



**NATIONAL UNIVERSITY OF ENGINEERING**  
**College of Petroleum, Natural Gas and Petrochemical Engineering**  
**Petrochemical Engineering Program**

**STUDENT TEAMWORK**

**REPORT: "ASSESSMENT AND EVALUATION OF EXPLOSION RISKS OF A  
FLUID CATALYTIC CRACKING REACTOR"  
COURSE: OCCUPATIONAL HEALTH AND INDUSTRIAL SAFETY**

**FACULTY: PROF. ENG. JUAN ESPINOZA**

**ACADEMIC TERM: 2016-2**

**DATE: DECEMBER, 20th**

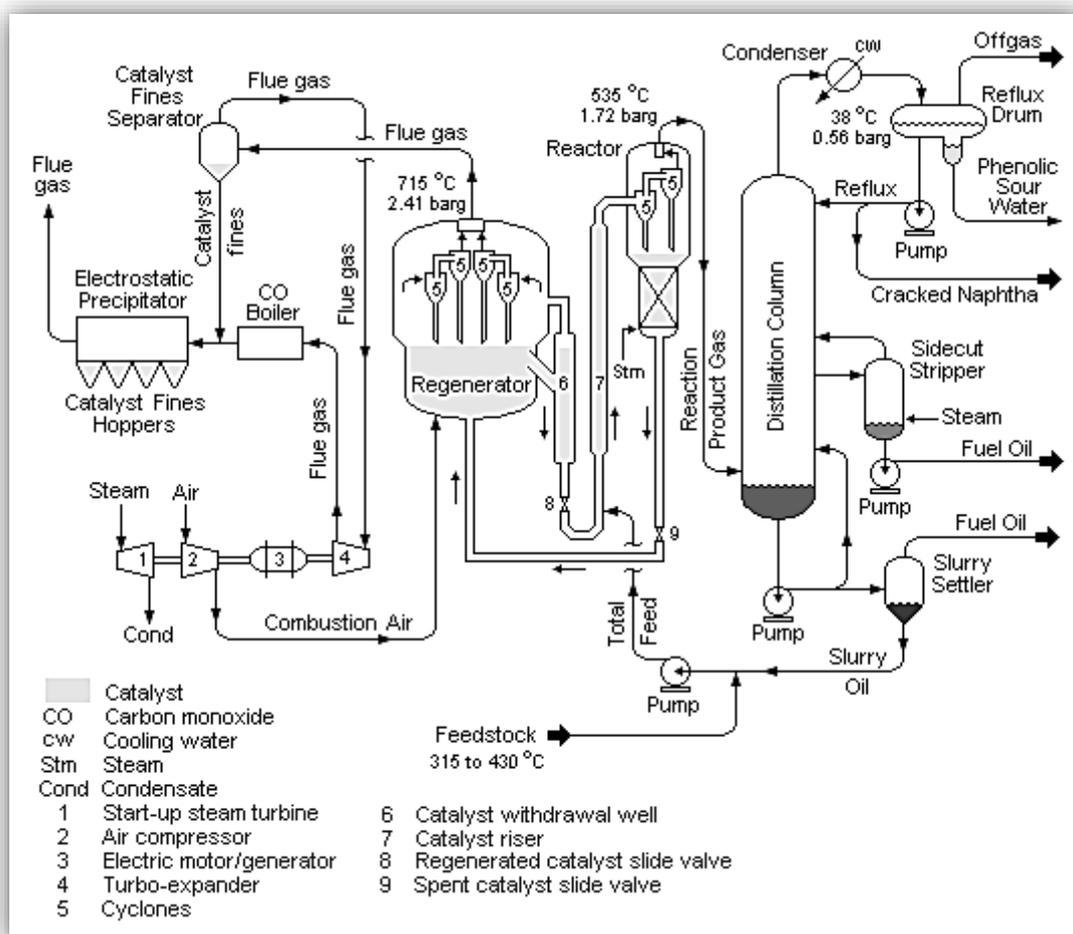
**MEMBERS:**

<b>NAME</b>	<b>STUDENT CODE</b>	<b>PROGRAMS</b>
GASPAR GUEVARA, FRANKLIN LUIS	20110424D	PETROCHEMISTRY
ARMAS ESPÍRITU, EDWIN MARTIN	20112633J	PETROLEUM AND NATURAL GAS
CHÁVEZ CONTRERAS, JOHAN BERNAL	20110210D	PETROLEUM AND NATURAL GAS
ROMERO MENDOZA, ALFREDO EDUARDO	20110346C	PETROCHEMISTRY
ALLCCA ÁLVAREZ, JUAN FRANCISCO	20112634F	PETROLEUM AND NATURAL GAS

**SCORE: 17**

## Selección y Diseño: Reactor de Craqueo Catalítico Fluido (FCC)

En el proceso *FCC* ocurren reacciones catalíticas de ruptura de cadenas moleculares de hidrocarburos de alto peso molecular (45 átomos de C), como gasóleo atmosférico (AGO), gasóleo pesado de vacío (HVGO) y recirculación de productos pesados de otras operaciones, para generar productos con bajo peso molecular de alto valor comercial, tales como gasolina de alto octanaje, combustibles ligeros (LCO, HCO), aceites en suspensión (*slurry*) y gases ligeros ricos en olefinas<sup>1</sup>. Un proceso *FCC* típico se muestra en la fig. 1. El 95% de las reacciones ocurren en un tubo largo donde se mezcla la alimentación y el catalizador (*riser*) y se completan en el reactor *FCC*.

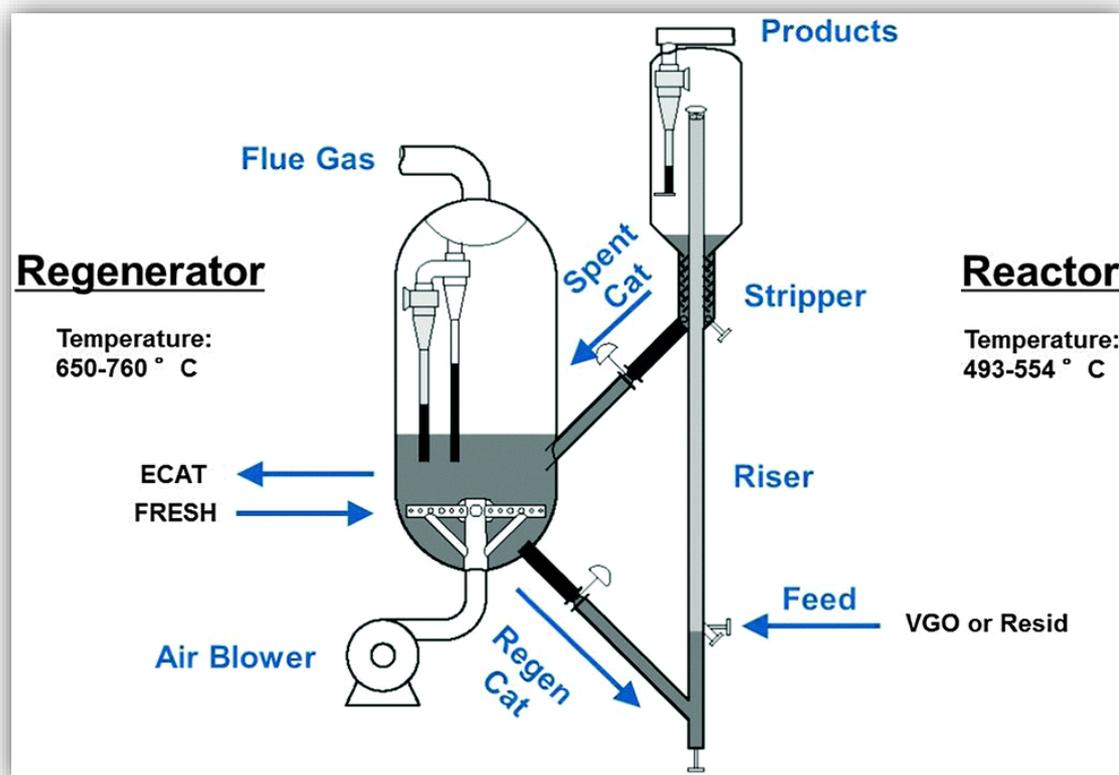


**Fig. 1** Un diagrama de flujo esquemático de una unidad de craqueo catalítico fluido tal como se utiliza en las refinerías (Dominio público)

### Descripción del reactor FCC

<sup>1</sup> A. Kayode Coker, 2001

El reactor se alimenta a través del *riser*, donde la temperatura cae a cerca de 500 ° C ya que el craqueo catalítico es un proceso endotérmico, luego en el reactor se separan los productos craqueados del catalizador gastado mediante ciclones de dos etapas (separación física por gravedad). Los productos se refinan más aguas abajo y el catalizador gastado cae a través de un arrastre de vapor para retirar los hidrocarburos que queden atrapados en su estructura, esté va hacia el regenerador regulada por una válvula deslizante, llamada válvula deslizante de catalizador gastado (VDCG)<sup>2</sup>.



**Fig. 2** Representación esquemática del proceso de craqueo catalítico fluido (FCC), incluyendo reactor y regenerador. (Vogt y Weckhuysen, 2015)

### **Dimensiones del reactor FCC**

Las dimensiones se toman de la patente US 5248411 A, donde se describe la invención de un reactor FCC (fig. 3), los diámetros se muestran en la tabla 1.

<sup>2</sup> Vogt y Weckhuysen, 2015

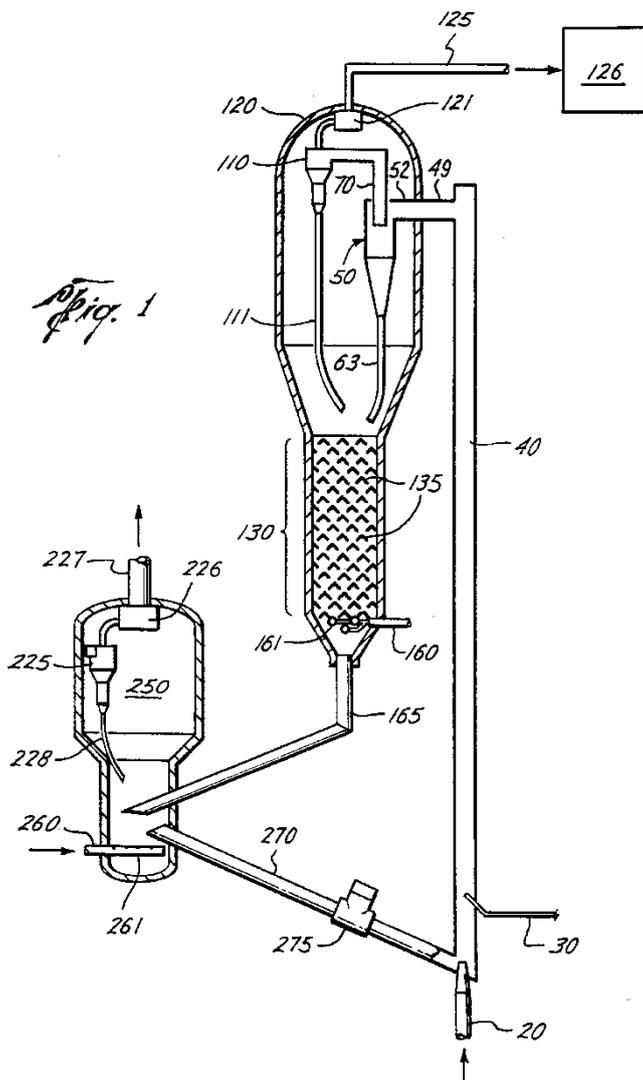


Fig. 3 Reactor FCC (Patente US 5248411 A)

Tabla 1. Dimensiones relevantes del estudio

Diámetro de entrada (40)	0.72 m (6")
Diámetro de salida (125)	0.48 m (4")
Diámetro 1 del reactor (120)	3.60 m (30")
Diámetro 2 del reactor (130)	1.80 m (15")
Diámetro tubería catalizador gastado (165)	0.60 m (5")
Diámetro tubería catalizador regenerado (275)	0.60 m (5")

**Límites de inflamabilidad**

**Límites de inflamabilidad de la alimentación**

La alimentación del FCC es, en general, un gasóleo pesado, en el cual no se analiza con frecuencia sus propiedades físicas y químicas, por no ser comercial, sin embargo, este gasóleo tiene características parecidas a un

diésel, por tanto, para fines prácticos, los límites de inflamabilidad los tomaremos de éste. Las fuentes de información describen los siguientes límites de inflamabilidad, % vol. en aire:

- Diesel B5: 1.3 - 6.0 aprox.<sup>3</sup>
- Diesel B5-S50: 1.3 - 6.0 aprox.<sup>3</sup>
- Marine Fuel Petroperú –180: 0.5 - 5.0 aprox.<sup>3</sup>
- Diesel N°2: 0,6 - 6,5<sup>4</sup>

Considerando que la alimentación es más pesada que el diésel, al tomar los valores del diésel N°2, se ocupa más rango, siendo más extendido la seguridad.

El diésel está compuesto aproximadamente de un 75% de hidrocarburos saturados (principalmente parafinas incluyendo isoparafinas y cicloparafinas) y un 25% de hidrocarburos aromáticos (incluyendo naftalenos y alcalobencenos). Su fórmula química general común es  $C_{12}H_{26}$ , incluyendo cantidades pequeñas de otros hidrocarburos cuyas fórmulas van desde  $C_{10}H_{22}$  a  $C_{15}H_{32}$ .

#### **Límites de inflamabilidad del producto**

El rendimiento típico del FCC varía según la severidad de la operación, sin embargo, de manera general, se obtiene en mayor porcentaje Gasolina de FCC, por lo tanto, se toma sus límites de inflamabilidad para el producto. La Gasolina PetroPerú tiene los límites de inflamabilidad, %vol. Aire de 1.4 (inf.) a 7.6 aprox. (sup.).<sup>3</sup>

La gasolina FCC tiene alrededor de un 40 % de aromáticos y 20 % de olefinas. La gasolina es una mezcla de cientos de hidrocarburos individuales desde C4 (butanos y butenos) hasta C11, por lo que se tomara como compuesto al etilbenceno,  $C_8H_6$ .

Se resume los límites de inflamabilidad en la tabla 1.

**Tabla 2.** Caracterización de las corrientes principales del reactor FCC

Corrientes	Componente considerado	Formula general	Nombre químico	Peso Molecular (g/mol)	Límite de Inflamabilidad	
					Inferior (%vol. Aire)	Superior (%vol. Aire)
<b>Entrada</b>	Diesel N°2	$C_{12}H_{26}$	Dodecano	170	0.6	1.4
<b>Producto</b>	Gasolina FCC	$C_8H_6$	Etilbenceno	102	6.5	7.6

<sup>3</sup> PetroPerú, 2013

<sup>4</sup> IPCS, 2004

**Densidad vapor-aire (d. v. a.)**

La densidad vapor-aire es el peso de una mezcla de vapor y aire como resultado de la vaporización de un líquido inflamable en condiciones de equilibrio de temperatura y presión, comparado con el peso de un volumen igual de aire en idénticas condiciones. Se expresa de la siguiente manera:

$$d. v. a. = \frac{P.M. (HC) * \%HC + P.M. (aire) * \%aire}{PM(aire)} \quad (1)$$

Donde:

**P.M. (HC):** Peso molecular del hidrocarburo.

**%HC:** Porcentaje en volumen del hidrocarburo de la mezcla vapor-aire.

**P.M. (aire):** Peso molecular del aire. (29 g/mol)

**%aire:** Porcentaje en volumen del aire de la mezcla vapor-aire.

En los límites de inflamabilidad de las corrientes

**Tabla 3.** Densidad de vapor-aire en los límites de inflamabilidad

Corriente	Límite de Inflamabilidad	D. v. a.
Entrada (Diésel N°2)	0.6 % (inf.)	<b>1.029</b>
	6.5 % (sup.)	<b>1.316</b>
Salida (Gasolina FCC)	1.4 % (inf.)	<b>1.035</b>
	7.6 % (inf.)	<b>1.191</b>

*Densidad de vapor-aire en función de la presión*

Siendo **P** la presión ambiente, **p** la presión del vapor de la sustancia a temperatura ambiente y **s** la densidad relativa de su vapor puro, se tiene que:

$$d. v. a. = \frac{p * s + (P - p)}{P} \quad (2)$$

Se toma valores de presión de vapor desde 0 a 760 mmHg (punto de ebullición), para obtener las densidades de vapor-aire. El valor de **s**, corresponde al cociente de los pesos moleculares. Se considera la presión del ambiente, 760 mmHg (1 atm).

**Tabla 4.** Densidad de vapor-aire para presiones de 0 a 760 mmHg

Entrada (Diésel N°2)			Salida (Gasolina FCC)		
s = 102/29 = 3.517			s = 170/29 = 5.862		
P(mmHg)	d. v. a.	%HC	P(mmHg)	d. v. a.	%HC
0	1.000	0	0	1.000	0
<b>10.64</b>	<b>1.035</b>	<b>0.6</b>	<b>4.56</b>	<b>1.029</b>	<b>1.4</b>
38	1.126	5	38	1.243	5
<b>57.76</b>	<b>1.191</b>	<b>6.5</b>	<b>49.4</b>	<b>1.316</b>	<b>7.6</b>

Continuación:

Entrada (Diésel N°2)			Salida (Gasolina FCC)		
s = 102/29 = 3.517			s = 170/29 = 5.862		
P(mmHg)	d. v. a.	%HC	P(mmHg)	d. v. a.	%HC
76	1.252	10	76	1.486	10
114	1.378	15	114	1.729	15
152	1.503	20	152	1.972	20
190	1.629	25	190	2.216	25
228	1.755	30	228	2.459	30
266	1.881	35	266	2.702	35
304	2.007	40	304	2.945	40
342	2.133	45	342	3.188	45
380	2.259	50	380	3.431	50
418	2.384	55	418	3.674	55
456	2.510	60	456	3.917	60
494	2.636	65	494	4.160	65
532	2.762	70	532	4.403	70
570	2.888	75	570	4.647	75
608	3.014	80	608	4.890	80
646	3.140	85	646	5.133	85
684	3.266	90	684	5.376	90
722	3.391	95	722	5.619	95
<b>760</b>	<b>3.517</b>	<b>100</b>	<b>760</b>	<b>5.862</b>	<b>100</b>

Se grafican, ubicando los límites de inflamabilidad:

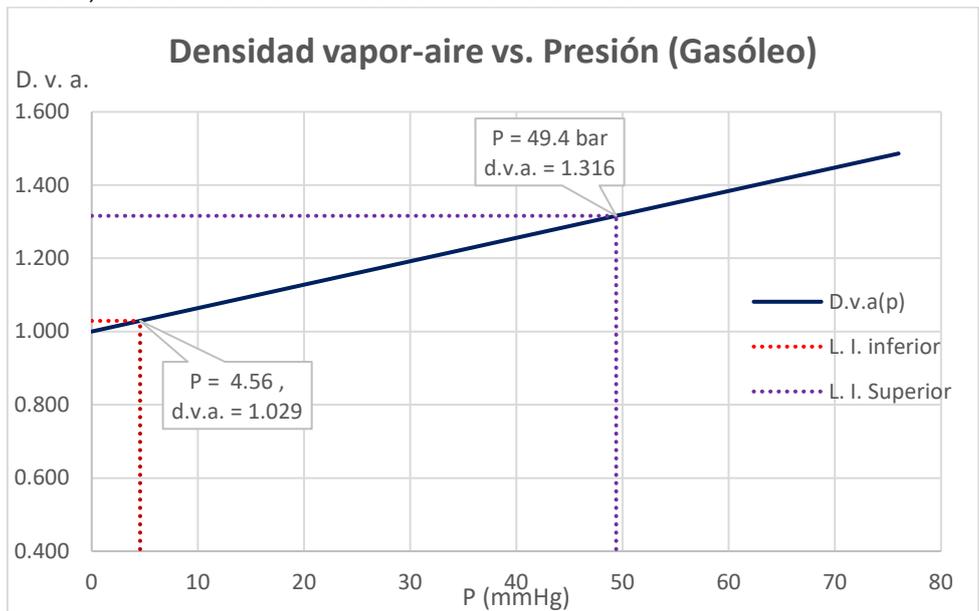
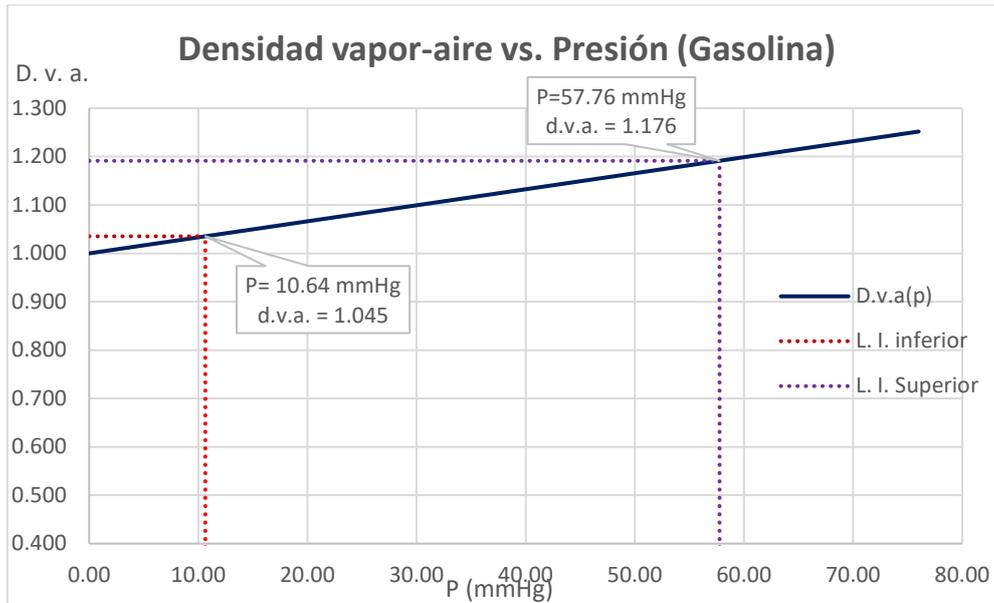


Gráfico 1. Densidad de vapor-aire a distintas presiones en la entrada al reactor



**Gráfico 2.** Densidad de vapor-aire a distintas presiones en la salida del reactor

La presión de vapor, se calculan usando la formula empírica de Antoine:

$$\log P(\text{mmHg}) = A - \frac{B}{T(^{\circ}\text{C}) + C}$$

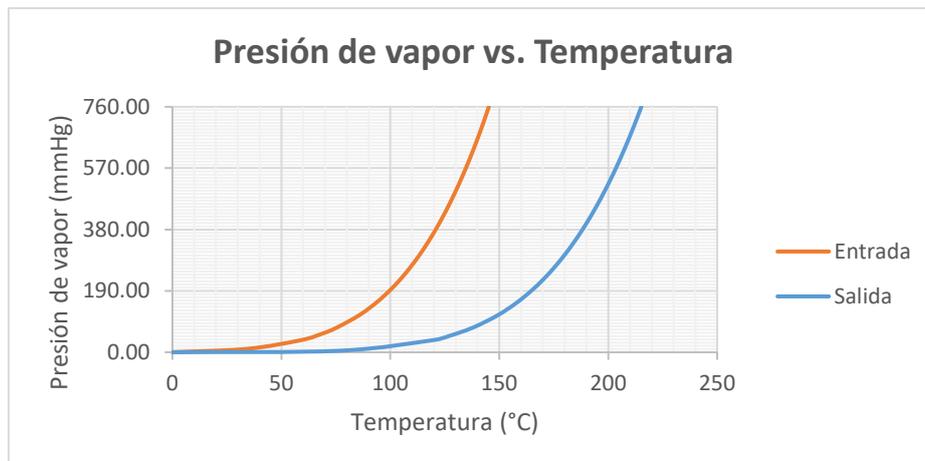
Las constantes de Antoine para los compuestos considerados, son los siguientes.

**Tabla 5.** Constantes de Antoine para los compuestos de entrada y salida

Corriente	Compuesto	A	B	C
Entrada	Dodecano	4.10549*	1625.928*	-92.839*
Salida	Etilbenceno	6.957	1445.58	209.44

\* Temperatura en K.

Utilizando la ecuación 3, con los datos de la tabla 3, se obtiene la siguiente gráfica:



**Gráfico 3.** Presión de vapor en función de la temperatura de los componentes de entrada y la salida.

### Radiación térmica del incendio del reactor FCC

La radiación que genera la llama, es una forma de transferencia de calor, por medio de ondas electromagnéticas. La radiación térmica es uno de los efectos de los incendios, por lo tanto es necesario determinarla para evaluar las consecuencias, las resistencias al fuego de las instalaciones, establecer las distancias de seguridad en las intervenciones, etc.

La intensidad de radiación térmica ( $I_e$ , kW/m<sup>2</sup>) generado por un incendio depende de las condiciones atmosféricas, de la geometría del incendio y de las características físico-químicas del producto en combustión. Estas dependencias se expresan en la siguiente expresión:

$$I_e = d * F * E \quad (1)$$

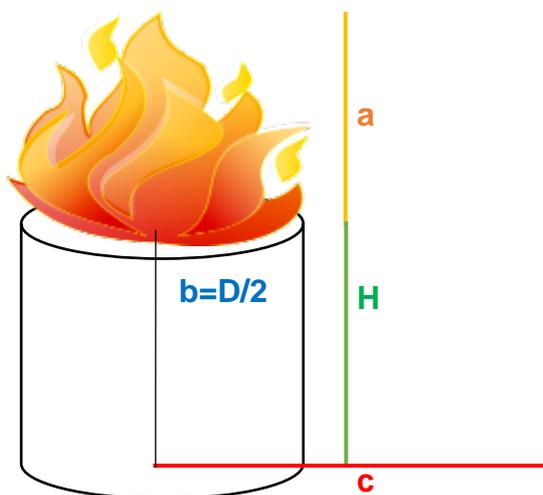
Donde:

d= Coeficiente de transmisión atmosférica (adimensional).

F= Factor geométrico de visión, de vista o de forma (adimensional).

E= Intensidad media de radiación de la llama (kW/m<sup>2</sup>)

El modelo para la evaluación de la radiación térmica que generará el reactor FCC, se basara en un incendio de base circular, así que el reactor se considerará totalmente cilíndrico. Se considera la fase de incendio estacionario independientemente de la fase inicial y de su desarrollo. Y el combustible será la gasolina, ya que se quemara el producto que queda en el reactor.



**Fig. 4** Modelo de Incendio Reactor FCC.

#### Parámetros

Altura de la llama ( $a$ )

Se estima por la siguiente fórmula empírica:

$$a = 29 * b^{0.7} * m^{0.6}$$

Dónde:

$b$ = Radio del cilindro, (m).

$m$ = Caudal de evaporación, (kg/m<sup>2</sup>s)

Adicionalmente podemos usar la fórmula alternativa de Thomas, 1963:

$$\frac{a}{D} = 42 * \left( \frac{m}{\rho_a * \sqrt{gD}} \right)^{0.61}$$

Dónde:

$D$ = Diámetro equivalente del incendio

$m$ = Tasa de combustión (kg/m<sup>2</sup>s)

$\rho_a$ = Densidad del aire, 1.2 kg/m<sup>3</sup>

$g$ = Gravedad, 9,8 m<sup>2</sup>/s

*Tasa de combustión o caudal de evaporación (m)*

Estimamos la tasa de combustión o caudal de evaporación mediante la siguiente relación:

$$m = K \left( \frac{h_c}{h_v} \right) * 10^{-3}$$

Donde:

K= Parámetro adimensional función de la temperatura

$h_c$ = Calor de combustión de producto evaporado (J/kg)

$h_v$ = Calor latente de vaporización (J/kg)

Para líquidos con temperatura de ebullición mayor a la ambiente, como el caso de la gasolina, K se calcula de la siguiente forma:

$$K = \frac{h_v}{c_p \Delta T + h_v}$$

Donde:

$c_p$ = Calor específico a presión constante (J/kg. K)

$\Delta T$ = La diferencia entre la temperatura de ebullición y la temperatura ambiente.

Mediante una fórmula empírica propuesta por Pietersen y Huerta (TNO) se puede estimar 'd':

$$d = 2,02 (P_v * x)^{-0.09}$$

Donde:

$P_v$ = Presión parcial del vapor de agua a la temperatura determinada (Pa)

$x$ = Longitud de recorrido de la radiación, distancia desde la superficie de la llama al blanco receptor (m).

**Tabla 6.** Propiedades Térmicas de la gasolina

Propiedad	Valor	Unidad
Calor de vaporización, $h_v$	360	kJ/mol
Calor de combustión, $h_c$	44.4	MJ/kg
Calor específico a p. c., $c_p$	191.3196	J/mol*K
Presión de vapor @ 25°C, $p_v^*$	15.56	Pa
Intensidad media de radiación, E	70	kW/m <sup>2</sup>

\* Del gráfico 3.

El *factor geométrico de visión* o factor de forma es un coeficiente que valora el efecto de la forma geométrica de las llamas (altura alcanzada y dimensiones de la superficie de líquido incendiada), de la distancia al punto P o superficie

irradiada y de la posición u orientación (horizontal, vertical, inclinada) de dicha superficie. Se muestra sus valores según a/b y c/d en la siguiente tabla.

**Tabla 7.** Factor de visión vertical,  $F_v$

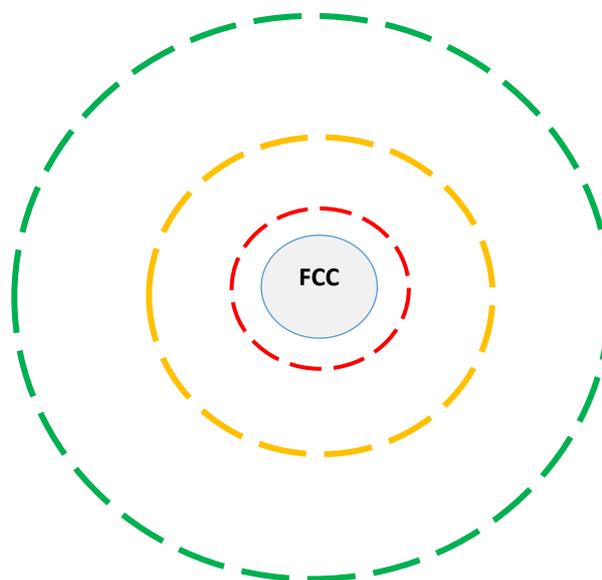
		Factor de visión vertical, $F_v$									
a/b	c/b	0.1	0.2	0.5	1.0	2.0	3.0	5.0	6.0	10.0	20.0
1.10		0.330	0.415	0.449	0.453	0.454	0.454	0.454	0.454	0.454	0.454
1.20		0.196	0.308	0.397	0.413	0.416	0.416	0.416	0.416	0.416	0.416
1.30		0.130	0.227	0.344	0.376	0.383	0.384	0.384	0.384	0.384	0.384
1.40		0.096	0.173	0.296	0.342	0.354	0.356	0.356	0.357	0.357	0.357
1.50		0.071	0.135	0.253	0.312	0.229	0.312	0.333	0.333	0.333	0.333
2.00		0.028	0.056	0.126	0.194	0.236	0.245	0.248	0.249	0.249	0.249
3.00		0.009	0.019	0.047	0.086	0.132	0.150	0.161	0.163	0.165	0.166
4.00		0.005	0.010	0.024	0.047	0.080	0.100	0.115	0.119	0.123	0.124
5.00		0.003	0.006	0.015	0.029	0.053	0.069	0.086	0.091	0.097	0.099
10.00		0.000	0.001	0.003	0.006	0.013	0.019	0.029	0.032	0.042	0.048
20.00		0.000	0.000	0.000	0.001	0.003	0.004	0.007	0.009	0.014	0.020
50.00		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.002	0.004

Se obtiene la siguiente tabla de resultados para las tres zonas según radiación:

**Tabla 8.** Resultados para la radiación térmica

Parámetros	Riesgo máximo	Zona de intervención	Zona de alerta
$b$ (m)		1.8	
$c$ (m)	3.8	7.8	14.8
$K$		0.786	
$m$ ( $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ )		0.097	
$a$ (m)		10.794	
$x$ (m)	2	6	13
$d$	1.482	1.342	1.252
$a/b$		5.996	
$c/b$	2.111	4.333	8.222
$F_v$	0.24	0.105	0.049
$I_e$ ( $\text{kW}/\text{m}^2$ )	24.90	9.87	4.32

**Fig. 4** Representación gráfica de la radiación



**Tabla 9.** Efectos de la radiación incidente sobre equipos y personas.

Radiación incidente		Efectos de la radiación térmica			Observaciones
Flujo térmico (kW/m <sup>2</sup> )	Alcance x (m)	Sobre equipos		Sobre personas	
		Sin ignifugado	Sin ignifugado		
24,9- Riesgo Máximo	2	>80%	70%	100% de muertes	
9,8 – Zona de Intervención	6	40%	35%	1% de muertes	Zona límite de intervención de bomberos
4,3 – Zona de alerta	13	10%	10%	0% de muertes (umbral humano)	Máximo tolerable por el hombre sin vestimenta especial

**Bibliografía**

- KAYODE COKER, *Modelado de Cinética Química y Diseño Reactor*, Volumen 1, 2001, p. 234-237
- E. T. C. VOGT Y B. M. WECKHUYSEN, *Craqueo catalítico fluido: la evolución reciente de la gran dama de la catálisis zeolita*, The Royal Society of Chemistry 2015, 2015, p. 7344
- PETROPERÚ, *Hoja de Datos de Seguridad de Materiales Diesel B5*, Dic. 2013, p. 3
- INTERNATIONAL PROGRAMME ON CHEMICAL SAFETY (IPCS), *Diesel* N° 2, Oct. 2004
- JOSÉ LLUCH URPI, *Tecnología y margen de refino del petróleo*, Diaz de Santos, 2008, p. 319
- AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASE REGISTRY (ATSDR). 1995. *Toxicological profile for fuel oils*. Atlanta, GA: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service
- TING Y. CHAN, *Apparatus and process for withdrawing stripper gas from an FCC reactor vessel*, US 5248411 A, Texaco Inc., 28 Sep 1993
- NATIONAL BUREAU OF STANDARDS, *Heats of combustion of benzene, toluene, ethylbenzene, o-xylene, m-xylene, p-xylene, n-propylbenzene, and styrene*, 1945.