

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE-L

CARRERA DE INGENIERÍA EN PETROQUÍMICA

MODELAMIENTO Y OPTIMIZACIÓN DE LAS CONDICIONES DE REACCIÓN DE COMBUSTIÓN, DEL PROCESO DE FUSIÓN DE ACERO RECICLADO, CON GLP Y AIRE ENRIQUECIDO EN UN HORNO DE ARCO ELÉCTRICO EN EL ÁREA DE ACERÍA DE ADELCA

AUTOR: MARCILLO CHANGOLUISA, HENRY FABIAN

DIRECTOR: Dr. Rer. Nat., Ph.D RODRÍGUEZ MAECKER, ROMAN NICOLAY.



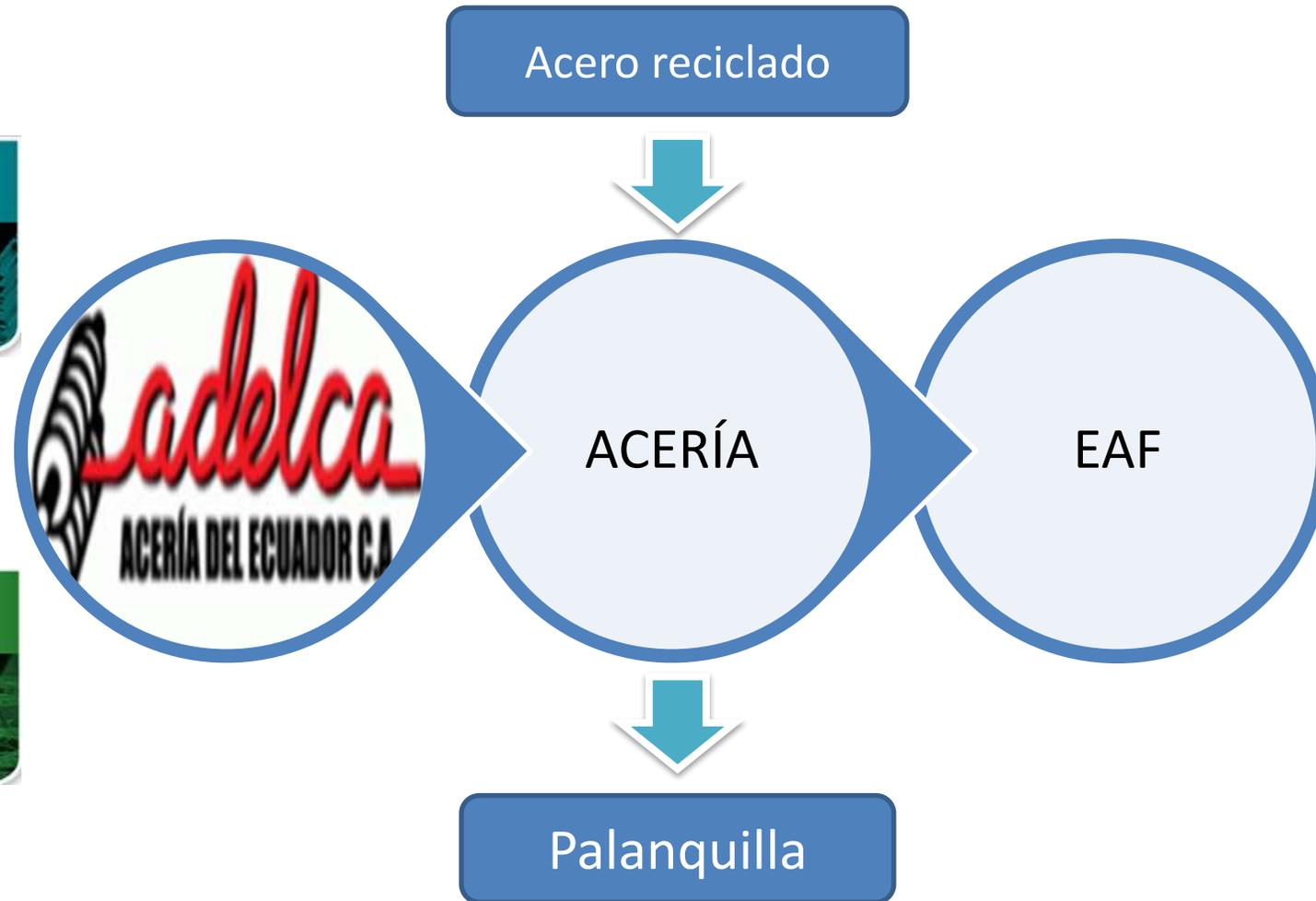
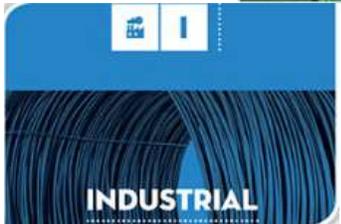
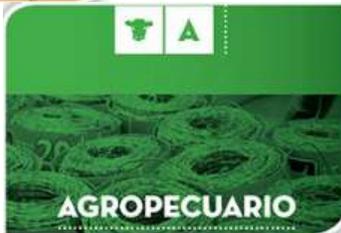
CONTENIDO

INTRODUCCIÓN

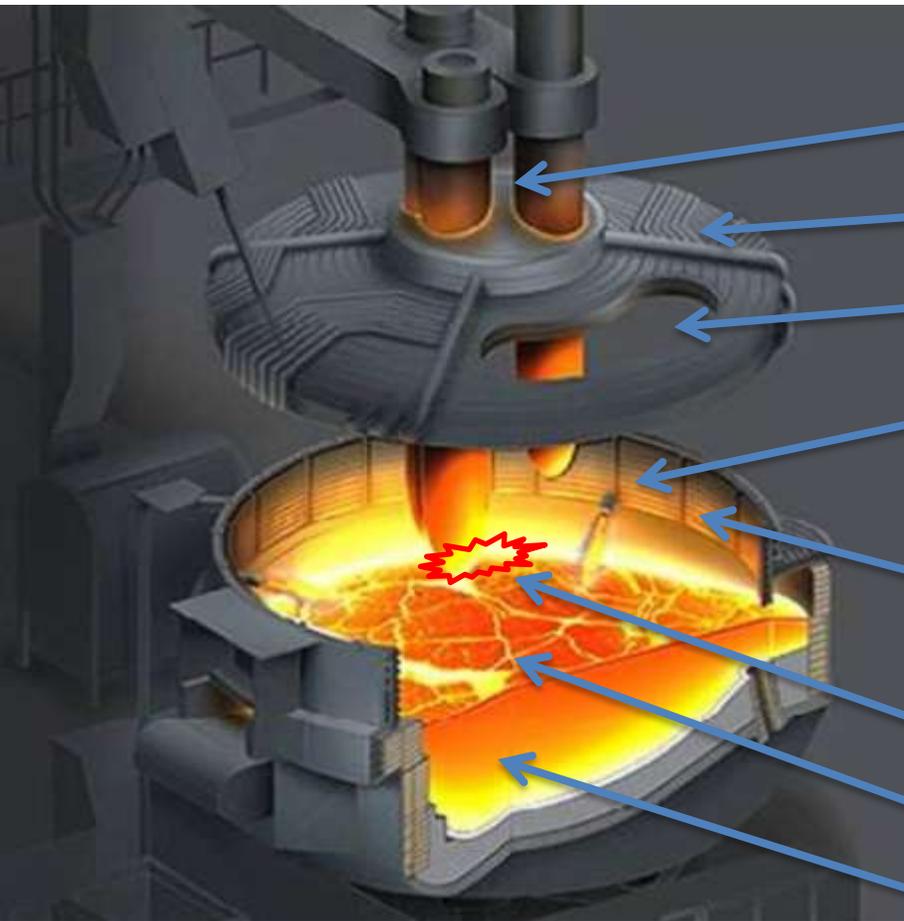
METODOLOGÍA

ANÁLISIS DE RESULTADOS

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES



Horno de Arco Eléctrico

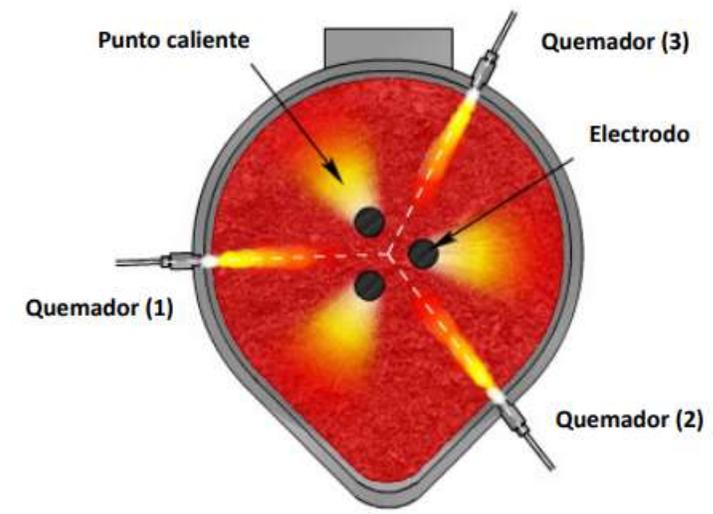


- Electrodos
- Bóveda
- Salida de gases
- Quemador oxicom bustible
- Cuba (superior)
- Arco eléctrico
- Escoria
- Acero fundido

Horno de Arco Eléctrico



Triángulo de la combustión



Distribución de puntos calientes y fríos

ASU, productora de O₂ al 99,9 %V

VSA, produce O₂ del 85 al 92 %V

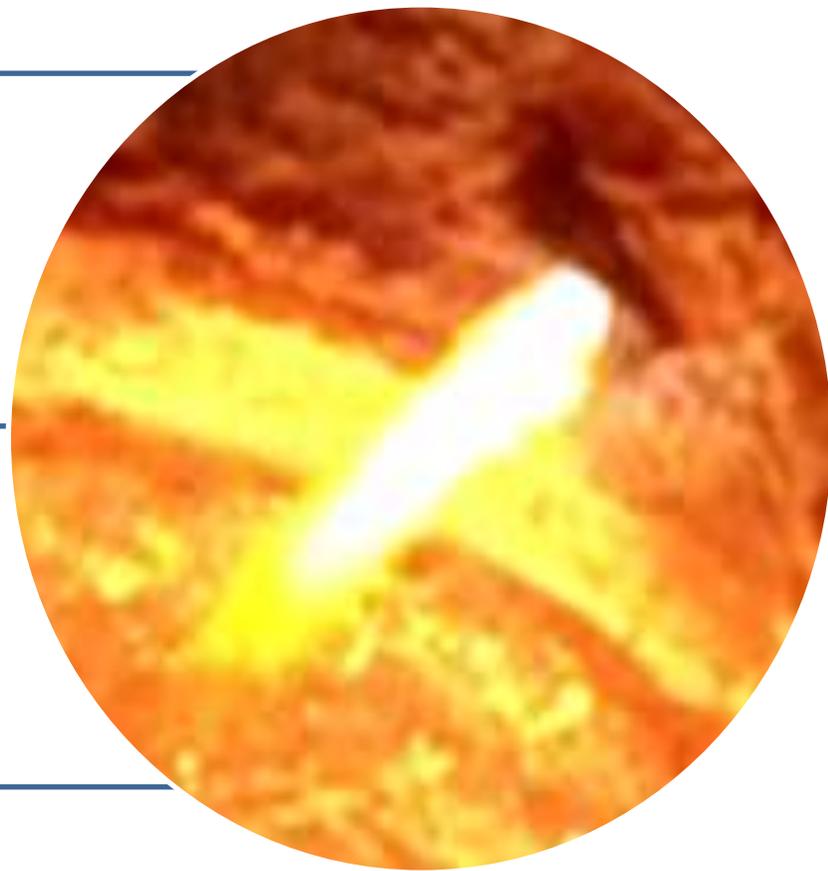


El arco genera energía térmica (calor)

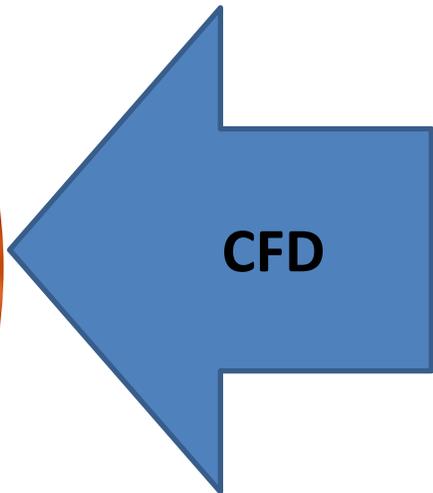


GLP Producido por EP Petroecuador y distribuido por Duragas

2 Tanques (50 m³)



Reacción de combustión con presencia de flama



OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Modelar y optimizar las condiciones de reacción de combustión, del proceso de fusión de acero reciclado, con GLP y aire enriquecido en un horno de arco eléctrico para el proceso de fusión de acero reciclado en el área de acería de ADELCA.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la composición del GLP empleado como combustible en el proceso de fundición de acero reciclado dentro del área de acería de ADELCA.
- Determinar las ecuaciones químicas llevadas a cabo en la reacción de combustión de GLP con aire enriquecido.
- Determinar teóricamente la relación aire/combustible y proponer las mejores condiciones de reacción tales como el flujo de los gases reactivos en la alimentación para optimizar los recursos empleados dentro del proceso de fundición.
- Establecer los modelos fenomenológicos que describan el proceso de combustión, a partir de una revisión bibliográfica de investigaciones similares reportadas, para la realización de una simulación didáctica del fenómeno estudiado.
- Validar parcialmente la simulación de forma experimental mediante imágenes que corroboren el comportamiento de la llama generada en el proceso manejado por ADELCA.

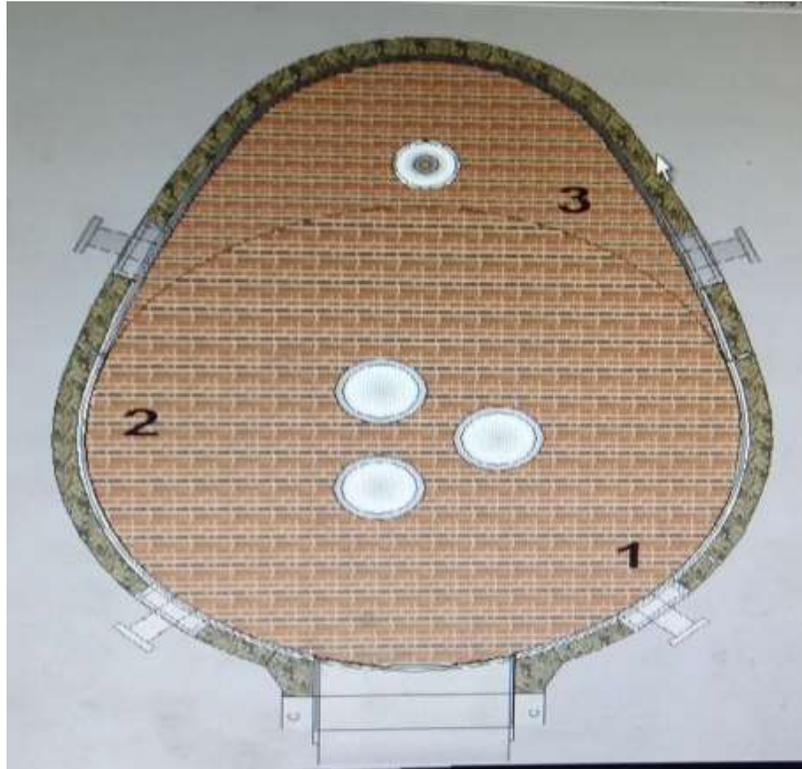
INTRODUCCIÓN

METODOLOGÍA

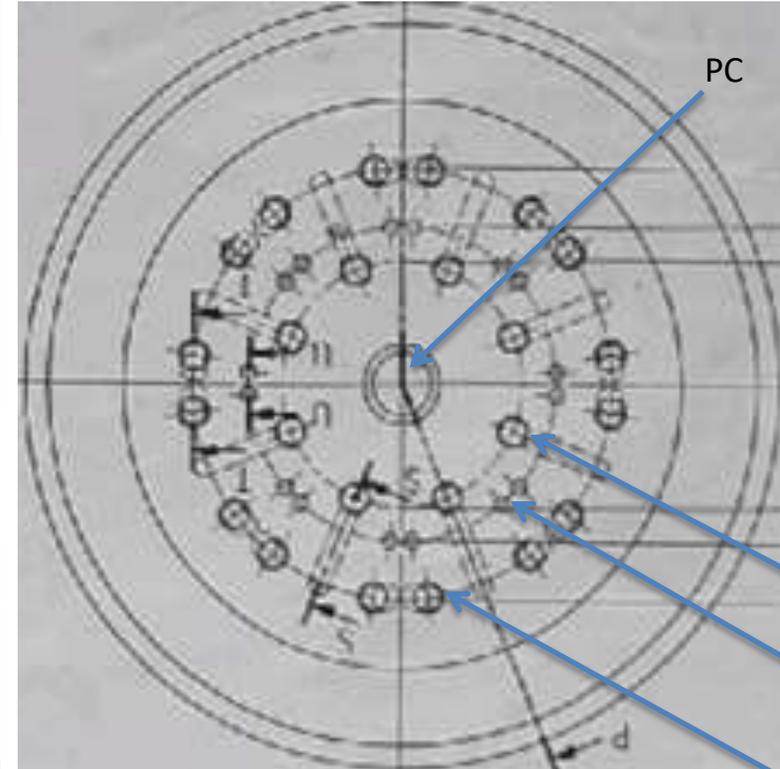
ANÁLISIS DE RESULTADOS

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

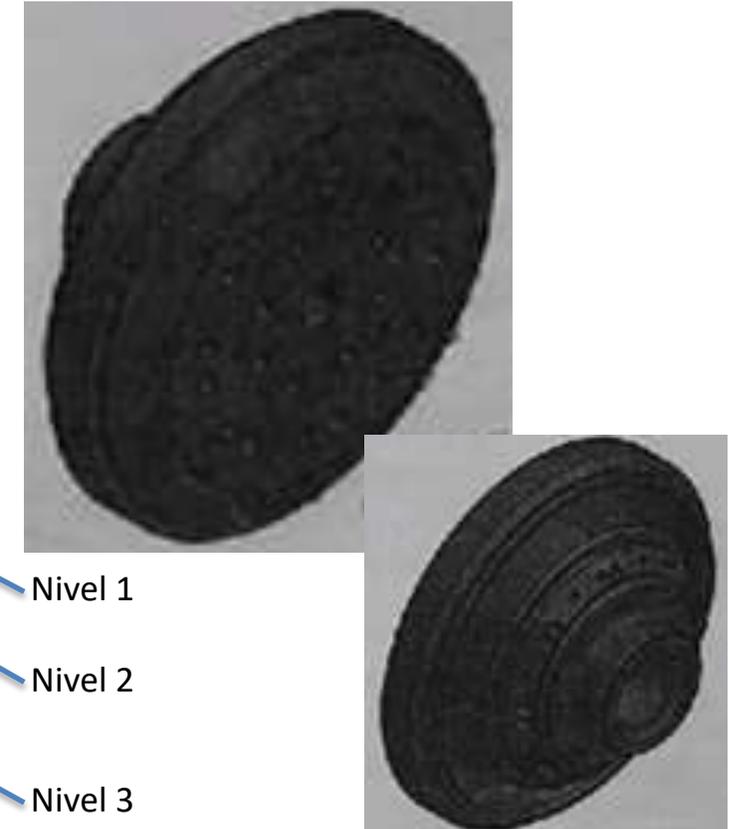
Sistema analizado



Representación de la distribución de los quemadores en el panel de control en el área de acería

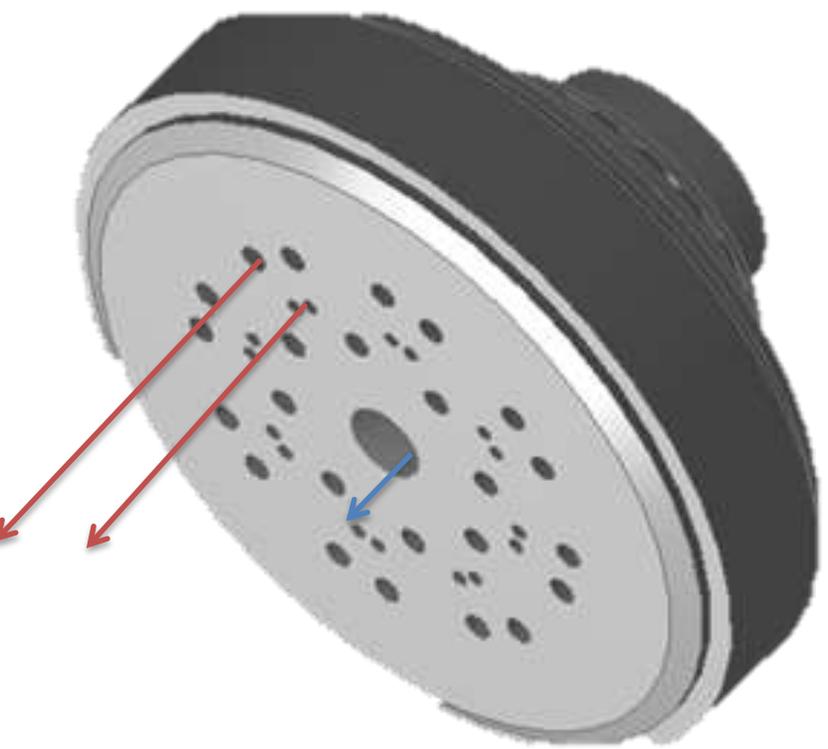


Planos del quemador oxicomcombustible

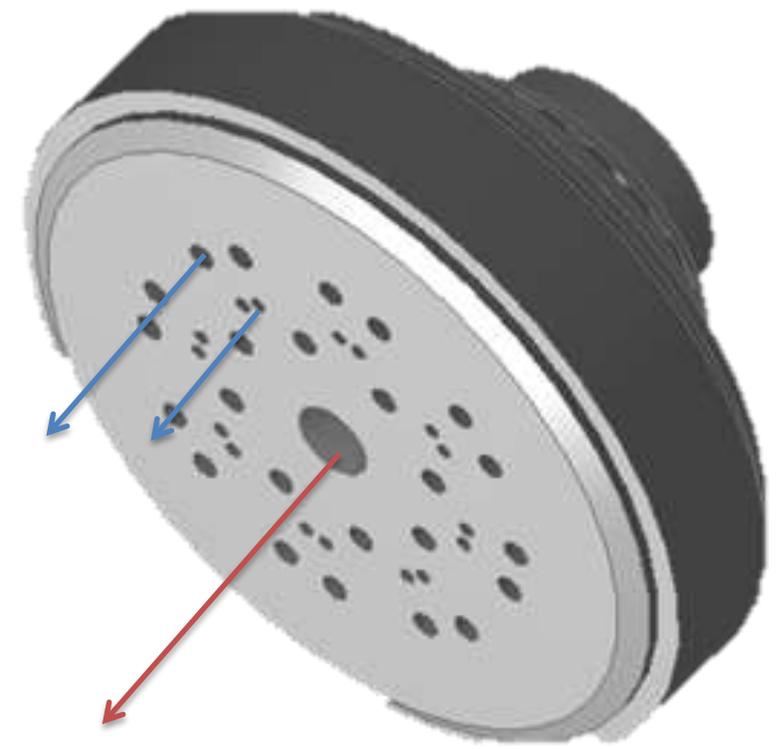


Diseño del quemador

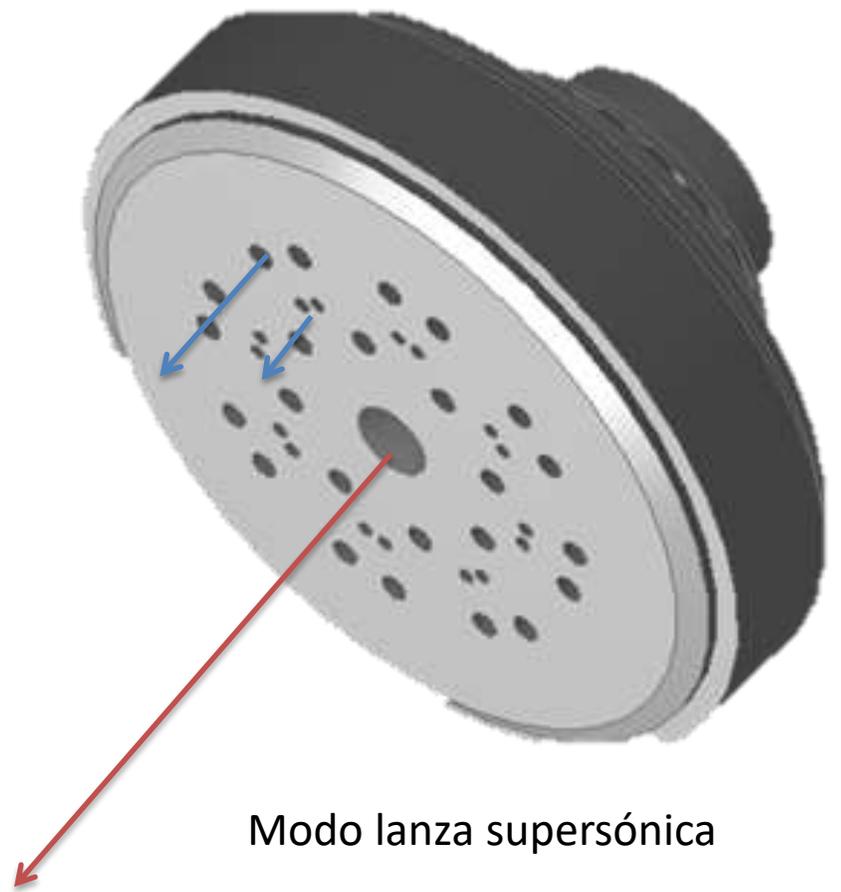
Sistema analizado



Modo quemador

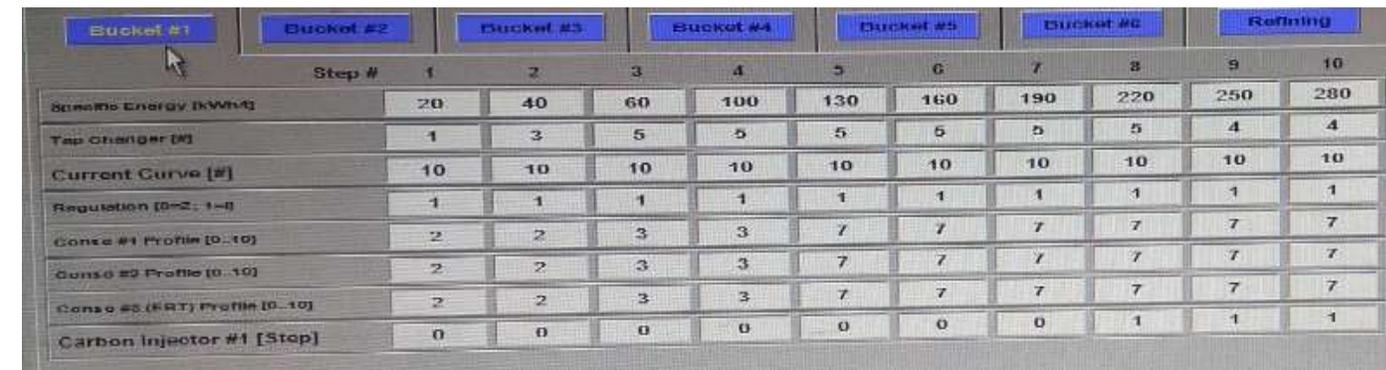


Modo lanza



Modo lanza supersónica

Sistema analizado



	Bucket #1	Bucket #2	Bucket #3	Bucket #4	Bucket #5	Bucket #6	Refining
Step #	1	2	3	4	5	6	7
Specific Energy [kWh/t]	20	40	60	100	130	160	190
Tap Changer [M]	1	3	5	5	5	5	5
Current Curve [#]	10	10	10	10	10	10	10
Regulation [0-2: 1=0]	1	1	1	1	1	1	1
Conso #1 Profile [0-10]	2	2	3	3	7	7	7
Conso #2 Profile [0-10]	2	2	3	3	7	7	7
Conso #3 (ERT) Profile [0-10]	2	2	3	3	7	7	7
Carbon injector #1 [Step]	0	0	0	0	0	0	1

Panel de control del paso en el que se encuentra el proceso de fundición en el área de acería



	PROFILE #0	PROFILE #1	PROFILE #2	PROFILE #3
Pilot Flame	40 Nm ³ /h	42 Nm ³ /h	42 Nm ³ /h	42 Nm ³ /h
CO Burner Flow	0 Nm ³ /h	0 Nm ³ /h	0 Nm ³ /h	0 Nm ³ /h
CO Burner CO/Gas Ratio	5.5 Ratio	5.5 Ratio	5.5 Ratio	5.5 Ratio
Gas Burner Flow	25 Nm ³ /h	40 Nm ³ /h	97 Nm ³ /h	97 Nm ³ /h
Burner Equivalent Power	0.8 MW	1.5 MW	3.8 MW	3.8 MW
PROFILE #4	PROFILE #5	PROFILE #6	PROFILE #7	
Pool Combustion	Scrap Cutting	Ref. Initial Lancing	High Lancing	
CO Lance Flow	210 Nm ³ /h	400 Nm ³ /h	800 Nm ³ /h	710 Nm ³ /h
CO Burner Flow	0 Nm ³ /h	0 Nm ³ /h	0 Nm ³ /h	0 Nm ³ /h
CO Burner CO/Gas Ratio	5.5 Ratio	5.5 Ratio	5.5 Ratio	5.5 Ratio
Gas Burner Flow	40 Nm ³ /h	70 Nm ³ /h	75 Nm ³ /h	50 Nm ³ /h
Burner Equivalent Power	1.3 MW	0.7 MW	0.8 MW	1.8 MW
PROFILE #8	PROFILE #9	PROFILE #10	PROFILE #11	
High High Lancing	SLIPPER 07	PSLIFE SA	PSLIFE SA	
CO Lance Flow	750 Nm ³ /h	1700 Nm ³ /h	1000 Nm ³ /h	42 Nm ³ /h
CO Burner Flow	0 Nm ³ /h	0 Nm ³ /h	0 Nm ³ /h	0 Nm ³ /h
CO Burner CO/Gas Ratio	5.5 Ratio	5.5 Ratio	5.5 Ratio	5.5 Ratio
Gas Burner Flow	20 Nm ³ /h	20 Nm ³ /h	20 Nm ³ /h	80 Nm ³ /h
Burner Equivalent Power	0.7 MW	0.7 MW	0.7 MW	0.8 MW
PROFILE #12	PROFILE #13	PROFILE #14	PROFILE #15	
PCO 5	PCO 2	Flame	Flame	
CO Lance Flow	750 Nm ³ /h	500 Nm ³ /h	0 Nm ³ /h	0 Nm ³ /h
CO Burner Flow	0 Nm ³ /h	0 Nm ³ /h	0 Nm ³ /h	0 Nm ³ /h
CO Burner CO/Gas Ratio	5.7 Ratio	5.7 Ratio	5.5 Ratio	5.5 Ratio
Gas Burner Flow	15 Nm ³ /h	15 Nm ³ /h	0 Nm ³ /h	0 Nm ³ /h

Perfiles del quemador en el panel de control en el área de acería

Optimización de los flujos reactantes



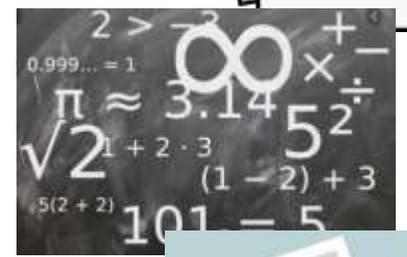
INFORME



REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA



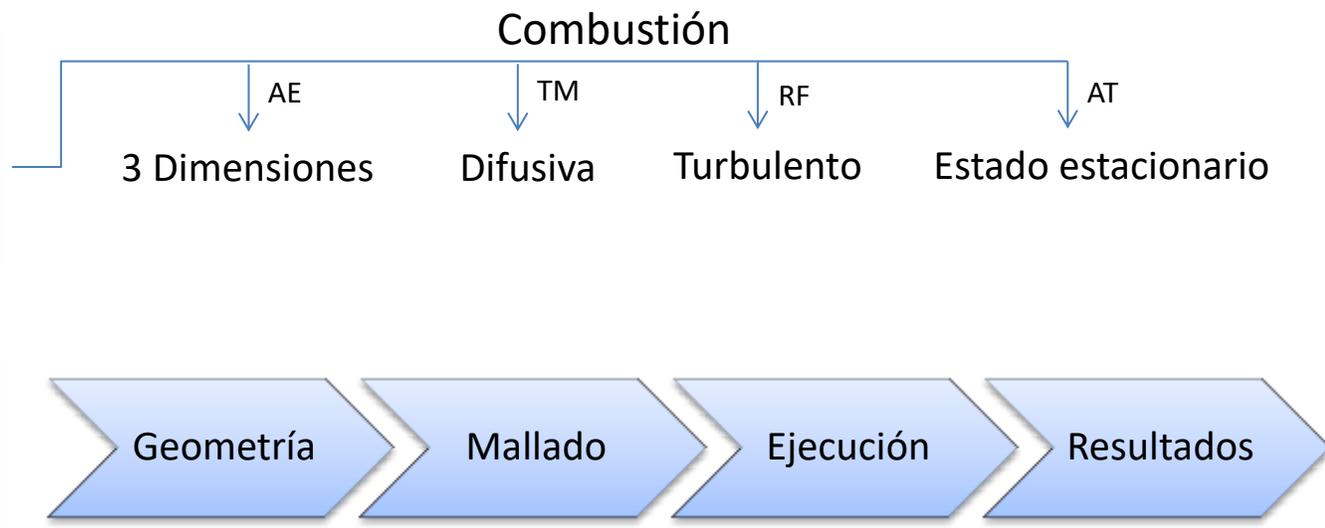
CÁLCULO



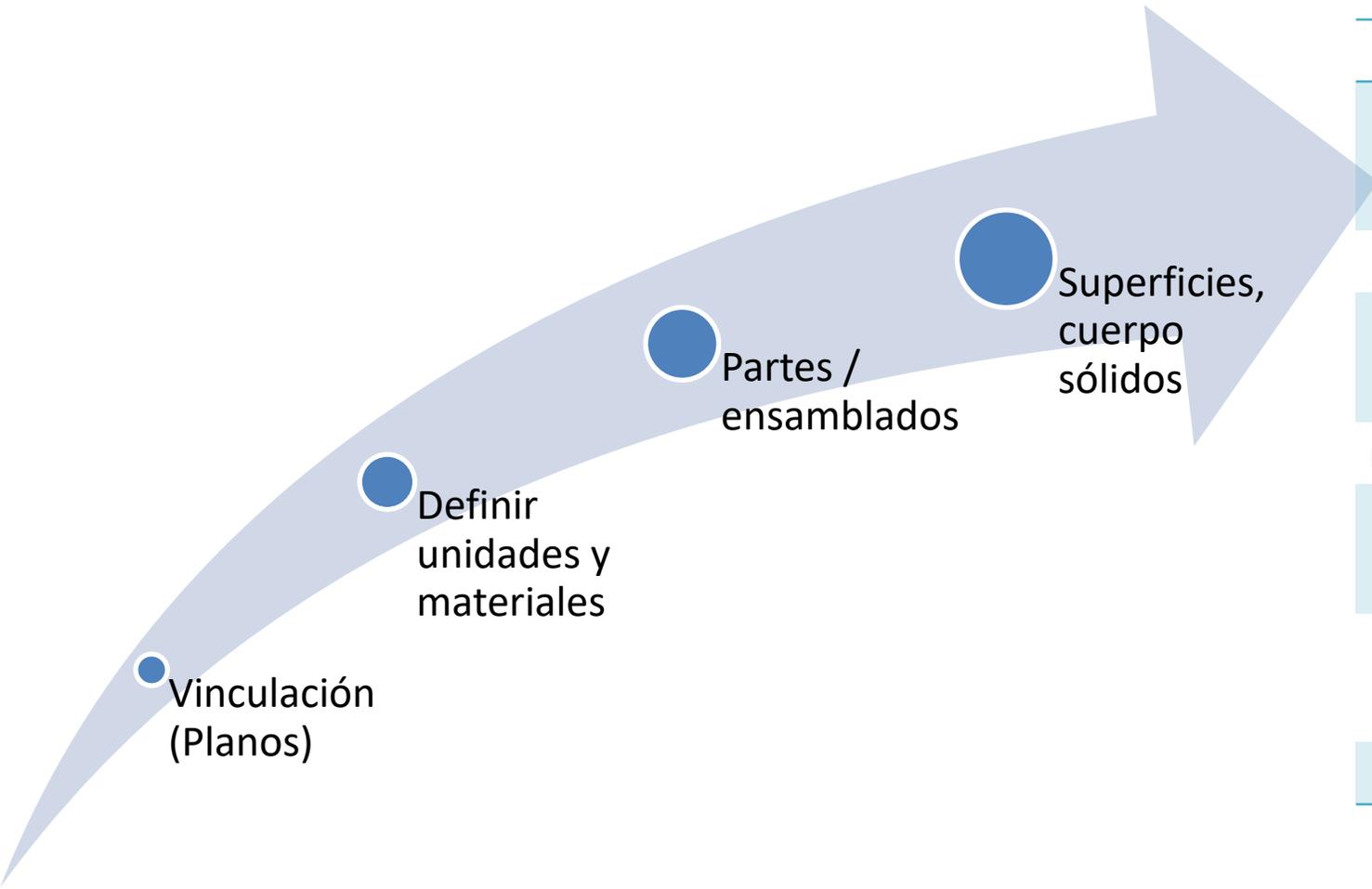
CORRECCIÓN



Modelamiento y simulación



Geometría analizada



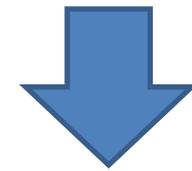
Denominación	Cantidad	Valor
Perforación de salida del combustible	16	4 (mm)
Perforación central (lanza)	1	20,5 (mm)
Perforación de salida del oxígeno (quemador)	24	7 (mm)
Diámetro de la cuba superior	1	3900 (mm)
Altura de la cuba inferior más cuba superior	1	3166 (mm)
Ángulo de incidencia para el quemador	1	54 °
Cuerpo/Dominio	1	Fluido

Información general de los planos de la geometría

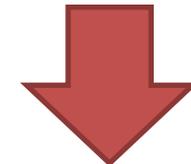
Mallado

-  Tipo de malla
-  Parámetros de calidad
-  Límite del número de elementos

Definir la zona
ingreso de flujo



Def.
L
í
m
i
t
e
s



Definir la zona
salida de flujo

Configuración y ejecución

GENERAL

Solucionador	Basado en la presión
Formulación de velocidad	Absoluto
Tiempo	Estado estacionario
Gravedad	$y = -9,8 \text{ m/s}^2$

MODELOS

Energía	Activado
----------------	----------

MODELO DE ESPECIES

Transporte de especies

Reacciones

Volumétricas

Interacción turbulencia-química

Eddy-Dissipation

Propiedades de mezcla

Propano-Aire (Adicionada reacción de combustión de butano)

MODELO DE VISCOSIDAD

k-épsilon (2 eqn)

Modelo k-épsilon

Estándar

MÉTODOS DE SOLUCIÓN

Esquema

Acoplado

CONDICIONES DE BORDE

Entradas

Tipo velocidad de entrada

Salidas

Tipo presión de salida

Paredes

Tipo pared

INICIALIZACIÓN

Método

Híbrido

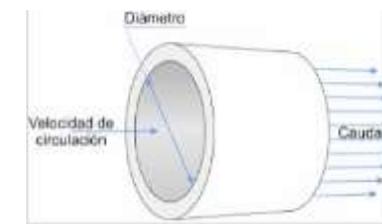
CÁLCULO DE CORRIDA

Factor de tiempo de escala

5

Número de iteraciones

170



	GLP	O ₂ (quemador)	O ₂ (lanza)
Caudal (m³/h)	92	506	42
Velocidad (m/s)	127,1	152,1	35,3
Área (m²)	1,256E-05	3,848E-05	3,30E-04
Radio (m)	0,002	0,0035	0,01025
Diámetro de C/P (m)	0,004	0,007	0,0205
Número de orificios	16	24	1



Modelos robustos

Pruebas prácticas

PROFILE #3	
Full Burner Power	
42	Nm ³ /h
0	Nm ³ /h
5.5	Ratio
92	Nm ³ /h
3.0	MW

Nombre del perfil	Full Burner Power
Flujo de aire como lanza (Nm ³ /h)	0
Flujo de aire como quemador (Nm ³ /h)	506
Relación aire como quemador/GLP	5,5
Flujo de GLP (Nm ³ /h)	92

Nombre del perfil	Full Burner Power
Flujo de aire como lanza (Nm ³ /h)	0
Flujo de aire como quemador (Nm ³ /h)	561,2
Relación aire como quemador/GLP	6,1
Flujo de GLP (Nm ³ /h)	92

Perfil 3 (actual)

Perfil prueba

Perfil propuesto

INTRODUCCIÓN

METODOLOGÍA

ANÁLISIS DE RESULTADOS

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

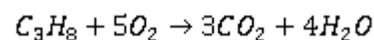
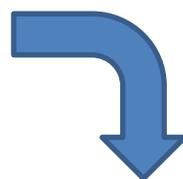
Moles y flujos ideales

Corriente	Porcentaje %V	Fracción másica
GLP	75% Propano 25% Butano	0,69 0,31
Aire como quemador (Planta VSA)	85-92% Oxígeno	0,86-0,93
Aire como lanza (Planta ASU)	99,9% Oxígeno	0,99

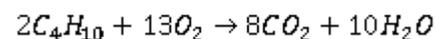
Composición general de los flujos reactantes

n O2 dirigidos al C3 a 75% V	n O2 dirigidos al butano a 25% V	nt O2 para la mezcla
3,75	1,62	5,37

Moles de O2 puro que intervienen en la Rx



Reacción 9. Combustión del propano.



Reacción 10. Combustión del butano.

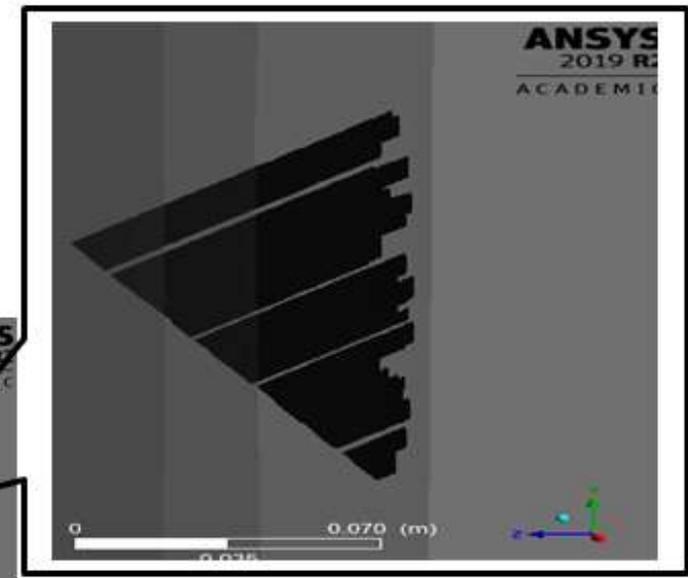
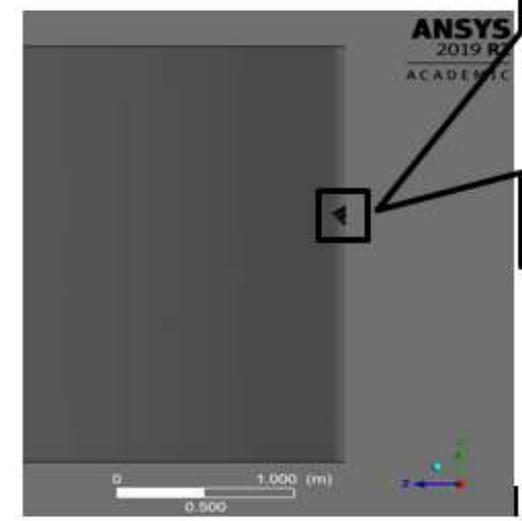
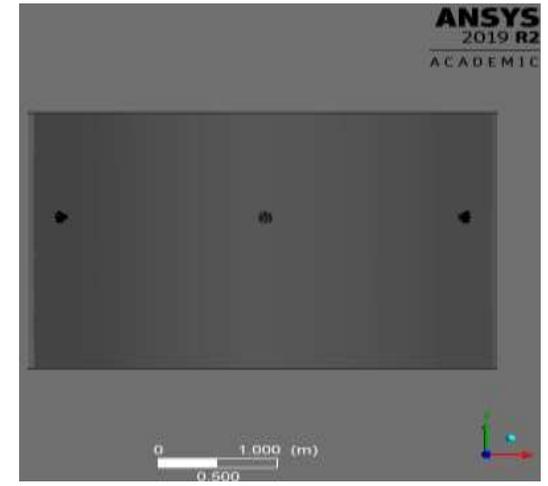
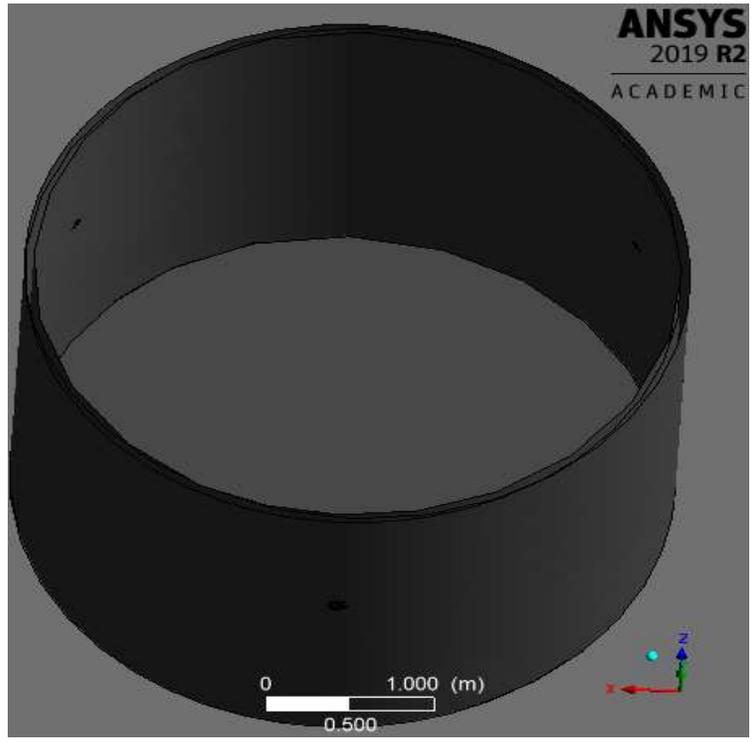


Moles de O2 a la composición establecida

% V O2	Fracción molar O2	Fracción molar C3	Fracción molar C4	n O2 dirigidos al propano	n O2 dirigidos al butano	nT o2 para la mezcla
85	0,85	0,75	0,25	4,41	1,91	6,32
86	0,86	0,75	0,25	4,36	1,88	6,24
87	0,87	0,75	0,25	4,31	1,86	6,17
88	0,88	0,75	0,25	4,26	1,84	6,10
89	0,89	0,75	0,25	4,21	1,82	6,03
90	0,9	0,75	0,25	4,16	1,8	5,96
91	0,91	0,75	0,25	4,12	1,78	5,90
92	0,92	0,75	0,25	4,07	1,76	5,83
99,9	0,99	0,75	0,25	3,75	1,63	5,38

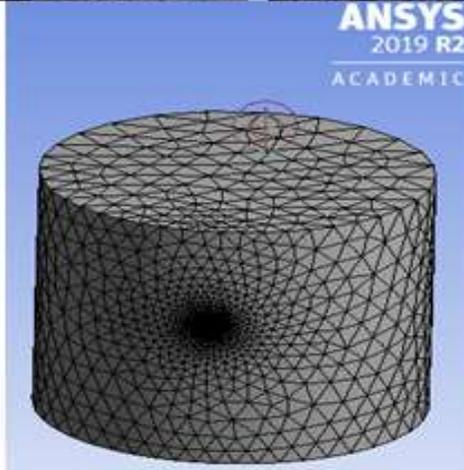
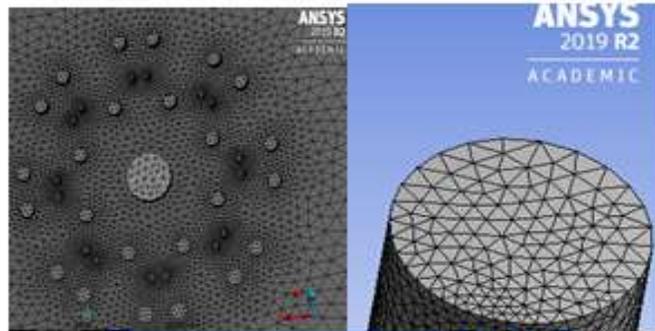
Perfil propuesto en pruebas prácticas

Geometría de análisis



Conserva las características esenciales del EAF

Malla



Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	62367
<input type="checkbox"/> Elements	339467

Estadísticas de la malla

Skewness mesh metrics spectrum:



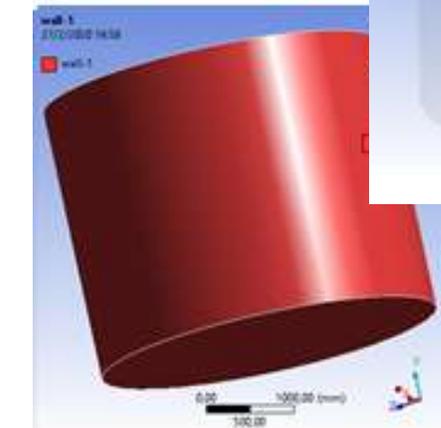
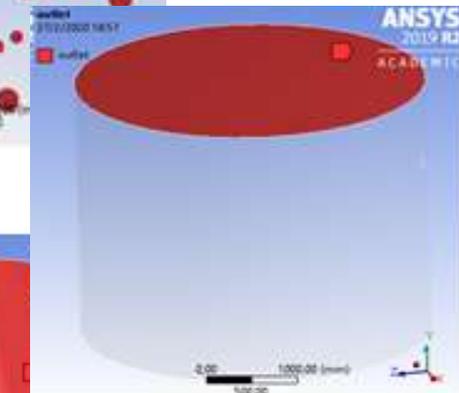
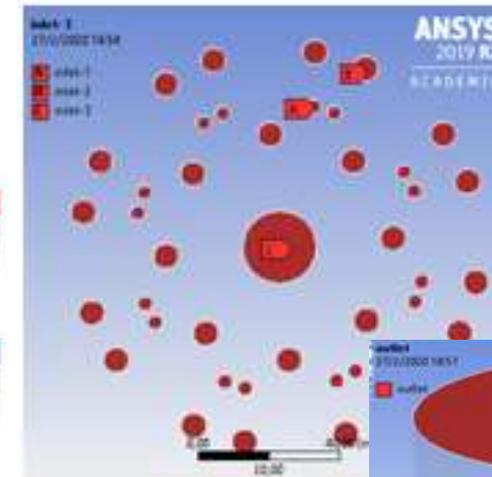
Orthogonal Quality mesh metrics spectrum:



Parámetros de calidad

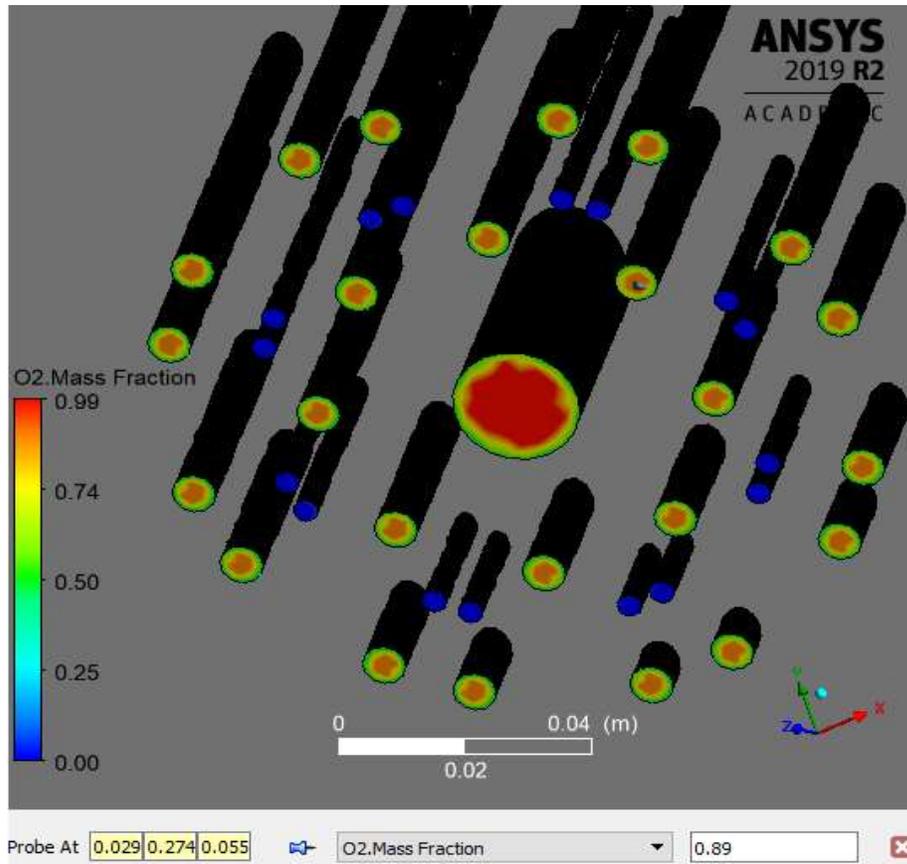
Mesh Metric	Skewness
<input type="checkbox"/> Min	7,8463e-005
<input type="checkbox"/> Max	0,83881
<input type="checkbox"/> Average	0,22848
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0,12205

Mesh Metric	Orthogonal Quality
<input type="checkbox"/> Min	0,16119
<input type="checkbox"/> Max	0,9936
<input type="checkbox"/> Average	0,77012
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0,12019

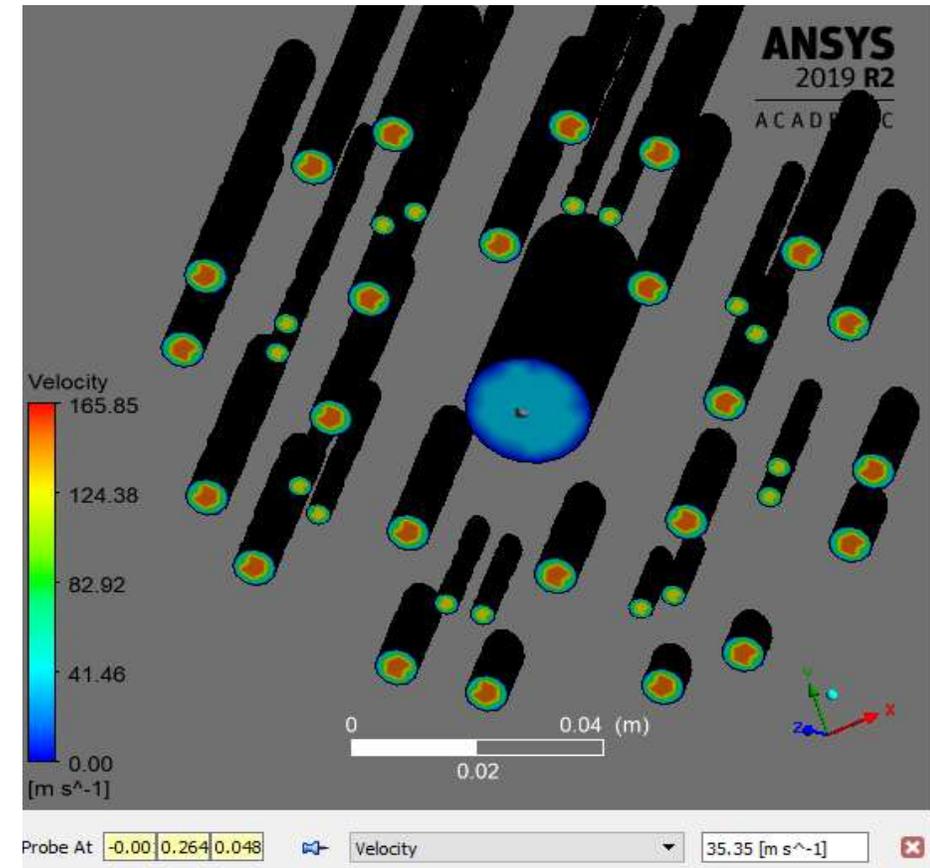


Superficies de ingreso, salida y "pared" límite

Inyección efectiva de los gases

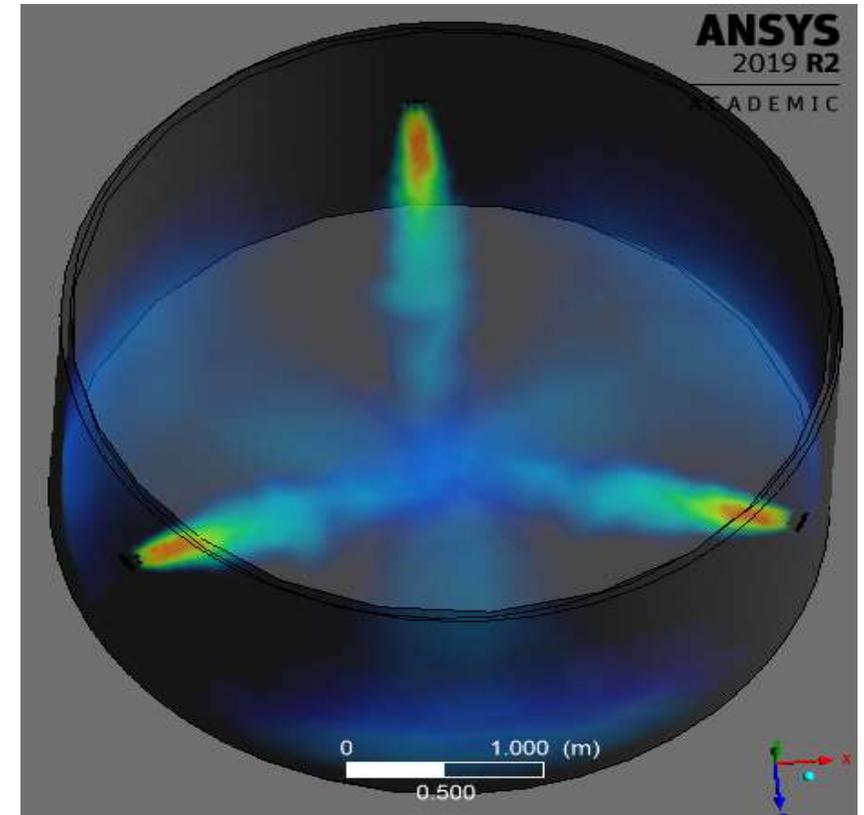
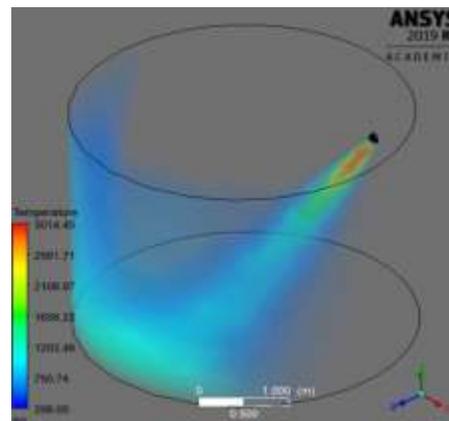
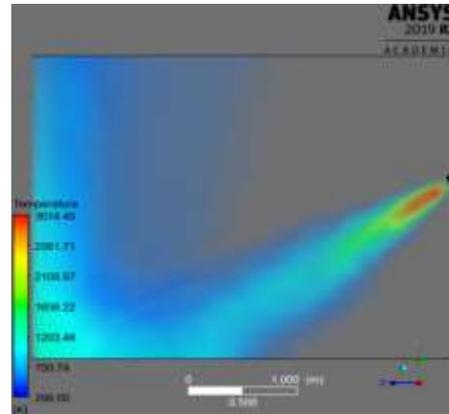
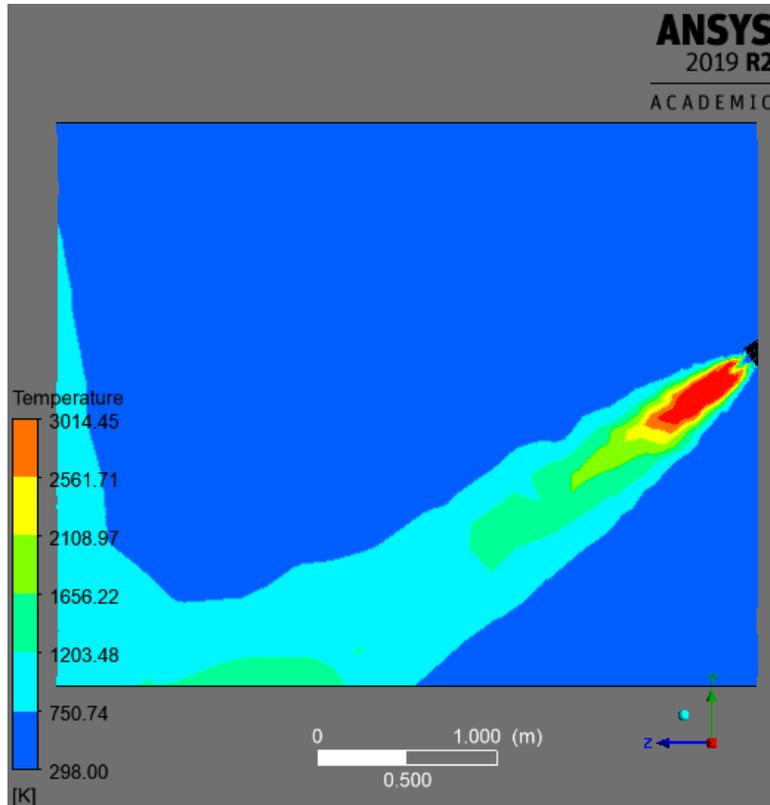


Composición del flujo oxidante



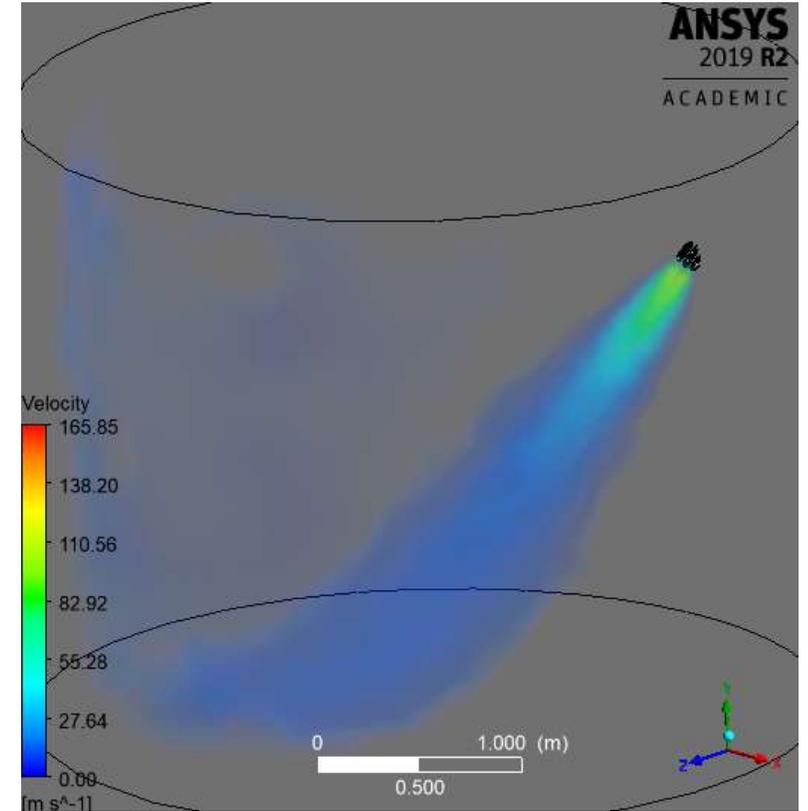
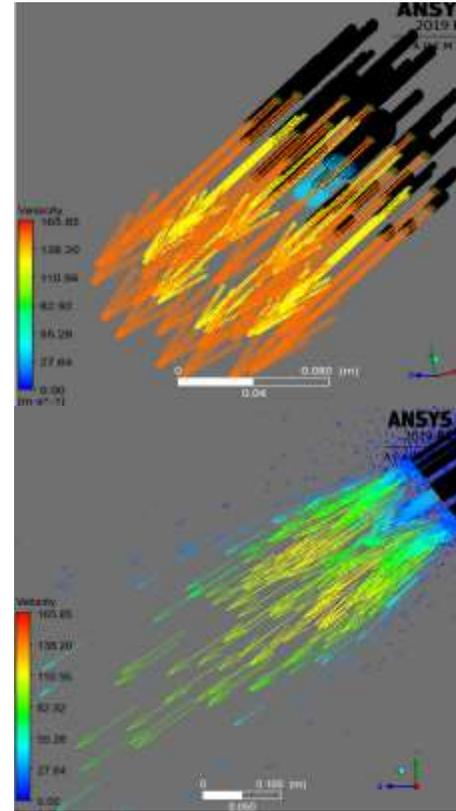
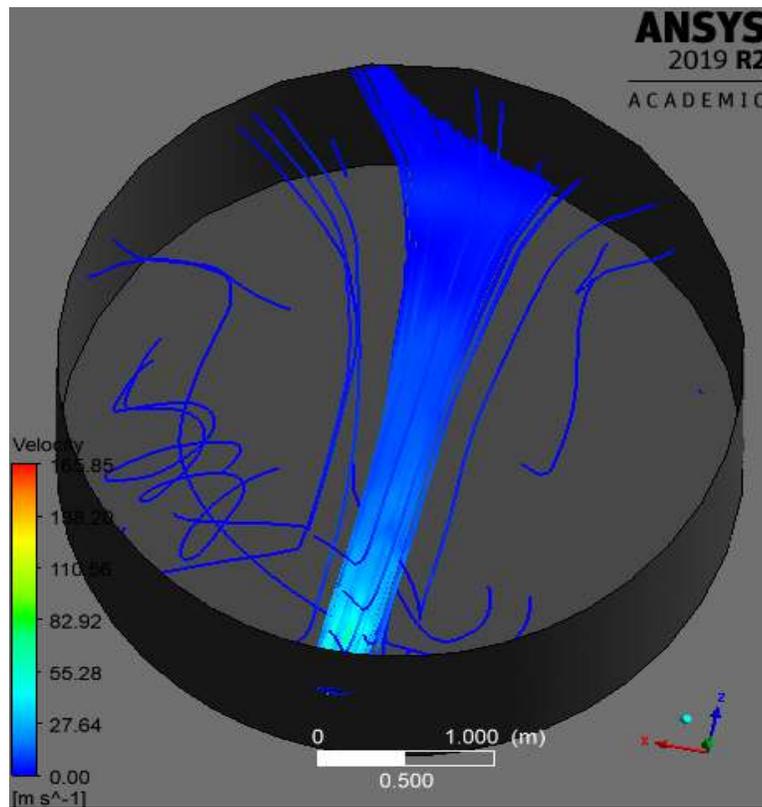
Velocidades de inyección

Perfil de temperatura



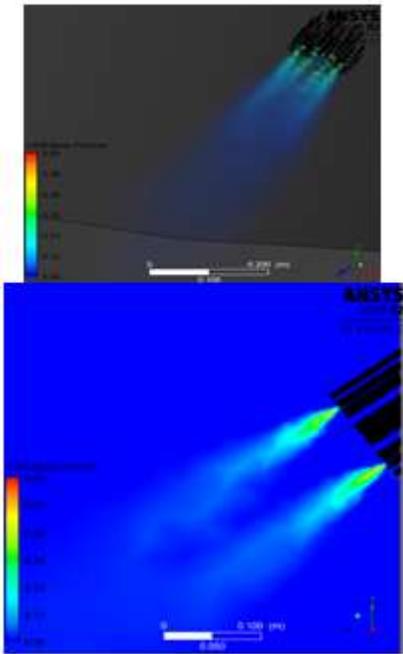
Distribución de la temperatura en el dominio

Líneas de Flujo, vectores y campo de velocidades

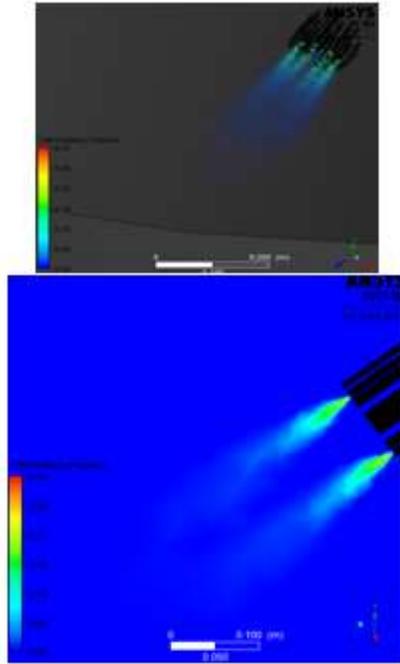


Comportamiento del flujo en el dominio

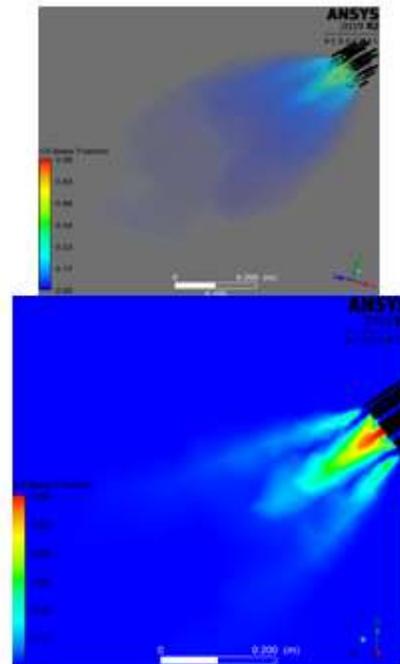
Distribución de especies químicas



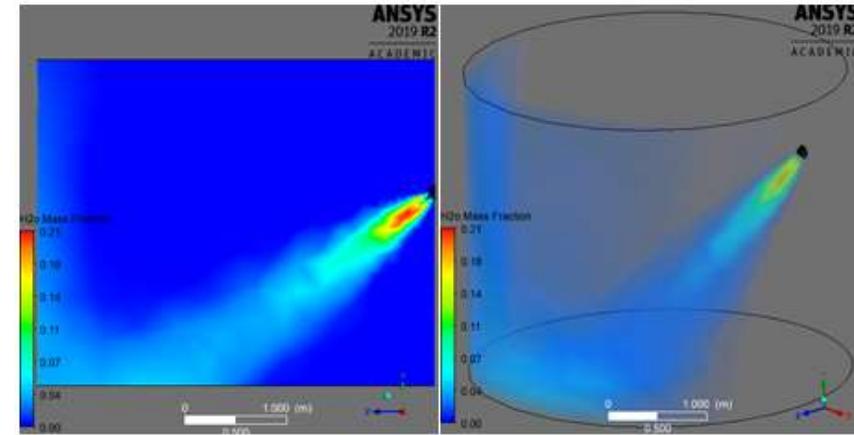
Ingreso de C3



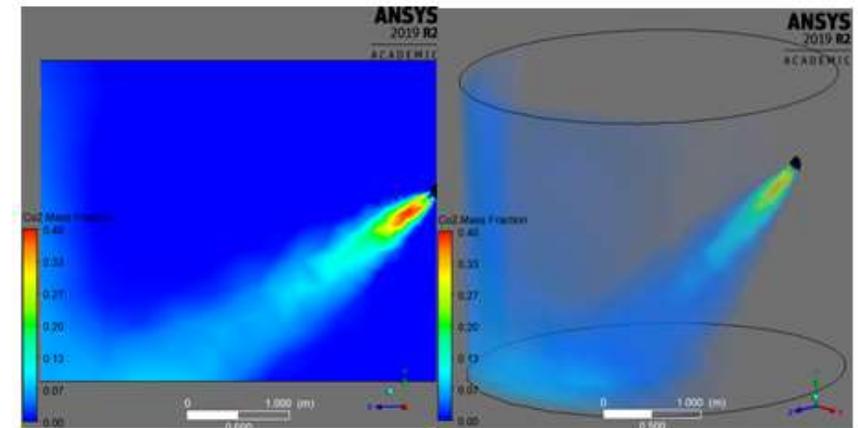
Ingreso de C4



Ingreso de O2

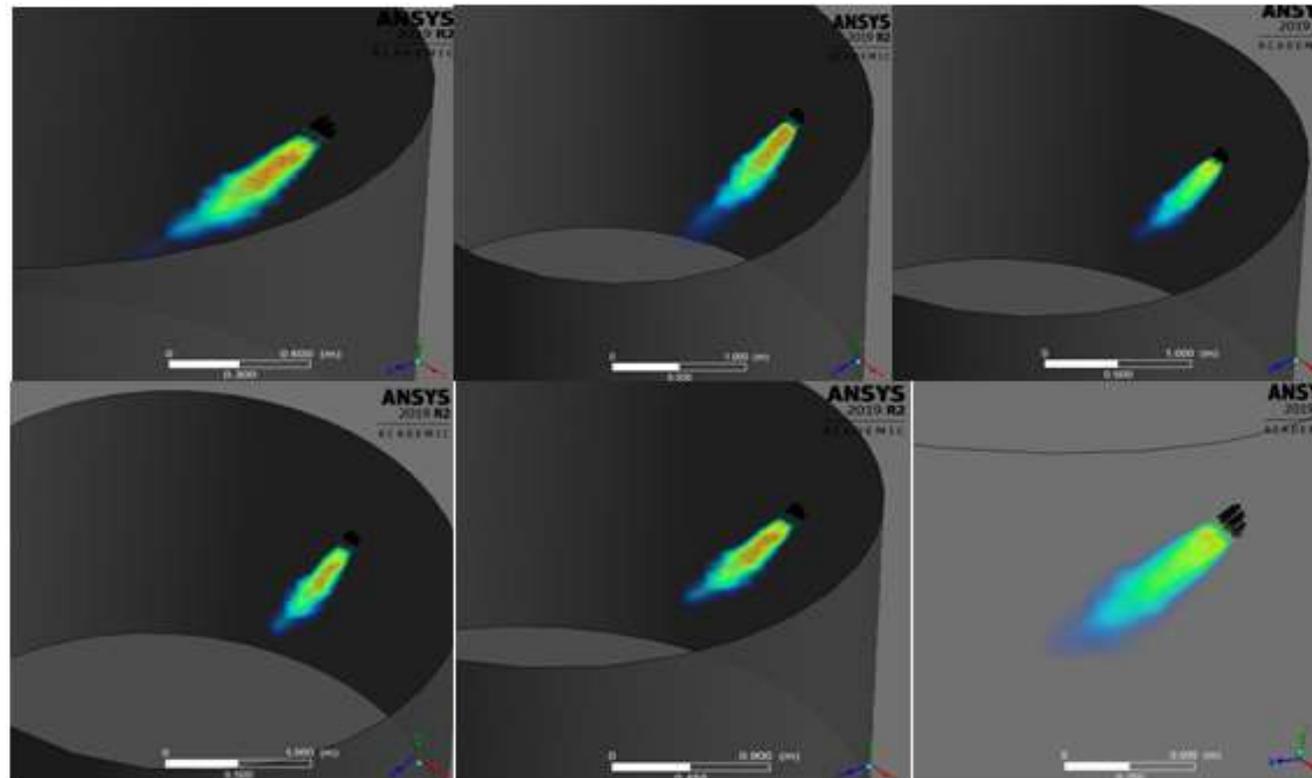


Generación de H2O vap.



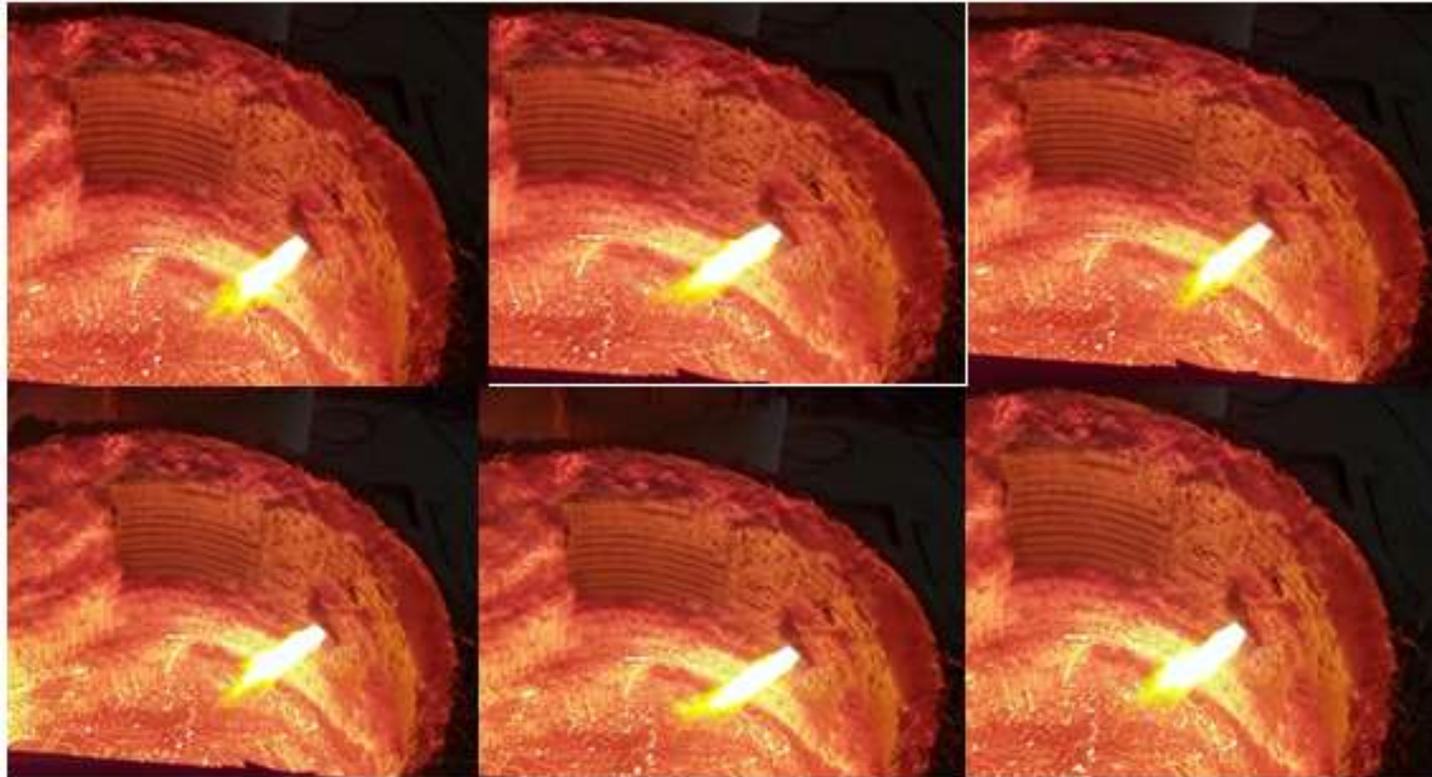
Generación de CO2

Resultado general de la simulación



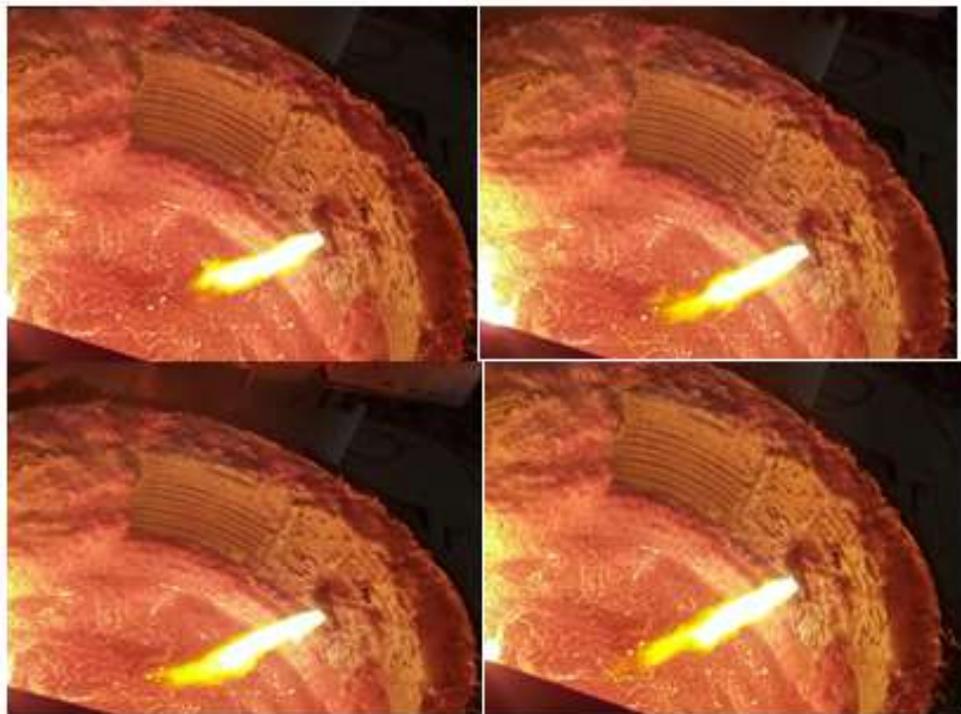
Vista general de la simulación

Registro fotográfico del proceso real en EAF de ADELCA

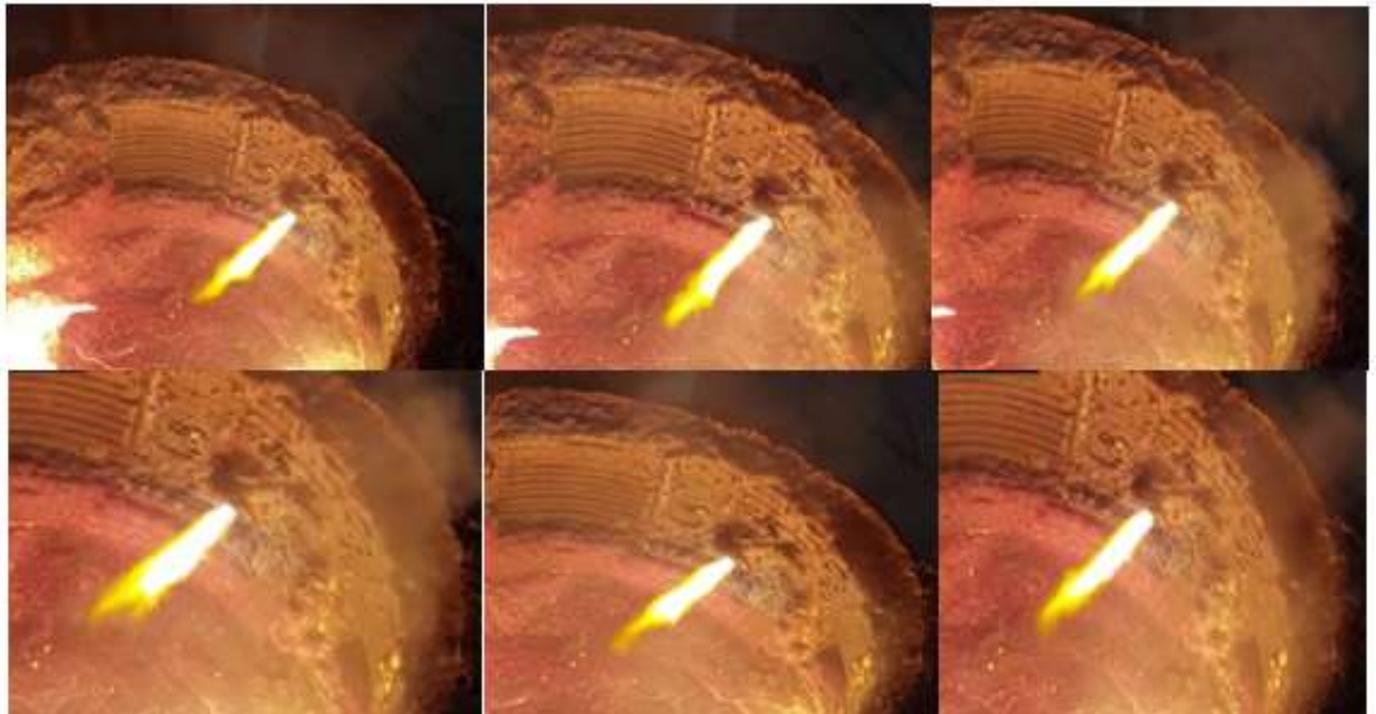


Llama generada por el perfil 3

Registro Fotográfico del proceso real en EAF de ADELCA



Llama generara por el perfil 3 sin influencia PC



Llama generada por el perfil 3 propuesto

INTRODUCCIÓN

METODOLOGÍA

ANÁLISIS DE RESULTADOS

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- La relación aire-combustible es influenciada mayormente por la variación de la composición de la corriente oxidante y cuya relación es inversa al contenido de oxígeno en dicha corriente. Debido a la composición variable de oxígeno empleado en el proceso de combustión, se propone trabajar con una relación de 6,1 para el perfil 2 y 3 asumiendo una corriente oxidante que posee 88% V/V o mayor, esta relación ha sido determinada a través del estudio de la estequiometría de reacción para la composición particular de GLP, además de considerar que el enfoque del quemador está orientado al calentamiento de la chatarra, por lo que, se ha simplificado el aporte del flujo por la PC, sin embargo, también se ha analizado la influencia que genera el flujo de la PC, determinando una relación de 5,7 para los perfiles mencionados, valor cercano a la relación con la que actualmente opera la empresa, y cuyo valor es de 5,5.

Conclusiones

- Debido a la naturaleza estricta de las reacciones químicas, no es recomendable describir a la reacción de combustión del GLP como una reacción global, por lo tanto, se ha considerado que las reacciones que ocurren en el proceso de combustión estudiado, se desarrollan de manera individual para cada componente de la mezcla.
- La relación oxígeno-combustible planteada, genera teóricamente ventajas termodinámicas frente a relaciones menores, puesto que, esta ha sido determinada bajo la consideración de una combustión estequiométrica para el propano y butano.

Conclusiones

- La difusión y la convección de transferencia de masa y energía, así como la turbulencia son fenómenos característicos y predominantes, por lo tanto, se han empleado modelos robustos que permiten describir la combustión, tal como lo es el modelo de turbulencia $k - \varepsilon$. Así mismo, se ha generado una geometría similar al dominio real, siguiendo un mallado no estructurado, calificado por los parámetros de calidad como una malla buena, demostrando que el modelamiento, y en general, la técnica CFD es una excelente herramienta para realizar simulaciones de un proceso combustión, abriendo así un panorama diferente al apreciado en la vida cotidiana.

Conclusiones

- Dentro del análisis visual de la llama generada por la relación propuesta, se observó una mayor longitud, un grosor reducido, y una estabilidad relativamente buena, acompañada de un color anaranjado, esta última indicando que la combustión es neutra. Estas características han sido corroboradas por el personal de la empresa.
- El estudio revela varias consideraciones particulares intrínsecas del proceso que se deben tomar en cuenta en un análisis de combustión, tal como el diseño quemador, el tipo de mezcla de los gases reactivos así como sus composiciones y la estequiometría dominante del proceso.
- Las consideraciones que se ha realizado en el presente modelamiento simplifican varios supuestos con fines prácticos. Las condiciones medio ambientales y la interacción de la transferencia de calor con este, es una de las simplificaciones más relevantes que se ha realizado, por estos y varias consideraciones más, la simulación presenta temperaturas similares a la de llama adiabática, reportada en bibliografía.

Recomendaciones

- Se recomienda el estudio de la factibilidad para el desarrollo de un control automático en línea que permita variar la relación aire-combustible de acuerdo el porcentaje de oxígeno en la corriente oxidante empleada para el proceso de combustión en los quemadores, enfocado al calentamiento de la chatarra.
- Se recomienda la conservación del caudal de oxígeno (como quemador) generado por la reacción 5,5 del perfil 2 y 3, y variar el caudal de GLP de acuerdo a la relación propuesta, es decir emplear $82,95 \text{ Nm}^3/h$ de GLP para una caudal de $506 \text{ Nm}^3/h$ de oxígeno como quemador.
- Analizar y estudiar la posibilidad de precalentar la corriente oxidante empleada en el proceso de combustión, puesto que existen varios estudios acerca de los beneficios de esta práctica para dicho proceso.

GRACIAS