



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Sede
Latacunga



DEPARTAMENTO DE ENERGÍA MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO AUTOMOTRIZ

TEMA: “INVESTIGACIÓN DE LOS MÉTODOS DE LIMPIEZA POR OXIDACIÓN Y
REDISTRIBUCIÓN DE METALES DEL MONOLITO DE CONVERTIDORES
CATALÍTICOS DE VEHÍCULOS MEDIANTE PROTOCOLOS ARMONIZADOS”

AUTORES:
ORDOÑEZ ESPINOZA, JONATHAN PATRICIO
PÉREZ GUZMÁN, ERIK SEBASTIÁN

DIRECTOR:
ING. QUIROZ ERAZO, LEONIDAS ANTONIO

LATACUNGA
MARZO, 2021





ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**Sede
Latacunga**



**“TANTO SI CREES QUE ERES CAPAZ COMO SI NO,
EN AMBOS CASOS TIENES RAZÓN.”**

Henry Ford





CONTENIDO

- Resumen
- Antecedentes Investigativos
- Planteamiento del Problema
- Objetivo General
- Objetivos Específicos
- Hipótesis
- Diseño y Construcción del equipo de limpieza
- Tratamiento del convertidor catalítico
- Pruebas estáticas catalizador de dos vías
- Pruebas estáticas catalizador de tres vías
- Pruebas dinámicas
- Proceso de oxidación en monolito de Oro
- Proceso de reducción en monolito de Oro
- Proceso de oxidación en monolito de Platino
- Proceso de reducción en monolito de Platino
- Conclusiones
- Recomendaciones





RESUMEN

Siendo el convertidor catalítico el principal elemento para reducir la emisión de gases contaminantes es necesario el estudio de limpieza por oxidación – reducción y redistribución de los metales presentes en este elemento, por tal motivo se propone el diseño y construcción de un equipo que satisfaga las necesidades de los métodos de limpieza, a demás realizar pruebas de emisiones de gases antes y después de aplicar los métodos de limpieza basadas en protocolos armonizados como WLTP para pruebas dinámicas, normativa INEN 2203 y protocolo AGS 688 BRAIN BEE para pruebas estáticas, para determinar la eficiencia del método de limpieza aplicado se utilizaron herramientas matemáticas, métodos gráficos y comparativos que validaron los resultados de los ensayos estáticos y dinámicos en función de la reducción de emisiones de HC, CO de acuerdo a la variación de λ .





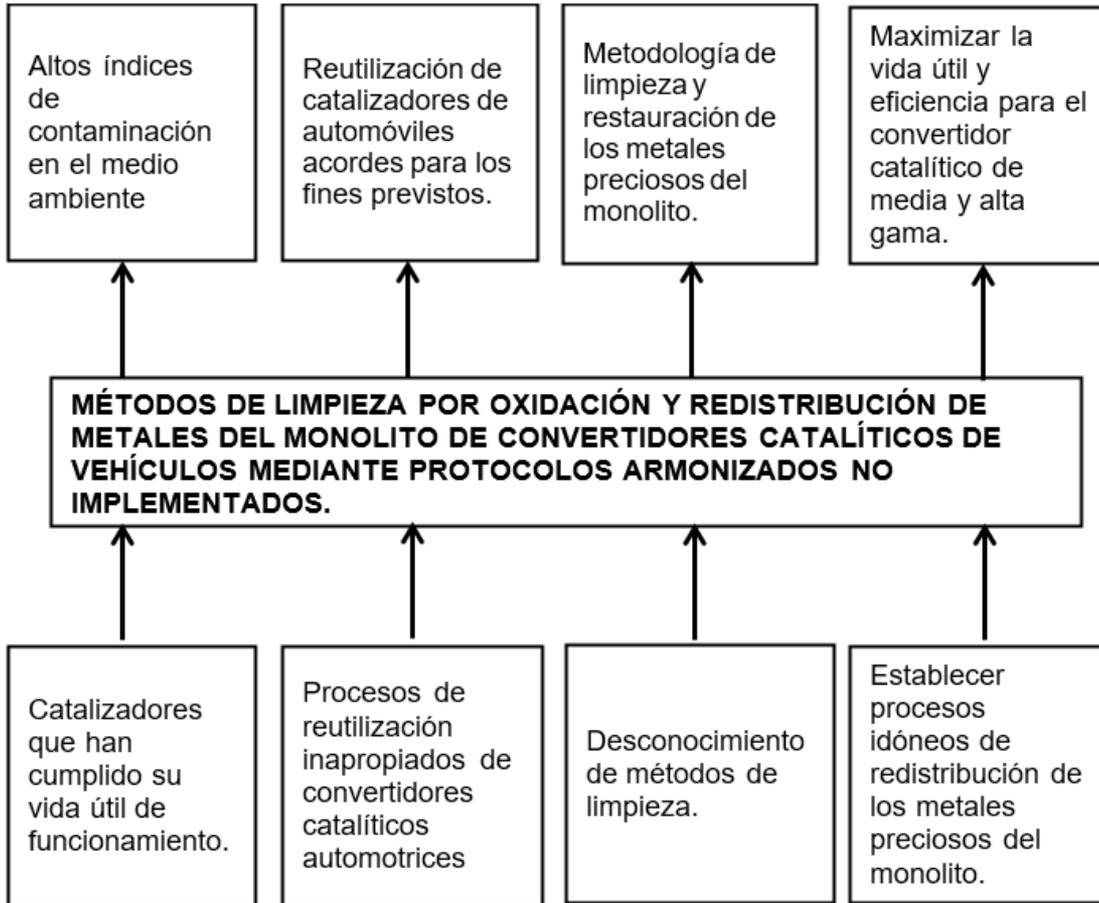
ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

- A inicios del siglo XX en Ecuador comenzó a regir la norma técnica INEN 2204, la misma que establece los límites de emisiones en vehículos a gasolina, a partir del año 1901 los vehículos fueron cambiando sus sistemas de escape para lograr la reducción de gases nocivos principalmente mediante el uso de convertidores catalíticos
- Una vez transcurrido la vida útil del catalizador este se convierte en un desecho ambiental, el cual no se puede eliminar por procesos simples debido a su estructura cerámica y la presencia de metales nobles.





PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA





ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**Sede
Latacunga**



OBJETIVO GENERAL

Investigar los métodos de limpieza de convertidores catalíticos de vehículos por medio de oxidación y redistribución de metales en monolitos mediante un proceso de reducción.





OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Fundamentar teórica y científicamente los procesos de reutilización de convertidores catalíticos de media y alta gama mediante procesos de oxidación – reducción y redistribución de los metales del monolito a través de fuentes confiables.
- Limpiar el monolito usado de desecho mediante un proceso de oxidación utilizando $49\% \frac{V}{V}$ Oxígeno/Nitrógeno a condiciones de flujo, tiempo de exposición y temperatura definida, y luego mediante un proceso de reducción utilizando una mezcla de $40\% \frac{V}{V}$ de Hidrógeno/Nitrógeno a flujo, tiempo de exposición y temperatura definida.





- Realizar pruebas estáticas de emisiones a los convertidores catalíticos antes y después de aplicar la metodología y tratamiento de limpieza y redistribución de metales obteniendo resultados de gases de HC, CO, CO₂ y λ presentes en las emisiones de escape de los vehículos de prueba.
- Realizar pruebas dinámicas de emisiones a los convertidores catalíticos antes y después de aplicar la metodología y tratamiento de limpieza y redistribución de metales bajo el protocolo armonizado WLTP.
- Determinar matemática y gráficamente la eficiencia de la metodología del tratamiento aplicado a los catalizadores a través de un algoritmo que valide los resultados de las pruebas con ensayos estáticos y dinámicos para la reutilización de los convertidores catalíticos en vehículos en función de la reducción de emisiones de HC, CO y NO_x de acuerdo a la variación de λ .





HIPÓTESIS

Al aplicar el método de limpieza al convertidor catalítico que culmino si tiempo de vida útil se debe recuperar la reducción de emisiones de un 50%.





ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Sede
Latacunga



DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO DE LIMPIEZA





REQUERIMIENTOS DEL PROCESO

PROCESO	Gas	Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Velocidad de calentamiento (°C/min)	Presión (Atm)	Flujo (cc/min)	Concentración (% V/V)
Eliminación de humedad	N_2	15	300	----	1	84.1	---
Oxidación	$\frac{O_2}{N_2}$	60	300	10	1	164	49
Reducción	$\frac{H_2}{N_2}$	60	500	10	1	140	40





Características del material

ACERO INOXIDABLE AISI 304		
Parámetro	Valor	Unidades
Conductividad térmica (k)	20.229	$\frac{W}{mK}$
Emisividad (ϵ)	0.2314	---
NITROGENO N ₂		
Conductividad térmica (k)	0.04619	$\frac{W}{mK}$
Prandtl	0.7121	---
Viscosidad cinemática (ν)	5.62×10^{-8}	$\frac{m^3}{s}$





Potencia Eléctrica

Parámetro	Valor	Unidades
Ecuación	$\dot{Q} = \frac{T_2 - T_1}{R_{Total}}$	W
Resistencia Total	$R_{total} = R_{cond} + R_{conv}$	$\frac{K}{W}$
Coefficiente de transferencia de calor combinado ($h_{combinado}$)	$h_{combinado} = h_r + h_c$	$\frac{W}{m^2K}$
Resistencia a la convección térmica (R_{conv})	$R_{conv} = \frac{1}{h_{combinado} A_s}$	$\frac{K}{W}$
Coefficiente de transferencia por convección (h_r)	17.046	$\frac{W}{m^2K}$
Coefficiente de transferencia por convección (h_c)	7.9296	$\frac{W}{m^2K}$
$h_{combinado}$	24.9756	$\frac{W}{m^2K}$
Área superficial (A_s)	0.1884	m^2
Resistencia a la conducción (R_{cond})	3.666×10^{-3}	$\frac{K}{W}$
Resistencia a la convección (R_{conv})	0.2124	$\frac{K}{W}$
R_{total}	0.2160	$\frac{K}{W}$
Factor por pérdidas de energía	20	%
Temperatura inicial (T_1)	973.15	K
Temperatura Final (T_2)	288.15	K
Razón de transferencia de calor (\dot{Q})	3170.32	W
Potencia requerida con 20 % adicional	3804.39	W
Potencia existente en el mercado	4000	W





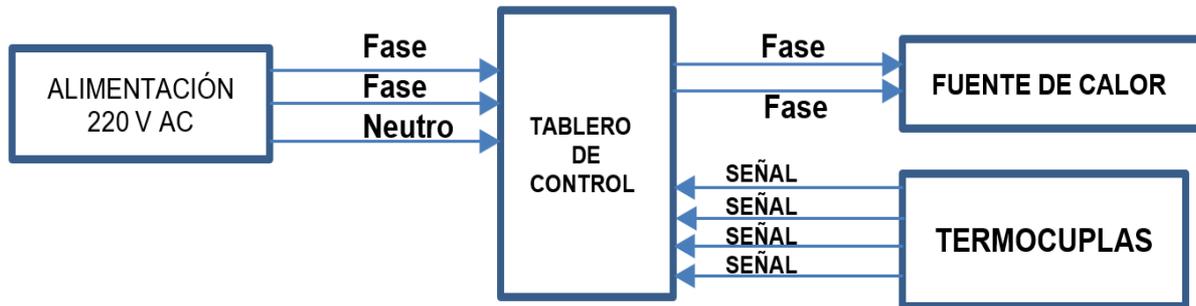
Intensidad de corriente

Parámetro	Valor	Unidades
Ecuación	$I = \frac{W_e}{V}$	A
Potencia eléctrica (W_e)	4000	W
Diferencia de potencial (V)	220	V
Corriente (I)	18.18	A





Diagrama de Bloques del circuito eléctrico

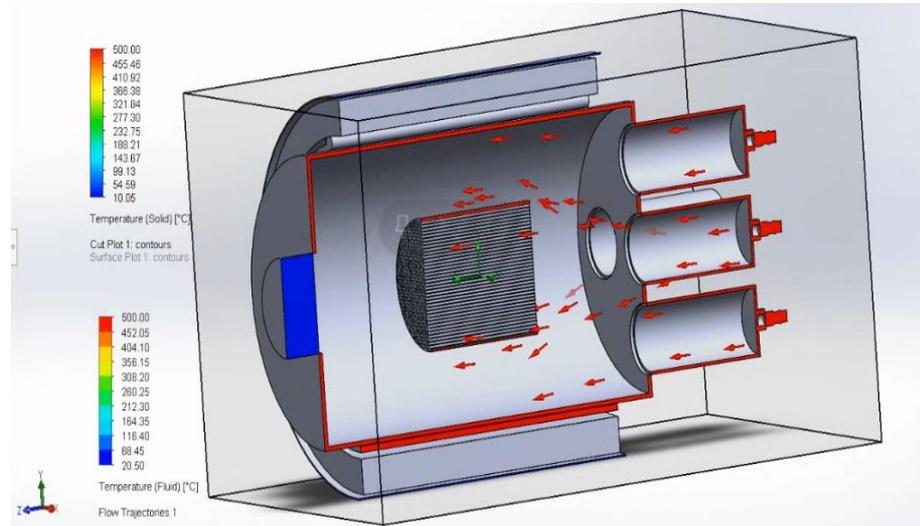
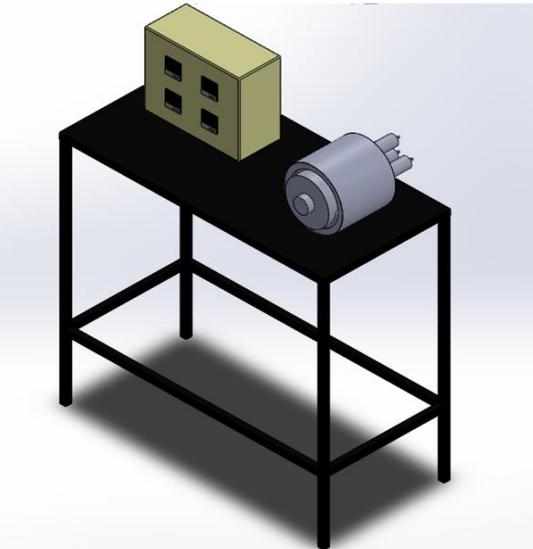




Diseño CAD

Diseño mecánico

Simulación termodinámica





Características del equipo de limpieza

Descripción	Valor	Unidad
Alimentación	220	V
Potencia	4000	W
Temperatura mínima	Ambiente	°C
Temperatura máxima	700	°C



Controlador de temperatura



Relé de estado sólido

Termocupla tipo K





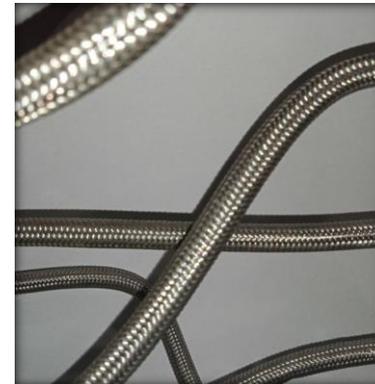
Flujómetros

$$1 \frac{lt}{min}$$

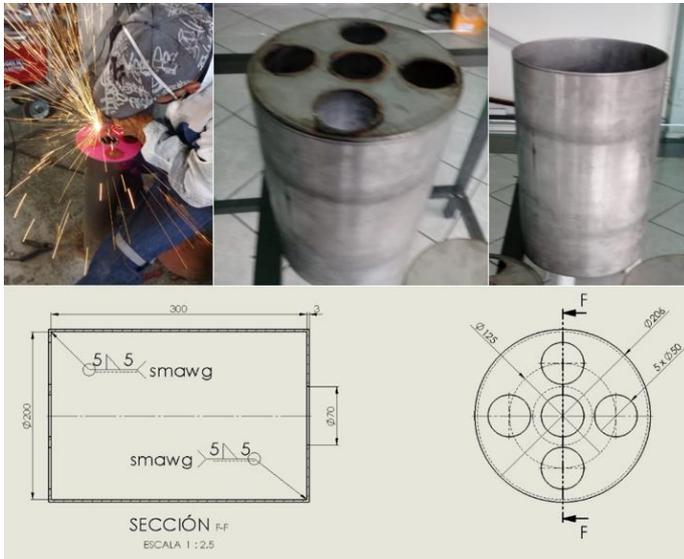


**Unión tipo "T"
Espigas Macho de ¼
Válvula de paso neumático**

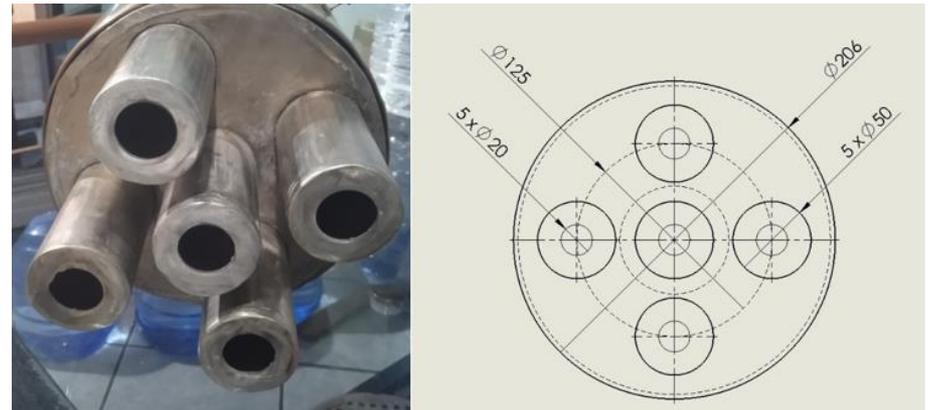
**Manguera de
Teflón de ¼"**



Maquinado de la tapa posterior y estructura interna del reactor



Acoples posteriores





Instalación de las resistencias eléctricas



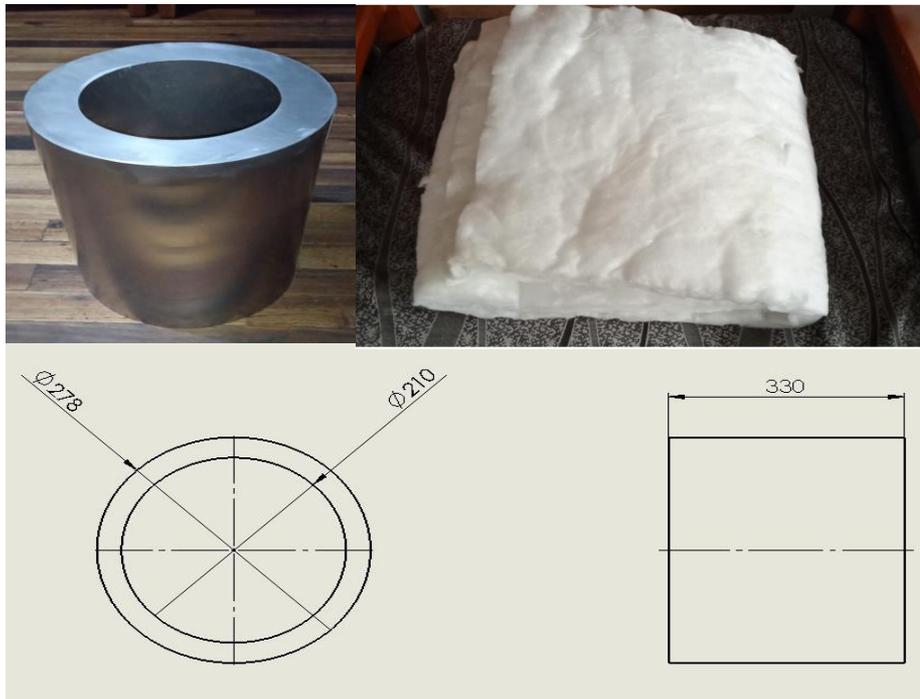
Acoples de distribución del gas vector

N°	Cantidad	Descripción	Características
1	1 m	Manguera de teflón de ¼	Soporta temperaturas de 232°C y presiones de 1500 Psi
2	4	Uniones "T" de ¼.	Fabricadas en Bronce
3	1	Codo ¼	Fabricadas en Bronce
4	11	Acoples tipo espiga ¼	Fabricadas en Hierro Galvanizado





Aislamiento térmico





Equipo de limpieza finalizado





ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Sede
Latacunga



Tratamiento del convertidor catalítico





Eliminación de humedad

Al elevar la temperatura en el interior del reactor a 300°C en atmosferas de Nitrógeno (N_2) usando un flujo de $84.1 \frac{cc}{min}$ en un tiempo de 15 minutos, se elimina la humedad presenten en el sistema para así realizar un proceso de empieza eficiente.





Oxidación

Después de alcanzar la temperatura ambiente en el monolito a atmosferas de Nitrógeno (N_2), el proceso de oxidación puede llevarse a cabo con una relación de $\frac{O_2}{N_2} 49 \% \frac{V}{V}$, un flujo total de $164 \pm 2 \frac{cc}{min}$ la cuál será establecida en el panel del sistema de flujo de gases vectores, la temperatura en este proceso debe alcanzar los $300 \text{ }^\circ\text{C}$ en una rampa de velocidad de elevación de temperatura de $10 \frac{^\circ\text{C}}{min}$.





Reducción

Debe ejecutarse después de haber cerrado el suministro de Oxígeno (O₂) al reactor y disminuir la temperatura del monolito a temperatura ambiente a atmosferas de Nitrógeno (N₂), se hace ingresar en el reactor hidrógeno (H₂) con una relación $\frac{H_2}{N_2} 40 \% \frac{V}{V} \pm 1$, flujo total de $140 \pm 1 \frac{cc}{min}$, la rampa de temperatura debe iniciar desde una temperatura ambiente hasta alcanzar 500 °C en intervalos de $10 \frac{°C}{min}$, se debe mantener la temperatura final descrita durante una hora.





ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Sede
Latacunga

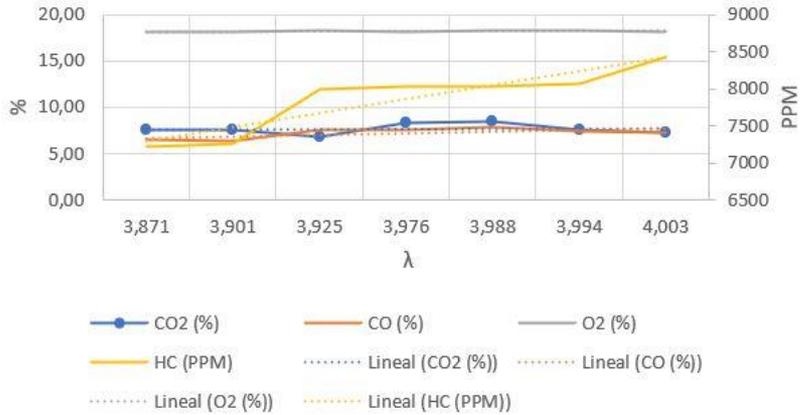


Pruebas estáticas catalizador de dos vías

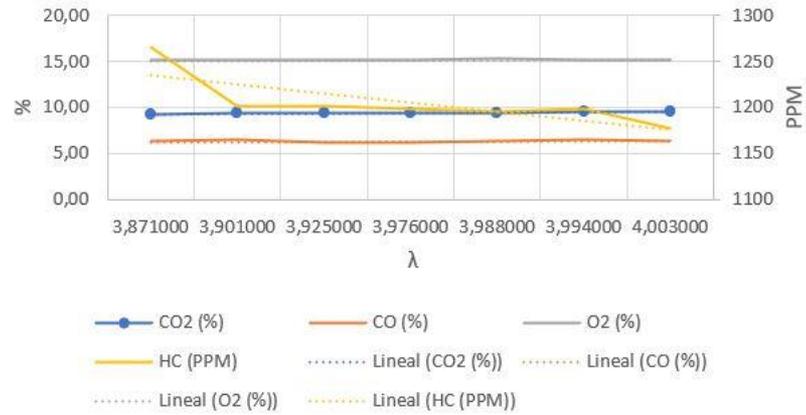




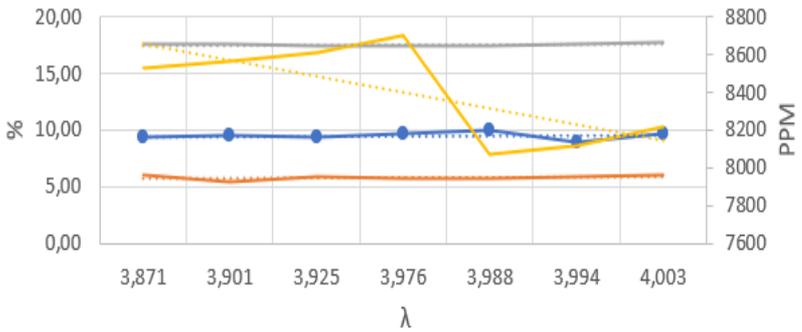
Catalizador usado 0 km - ralentí



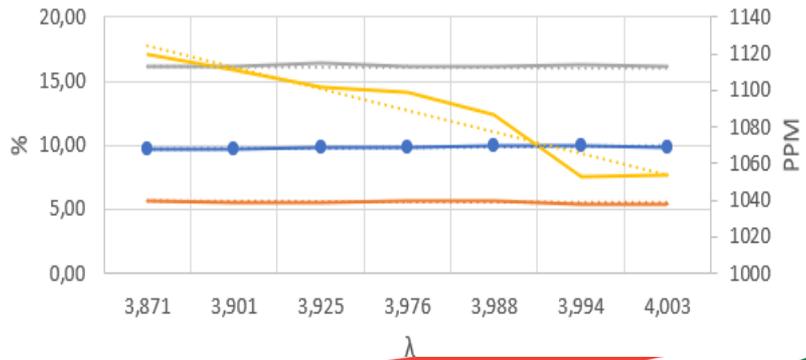
Catalizador tratado 0 km - ralentí



Catalizador usado 0 km - crucero

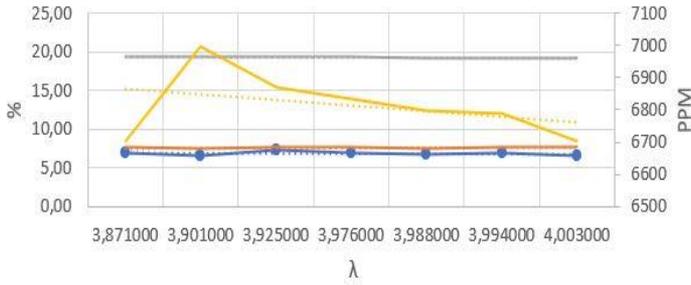


Catalizador tratado 0 km - crucero



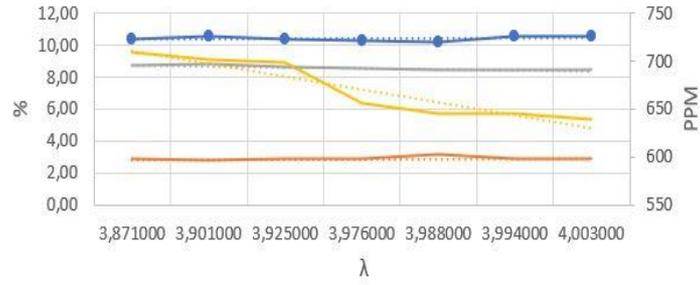


Catalizador usado 1000 km - ralentí



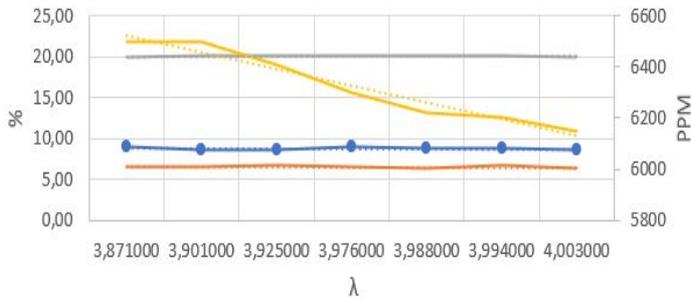
● CO2 (%) — CO (%) — O2 (%)
 — HC (PPM) Lineal (CO2 (%)) Lineal (CO (%))
 Lineal (O2 (%)) Lineal (HC (PPM))

Catalizador tratado 1000 km - ralentí



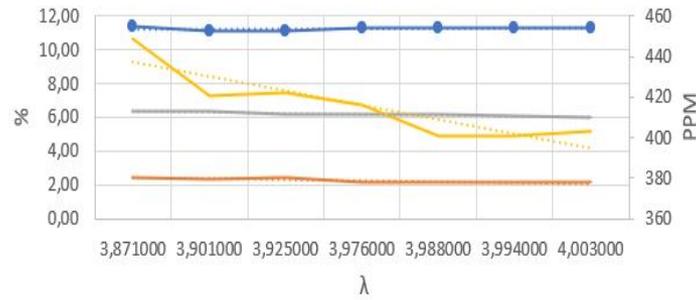
● CO2 (%) — CO (%) — O2 (%)
 — HC (PPM) Lineal (CO2 (%)) Lineal (CO (%))
 Lineal (O2 (%)) Lineal (HC (PPM))

Catalizador usado 1000 km - crucero



● CO2 (%) — CO (%) — O2 (%)
 — HC (PPM) Lineal (CO2 (%)) Lineal (CO (%))
 Lineal (O2 (%)) Lineal (HC (PPM))

Catalizador tratado 1000 km - crucero

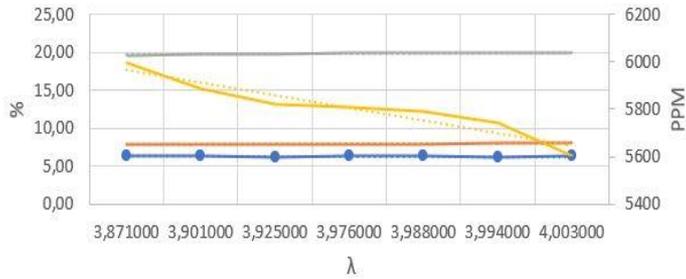


● CO2 (%) — CO (%) — O2 (%)
 — HC (PPM) Lineal (CO2 (%)) Lineal (CO (%))
 Lineal (O2 (%)) Lineal (HC (PPM))



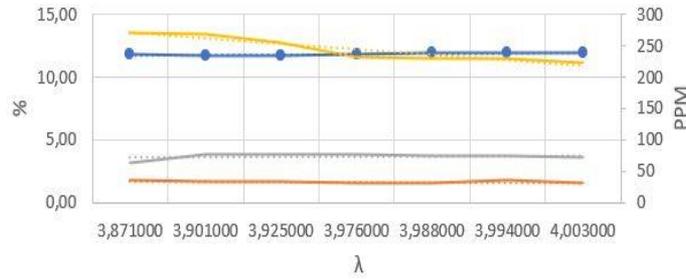


Catalizador usado 2000 km - ralentí



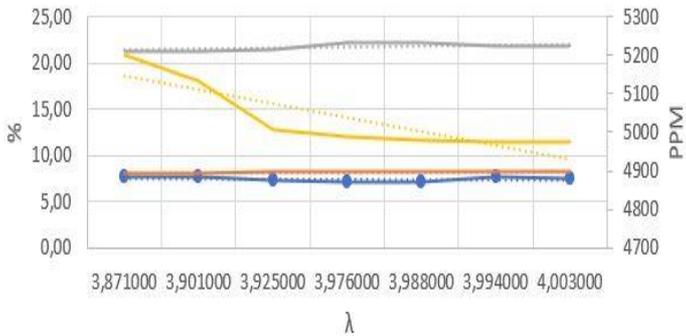
● CO2 (%) ● CO (%) ● O2 (%)
 — HC (PPM) Lineal (CO2 (%)) Lineal (CO (%))
 Lineal (O2 (%)) Lineal (HC (PPM))

Catalizador tratado 2000 km - ralentí

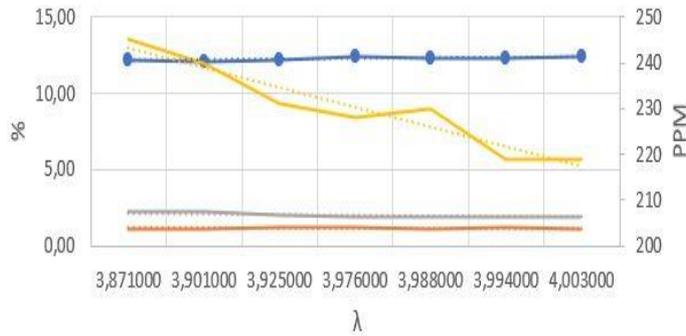


● CO2 (%) ● CO (%) ● O2 (%)
 — HC (PPM) Lineal (CO2 (%)) Lineal (CO (%))
 Lineal (O2 (%)) Lineal (HC (PPM))

Catalizador usado 2000 km - cruceo

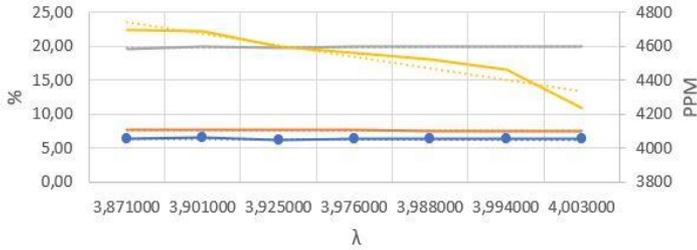


Catalizador tratado 2000 km - cruceo



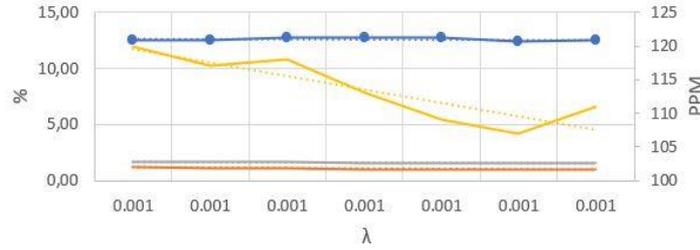


Catalizador usado 3000 km - ralentí



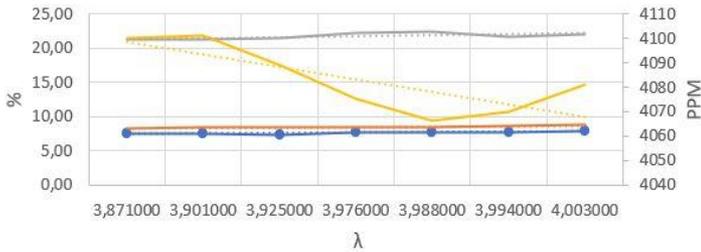
● CO2 (%) — CO (%) — O2 (%)
 — HC (PPM) Lineal (CO2 (%)) Lineal (CO (%))
 Lineal (O2 (%)) Lineal (HC (PPM))

Catalizador tratado 3000 km - ralentí



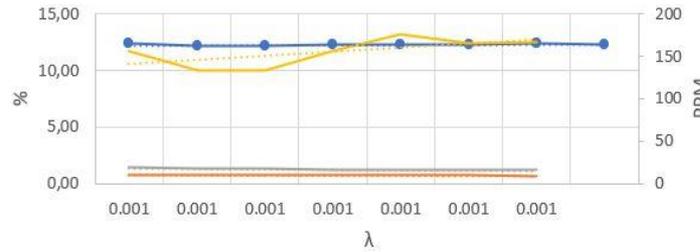
● CO2 (%) — CO (%) — O2 (%)
 — HC (PPM) Lineal (CO2 (%)) Lineal (CO (%))
 Lineal (O2 (%)) Lineal (HC (PPM))

Catalizador usado 3000 km - cruceo



● CO2 (%) — CO (%) — O2 (%)
 — HC (PPM) Lineal (CO2 (%)) Lineal (CO (%))
 Lineal (O2 (%)) Lineal (HC (PPM))

Catalizador tratado 3000 km - cruceo



● CO2 (%) — CO (%) — O2 (%)
 — HC (PPM) Lineal (CO2 (%)) Lineal (CO (%))
 Lineal (O2 (%)) Lineal (HC (PPM))





ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**Sede
Latacunga**

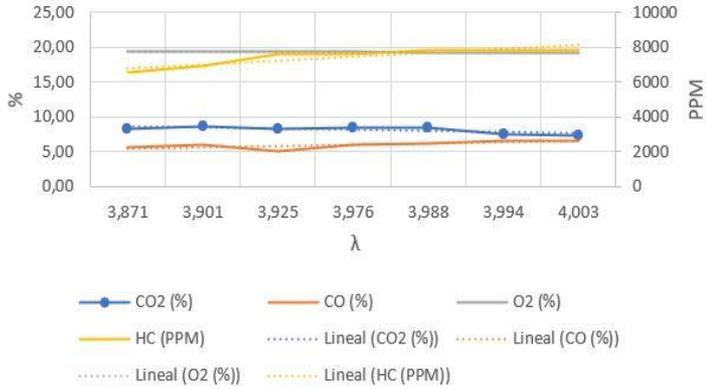


Pruebas estáticas catalizador de tres vías

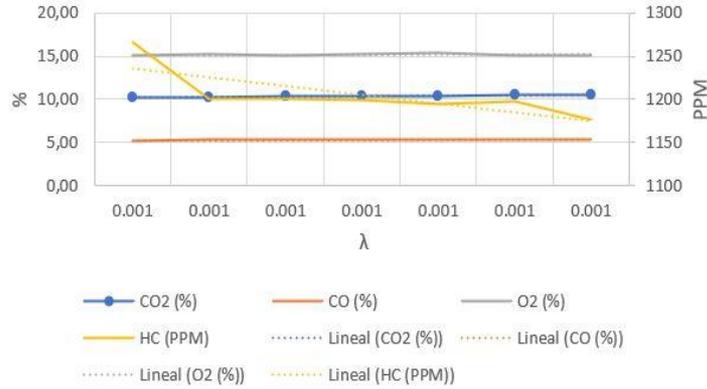




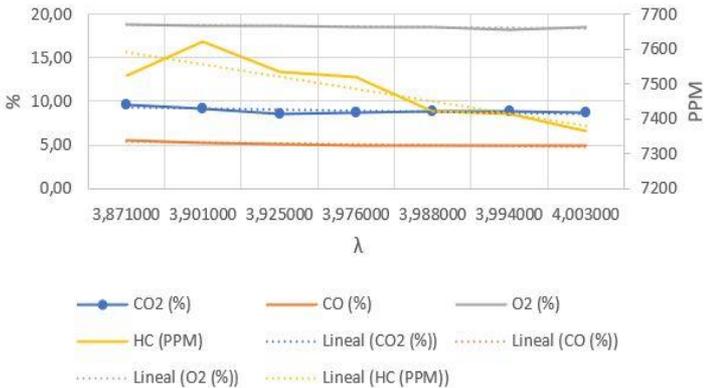
Catalizador usado 0 km - ralentí



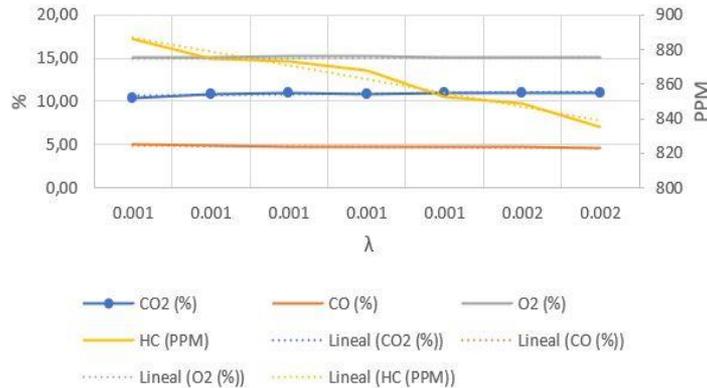
Catalizador tratado 0 km - ralentí



Catalizador usado 0 km - cruceo

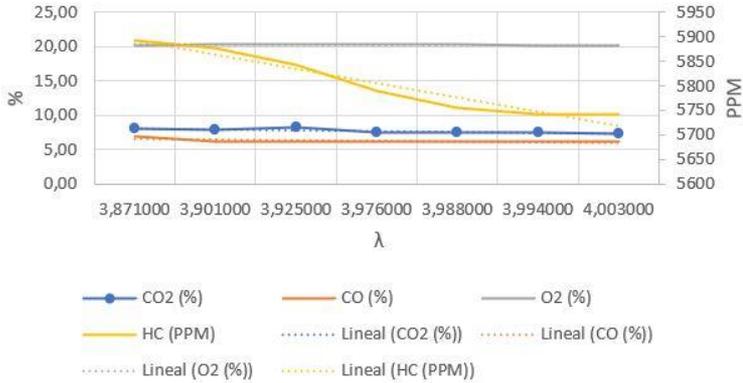


Catalizador tratado 0 km - cruceo

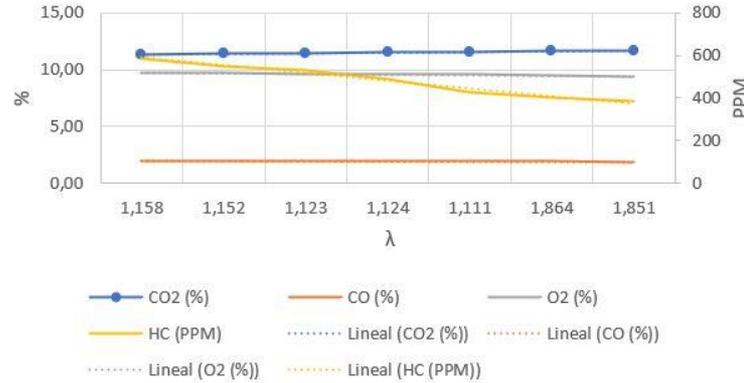




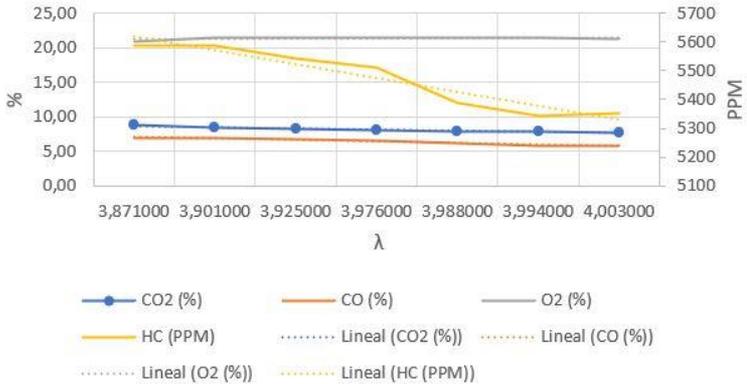
Catalizador usado 1000 km - ralenti



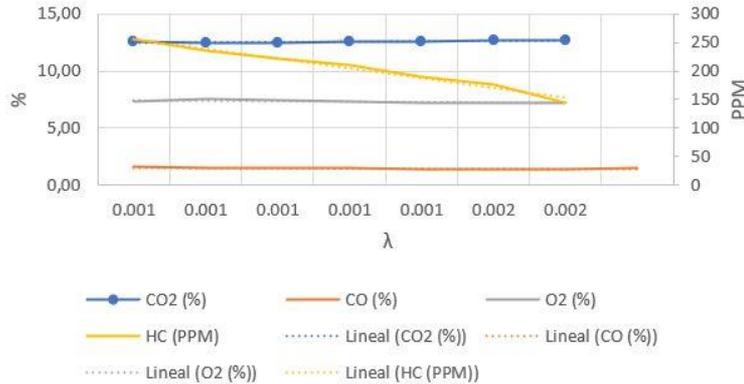
Catalizador tratado 1000 km - ralenti



Catalizador usado 1000 km - cruceo

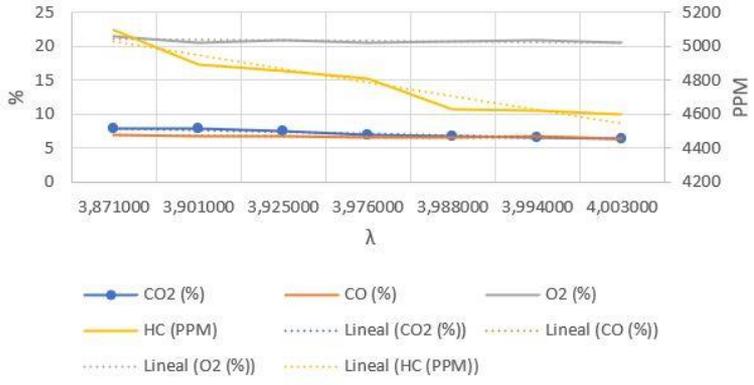


Catalizador tratado 1000 km - cruceo

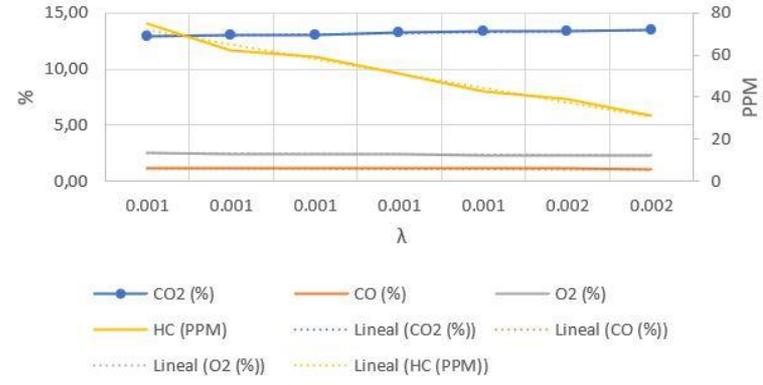




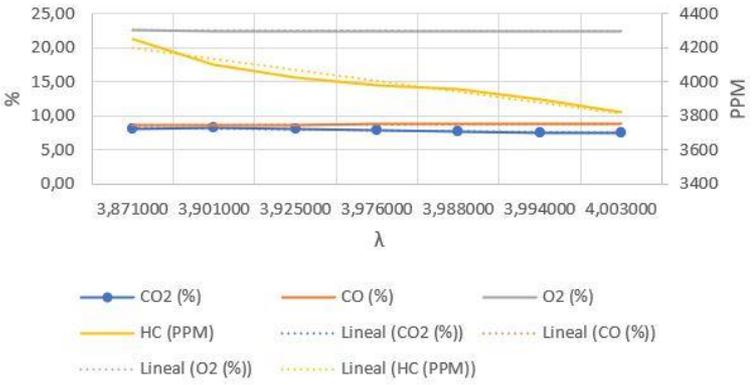
Catalizador usado 2000 km - ralentí



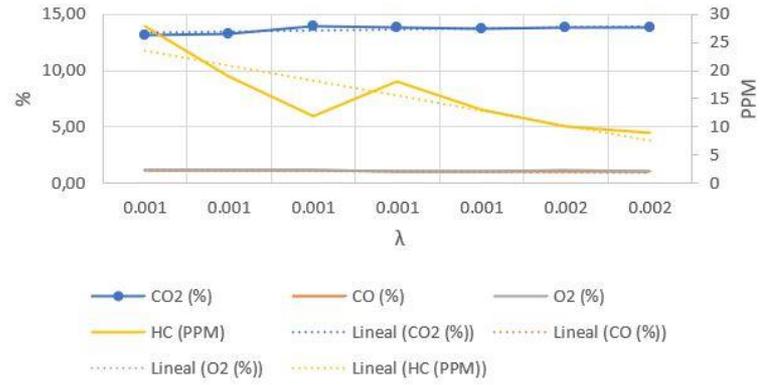
Catalizador tratado 2000 km - ralentí



Catalizador usado 2000 km - cruceo

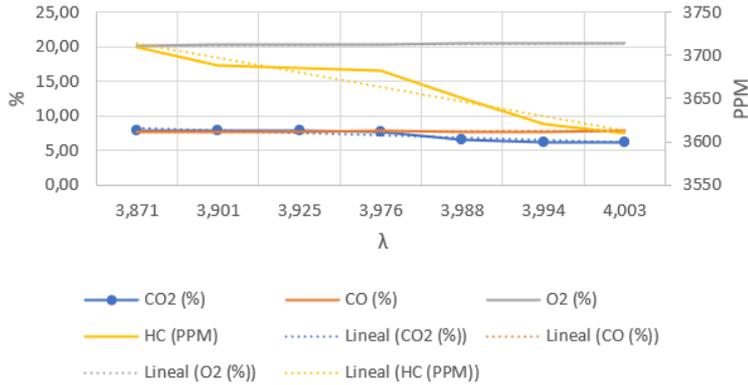


Catalizador tratado 2000 km - cruceo

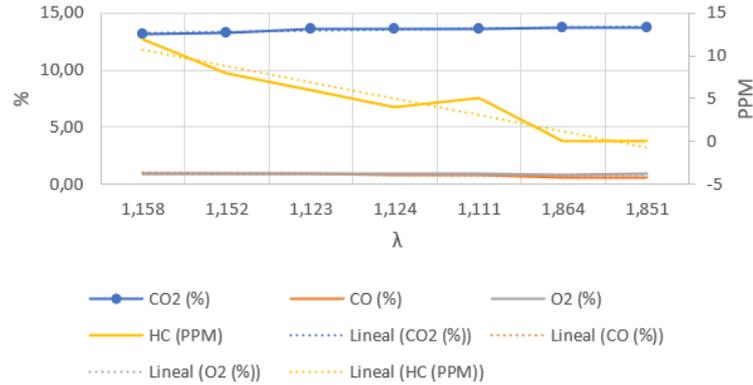




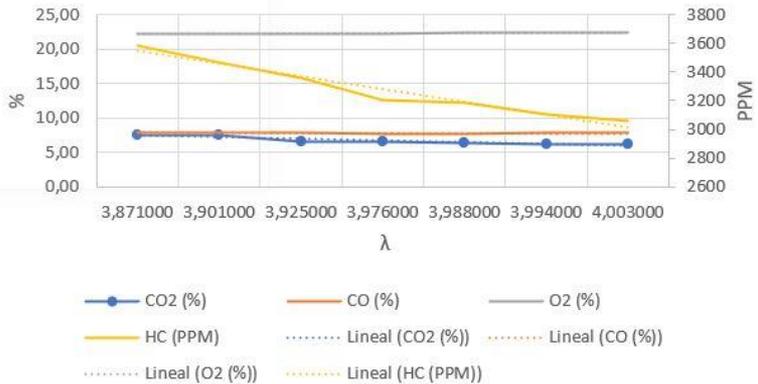
Catalizador usado 3000 km - ralentí



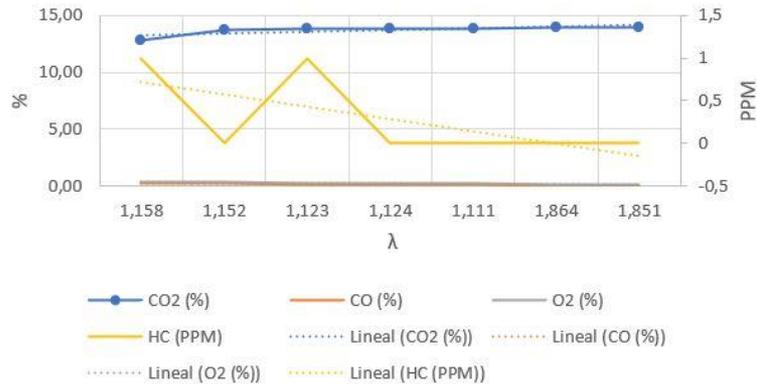
Catalizador tratado 3000 km - ralentí



Catalizador usado 3000 km - crucero



Catalizador tratado 3000 km - crucero





ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Sede
Latacunga



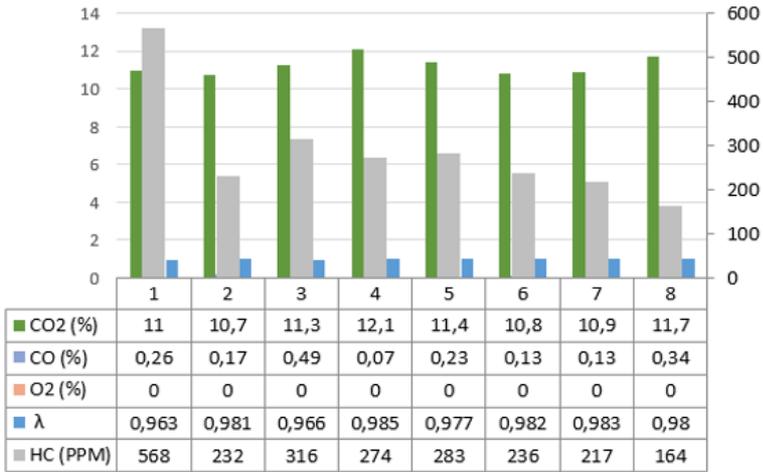
PRUEBAS DINÁMICAS



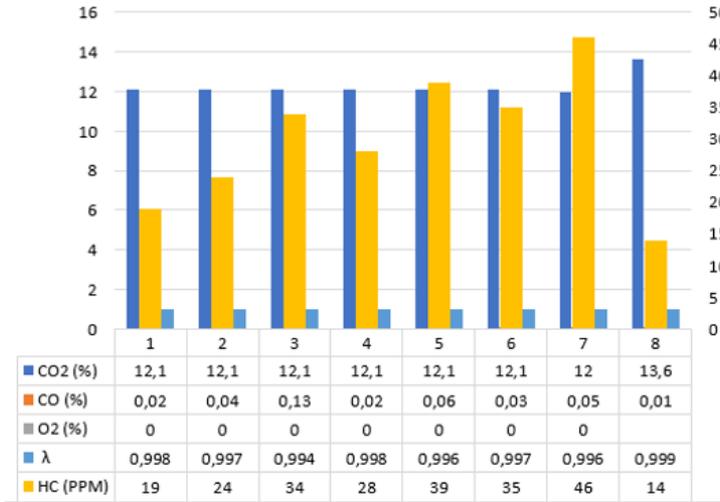


EMISIONES A 30 Km/h

Emisiones catalizador Usado



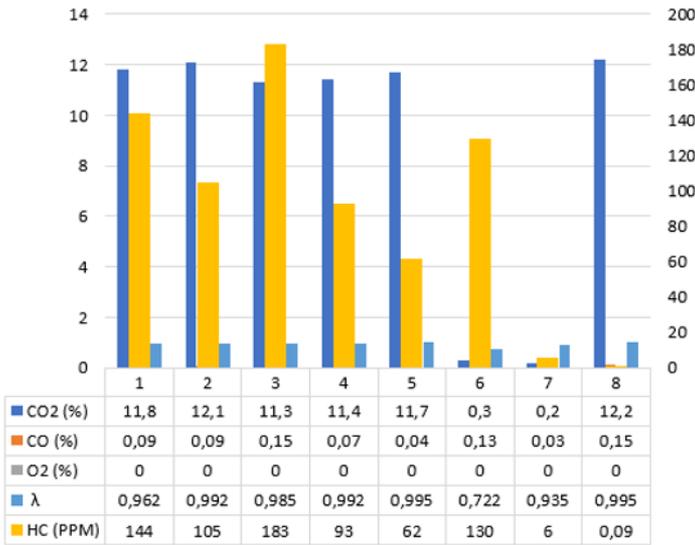
Emisiones catalizador Tratado



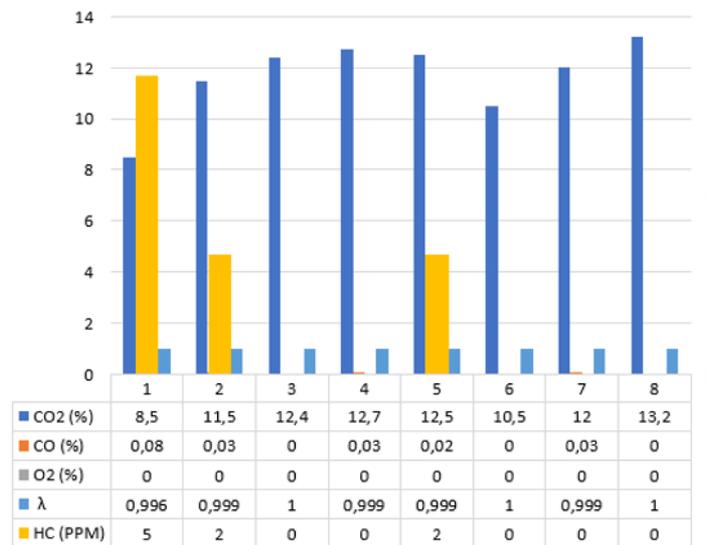


EMISIONES A 50 Km/h

Emisiones catalizador Usado



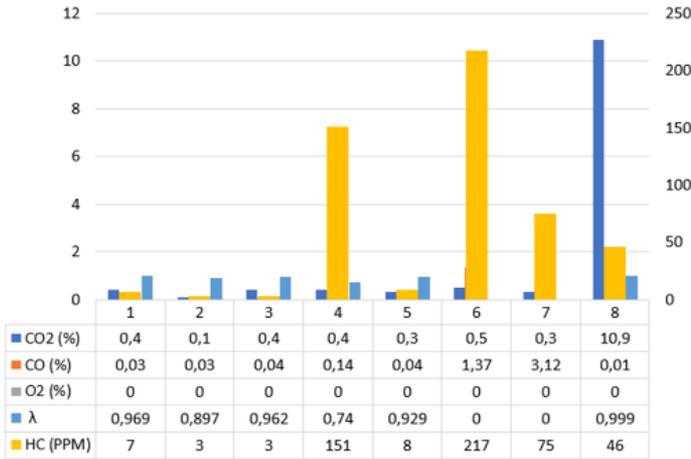
Emisiones catalizador Tratado



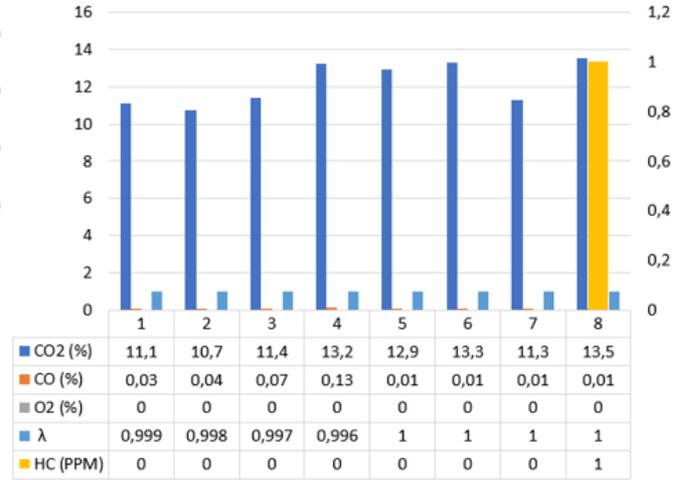


EMISIONES A 70 Km/h

Emisiones catalizador Usado



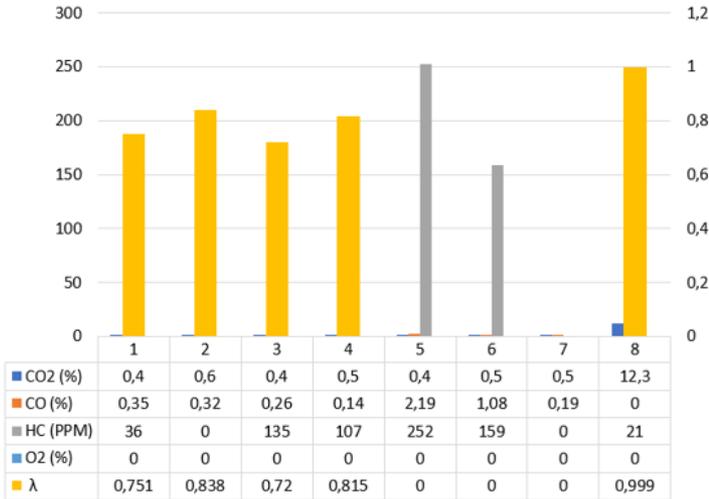
Emisiones catalizador Tratado



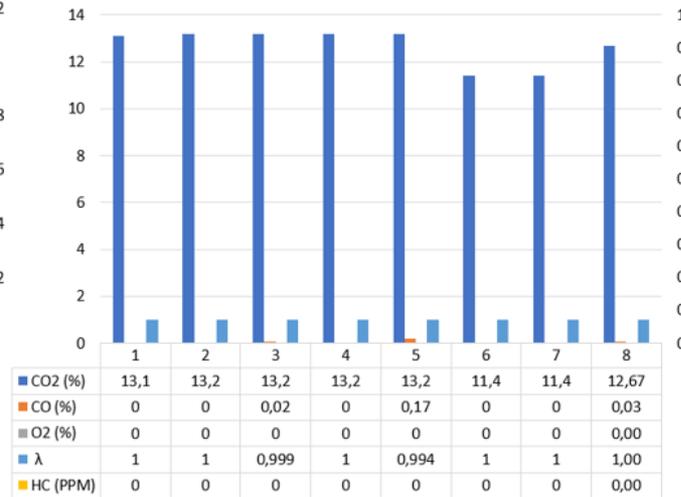


EMISIONES A 100 Km/h

Emisiones catalizador Usado

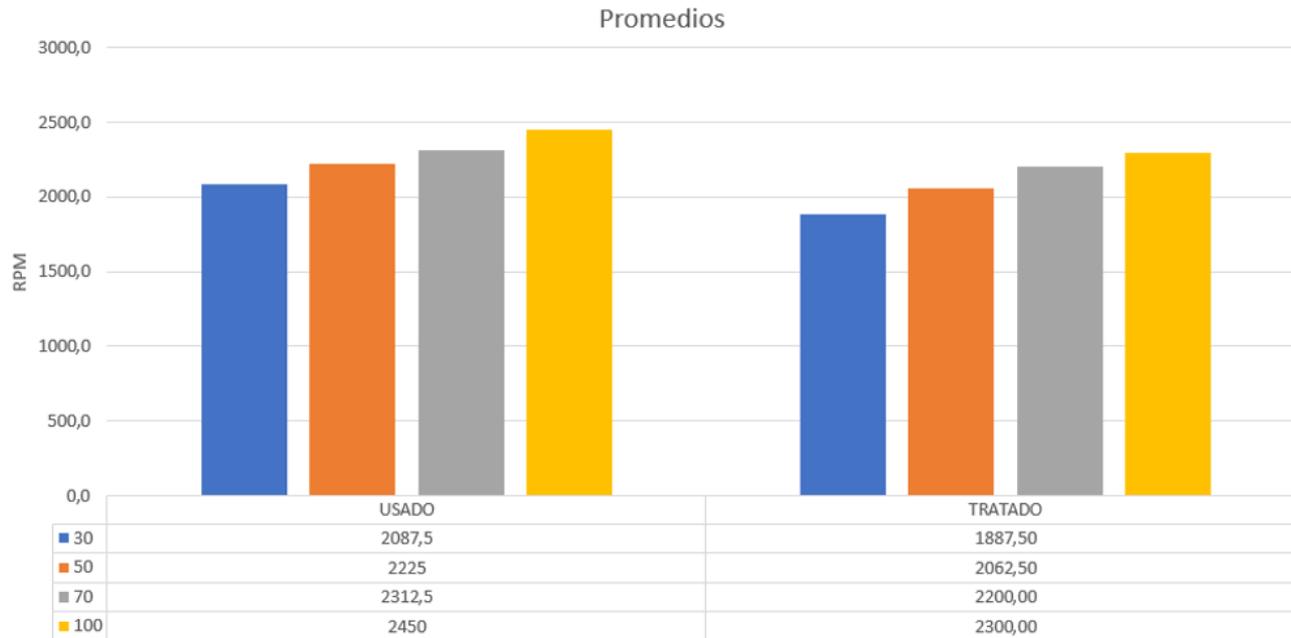


Emisiones catalizador Tratado





Régimen de giro del motor





ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Sede
Latacunga

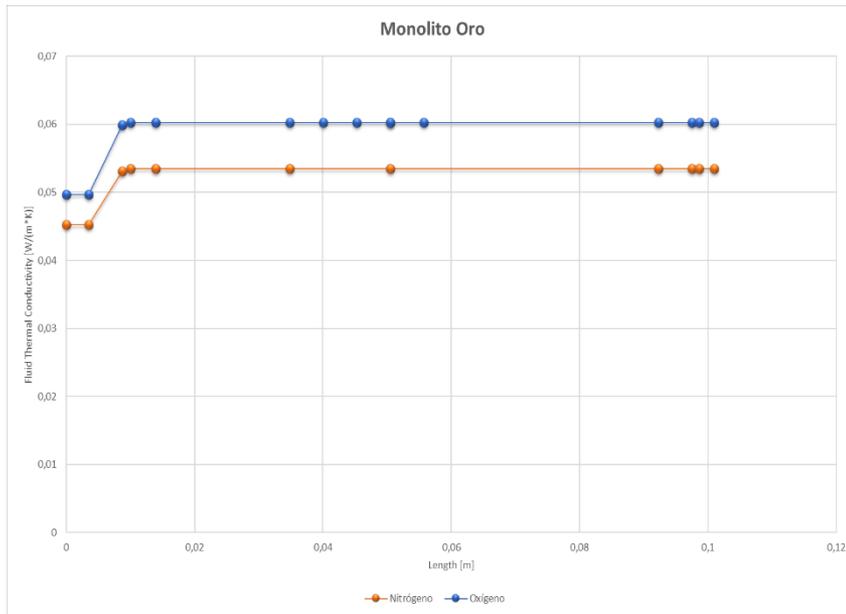


Proceso de oxidación en monolito de ORO

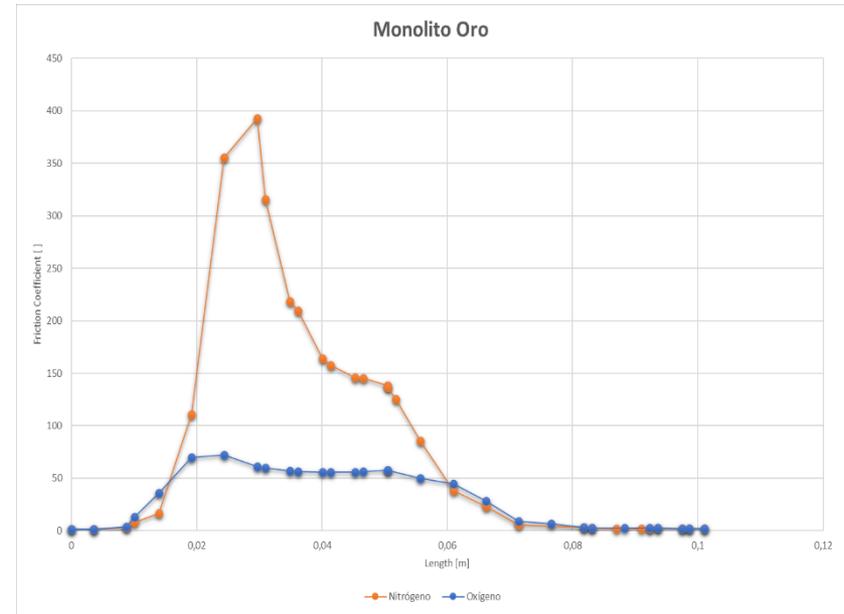




CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

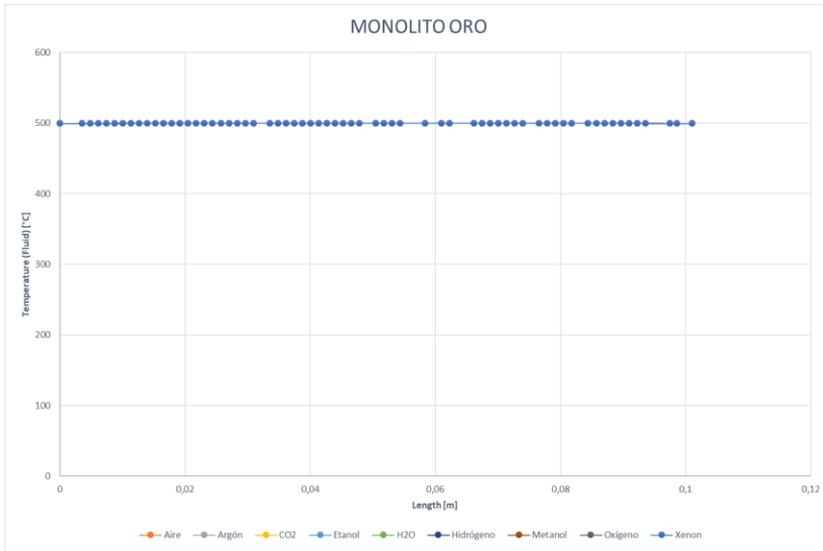


COEFICIENTE DE FRICCIÓN

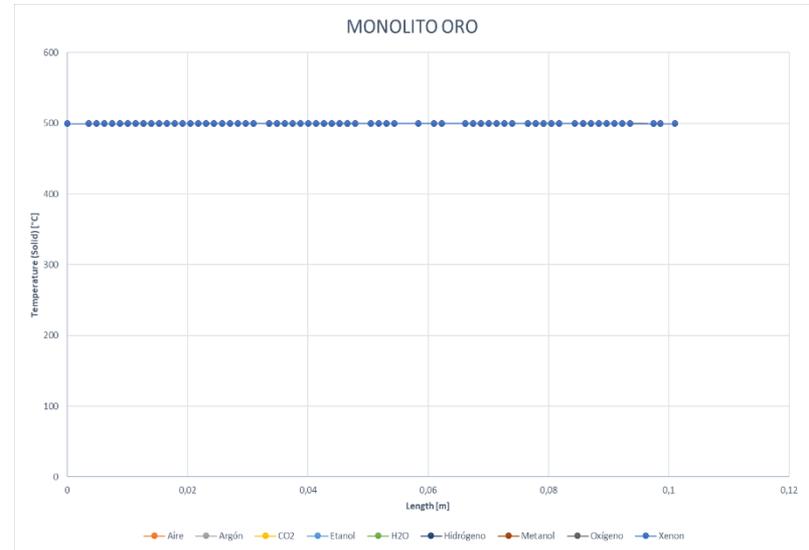




TEMPERATURA DE LOS FLUIDOS



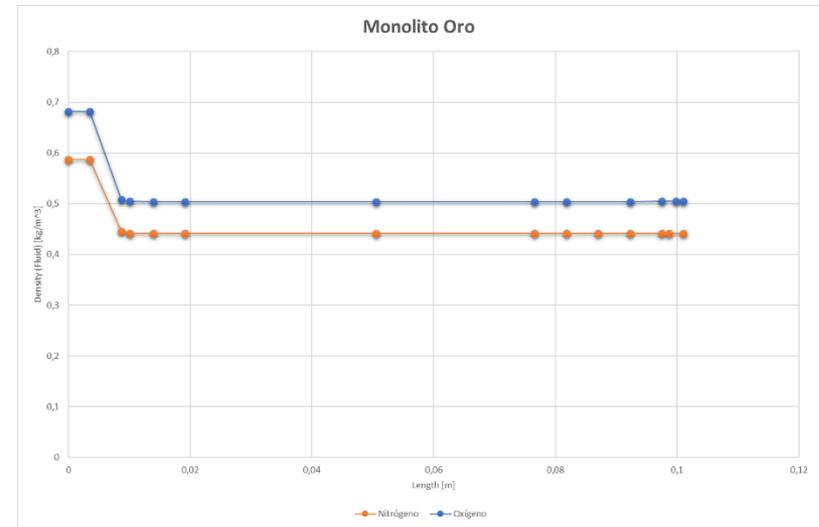
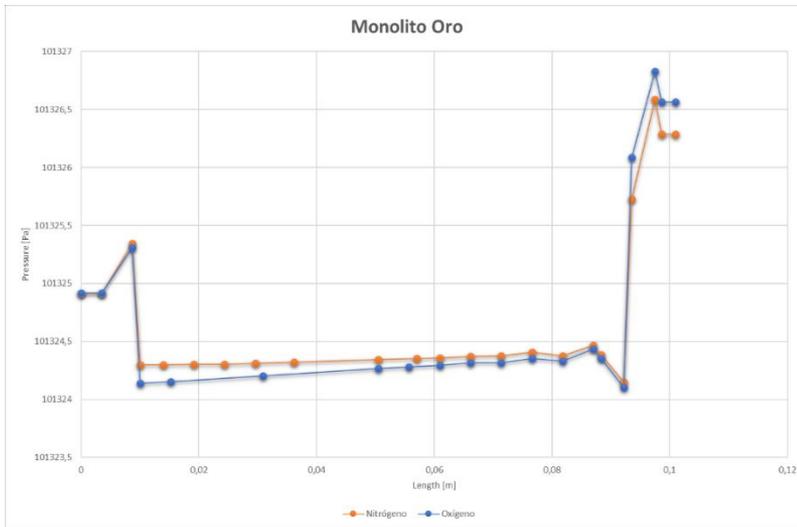
TEMPERATURA DEL SÓLIDO





PRESIÓN DEL FLUIDO

DENSIDAD DEL FLUIDO





ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Sede
Latacunga



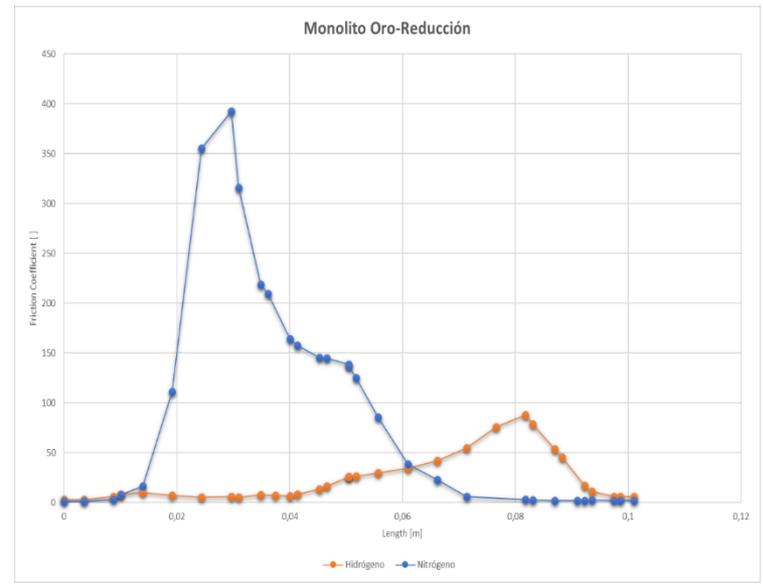
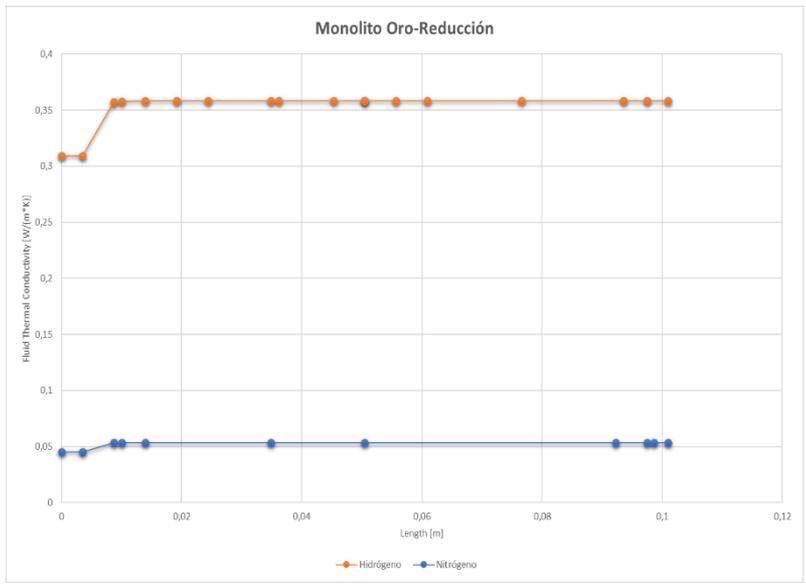
Proceso de reducción en monolito de ORO





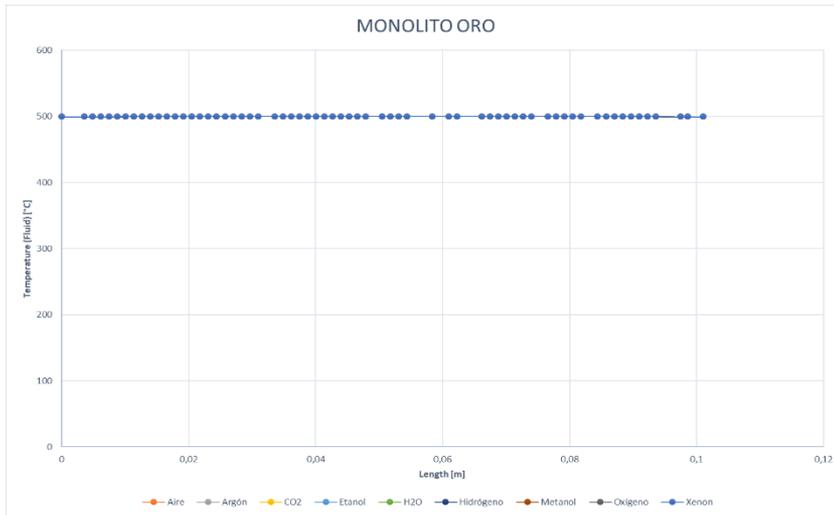
CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

COEFICIENTE DE FRICCIÓN

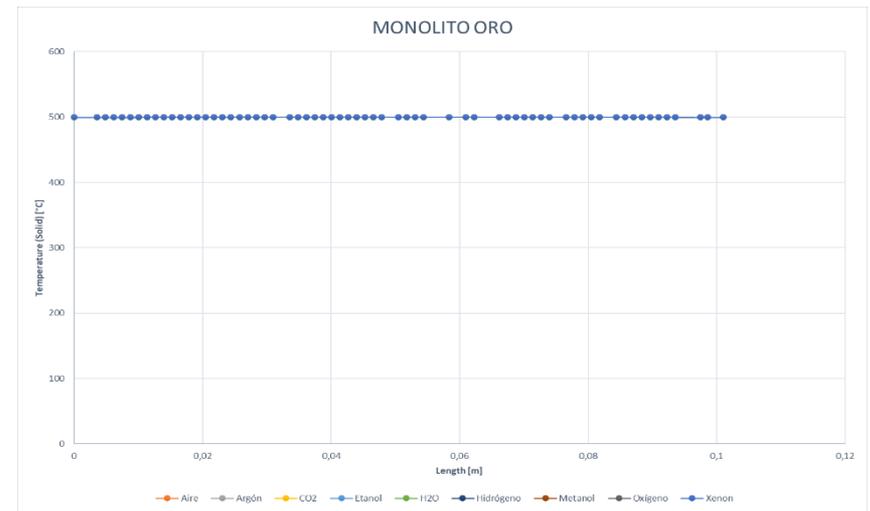




TEMPERATURA DE LOS FLUIDOS

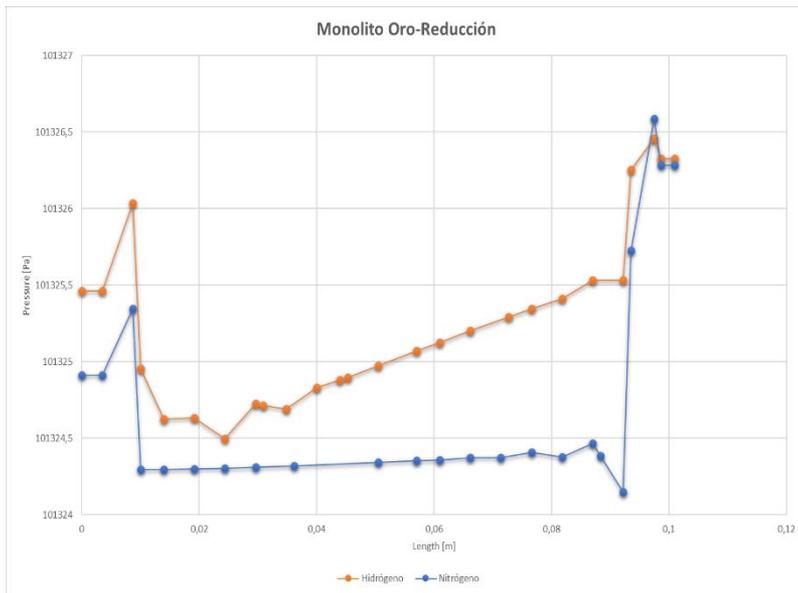


TEMPERATURA DEL SÓLIDO

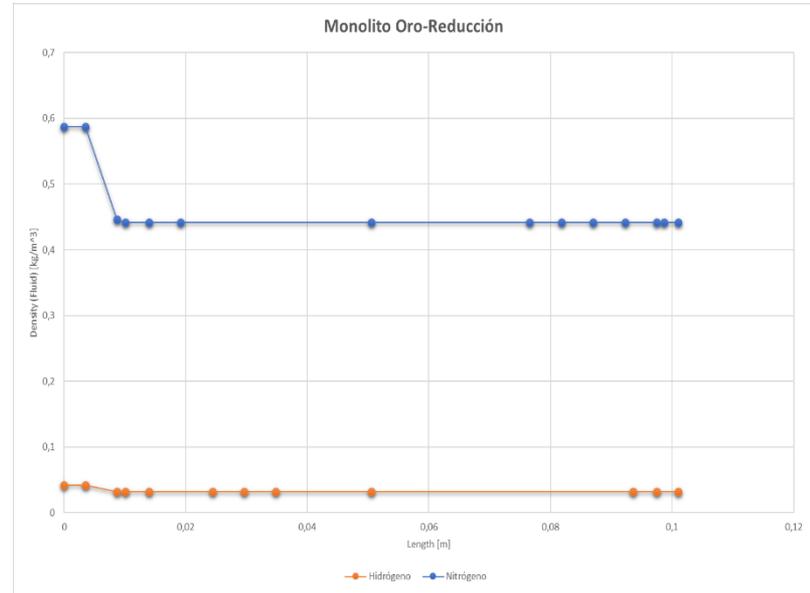




PRESIÓN DEL FLUIDO



DENSIDAD DEL FLUIDO





ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Sede
Latacunga

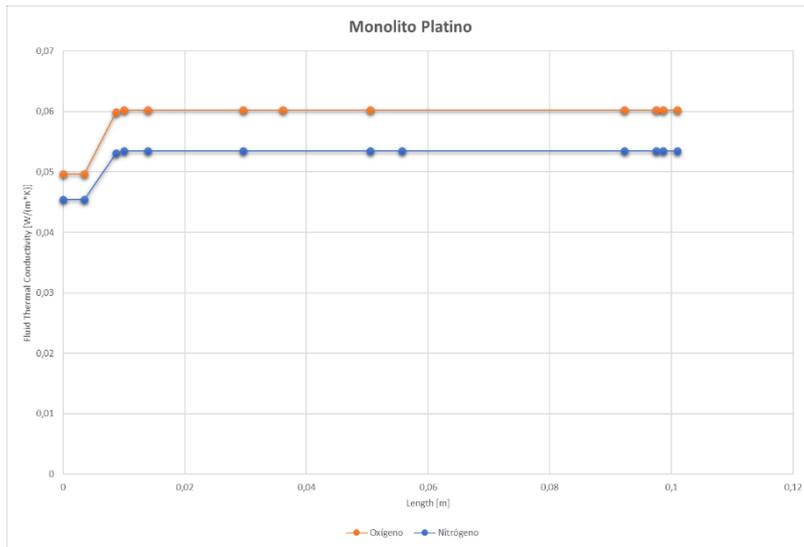


Proceso de oxidación en monolito de platino

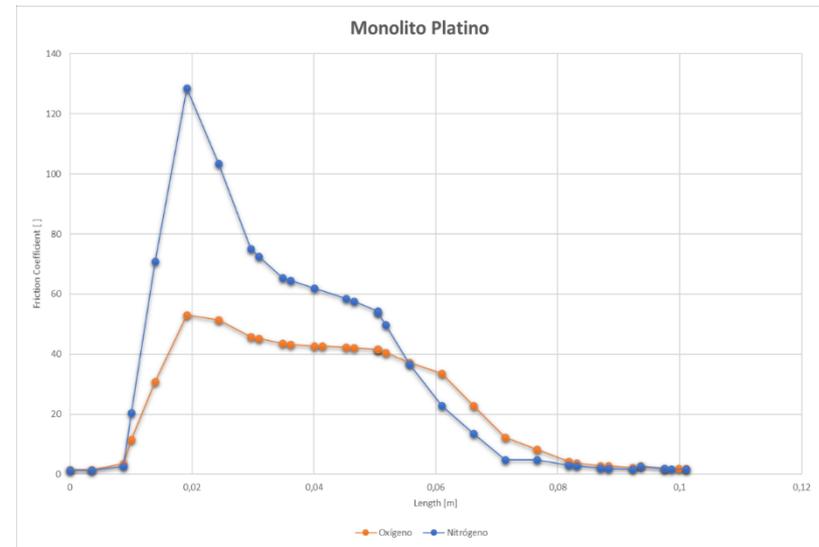




CONDUCTIVIDAD TÉRMICA



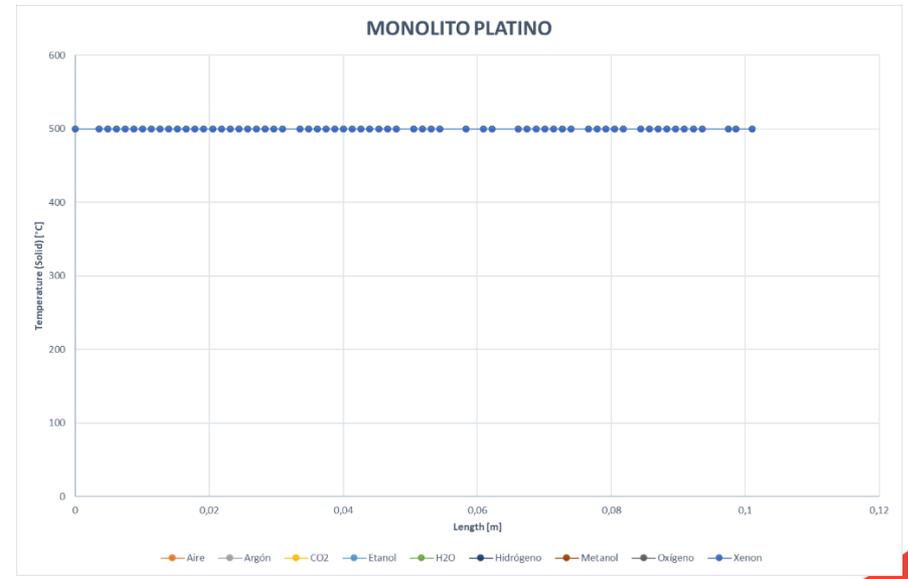
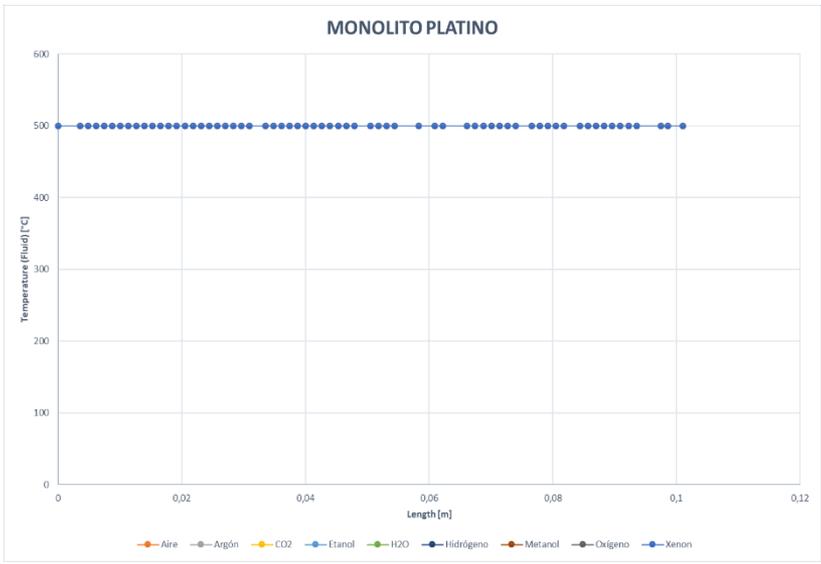
COEFICIENTE DE FRICCIÓN





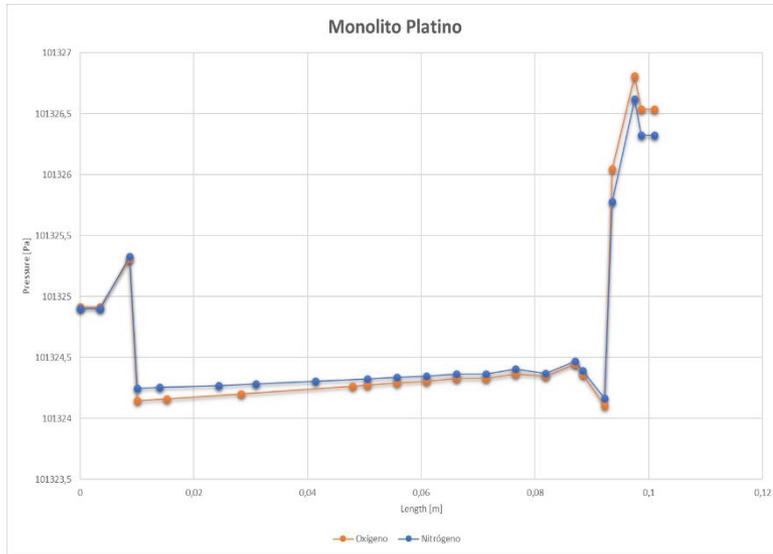
TEMPERATURA DE LOS FLUIDOS

TEMPERATURA DEL SÓLIDO

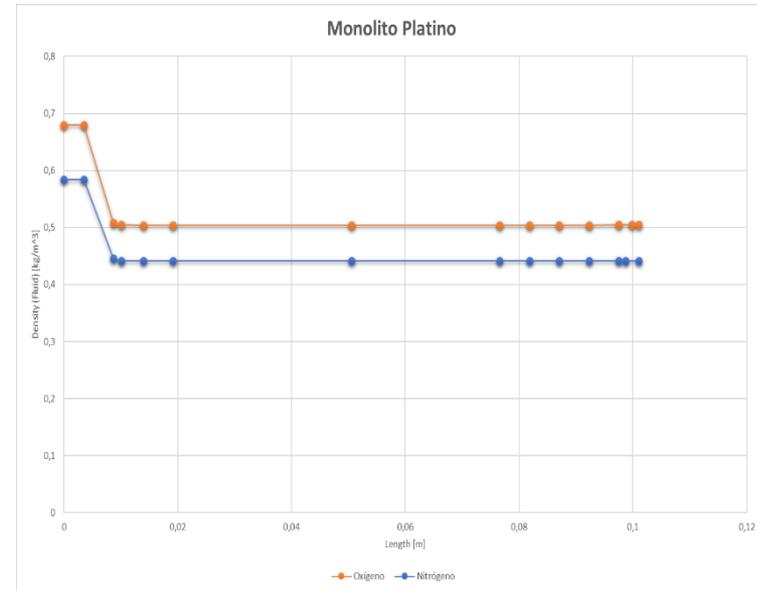




PRESIÓN DEL FLUIDO



DENSIDAD DEL FLUIDO





ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Sede
Latacunga

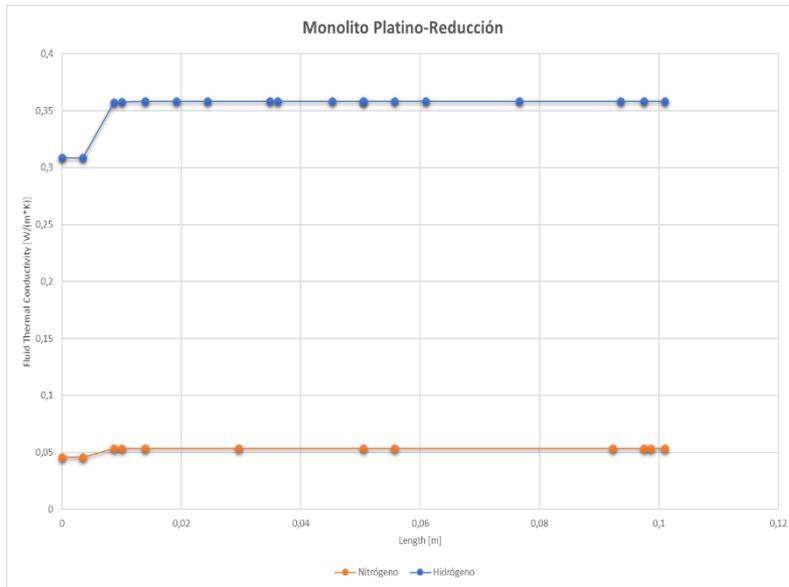


Proceso de reducción en monolito de platino

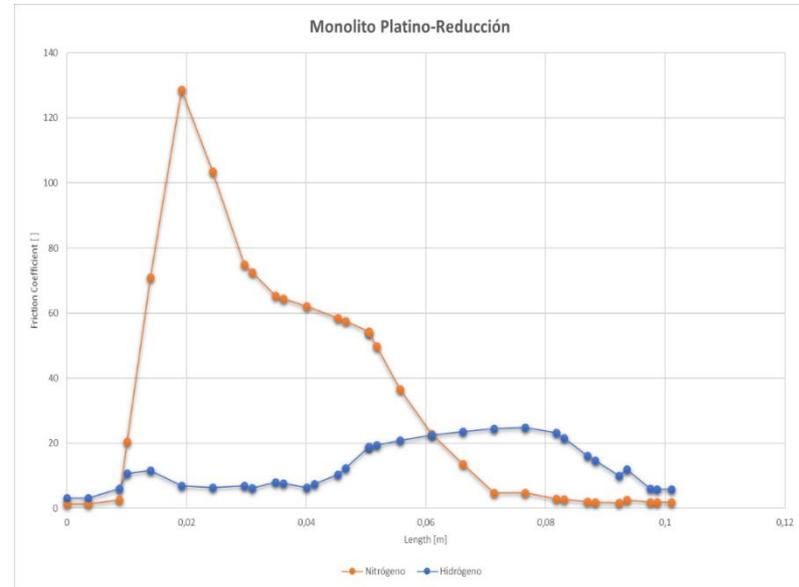




CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

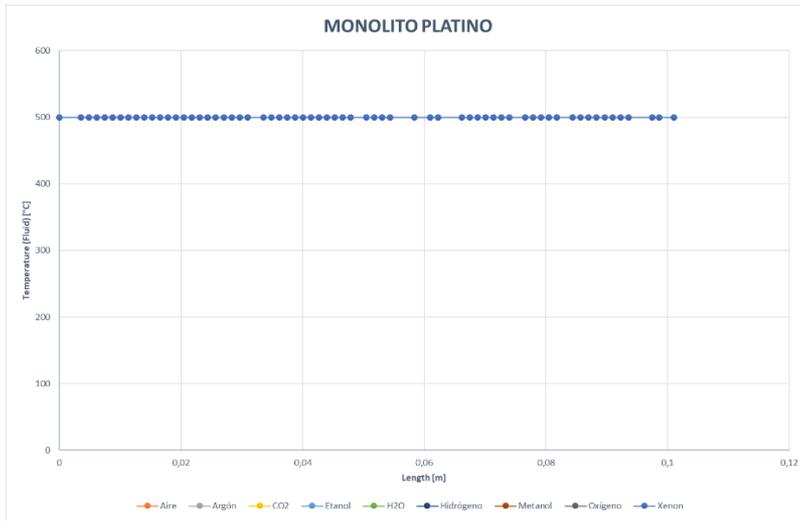


COEFICIENTE DE FRICCIÓN

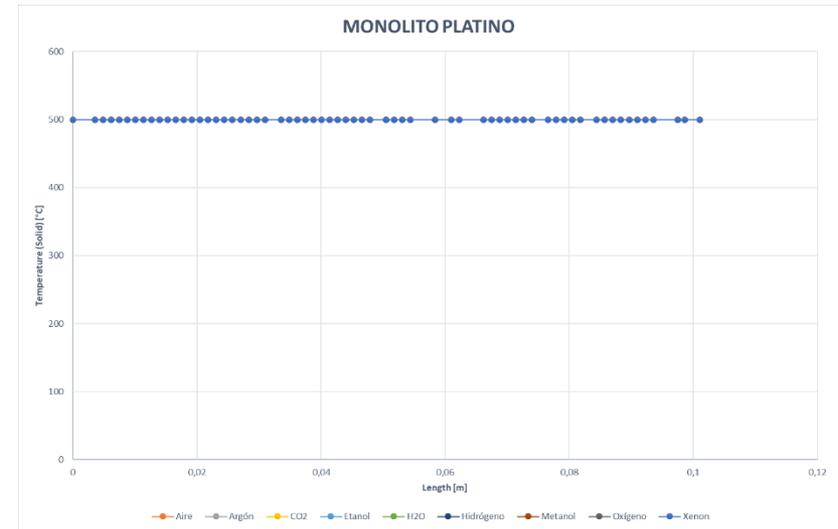




TEMPERATURA DE LOS FLUIDOS



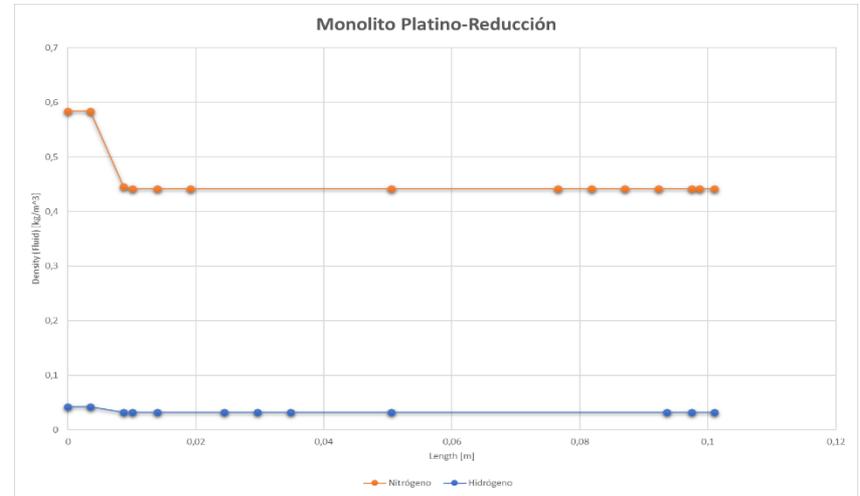
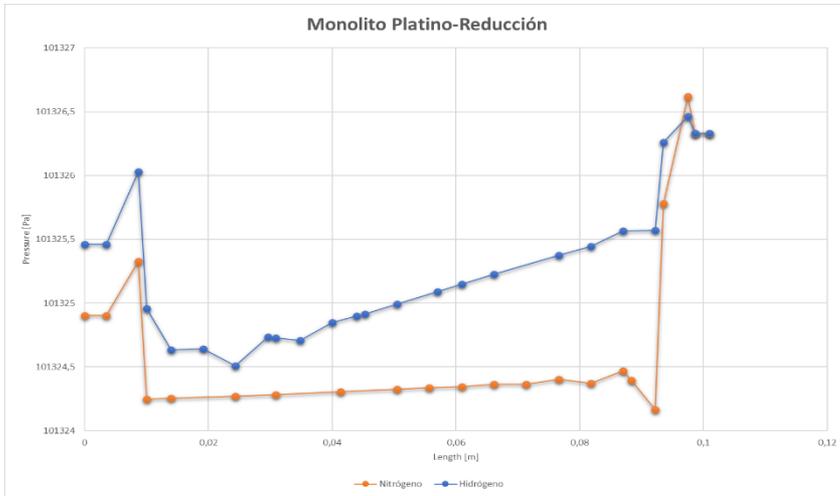
TEMPERATURA DEL SÓLIDO





PRESIÓN DEL FLUIDO

DENSIDAD DEL FLUIDO





CONCLUSIONES

- Se fundamentó la reutilización de convertidores catalíticos de media y alta gama a través de procesos de oxidación – reducción y redistribución de metales del monolito con el flujo de gases inertes a condiciones de tiempo de exposición y temperatura sustentado mediante pruebas de emisiones estáticas y dinámicas a los convertidores catalíticos antes y después del tratamiento de limpieza y redistribución de metales, donde la eficiencia de la metodología fue la validada desde una visión matemática y gráfica.
- Los catalizadores después del tratamiento de oxidación – reducción, el Dióxido de Carbono (CO_2) experimenta un incremento de 6.37% en valor, alcanzando un porcentaje de emisión de 13.52% que es producido por el catalizador tratado, por lo contrario el Monóxido de Carbono (CO) presenta una disminución de un 6.91% frente al valor de emisión con el monolito totalmente obstruido que es de 7.72% y alcanza el 0.81% cuando este elemento ya fue tratado, de la misma manera disminuye el porcentaje de emisión del Oxígeno alcanzando un 0.93%.





- Los valores de las emisiones de gases en las pruebas dinámicas, los Hidrocarburos (HC) se encuentran en un promedio de 286.25 ppm con un catalizador usado y en 29.88 ppm con el catalizador tratado existiendo una disminución de 256.37 ppm, el factor Lambda λ con el catalizador tratado se observa que en promedio se encuentra en 1 a diferencia del catalizador usado que está en 0.98. Estos valores reflejan la efectividad del tratamiento realizado al convertidor catalítico el cual ha recuperado su función principal que es la de transformar los gases tóxicos en inocuos.
- Considerando el análisis en el monolito de Oro que se encuentra sometido al proceso de oxidación, se toma el aporte de la conductividad térmica del oxígeno inicial de $49.664 \frac{mW}{mK}$ hasta alcanzar su máximo valor de $60.259 \frac{mW}{mK}$ al recorrer los 100 mm de longitud total del monolito, por otro lado, el nitrógeno aporta $45.261 \frac{mW}{mK}$ de conductividad térmica siendo este el valor mínimo de aporte que tiene dicho gas, el valor sigue aumentando hasta alcanzar los $53.511 \frac{mW}{mK}$.





- La presión del nitrógeno en el proceso de reducción en el monolito de Platino presenta su valor máximo en el punto 92.24 mm de longitud del monolito y corresponde a 101.326 KPa de presión, en este mismo punto para el hidrógeno el valor de la presión es de 101.325 KPa, así el aporte de presión de cada gas es indispensable para el tratamiento mencionado en la investigación de tal manera que mejore la eficiencia en la redistribución de los metales presentes en el monolito.
- El factor lambda obtenido mediante el analizador de gases en comparación con el cálculo realizado utilizando el análisis matemático evidencian como estos valores son muy semejantes y por ende se comprueba la efectividad del cálculo realizado y los datos obtenidos por medio de los equipos de medición, en la prueba realizada al vehículo con una velocidad de $100 \frac{Km}{h}$ con un catalizador obstruido, el promedio calculado del factor lambda es de 0.8791 mientras que el obtenido por el analizador de gases es de 0.82.





RECOMENDACIONES

- Ejecutar un estudio con los catalizadores tratados y analizar la efectividad del tratamiento en función al del test oficial para aprobación de emisiones de gases de escape de la revisión técnica vehicular dispuesta en el país.
- Con el fin de mejorar el método de tratamiento de limpieza y redistribución de metales del convertidor catalítico se debe tomar en cuenta los flujos del gas vector tomando en consideración que se necesitan flujos más altos y que la dimensión del monolito y el reactor son a tamaño real.
- La calibración de los analizadores y sus filtros deben estar actualizadas y limpios respectivamente para obtener datos más precisos en las pruebas realizadas, además de proteger a los equipos excesivo gases nocivos y humedad.





- Para determinar con mayor exactitud la efectividad del proceso de limpieza es necesario utilizar mayor número de muestras de convertidores catalíticos que hayan cumplido con su vida útil de funcionamiento para de esta manera evidenciar dicha eficiencia.
- Para evitar fisuras o fracturas en el monolito, es necesario manipularlo con sumo cuidado al momento de retirarlo de su carcasa metálica y colocarlo en el acople de fijación dentro del reactor.
- Fomentar el interés en futuras investigaciones para salvaguardar al medio ambiente reutilizando los convertidores catalíticos para disminuir la contaminación emitida por mal reciclaje de este elemento.





ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**Sede
Latacunga**



“No siempre es posible ser el mejor, pero lo que si es posible es siempre mejorar tu desempeño.”

Jackie Stewart

