



TEMA 2: SEGUIMIENTO DE LOS PROCESOS DE COMBUSTIÓN

MATERIALES DE ESTUDIO

Blanca M^a Caballero Iglesias
Maite de Blas Martín

Escuela de Ingeniería de Bilbao
Ingeniería Química y del Medio Ambiente

SEGUIMIENTO DE LOS PROCESOS DE COMBUSTIÓN

2.1. Productos de la combustión

2.2. Analizadores de gases de combustión

2.2.1. Cálculo del exceso de aire

2.3. Análisis de la opacidad de los gases de combustión

2.4. Diagramas de combustión

2.4.1. Recta de Grebbel

2.4.2. Diagrama de Bunte

2.4.3. Diagrama de Ostwald

PRODUCTOS DE LA COMBUSTIÓN

PRODUCTOS DE LA OXIDACIÓN COMPLETA:

- ✓ CO₂
 - ✓ H₂O
 - ✓ SO₂
- } **Gaseosos**

Figura 2.1.
Central térmica de As Pontes
- A Coruña. Fotografía
tomada por Amio Cajander y
publicada en Flickr con
licencia CC BY 2.0 [1]



PRODUCTOS DE LA OXIDACIÓN INCOMPLETA: "Inquemados"

- ✓ CO
 - ✓ H₂
 - ✓ Hidrocarburos ligeros (C_nH_m)
 - ✓ Partículas de carbono (C)
 - ✓ Hidrocarburos pesados (C_nH_m)
- } **Gaseosos**
- } **Sólidos**

Aire insuficiente

Quemador en mal
funcionamiento

Quemador inadecuado

OTROS PRODUCTOS

- ✓ Óxidos de nitrógeno (NO_x) → Altas temperaturas

PRODUCTOS DE LA COMBUSTIÓN

COMBUSTIÓN COMPLETA:

✓ Exceso de aire bajo → rendimiento térmico bajo

COMBUSTIÓN INCOMPLETA:

✓ Exceso de aire < combustión completa →

- Rendimiento térmico óptimo
- "Inquemados" → CO

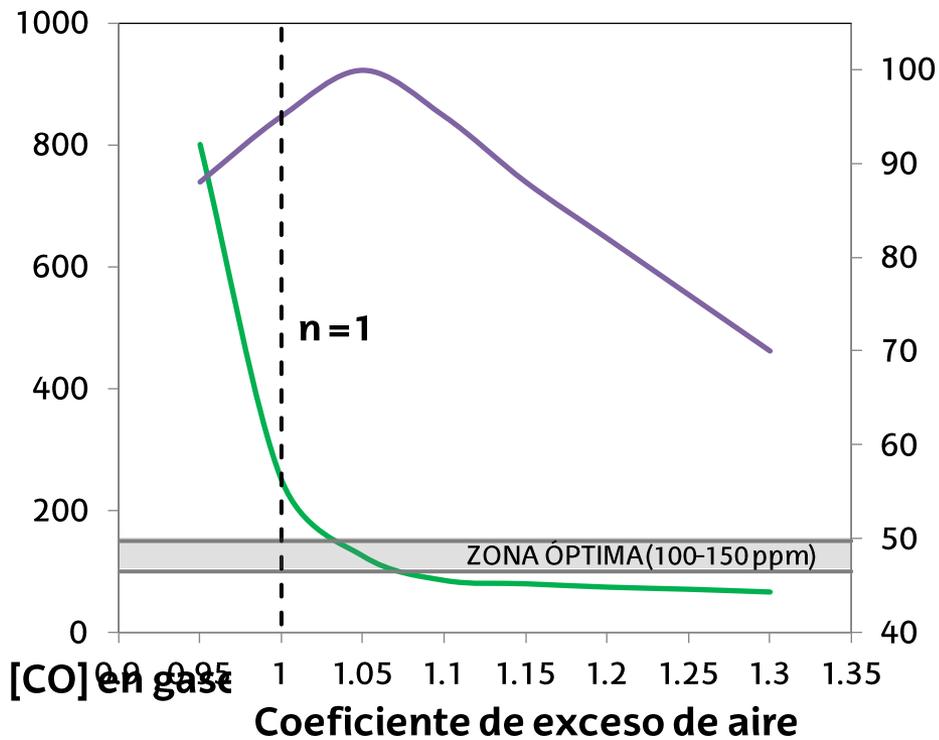


Figura 2.2. Concentración de monóxido de carbono en los gases de combustión y rendimiento térmico vs. exceso de aire. Ejemplo para una caldera doméstica de gas natural. Imagen propia

R

PRODUCTOS DE LA COMBUSTIÓN

HOLLIN: partículas carbonosas de 100 nm-5 μm que pueden depositarse en los conductos de evacuación de calderas, tubo de escape de vehículos, etc.

- ✓ Son componentes indeseables de los gases de combustión
- ✓ Dificultan la recuperación del calor de los gases, ya que se forman depósitos en las superficie de intercambio → limpieza periódica
- ✓ En grandes cantidades el rendimiento térmico disminuye



Figura 2.3. Fotografía tomada por Roberto Venturini y publicada en Flickr con licencia CC BY 2.0 [\[2\]](#)

Emisión de hollín

Figura 2.4. Fotografía publicada en Wikimedia, de dominio público [\[3\]](#)



PRODUCTOS DE LA COMBUSTIÓN

ÓXIDOS DE NITRÓGENO: NO_x

- **NO**: óxido nítrico $\approx 90\%$ NO
(nº de oxidación del nitrógeno: +2)
- **NO₂**: dióxido de nitrógeno
(nº de oxidación del nitrógeno: +4)

 Oxidación

- ✓ Tóxicos
- ✓ Precursores de lluvia ácida, partículas finas y ozono troposférico

Mecanismos de formación

1) NO_x térmicos. Se producen por oxidación del nitrógeno del aire, cuando la combustión ocurre a altas temperaturas ($>1000\text{ }^\circ\text{C}$)

- ✓ Son habituales cuando se queman combustibles líquidos y gaseosos
- ✓ Es el mecanismo principal de formación de NO_x ($\approx 90\%$ del total de los NO_x)

2) NO_x del combustible. Se forman a partir del nitrógeno que contiene el combustible, por reacción del mismo con el oxígeno.

- ✓ Son habituales cuando se quema combustible de alto contenido en nitrógeno, por ejemplo carbón.

3) NO_x súbito (*prompt NO_x*). Se producen en el frente de llama, por reacción del nitrógeno molecular con los radicales libres formados en la reacción.

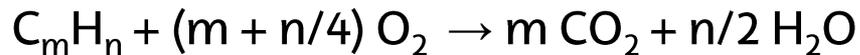
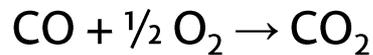
PRODUCTOS DE LA COMBUSTIÓN

MÁXIMO RENDIMIENTO: mínimo contenido de

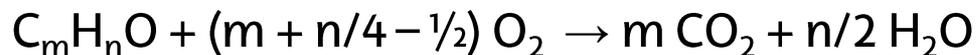
- CO
- C_nH_m
- NO_x

Uso de **convertidores catalíticos** en vehículos,
catalizadores de Rh y Pt:

1) Oxidación de CO e hidrocarburos:



*Oxidación de aldehídos y cetonas:



2) Reducción de óxidos de nitrógeno:

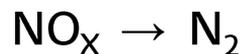


Figura 2.5. Convertidor catalítico
Fotografía de dominio público
publicada en Wikimedia [\[4\]](#)

ANALIZADORES DE GASES DE COMBUSTIÓN

ANÁLISIS CONTÍNUO DE GASES DE COMBUSTIÓN: determinar las variables que caracterizan las combustiones

Toma de muestras: { - Filtro: eliminación de partículas sólidas
- Purga: separar el vapor de agua por condensación
Análisis de **gases de combustión secos** 

✓ **ANALIZADORES DIGITALES:** en inspecciones técnicas, para el análisis de gases (secos) de escape de vehículos, calderas domésticas y gases de combustión en procesos industriales.

*Además de la temperatura se miden CO_2 , O_2 y CO (entre otros)

✓ **APARATO ORSAT:** análisis de gases en laboratorio o para comparación con analizadores que no utilizan reactivos para la absorción: { - CO_2 , O_2 , CO
- N_2 (por diferencia)

*Orsat de 6 cámaras: { - CO_2 , O_2 , H_2 , C_nH_m , CH_4 , CO
- N_2 (por diferencia)

ANALIZADORES DE GASES DE COMBUSTIÓN

APARATO ORSAT de 3 cámaras

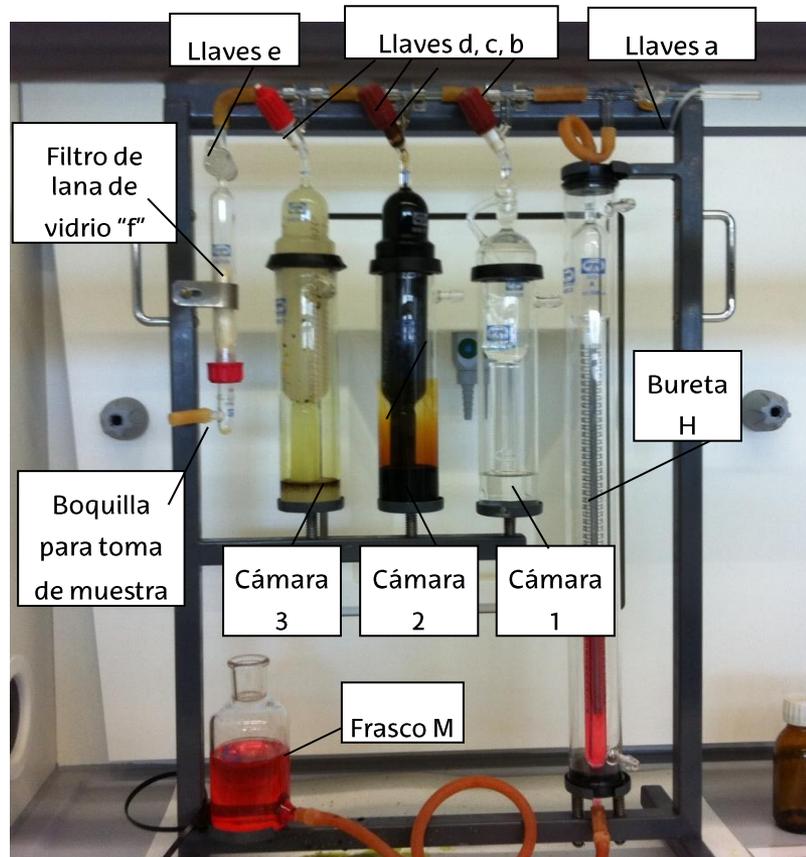


Figura 2.6. Aparato Orsat.
Imagen propia

Descripción:

- Bureta "H" de 100 mL con numeración ascendente y graduación de 0,1 mL
- Cámaras de borboteo con disoluciones absorbente s:

- | | |
|---|-------------------|
| 1) Hidróxido potásico (KOH) | → O ₂ |
| 2) Pirogalato potásico (KC ₆ H ₅ O ₃) | → CO ₂ |
| 3) Cloruro cuproso (CuCl ₂) | → CO |

- "f": filtro de lana de vidrio
- "M": frasco de nivel unido mediante un tubo de goma a la bureta medidora
- "e": llave de toma de muestra
- "b", "c", "d": llaves de las cámaras 1, 2 y 3
- "a": llave de conexión a la atmósfera

ANALIZADORES DE GASES DE COMBUSTIÓN

APARATO ORSAT de 3 cámaras

Procedimiento:

- 1.- Llenado lavadores con reactivos
 - 2.- Toma de muestra de gas
 - 3.- Determinación del CO_2
 - 4.- Determinación del O_2
 - 5.- Determinación del CO
- *Determinación de N_2 : por diferencia

Video explicativo del procedimiento de análisis de gases de combustión mediante el aparato Orsat [5] (Recurso propio)



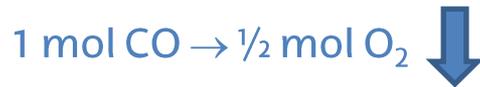
ANALIZADORES DE GASES DE COMBUSTIÓN

CÁLCULO DEL EXCESO DE AIRE → "n": coeficiente de exceso de aire

N₂: se considera "inerte" en los cálculos de combustión

$$\frac{\text{N}_2 \text{ en el exceso de aire}}{\text{N}_2 \text{ en el aire teórico}} = \frac{0,79(n-1) A_T}{0,79A_T} = n-1 \rightarrow \text{"n"}$$

O₂: combustión completa: $C + O_2 \rightarrow CO_2$ $\frac{(\%O_2)}{100} \cdot V_0 = O_2 \text{ en exceso}$



V₀: volumen de gases de combustión secos

$$\frac{(\%O_2)}{100} V_0 = O_2 \text{ en exceso} + \frac{1}{2} \cdot \frac{(\%CO)}{100} \cdot V_0$$

↓

$$O_2 \text{ en exceso} = \frac{21}{100} \cdot (n-1) \cdot A_T \rightarrow \text{"n"}$$

ANALIZADORES DE GASES DE COMBUSTIÓN

CÁLCULO DEL EXCESO DE AIRE → "n": coeficiente de exceso de aire

Análisis de gases (Orsat): % O₂, % CO, % CO₂, % N₂ (por diferencia). Balances:

1) Balance de (volumen CO₂ + volumen CO) = constante,
independientemente del tipo de combustión → V₀

$$\frac{(\%CO_2 + \%CO)}{100} V_0 = \frac{(\%CO_2)_{\text{combustión teórica}}}{100} V_T$$

2) Balance de N₂: $\frac{(\%N_2)}{100} V_0 = \frac{79}{100} A_0 + (N_2)_{\text{combustible}} \rightarrow A_0$
ó

Balance de O₂: $\frac{(\%O_2)}{100} V_0 = \frac{21}{100} (n-1) A_T + \frac{1}{2} \frac{(\%CO)}{100} V_0 \rightarrow A_T$

3) Cálculo de "n": $n = \frac{A_0 \text{ aire utilizado}}{A_T \text{ aire teórico}}$

ANALIZADORES DE GASES DE COMBUSTIÓN

OTROS ANALIZADORES

- 1) Registradores de CO₂
- 2) Analizadores por conductividad térmica
- 3) Análisis por infrarrojos (IR) Ejemplo: el contenido de O₂ y CO₂ en gases de combustión puede determinarse mediante análisis de IR que se basa en la capacidad de las moléculas para absorber radiación IR
- 4) Determinación del O₂

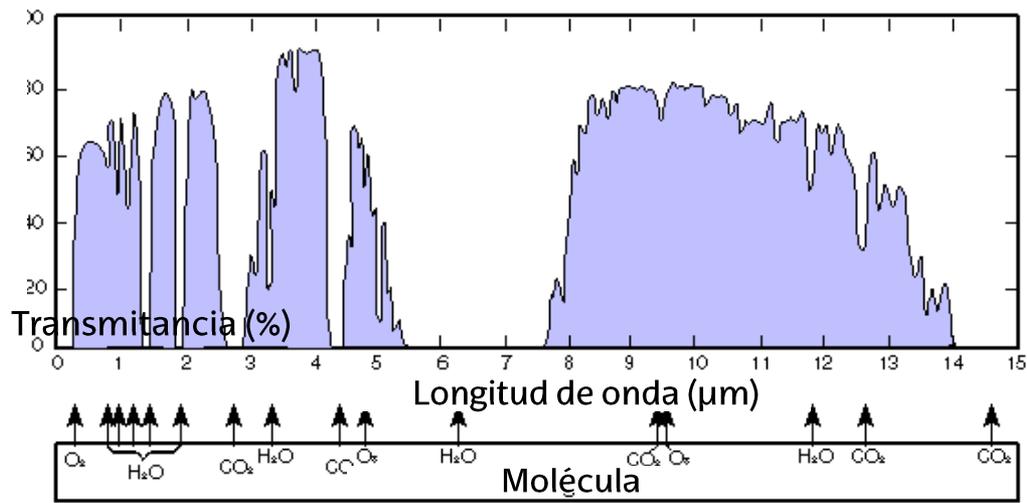


Figura 2.7. Bandas de absorción IR de diferentes gases atmosféricos. Imagen adaptada a partir de [6], publicada en Wikimedia y de dominio público

ANÁLISIS DE LA OPACIDAD DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN

Opacidad de gases: medida de la luz transmitida a través de los gases de combustión → indicativo del contenido en **hollín**

✓ **ENSAYO RINGELMANN:** un observador situado a 15 m de la chimenea, con luz diurna, compara el color de los gases que salen de chimenea con unas rejillas patrón (nº1-nº5)

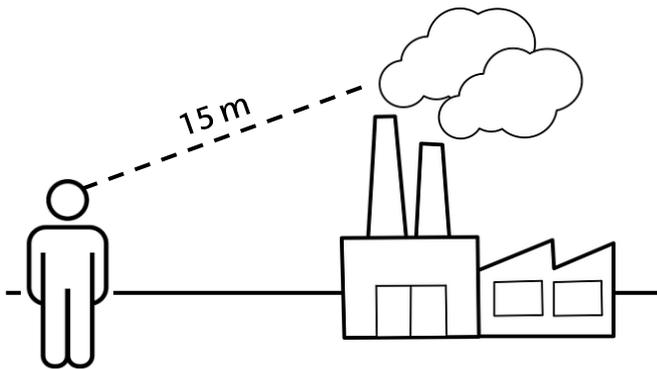


Figura 2.8. Ensayo Ringelmann. Imagen propia a partir de vectores publicados en Pixabay [7] y [8]

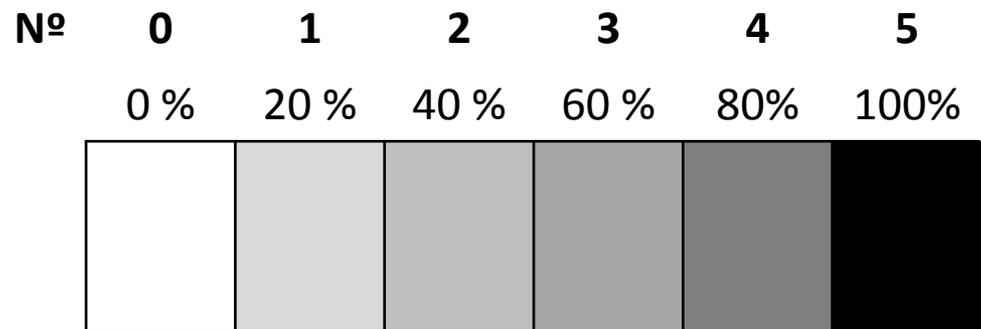


Figura 2.9. Representación de los patrones de Ringelmann: 1-4 (escala de grises), 5 (negro). Imagen propia

ANÁLISIS DE LA OPACIDAD DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN

✓ **ENSAYO BACHARACH:** toma de muestras por medio de una bomba. Los gases se hacen pasar a través de un filtro y se compara el color final del filtro con patrones de referencia (0-9).

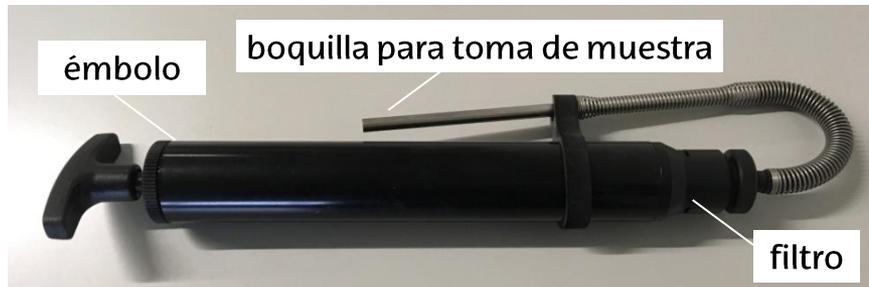


Figura 2.10. Bomba de muestreo para la medida de la opacidad. Imagen propia

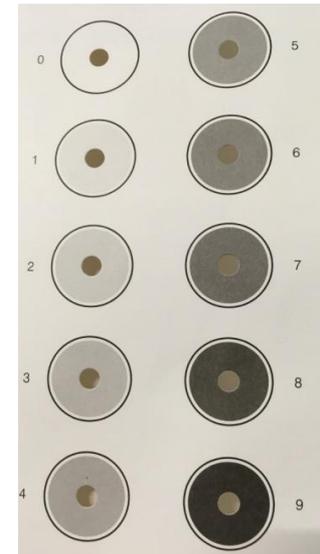


Figura 2.11. Escala de opacidad Bacharach (0-9). Imagen propia

El índice Bacharach permite estimar las pérdidas energéticas por inquemados. Estimación a partir del procedimientos experimentales:

Tabla 2.1. Estimación de pérdidas de calor a partir del índice Bacharach, IDAE [9]

Índice Bacharach	1	2	3	4	5	6
% pérdidas de calor sobre combustible	0,7	1,3	2,4	3,5	4,5	6

DIAGRAMAS DE COMBUSTIÓN

Diagrama de combustión: representación gráfica de los diferentes procesos de combustión de un combustible determinado

Utilidad: cálculos de combustión de manera rápida y precisa

"n" (exceso de aire) ↔ composición de gases de combustión secos

*Combustibles con bajo contenido en azufre, hidrógeno y nitrógeno

✓ **RECTA DE GREBBEL.** Combustión completa con exceso de aire → "n"

✓ **DIAGRAMA DE BUNTE.** Combustión completa con exceso de aire → "n"

✓ **DIAGRAMA DE OSTWALD.** Combustión incompleta → %CO, "n"

Combustibles
sólidos y líquidos

Otros diagramas:

✓ **DIAGRAMA DE KELLER.** Combustión incompleta → %CO, %H₂, "n"

✓ **DIAGRAMA DE KISSEL.** Combustión incompleta → %CO, "n"

Combustibles
gaseosos

DIAGRAMAS DE COMBUSTIÓN

RECTA DE GREBBEL {

- Eje abscisas: %O₂ en gases secos
- Eje ordenadas: %CO₂ en gases secos

Punto A (0, k): **combustión teórica**. Se consume todo el O₂ y el % CO₂ en los gases de combustión secos es el máximo

Punto B (21, 0): **combustión completa** con "n" → ∞. Los gases de combustión apenas contienen CO₂, está diluido, siendo su composición aprox. la del aire

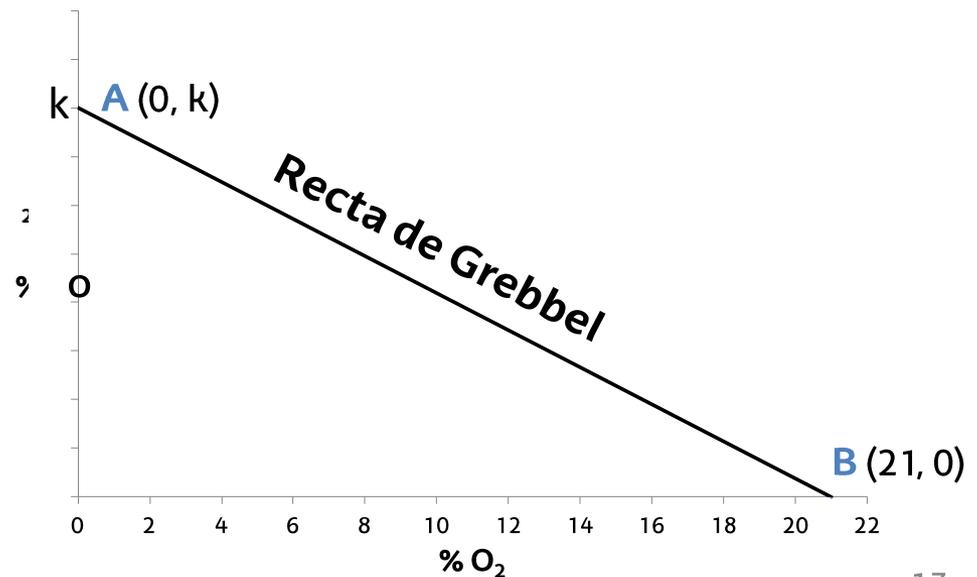
Pendiente: -k/21

Ecuación de la recta:

$$y - k = -k/21 (x - 0)$$

$$y = -\frac{k}{21}x + k$$

Exceso de aire: $n = \frac{k}{y}$



DIAGRAMAS DE COMBUSTIÓN

RECTA DE GREBBEL: ejemplos para diferentes combustibles

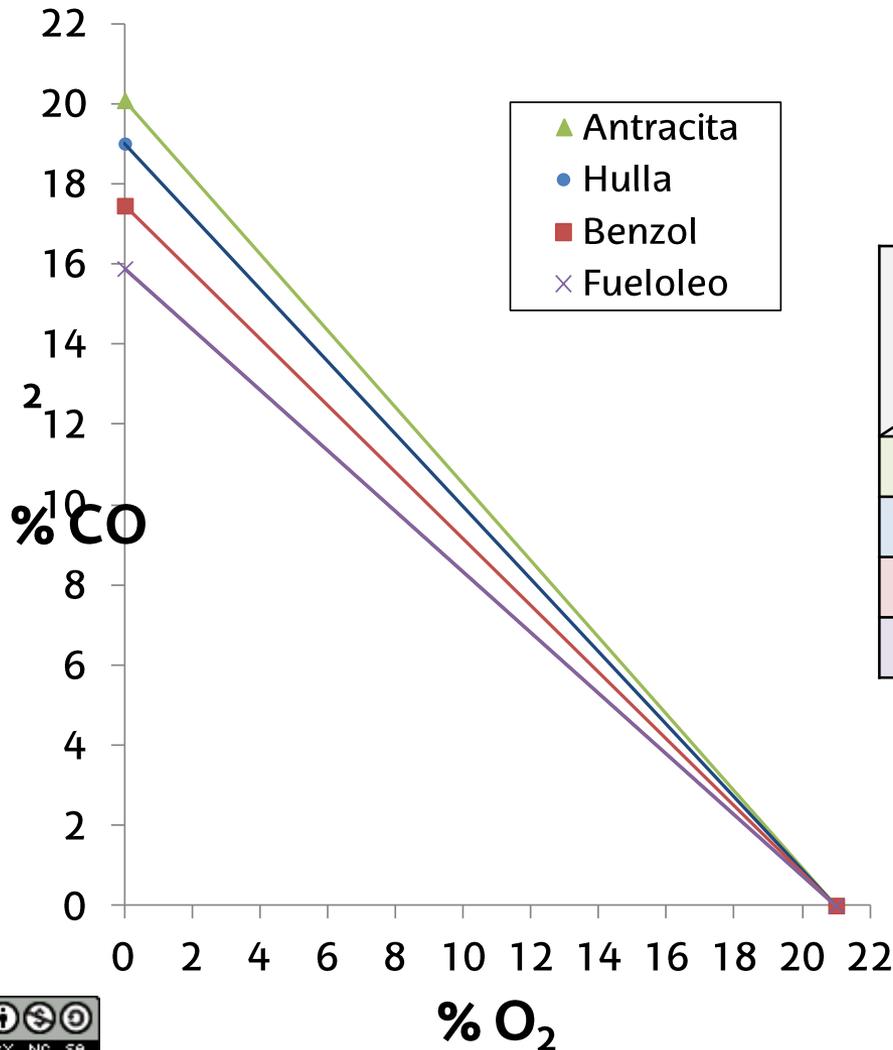


Tabla 2.2. Composición y contenido de CO₂ en gases de combustión para distintos combustibles

Combustible Contenido	Combustible: base seca y libre de cenizas (%)*			Gases: base seca
	% C	% H	% O	(% CO ₂) _{máx}
Antracita	95	2	3	20,10
Hulla	85	5	10	19,02
Benzol	92,1	7,9	0	17,47
Fuelóleon ^o 2	87	12	1	15,90

*Se han despreciado los contenidos de N y S (< 1%)

DIAGRAMAS DE COMBUSTIÓN

DIAGRAMA DE BUNTE {

- Eje abscisas: %O₂ + %CO₂ en gases secos
- Eje ordenadas: %CO₂ en gases secos

$$x' = x + y = \%O_2 + \%CO_2$$

Punto A (k, k): combustión teórica

Punto B (21, 0): combustión completa con "n" → ∞

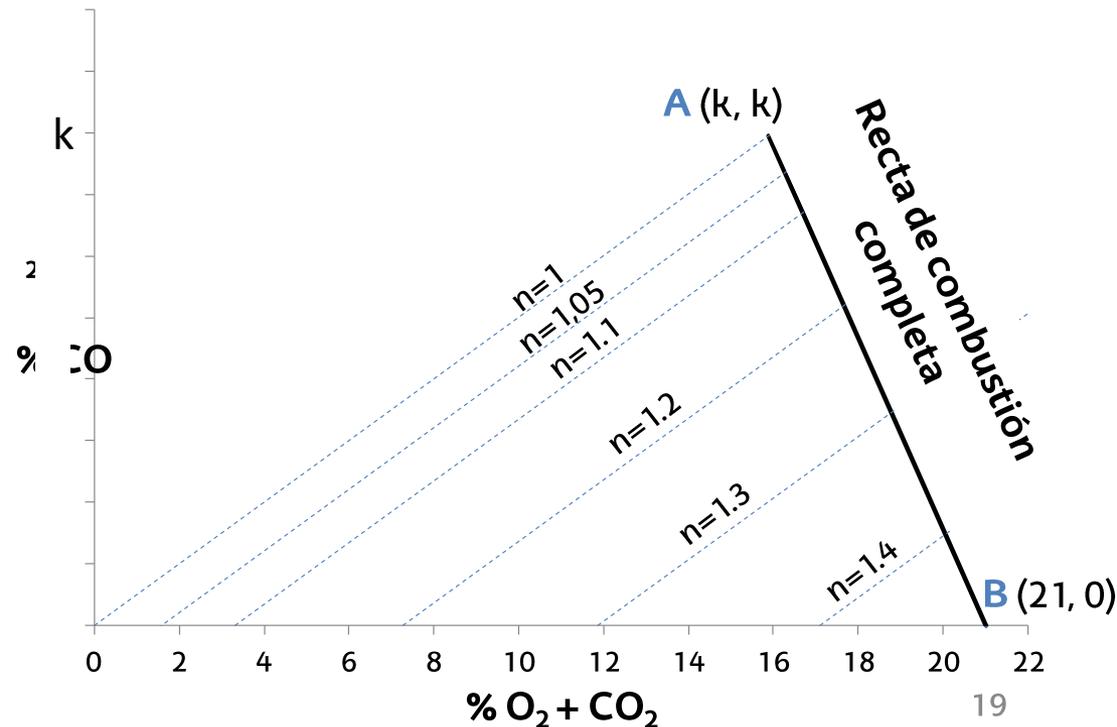
Pendiente: $\frac{-k}{21-k}$

**Ecuación de la recta
(a partir de Grebbel):**

$$y = -\frac{k}{21}x + k = -\frac{k}{21}(x' - y) + k$$

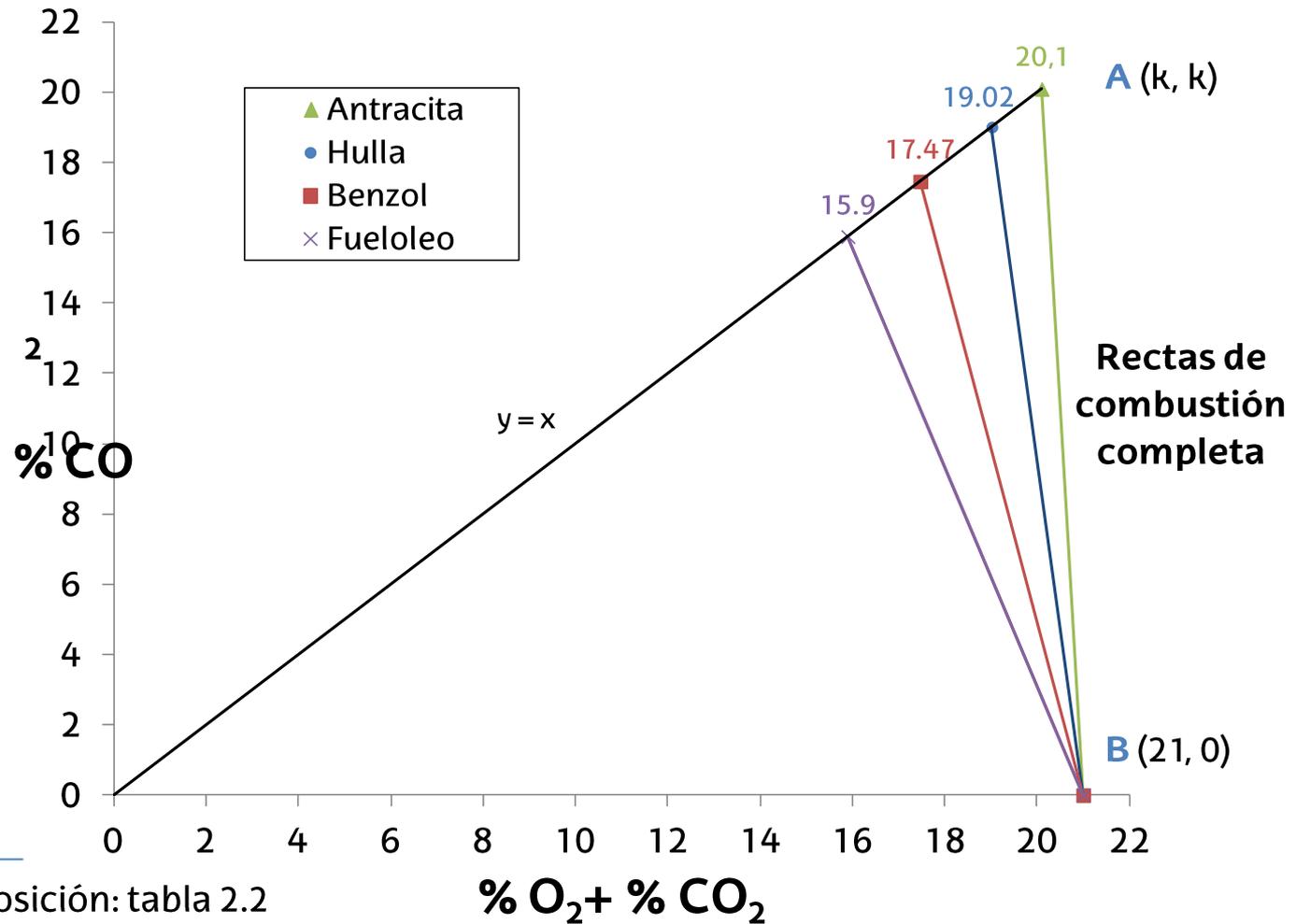
$$y(21-k) = k(21-x')$$

*Rectas paralelas a x=y
(combustión completa con
distintos valores de "n")



DIAGRAMAS DE COMBUSTIÓN

DIAGRAMA DE BUNTE: ejemplos para diferentes combustibles*



*Datos de composición: tabla 2.2

DIAGRAMAS DE COMBUSTIÓN

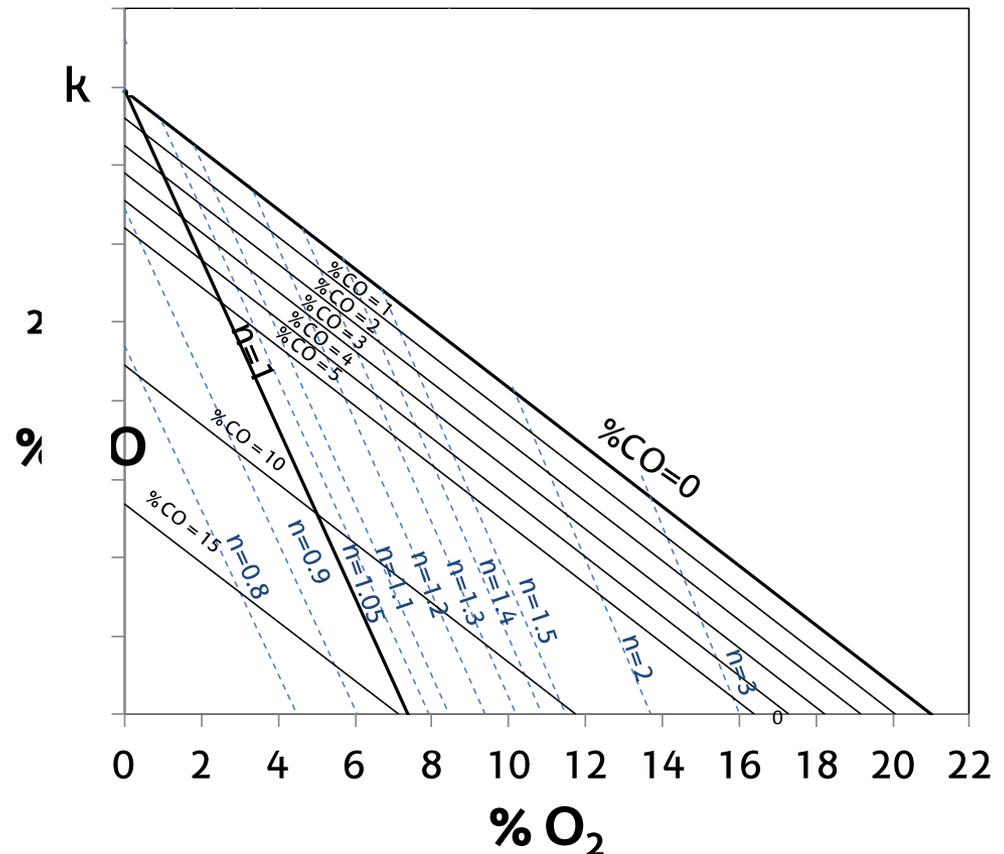
DIAGRAMA DE OSTWALD

- Eje abscisas: %O₂ en gases secos
- Eje ordenadas: %CO₂ en gases secos

- Combustibles líquidos y sólidos
- Combustión incompleta: cálculo del % CO en gases secos y exceso de aire ("n")

Familias de rectas:

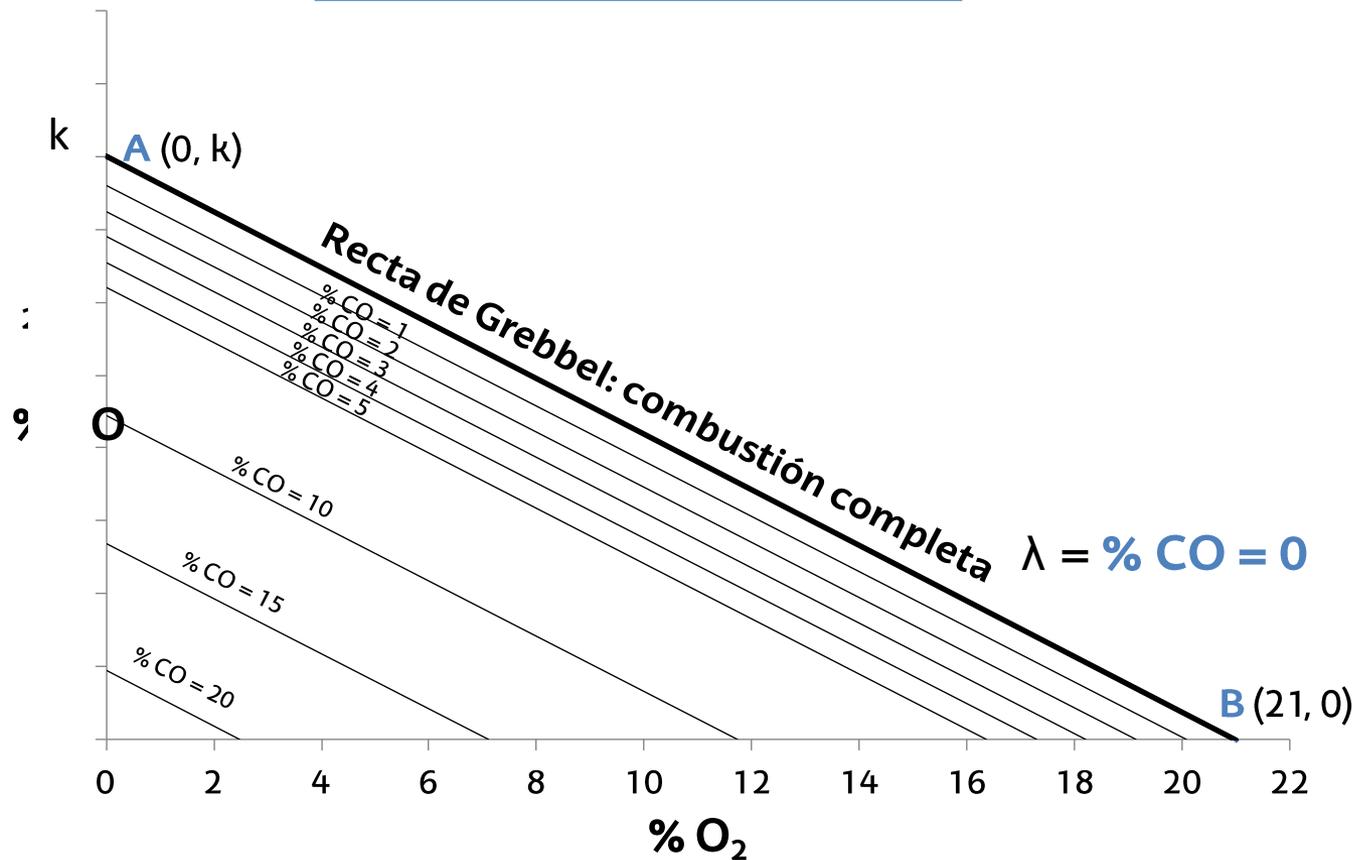
- 1) % CO = constante
- 2) "n" = constante



DIAGRAMAS DE COMBUSTIÓN

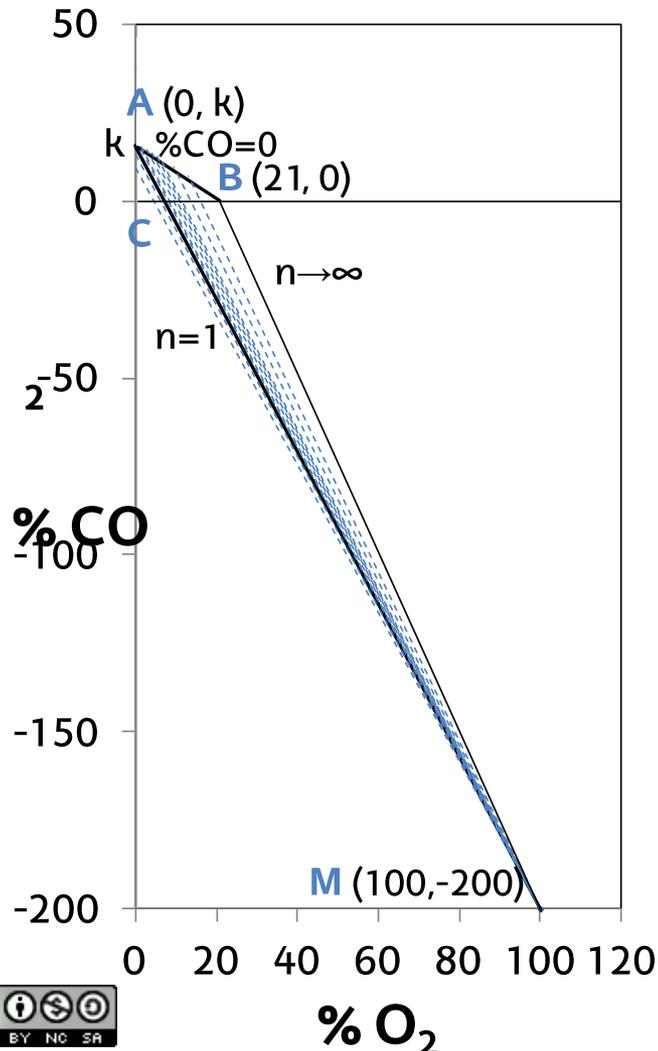
DIAGRAMA DE OSTWALD: 1ª familia de rectas $(\%CO)_{\text{gases secos}} = \lambda = \text{constante}$

$$y = -\frac{k}{21}x + \lambda(0,0188k - 1) + k$$



DIAGRAMAS DE COMBUSTIÓN

DIAGRAMA DE OSTWALD: 2ª familia de rectas, "n" = constante



$$y = -\frac{(k+2) V_T + 2(n-1) A_T}{V_T + 0,79(n-1) A_T} x + \frac{k V_T + 42(n-1) A_T}{V_T + 0,79(n-1) A_T}$$

Punto **A** (0, k): combustión teórica

$$\%CO = 0, n=1$$

Punto **B** (21, 0): combustión completa,

$$\%CO_2 = 0, n \rightarrow \infty$$

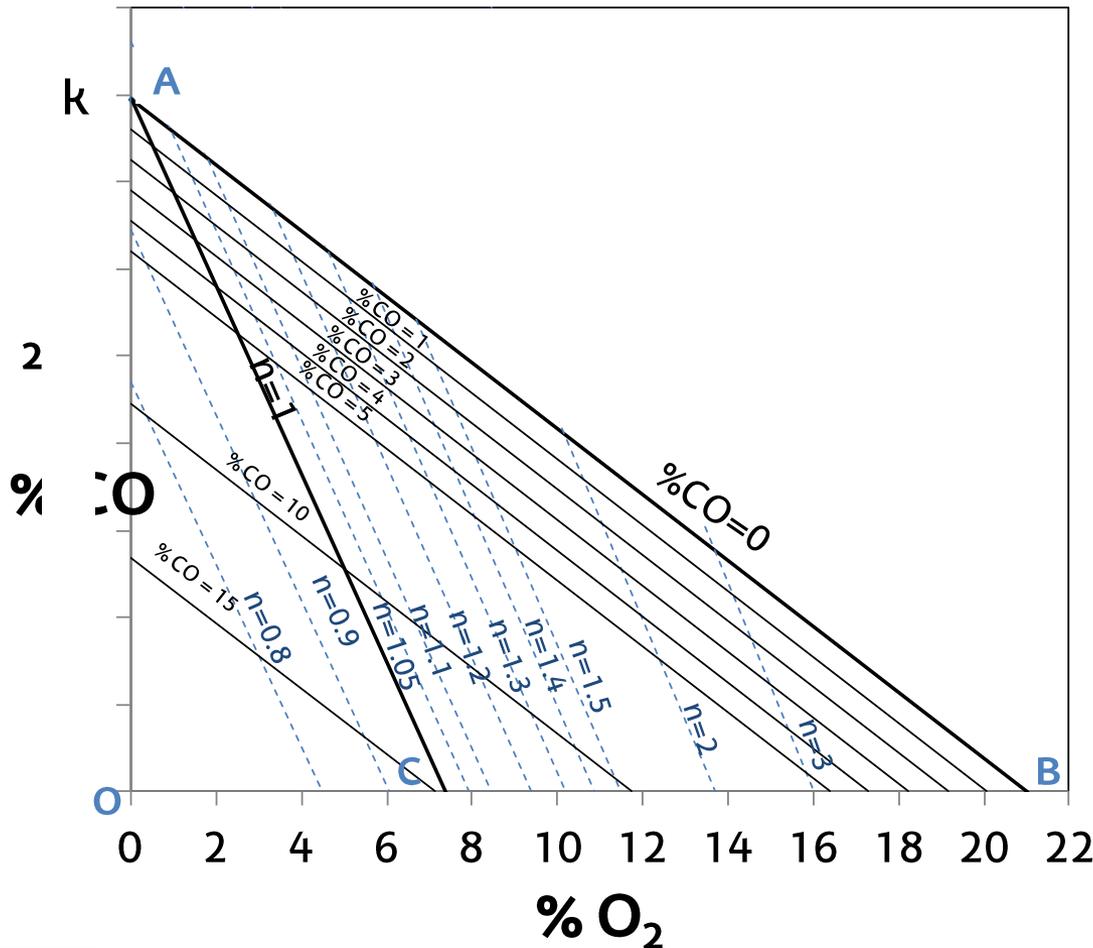
Punto **C**: combustión incompleta (con A_T)

$$\%CO_2 = 0, n = 1$$

Punto **M** (100, -200): punto de corte de la 2ª familia de rectas, que no son paralelas aunque lo parecen porque el punto está muy alejado del origen

DIAGRAMAS DE COMBUSTIÓN

DIAGRAMA DE OSTWALD: zoom de la figura anterior



RECTAS

AB: recta de Grebbel (combustión completa)
AC: todas las combustiones con A_T ($n=1$). Excepto el punto A, son todas incompletas

REGIONES (triángulos)

AOC: combustiones incompletas con defecto de aire ($n < 1$)

ABC: combustiones imperfectas con exceso de aire ($n > 1$)

DIAGRAMAS DE COMBUSTIÓN

DIAGRAMA DE OSTWALD: ejemplo, fuelóleo

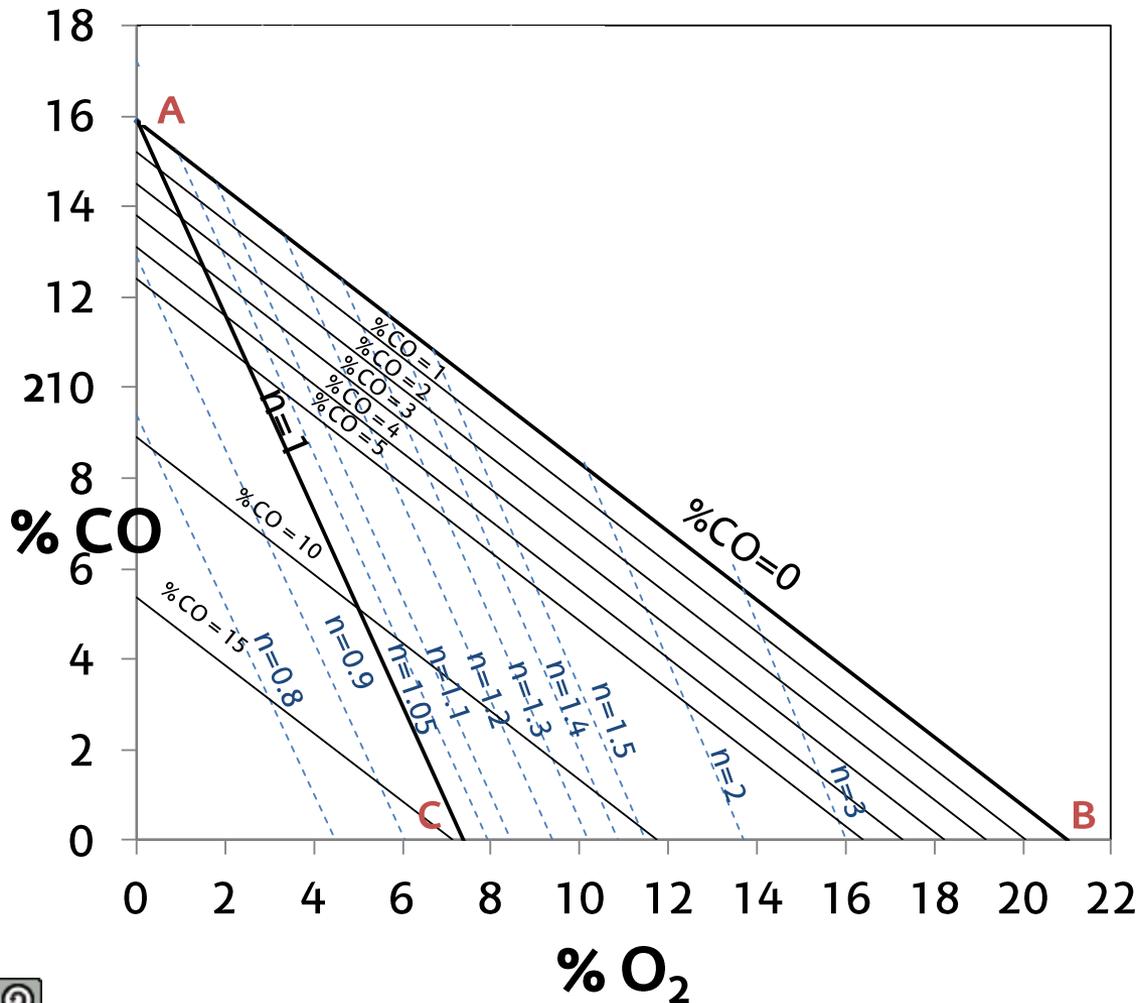


Tabla 2.3. Composición del fuelóleo (base seca y libre de cenizas)

Contenido	% C	% H	% O
Fuelóleo	87	12	1

Punto **A** (0, 15,9)

Punto **B** (21, 0)

Punto **C** (6,7 , 0)