



Análisis de métodos para el control de fugas e inyección de urea en sistemas SCR para el estándar de emisiones Euro7 en motores diesel

Jonatan Cano González

Proyecto de Prácticas para optar al Título de Ingeniero Mecánico

Modalidad de Práctica

Semestre de Industria

Orientador

Prof. Dr.-Ing. John Ramiro Agudelo Santamaría

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Mecánica

Medellín, Antioquia, Colombia

Septiembre 2024

Cita	Cano J. (2024)
Referencia	Cano J. (2024) <i>Análisis de métodos para el control de fugas e inyección de urea en sistemas SCR para el estándar de emisiones Euro7 en motores diesel</i> . [Informe de práctica]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Agradecimientos

A mi esposa, Estefanía, por su incansable apoyo y motivación.

A mi familia, sin cuyo apoyo no hubiese logrado llegar hasta aquí.

Al profesor John Ramiro, por su invaluable conocimiento y por guiarme durante todo el proceso.

A mi colega, María Eugenia García de la Cruz, por su infinita paciencia para explicarme los incontables conceptos de todas las formas posibles y su generosidad con el conocimiento.

A Sebastián Giraldo, por confiar en mi potencial y estar siempre dispuesto a ayudar.

A FEV Iberia, por la oportunidad de aprender y trabajar con ellos en el mundo de la automoción, que es lo que me apasiona.

A mi Alma Máter, la Universidad de Antioquia, por formarme para llegar a ser el profesional de hoy.

Tabla de contenido

Resumen	5
Abstract	6
Introducción	7
Objetivos	9
Objetivo general	9
Objetivos específicos.....	9
Marco teórico	10
Conclusiones y recomendaciones.....	32
Referencias	34

Resumen

El proceso de prácticas se enfocó en analizar los métodos empleados para mejorar el control de fugas e inyección de urea automotriz en sistemas SCR (*Selective Catalytic Reduction*) en motores diesel, centrado principalmente en el cumplimiento de la nueva normativa Euro 7. Se aborda la evolución de la normativa de control de emisiones Euro y la implementación del sistema SCR, detallando las reacciones químicas involucradas en la reducción de óxidos de nitrógeno (NOx), además del efecto que tienen factores como el envejecimiento del catalizador y la cristalización de urea sobre la eficiencia del sistema. Se encontró que bajo condiciones óptimas de relación NO₂/NOx y temperatura media del sistema, se puede alcanzar una reducción mayor al 95%. Se habla de los dos enfoques principales para mejorar el control de la inyección de urea: el modelo *Mapped*, basado en mapas preestablecidos para diferentes condiciones operativas y el modelo *Model Based*, que integra variables en tiempo real como la temperatura y el flujo de gases. Se ilustra la arquitectura funcional de estrategias para el cálculo efectivo de la cantidad de urea necesaria, según las condiciones de funcionamiento, con el objetivo de minimizar las fugas de NH₃ y garantizar una reducción eficiente de NOx por medio del *buffer* (inyección previa de urea). En las conclusiones se subraya la importancia de optimizar la gestión de la inyección de urea para asegurar el cumplimiento de las regulaciones de emisiones.

Palabras clave: Motores diesel, SCR, Buffer, Euro 7, Amoníaco y NOx.

Abstract

The internship process focused on analyzing the methods used to improve leak control and urea injection in SCR (Selective Catalytic Reduction) systems in diesel engines, primarily centered on complying with the new Euro 7 regulation. It addresses the evolution of the Euro standards and the implementation of the SCR system, detailing the chemical reactions involved in reducing nitrogen oxides (NO_x), as well as the impact of factors such as catalyst aging and urea crystallization on system efficiency. It was found that under optimal NO₂/NO_x ratios and average system temperature conditions, a reduction of over 95% can be achieved. The two main approaches to improving urea injection control are discussed: the *Mapped model*, based on pre-established maps for different operating conditions, and the *Model Based* approach, which integrates real-time variables such as temperature and gas flow. The functional architecture of strategies for effectively calculating the necessary amount of urea according to operating conditions is illustrated, with the goal of minimizing NH₃ leaks and ensuring efficient NO_x reduction through the *buffer* (pre-injection of urea). The conclusions highlight the importance of optimizing urea injection management to ensure emission regulatory compliance.

Keywords: diesel engines, SCR, Buffer, Euro 7, Ammonia and NO_x.

Introducción

En un contexto de constante cambio de normas y técnicas asociadas a la fabricación de motores de combustión interna, es necesario interpretar y aplicar debidamente metodologías y técnicas que satisfagan las necesidades del mercado teniendo en cuenta los recursos disponibles (sistemas, dispositivos, presupuesto, tiempo etc.). Particularmente los motores diésel reciben especial atención, puesto que, en un entorno actual de hibridación, electrificación y en general, cambios en los trenes de potencia de vehículos, los motores diésel emiten gases y elementos nocivos para la salud y el medio ambiente (NOx, CO, CO₂, PM, entre otros), a tal punto que en varias ciudades se ha impedido la circulación de vehículos puramente diesel al interior de sus urbes, en un afán de reducir la polución y la generación de gases de efecto invernadero. Sin embargo, los motores diesel son altamente eficientes y siguen teniendo gran potencial de desarrollo para su implementación actual y futura.

Cabe señalar que una parte importante de la industria aún depende de estos motores y en muchos casos, la transición a otros tipos de propulsores puede resultar más perjudicial y costosa que trabajar en el desarrollo de los sistemas existentes, buscando mayor eficiencia y menor impacto ambiental. Cuando se abordan normativas de emisiones para motores diésel, es imprescindible considerar los sistemas de postratamiento de gases, debido a que son los responsables de filtrar, reducir, y si es posible, eliminar los gases nocivos generados por el motor en el proceso de combustión. Es por esto que el enfoque del proyecto se basa en comprender tales sistemas de acuerdo con las nuevas propuestas reglamentarias y analizar el desarrollo de las funciones del software de control motor que las satisfagan.

Normativa Euro de Emisiones; su Historia y Evolución

La normativa Euro de emisiones contaminantes, fue propuesta e implementada por la Comisión Europea a principios de los noventa, con el fin de controlar y paulatinamente reducir los principales gases contaminantes emitidos por los vehículos de combustión interna, tanto automóviles como camiones. Entre los contaminantes regulados se encuentra el monóxido de

carbono (CO), los hidrocarburos no quemados (HC), los óxidos de nitrógeno (NOx), el material particulado (PM) y el número de partículas (PN). El objetivo es reducir las emisiones nocivas lo máximo posible, por ello con cada normativa aplicada, los límites han sido cada vez más estrictos (ver *Tabla 1*). Esto implica la implementación de distintos dispositivos en el vehículo que permitan ir cumpliendo con cada regulación, como sistemas de recirculación de gases (EGR), filtro de partículas (DPF), sistemas catalíticos (DOC, LNT, SCR), entre otros. Cabe notar que el enfoque de la normativa Euro está en los contaminantes de tipo local, que afectan más la calidad del aire y la salud pública. El CO₂, al ser un gas de efecto invernadero global, no está regulado en estas leyes. Sin embargo, otras políticas climáticas que buscan reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, si están presentes en la Unión Europea y serán brevemente abordadas más adelante en este documento.

Además de los límites en emisiones, la normativa regula también los ciclos de pruebas que deben realizar los fabricantes para homologar cada vehículo (ya sean ciclos en laboratorio, banco de rodillos o en la calle), así como la tolerancia que puede haber entre los resultados obtenidos en cada entorno (las emisiones obtenidas en laboratorio suelen ser menores que las obtenidas en condiciones reales en la calle). En la tabla siguiente se describen los límites establecidos para automóviles de pasajeros (categoría M, vehículos livianos menores a 3.5 Ton) con motor diesel, además de los dispositivos que fueron implementando (estimación) los fabricantes para poder cumplir con cada versión de la norma.

Tabla 1

Evolución de las normas Euro para vehículos de pasajeros (M1) con motor diesel.

Norma	Entrada en vigor	CO [g/km]	NOx [g/km]	HC+NOx [g/km]	PM [g/km]	PN [# /km]	NH3	Dispositivo
Euro 1	Julio 1992	2.72	-	0.97	0.14	-	-	
Euro 2	Enero 1996	1.0	-	0.7	0.08	-	-	Turbocompresor
Euro 3	Enero 2000	0.66	0.500	0.56	0.05	-	-	EGR + DOC
Euro 4	Enero 2005	0.50	0.250	0.30	0.025	-	-	DPF
Euro 5a	Septiembre 2009	0.50	0.180	0.230	0.005	-	-	EGRHP + EGRLP + LNT
Euro 5b	Septiembre 2011	0.50	0.180	0.230	0.0045	6×1011	-	
Euro 6b	Septiembre 2014	0.50	0.080	0.170	0.0045	6×1011	-	SCR
Euro 6c	Septiembre 2017	0.50	0.080	0.170	0.0045	6×1011	-	
Euro 6d-Temp	Septiembre 2017	0.50	0.080	0.170	0.0045	6×1011	-	
Euro 6d	Enero 2020	0.50	0.080	0.170	0.0045	6×1011	10 [ppm]	
Euro 6e	Septiembre 2023	0.50	0.080	0.170	0.0045	6×1011	-	
Euro 7	Julio 2025	0,5	0.080	0.170	0.0045	6×1011	0,02 [g/km]	

Objetivos

Objetivo general

Desarrollar criterios técnicos y metodológicos enfocados en el diseño de sistemas de postratamiento de emisiones como futuro profesional en Ingeniería Mecánica

Objetivos específicos

1. Evaluar las propuestas de la normativa Euro 7 para la reducción de emisiones y su aplicabilidad en el contexto actual, contribuyendo a la innovación en los sistemas involucrados.
2. Diseñar requerimientos operacionales y funcionales aplicados a los sistemas de postratamiento en motores diesel (SCR).
3. Apoyar al equipo de software en el desarrollo del algoritmo que ejecutará las funciones para la reducción de emisiones y mejora de eficiencia de los sistemas

Marco teórico

Sistemas de Postratamiento de Emisiones

A continuación, se da una breve descripción de los sistemas hasta ahora empleados en el postratamiento de gases en motores diesel:

- EGR/HP (Exhaust Gas Recirculation-High Pressure): En este sistema, una parte de los gases de escape se redirige directamente desde el colector de escape al colector de admisión. Estos gases se mezclan con el aire fresco antes de entrar en la cámara de combustión, reduciendo así, las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) al disminuir la temperatura de combustión.

- EGR-LP (Exhaust Gas Recirculation-Low Pressure): Similar al EGR-HP, pero en este caso los gases de escape se recirculan después de pasar por el filtro de partículas (DPF). Esto significa que los gases recirculados están más limpios.

- DOC (Diesel Oxidation Catalyst): Disminuye las emisiones de hidrocarburos no quemados (HC) en el proceso de combustión y el monóxido de carbono (CO) en el escape por medio de un proceso de oxidación, convirtiéndolos en dióxido de carbono (CO₂) y agua (H₂O)

- SCR (Selective Catalytic Reduction): Utilizando una solución de urea (comercialmente llamada AdBlue) inyectada en los gases de escape, logra reducir las emisiones de NO_x al reaccionar con este y la ayuda de un catalizador.

- ASC (Ammonia Slip Catalyst): Convierte el amoníaco (NH₃) no consumido por el SCR, en nitrógeno (N₂) y agua (H₂O). Dicho proceso se da mediante la oxidación del NH₃ a determinada temperatura y con la ayuda de materiales catalizadores presentes en el ASC como platino (Pt), paladio (Pd), óxido de cerio (CeO₂), óxido de aluminio (Al₂O₃).

- LNT (Lean NOx Trap): Atrapa los NOx en una trampa durante la combustión pobre y los libera convertidos en nitrógeno en condiciones de combustión rica. Esto último sucede cuando el LNT alcanza un nivel de saturación significativo de NOx, siendo la ECU la que activa el proceso de regeneración, que consiste en enriquecer la mezcla de aire combustible para aumentar la temperatura de los gases de escape, dejando como producto final nitrógeno (N₂) y agua H₂O, que son inofensivos para el medio ambiente.

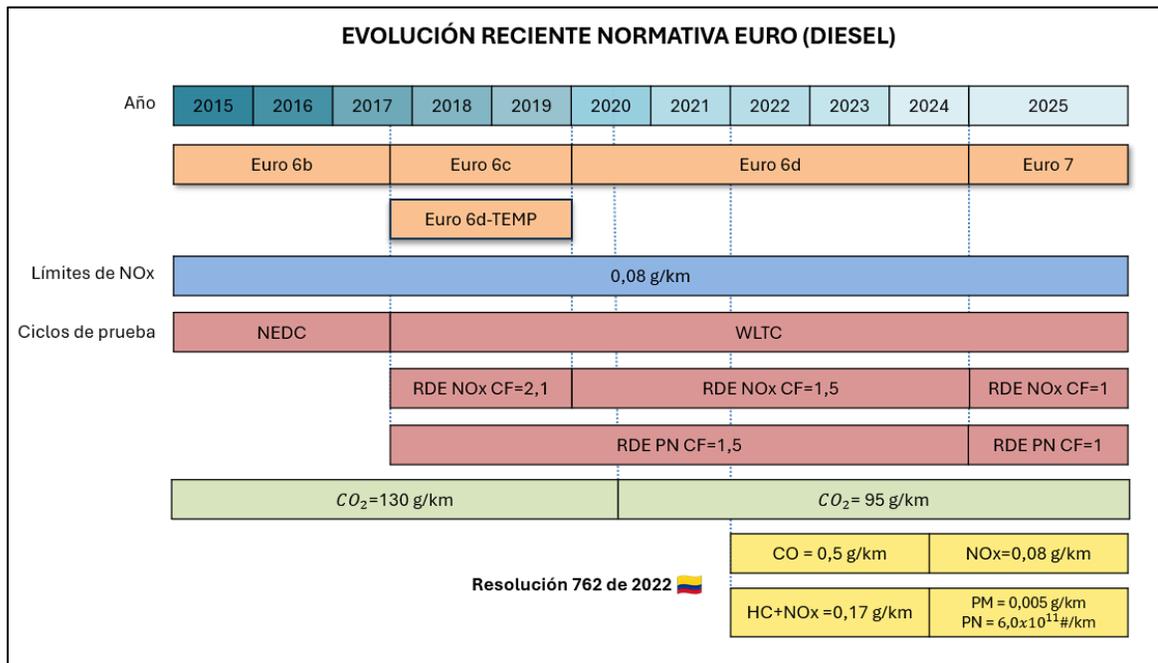
- DPF (Diesel Particle Filter): Es un filtro que atrapa y almacena el material particulado (hollín) del escape. Eventualmente, estas partículas son quemadas en un proceso llamado regeneración, que aumenta la temperatura del escape para convertirlas en CO₂.

- OBM (On Board Monitoring): Es un sistema de monitoreo continuo que supervisa las emisiones del vehículo en tiempo real, siendo capaz de enviar alertas tanto al conductor como al fabricante de manera OTA (Over The Air), aunque aún hay aspectos de esto último por definirse.

La *ilustración 1* muestra la evolución de la normativa Euro desde el 2015 hasta lo que será la Euro 7 en 2025, enfocándose en los límites de emisiones de NOx, CO₂ y los ciclos de pruebas de homologación. Además, se añade un paralelo con la normativa colombiana y un corto análisis.

Ilustración 1

Evolución de la normativa Euro para vehículos de pasajeros (M1) con motor diesel.

**Colombia**

La Resolución 762 de 2022, “Por la cual se reglamentan los límites máximos permisibles de emisión de contaminantes que deberán cumplir las fuentes móviles terrestres...”¹⁸ de julio 2022 (Colombia) presentada en la *ilustración 1*, busca asemejarse a la normativa Euro. Analizando los límites establecidos, se puede afirmar que la resolución 762 encuentra su equivalente en la norma Euro 6, por lo menos en lo que respecta a vehículos de pasajeros con motor diesel. Con la salvedad de que el límite para material particulado (PM), es el de euro 5a (0.005 g/km) y que, para el proceso de homologación, los fabricantes pueden emplear bien sea el ciclo NEDC (que es menos estricto y en Europa ya no se implementa) o el ciclo WLTC que es el estándar mundial.

Regulaciones CO₂ en Europa

Debido al enfoque de las normativas Euro sobre los gases que tienen un efecto directo en la salud y la calidad del aire, el CO₂, al ser un gas de efecto invernadero global, no se incluye en estas regulaciones. Para regular este gas, se estableció el Reglamento (UE) 2023/851 del Parlamento Europeo “por el que se modifica el Reglamento (UE) 2019/631 en lo que respecta al refuerzo de las normas de comportamiento en materia de emisiones de CO₂ de los turismos nuevos y de los vehículos comerciales ligeros nuevos, en consonancia con la mayor ambición climática de la Unión”. 19 de Abril 2023 (UE). Alineándose con el Acuerdo de París, un tratado internacional para combatir el cambio climático, por el cual se establece que los turismos nuevos no deben superar los 95 g de CO₂/km. 12 diciembre 2015. Según este reglamento, el propósito es que haya una reducción progresiva de las emisiones hasta un 55% para el año 2030. Los fabricantes que superen dichos límites deberán pagar una prima por exceso de emisiones, en contraste de los “supercréditos” otorgados para vehículos de baja emisión, incentivando el uso de vehículos eléctricos. La prueba seleccionada para validar el cumplimiento es el ciclo WLTP, con el fin de proporcionar valores de consumo y emisiones más representativo de las condiciones reales (aunque todavía no llega a reglamentarse un ciclo RDE en esta regulación).

Actualidad y Euro 7

De acuerdo con los previos debates del Parlamento Europeo, la normativa Euro 7 entrará en vigor en julio de 2025. Sin embargo, según la plenaria del Consejo Europeo, reunida el pasado 12 de abril de 2024, la nueva normativa se aplicaría para automóviles de pasajeros a mediados del 2027. Ésta mantendrá los mismos límites de emisiones y condiciones de prueba que tenía Euro 6, con la salvedad de que ahora no habrá tolerancia entre las emisiones permitidas en las pruebas de calle (RDE) versus las de laboratorio (WLTP). Es decir, el factor de conformidad (CF) será de 1. Se regularán también las emisiones de amoníaco (NH₃), el material particulado proveniente de los frenos y la vida útil mínima de las baterías para vehículos eléctricos e híbridos. Adicionalmente, unificará las normativas para camiones y automóviles con el fin de simplificar la comprensión de las regulaciones según la posición del Parlamento Europeo TC1-COD (2022)0365.

Tabla 2

Límites de emisiones en Euro 7 para las categorías M1 y N1.

ANEXO I																		
LÍMITES DE EMISIONES EURO 7																		
Cuadro I: Límites de emisiones de escape Euro 7 para los vehículos de las categorías M ₁ y N ₁ con motor de combustión interna																		
Categoría	Clase	Masa en orden de marcha (MOM) (kg)	Masa de monóxido de carbono (CO)		Masa de hidrocarburos totales (HCT)		Masa de hidrocarburos no metánicos (HCNM)		Masa de óxidos de nitrógeno (NO _x)		Masa combinada de hidrocarburos y óxidos de nitrógeno totales (HCT + NO _x)		Masa de materia particulada (PM)		Número de partículas (PN ₁₀)			
			L ₁ (mg/km)	PI	CI	L ₂ (mg/km)	PI	CI	L ₃ (mg/km)	PI	CI	L ₄ (mg/km)	PI	CI	L ₂ + L ₄ (mg/km)	PI	CI	L ₅ (mg/km)
M ₁	-		1 000	500	100	-	68	-	60	80	-	170	4,5	4,5	6 x 10 ¹²	6 x 10 ¹²		
N ₁	I	MOM ≤ 1280	1 000	500	100	-	68	-	60	80	-	170	4,5	4,5	6 x 10 ¹²	6 x 10 ¹²		
	II	1280 < MOM ≤ 1735	1 810	630	130	-	90	-	75	105	-	195	4,5	4,5	6 x 10 ¹²	6 x 10 ¹²		
	III	1735 < MOM	2 270	740	160	-	108	-	82	125	-	215	4,5	4,5	6 x 10 ¹²	6 x 10 ¹²		

Nota: Adaptado de Posición del Parlamento Europeo TC1-COD (2022)0365. Documento legislativo consolidado. 2024. <https://goo.su/p60tKf>

Dentro del marco de postratamiento de emisiones en motores diesel, ha habido un enfoque particular en el sistema SCR (Selective Catalytic Reduction), estudiando su sistema de inyección de urea basado en modelo y el método por mapa o cartografía, con énfasis en el *buffer* de NH₃ en el monolito (consigna del *buffer*, carga e inyección de NH₃).

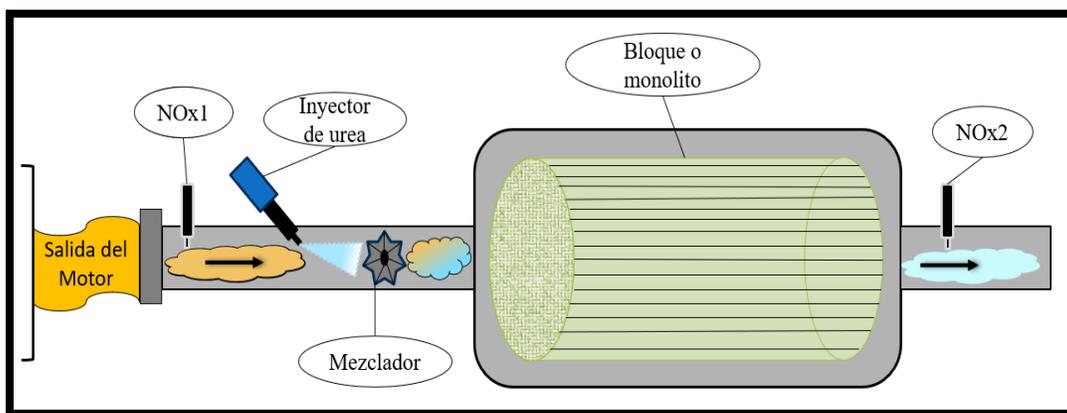
Sistema SCR (Selective Catalytic Reduction)

Entre los distintos sistemas de postratamiento en motores diesel, el SCR es uno de los más implementados e importantes en la última década, esto debido a la entrada en vigor de la normativa Euro 6, que aplicó regulaciones más estrictas respecto a las emisiones de NO_x (80 mg/km). Dicha regulación obliga a los fabricantes a implementar estrategias altamente eficientes de reducción de NO_x, por lo que el SCR, al tener capacidades de reducción incluso por encima del 95%, se convirtió en el sistema predilecto para cumplir las exigencias de emisiones.

Principio de funcionamiento: definiendo el SCR de manera simple, se puede decir que es un sistema ubicado a la salida de los gases de escape del motor cuyo propósito es reducir las emisiones de óxidos de nitrógeno NO_x (incluye NO₂ y NO) producidas durante el proceso de combustión. Esto se realiza mezclando los gases de escape con una solución de urea y agua, llamada comercialmente Adblue®. La mezcla pasa posteriormente por un bloque con agujeros en forma de panal en el que sucede la reacción de reducción, esto gracias a la alta temperatura (200-500°C) y otros componentes clave que serán descritos a continuación.

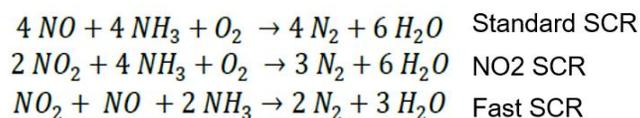
Ilustración 2

Esquema básico de un sistema SCR.



Ecuación 1

Reacciones de reducción típicas dentro del SCR



Existen distintas configuraciones de un sistema SCR, no sólo entre fabricantes, sino entre cada motor de un mismo fabricante. La configuración ilustrada anteriormente y descrita a continuación, no es más que un ejemplo genérico para describir el concepto.

Partes del SCR

- Bloque o monolito: Es el componente central de todo el sistema y donde sucede la reacción de reducción del NOx. Es un bloque cilíndrico o cúbico, con agujeros en forma de panal para maximizar el área de contacto con los gases y facilitar la reacción de reducción. Generalmente construido en cerámica o metal recubierto de materiales catalíticos activos, como zeolitas (aluminosilicatos), óxido de vanadio (V₂O₅) u óxido de titanio (TiO₂)

- Inyector de urea: Se encarga de inyectar la solución de urea en el tubo de escape, puede ser metálico o de polímero resistente a altas temperaturas. Hace parte de un sistema más amplio que se compone de un compresor, módulo de inyección, tuberías y depósito; todo con el fin de controlar lo mejor posible las dosis de urea inyectadas.

- Mezclador: Permite homogeneizar la mezcla de gases de escape y urea antes de entrar al monolito, esto permite una mejor distribución de las moléculas de NOx y por tanto, un mayor contacto con los materiales catalizadores del bloque, aumentando así la eficiencia de la reducción.

- Sensores NOx 1 y 2: Algunas configuraciones sólo tienen el sensor #2, a la salida del monolito. Su función en ambas posiciones es determinar la cantidad de NOx presente en los gases de escape y así controlar la inyección de urea en concordancia. Al añadir un sensor antes de la reacción de reducción, se puede determinar con mayor precisión la cantidad de urea necesaria, además ayuda a determinar como la diferencia de temperatura y el amoníaco (NH₃) presente en la urea, afectan la eficiencia del sistema. Otra ventaja que tiene añadir un segundo sensor es que facilita la obtención de datos para la creación de modelos matemáticos que puedan anticipar el comportamiento del sistema en distintas condiciones, llegando incluso a ser posible reemplazar alguno de los sensores en caso de falla de éstos.

- Obstrucción de urea a bajas temperaturas.

Cuando los sistemas de inyección de urea trabajan en condiciones de baja temperatura (países nórdicos, estación invernal, etc) se pueden formar depósitos de urea cristalizada. Esto también está relacionado con el aumento de rugosidad en la superficie interna de la línea de escape con el paso del tiempo, debido a las altas temperaturas de trabajo.

Ilustración 3

Línea de Escape con Cristalización de Urea.



Nota: Adaptado de Línea de Escape con Cristalización Urea, 2020, <https://goo.su/gUvbP>.

Existen dos tipos de depósitos: depósito en las paredes del tubo de escape y depósito cerca al inyector de urea. Dichos depósitos pueden afectar la distribución uniforme del NH_3 dentro del catalizador, disminuir el flujo de inyección de urea y obstruir la línea de escape parcialmente.

Para prevenir la cristalización, actualmente existen las siguientes estrategias:

- Sólo se permite la inyección de urea cuando se ha alcanzado cierta temperatura dentro del sistema
- Limitación de la inyección de urea (mapas y modelos para inyectar sólo la cantidad necesaria para el proceso de reducción).

- Modelos que permiten predecir la formación de depósitos de cristal.

Una vez se han formado los cristales de urea, existen dos alternativas para eliminarlos:

- El proceso de regeneración del filtro de partículas (DPF) los elimina con la alta temperatura.
- Desmontar y limpiar el sistema manualmente.

Control de Fugas

Con el fin de disminuir las pérdidas de NH_3 por el tubo de escape (para reducir el consumo de urea y sobre todo por el potencial contaminante del NH_3) se busca hacer un monitoreo y control más preciso de las fugas y el *buffer*, tanto en el SCRcc (*closed coupled*) como en el SCRuf (*under floor*). Para ello, se dispone de dos métodos; el “*Mapped model*” que hace uso de cartografías para interpolar entre valores conocidos, y el *Model based* que integra el *Mapped model* con un modelo para pronosticar la cantidad de urea necesaria en función de distintas variables.

Mapped model: Después de realizar diversas pruebas (laboratorio, banco de rodillos, pruebas de ruta) se determinan ciertos valores idóneos de inyección de urea (para el *buffer*), según las condiciones de funcionamiento (temperatura, cantidad de NO_x , humedad, envejecimiento del SCR, flujo de aire de escape, etc). Por ejemplo, cuando se está en condiciones reales de conducción, el sistema puede tomar valores como la temperatura media (ya sea el SCRcc o SCRuf) y la interpola entre los valores idóneos de inyección preestablecidos para dicha temperatura, determinando así la cantidad de urea necesaria. En la figura siguiente, se muestra un ejemplo de un mapa para determinar la capacidad de almacenamiento de amoníaco (ASC por sus siglas en ingles) en función de la temperatura (270°C) y el factor de envejecimiento del SCR (0.7).

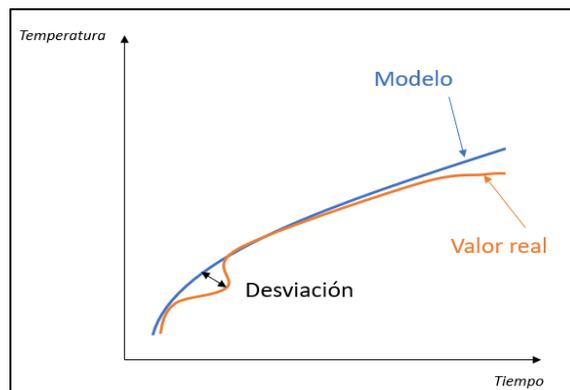
Tabla 3*Ejemplo de Interpolación para ASC*

Temperatura [°C]	Factor de Envejecimiento SCR									
	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
200	4	3	3	3	2	2	1	1	1	1
250	5	5	5	4	4	4	4	4	3	3
300	6	6	6	6	5	5	4	4	3	3
350	7	7	7	6	6	5	5	5	5	4
400	8	7	7	7	6	6	5	5	4	4

270 °C

ASC de NH₃ en mol/m³

- *Model Based*: Basado en el flujo másico de aire de escape, la fracción molar de NH₃ y la temperatura media del sistema, se crean modelos que permiten determinar valores como la fracción molar estimada de NO_x que llega al SCRcc y su capacidad real de adsorción de NH₃ para controlar el *buffer*. Esta última en función del grado de envejecimiento del SCR, teniendo en cuenta que el ciclo de regeneración del DPF contribuye al envejecimiento prematuro del SCR, reduciendo su capacidad de adsorción. Asimismo, se hace uso de la Ley de Arrhenius para determinar la velocidad de oxidación de NH₃ en el sistema (no deseada) por medio de las reacciones químicas que se dan durante la operación. De esta manera se puede estimar más precisamente el *buffer* necesario y si hay presencia de fugas de NH₃.

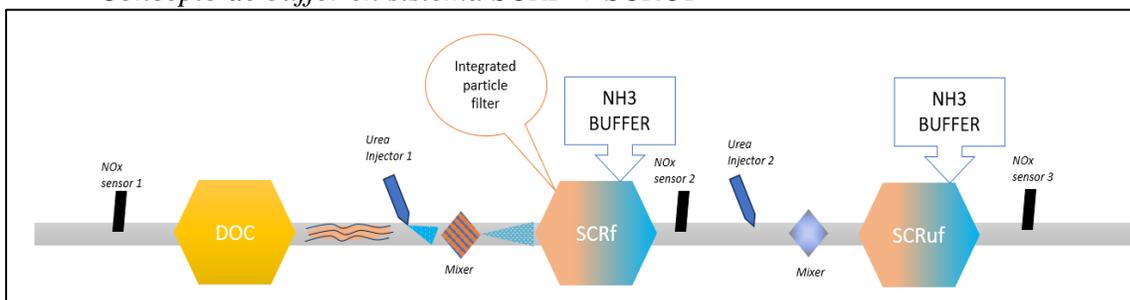
Ilustración 4*Ejemplo de un modelo.*

Buffer

El *buffer* se puede definir como una pequeña cantidad de NH_3 que se almacena en el monolito del sistema SCR con el fin de reducir la mayor cantidad posible de NO_x que pasa por el sistema de escape. El control del *buffer* depende de muchas variables y procesos distintos, como la determinación del ASC, el *buffer setpoint*, la carga de *buffer*, la temperatura del monolito, la temperatura aguas arriba del SCR, el flujo másico de gases de escape, la cantidad de NO_x , el modo de combustión, el precontrol de inyección de urea, entre muchos otros.

Ilustración 5

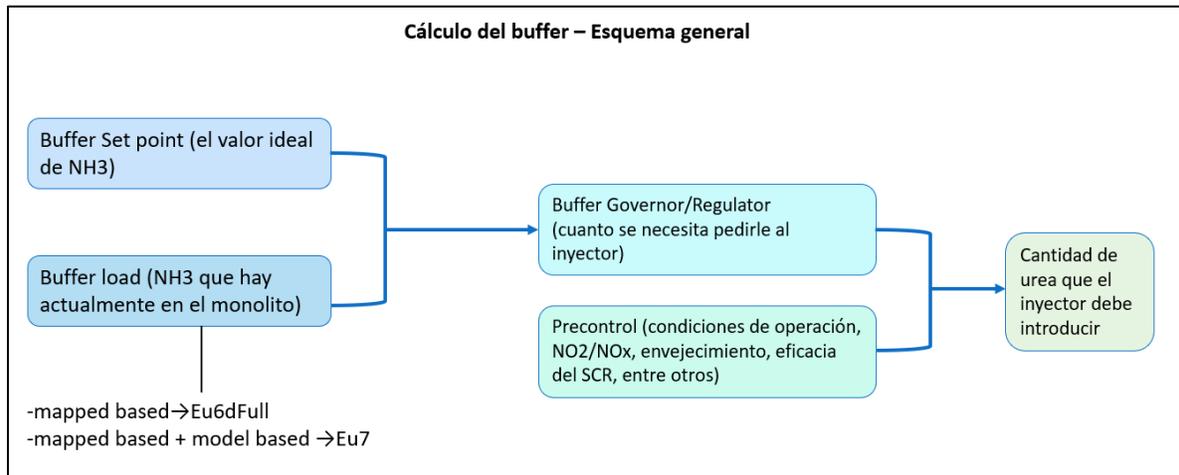
Concepto de *buffer* en sistema SCRF + SCRUF



El cálculo del *buffer* depende de diversas condiciones, estrategias y variables. Primero se trata de determinar cuál es la cantidad ideal de NH_3 para el *buffer* en función de las condiciones de funcionamiento. Posteriormente se determina cuánto NH_3 está ya presente en el monolito del SCR (de ciclos de conducción anteriores o durante el mismo ciclo en tiempo real), para finalmente calcular el flujo que se le debe pedir al inyector de urea.

Ilustración 6

Cálculo del Buffer – Esquema General



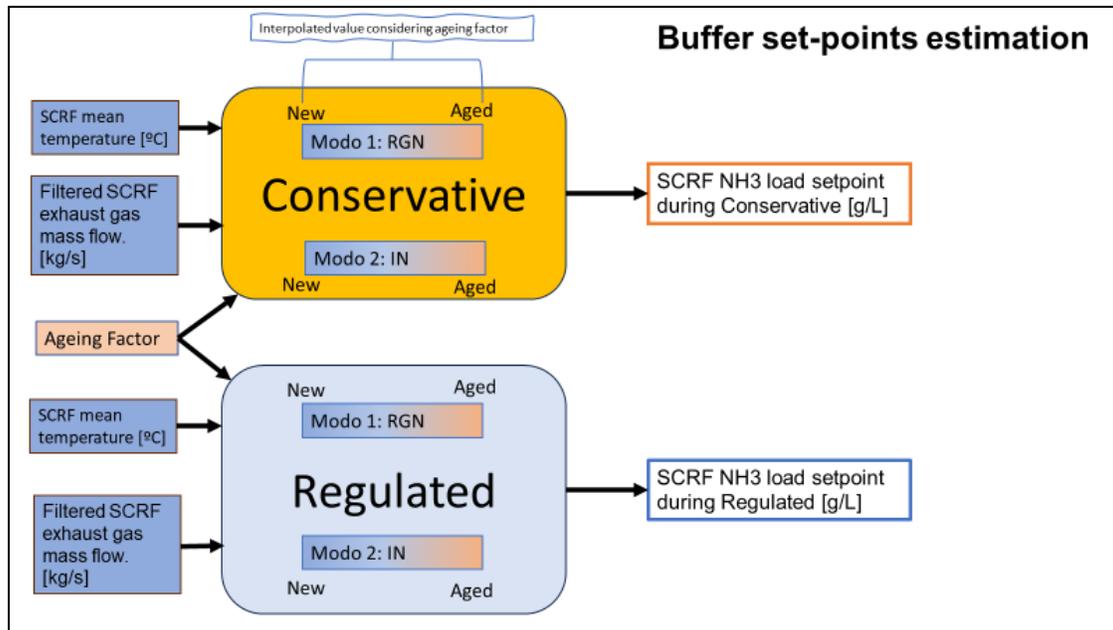
En los bloques funcionales de las siguientes ilustraciones, donde se indica “To compute...” implica que hay un mapa o cartografía involucrada dentro de dicha función para calcular el valor en cuestión.

Buffer Setpoint

Consiste en determinar la cantidad ideal necesaria de NH_3 según las condiciones del sistema, tales como la temperatura media del SCR, el flujo másico de aire, el modo de precontrol de urea, el grado de envejecimiento del monolito SCR, la contaminación por HC y material particulado, entre otros.

Ilustración 7

Arquitectura funcional para calcular el setpoint del buffer.



Modo *Conservative*: Proporciona la cantidad mínima necesaria para reducir el NO_x, es decir que no hay *buffer*. Disminuye la capacidad de tratamiento de los NO_x, pero también reduce las fugas de NH₃, ya que la inyección siempre está por debajo del valor estequiométrico.

Modo *Regulated*: Ofrece un mejor tratamiento de los NO_x, regulando constantemente la cantidad de urea a inyectar además de introducir el *buffer* necesario para garantizar la máxima reducción posible. Como desventaja, implica mayores fugas de NH₃ que el modo *Conservative*.

El software del SCR usa 8 mapas diferentes para crear el *setpoint* básico para el *buffer*. 4 mapas se usan para el modo *Regulated* y los otros 4 para el *Conservative*. De esos 4 mapas para cada modo, 2 se utilizarán para el *buffer* en modo RGN (Regeneración) del DPF y los otros dos para el *buffer* en IN mode (modo de inyección normal). Esto es así puesto que, según el modo de combustión, habrá cambios en la temperatura y el flujo másico de gases, entre otros. Por tanto, es necesario ajustar el *buffer* según dichas condiciones.

Para cada modo de combustión, un mapping provee el *buffer setpoint* para un monolito nuevo y otro para un monolito viejo. Dichos mapping están expresados en g de NH₃/l del monolito, después se multiplican por el volumen del monlito de SCR.

El envejecimiento del SCR es tenido en cuenta usando un factor que suma el porcentaje del mapeo de un monolito nuevo y el porcentaje adicional sobre uno envejecido:

Ecuación 2

Factor de Envejecimiento para el Buffer

$$Buffer = Factor\ envejecimiento * monolito\ nuevo + (1 - Factor\ envejecimiento) * monolito\ viejo$$

Factores principales para calcular el factor de envejecimiento:

- Desgaste térmico: debido a la constante exposición a altas temperaturas por períodos prolongados, el catalizador SCR sufre una degradación. Esto reduce la capacidad del sistema para convertir los NO_x en nitrógeno (N₂) y agua (H₂O). Se somete el SCR a ciclos térmicos acelerados en pruebas controladas para simular el envejecimiento a lo largo de la vida útil del vehículo.

- Contaminación del catalizador: La acumulación de trazas de fósforo o azufre presentes en el combustible y el aceite, contaminan y “envenenan” el monolito, disminuyendo su eficacia. Se prueba el sistema utilizando combustibles ricos en contaminantes, esto le permite crear mapas para estimar el efecto a largo plazo sobre el SCR.

- Modelos predictivos de vida útil: Se desarrollan modelos predictivos basados en datos reales obtenidos en laboratorio y en campo. Dichos modelos prevén cómo se comportará el catalizador bajo diversas condiciones operativas. Posteriormente los valores predictivos son

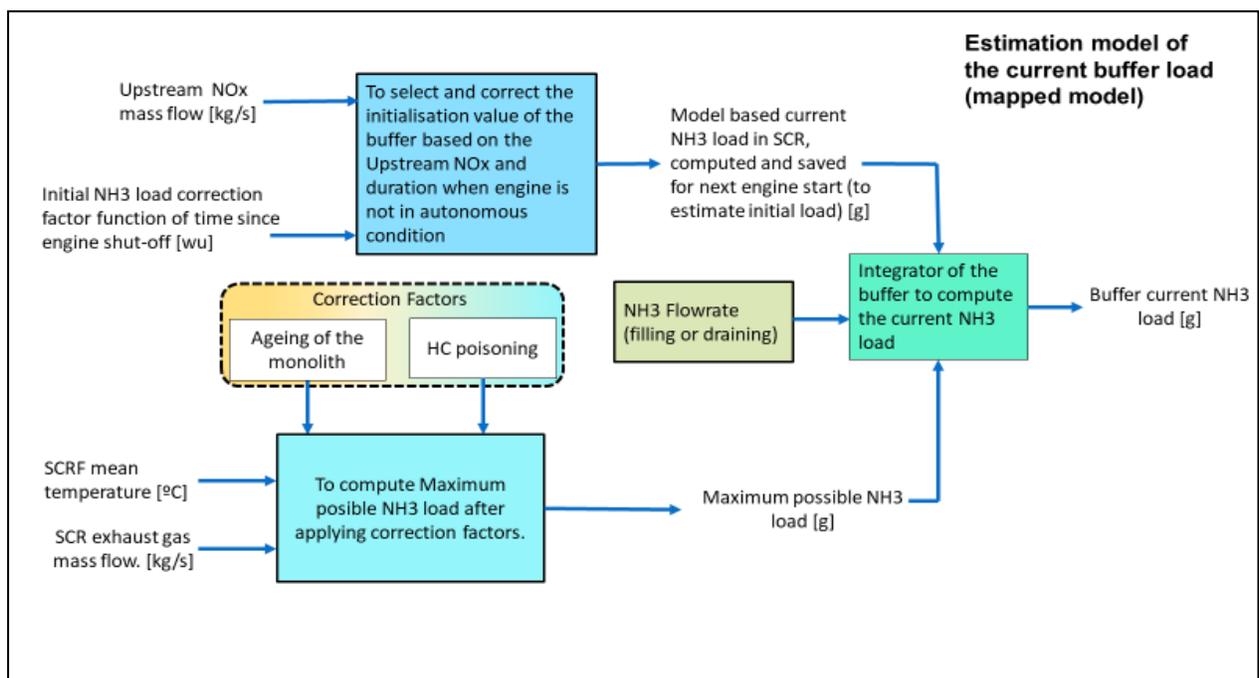
comparados con vehículos que realmente han transcurrido dicha vida útil para comparar los datos y ajustar el modelo.

Carga del Buffer

Busca determinar la cantidad actual de NH_3 presente en el monolito para posteriormente compararla con el *setpoint* y saber cuánta urea se debe inyectar. Dicha determinación de la carga está en función del flujo de NH_3 , la carga de NO_x , el tiempo transcurrido desde el último apagado del motor, flujo másico de gases, envejecimiento del monolito, entre otros.

Ilustración 8

Arquitectura funcional para el cálculo de la carga de NH_3



Contaminación por hidrocarburos (HC): En el proceso de combustión, no siempre se quema completamente el combustible, generando emisión de hidrocarburos no quemados (HC). Estos HC llegan al SCR por el sistema de escape e interfieren con la conversión de NOx, ya que bloquean las superficies activas del catalizador, reduciendo su eficiencia para catalizar la reacción del NOx en nitrógeno (N₂) y agua (H₂O). Adicionalmente, los HC pueden participar en reacciones no deseadas dentro del sistema, lo que lleva a la formación de monóxido de carbono (CO) y otros contaminantes.

Fugas de amoníaco: El exceso de HC en el sistema puede afectar la inyección de urea, aumentando el riesgo de fugas de NH₃ que no reaccionó en el SCR.

Con la ayuda de los sensores de oxígeno y NOx, se crean factores de corrección y mapas que determinan la cantidad de HC presente en el sistema en función de la temperatura media del SCR y la eficiencia de reducción de los NOx. De esta manera se puede estimar el nivel de contaminación por hidrocarburos y prever el funcionamiento del sistema de postratamiento a lo largo de la vida útil del vehículo.

Inyección de Urea para el Buffer (Governor)

Una vez se ha obtenido el *buffer setpoint* (para saber la cantidad ideal de urea a inyectar) y la carga del *buffer* (la cantidad de NH₃ presente en el monolito) se procede a determinar la diferencia entre uno y otro, obteniendo así un valor preliminar de NH₃ a inyectar que se deberá solicitar a los inyectores. Sin embargo, dicho valor debe refinarse teniendo en cuenta varios factores de corrección, la temperatura aguas arriba del SCR, el flujo de amoníaco actual, urea cristalizada (si la hay), entre otros.

Ilustración 9

Arquitectura funcional del Governor/Regulator para requerir la cantidad preliminar de urea a inyectar.

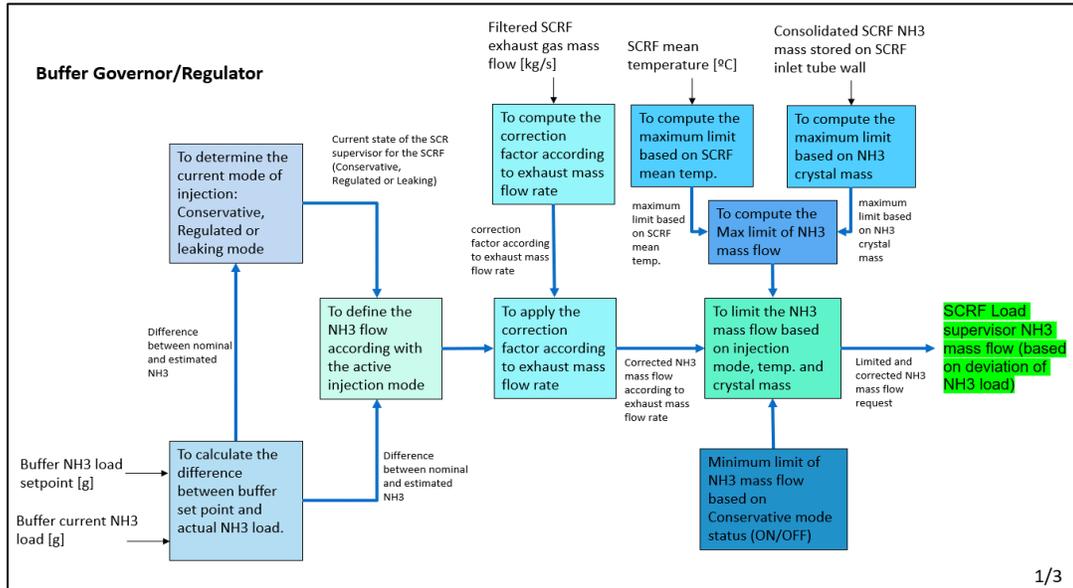
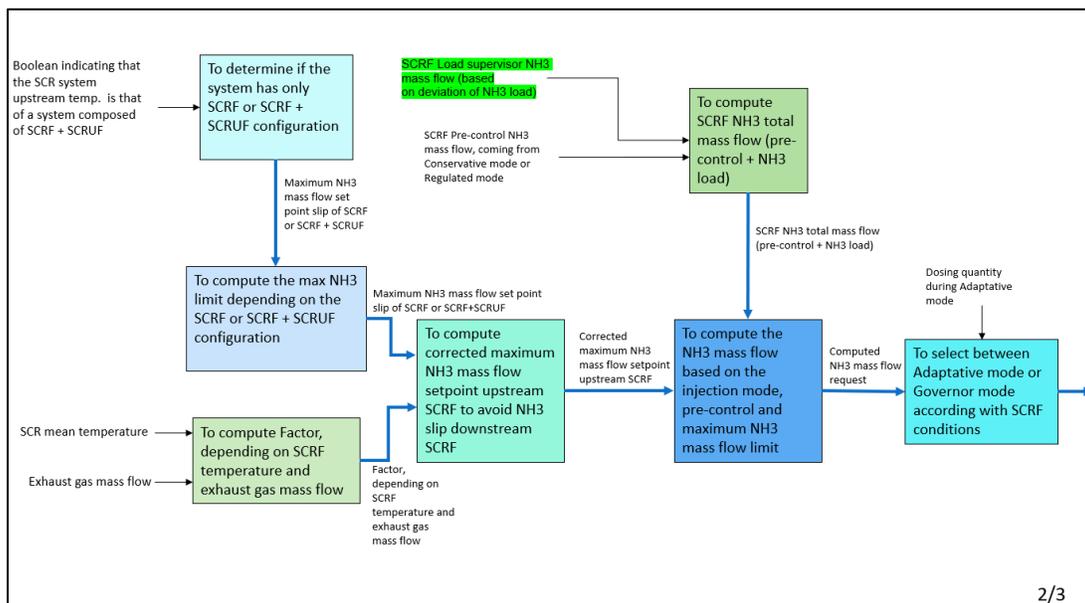


Ilustración 10.

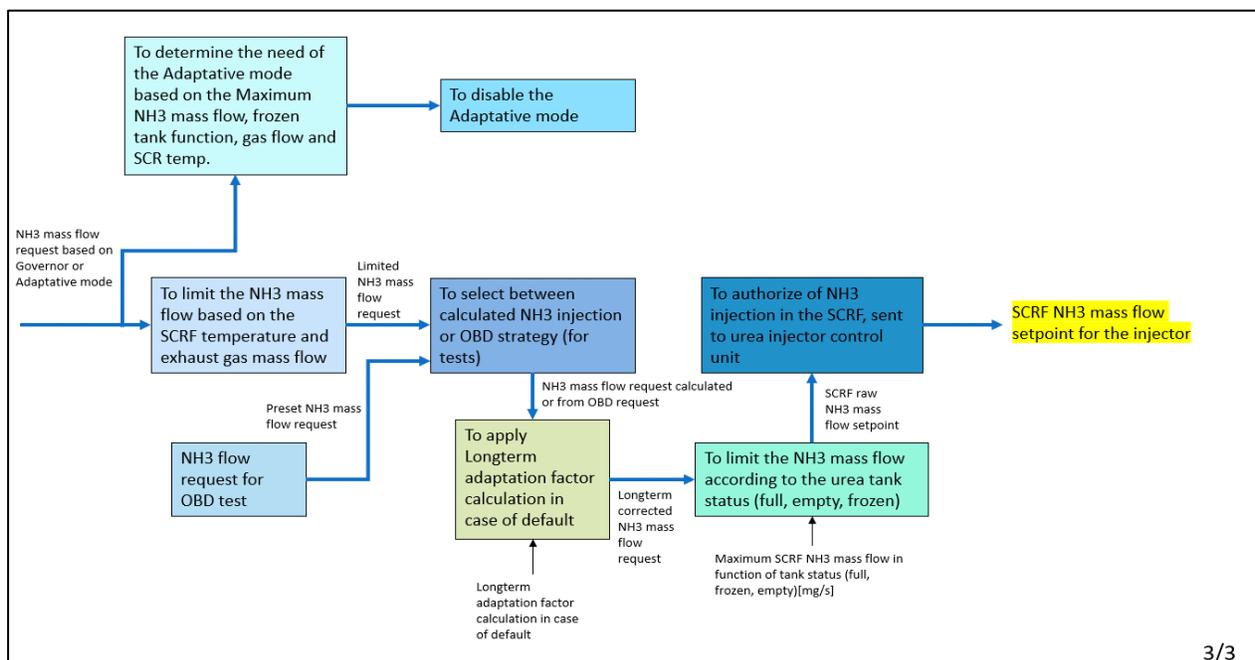
Arquitectura funcional del Governor/Regulator para requerir la cantidad final de urea a inyectar



Después de fijar un valor preliminar de flujo de urea a solicitar, es necesario continuar con el refinamiento del valor antes de enviar la solicitud al inyector. Se consideran el modo de inyección activo (*Conservative, Regulated, Leaking*), el precontrol, la configuración del sistema (sólo SCRf o SCRf + SCRUF) y se añade un modo OBD que sólo se activa en caso de necesitar un testeo del sistema.

Ilustración 11

Arquitectura funcional del Governor/Regulator para requerir la cantidad final de urea a inyectar



El modo *Leaking* permite obtener fugas de NH₃ intencionalmente. Esto con el fin de realizar pruebas sobre cómo reacciona el sistema en caso de fugas.

Finalmente se obtiene el valor de flujo másico (*SCRf NH₃ mass Flow setpoint for the injector*) que se le va a solicitar al sistema de inyección. Cabe resaltar que los procesos y conceptos descritos anteriormente, se componen de subprocesos, algoritmos, mapas, variables y cálculos en extenso más complejos de lo que se pueda plasmar en el resumen.

A continuación, se presenta un problema ejemplo para el cálculo del consumo de urea y una estrategia de postratamiento diseñada para cumplir normativa Euro 6.

Problema: Un coche con sistema DOC y SCR emite una media de 1 g de NO_x/km (a la salida del motor).

- Calcular el consumo medio de Adblue® en L por 1000 km
- Desarrollar una estrategia de postratamiento para cumplir la norma Euro 6 con respecto a la emisión de NO_x (80 mg/km).

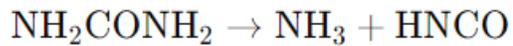
Solución

Para la solución se hacen las siguientes suposiciones:

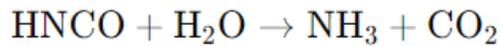
- Una relación de NO₂/NO_x de 0.5 (50% NO₂ y 50% NO).
- Una temperatura de operación de 300-450°C
- Densidad de Adblue®: 1.09 kg/L

Además, se tienen en cuenta las reacciones relevantes en el proceso de reducción de NO_x usando amoníaco (NH₃), que es un derivado de la urea (Adblue®).

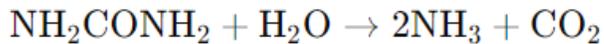
Termólisis de Urea



Hidrólisis de Isocianato de Amonio:



Combinadas, estas dos reacciones producen dos moles de Amoníaco por cada mol de urea:



Para reducir 1000 mg de NOx (con una relación 50% NO₂ y 50% NO):

$$\text{NO}_2 = 0.5 * \frac{1000\text{mg}}{\text{km}} = 500 \text{ mg/km}$$

$$\text{NO} = 0.5 * \frac{1000\text{mg}}{\text{km}} = 500\text{mg/km}$$

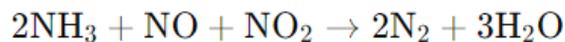
Convertimos las masas a moles:

$$\text{Moles de NO}_2 = \frac{\frac{500\text{mg}}{\text{km}}}{\frac{46000\text{mg}}{\text{mol}}} = 0.01087 \text{ mol/km}$$

$$\text{Moles de NO} = \frac{\frac{500\text{mg}}{\text{km}}}{\frac{30000\text{mg}}{\text{mol}}} = 0.01667 \text{ mol/km}$$

NH₃ necesario:

Dado que en este caso hay igual proporción de NO y NO₂, se puede utilizar la reacción 'Fast SCR', que involucra a ambos reactivos:



Como indica la reacción, para cada mol de NO y NO₂, se "corresponde" un mol de NH₃

$$\text{Moles de NH}_3 = 0.01087 \frac{\text{mol}}{\text{km}} + 0.01667 \frac{\text{mol}}{\text{km}} = 0.02754 \text{ mol/km}$$

Conversión de NH₃ a urea:

$$\text{Moles de urea} = \frac{0.02754}{2} = 0.01377 \text{ mol/km}$$

La masa molar de la urea es 60g/mol:

$$\text{Masa de urea} = 0.01377 \frac{\text{mol}}{\text{km}} * 60 \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 0.8262 \frac{\text{g}}{\text{km}}$$

Conversión de urea a Adblue®:

Debido a que el Adblue® es una solución al 32.5% de urea en agua, la cantidad de urea por litro de Adblue® es:

$$\text{Masa de urea por litro de Adblue} = 0.325 * \frac{1.09\text{kg}}{\text{L}} = 0.35425 \frac{\text{kg}}{\text{L}} = 354.25 \frac{\text{g}}{\text{L}}$$

Entonces el volumen de Adblue® por km necesario es:

$$\text{Volumen de Adblue} = \frac{0.8262 \frac{g}{km}}{354.25 \frac{g}{km}} = 0.00233 \text{ L/km}$$

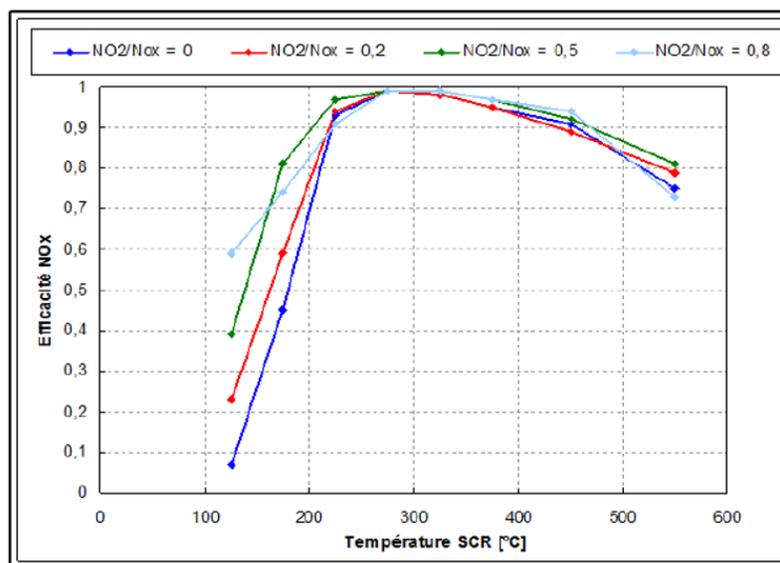
Consumo medio de Adblue® por 1000 km:

$$\text{Consumo Adblue} = 0.00233 \frac{L}{km} * 1000 \text{ km} = 2.33 \frac{L}{1000 \text{ km}}$$

Dado que se tiene la relación de NO₂/NO_x y la presencia de un sistema DOC, con el que se tiende a aumentar la concentración de NO₂, al trabajar a temperaturas entre 300-450°C se pueden obtener eficiencias por encima del 92% según el siguiente diagrama:

Ilustración 12

Eficacia de reducción de NO_x según concentración y temperatura



Dicha estrategia permite cumplir con la normativa Euro 6, ya que se emitirían 80 mg/km o menos al final de la línea de escape.

Conclusiones y recomendaciones

Durante el proceso de práctica académica, se estudiaron los esquemas y cronogramas que el fabricante usa para llevar un proyecto de desarrollo de principio a fin, entendiendo el rol de cada parte involucrada en el proceso. Adicionalmente, se trabajó en tareas de actualización de datos dentro del sistema de trazabilidad manejado por la compañía (DOORS), para darle continuidad al desarrollo de funciones nuevas, relacionadas con el diagnóstico de sistemas de postratamiento de emisiones, como el DPF y el SCR. Se participó en diversas formaciones, alineadas con la arquitectura funcional de nuevos diseños para el sistema de aire del motor, sistema de combustión y sistema de postratamiento. Se analizó e ilustró la estrategia para determinar e inyectar el buffer de NH_3 en el sistema SCR.

Si bien los avances en el *software* de control de inyección y fugas han sido significativos desde la última normativa, es necesario continuar con su mejoramiento y estudiar los efectos de dichas fugas. Debido a que recién se regularon las emisiones de NH_3 , el conocimiento sobre el impacto que éstas puedan tener es aún impreciso, además de que no hay una estrategia clara para el tratamiento de residuos de amoníaco que quedan en la línea de escape cuando termina el ciclo de conducción. Generalmente, dichos residuos se liberan a la atmósfera, ya que no reaccionaron con el NO_x y el SCR pierde capacidad de almacenamiento al reducirse su temperatura.

Es de resaltar la implementación que Renault ha tenido en sus motores recientes de sistemas SCRF en lugar de un DPF y un SCR por separado. Esto reduce espacio y complejidad al Sistema. Sin embargo, presenta ciertas desventajas con respecto, por ejemplo, a una configuración con CSF, que permite una mejor eficiencia de regeneración del filtro.

Es importante estudiar el impacto de envejecimiento que tiene un sistema SCRF versus una configuración DPF + SCR, ya que, en el SCRF al estar unidos ambos sistemas, la temperatura que debe soportar el monolito de la parte SCR puede ser mayor, a su vez teniendo implicaciones en el envejecimiento y vida útil.

Entre todos los sistemas de postratamiento que se han implementado para motores diesel a lo largo de las distintas normativas, el SCRF es quizá uno de los que más futuro podría tener, debido a su gran eficiencia para controlar uno de los contaminantes más estrictamente limitados en las recientes regulaciones, como es el NOx. Sin embargo, su complejidad es alta debido a la cantidad de variables y componentes que influyen en su funcionamiento, por ende, seguirá siendo objeto de estudio y un referente en futuros desarrollos para el control de emisiones en motores diesel.

Referencias

- Aprobación definitiva: la normativa Euro 7 entrará en vigor en 2027. (2024). <https://goo.su/FykUX>
- Consejo de la Unión Europea (2024). *Euro 7: el Consejo adopta nuevas normas sobre límites de emisiones para turismos, furgonetas y camiones*. Comunicado de prensa. 12 abril 2024. <https://goo.su/ZkvmT8>
- Cumaranatunge, L., Chiffey, A. & Stetina, J.(2017). A Study of the Soot Combustion Efficiency of an SCR[®] Catalyst vs a CSF During Active Regeneration. *Emiss. Control Sci. Technol.*(pp. 93–104 (2017). <https://doi.org/10.1007/s40825-016-0059-6>
- El Acuerdo de París. (s.f.). United Nations Climate Change. <https://acortar.link/HypNwf>
- El Parlamento Europeo y el Consejo de la Unión Europea. Reglamento (UE) 2023/851. 19 de abril 2023. (Unión Europea).
- Euro 7: aprobadas nuevas medidas para reducir las emisiones del transporte por carretera. Noticias Parlamento Europeo. <https://acortar.link/taXipp>
- Euro 7: emission standards. (2023). Insight from Infineum International Limited. <https://onx.la/f7a55>
- Guardiola C., Mora J., Seykens X. & Willems F. (2018). *An OBD strategy to estimate SCR ageing and detect urea injection faults*. (pp. 369-376). ScienceDirect. <https://goo.su/m3fgVV>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia. Resolución 0762. 18 de julio 2022. (Colombia).
- Posición del Parlamento Europeo TC1-COD (2022)0365. Documento legislativo consolidado. 2024. <https://goo.su/p60tKf>
- Reglamento (UE) 2017/1154 de la Comisión de 7 de junio de 2017. Diario Oficial de la Unión Europea. <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2017-81346>
- Types and Hazards of AdBlue Crystallization. (2020). <https://goo.su/gUvbP>