

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE
TELECOMUNICACIÓN



**Modelización y monitorización de la
calidad de la combustión en función de la
información luminosa existente en la
llama en calderas domésticas**

Tesis Doctoral



D. Javier Anduaga Salvatierra.

Licenciado en Electrónica, Electrotecnia y Automática



Directores:

D. Elías Muñoz Merino.

Dr. Ingeniero de Telecomunicación



D. Ander Echeverría Larrazabal.

Dr. Ciencias Físicas

Madrid, 2007

Tribunal nombrado por el Mgfc. y Excmo. Sr. Rector de la Universidad Politécnica de Madrid, el día 2 de 7 de . 2007

Presidente D. Fernando Calle Gines.

Vocal D.^a Isabel Alava Pérez

Vocal D. Javier Ballester Castañen

Vocal D. Juan Ángel Botas Echeverría

Secretario D. Álvaro de Guzmán Fernández González

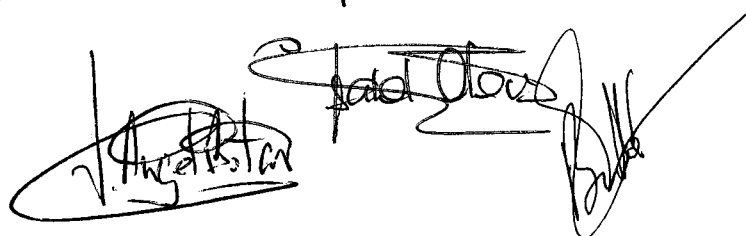
Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis el día 17 de Julio de 2007

en Madrid

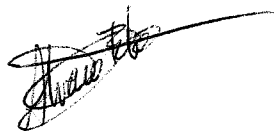
Calificación: SOBRESALIENTE CUM LAUDE P.U.



EL PRESIDENTE



LOS VOCALES



EL VOCAL SECRETARIO

RESUMEN

Las cada vez más fuertes exigencias en el campo de la seguridad y el ahorro energético están incrementando el interés existente en el desarrollo de sensorizaciones que monitoricen la forma en la que se desarrolla la combustión. Sin embargo, debido a diversos factores como precio, fiabilidad, vida de los sensores, etc., las sensorizaciones que se implementan actualmente en calderas domesticas contemplan el aspecto seguridad, pero no así el aspecto de calidad de la combustión.

En esta tesis se ha desarrollado un método de monitorización de la calidad de la combustión, aplicable a calderas domésticas, que permite conocer, de forma rápida y fiable, cómo se está desarrollando el proceso de combustión: si la combustión es limpia y energéticamente eficiente o, si por el contrario, la combustión es degradada y altamente contaminante. El método desarrollado se fundamenta en la relación existente entre la información contenida en las bandas luminosas correspondientes a los radicales de la llama y las condiciones de la combustión. Esta relación permite deducir la calidad de la combustión a partir de la radiación luminosa de la llama y su consigna de potencia.

En el desarrollo de la tesis se ha trabajado sobre dos tipos diferentes de combustiones: las generadas en quemadores de premezcla y de mezcla parcial. El estudio espectroscópico de sus llamas, junto con el análisis realizado por Componentes Principales, ha permitido deducir que las bandas del espectro de mayor interés para estas combustiones son las correspondientes a los radicales OH (310nm) y CH (432nm).

La luminosidad de estas bandas, así como la información de todo el espectro y la potencia específica han constituido las entradas de los diferentes modelos desarrollados: Regresión en Componentes Principales (PCR), Regresión por Mínimos Cuadrados Parciales (PLS), Regresión Lineal Múltiple Inversa (ILS) y Redes Neuronales, siendo estas últimas las que han proporcionado los modelos más precisos. Estas redes, a partir

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1 PROBLEMÁTICA	1
1.1.1 Combustión en el ámbito doméstico	1
1.1.2 Combustión industrial	4
1.2 OBJETIVO	9
1.3 PRESENTACIÓN DE LA MEMORIA	11
1.4 OPORTUNIDAD	12
1.5 METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN	14
2. ESTADO DEL ARTE	18
2.1 CARACTERIZACIÓN DE LLAMA	18
2.1.1 Geometría de la llama	18
2.1.2 Campo de velocidades de la llama	19
2.1.3 Temperatura de la llama	20
2.1.4 Radicales de la llama	21
2.2 SENSORIZACIÓN EN COMBUSTIÓN	27
2.2.1 Sensorización antes de la combustión	28
2.2.2 Sensorización durante la combustión	28
2.2.3 Sensorización tras la combustión	29
2.2.4 Sensores puntuales	31
2.3 SENSORIZACIÓN ACTUAL EN CALDERAS DOMÉSTICAS	33
2.3.1 Detección de llama	35
2.3.2 Monitorización de la combustión	36
2.4 MÉTODOS PARA LA MONITORIZACIÓN ÓPTICA DE LA COMBUSTIÓN	37
2.4.2 Pírometría óptica: Radiación de cuerpo negro	41
2.4.3 Espectroscopia de emisión de la llama	42
2.4.4 Investigación en calderas domésticas	51
2.5 REDES NEURONALES EN LA COMBUSTIÓN	52
2.6 CONCLUSIONES	54
3. PLATAFORMAS DE ENSAYO PARA EL ANÁLISIS DE LA COMBUSTIÓN	56
3.1 PLATAFORMA 1: CALDERA CON QUEMADOR DE PREMEZCLA DE GAS NATURAL	58
3.1.1 Combustión en un quemador de premezcla	58
3.1.2 Circuito de combustión	62
3.1.3 Captación de la luminosidad de la llama	68
3.1.4 Plataforma de ensayos	69
3.2 PLATAFORMA 2: CALDERA CON QUEMADOR DE MEZCLA PARCIAL A GAS PROPANO	70
3.2.1 Combustión en un quemador de mezcla parcial	70
3.2.2 Circuito de combustión	73
3.2.3 Potencia específica del quemador	76
3.2.4 Captación de la luminosidad de la llama	77
3.2.5 Plataforma de ensayos	78
3.3 SISTEMAS DE MEDIDA	80
3.3.1 Analizador de gases	80
3.3.2 Espectrómetro	81
4. ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE COMBUSTIÓN	86
4.1 MÉTODO	86
4.2 MAGNITUDES QUE INDICAN LA CALIDAD DE LA COMBUSTIÓN	88
4.3 DATOS ADQUIRIDOS EN LAS COMBUSTIONES	91
4.4 ANÁLISIS DE LA COMBUSTIÓN DE PREMEZCLA A GAS NATURAL	94
4.4.1 Caracterización espectral de la llama	94
4.4.2 Condiciones de experimentación	96

4.4.3	Forma de la llama	98
4.4.4	Pretratamiento de los datos.....	101
4.4.5	Análisis de componentes principales	102
4.4.6	Análisis del comportamiento de los radicales	105
4.4.7	Análisis del comportamiento de las variables	108
4.5	ANÁLISIS DE LA COMBUSTIÓN DE MEZCLA PARCIAL DE GAS PROPANO.....	116
4.5.1	Caracterización espectral de la llama	116
4.5.2	Condiciones de experimentación	119
4.5.3	Forma de la llama y selección de la altura de adquisición.....	121
4.5.4	Pretratamiento de los datos.....	124
4.5.5	Análisis de Componentes Principales	125
4.5.6	Análisis del comportamiento de los radicales	127
4.5.7	Análisis del comportamiento de las variables	130
4.6	CONCLUSIONES	139
5.	MODELIZACIÓN DE LA CALIDAD DE LA COMBUSTIÓN	141
5.1	INTRODUCCIÓN	141
5.2	PROCESO DE MODELIZACIÓN	145
5.3	PARÁMETROS PARA LA EVALUACIÓN DEL MODELO	146
5.3.1	Error estándar de calibración y estimación	147
5.3.2	Coeficiente de determinación	149
5.4	MODELOS DE LA CALIDAD DE LA COMBUSTIÓN	150
5.4.1	Regresión en componentes principales (PCR)	150
5.4.2	Regresión por Mínimos cuadrados Parciales (PLS)	153
5.4.3	Regresión lineal múltiple inversa (ILS)	156
5.4.4	Redes neuronales. Diseño y aprendizaje.....	159
5.4.5	Multilayer perceptron	163
5.4.6	Modelización de la calidad de la combustión por redes neuronales.....	169
5.5	MODELIZACIÓN DE LA COMBUSTIÓN DE PREMEZCLA CON GAS NATURAL.....	178
5.5.1	Regresión en Componentes Principales (PCR)	178
5.5.2	Regresión por mínimos cuadrados parciales (PLS).....	180
5.5.3	Regresión lineal múltiple inversa (ILS).....	181
5.5.4	Redes Neuronales	183
5.5.5	Conclusiones	188
5.6	MODELIZACIÓN DE LA COMBUSTIÓN DE MEZCLA PARCIAL CON GAS PROPANO.....	190
5.6.1	Regresión en componentes principales (PCR)	190
5.6.2	Regresión por mínimos cuadrados parciales (PLS).....	192
5.6.3	Regresión lineal múltiple inversa (ILS).....	193
5.6.4	Redes neuronales.....	195
5.6.5	Conclusiones	197
5.7	CONCLUSIONES	198
6.	SISTEMA SENSOR BASADO EN COMPONENTES COMERCIALES.....	201
6.1	INTRODUCCIÓN	201
6.2	DISEÑO DEL SISTEMA SENSOR	202
6.2.1	Transducción	203
6.2.2	Acondicionamiento de las señales	214
6.2.3	Adquisición y tratamiento	220
6.3	ADAPTACIÓN DEL SISTEMA SENSOR	228
6.3.1	Adaptación a la plataforma de combustión de premezcla	229
6.3.2	Adaptación a la Plataforma de Combustión de Mezcla Parcial	233
6.4	ENSAYOS CON EL SISTEMA SENSOR Y RESULTADOS	237
6.4.1	Ensayos en la plataforma de combustión de premezcla.....	237
6.4.2	Ensayos en la plataforma de combustión de mezcla parcial	248
6.5	CONCLUSIONES	255
7.	SISTEMA SENSOR GaN.....	259
7.1	OPORTUNIDAD: TECNOLOGÍA GaN	260
7.2	DISEÑO DEL SISTEMA SENSOR BASADO EN FOTODETECTORES GaN.....	263

7.2.1 Transducción	263
7.2.2 Acondicionamiento de las señales	277
7.2.3 Adquisición y Tratamiento	279
7.3 ADAPTACIÓN DEL SISTEMA SENSOR	279
7.4 ENSAYOS CON EL SISTEMA SENSOR GaN Y RESULTADOS.....	280
7.4.1 Ensayos en la plataforma de combustión de premezcla.....	280
7.4.2 Ensayos en la plataforma de combustión de mezcla parcial	288
7.5 AUTOCALIBRACIÓN. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO	295
7.6 CONCLUSIONES	299
8. CONCLUSIONES.....	302
8.1 TRABAJO FUTURO	307
9. REFERENCIAS	310