

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA  
**TRABAJO FIN DE GRADO**

***SIMULACIÓN DE LA COMBUSTIÓN EN UNA  
CALDERA PIROTUBULAR POR CFD***

***DOCUMENTO 4- ANEXOS***

**Alumno/Alumna:** Díaz Castillo, Alexander

**Director/Directora:** Romero Antón, Naiara

**Curso:** 2018-2019

**Fecha:** Bilbao, 11 de junio de 2019

## Índice

---

1. Cálculos con EES .....	1
1.1. Cálculo de los caudales de aire y propano .....	1
1.2. Cálculo de la temperatura de saturación del agua .....	2
2. Fichas técnicas de los equipos .....	2



## 1.2. Cálculo de la temperatura de saturación del agua

Se trata del cálculo de la temperatura de saturación del agua calculada para compararla con la temperatura medida en el ensayo experimental de la caldera a la presión medida.

El código es el siguiente:

```
"# Cálculo de la temperatura del agua"  
T_sat_agua =T_sat(Water;P=2,2)    "[°C]"
```

## 2. Fichas técnicas de los equipos

A continuación, se adjuntan las fichas técnicas de los equipos utilizados para la realización de este trabajo. Se presentarán en el orden siguiente:

- Ficha técnica de la central de vapor del laboratorio
- Ficha técnica del analizador de gases Testo 350

**6 Anexo**
**6.1 Datos técnicos**
**Dimensiones**

Longitud/anchura/altura	800 x 800 x 1600 mm
Peso	Aprox. 80 kg

**Alimentación de tensión**

Tensión	230 V
Frecuencia	50 Hz
Fases	1 ph
Consumo nominal (potencia)	0,13 kW
Alternativas opcionales, ver la placa de características	

Sonido	65 dB(A)
--------	----------

**Suministro de agua fría**

Caudal, mínimo	100 L/h
----------------	---------

**Máquina de vapor, doble efecto**

Número de cilindros:	1
Taladro:	20 mm
Carrera:	20 mm
Estado del vapor:	4 bar
Máx. consumo de vapor:	1 kg/h
	Vapor saturado
N.º de revoluciones máx.:	1200 1/min
Potencia máx.:	5 W

Aceite lubricante:

Para la tubería de vapor delante del cilindro de vapor: Aceite de vapor caliente

Para puntos de cojinete: Aceite para máquinas

**Caldera: Caldera de tubo de llamas y de tubo de humo**

Calefactado por gas

Superficie calentada aprox.:	970 cm <sup>2</sup>
Presión de servicio:	<4 bar
Válvula de seguridad:	4 bar
Combustible:	Propano Densidad normalizada $\rho_n = 2,01$ kg/m <sup>3</sup> Valor calorífico $H_u = 46354$ kJ/kg
	Butano Densidad normalizada $\rho_n = 2,71$ kg/m <sup>3</sup> Valor calorífico $H_u = 45715$ kJ/kg
Presión previa de gas: (0,5...4 bar)	800 mbar
Temperatura del gas de humo máx.:	200 °C
Controlador de llama, temperatura mín.:	600 °C

**Condensador:**
**atmosférico**

Superficie de transferencia:	63 cm <sup>2</sup>
Consumo de agua refrigerante :	100 L/h

**Líneas de suministro**

Toma de agua refrigerante:	Acoplamiento rápido NW7.8 Manguera 1/2 "
Conexión de gas:	3/8 "

**Caudal de gas**

Rango de medición:	110 L/h
Presión máx.:	2,5 bar

**Caudalímetro de agua de refrigeración**

Rango de medición:	100 L/h
--------------------	---------

**Puntos de medición**

Temperatura: Termopar con indicación digital

Entorno	T1
Agua de alimentación	T2

Vapor de la caldera	T3
Vapor en la entrada a la máquina de vapor	T4
Vapor en la salida de la máquina de vapor	T5
Condensado	T6
Entrada de agua refrigerante	T7
Salida de agua refrigerante	T8
Temperatura del gas de humo	Ta
Presión: Manómetro de Bourdon	
Presión de vapor de la caldera	P1
Caudal: Rotámetro	
Caudal de agua refrigerante	F1
Caudal de gas	F2
La determinación del volumen de vapor se realiza mediante una medición del condensado con un depósito de medición	
Potencia del generador	
Corriente	I
Tensión	U
Bombillas eléctricas (como carga)	
Tensión	6 V
Potencia	0,3 W
Desconexiones de seguridad:	
La desconexión de seguridad se activa cuando	
Temperatura de gas de escape:	>200 °C
Temperatura de las llamas:	<600 °C
Al exceder la temperatura de gas de escape puede volver a realizarse el encendido con el botón pulsador (pos. 21) y una llama después de que el sistema se haya enfriado.	

# Datos técnicos

## Unidad de control testo 350

	Unidad de control testo 350	Caja de salida analógica (salida en mA)
Temperatura de servicio	-5 ... +45 °C	-5 ... +45 °C
Temperatura de almacenamiento	-20 ... +50 °C	-20 ... +50 °C
Tipo de pila	Batería de litio	-
Tiempo de operatividad	5 h (sin conexión de radio)	-
Memoria	2 MB (250.000 lecturas)	-
Peso	440 g	305 g
Medidas	88 x 38 x 220 mm	200 x 89 x 37 mm
Clase de protección	IP 40	-

### Países con permiso para la transmisión por BLUETOOTH® para testo 350

El uso del módulo para transmisión por BLUETOOTH® utilizado por Testo está permitido exclusivamente en los países que se indican a continuación; ¡Es decir, la transmisión por BLUETOOTH® no está permitida en ningún otro país!

#### Europa incluyendo todos los países miembro de la Unión Europea

Bélgica, Bulgaria, Alemania, Dinamarca, Estonia, Grecia, Finlandia, Francia, Gran Bretaña, Irlanda, Italia, Letonia, Lituania, Luxemburgo, Malta, Países Bajos, Austria, Polonia, Portugal, Rumanía, Suecia, Eslovaquia, Eslovenia, España, República Checa, Turquía, Hungría, Chipre

#### Países europeos (EFTA)

Islandia, Liechtenstein, Noruega y Suiza

#### Países no europeos

Canadá, EE.UU., Japón, Ucrania, Australia, Colombia, El Salvador, México, Venezuela, Ecuador, Nueva Zelanda, Bolivia, República Dominicana, Perú, Chile, Cuba, Costa Rica, Nicaragua, Corea, Bielorrusia.

## Datos técnicos caja analizadora testo 350

	Rango de medición	Exactitud ±1 dígito	Resolución	Tiempo de reacción t <sub>90</sub>
<b>Medición de O<sub>2</sub></b>	0 ... +25 vol. % O <sub>2</sub>	±0.8 % del f.e. (0 ... +25 vol. % O <sub>2</sub> )	0,01 vol. % O <sub>2</sub> (0 ... +25 vol. % O <sub>2</sub> )	20 seg (t <sub>95</sub> )
<b>Medición de CO (con compensación de H<sub>2</sub>)*</b>	0 ... +10.000 ppm CO	±5 % del v.m. (+200 ... +2.000 ppm CO) ±10 % del v.m. (2.001 ... +10.000 ppm CO) ±10 ppm CO (0 ... +199 ppm CO)	1 ppm CO (0 ... +10.000 ppm CO)	40 seg
<b>Medición de CO<sub>bajo</sub> (con compen. de H<sub>2</sub>)*</b>	0 ... 500 ppm CO	±5 % del v.m. (+40 ... +500 ppm CO) ±2 % ppm CO (0 ... +39,9 ppm CO)	0.1 ppm CO (0 ... +500 ppm CO)	40 seg
<b>Medición de NO</b>	0 ... +4.000 ppm NO	±5 % del v.m. (+100 ... +1.999 ppm NO) ±10 % del v.m. (+2.000 ... +4.000 ppm NO) ±5 ppm CO (0 ... +99 ppm CO)	±1 ppm NO (0 ... +4.000 ppm NO)	30 seg
<b>Medición de NO<sub>bajo</sub></b>	0 ... +300 ppm NO	±5 % del v.m. (+40 ... +300 ppm NO) ±2 ppm NO (0 ... +39,9 ppm NO)	±0,1 ppm NO (0 ... +300 ppm NO)	30 seg
<b>Medición de NO<sub>2</sub></b>	0 ... +500 ppm NO <sub>2</sub>	±5 % del v.m. (+100 ... +500 ppm NO <sub>2</sub> ) ±5 ppm NO <sub>2</sub> (0 ... +9,99 ppm NO <sub>2</sub> )	±0,1 ppm NO <sub>2</sub> (0 ... +500 ppm NO <sub>2</sub> )	40 seg
<b>Medición de SO<sub>2</sub></b>	0 ... +5.000 ppm SO <sub>2</sub>	±5 % del v.m. (+100 ... +2.000 ppm SO <sub>2</sub> ) ±10 % del v.m. (2.001 ... +5.000 ppm SO <sub>2</sub> ) ±5 ppm SO <sub>2</sub> (0 ... +99 ppm SO <sub>2</sub> )	±1 ppm SO <sub>2</sub> (0 ... +5.000 ppm SO <sub>2</sub> )	30 seg
<b>Medición de CO<sub>2</sub> (IR)</b>	0 ... +50 vol. % CO <sub>2</sub>	±0.3 vol. % CO <sub>2</sub> +1 % del v.m. (0 ... 25 vol. % CO <sub>2</sub> ) ±0.5 vol. % CO <sub>2</sub> + 1.5 % del v.m. (>25 ... 50 vol. % CO <sub>2</sub> )	0,01 vol. % CO <sub>2</sub> (0 ... 25 vol. % CO <sub>2</sub> ) 0,1 vol. % CO <sub>2</sub> (>25 vol. % CO <sub>2</sub> )	10 seg
<b>Medición de H<sub>2</sub>S</b>	0 ... +300 ppm H <sub>2</sub> S	±5 % del v.m. (+40 ... +300 ppm) ±2 ppm (0 ... +39,9 ppm)	0,1 ppm (0 ... +300 ppm)	35 seg

\* Indicación de H<sub>2</sub> solo como indicador

	Dilución individual con factor de dilución seleccionable (x2, x5, x10, x20, x40)			Dilución de todos los sensores (factor 5)		
	Rango de medición	Exactitud ±1 dígito	Resolución	Rango de medición	Exactitud ±1 dígito	Resolución
<b>Medición de CO (con compen. de H<sub>2</sub>)</b>	según el factor seleccionado	±2 % del v.m. (error adicional)	1 ppm	2.500 ... 50.000 ppm	±5 % del v.m. (error adicional) rango de pres. -100 ... 0 mbar en la punta de la sonda	1 ppm
<b>Opción medición de CO<sub>bajo</sub> (con compen. de H<sub>2</sub>)</b>	según el factor de diluc. seleccionado		0.1 ppm	500 ... 2.500 ppm		0.1 ppm
<b>Medición de NO</b>			1 ppm	1.500 ... 20.000 ppm		1 ppm
<b>Medición de NO<sub>bajo</sub></b>			0.1 ppm	300 ... 1.500 ppm		0.1 ppm
<b>Medición de SO<sub>2</sub></b>			1 ppm	500 ... 25.000 ppm		1 ppm
<b>Medición de C<sub>x</sub>H<sub>y</sub></b>			Metano: 100 ... 40.000 ppm Propano: 100 ... 21.000 ppm Butano: 100 ... 18.000 ppm	10 ppm		
<b>Medición de NO<sub>2</sub></b>			500 ... 2.500 ppm		0.1 ppm	
<b>Medición de H<sub>2</sub>S</b>			200 ... 1.500 ppm		0.1 ppm	

# Datos técnicos

## Datos técnicos caja analizadora testo 350

	Rango de medición	Exactitud ±1 dígito	Resolución	Tiempo de reacción t <sub>90</sub>
<b>Rendimiento</b>	0 ... +120 %		0.1 % (0 ... +120 %)	
<b>Pérdi. por chimenea</b>	0 ... +99.9 % qA		0.1 % qA (-20 ... +99.9 % qA)	
<b>Cálculo de CO<sub>2</sub></b>	0 ... CO <sub>2</sub> máx vol. % CO <sub>2</sub>	calculado a partir de O <sub>2</sub> ±0.2 vol. %	0.01 vol. % CO <sub>2</sub>	40 seg
<b>Presión diferencial 1</b>	-40 ... +40 hPa	±1.5 % del v.m. (-40 ... -3 hPa) ±1.5 % del v.m. (+3 ... +40 hPa) ±0.03 hPa (-2.99 ... +2.99 hPa)	0.01 hPa (-40 ... +40 hPa)	
<b>Presión diferencial 2</b>	-200 ... +200 hPa	±1.5 % del v.m. (-200 ... -50 hPa) ±1.5 % del v.m. (+50 ... +200 hPa) ±0.5 hPa (-49.9 ... +49.9 hPa)	0.1 hPa (-200 ... +200 hPa)	
<b>Flujo</b>	0 ... +40 m/s		0.1 m/s (0 ... +40 m/s)	
<b>Presión absoluta (opc. cuando está equipado con sensor IR)</b>	-600 ... +1.150 hPa	±10 hPa	1 hPa	
<b>Cálculo del punto de rocío de los gases de combustión</b>	0 ... 99.9 °Ctd		0.1 °Ctd (0 ... 99.9 °Ctd)	
<b>Tipo K (NiCr-Ni)</b>	-200 ... +1.370 °C	±0.4 °C (-100 ... +200 °C) ±1 °C (-200 ... -100.1 °C) ±1 °C (+200.1 ... +1370 °C)	0.1 °C (-200 ... +1.370 °C)	
<b>Tipo S (Pt10Rh-Pt)</b>	0 ... +1.760 °C	±1 °C (0 ... +1.760 °C)	0.1 °C (0 ... +1.760 °C)	
<b>Sonda de temperatura ambiente (NTC)</b>	-20 ... +50 °C	±0.2 °C (-10 ... +50 °C)	0.1 °C (-20 ... +50 °C)	

## Datos técnicos sensor CxHy

Parámetro de medición	Rango de medición <sup>1</sup>	Exactitud ±1 dígito	Resolución	Demanda mín. de O <sub>2</sub> en el gas de combustión	Tiempo de reacción t <sub>90</sub>	Factor de repuesta <sup>2</sup>
<b>Metano</b>	100 ... 40.000 ppm	< 400 ppm (100 ... 4.000 ppm) < 10 % del v.m. (>4.000 ppm)	10 ppm	2 % + (2 × v.m. metano)	< 40 seg	1
<b>Propano</b>	100 ... 21.000 ppm			2 % + (5 × v.m. propano)		1.5
<b>butano</b>	100 ... 18.000 ppm			2 % + (6.5 × v.m. butano)		2

<sup>1</sup> Debe observarse el límite inferior de explosividad (LEL).

<sup>2</sup> El sensor de HC viene ajustado de fábrica para metano. Puede ser ajustado para otro gas (propano o butano) por el usuario.

## Datos técnicos generales

Medidas	330 x 128 x 438 mm	Long. manguera	máx. 16,2 m (corresponde a 5 extensiones de la manguera)
Peso	4.800 g	Carga máx. de humedad	+70 °C Temperatura del punto de rocío en la entrada de medición de la caja analizadora
Temperatura de almacenamiento	-20 ... +50 °C	Entrada del disparador	tensión 5...12 voltios (flancos ascendentes o descendentes) amplitud > 1 seg carga: 5 V/máx, 5 mA, 12 V/máx. 40 mA
Temperatura de servicio	-5 ... +45 °C	Garantía	
Material de la carcasa	ABS	Para medidor	2 años
Memoria	250.000 lecturas	Sensores de gas	CO, NO, NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S, C <sub>x</sub> H <sub>y</sub> : 1 año sensor de O <sub>2</sub> : 1,5 años sensor IR de CO <sub>2</sub> : 2 años
Suministro de corriente	fuelle de alimentación CA 100 V ... 240 V (50 ...60 Hz)	Bombas	0.5 años
Entrada de tensión CC	11 V ... 40 V	Válvulas magnéticas	0.5 años
Carga máx. de polvo	20 g/m <sup>3</sup> polvo en el gas de combustión	Termopares	1 año
Cálculo del punto de rocío	0 a 99 °Ctd	Pilas recargables	1 año
Sobrepresión máx.	máx. +50 mbar	Sondas	2 años
Depresión máx.	mín. -300 mbar	Véanse condiciones de la garantía	<a href="https://www.testo.com/guarantee">https://www.testo.com/guarantee</a>
Caudal bomba	1 l/min. con monitorización de flujo	Clase de protección	IP 40
		Duración batería	carga máxima aprox. 2,5 h