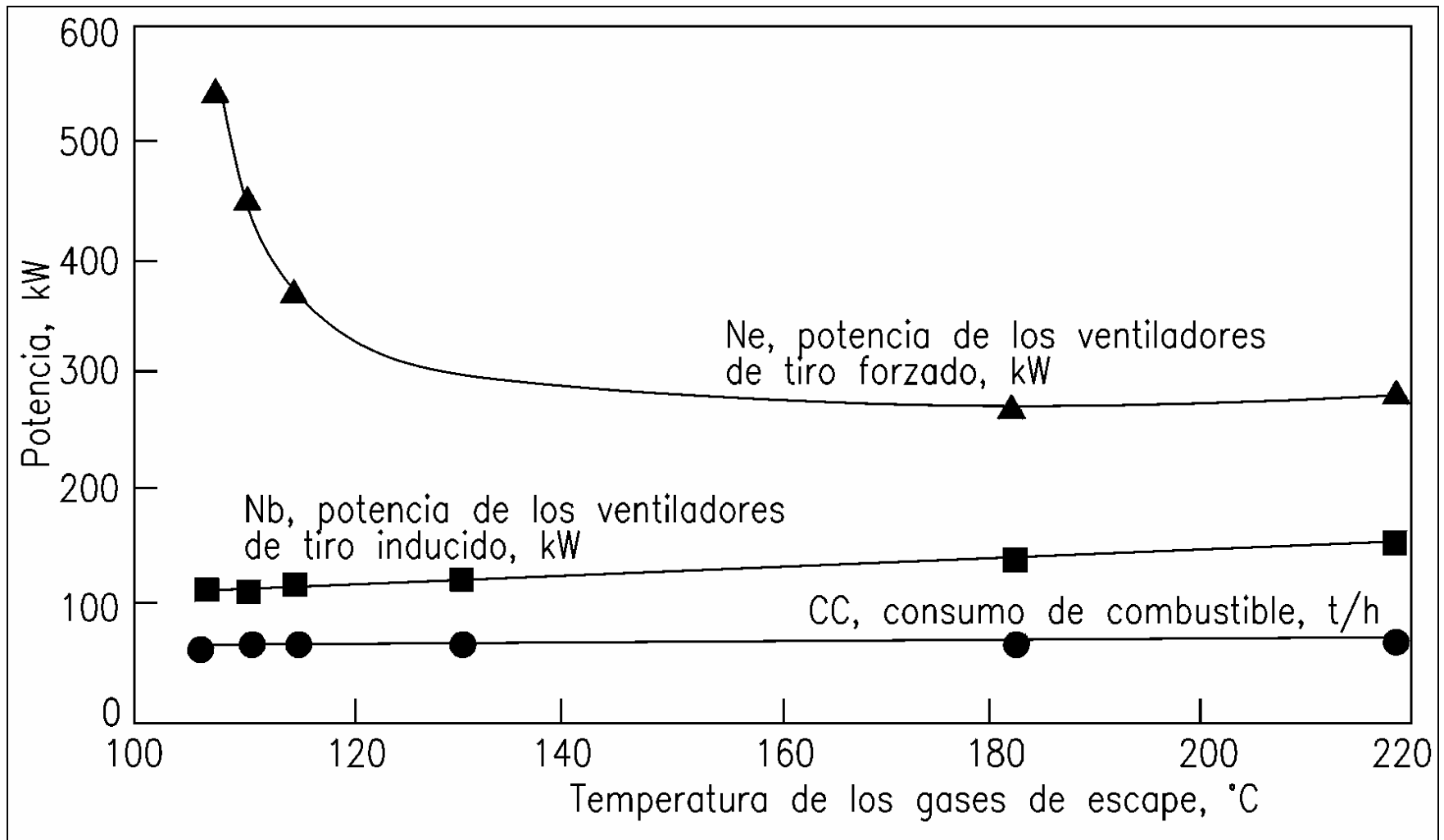
Esquema de disposición de las superficies de calentamiento



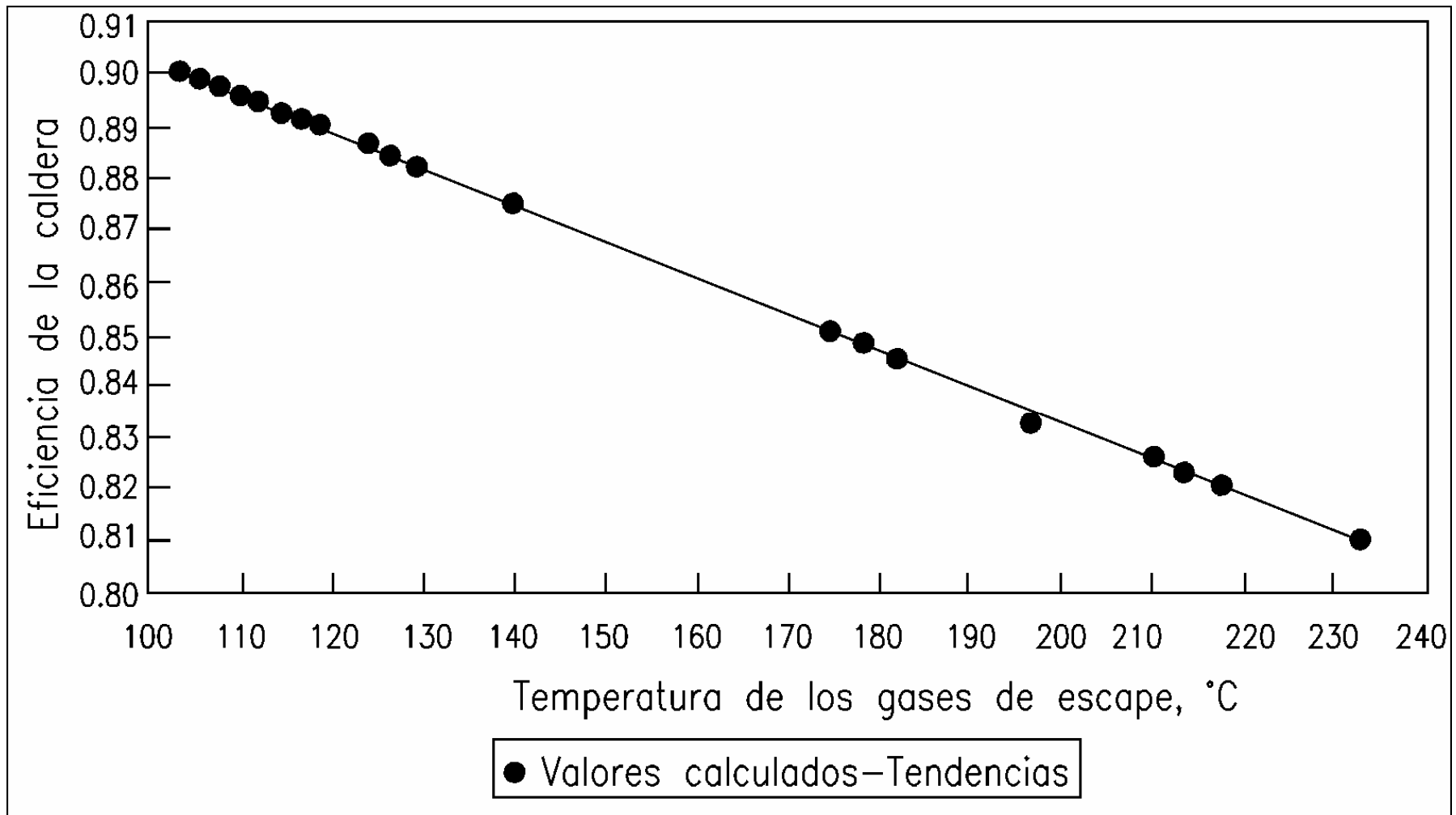
Esquema térmico de la planta de cogeneración con los resultados obtenidos utilizando el software Gate-Cycle.



Variación en el consumo de combustible en la caldera y en la potencia consumida por los ventiladores de tiro inducido y forzado en relación con la temperatura de los gases de escape

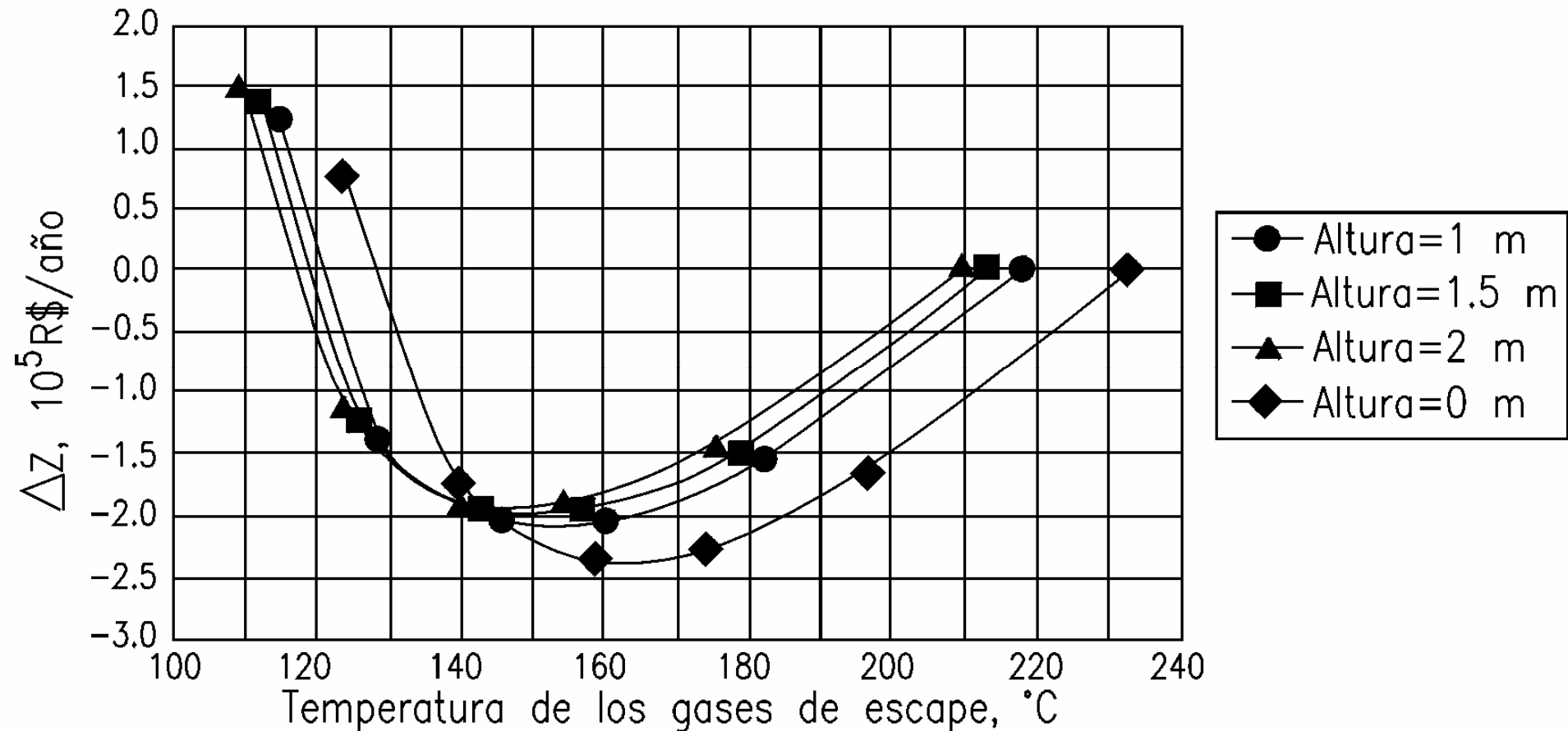


Relación entre la eficiencia de la caldera y la temperatura de los gases de escape

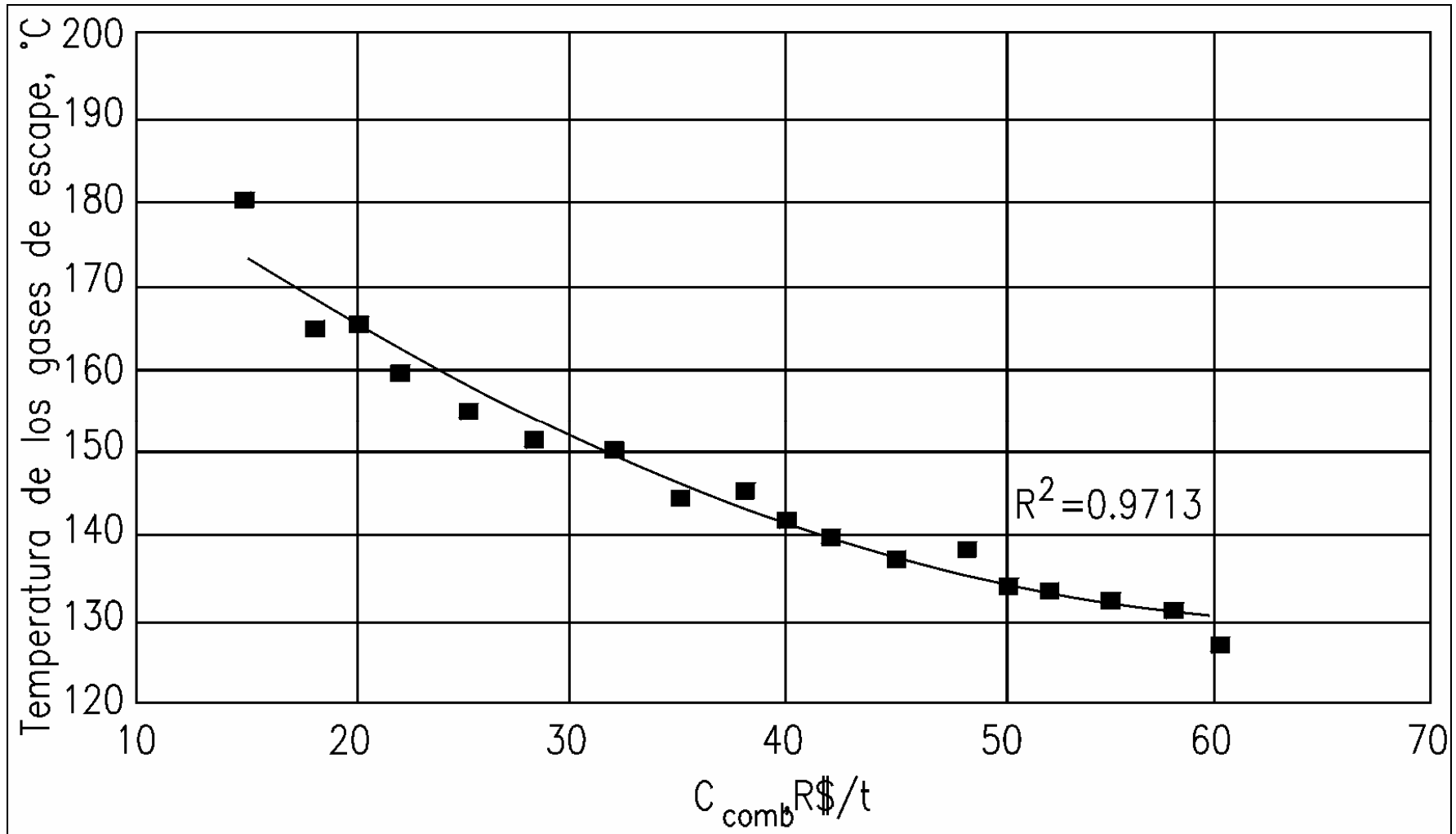


RESULTADOS ABORDAJE I

Dependencia del costo anual de
operación de la caldera con la
temperatura de los gases de escape de
la caldera para un precio del
combustible de 30 R\$/t

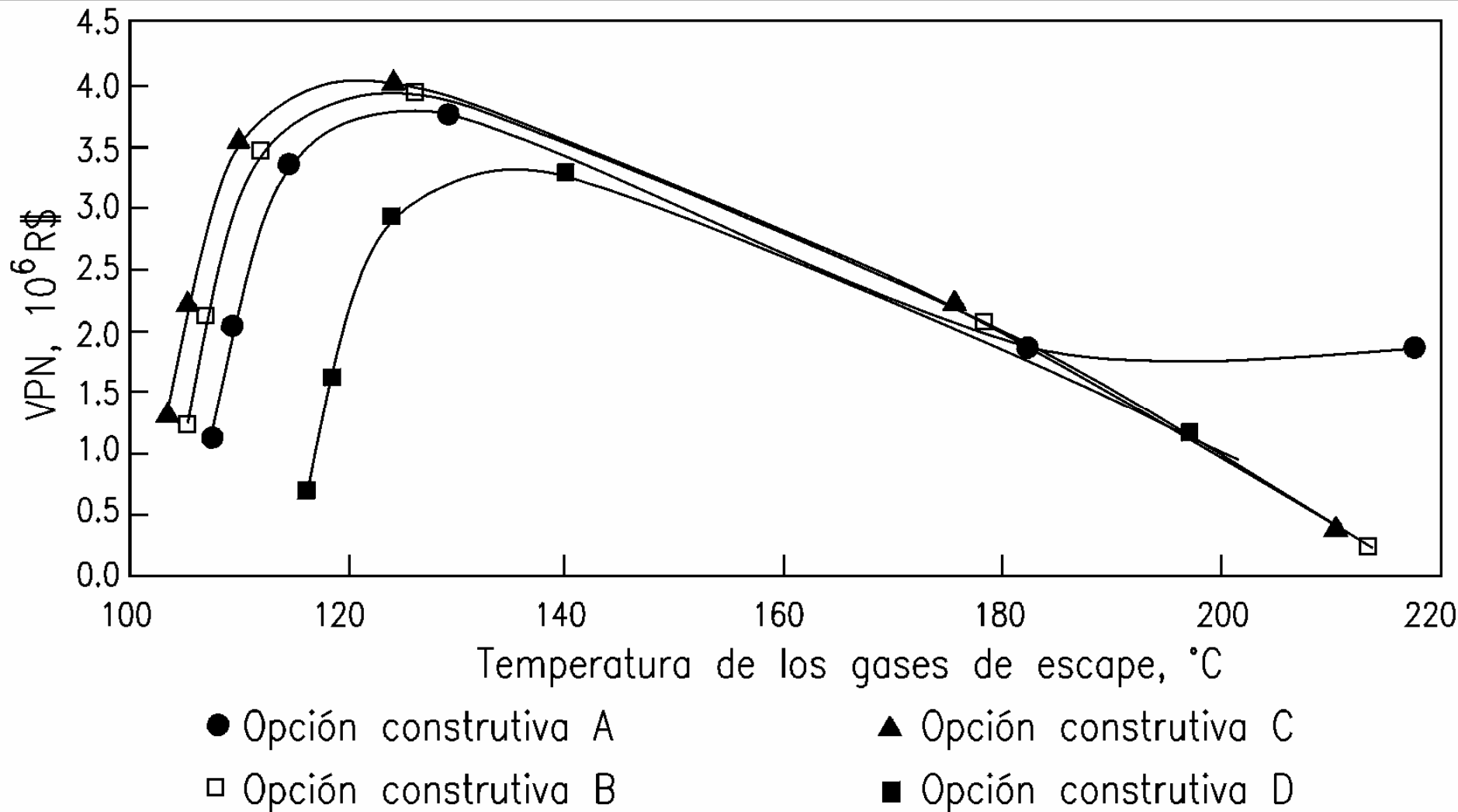


Dependencia entre la temperatura optima de los gases de escape de la caldera y el precio do bagazo

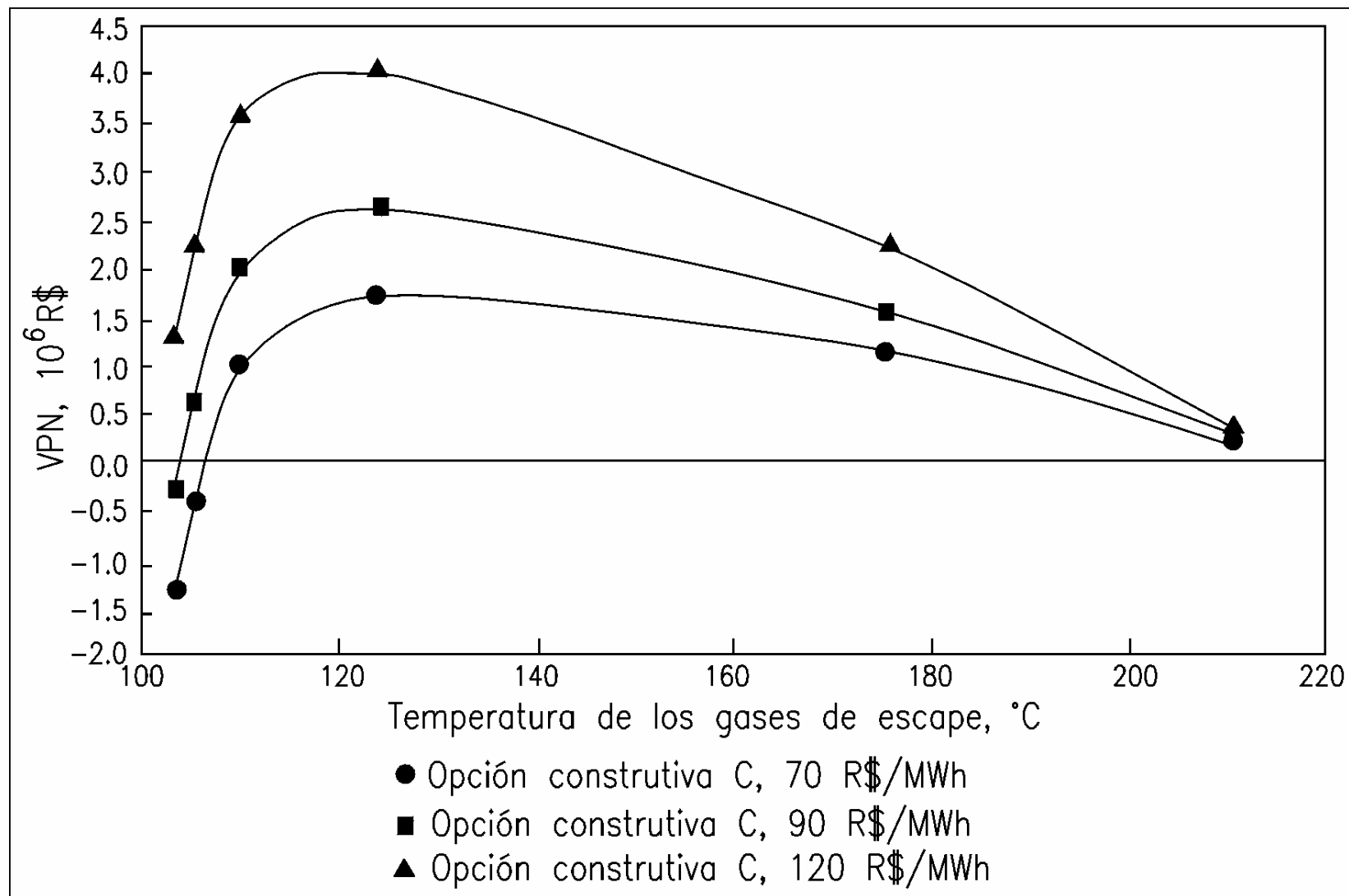


RESULTADOS ABORDAJE II

Relación entre el VPN y la temperatura de los gases de escape para cuatro opciones de modificación constructiva y un precio de comercialización de la electricidad excedente de 120 R\$/MWh



Relación entre el VPN y la temperatura de los gases de escape para diferentes precios de comercialización de la electricidad excedente

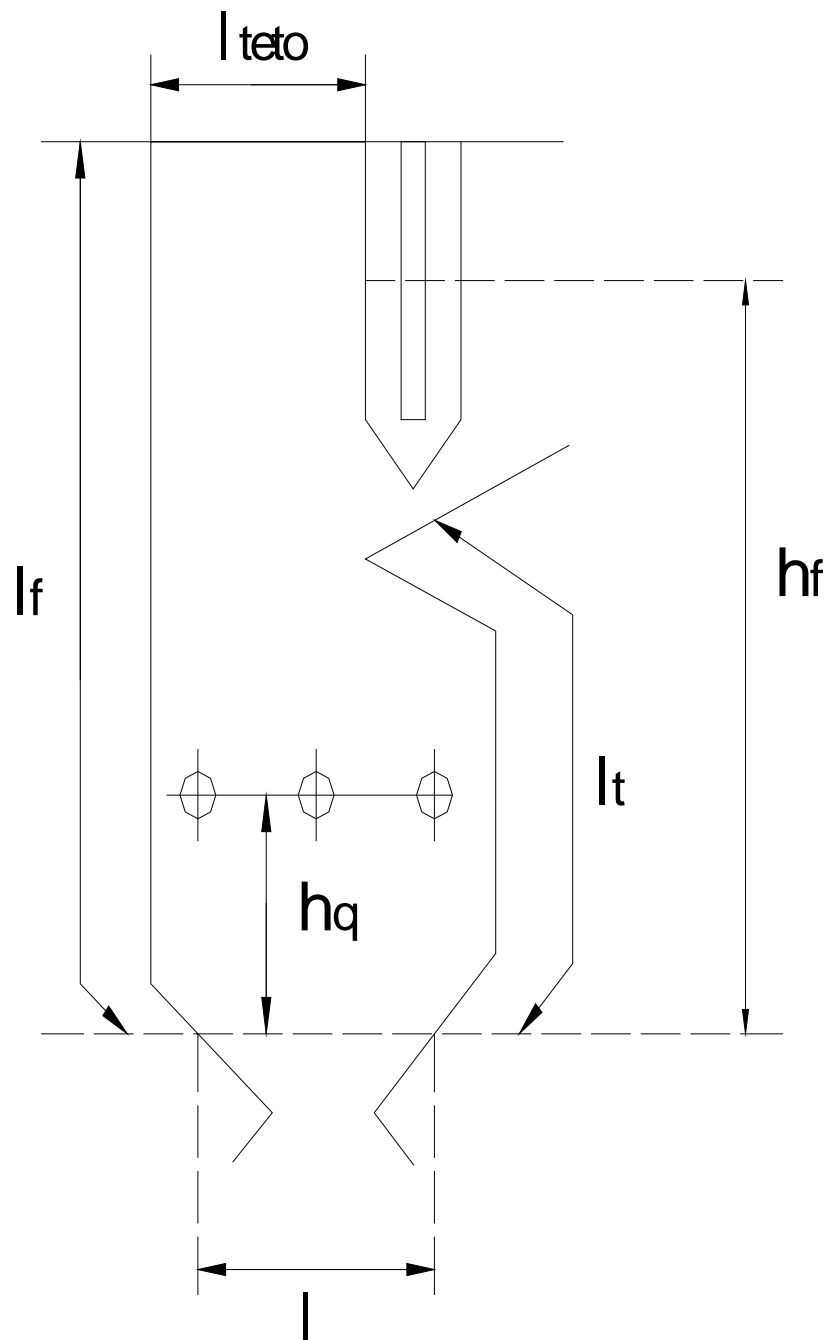


FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL CÁLCULO TÉRMICO DE CALDERAS

- No dimensionamento de uma nova caldeira, ou no recálculo de uma caldeira já existente para a sua conversão a um tipo diferente de combustível ou reforma, o cálculo da transferência de calor em fornalhas é a parte mais importante e complexa.
- A transferência de calor na fornalha ocorre fundamentalmente por radiação, com exceção das fornalhas ciclônicas ou de outros tipos onde os gases circulam com alta velocidade tornando importante a componente convectiva.

Métodos de cálculos de la transferencia de calor en hornos

- **Empíricos** - caracterizam-se pela determinação da relação existente entre as variáveis com base em dados experimentais. A sua principal desvantagem é a impossibilidade de utilizar os resultados obtidos para condições diferentes daquelas dos testes. Na prática estes métodos são pouco utilizados.
- **Analíticos** - baseados nas soluções das equações diferenciais que descrevem a aerodinâmica e a combustão. As principais firmas fabricantes de caldeiras já desenvolveram *softwares* para o projeto térmico das mesmas. CFX.
- **Combinados**: baseados nas técnicas de análise dimensional. Os números adimensionais são derivados a partir das equações analíticas e com base nos dados empíricos se determinam a relação entre estes.



Sistema de ecuaciones para el cálculo de la temperatura terminal de los gases en hornos (Método analítico)

$$Q_r^f = \frac{\sigma_o \varepsilon_f H_R}{C} (T_{ch}^4 - T_{c.e}^4)$$

$$Q_b^f = \varphi (Q_f - h_f^t) = \varphi \overline{VC} (T_a - T_f^t)$$

$$Q_c^f = \frac{H_R}{C \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_2} \right)} (T_{c.e} - T_{s.t})$$

Método combinado

Critério adimensional determinante durante a análise dos processos de transferência de calor em fornalhas.

Caracteriza a relação entre o calor absorvido na fornalha com um resfriamento relativo dos gases $(T_a - T_{ft}) / T_a$ e a quantidade de calor liberada nesta durante a combustão à temperatura adiabática (T_a).

$$B_o = \frac{\varphi \ C \ \overline{VC}}{\sigma_o \ \psi_f \ F_p \ T_a^3}$$

Ecuación de Gurvich

Expresión para el cálculo de la temperatura terminal de los gases obtenida a partir del análisis de datos experimentales utilizando el criterio de Boltzman

$$\theta_f^t = \frac{T_f^t}{T_a} = \frac{1}{M \left(\frac{\varepsilon_f}{B_o} \right)^{0,6} + 1}$$

Emisividad (grado de negrura) del horno

Fornalhas de queima em suspensão:

$$\varepsilon_f = \frac{\varepsilon_{ch}}{\varepsilon_{ch} + (1 - \varepsilon_{ch}) \cdot \overline{\psi}_f}$$

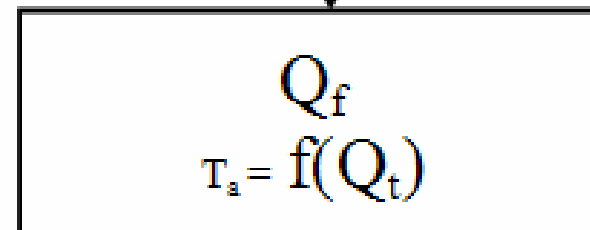
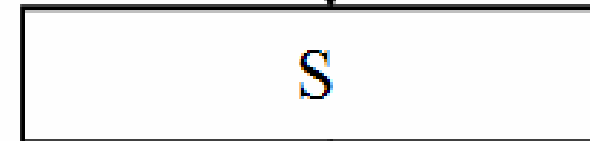
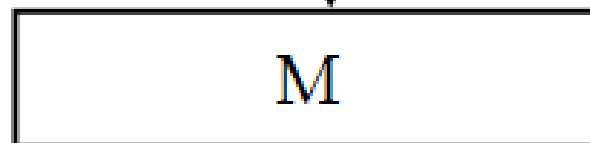
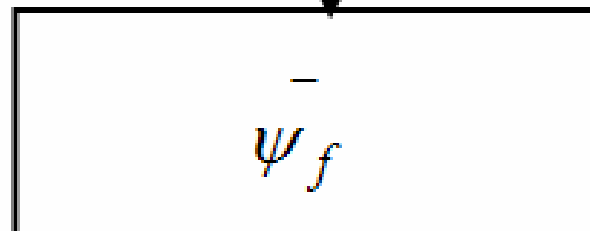
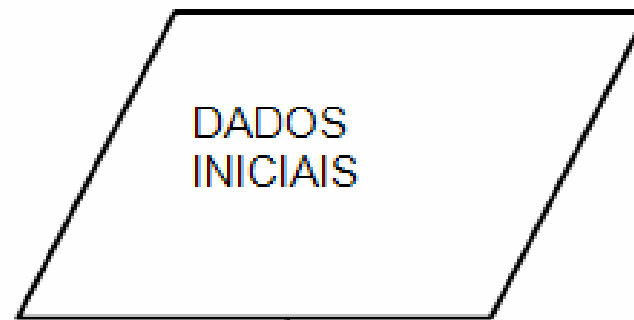
Fornalhas de queima em camada:

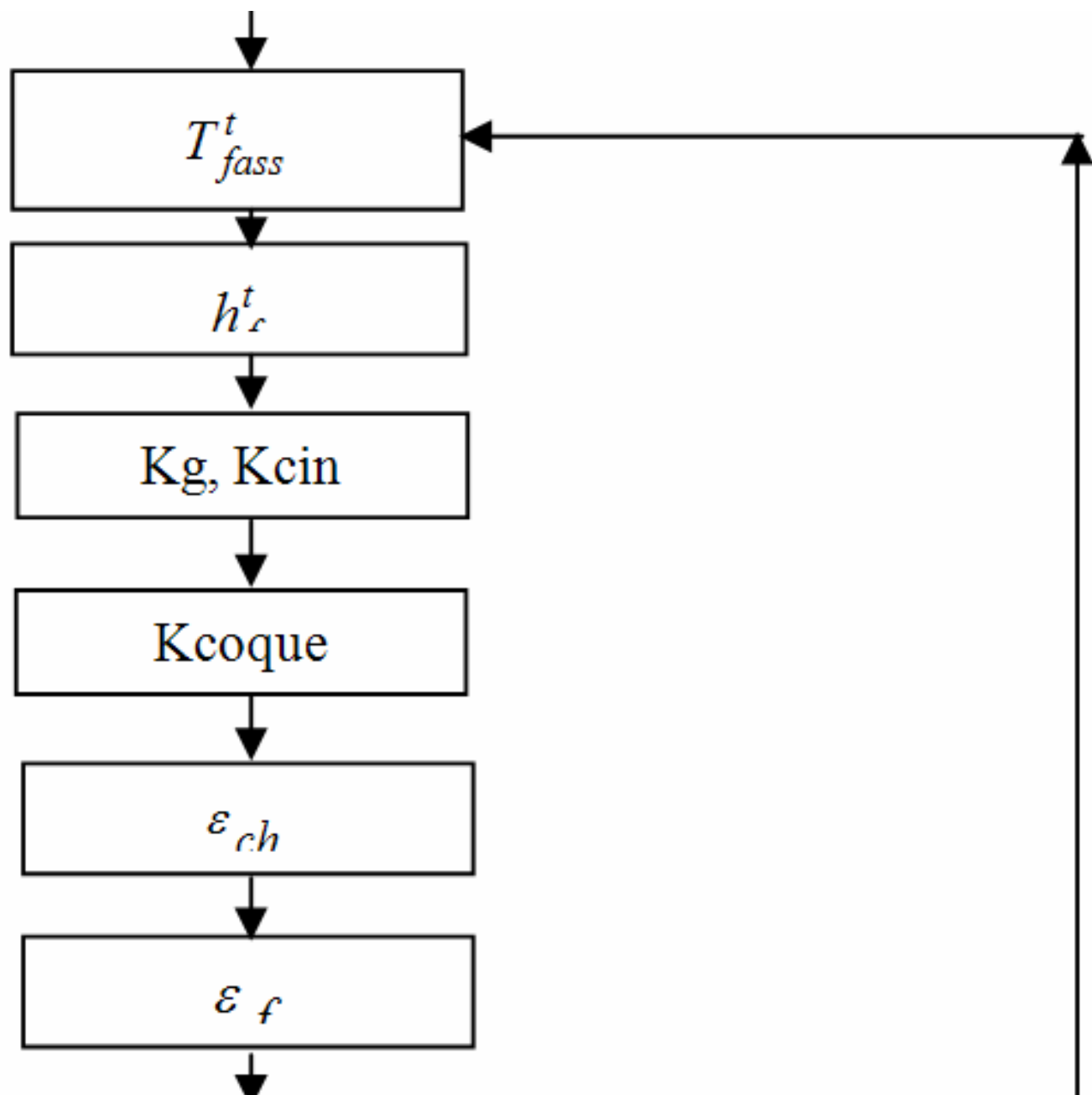
$$\varepsilon_f = \frac{\varepsilon_{ch} + (1 - \varepsilon_{ch}) A / F_p}{1 - (1 - \varepsilon_{ch})(1 - \overline{\psi}_f)(1 - A / F_p)}$$

$$\varepsilon_{ch} = 1 - e^{-kps}$$

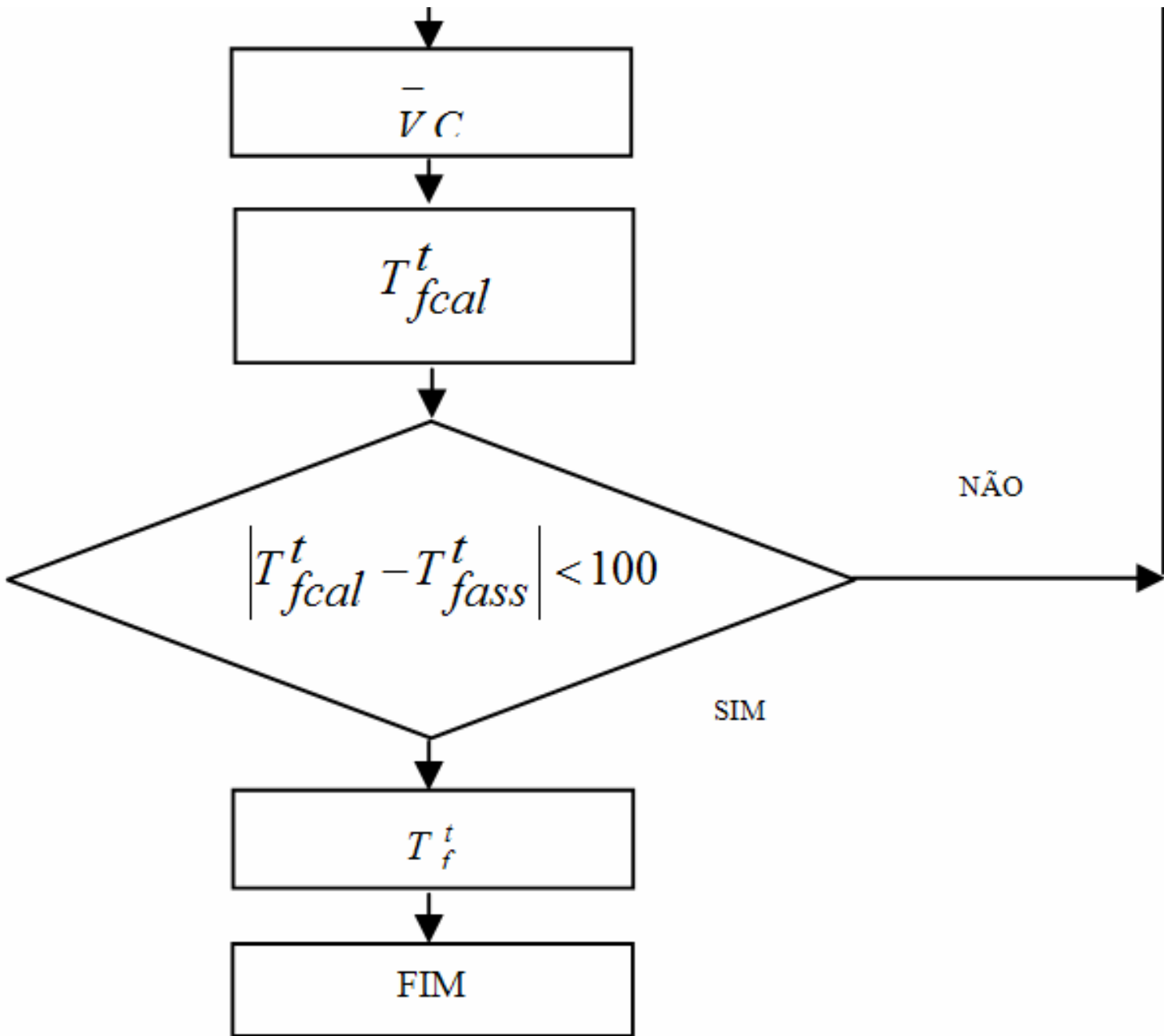
$$\psi = X \cdot \zeta$$

$$\overline{\psi}_f = \sum \psi_i \cdot \frac{F_{pi}}{F_p}$$





$$T_{fass}^t = T_{fcal}^t$$



Sistema de ecuaciones para el cálculo de superficies de calentamiento

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_g = \varphi (h_g^e - h_g^s + \Delta \alpha_{\infty} h_{\infty}) \\ Q_i = Q_{T_i} = \frac{\dot{m}_i (h_i^s - h_i^e)}{C} \\ Q_{T_i} = \frac{K_i \Delta T_i H_i}{C} \end{array} \right. \quad \Delta T = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{2,3 \log(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2})}$$

