



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA EN MECÁTRONICA

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE REACCIÓN POR
PIRÓLISIS PARA LA PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLE, A PARTIR DE
POLÍMEROS URBANOS DE RECICLO PARA EL LABORATORIO DE
PETROQUÍMICA DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE
SEDE LATACUNGA”**

AUTORES: BALSECA FALCÓN, JESSICA CRISTINA
CARRERA AGAMA, DANIEL ERNESTO

DIRECTOR: ING. QUIROZ ERAZO, LEONIDAS ANTONIO.



INTRODUCCIÓN



El plástico es el material más utilizado por el hombre y se ha convertido en un gran contaminante del planeta, hasta preocupar a organizaciones y gobiernos por su impacto en el ambiente.

Este proyecto parte de la premisa que los plásticos son sintetizados a partir de derivados químicos del petróleo, por lo que se diseña y construye un sistema de reacción por pirólisis para la obtención de combustibles a partir de polímeros urbanos de reciclado.

OBJETIVOS

General

Diseñar y construir un sistema de reacción por pirólisis para la producción de combustible, a partir de polímeros urbanos de reciclaje para el laboratorio de Petroquímica de la Universidad de las Fuerzas Armadas Espe Sede Latacunga.

Específicos

Definir los parámetros operacionales que se deben utilizar en el proceso de pirólisis.

Establecer alternativas del diseño mecánico para el sistema de reacción por pirólisis.

Realizar el diseño CAD del sistema de reacción por pirólisis.

Realizar la simulación de transferencia de calor en el reactor térmico principal, utilizando un software CAE.

Seleccionar el material y los componentes normalizados para la construcción del sistema de reacción.

Validar la hipótesis mediante el análisis de resultados de las pruebas de funcionamiento realizadas.

CONCEPTOS BÁSICOS

Polímeros: son macromoléculas que se forman por la unión de millones de monómeros mediante reacciones de polimerización. Son componentes de diversos materiales en los organismos vivos, en minerales y en materiales artificiales como el vidrio, papel, plásticos y gomas.

Polipropileno: es un compuesto formado por la polimerización del propileno. Las ventajas más relevantes:

- Elevado punto de fusión.
- Alta resistencia mecánica.
- Resistencia química.



CONCEPTOS BÁSICOS

Pirólisis: Es la técnica de reciclaje en el que los residuos sólidos son degradados en una atmósfera inerte en ausencia de oxígeno. Al ejecutarse sobre plásticos se consiguen fracciones de productos sólidos, líquidos y gaseosos, cuya composición dependerá de las condiciones de operación utilizadas.

Factores Relacionados con el Proceso de Pirólisis Plástica

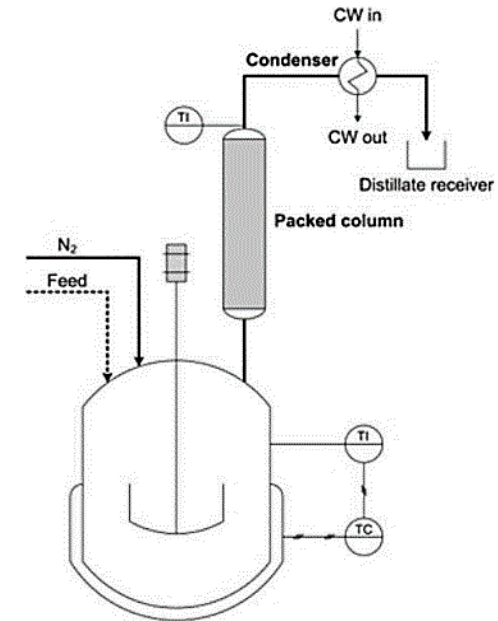
- Temperatura de Reacción.
- Velocidad de Calefacción.
- Tiempo de Residencia de los Gases en el Medio de Reacción.
- Cantidad de Muestra y Tamaño de Partícula.
- Densidad y Humedad de la Muestra.
- Tipo de Contacto Material – Catalizador.

CONCEPTOS BÁSICOS

Tipos de Reactores

- Reactor Batch (RDTA).
- Reactor Semi Batch (RSCTA).
- Reactor de Tornillo.
- Reactor Extrusor.
- Reactor de Esferas.
- Reactor Riser.
- Reactor de Lecho Fijo.
- Reactor de Lecho Fluidizado.
- Reactor de Cono Rotatorio.

Reactor Semi Batch



METODOLOGÍA DE DISEÑO DEL SISTEMA MECÁNICO

Análisis de Alternativas del Sistema

Se realiza un análisis cualitativo y cuantitativo para escoger la mejor alternativa de diseño del tipo de reactor.

Tipo de Reactor	Pirólisis térmica		Alimentación continua		Agitación mecánica		Costo de construcción		Manufactura disponible en el país		Inyección de nitrógeno		Total	
	Si	No	Si	No	Si	No	Accesible	Elevado	Si	No	Si	No	✓	✗
	Batch	✓			✗	✓		✓		✓			✗	4
Semibatch	✓		✓		✓		✓		✓		✓		6	0
Lecho Fijo		✗		✗		✗		✗		✗		✗		6
Lecho Fluidizado		✗		✗		✗		✗		✗		✗		6
Tornillo	✓		✓			✗	✓		✓		✓		5	1
Extrusor	✓		✓		✓			✗		✗		✗	3	3
Esferas	✓		✓		✓			✗		✗		✗	3	3
Riser	✓			✗	✓			✗		✗		✗	2	4
Cono	✓			✗	✓			✗		✗		✗	2	4
Rotatorio	✓			✗	✓			✗		✗		✗	2	4

Costo	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma + 1$	Pondera.
Solución A		1	0	2	0.33
Solución B	0		0	1	0.17
Solución C	1	1		3	0.50
Suma				6	1

Inyección	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma + 1$	Pondera.
Solución A		0.5	1	2.5	0.42
Solución B	0.5		1	2.5	0.42
Solución C	0	0		1	0.16
Suma				6	1

Criterio	Semicontinuo	Modular	Costo	Agitación	Inyección	$\Sigma + 1$	Pondera.
Semicontinuo		1	1	1	1	5	0.33
Modular	0		1	1	1	4	0.27
Costo	0	0		1	1	3	0.2
Agitación	0	0	0		0.5	1.5	0.1
Inyección	0	0	0	0.5		1.5	0.1
Suma						15	1

Semicontinuo	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma + 1$	Pondera.
Solución A		0.5	1	2.5	0.42
Solución B	0.5		1	2.5	0.42
Solución C	0	0		1	0.16
Suma				6	1

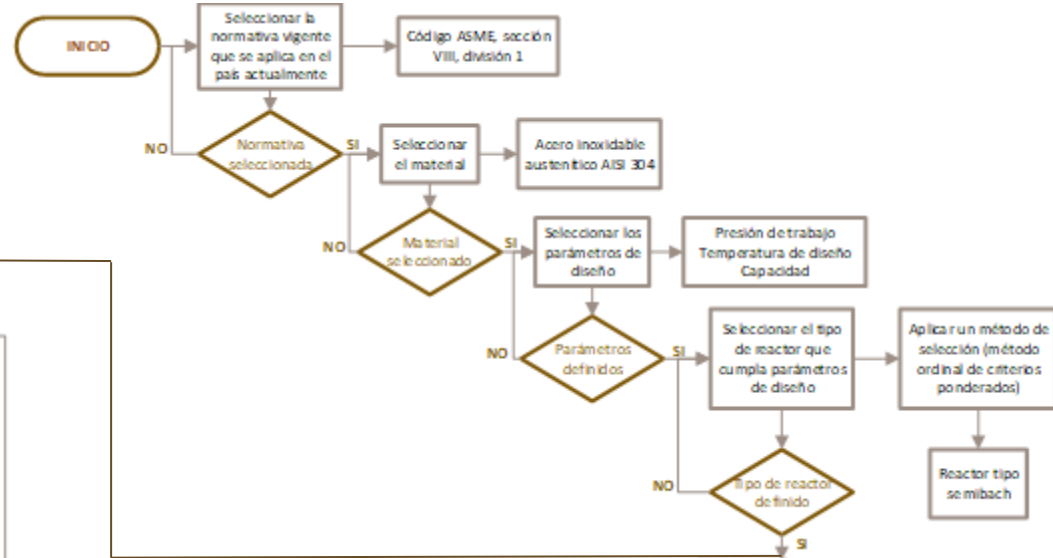
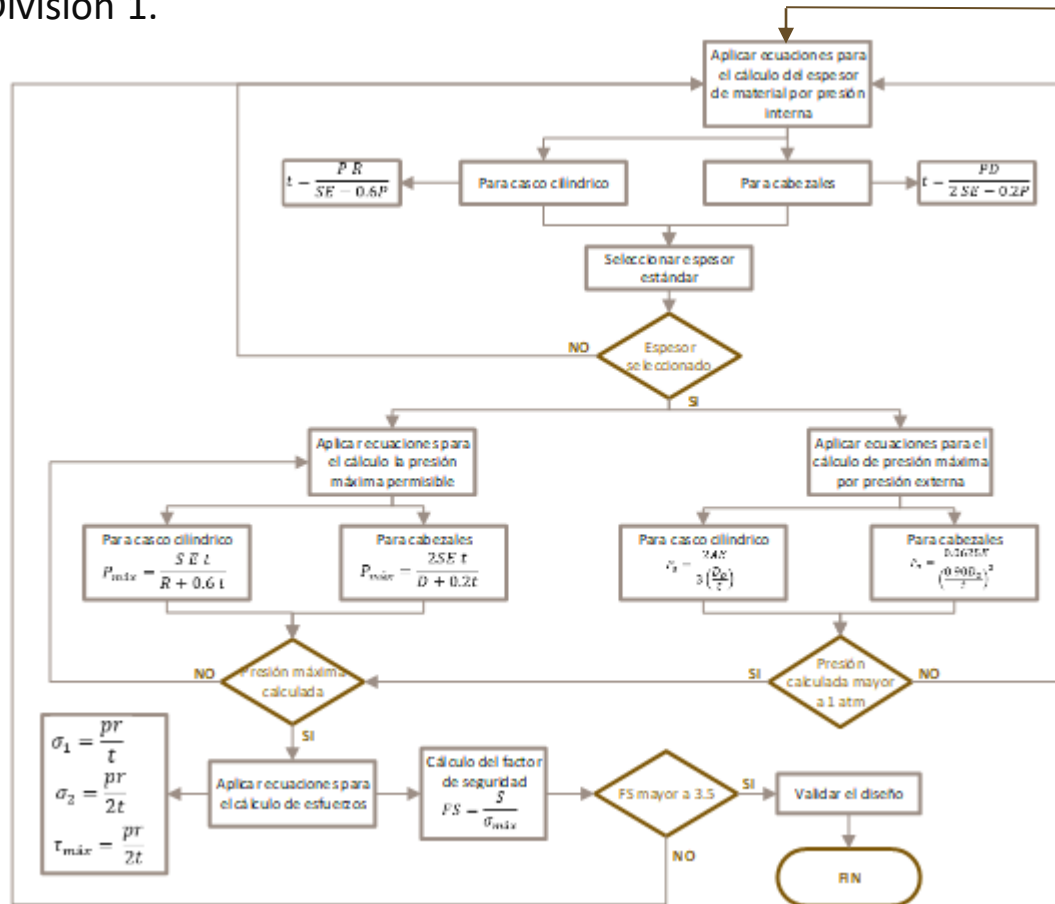
Modular	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma + 1$	Pondera.
Solución A		1	1	3	0.50
Solución B	0		0	1	0.17
Solución C	0	1		2	0.33
Suma				6	1

Agitación	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma + 1$	Pondera.
Solución A		1	0.5	2.5	0.42
Solución B	0		0	1	0.16
Solución C	0.5	1		2.5	0.42
Suma				6	1

Conclusión	Semicontinuo	Modular	Costo	Agitación	Inyección	Σ	Prioridad
Solución A	0.42 * 0.33	0.5 * 0.27	0.33 * 0.2	0.42 * 0.1	0.42 * 0.1	0.423	1
Solución B	0.42 * 0.33	0.17 * 0.27	0.17 * 0.2	0.16 * 0.1	0.42 * 0.1	0.276	3
Solución C	0.16 * 0.33	0.33 * 0.27	0.50 * 0.2	0.42 * 0.1	0.16 * 0.1	0.299	2

Norma para el Diseño y Construcción de Recipientes a Presión.

En Ecuador, donde no se ha establecido una norma propia para el diseño de recipientes a presión, es común utilizar el código ASME (American Society of Mechanical Engineers). Sección VIII – División 1.



Reglas Para La Construcción De Recipientes A Presión

Volumen de Recipientes a Presión

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{tc} = V_c + V_{seg} \\ V_{seg} = V_c \cdot 20\% = 0.2 \cdot V_c \end{array} \right.$$

Presión y Temperatura

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Si: } P_o > 2068427.184 \text{ [Pa]} \quad P = (P_o + P_H)(1.1) \\ \text{Si: } P_o \leq 2068427.184 \text{ [Pa]} \quad P = P_o + P_H + 206842.77 \text{ [Pa]} \end{array} \right.$$

Evaluación del Reactor Térmico por Presión Externa

$$P_a = \frac{2AE}{3 \left(\frac{D_o}{t} \right)}$$

Cálculo del espesor de pared (t) Y Presión de trabajo máxima permisible (P máx)

$$\left\{ \begin{array}{l} t = \frac{P R}{SE - 0.6P} \\ P_{máx} = \frac{S E t}{R + 0.6 t} \end{array} \right.$$



Cálculo del esfuerzo circunferencial, longitudinal y cortante máximo

$$\sigma_1 = \frac{pr}{t} \quad \sigma_2 = \frac{pr}{2t} \quad \tau_{m\acute{a}x} = \sigma_2 = \frac{pr}{2t}$$

Cálculo del espesor de la tapa semielíptica

$$t = \frac{PD}{2SE - 0.2P}$$

Presión de trabajo máxima permisible en la tapa semielíptica

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{2SEt}{D + 0.2t}$$

Evaluación de los Cabezales del Reactor Térmico por Presión Externa

$$P_a = \frac{0.0625 E}{\left(\frac{0.90D_o}{t}\right)^2}$$

Cálculo del factor de seguridad

$$FS = \frac{S}{\sigma_{m\acute{a}x}}$$

Factor de Seguridad Según el Código ASME

Año de Publicación de la Edición del Código ASME	Presión de Diseño				Factor de Seguridad
	Butano		Propano		
	Psig	MPa	Psig	MPa	
1931 hasta 1946	100	0.70	200	1.40	5
1946, párrafo U-68 y U-69	100	0.70	200	1.40	5
1949, párrafo U-200 y U-201	125	0.90	250	1.70	4
1952 hasta 1998	125	0.90	250	1.70	4
1998 hasta el presente					3.5



MODELADO Y SIMULACIÓN CAE

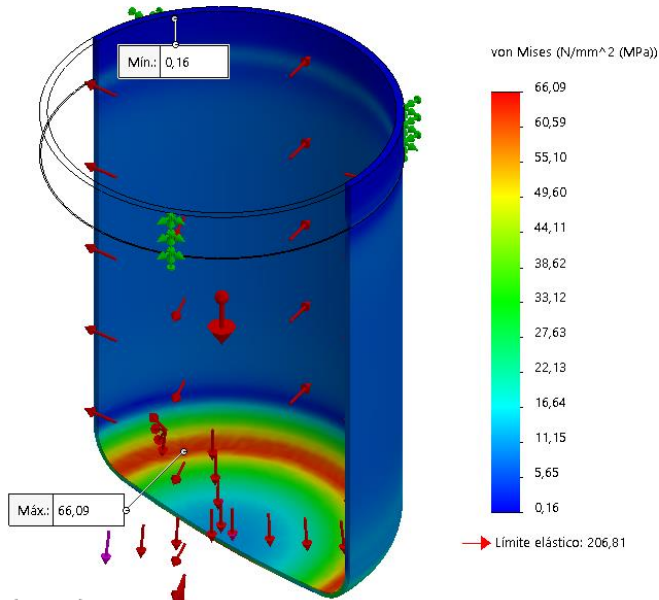
Reactor Térmico

Vista Isométrica

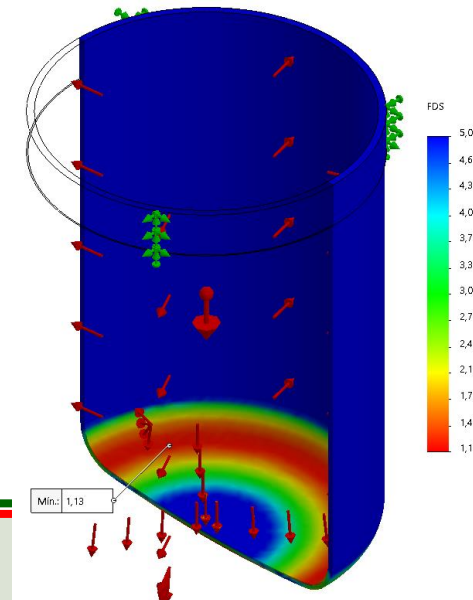
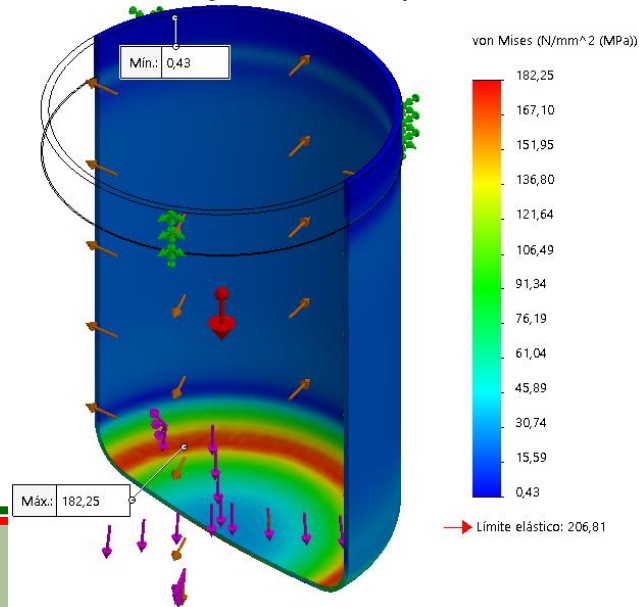


$$F = mg = (5 \text{ Kg}) \left(9.7721113 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) = 48.86 \text{ N}$$

Presión de Diseño: $P = 309596.98 \text{ Pa}$



Presión de trabajo máxima permisible: $P_{m\acute{a}x} = 856115.11 \text{ Pa}$



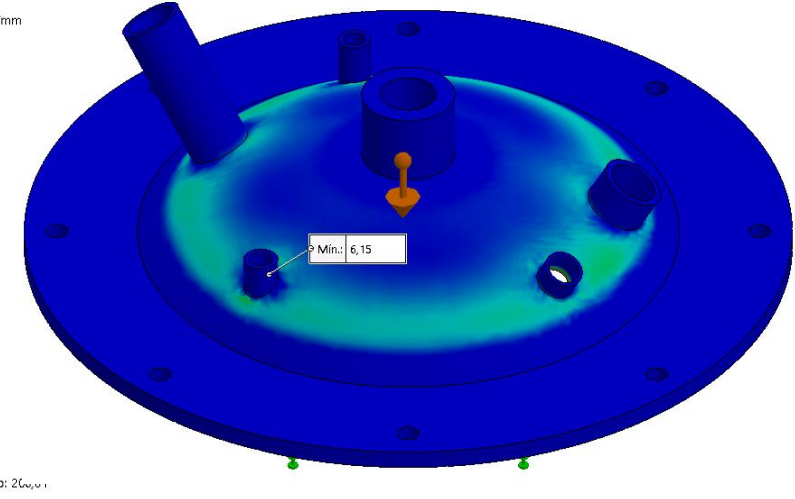
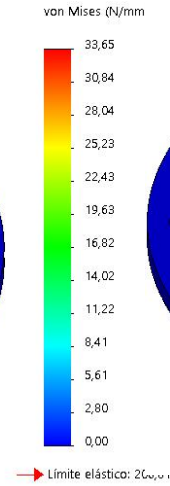
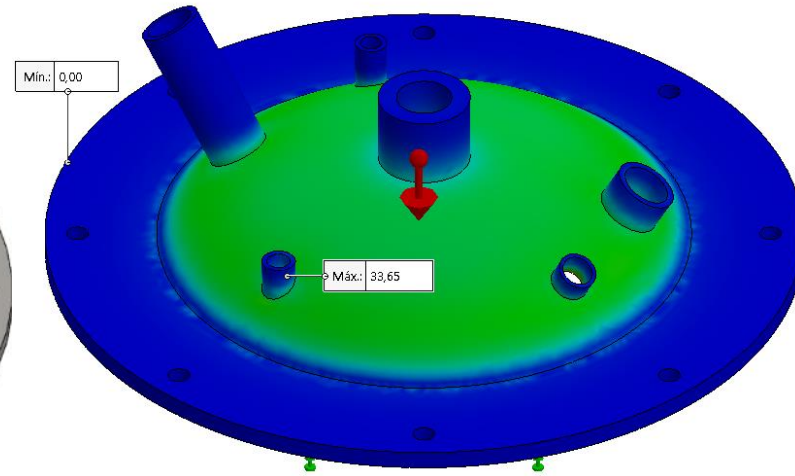
MODELADO Y SIMULACIÓN CAE

Cabezal Superior

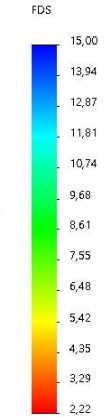
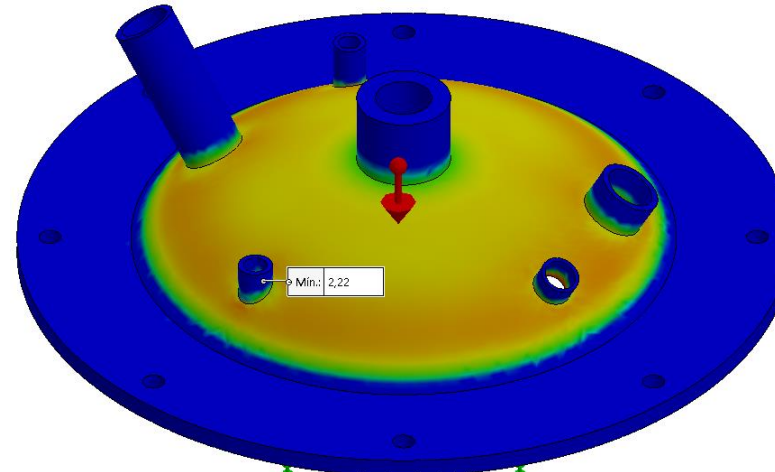
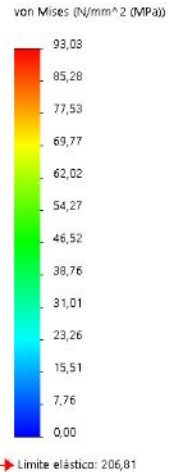
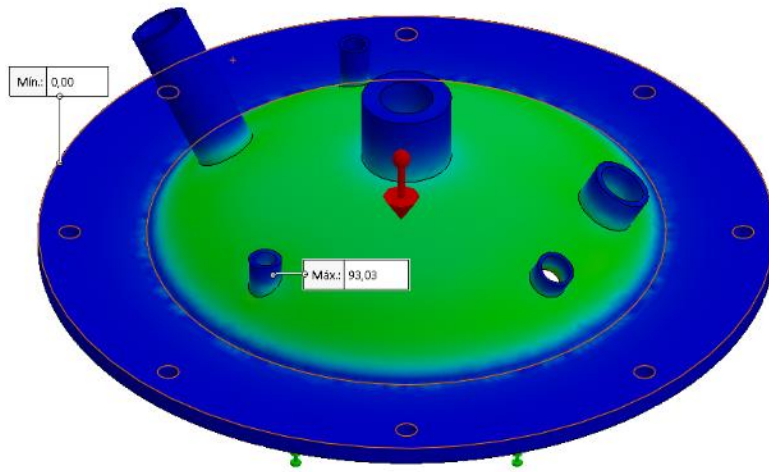
Vista Isométrica



Presión de Diseño: $P = 309596.98 \text{ Pa}$



Presión de trabajo máxima permisible: $P_{m\acute{a}x} = 856115.11 \text{ Pa}$



MODELADO Y SIMULACIÓN CAE

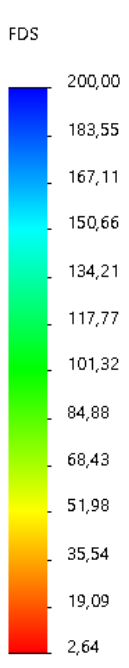
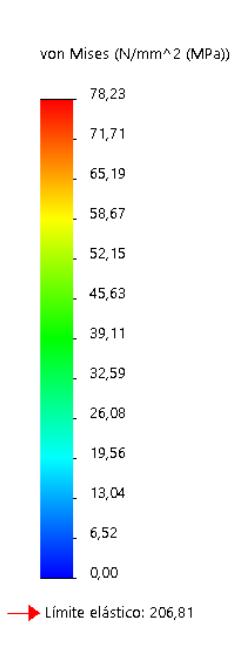
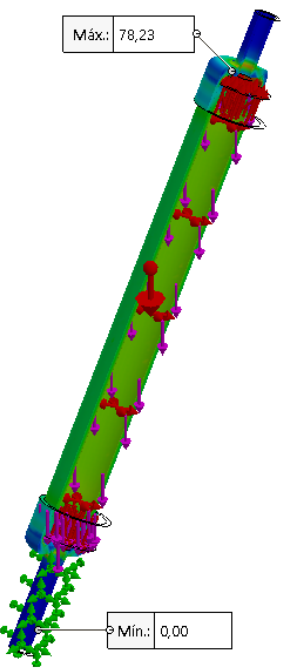
Columna de Reflujo

Vista Isométrica

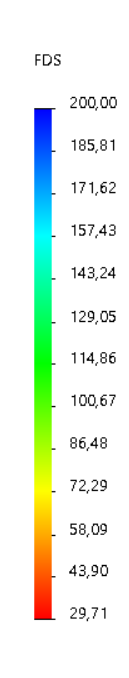
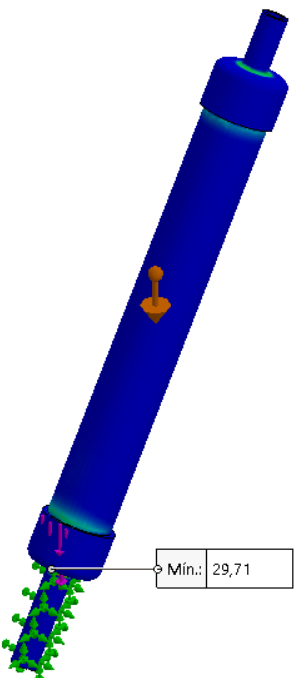
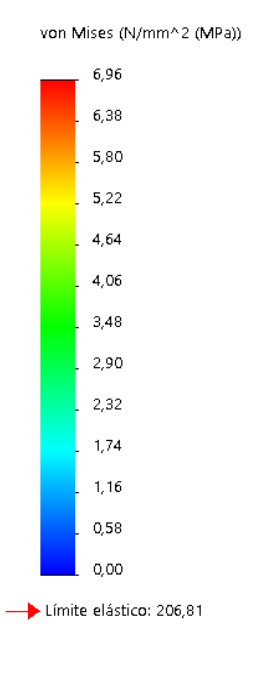
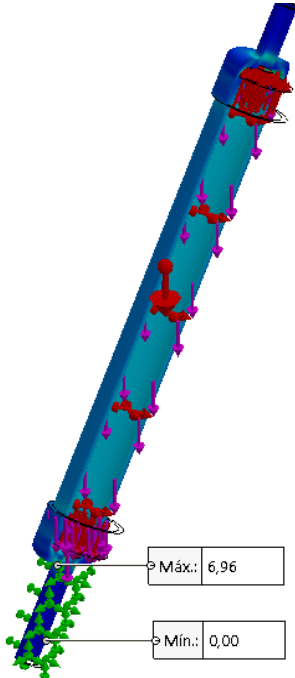


$$F = mg = (0.25 \text{ Kg}) \left(9.7721113 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)$$
$$F = 2.44 \text{ N}$$

Presión de trabajo máxima permisible: $P_{m\acute{a}x} = 10314655.73 \text{ Pa}$



Presión de Diseño: $P = 314289.47 \text{ Pa}$



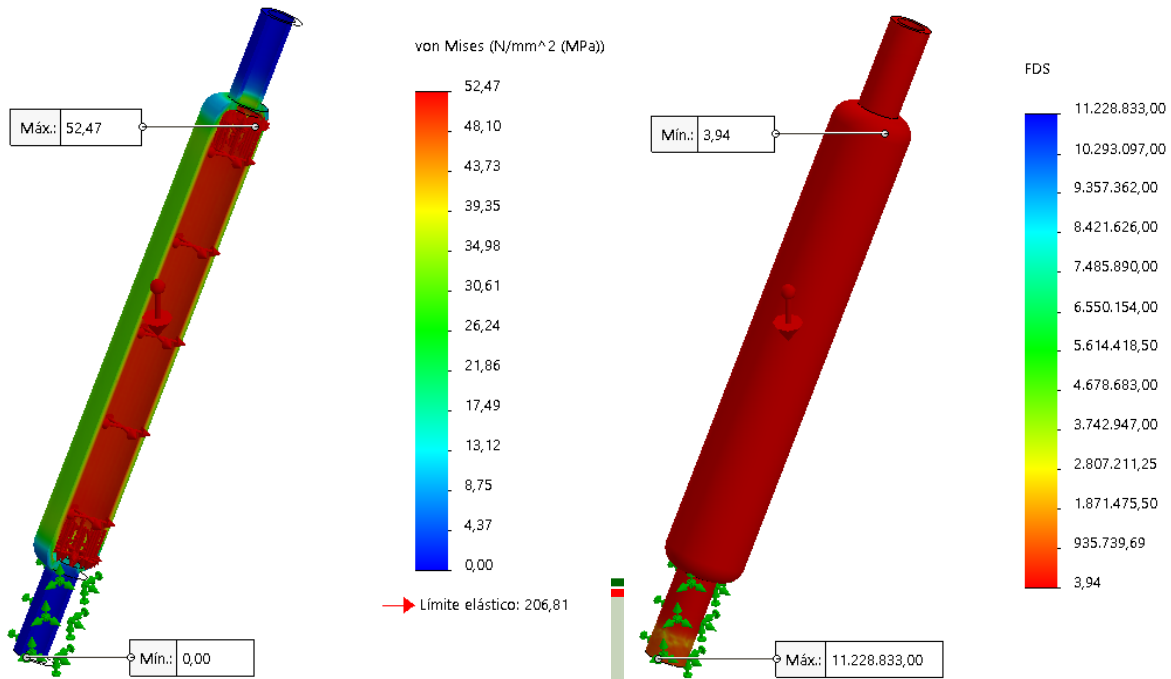
MODELADO Y SIMULACIÓN CAE

Reactor Catalítico

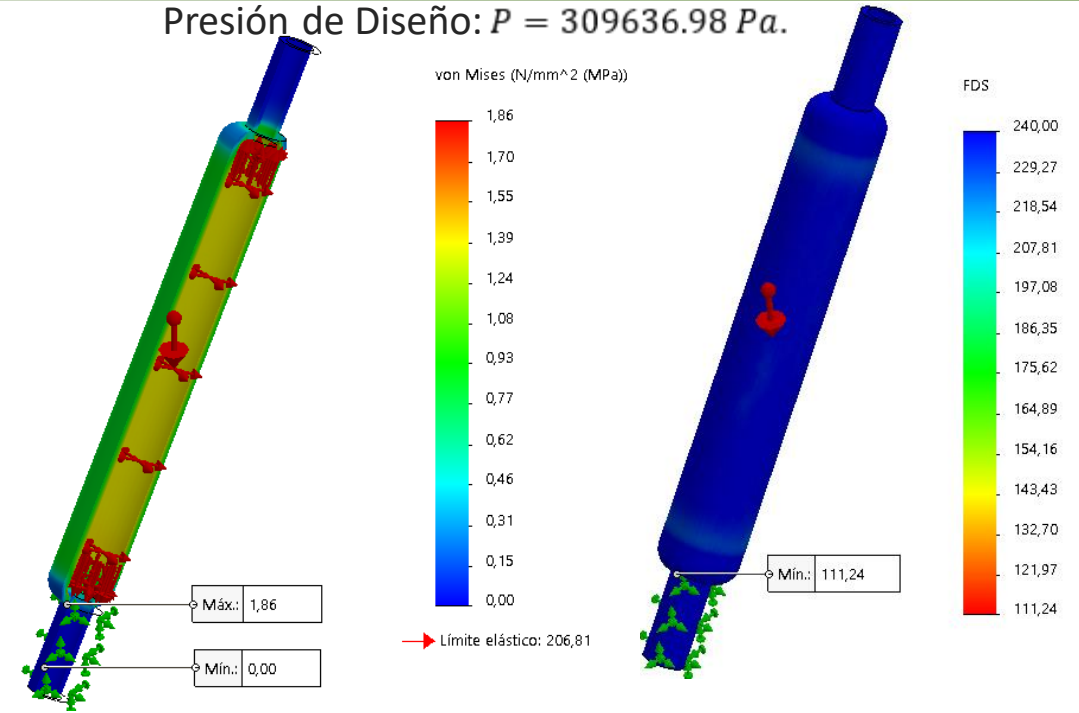
Vista Isométrica



Presión de trabajo máxima permisible: $P_{m\acute{a}x} = 11209649.63 \text{ Pa}$



Presión de Diseño: $P = 309636.98 \text{ Pa}$.



MODELADO Y SIMULACIÓN CAE

Depósito

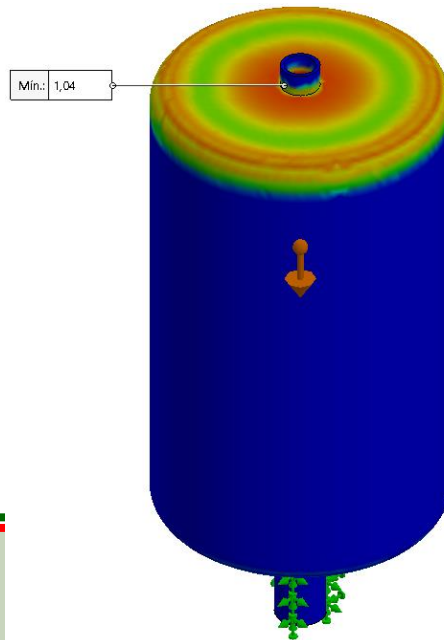
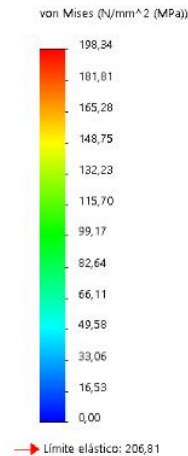
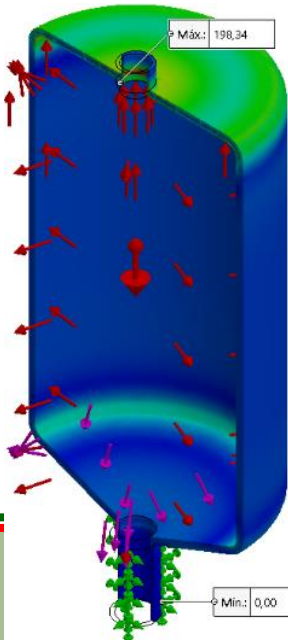
Vista Isométrica



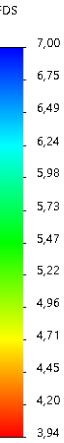
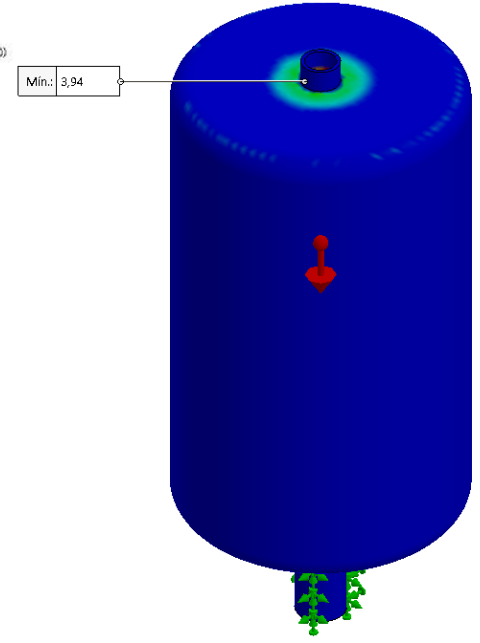
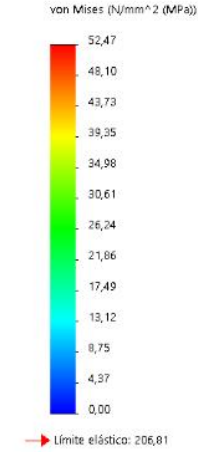
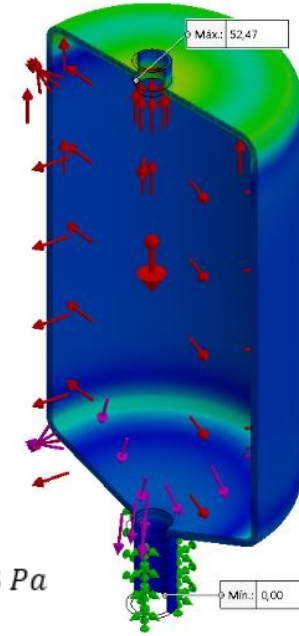
$$F = (2.6 \text{ Kg}) \left(9.7721113 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right)$$

$$F = 25.40 \text{ N}$$

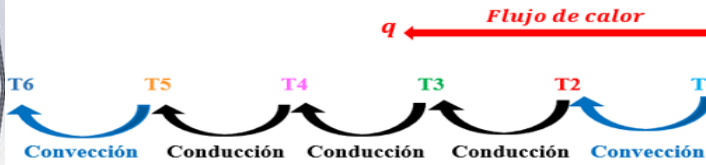
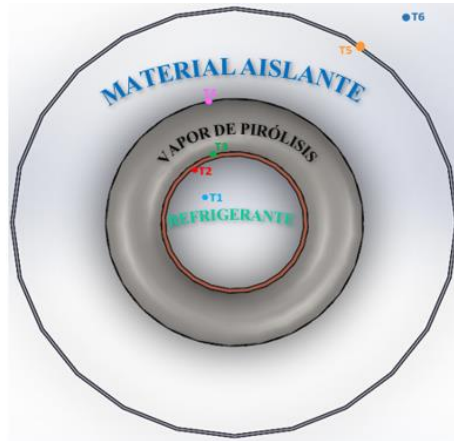
Presión de trabajo máxima permisible: $P_{\text{máx}} = 1172413.793 \text{ Pa}$



Presión de Diseño: $P = 310420.56 \text{ Pa}$



Diseño del Intercambiador de Calor



$$\begin{aligned}
 h_r &= 39.3452 \frac{\text{btu}}{\text{h pie}^2 \text{ } ^\circ\text{F}} & k_a &= 9.42427 \frac{\text{btu} \cdot \text{pie}}{\text{h pie}^2 \text{ } ^\circ\text{F}} & h_o &= 2 \frac{\text{btu}}{\text{h pie}^2 \text{ } ^\circ\text{F}} \\
 k_c &= 222.7134 \frac{\text{btu} \cdot \text{pie}}{\text{h pie}^2 \text{ } ^\circ\text{F}} & k_o &= 0.014458 \frac{\text{btu} \cdot \text{pie}}{\text{h pie}^2 \text{ } ^\circ\text{F}} \\
 r_1 &= 0.0392 \text{ [pie]} \\
 r_2 &= 0.0441 \text{ [pie]} \\
 r_3 &= 0.0499 \text{ [pie]} \\
 r_4 &= 0.125 \text{ [pie]}
 \end{aligned}$$

$$T_1 = 2 \text{ } ^\circ\text{C} \rightarrow 35.6 \text{ } ^\circ\text{F}. \quad T_6 = 15 \text{ } ^\circ\text{C} \rightarrow 59 \text{ } ^\circ\text{F}.$$

Se calcula la pérdida de calor

$$q = \frac{T_1 - T_6}{\frac{1}{h_r A_o} + \frac{r_2 - r_1}{k_c A_{1Lm}} + \frac{r_3 - r_2}{k_a A_{2Lm}} + \frac{r_4 - r_3}{k_o A_{3Lm}} + \frac{1}{h_o A_{ext}}}$$

$$q = -0.5720 \left[\frac{\text{btu}}{\text{h}} \right]$$

El valor negativo que se obtiene de la pérdida de calor "q", es porque el sistema de condensación se encuentra extrayendo el calor que posee el vapor de pirólisis.

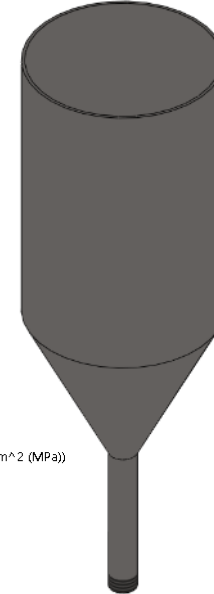


Diseño de la Tolva

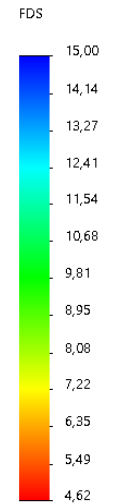
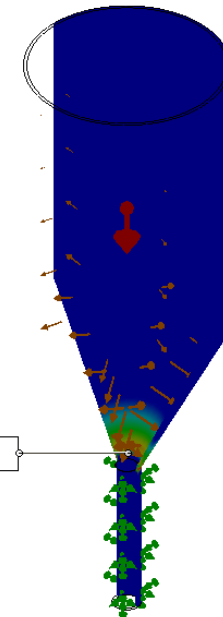
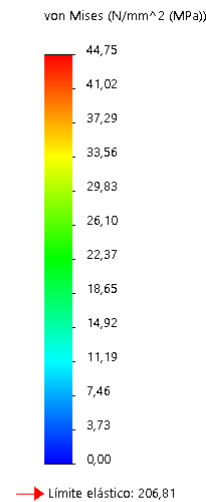
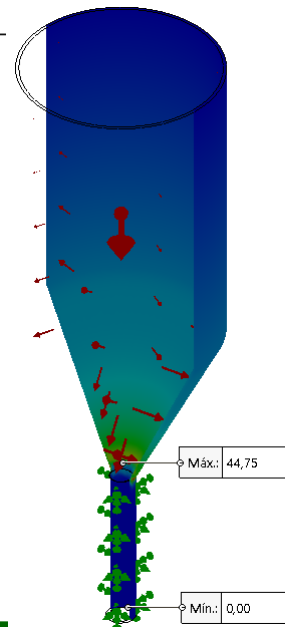
Parámetros iniciales	Ecuación	Valor calculado
$V_C = 7 [lt]$ Asumir: $V_{cono} = 1.5 [lt]$ $\theta = 60^\circ$	$V_{inútil} = 20\% V_C$	$V_{inútil} = 1.4 [lt]$
	$V_{total} = V_C + V_{inútil}$	$V_{total} = 8.4 [lt]$
	$r = \sqrt[3]{\frac{3 V_{cono}}{\pi \tan(\theta)}}$	$r = 9.38 [cm]$ $r \approx 9 [cm]$
	$h_1 = r \tan(\theta)$	$h_1 = 15.58 [cm]$
Recalcular el V_{cono}	$V_{cono} = \frac{1}{3} (\pi r^3 \tan(\theta))$	$V_{cono} = 1.321 [lt]$
	$V_{cilindro} = V_{total} - V_{cono}$	$V_{cilindro} = 7.079 [lt]$ $V_{cilindro} = 7079 [cm^3]$
	$h_2 = \frac{V_{cilindro}}{\pi r^2}$	$h_2 = 27.81 [cm]$

MODELADO Y SIMULACIÓN CAE

Vista Isométrica



$$F = mg = (5 \text{ Kg}) \left(9.7721113 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) = 48.86 \text{ N}$$



Diseño del Agitador

Parámetros iniciales

$$\rho = 0.77 \frac{g}{cm^3} = 770 \frac{Kg}{m^3}$$

$$\mu = 6.387 \frac{Kg}{ms}$$

$$D_a = 0.10 m$$

$$n = 1.25 \frac{rev}{s}$$

$$\eta = 0.8$$

$$Re = \frac{D_a^2 n \rho}{\mu}$$

$$P = K_L n^2 D_a^3 \mu$$

$$P_m = \frac{P}{\eta}$$

$$T_m = \frac{P}{\omega}$$

$$d = \left[\frac{16 \sqrt{3} N_f}{\pi} \left(\frac{T_m}{S_y} \right) \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$Re = 1.506967$$

$$P = 0.648679 [w]$$

$$P = 8.698936 \times 10^{-4} [hp]$$

$$P_m = 1.08736 \times 10^{-3} [hp]$$

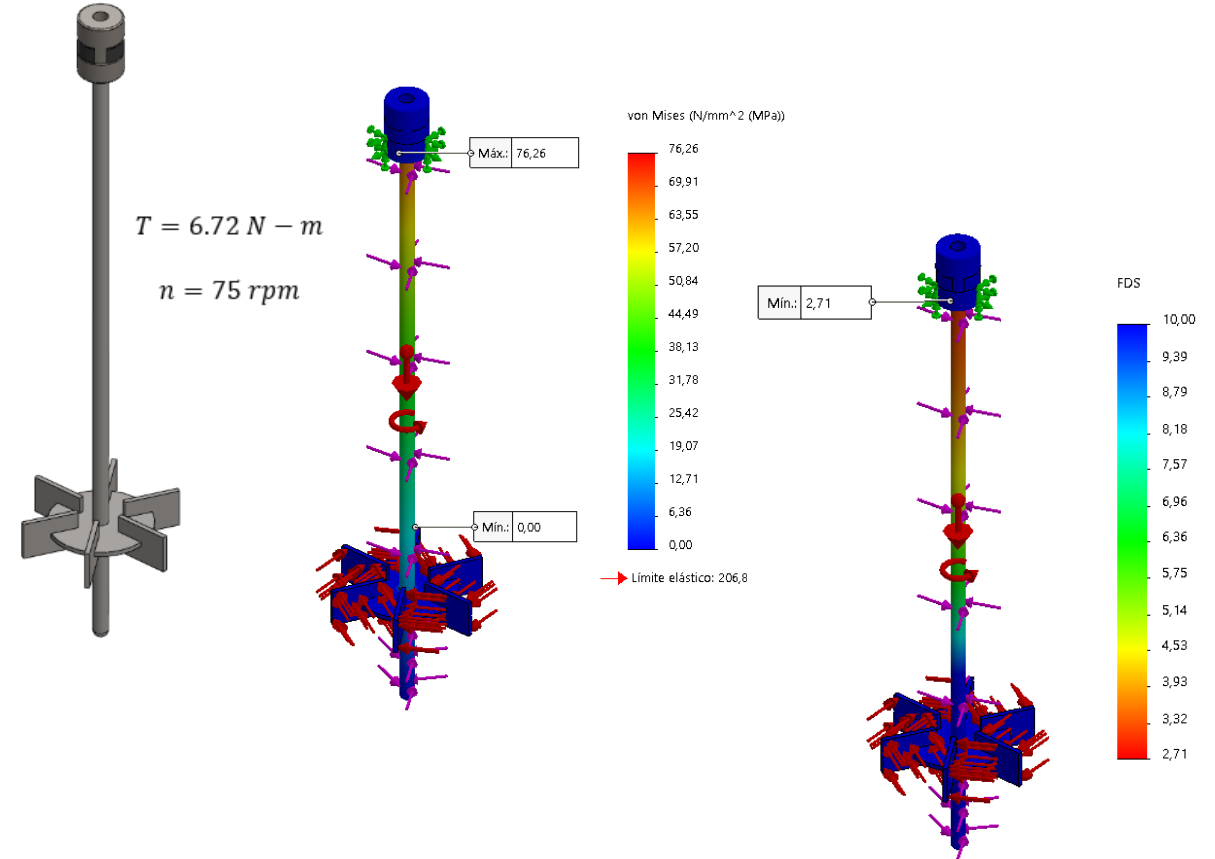
$$T_m = 0.0825924 [N - m]$$

$$d = 3.019739 \times 10^{-3} [m]$$

$$d = 3.02 [mm]$$

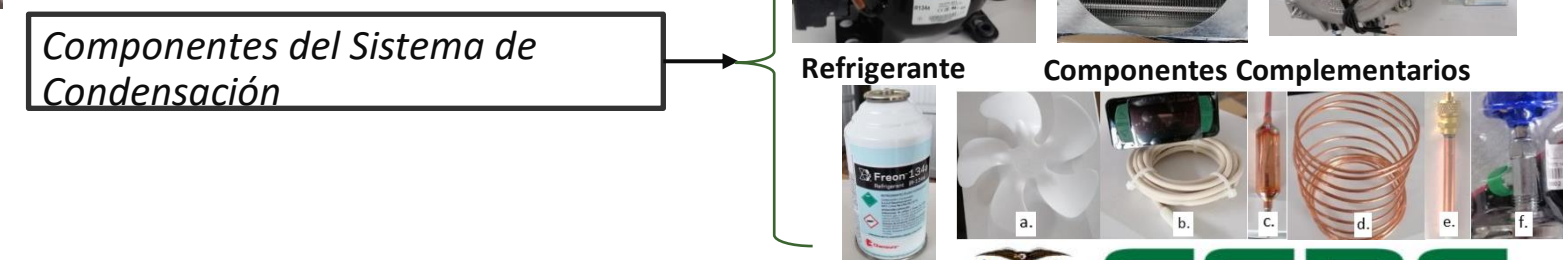
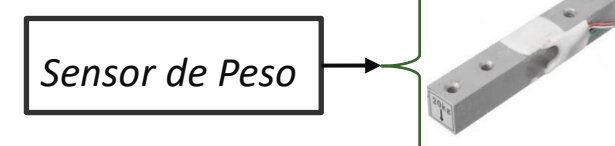
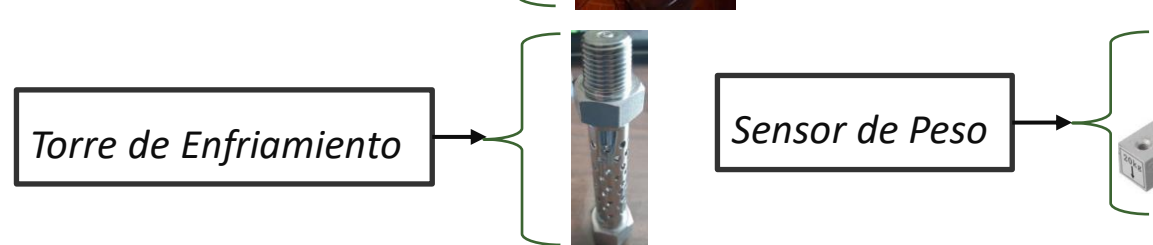
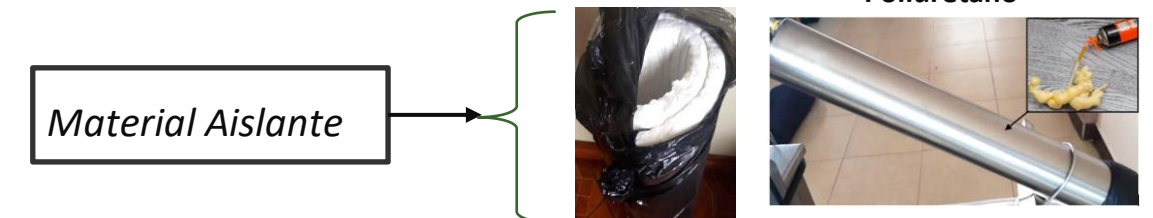
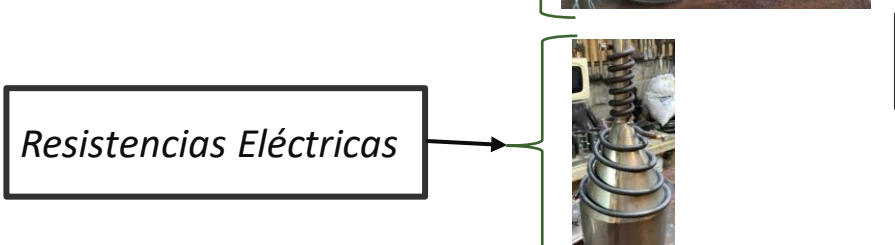
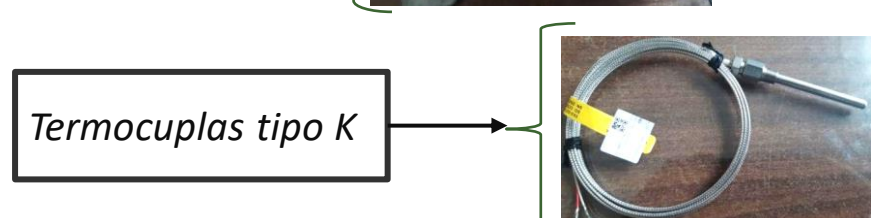
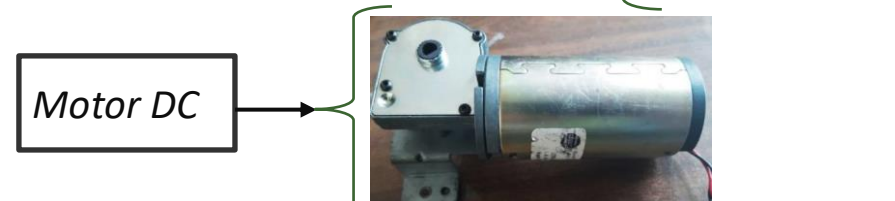
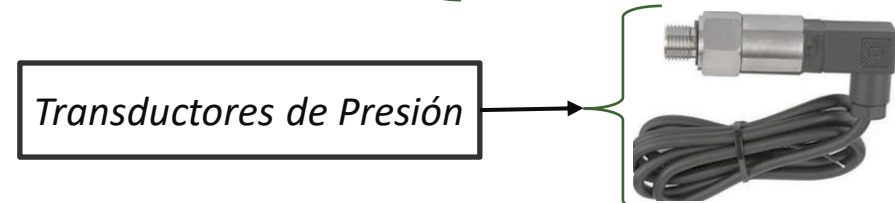
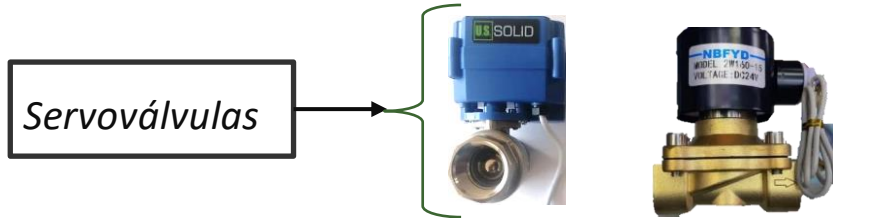
MODELADO Y SIMULACIÓN CAE

Vista Isométrica



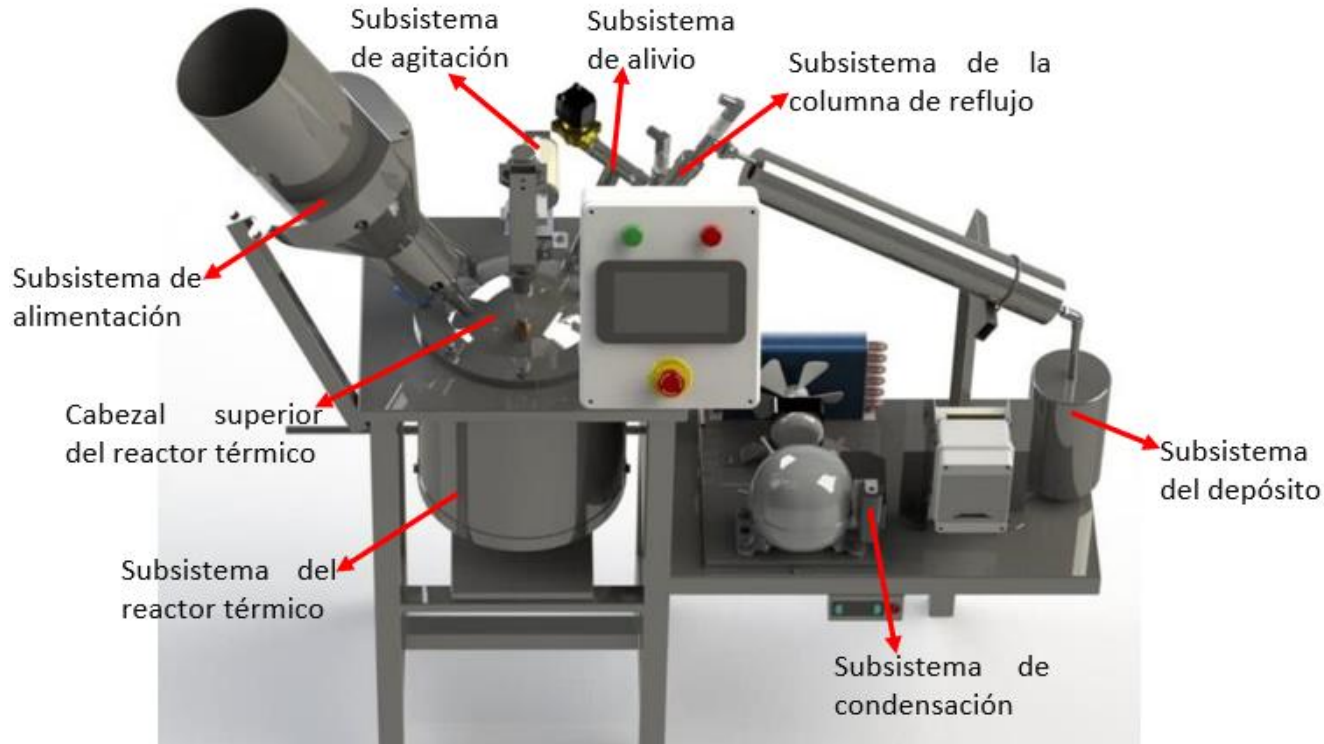
ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

SELECCIÓN DE COMPONENTES NORMALIZADOS

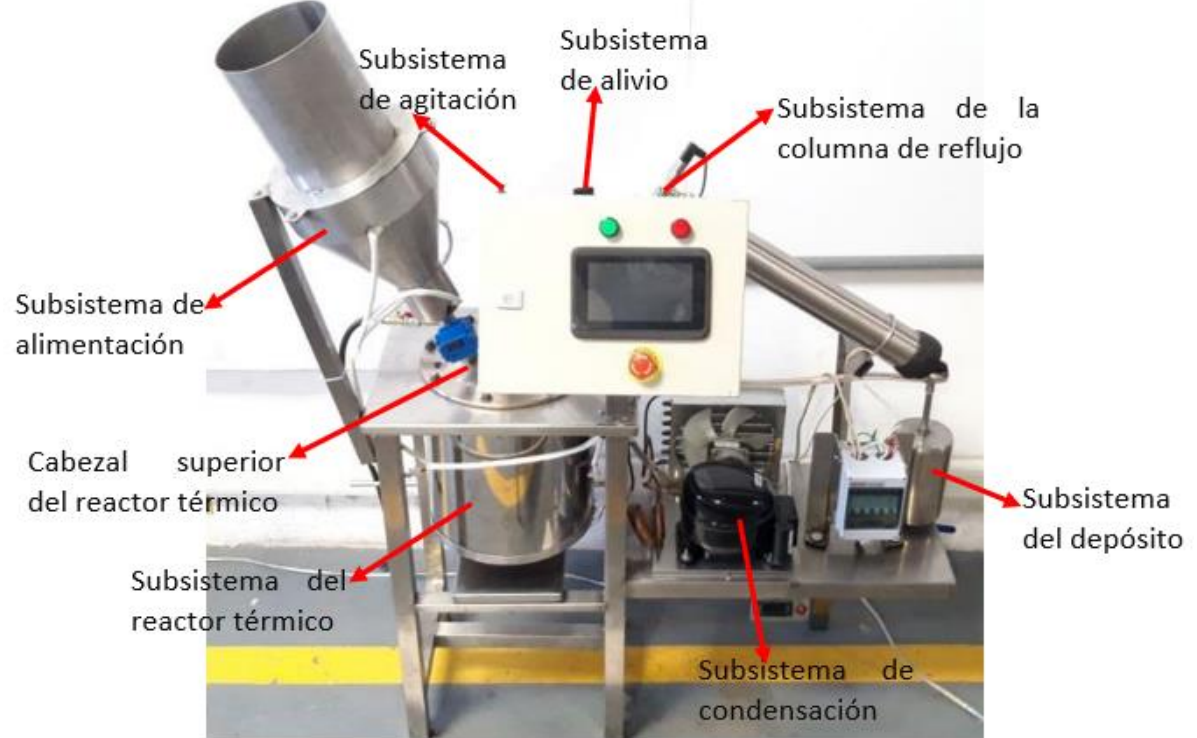


ENSAMBLE DEL SISTEMA DE REACCIÓN DE PIRÓLISIS

CAD

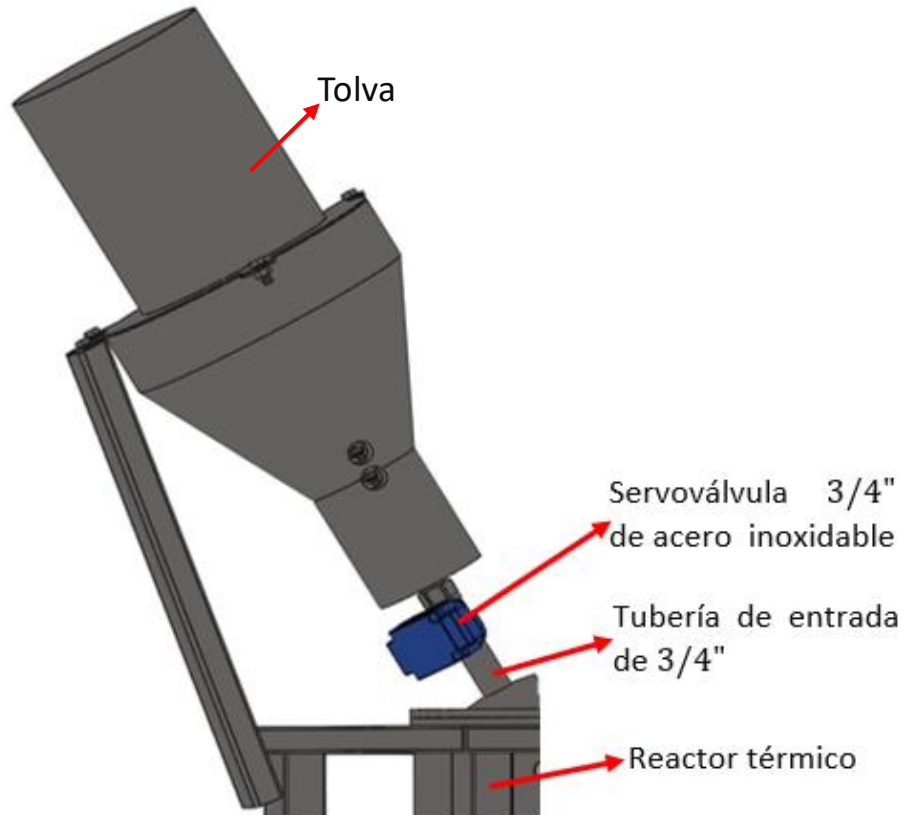


CONSTRUCCIÓN

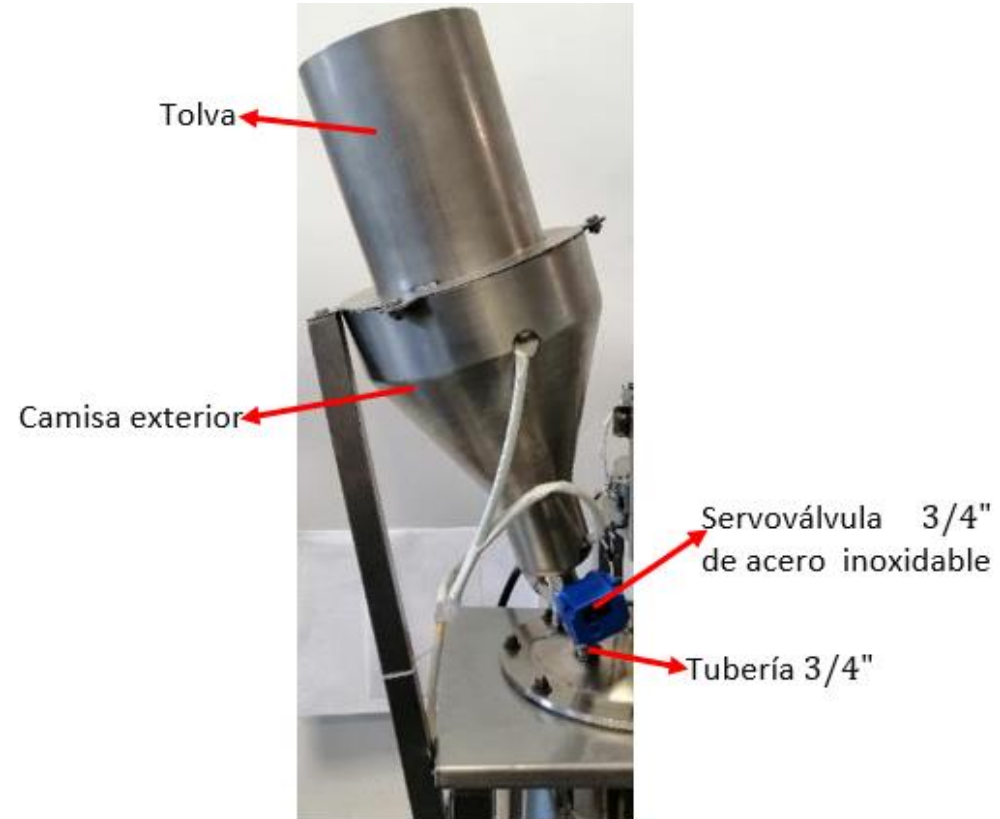


ENSAMBLE DEL SUBSISTEMA DE ALIMENTACIÓN

CAD

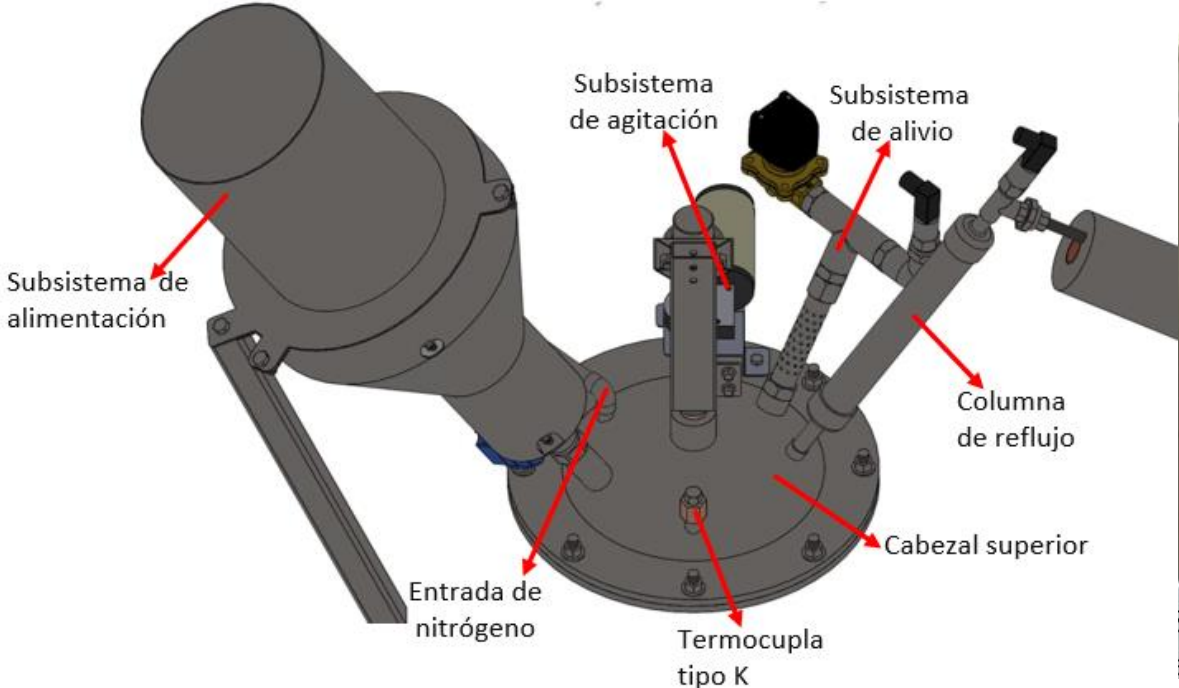


CONSTRUCCIÓN

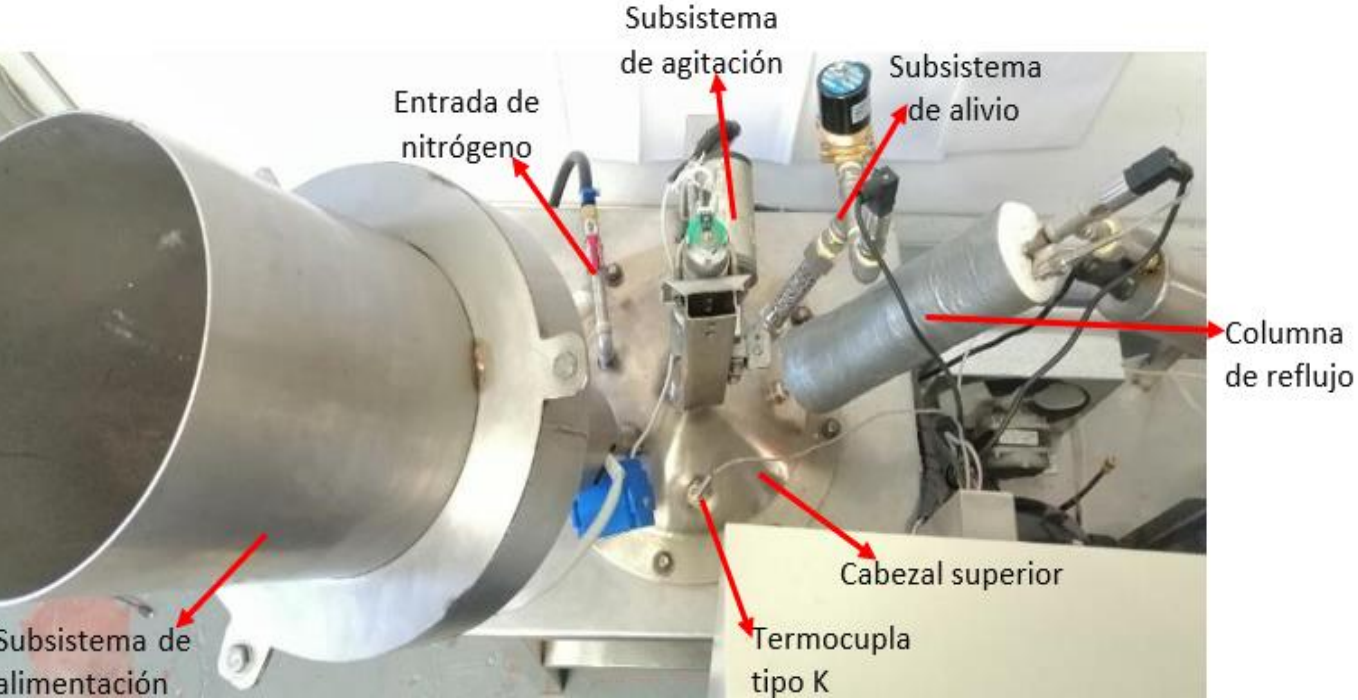


ENSAMBLE DEL CABEZAL SUPERIOR

CAD



CONSTRUCCIÓN



ENSAMBLE DEL REACTOR TÉRMICO

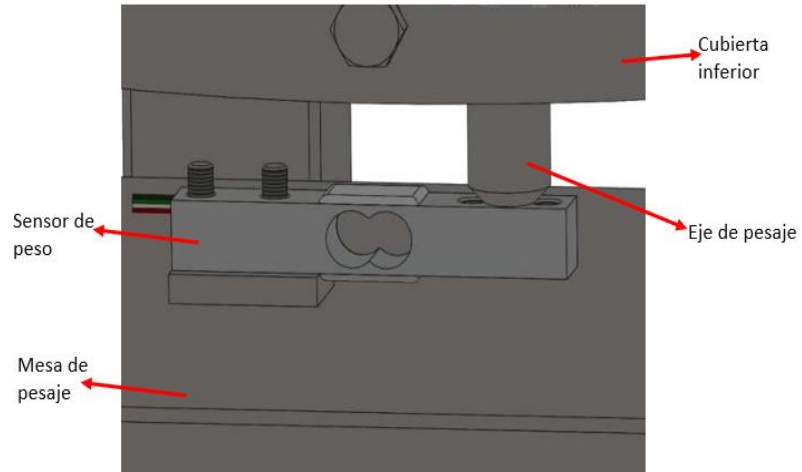
CAD



CONSTRUCCIÓN



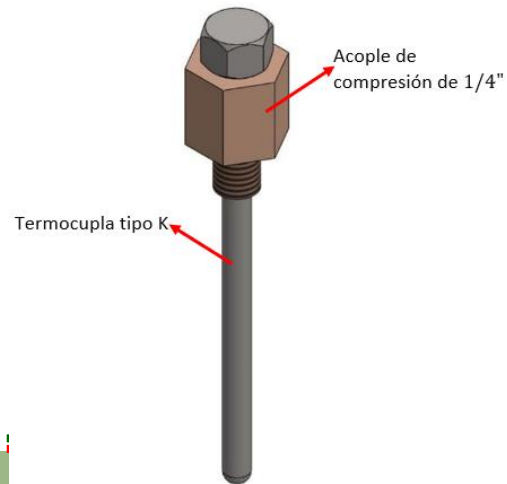
CAD



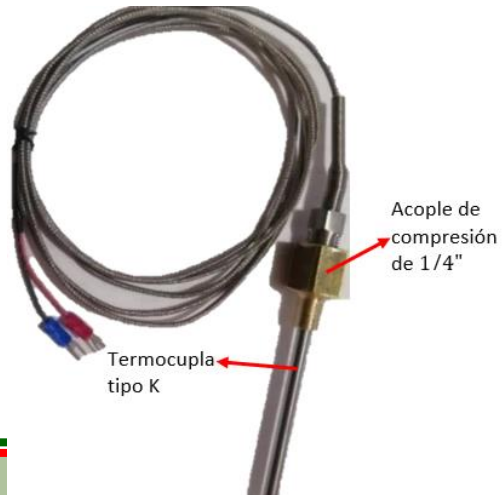
CONSTRUCCIÓN



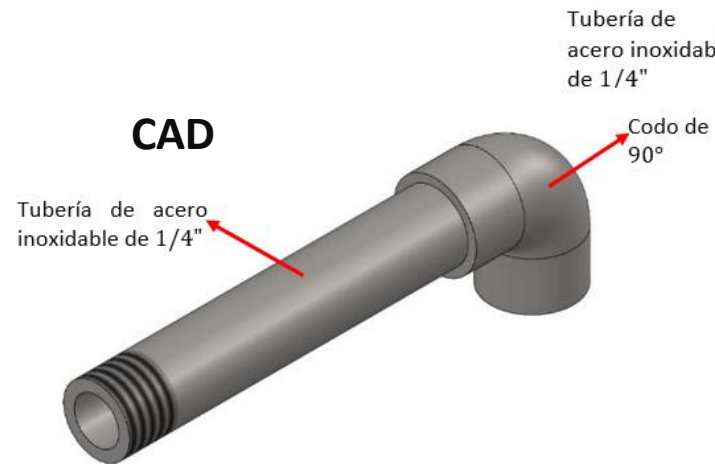
CAD



CONSTRUCCIÓN



CAD

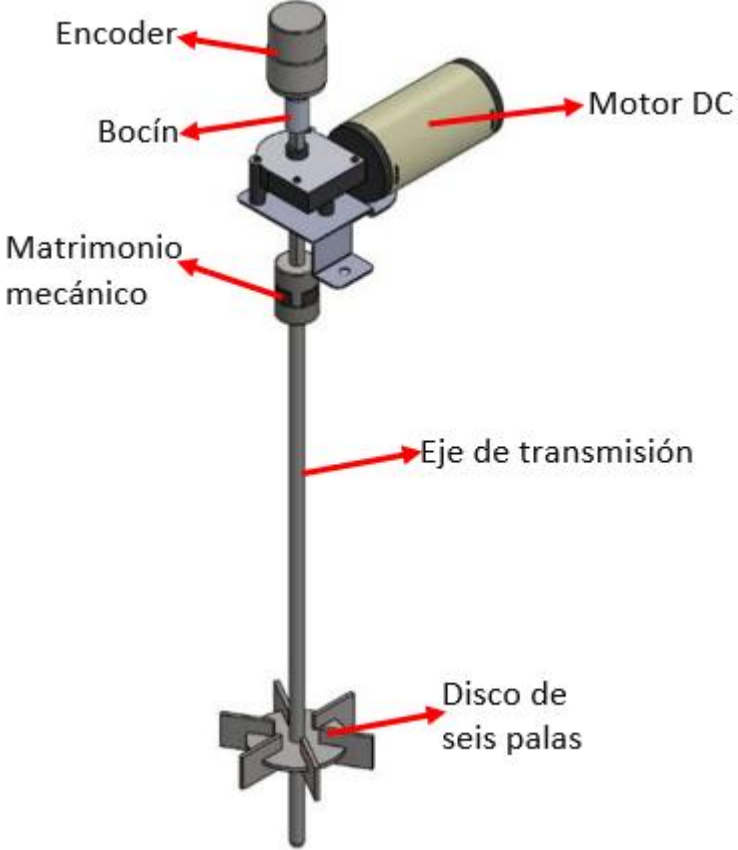


CONSTRUCCIÓN

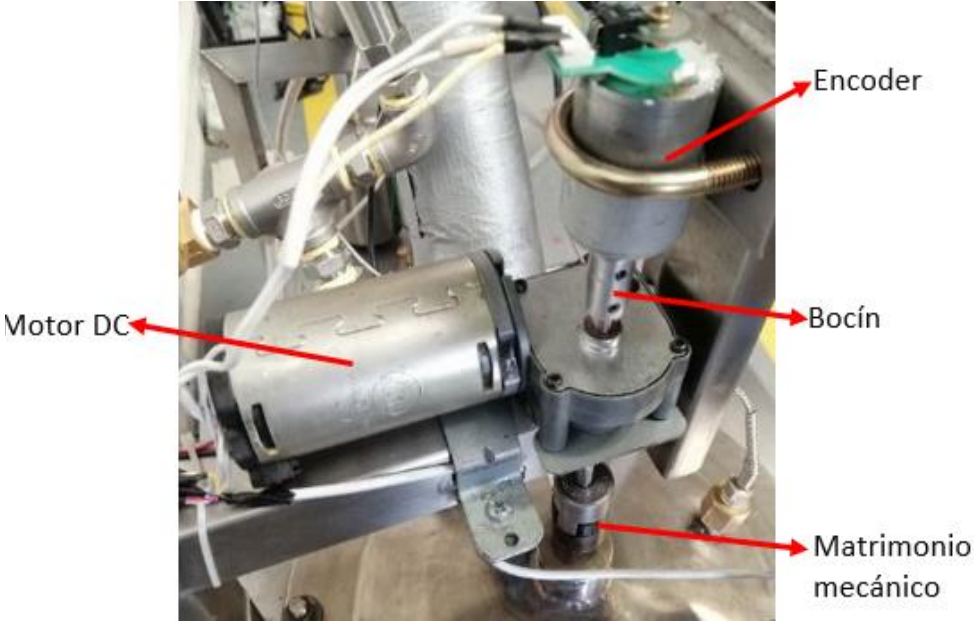


ENSAMBLE DEL SUBSISTEMA DE AGITACIÓN

CAD

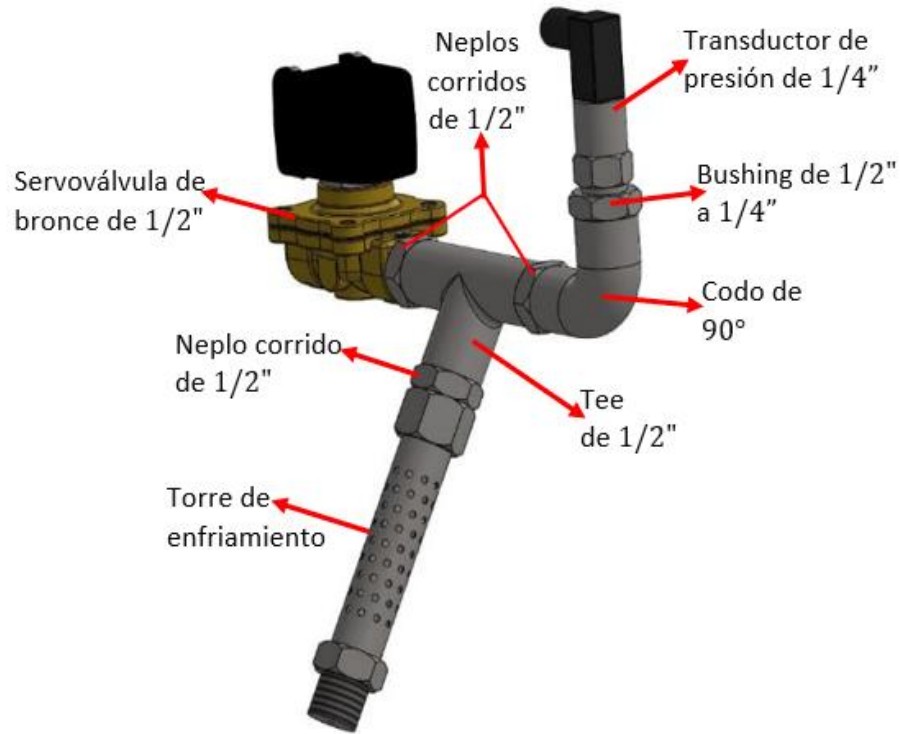


CONSTRUCCIÓN

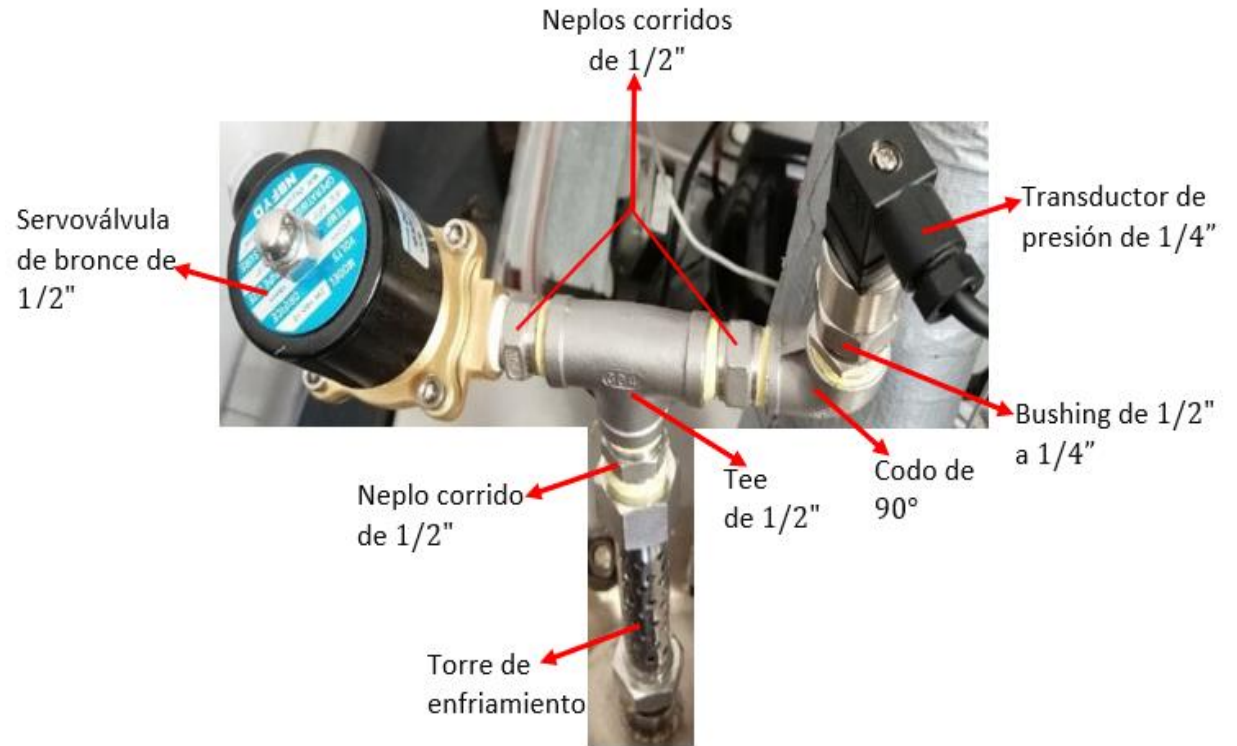


ENSAMBLE DEL SUBSISTEMA DE ALIVIO

CAD



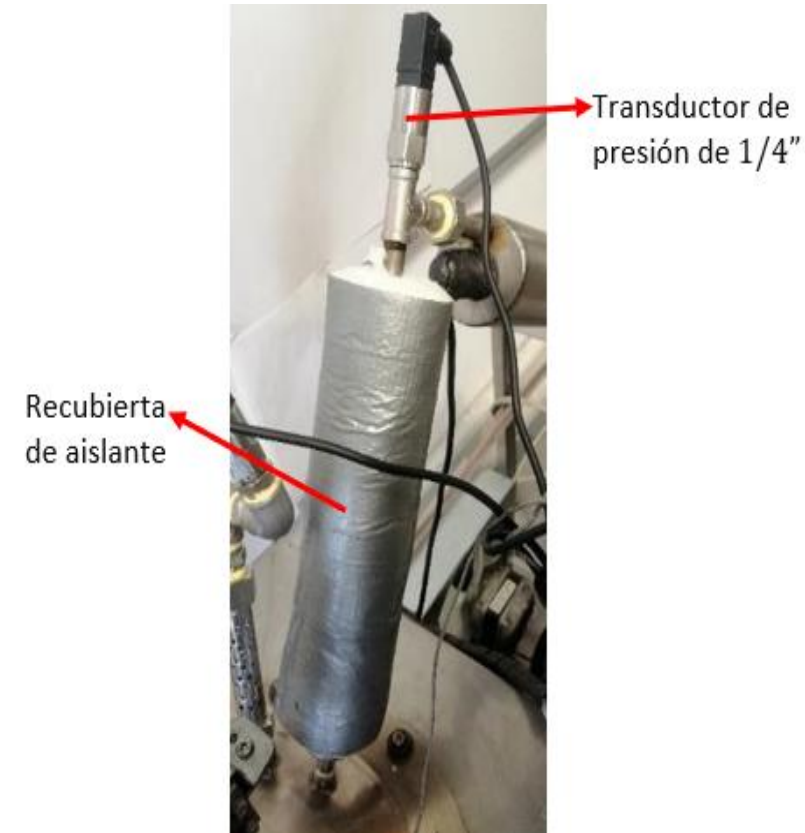
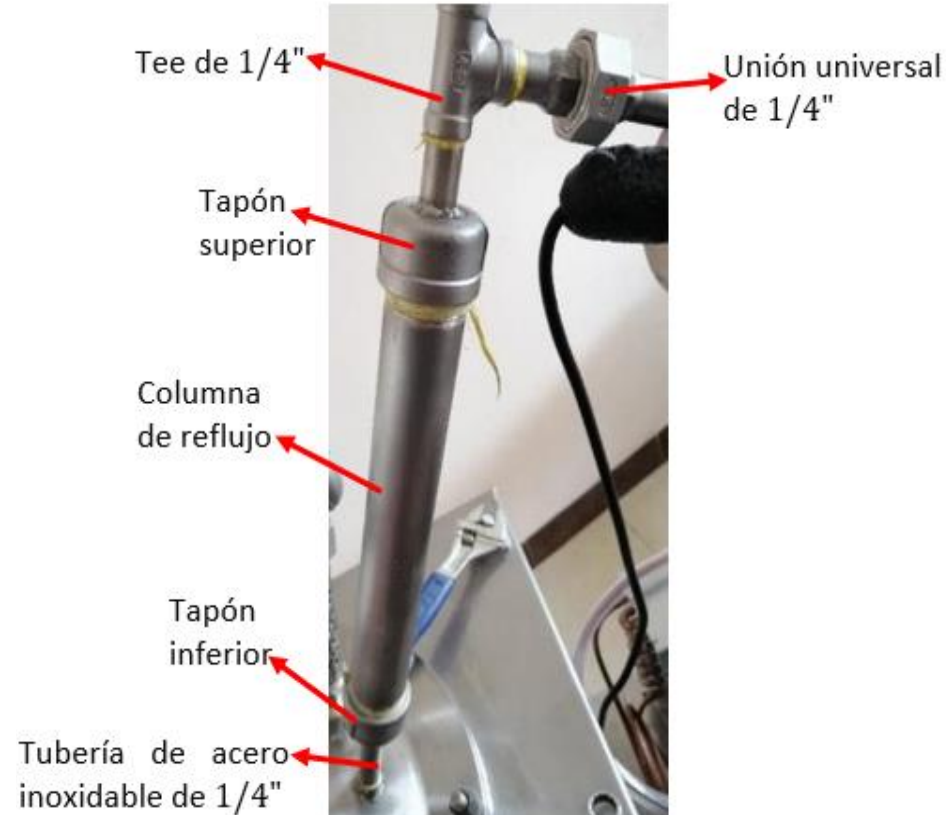
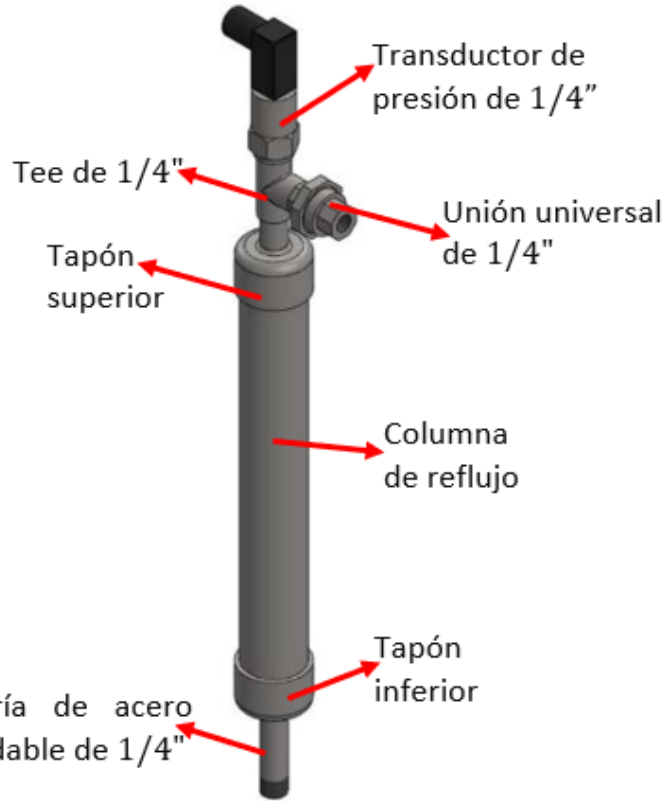
CONSTRUCCIÓN



ENSAMBLE DEL SUBSISTEMA DE LA COLUMNA DE REFLUJO

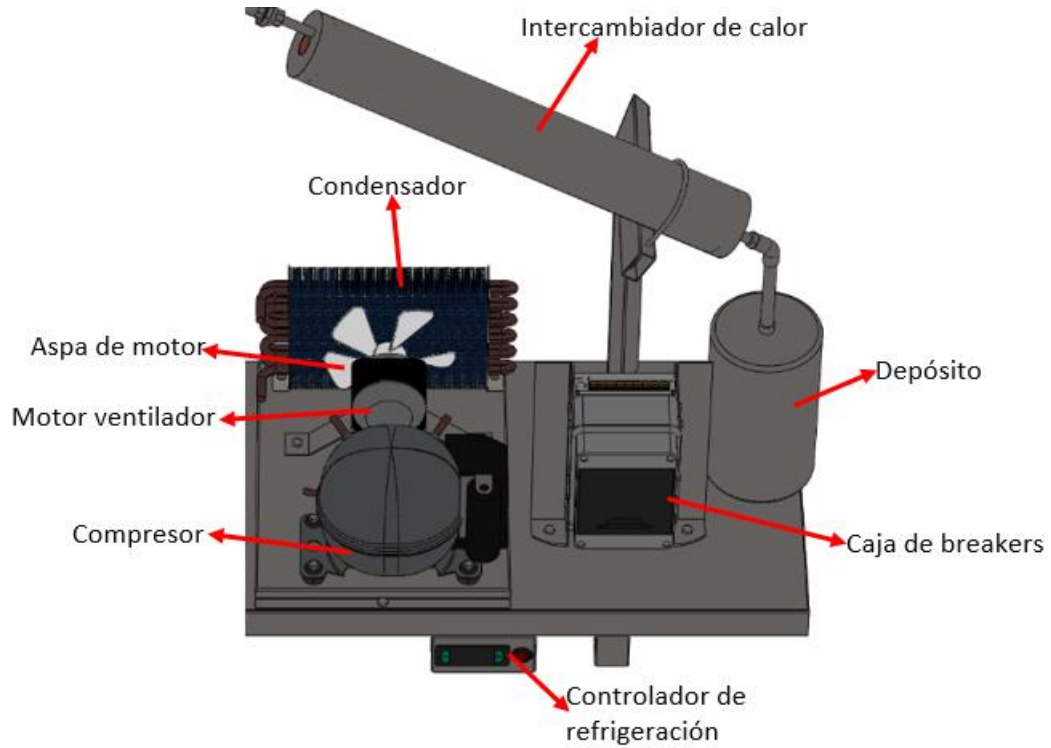
CAD

CONSTRUCCIÓN



ENSAMBLE DEL SUBSISTEMA DE CONDENSACIÓN

CAD



CONSTRUCCIÓN



ENSAMBLE DEL INTERCAMBIADOR

CAD

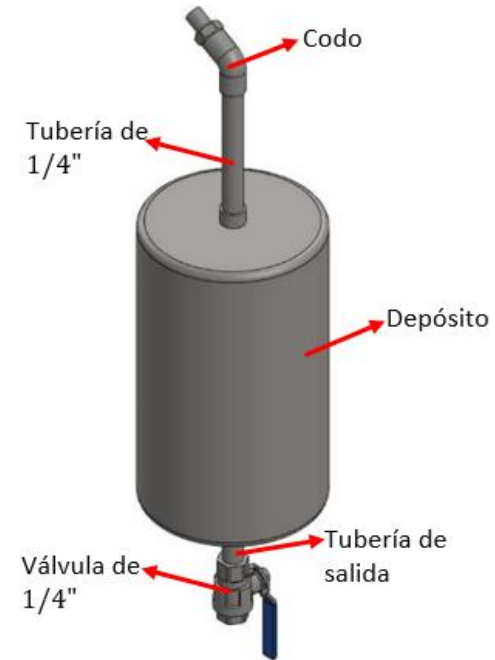


CONSTRUCCIÓN

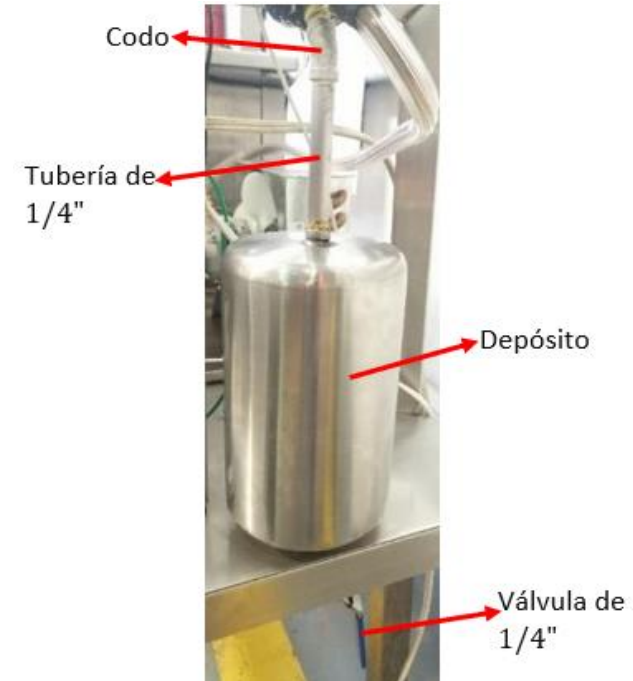


ENSAMBLE DEL DEPÓSITO

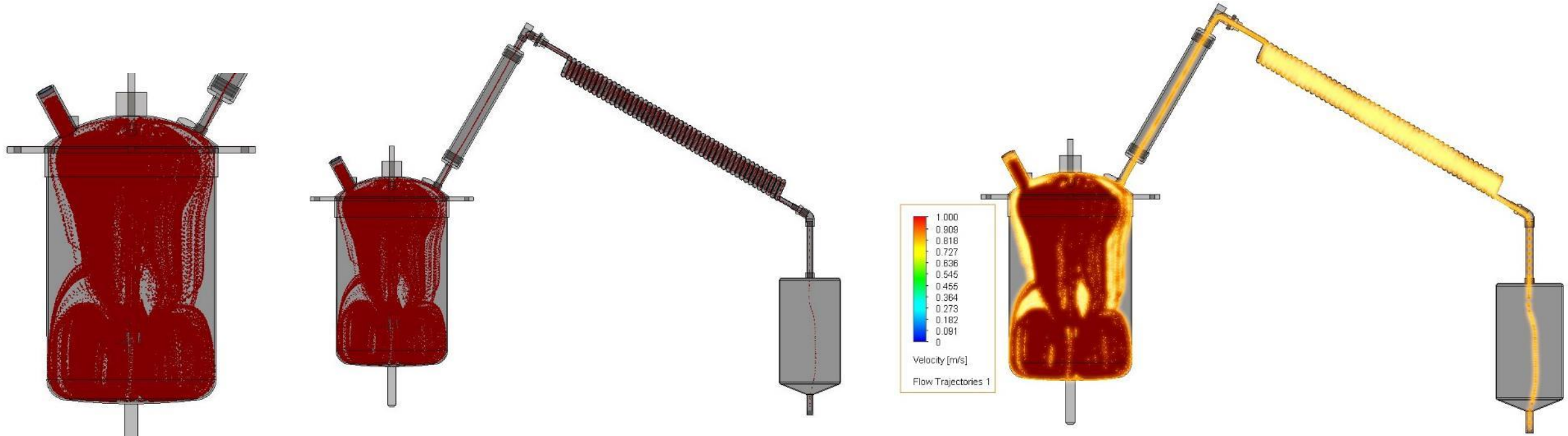
CAD



CONSTRUCCIÓN

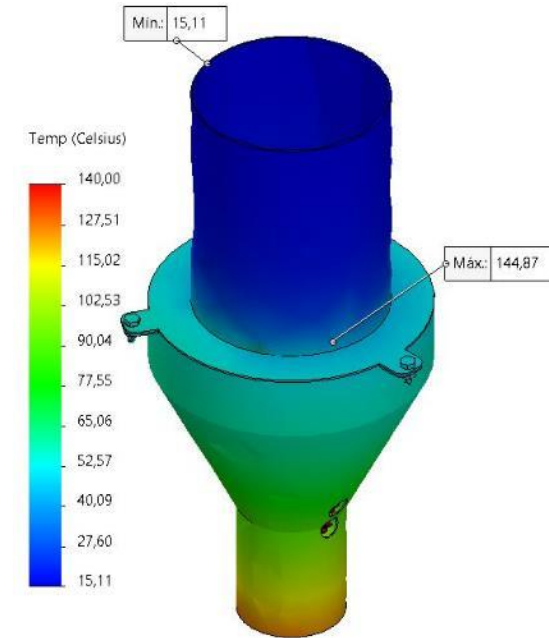
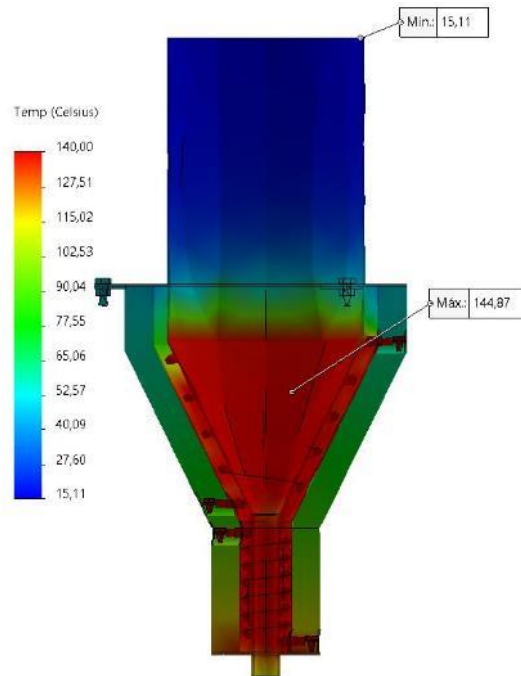


SIMULACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE REACCIÓN



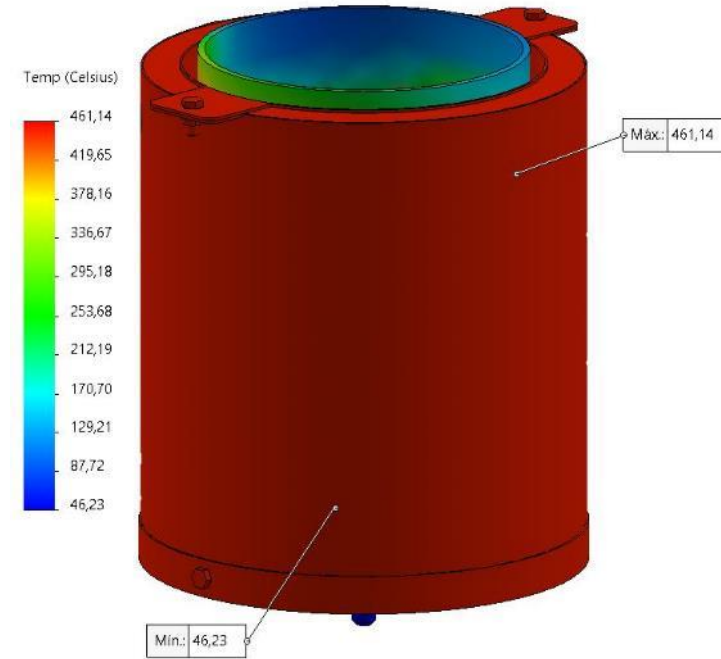
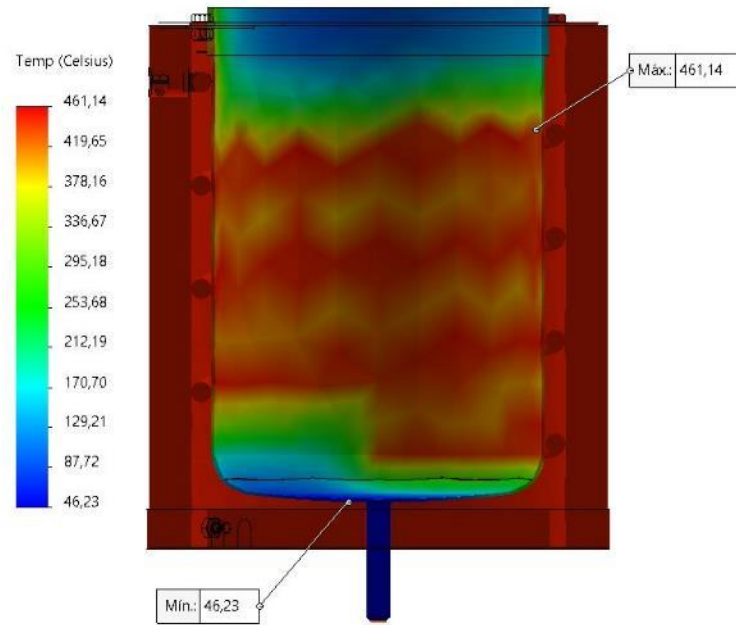
SIMULACIÓN DE TRANSFERENCIA DE CALOR

SIMULACIÓN DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN LA TOLVA DE ALIMENTACIÓN



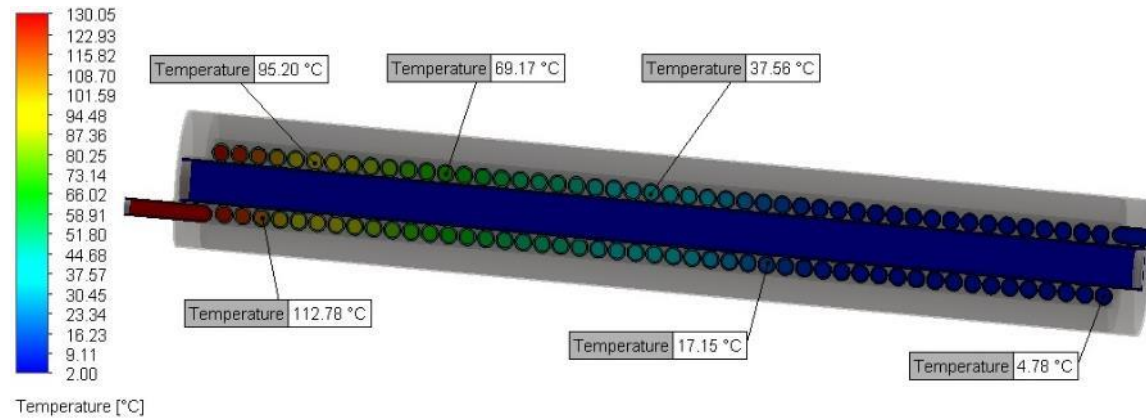
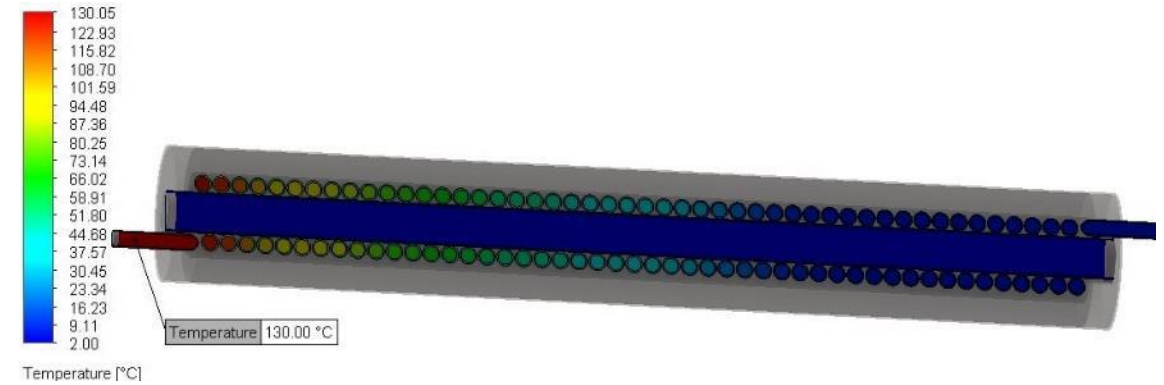
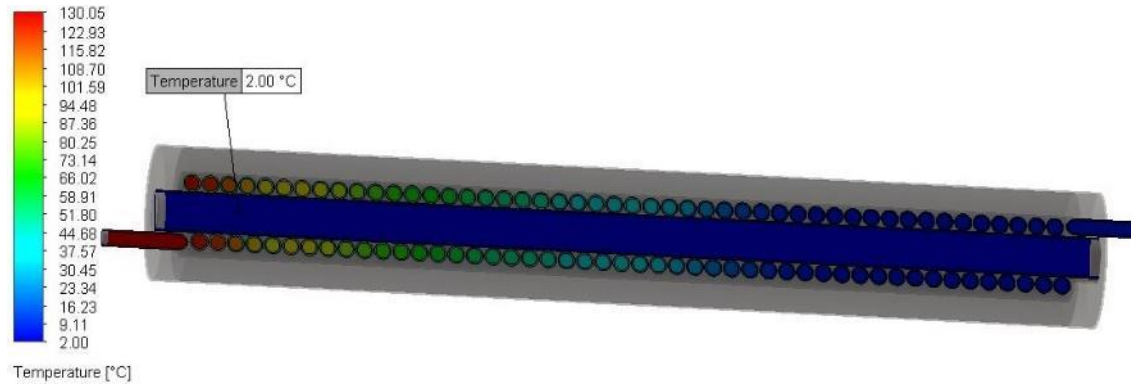
SIMULACIÓN DE TRANSFERENCIA DE CALOR

SIMULACIÓN DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL REACTOR TÉRMICO

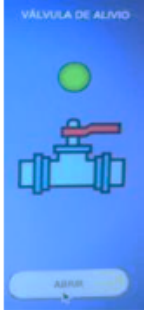

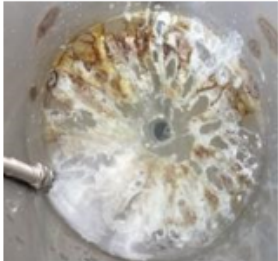


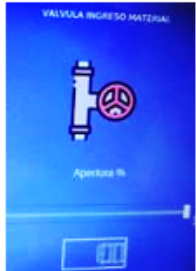


SIMULACIÓN DE TRANSFERENCIA DE CALOR





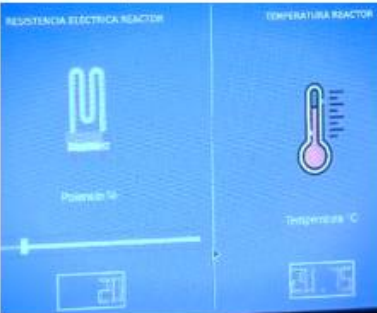
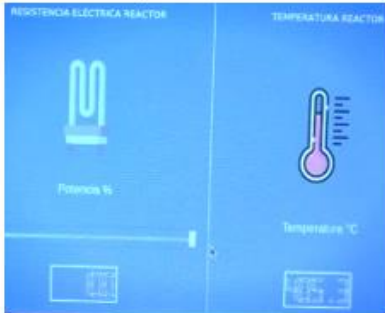
SIMULACIÓN DE LA PÉRDIDA DE CALOR EN EL INTERCAMBIADOR



PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DE LOS SUBSISTEMAS









Subsistemas	Descripción	Funcionamiento	
Subsistema de alivio	<p>El subsistema de alivio permite la apertura de la válvula de bronce, en el momento que el sistema de reacción presente alguna elevación anormal en la presión durante el proceso de pirólisis.</p> <p>Entonces se realiza una prueba de funcionamiento que consiste en la apertura y cierre de la válvula de bronce. La iluminaria verde se enciende cuando la válvula de bronce se encuentra abierta y cuando esta iluminaria se encuentra apagada es porque la válvula ya está cerrada.</p>	Válvula de bronce abierta	Válvula de bronce cerrada
			
Subsistema de alimentación	<p>En el subsistema de alimentación la prueba de funcionamiento consiste en la apertura y cierre de la servoválvula de 3/4" de acero inoxidable.</p> <p>Para la primera prueba de funcionamiento, en un comienzo la servoválvula se encuentra completamente cerrada y se coloca agua en el interior de la tolva de alimentación.</p> <p>Posteriormente se abre la servoválvula y el agua empieza a caer a través de la tubería, para llegar al interior de reactor térmico.</p>	Servoválvula cerrada y tolva llena de agua	Servoválvula abierta y el agua descende por la tubería
			
	Reactor térmico lleno de agua	Abertura de la servoválvula	
	<p>Cuando se realizan las pruebas para la obtención de combustible, en la tolva de alimentación se ingresa la materia prima que es el polipropileno.</p> <p>En el anexo 26 se presentan los de videos donde se verifica que la servoválvula funciona correctamente.</p>		

PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DE LOS SUBSISTEMAS

Subsistemas	Descripción	Funcionamiento	
Subsistema de agitación	<p>Para el subsistema de agitación, la prueba de funcionamiento consiste en encender al motor y que el agitador mecánico gire en intervalos controlados de tiempo. Como se observa en esta prueba de funcionamiento, se activa al motor en un 70% del pwm que corresponde a una velocidad de 32 rpm.</p>	Motor girando a 32 rpm	Visualización en el panel
			
Subsistema del reactor térmico	<p>En el subsistema del reactor térmico, la principal prueba de funcionamiento se realiza con el fin de verificar si existen fugas en el reactor. Esto se comprueba en el momento de la inyección del nitrógeno, ya que este gas debe trasladarse a través de todo el sistema y salir por la válvula que se encuentra al final del depósito, cuando esto sucede se puede visualizar el burbujeo en el recipiente lleno de agua.</p>	Reactor térmico acoplado	Burbujeo del N a la salida
			
Termocuplas tipo K	<p>La prueba de funcionamiento para las termocuplas consiste en obtener datos de temperatura; para ello se procede a encender las resistencias térmicas y subir su potencia para calentar el interior del reactor térmico y la tolva de alimentación. Como se visualiza en un comienzo se registra una temperatura de 20.75 °C y al transcurrir 2 horas se registra una temperatura de 405.3 °C; con ello se comprueba que las termocuplas tipo K se encuentran funcionando correctamente.</p>	Temperatura inicial	Temperatura final
			





PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DE LOS SUBSISTEMAS



Subsistemas	Descripción	Funcionamiento
Transductores de presión	<p>La prueba de funcionamiento para los transductores de presión consiste en leer datos de presión; para ello se calienta el interior del reactor térmico. En un inicio se registra una presión de 14.96 <i>psi</i> en el reactor y una presión de 14.88 <i>psi</i> en la columna de reflujo; al transcurrir 1 hora se registra una presión de 17.39 <i>psi</i> en el reactor y una presión de 16.69 <i>psi</i> en la columna de reflujo; se comprueba que los transductores de presión funcionan correctamente.</p>	<p>Presión inicial</p>  <p>Presión final</p> 
Sensor de peso	<p>Para la prueba de funcionamiento del sensor de peso, se procede a ingresar la materia prima que es el polipropileno; se coloca la materia prima en la tolva y se abre la servoválvula. Entonces el sensor comienza a leer la cantidad de polipropileno en el interior del reactor térmico. Como se puede observar el sensor ha detectado 384.4 <i>gramos</i> de materia prima en el interior del reactor térmico.</p>	 
Subsistema de condensación	<p>En el subsistema de condensación se ingresa un set point de 5 °C, entonces todo el subsistema va a disminuir la temperatura inicial y tiende a cumplir el valor del set point ingresado. Como se observa se registra una temperatura inicial de 18.3 °C y al transcurrir 2 horas la temperatura baja a 9 °C.</p>	 
Subsistema del depósito	<p>La principal función del subsistema del depósito es la recolección del producto que se obtiene al finalizar el proceso de pirólisis. Como se visualiza se logra obtener 850 <i>ml</i> de combustible en el recipiente de vidrio.</p>	 



PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO PARA OBTENER COMBUSTIBLE

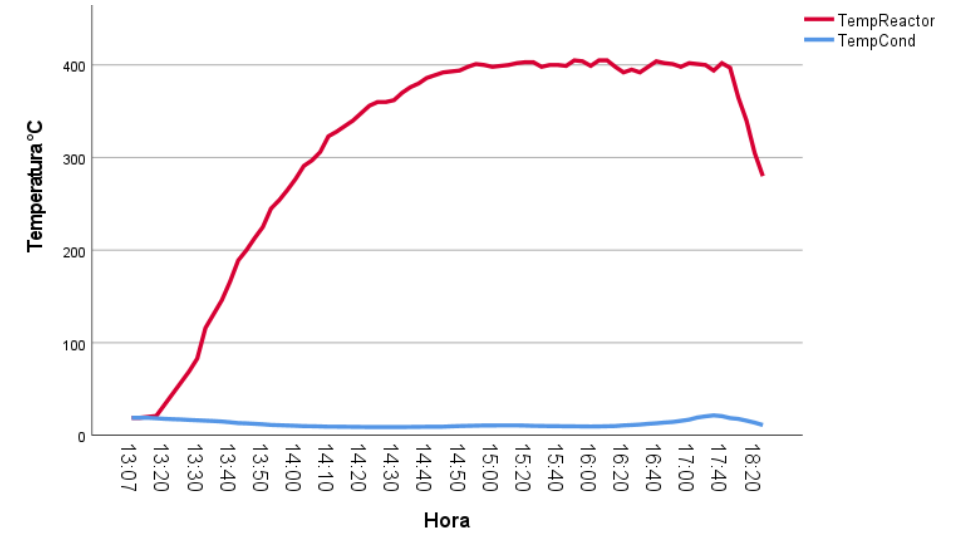
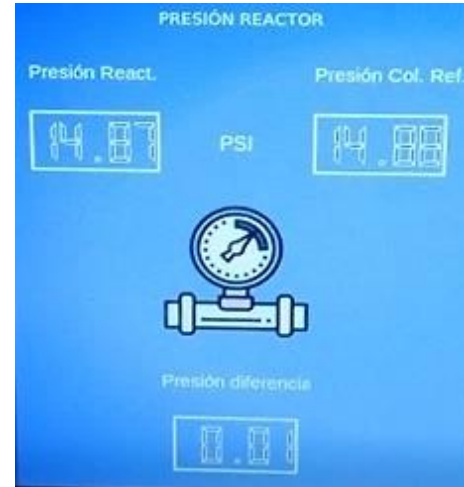
Prueba de funcionamiento	Objetivo	Problema mecánico detectado	Solución realizada en el sistema	Evidencia fotográfica
Primera prueba (en vacío)	Verificar fugas en el reactor térmico. Comprobar que los sensores detecten los parámetros físicos y que los actuadores funcionen correctamente.	No se observa el burbujeo del nitrógeno a la salida, entonces existen fugas en el reactor térmico. Se procede con la prueba para llegar a la temperatura de operación y verificar que los sensores y actuadores funcionen correctamente.	Para solucionar la fuga del nitrógeno en el reactor térmico; se coloca una pasta sellante que resiste altas temperaturas, en el borde del reactor. Como resultado se obtiene poco burbujeo a la salida del depósito.	
Segunda	Ingresar 1 Kg de polipropileno. Verificar que no existan fugas en el reactor térmico. Conseguir lectura de sensores y accionar los actuadores. Obtener producto al finalizar la pirólisis.	Se ingresa 1 Kg de materia prima y no se detectan fugas en el reactor. Después de 2 horas, entre la mesa y el reactor se detecta fugas del vapor de pirólisis. Se continua con el proceso para verificar el funcionamiento de sensores y actuadores. Se obtiene poco producto a la salida del depósito.	Para lograr un buen proceso de pirólisis y obtener gran cantidad de combustible, se debe descartar cualquier fuga en el sistema. Por lo que se elimina la medición del peso para que el reactor térmico sea hermético, con ello se evita las fugas del nitrógeno y el vapor de pirólisis.	

PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO PARA OBTENER COMBUSTIBLE

Prueba de funcionamiento	Objetivo	Problema mecánico detectado	Solución realizada en el sistema	Evidencia fotográfica
Tercera	<p>Ingresar 1 Kg de polipropileno.</p> <p>Inyectar nitrógeno y verificar que no existan fugas en el reactor térmico.</p> <p>Conseguir lectura de sensores y accionar los actuadores.</p> <p>Realizar el proceso completo de pirólisis.</p> <p>Obtener mayor cantidad de producto.</p>	<p>Se ingresa 1 Kg de polipropileno.</p> <p>Al inyectar nitrógeno se nota el burbujeo inmediatamente en la salida del depósito. No se detectan fugas entre la mesa y el reactor. Después de 3 horas se detecta fugas en el eje del agitador.</p> <p>Se continua con el proceso para verificar el funcionamiento de los sensores y actuadores.</p> <p>Se realiza el proceso de pirólisis con una tasa de calentamiento de 4 °C/min y se obtiene cerca de 100 g de producto a la salida del depósito, lo que representa un rendimiento del 10%.</p>	<p>Nuevamente se concluye que para lograr un buen proceso de pirólisis y obtener gran cantidad y calidad de combustible, se debe eliminar cualquier fuga en el sistema.</p> <p>Entonces se cierra la salida del eje de agitación, al soldar una placa de acero inoxidable en el interior del casco superior. Con esto el reactor térmico es completamente hermético, pero ya no dispone de agitación mecánica en el reactor.</p>	
Cuarta	<p>Ingresar 1 Kg de polipropileno.</p> <p>Poner en marcha el sistema de reacción por pirólisis para la producción de combustible, a partir de polímeros urbanos de recicló.</p>	<p>En esta prueba de funcionamiento no se detectan problemas mecánicos durante todo el proceso de pirólisis.</p> <p>Se realiza el proceso de pirólisis con una tasa de calentamiento de 4 °C/min.</p>	<p>Con el sistema de reacción completamente funcional, se ejecuta todo el proceso de pirólisis.</p> <p>Al finalizar esta prueba de funcionamiento se obtiene 850 g de producto a la salida del depósito, lo que representa un rendimiento del 57%.</p>	



ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

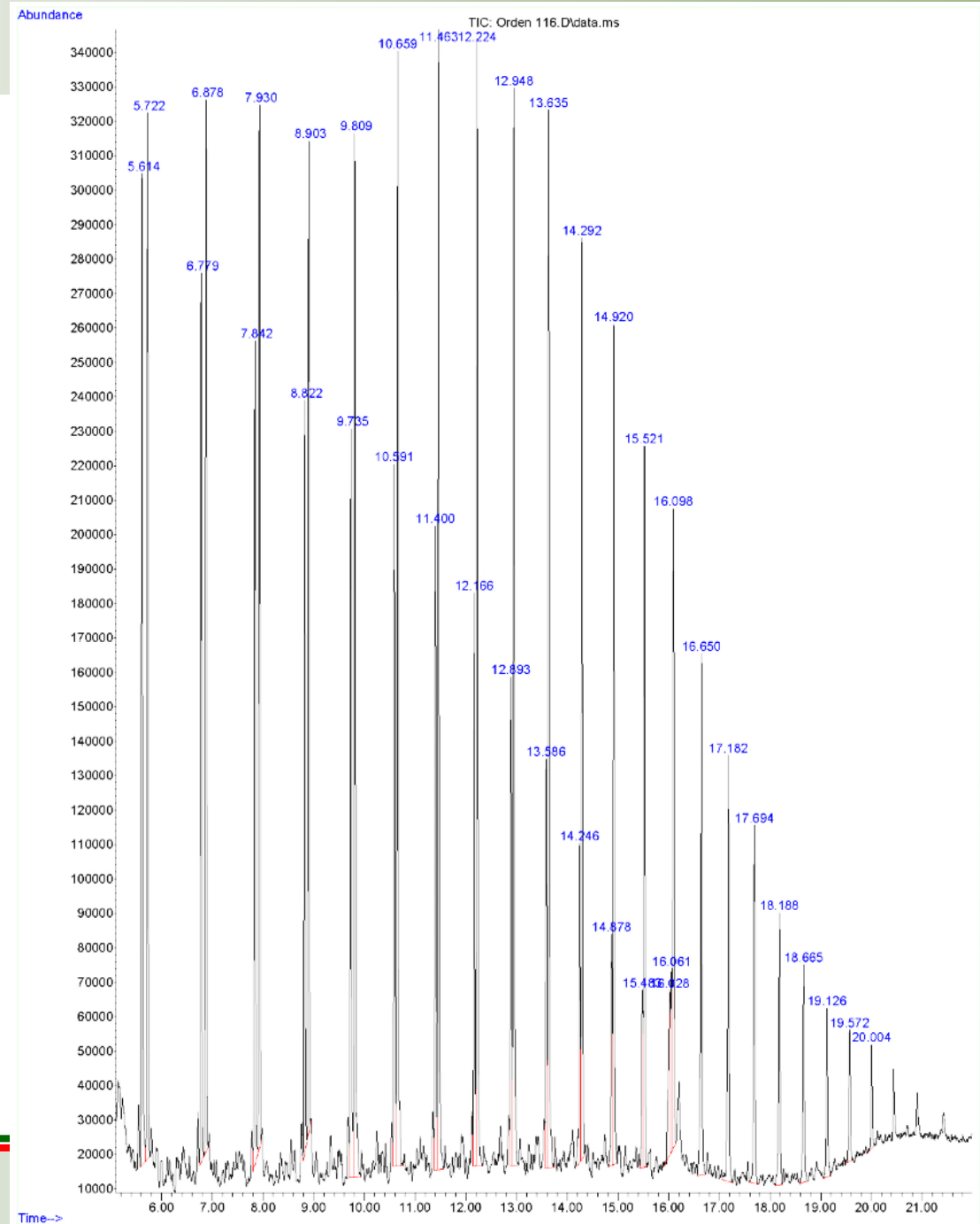


1. Polipropileno
2. Polipropileno fundido
3. Tercer prueba
4. Cuarta prueba
5. Muestra de análisis





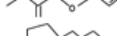





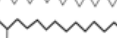
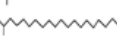
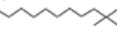





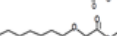

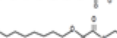
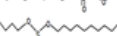







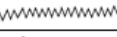
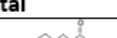
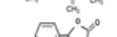

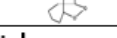
Resultados de la Cromatografía GCMS

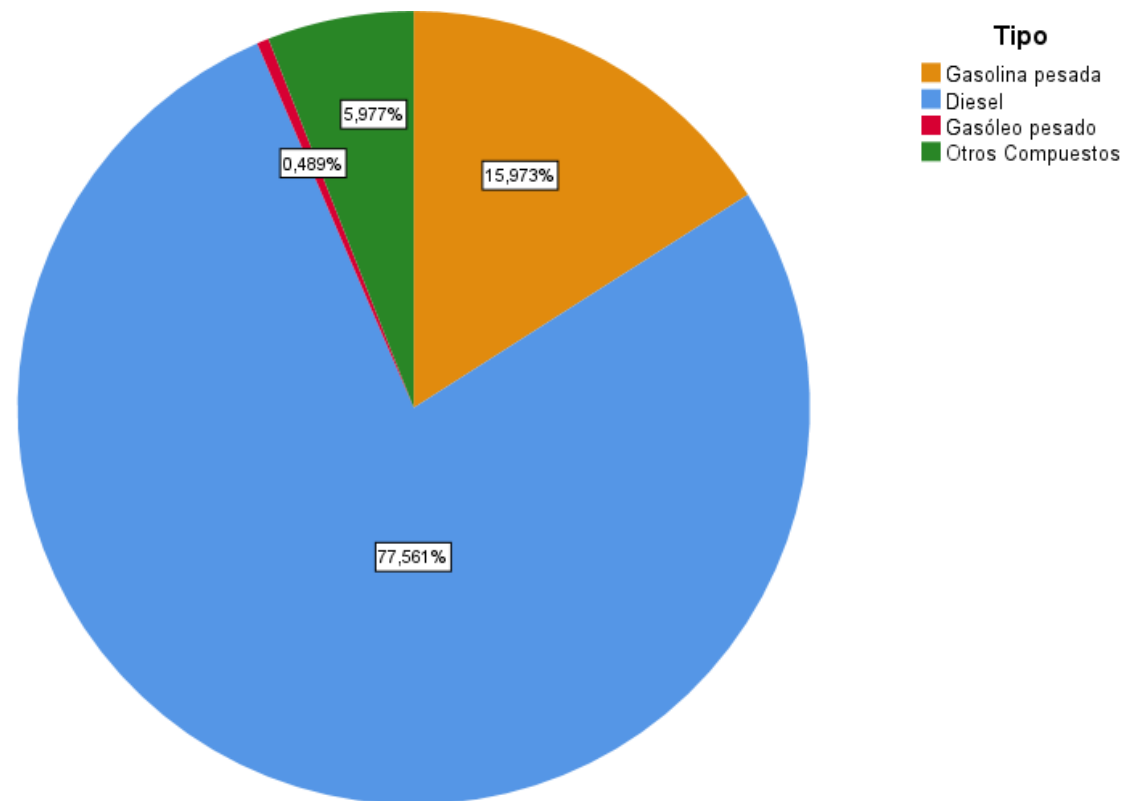
TR (min)	Molécula Identificada	Porcentaje relativo (%)
5.614	Butil-Ciclopentano	4.035
5.722	7, 8 dioxi biciclo [4.2.2] decano	3.999
6.779	Alil-meta-alil eter	3.391
6.878	2, 4, 6 trimetil-decano	3.998
7.842	2-metil, 2-undecanotiol	3.224
7.930	Ácido oxálico, alil nonil ester	3.839
8.822	1-trideceno	2.861
8.903	Tridecano	3.641
9.735	1, 2 dimetil-ciclohexano	3.176
9.809	Ácido oxálico, octil propil ester	4.512
10.591	Ácido oxálico, alil tridecil ester	2.851
10.659	2-metil decano	4.596
11.400	Ceteno	2.657
11.463	Hexadecano	4.729
12.166	Ácido oxálico, alil dodecil ester	2.337
12.224	2, 6 dimetil-heptano	4.652
12.893	Ácido oxálico, alil dodecil ester	1.958
12.948	Octadecano	4.496
13.586	5-octadeceno	1.683
13.635	2-metil octadecano	4.338
14.246	Ácido oxálico, alil tridecil ester	1.436
14.292	2-metil, heptadecano	3.736
14.878	1-docoseno	0.988
14.920	Heneicosano	3.480
15.483	Metil-cicloheptano	0.719
15.521	2-metil, octadecano	3.046
16.028	3-metil 5-fenil oxazolidin 2-uno	1.259
16.061	2-n-butilacroleína	0.719
16.098	2-metil, heptadecano	2.750
16.650	2-metil, octadecano	2.564
17.182	3-metil eicosano	2.154
17.694	2-metil pentadecano	1.693
18.188	Ácido sulfuroso, butil-dodecil ester	1.364
18.665	2-metil tricosano	1.101
19.126	2, 6, 10, 14-tetrametil hexadecano	0.873
19.572	Eicosano	0.656
20.004	Tetratetracontano	0.489



ANÁLISIS CUALITATIVOS Y CUANTITATIVOS DEL PRODUCTO OBTENIDO

Agrupación de las Moléculas Según el Número de Carbonos

Tipo	Molécula	Fórmula	Estructura	Porcentaje
Gasolina pesada $C_8 - C_9$	1, 2 dimetil-ciclohexano	C_8H_{16}		3.176 %
	2, 6 dimetil-heptano	C_9H_{20}		4.652 %
	Alil-meta-alil eter	$C_7H_{12}O$		3.391 %
	Butil-ciclopentano	C_9H_{18}		4.035 %
	Metil-cicloheptano	C_8H_{16}		0.719 %
Subtotal				15.973 %
Diesel $C_{11} - C_{24}$	1-docoseno	$C_{22}H_{44}$		0.988 %
	1-trideceno	$C_{13}H_{26}$		2.861 %
	2-metil, decano	$C_{11}H_{24}$		4.596 %
	2-metil, octadecano	$C_{19}H_{40}$		9.948 %
	2-metil, pentadecano	$C_{16}H_{34}$		1.693 %
	2-metil, tricosano	$C_{24}H_{50}$		1.101 %
	2-metil, 2-undecanotiol	$C_{12}H_{26}S$		3.224 %
	2-metil, heptadecano	$C_{18}H_{38}$		6.486 %
	2, 4, 6 trimetil-decano	$C_{13}H_{28}$		3.998 %
	2, 6, 10, 14-tetrametil hexadecano	$C_{20}H_{42}$		0.873 %
	3-metil eicosano	$C_{21}H_{44}$		2.154 %
	5-octadeceno	$C_{18}H_{38}$		1.683 %
	Ácido oxálico, alil dodecil ester	$C_{17}H_{30}O_4$		4.295 %
	Ácido oxálico, alil nonil ester	$C_{14}H_{24}O_4$		3.839 %
	Ácido oxálico, alil tridecil ester	$C_{18}H_{32}O_4$		4.287 %
	Ácido oxálico, octil propil ester	$C_{12}H_{24}O_4$		4.512 %
	Ácido sulfuroso, butil-dodecil ester	$C_{16}H_{34}O_3S$		1.364 %
	Ceteno	$C_{16}H_{32}$		2.657 %
	Eicosano	$C_{20}H_{42}$		0.656 %
	Heneicosano	$C_{21}H_{44}$		3.480 %
	Hexadecano	$C_{16}H_{34}$		4.729 %
	Octadecano	$C_{18}H_{38}$		4.496 %
	Tridecano	$C_{13}H_{28}$		3.641 %
Subtotal				77.561 %
Gasóleo pesado C_{44}	Tetratetracontano	$C_{44}H_{90}$		0.489 %
Subtotal				0.489 %
Otros Compuestos $C_7 - C_{10}$	2-n-butilacroleína	$C_7H_{12}O$		0.719 %
	3-metil 5-fenil oxazolidin 2-u	$C_{10}H_{11}NO_2$		1.259 %
	7, 8 dioxi biciclo [4.2.2] decano	$C_8H_{14}O_2$		3.999 %
Subtotal				5.977 %
TOTAL				100 %



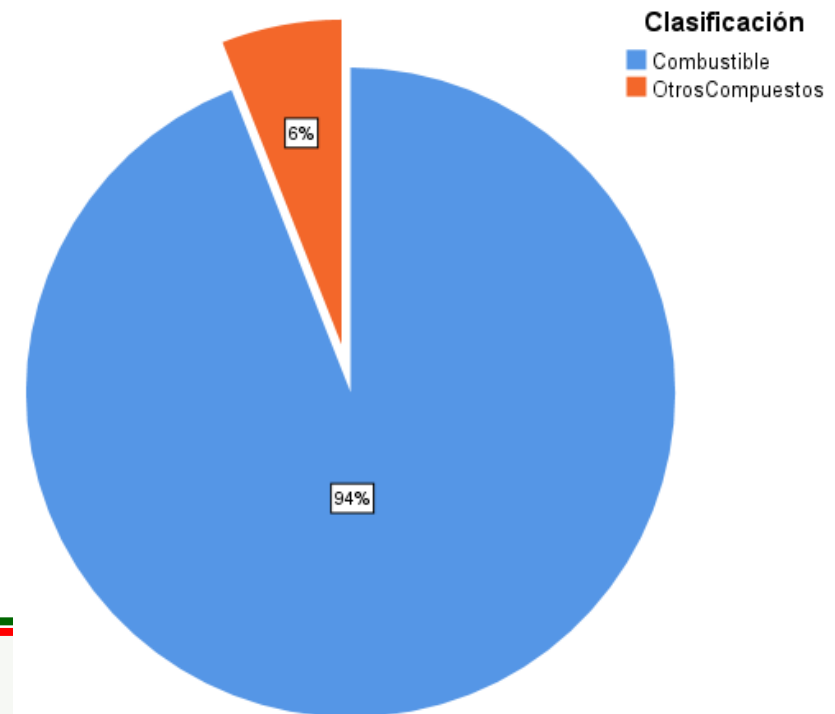
ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

VALIDACIÓN DE LA HIPÓTESIS

El sistema de reacción por pirólisis fue diseñado en un software CAD, se validó el diseño en un software CAE y se construyó siguiendo los parámetros de diseño. Se realizaron cuatro pruebas, y utilizando una metodología experimental se optimizó la planta, es así que en la última prueba se controló variables como la temperatura, presión, refrigeración y se obtuvo un producto final con un rendimiento del 56 % que finalmente se envió a analizar en un laboratorio especializado para avalar los resultados.

Los resultados obtenidos con la cromatografía GCMS representados tanto en la tabla como en la figura y el detalle del número de carbonos analizados de cada molécula en la tabla, demuestra que el producto contiene una gran cantidad de hidrocarburos (cadenas de CH) como oleofinas y parafinas con estructuras orgánicas lineales que conduce a un diésel lineal de alto valor. Así mismo los tipos de moléculas analizados se clasificaron en gasolina pesada, diésel y gasóleo pesado que corresponden a un porcentaje del 94 % de combustibles y el 6 % a otros compuestos como se puede apreciar en la figura. Por tanto, se puede verificar que la hipótesis planteada se cumple satisfactoriamente.

La fracción de diésel contiene un pequeño porcentaje de ésteres y de ácido sulfuroso, lo cual no supone un problema al análisis, ya que al agregar compuestos oxigenados, sulfurados o nitrogenados se puede llegar a mejorar el cetano del diésel, así como su rendimiento y potencia que mejoraría el proceso de combustión en una determinada máquina térmica en proporciones a validar según la necesidad. En el diésel comercial se agregan aditivos y en compuestos como el biodiesel FAME existen compuestos oxigenados.



CONCLUSIONES

- Se fundamentó teóricamente el proceso de pirólisis a través de la metodología establecida por el código ASME sección VIII división 1 que indica las actividades para realizar el diseño y construcción de tanques a presión de manera apropiada partiendo de los criterios de evaluación técnicos que establece parámetros como presión, temperatura y esfuerzos. Se realiza el diseño CAD con una presión de trabajo atmosférica y una temperatura de diseño de 550 °C que da como resultado un espesor de los recipientes a presión de 2 mm y una presión de trabajo máxima del sistema de 0.85 MPa o 124 psi. Se construyen los subsistemas de reacción, alimentación, pesaje, entrada de nitrógeno, agitación, alivio, columna de reflujo, condensación, depósito y finalmente se realizan las pruebas de obtención de combustible.
- La pirólisis es un proceso de degradación térmica de una sustancia en una atmósfera inerte que depende de un sinfín de parámetros operacionales para que este proceso se ejecute correctamente, entre los más importantes son la temperatura de reacción, la velocidad de calefacción, el tiempo de residencia de los gases en el recipiente de reacción, el tipo, cantidad, tamaño, densidad y humedad de la muestra.
- Para el diseño mecánico se establece en primera instancia el tipo de reactor en función de características requeridas como la alimentación, agitación, costo, que sea modular y semicontinuo, disponibilidad de manufactura e inyección de nitrógeno utilizando el método ordinal corregido de criterios ponderados se estableció que es factible el diseño del reactor semibatch. El material seleccionado para la construcción del sistema fue el acero inoxidable austenítico AISI 304 por sus propiedades térmicas y mecánicas ideales para este proceso y se seleccionó componentes estándares que cumplen con los criterios de diseño como temperatura y presión para la construcción del sistema como servoválvulas, transductores de presión, motor DC, termocuplas, torre de enfriamiento, resistencias eléctricas, perlas de vidrio, material aislante, sensor de peso y componentes del sistema de condensación.

CONCLUSIONES

- La simulación de transferencia de calor en el reactor térmico registra una temperatura máxima en la cubierta interior de 461.14 °C y la temperatura más baja se establece en 46.23 °C en el eje de pesaje, en la tolva de alimentación la simulación en la cubierta cónica interior registra 144.87 °C y 15.11 °C en la parte superior, en el intercambiador de calor la temperatura de enfriamiento está simulada a 2 °C, ingresa por el serpentín a 130 °C y sale a 4.78 °C, finalmente la simulación de flujo verifica que las partículas en el interior del reactor se desplazan por el sistema y llegan hasta el depósito.
- Los resultados de la cromatografía GCMS fueron analizados conforme a los tipos de moléculas de acuerdo con su número de carbonos y se clasificaron en gasolina pesada 15.97 %, diésel 77.56 % y gasóleo pesado 0.49 % que corresponden a un porcentaje del 94 % de combustibles y el 6 % a otros compuestos; en otras palabras, se verifica que el producto contiene una gran cantidad de hidrocarburos como oleofinas y parafinas con estructuras orgánicas lineales que conduce a un diésel lineal de alto valor. Sin embargo, la fracción de diésel contiene porcentaje de ésteres y ácido sulfuroso, que se puede interpretar como aditivos que podrían mejorar su potencia y rendimiento del proceso de combustión en una determinada máquina térmica en proporciones a validar según la necesidad.

RECOMENDACIONES

- Se puede implementar un reactor catalítico o un segundo sistema de reacción con el fin de optimizar el sistema, además de garantizar que sea hermético es necesario un sistema de agitación para la transferencia de masa y calor a prueba de fugas, además de una válvula en el depósito para que el nitrógeno sea constante en todo el proceso, lo que podría significar un aumento considerable en el rendimiento en la calidad del producto.
- Al producto de pirólisis se puede hacer una destilación para separar sus componentes y a las diferentes fracciones obtenidas es importante realizar algunas pruebas de acuerdo con la normativa vigente para determinar la calidad del combustible y estableciendo algunos parámetros químicos como el uso de catalizadores se puede optimizar el rendimiento de la planta obteniendo un producto con mayor rendimiento y calidad.
- Al provenir de diferentes fuentes como la mezcla y el reciclaje los resultados del proceso de pirólisis con el polipropileno puede variar en función de muchos parámetros como el tamaño de grano, la densidad y la humedad por lo que esto representa la principal dificultad del uso de este material como materia prima. Es importante utilizar el mismo tipo de polipropileno para realizar pruebas y poder comparar los resultados.

GRACIAS POR SU ATENCIÓN

