



MÁSTER EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE MÁSTER MEJORA Y OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE DENOXIZACIÓN DE LA PLANTA DE 'ENERGY FROM WASTE' (LINCOLN, REINO UNIDO)

Autor: Carlos Samuel Lucas Carpintero

Director: Javier Peiro Balaguer

Madrid

Julio de 2026

Declaración de originalidad

Declaro bajo mi responsabilidad que el Proyecto presentado con el título **MEJORA Y OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE DENOXIZACIÓN DE LA PLANTA DE ‘ENERGY FROM WASTE’ (LINCOLN, REINO UNIDO)** en la ETS de Ingeniería – ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el curso académico **2025-2026** es de mi autoría y no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

Uso de Inteligencia Artificial¹

Declaro bajo mi responsabilidad que (indicar la opción correcta):

☐ No he utilizado Inteligencia Artificial en la elaboración del presente documento.

☒ He utilizado Inteligencia Artificial en la elaboración del presente documento y/o del Anexo B siempre en las condiciones permitidas por la Universidad Pontificia Comillas, es decir, aplicando el Nivel 2 de la [Escala de Evaluación de Perkins et al. \(2024\)](#): *“La IA puede utilizarse para actividades previas a la tarea, como la lluvia de ideas, la descripción y la investigación inicial. Este nivel se centra en el uso de la IA para la planificación, las síntesis y la generación de ideas, pero las evaluaciones deben hacer hincapié en la capacidad de desarrollar y refinar estas ideas de forma independiente”*. En concreto, las Inteligencia Artificial ha sido empleada para:

Únicamente con fines estéticos a la hora de realizar unas graficas en el programa Rstudio. El contenido, idea y código mayoritariamente para realizar estas graficas ha sido realizado por mi mientras que para poder aplicar los colores, formatos y diseños para hacerlas más visuales me he apoyado en la IA para perfeccionarlo.



Firmado (alumno): Carlos Samuel Lucas Carpintero

¹ Esta declaración se refiere al uso de la Inteligencia Artificial generativa para realizar los documentos del Proyecto (Anexo B y Memoria). No aplica a Proyectos donde, por su naturaleza, deban emplear inteligencia artificial como parte de los mismos (aplicación de técnicas de aprendizaje automático, redes neuronales, análisis de datos...)

Fecha: 02-07-2026

Autorización para la entrega del Proyecto

El Director del Proyecto	El co-Director del Proyecto (si aplica)
	
Fdo: Javier Peiro Balaguer	Fdo:
Fecha: 02-07-2026	Fecha:



MÁSTER EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE MÁSTER MEJORA Y OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE DENOXIZACIÓN DE LA PLANTA DE 'ENERGY FROM WASTE' (LINCOLN, REINO UNIDO)

Autor: Carlos Samuel Lucas Carpintero

Director: Javier Peiro Balaguer

Madrid

Julio de 2026

Agradecimientos

A mi familia especialmente a mis padres y tíos que tanto me han apoyado en este largo camino. Durante este tiempo me he dado cuenta de la gran suerte que tengo de la gente que me rodea y de las oportunidades que gracias a dios he podido disfrutar.

MEJORA Y OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE DENOXIZACIÓN DE LA PLANTA DE 'ENERGY FROM WASTE' (LINCOLN, REINO UNIDO)

Autor: Lucas Carpintero, Carlos Samuel.

Director: Peiro Balaguer, Javier.

Entidad Colaboradora: FCC Servicios Medio Ambiente Holding, S.A.

Palabras clave: Energy from Waste, Amoniac (NH₃), Óxidos de Nitrógeno (NO_x), Control PID, SIMATIC Manager, Energía, Denoxización, Emisiones y Optimización.

1. Introducción

El presente Trabajo de Fin de Máster aborda la optimización del sistema de denoxización por reducción selectiva no catalítica (SNCR) de la planta de valorización energética gestionada por FCC Environment en Lincoln, Reino Unido. Dicha instalación procesa aproximadamente 500 toneladas diarias de residuos sólidos urbanos, generando en torno a 300 MWh de energía eléctrica y contribuyendo activamente a la economía circular de la región. El proceso de denoxización, basado en la inyección de amoniac y agua en función de la temperatura de los gases de combustión, presenta actualmente ineficiencias que se traducen en un consumo excesivo de NH₃, con el consiguiente impacto económico y medioambiental.

Ante esta situación, el proyecto plantea una serie de mejoras orientadas a reducir el consumo de amoniac en un 5%, limitar el ammonia slip por debajo de 4.5 mg/Nm³ y mejorar la eficiencia global del proceso en un 10%, sin comprometer en ningún momento el cumplimiento de la normativa de emisiones de NO_x vigente en el Reino Unido. Para ello, se propone una metodología basada en el análisis exhaustivo de datos operacionales, la revisión de las recetas de inyección y la automatización de tareas actualmente realizadas de forma manual por los operarios. Los resultados obtenidos aspiran a ser escalables al resto de plantas de FCC en el país, con un impacto potencial tanto económico como ambiental de considerable magnitud.

2. Definición del proyecto

El proyecto nace ante la constatación de que el sistema de denoxización de la planta opera de forma semiautomática, requiriendo la intervención periódica de operarios para ajustar manualmente los parámetros de inyección de NH₃. Esta dependencia del factor humano genera ineficiencias que se traducen en un consumo excesivo de amoniac, pese a que los niveles de NO_x emitidos se mantienen dentro de los límites legales.

Los objetivos perseguidos son grosso modo tres: obtener un ahorro económico mediante la reducción del consumo de NH₃, mejorar el impacto ambiental minimizando el ammonia slip y aumentar la seguridad y autonomía del sistema, reduciendo la necesidad de intervención manual y garantizando en todo momento el cumplimiento de la normativa de emisiones vigente.

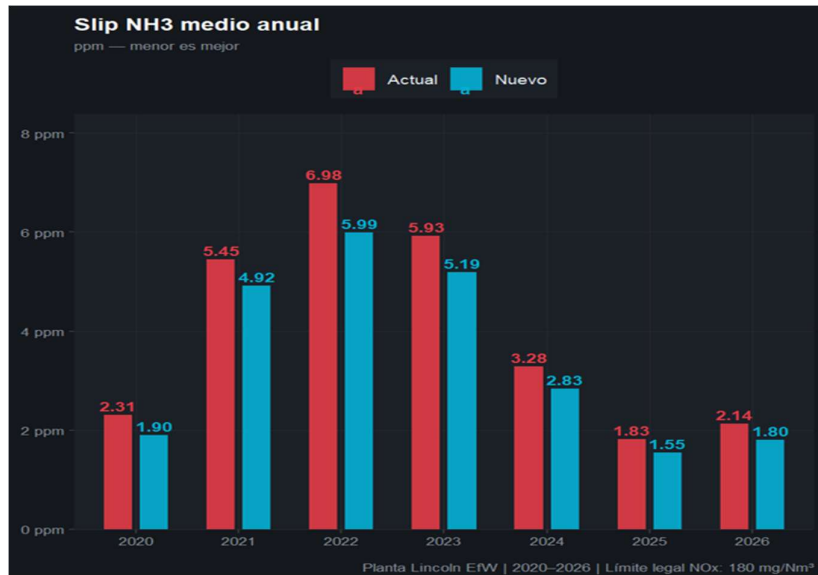
3. Descripción del modelo/sistema/herramienta

La solución desarrollada se articula en torno a dos elementos principales: una receta de inyección optimizada y un sistema de control mejorado compuesto por tres factores de corrección que actúan de forma encadenada sobre la dosis de NH_3 . Para el diseño de la receta, se llevó a cabo en primer lugar un estudio del perfil de temperaturas a lo largo de la caldera, combinando documentación técnica de diseño, mediciones experimentales en los puertos de inyección y ajuste de una ecuación exponencial unificada con un error máximo inferior al 1%. Esto permitió determinar con precisión la temperatura de cambio de nivel de inyección, fijada en 805 °C medidos en el tejado, equivalente a 960 °C en el punto de inyección, garantizando así que el NH_3 se introduce siempre en la ventana de máxima eficiencia. Sobre esta base se definieron ocho niveles de inyección con caudales de NH_3 que oscilan entre 70 y 105 L/h, aplicando un factor de seguridad de 1,5 sobre los valores medios históricos.

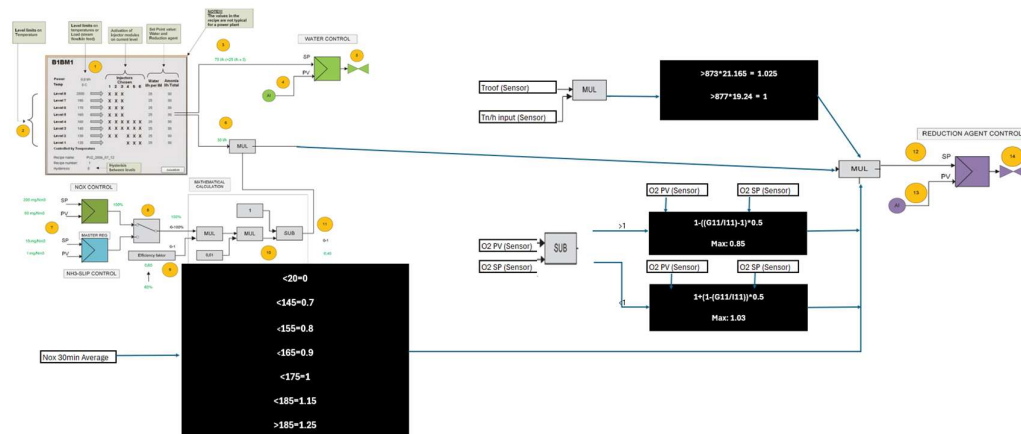
Respecto al sistema de control, se diseñaron tres factores de corrección que modulan en tiempo real la dosis fijada por la receta: el primero ajusta la inyección en función del régimen de operación de la caldera combinando temperatura y toneladas de residuo introducidas por hora; el segundo aprovecha las variaciones del porcentaje de O_2 respecto a su valor de consigna para anticipar cambios en la producción de NO_x ; y el tercero, el más determinante, introduce una media móvil de 30 minutos de NO_x que permite regular la dosis de forma más ágil y precisa que el sistema previo, evitando tanto el exceso de NH_3 en situaciones de baja emisión como la insuficiencia del mismo cuando el NO_x se aproxima a sus límites máximos.

4. Resultados

El análisis de los más de 5,3 millones de datos extraídos del DCS entre enero de 2020 y abril de 2026 revela que la planta emite de media 139,5 mg/ Nm^3 de NO_x , muy por debajo del límite de 180 mg/ Nm^3 , con un consumo medio de 50,5 L/h de NH_3 y una eficiencia estimada del sistema en torno al 60%. Frente a estos valores, el sistema propuesto, que combina una receta de inyección optimizada por temperatura con tres factores de corrección basados en el régimen de operación, la concentración de O_2 y la media móvil de 30 minutos de NO_x , logra reducir el consumo medio de NH_3 hasta 47,3 L/h, lo que representa un ahorro aproximado del 6,7%.



Al mismo tiempo, la emisión media de NO_x se eleva moderadamente hasta 149,4 mg/Nm³, manteniéndose un margen del 17% respecto al límite legal, y el número de días con exceso de emisiones se reduce de 16 a tan solo 1 en el periodo analizado, mejorando el margen de error del sistema del 0,7% actual al 0,04%.



Con todo ello obtenemos un ahorro económico anual medio de en torno a 9.000€ en un escenario muy conservador pues no se ha querido correr ningún riesgo respecto a los valores límites de emisión. Además, dado que el consumo está en una tendencia alcista, este ahorro podría verse incrementado y mucho más si se ajusta a mantener la tasa de error del sistema actual, por ejemplo.

5. Conclusiones

El proyecto demuestra que es posible reducir de forma significativa el consumo de NH₃ en el sistema SNCR de la planta de Lincoln sin comprometer el cumplimiento de la normativa de emisiones, simplemente mediante la optimización de la receta de inyección y la incorporación de controles automáticos basados en variables de operación en tiempo real. La introducción del perfil exponencial de temperatura a lo largo de la caldera,

validado experimentalmente con un error máximo inferior al 1%, permite seleccionar el puerto de inyección óptimo en cada momento, mejorando la eficiencia del NH₃ utilizado. Los factores de corrección diseñados dotan al sistema de una mayor autonomía, reduciendo la intervención manual de los operarios y disminuyendo el riesgo de superar los límites de emisión.

Por último, dado que la solución propuesta es escalable al resto de plantas de FCC en el Reino Unido, el impacto económico y ambiental potencial de su implementación podría multiplicarse considerablemente, convirtiéndose en una referencia para la modernización de los sistemas de denoxización en el sector de la valorización energética.

6. Referencias

- [1] Argus Media. “Argus Ammonia”. Argus Media, 2026.
<https://www.argusmedia.com/es/solutions/products/argus-ammonia> .
- [2] FCC Environment. “FCC Environment : Home”. FCC Environment, 2026.
<https://www.fccenvironment.co.uk/> .
- [3] Weston Myer. “SNCR DeNOx System by ERC”. Weston Myer, Abril 2025.
<https://www.westonmyer.com/en/product-service/sncr-denox-system-by-erc/> .
- [4] The R Foundation. “The R Project for Statistical Computing”. R-project.org, 2026.
<https://www.r-project.org/> .
- [5] Sorrels, J.L.; Randall, D.D.; Richardson Fry, C.; Schaffner, K.S. “Selective Noncatalytic Reduction”. EPA Air Pollution Control Cost Manual, 7th Edition. Abril 2019.
<https://www.epa.gov/economic-and-cost-analysis-air-pollution-regulations/chapter-1-selective-non-catalytic-reduction> .
- [6] FCC Lincoln Internal SharePoint <https://fcces.sharepoint.com/sites/NewLincolnshireEfW> .

IMPROVEMENT AND OPTIMIZATION OF THE DENOXIFICATION PROCESS AT THE 'ENERGY FROM WASTE' PLANT (LINCOLN, UNITED KINGDOM)

Author: Lucas Carpintero, Carlos Samuel.

Director: Peiro Balaguer, Javier.

Collaborating Entity: FCC Servicios Medio Ambiente Holding, S.A.

Keywords: Energy from Waste, Ammonia (NH₃), Nitrogen Oxides (NO_x), PID Control, SIMATIC Manager, Energy, Denoxification, Emissions and Optimization.

1. Introduction

The present Master's Thesis addresses the optimization of the selective non-catalytic reduction (SNCR) denoxification system at the energy recovery plant managed by FCC Environment in Lincoln, United Kingdom. This facility processes approximately 500 tonnes of municipal solid waste per day, generating around 300 MWh of electrical energy and actively contributing to the circular economy of the region. The denoxification process, based on the injection of ammonia and water as a function of combustion gas temperature, currently presents inefficiencies that result in excessive NH₃ consumption, with the corresponding economic and environmental impact.

Faced with this situation, the project proposes a series of improvements aimed at reducing ammonia consumption by 5%, limiting ammonia slip below 4.5 mg/Nm³ and improving the overall process efficiency by 10%, without compromising at any time compliance with the NO_x emissions regulations in force in the United Kingdom. To this end, a methodology based on comprehensive analysis of operational data, revision of injection recipes and automation of tasks currently performed manually by operators is proposed. The results obtained aim to be scalable to the rest of FCC's plants in the country, with a potential economic and environmental impact of considerable magnitude.

2. Project Definition

The project arises from the observation that the plant's denoxification system operates in a semi-automatic manner, requiring periodic intervention from operators to manually adjust the NH₃ injection parameters. This dependence on the human factor generates inefficiencies that result in excessive ammonia consumption, even though NO_x emission levels remain within legal limits.

The objectives pursued are in general terms, three: achieving economic savings through the reduction of NH_3 consumption, improving the environmental impact by minimising ammonia slip and increasing the safety and autonomy of the system, reducing the need for manual intervention and always ensuring compliance with the emissions regulations in force.

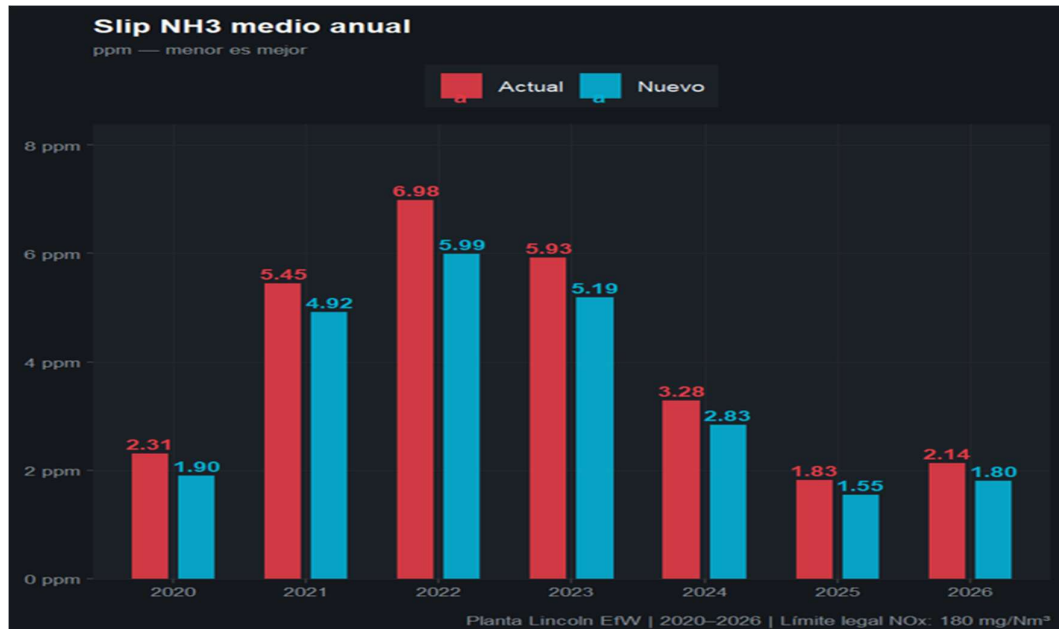
3. Description of the Model/System/Tool

The solution developed is structured around two main elements: an optimised injection recipe and an improved control system composed of three correction factors that act in a chained manner on the NH_3 dose. For the recipe design, a study of the temperature profile along the boiler was first carried out, combining technical design documentation, experimental measurements at the injection ports and fitting of a unified exponential equation with a maximum error of less than 1%. This made it possible to precisely determine the injection level change temperature, set at 805 °C measured at the roof, equivalent to 960 °C at the injection point, thus ensuring that NH_3 is always introduced within the maximum efficiency window. On this basis, eight injection levels were defined with NH_3 flow rates ranging from 70 to 105 L/h, applying a safety factor of 1.5 over the historical mean values.

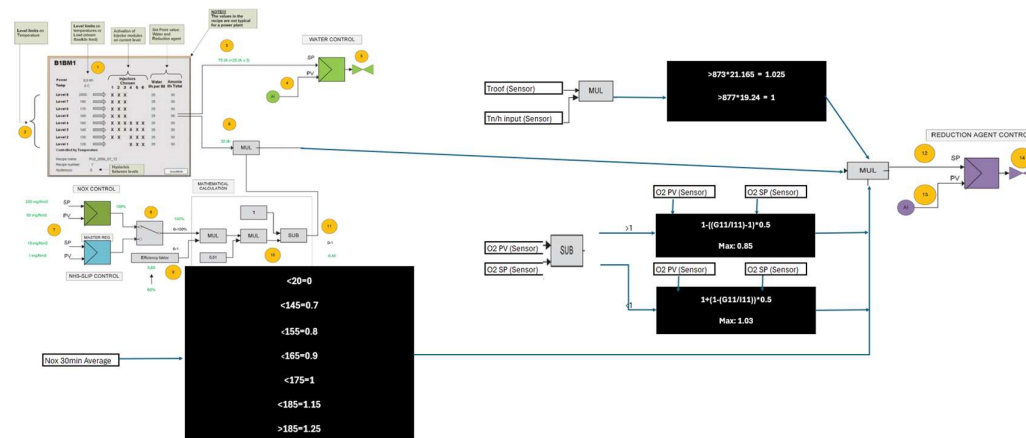
Regarding the control system, three correction factors were designed that modulate the dose set by the recipe in real time: the first adjusts the injection according to the boiler's operating regime combining temperature and tonnes of waste fed per hour; the second takes advantage of variations in the O_2 percentage relative to its setpoint value to anticipate changes in NO_x production; and the third, the most decisive, introduces a 30-minute moving average of NO_x that allows the dose to be regulated more agilely and precisely than the previous system, avoiding both excess NH_3 in low-emission situations and its insufficiency when NO_x approaches its maximum limits.

4. Results

Analysis of the more than 5.3 million data points extracted from the DCS between January 2020 and April 2026 reveals that the plant emits an average of 139.5 mg/ Nm^3 of NO_x , well below the limit of 180 mg/ Nm^3 , with an average consumption of 50.5 L/h of NH_3 and an estimated system efficiency of around 60%. Against these figures, the proposed system, which combines a temperature-optimised injection recipe with three correction factors based on the operating regime, O_2 concentration and the 30-minute moving average of NO_x , achieves a reduction in average NH_3 consumption to 47.3 L/h, representing a saving of approximately 6.7%.



At the same time, average NOx emissions rise moderately to 149.4 mg/Nm³, maintaining a margin of 17% with respect to the legal limit, and the number of days with excess emissions is reduced from 16 to just 1 in the analysed period, improving the system's error margin from the current 0.7% to 0.04%.



With all this, we obtain an average annual economic saving of around €9,000 in a very conservative scenario, as no risk has been taken with respect to the emission limit values. Furthermore, given that consumption at the plant is in a rising scenario, this saving could be significantly increased, especially if adjusted to maintain the current system's error rate, for example.

5. Conclusions

The project demonstrates that it is possible to significantly reduce NH_3 consumption in the SNCR system of the Lincoln plant without compromising compliance with emissions regulations, simply through the optimisation of the injection recipe and the incorporation of automatic controls based on real-time operating variables. The introduction of the exponential temperature profile along the boiler, experimentally validated with a maximum error of less than 1%, allows the optimal injection port to be selected at each moment, improving the efficiency of the NH_3 used. The correction factors designed endow the system with greater autonomy, reducing manual intervention by operators and decreasing the risk of exceeding emission limits.

Finally, given that the proposed solution is scalable to the rest of FCC's plants in the United Kingdom, the potential economic and environmental impact of its implementation could be considerably multiplied, making it a reference for the modernisation of denoxification systems in the energy recovery sector.

6. References

- [1] Argus Media. "Argus Ammonia". Argus Media, 2026.
<https://www.argusmedia.com/es/solutions/products/argus-ammonia> .
- [2] FCC Environment. "FCC Environment : Home". FCC Environment, 2026.
<https://www.fccenvironment.co.uk/> .
- [3] Weston Myer. "SNCR DeNOx System by ERC". Weston Myer, Abril 2025.
<https://www.westonmyer.com/en/product-service/sncr-denox-system-by-erc/> .
- [4] The R Foundation. "The R Project for Statistical Computing". R-project.org, 2026.
<https://www.r-project.org/> .
- [5] Sorrels, J.L.; Randall, D.D.; Richardson Fry, C.; Schaffner, K.S. "Selective Noncatalytic Reduction". EPA Air Pollution Control Cost Manual, 7th Edition. Abril 2019.
<https://www.epa.gov/economic-and-cost-analysis-air-pollution-regulations/chapter-1-selective-non-catalytic-reduction> .
- [6] FCC Lincoln Internal SharePoint <https://fcces.sharepoint.com/sites/NewLincolnshireEfW> .

Índice de la memoria

<i>Índice de figuras</i>	4
<i>Índice de Tablas</i>	8
Capítulo 1. Introducción	10
1.1 Motivación del proyecto	11
1.2 Contexto: problemática del NOx en incineradoras y coste del amoniaco	12
1.3 Objetivos del Proyecto	14
1.4 Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)	15
1.5 Metodología de Trabajo	18
Capítulo 2. Descripción del Proceso y Tecnología	20
2.1 Proceso de incineración de residuos y generación de energía (Waste-to-Energy)	20
2.2 Tecnologías de eliminación de NOx: primarias y secundarias	24
2.3 Reducción No Catalítica Selectiva (SNCR): fundamentos de operación y parámetros clave	25
Capítulo 3. Estado de la Cuestión	27
3.1 Importancia de la vigilancia sobre el NOx	27
3.2 Agentes reductores disponibles y diferencia entre ellos	28
Capítulo 4. Definición del Trabajo	30
4.1 Justificación	30
4.2 Objetivos	32
4.2.1 Mejora económica	32
4.2.2 Mejora ambiental	32
4.2.3 Mejora de las condiciones de operación	32
4.3 Planificación y Metodología	33
4.3.1 Fase de estudio y comprensión	33
4.3.2 Análisis y Comprensión	33
4.3.3 Propuesta y ejecución de soluciones	34
Capítulo 5. Sistema/Modelo Desarrollado	35
5.1 Análisis del Sistema	35

5.1.1 Control en función de la temperatura	35
5.1.2 Present y Setpoint Values (SP y PV)	36
5.1.3 Lógica de Operación	37
5.2 Principales inconvenientes detectados	38
5.2.1 Temperaturas de Operación	38
5.2.2 Producción de NOx inicial	39
5.2.3 Composición del Residuo	39
5.3 Solución Propuesta	40
5.3.1 Obtención y pretratamiento de datos	41
5.3.2 Primera Operación	41
5.3.3 Segunda Operación	43
5.3.4 Tercera Operación	45
5.4 Introducción al Sistema Electrónico	48
5.5 Manejo e Implantación en SIMATIC Manager	51
5.5.1 Reconocimiento de sensores y transposición a escala de los valores	52
5.5.2 Networks de Operación y Localización de las Mejoras	54
5.5.3 Corrector por Oxígeno	58
5.5.4 Corrector por Temperatura y Toneladas Entrantes	60
5.5.5 Corrector por niveles de emisión de NOx y Salida Final	60
5.6 Optimización de la Receta	62
5.6.1 Variabilidad de la Temperatura	62
5.6.2 Temperatura de cambio de nivel	72
5.6.3 Cantidad Inyectada por Nivel	76
Capítulo 6. Análisis de Resultados	82
6.1 Comparativa entre situación actual y escenario optimizado	82
6.1.1 Situación Actual	82
6.1.2 Efectos Observados	87
6.2 Valores para introducir en el PLC	92
6.2.1 Análisis Teórico	92
6.2.2 Prueba en Operación Real	99
6.3 Relación Ahorro-Riesgo	102
6.4 Beneficios Reportados	108
6.4.1 Beneficios Operativos	109

6.4.2 Impacto Económico.....	113
6.5 Objetivos Alcanzados vs Objetivos Propuestos	114
Capítulo 7. Conclusiones y Trabajos Futuros.....	117
7.1 Síntesis y Reflexión.....	117
7.2 Limitaciones del estudio.....	118
7.2.1 Número reducido de mediciones experimentales de temperatura.....	118
7.2.2 Condiciones no representativas durante el experimento de validación.....	119
7.2.3 Estimación indirecta del NOx emitido con el sistema propuesto.....	119
7.2.4 Sistema no implantado físicamente: resultados de carácter analítico.....	120
7.2.5 Otras limitaciones de contexto	120
7.3 Trabajos futuros.....	121
7.3.1 Implantación definitiva y fase de observación (0–12 meses)	121
7.3.2 Instalación de sensores de temperatura en los puertos de inyección (corto-medio plazo)	121
7.3.3 Activación de escenarios de mayor ahorro (tras validación del escenario base).....	122
7.3.4 Automatización completa y eliminación de la intervención manual en el PLC (medio plazo)	122
7.3.5 Estudio de viabilidad de pretratamiento del residuo entrante (medio-largo plazo)	123
7.3.6 Escalabilidad al resto de plantas de FCC en el Reino Unido (largo plazo)	123
7.4 Reflexión final.....	125
Capítulo 8. Bibliografía.....	126
ANEXO I	127

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 "Representación de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030 relacionados con el proyecto"	16
Figura 2 "Vista de la planta de Energy from Waste de Lincoln"	21
Figura 3 "Esquema de la caldera de tubos de agua con intercambiadores de calor y sistema de generación de vapor sobrecalentado"	23
Figura 4 "Representación visual del funcionamiento del proceso completo "	31
Figura 5 "Diagrama de bloques del primer factor de corrección de la dosis de NH_3 basado en el régimen de operación de la caldera (temperatura y toneladas entrantes)"	42
Figura 6 "Diagrama de bloques del segundo factor de corrección de la dosis de NH_3 basado en la concentración de O_2 en la caldera"	45
Figura 7 "Diagrama de bloques del tercer factor de corrección de la dosis de NH_3 basado en la media móvil de 30 minutos de las emisiones de NO_x "	47
Figura 8 "Esquema de la operación final de combinación en cascada de los tres factores de corrección para obtener la señal de dosificación del sistema de inyección de NH_3 "	47
Figura 9 "Esquema general de implantación del sistema de control propuesto, con indicación de las entradas de sensores, bloques de operación y salida al sistema de inyección de NH_3 "	48
Figura 10 "Menú de intercambio de datos entre el DCS y el PLC con indicación de las variables nuevas incorporadas (en naranja), unidades de medida, rangos y direcciones KKS"	49
Figura 11 . "Vista del dashboard del PLC de la planta de Lincoln con la receta de inyección activa y los niveles configurados de NH_3 y H_2O "	50
Figura 12 "Árbol de bloques del proyecto en SIMATIC Manager con los bloques OB, FC, FB y DB que componen el programa de control de denoxización"	52
Figura 13 . "Redes del bloque FB1 dentro del FC101 donde se realiza el reconocimiento de sensores y la transposición a escala de los valores recibidos desde el DCS"	53

Figura 14 "Bloques FC15 'Integer to Real' empleados para convertir a la escala del programa (0–32.767) los valores en unidades físicas recibidos de cada sensor"	54
Figura 15 "Vista del Network 173 del bloque FB13, donde el bloque #AmmoniaPID genera la salida actual del sistema PID antes de ser escalada a unidades de operación"	55
Figura 16 "Vista del Network 174 del bloque FB13, donde la salida del PID es convertida al rango de operación (0 a 1) para regular la dosis de NH ₃ en función de la receta"	56
Figura 17. "Estructura del nuevo bloque FC23 con las conexiones de entrada procedentes de los sensores del DCS y la salida hacia el Network 175 del PLC"	57
Figura 18 "Declaración de variables del bloque FC23 con los valores de entrada (IN), las variables temporales de cálculo (TEMP) y el valor de corrección de salida (OUT)"	58
Figura 19 "Network 1 del bloque FC23: lógica del corrector por O ₂ aplicado cuando el valor PV de O ₂ es inferior al valor SP fijado por el operario"	59
Figura 20 "Network 2 del bloque FC23: lógica del corrector por O ₂ aplicado cuando el valor PV de O ₂ es igual o superior al valor SP fijado por el operario"	59
Figura 21 "Network 3 del bloque FC23: lógica del corrector por temperatura y toneladas entrantes con los distintos factores de corrección según el régimen de operación de la caldera"	60
Figura 22 "Network 4 del bloque FC23: lógica del corrector por media móvil de 30 minutos de NO _x para los rangos de emisión inferiores"	61
Figura 23 "Network 5 del bloque FC23: lógica de cancelación del factor de corrección por NO _x cuando la media de 30 minutos no es válida por labores de mantenimiento o fallo del analizador"	61
Figura 24 "Network 6 del bloque FC23: multiplicación en cascada de los tres factores de corrección por la salida del sistema PID actual para obtener la dosis final de NH ₃ a inyectar"	62
Figura 25 "Plano de la caldera de la planta de Lincoln sobre AutoCAD con indicación de la altura de la parrilla de incineración y la posición del primer sensor de temperatura en el tejado"	64
Figura 26 "Mapa de comportamiento de temperaturas en la caldera según el documento de diseño proporcionado por YARA U.K. en 2012"	65

Figura 27 "Documento de diseño de la caldera de la planta de Gloucester (FCC) utilizado como referencia comparativa para el estudio del perfil de temperaturas"	66
Figura 28 "Representación de los niveles de inyección de NH ₃ en la caldera de Lincoln, con identificación de los puertos operativos (DENOX 2 y DENOX 3) y los puertos de repuesto"	67
Figura 29 "Ajuste de la curva exponencial del perfil de temperatura a lo largo de la caldera para la Medición 1 y 2 referida al puerto DENOX 2"	68
Figura 30 "Ajuste de la curva exponencial del perfil de temperatura a lo largo de la caldera para la Medición 1 y 2 referida al puerto DENOX 3"	69
Figura 31 "Calculadora de temperatura en los puntos de inyección basada en la ecuación exponencial unificada, con comparativa entre valores calculados y medidos empíricamente"	71
Figura 32 "Diapositiva del manual de formación de YARA U.K. en la que se establece el rango de temperatura de operación del sistema SNCR (850–950 °C) y la eficiencia óptima estimada en torno a 900 °C"	74
Figura 33 . "Gráfica de Weston Myer sobre la variación de la eficiencia de reducción de NO _x y el slip de NH ₃ en función de la temperatura de inyección del agente reductor"	75
Figura 34 "Diagrama de cajas del consumo histórico de NH ₃ (L/h) agrupado por intervalo de temperatura medida en el tejado de la caldera, con indicación de medias, máximos y mínimos filtrados"	78
Figura 35 "Captura real del DCS de la planta de Lincoln correspondiente a la operación de la caldera"	83
Figura 36 "Comparativa del uso de NH ₃ por intervalos de emisión de NO _x "	91
Figura 37 "Comparativa gráfica de las emisiones de NO _x entre el sistema de dosificación actual y el sistema propuesto, generada en RStudio"	91
Figura 38 "Curva de eficiencia de reducción de NO _x en función de la temperatura de inyección del NH ₃ , extraída del informe de la EPA (2019) y adaptada a grados Celsius" .	93
Figura 39 "Ventana de operación del sistema SNCR de la planta de Lincoln con los rangos de eficiencia mínima y máxima estimados en función de la temperatura de inyección"	94

Figura 40 "Extracto del documento 'Calculation Notes Denox System' de YARA (2012) con los valores de diseño estimados del sistema"	95
Figura 41 "Gráfica de L/h de NH ₃ (Rojo)-Temperatura °C (Verde)"	100
Figura 42 "Gráfica NO _x emitido mg/Nm ³ (Azul)-Temperatura °C (Rojo)"	100
Figura 43 "Gráfica % O ₂ (Violeta)-NH ₃ L/h (Rojo)"	100
Figura 44 "Evolución temporal de las emisiones de NO _x de la planta de Lincoln con indicación del cambio del límite regulatorio de 200 a 180 mg/Nm ³ en diciembre de 2023"	103
Figura 45 "Representación de las ventanas de operación del tercer factor de corrección optimizadas para el escenario de máximo ahorro manteniendo el límite de 180 mg/Nm ³ "	106
Figura 46 "Desglose anual del ahorro de NH ₃ (L/h) obtenido con el sistema propuesto frente al sistema actual de dosificación, representado en RStudio"	111
Figura 47 "Evolución histórica completa del slip de NH ₃ medido en la planta de Lincoln entre 2020 y 2026, incluyendo periodos de parada de mantenimiento"	112
Figura 48 "Comparativa resumida del slip medio de NH ₃ entre el sistema actual y el sistema propuesto en periodos de operación normal"	112
Figura 49 "Mapa de localización de las plantas de Energy from Waste operadas por FCC en el Reino Unido, con indicación de su antigüedad relativa respecto a la planta de Lincoln"	124

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 “Organigrama General de Trabajo”	19
Tabla 2 "Contraste de hipótesis de temperaturas: mediciones empíricas de Troof y temperatura en DENOX 2 y 3 para dos condiciones distintas de operación"	68
Tabla 3 "Validación de la ecuación exponencial unificada mediante comparación entre las temperaturas calculadas y las medidas empíricamente en los puntos de inyección DENOX 2 y DENOX 3"	72
Tabla 4 "Consumo histórico medio de NH ₃ (L/h) por intervalo de temperatura medida en el tejado de la caldera, obtenido del análisis de la operación de la planta entre 2020 y 2026"	79
Tabla 5 "Caudal máximo de NH ₃ a inyectar por nivel de temperatura con factor de seguridad de 1,5 aplicado sobre los valores medios históricos"	80
Tabla 6 "Panel de la receta de inyección diseñada para el PLC de denoxización con los 8 niveles de temperatura, caudal de agua, inyector activo y caudal de NH ₃ "	81
Tabla 7 "Valores medios de operación del sistema de denoxización actual: NO _x emitido, NH ₃ empleado, O ₂ en caldera, días con exceso de emisión, caudal total y slip de NH ₃ "	84
Tabla 8 "Media de NH ₃ inyectado (L/h) desglosada por intervalos de emisión de NO _x con el sistema actual de dosificación"	86
Tabla 9 "Valores medios de operación del sistema de denoxización propuesto: NO _x emitido, NH ₃ empleado, días con exceso de emisión y slip de NH ₃ "	88
Tabla 10 "Comparativa de las emisiones diarias de NO _x entre el método actual y el método previsto para las cinco últimas fechas en que se superó el límite de 180 mg/Nm ³ "	89
Tabla 11 "Comparativa de la media de NH ₃ inyectado (L/h) entre el sistema actual y el sistema previsto para cada intervalo de emisión de NO _x "	90
Tabla 12 "Comparación entre los valores medidos de operación real (2020–2026) y los valores estimados en el documento de diseño de YARA para el NO _x emitido, el NH ₃ empleado y el slip"	96

Tabla 13 "Eficiencias teóricas del sistema SNCR de la planta de Lincoln por temperatura en el tejado de la caldera (Troof) para los puertos de inyección DENOX 2 y DENOX 3, en el rango de 750 a 829 °C"	99
Tabla 14 "Comparativa de valores medios de operación (NO _x , NH ₃ , O ₂ , slip y temperatura) entre la inyección en DENOX 3 y la inyección en DENOX 2 para temperatura media igual o superior a 821 °C"	102
Tabla 15 "Resultados del Escenario 1 de la relación ahorro-riesgo: ahorro total de amoniaco aplicando el límite regulatorio de 200 mg/Nm ³ para el periodo anterior a diciembre de 2023"	105
Tabla 16 "Resultados del Escenario 2 combinado de la relación ahorro-riesgo: ahorro máximo obtenido respetando el límite vigente de 180 mg/Nm ³ en todo el periodo analizado"	107
Tabla 17 "Comparativa de Objetivos Alcanzados y Propuestos"	116

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

El presente proyecto consiste en la optimización y mejora del sistema de denoxización (SNCR) de la planta de valorización energética (Energy from Waste) situada en Lincoln, Reino Unido, gestionada por FCC Environment. Esta instalación, actualmente en funcionamiento nominal, quema alrededor de 500 toneladas diarias de residuos sólidos urbanos, generando aproximadamente 300 MWh de energía eléctrica. Dicha energía se produce mediante una turbina alimentada con vapor de agua sobrecalentado, obtenido a partir del calor desprendido durante la combustión de los residuos.

La planta desempeña un papel fundamental en los ámbitos social, económico y medioambiental de la región. Por un lado, permite reducir significativamente el volumen de residuos que, de otro modo, acabarían en vertederos, liberando terrenos que podrían destinarse a otros usos. Por otro lado, aprovecha el residuo como recurso para generar energía que abastece aproximadamente a 20.000 hogares al año, favoreciendo así la economía circular y transformando un elemento considerado como un mero desecho en una fuente de valor.

Cabe destacar que la planta cumple en todo momento con los estrictos requisitos medioambientales impuestos por el Gobierno del Reino Unido en materia de emisiones de gases nocivos derivados de la combustión. De hecho, cerca de tres cuartas partes de las instalaciones están expresamente dedicadas a los procesos de limpieza y purificación de estos gases, garantizando que la incineración de residuos no suponga un peligro para la población civil cercana.

Aunque la incineración con valorización energética no es una tecnología ampliamente extendida en España (debido, entre otros factores, a la falta de apoyo institucional y al desconocimiento ciudadano sobre los rigurosos procesos de limpieza de gases), este tipo de plantas representa una solución clave para alcanzar los nuevos objetivos medioambientales marcados por la Unión Europea. Dichos objetivos fijan un límite máximo del 10% de

residuos enviados a vertedero, mientras que actualmente en España ese porcentaje alcanza el 47% desde las plantas de tratamiento existentes.

En cuanto al proceso concreto objeto de este estudio, los gases resultantes de la combustión, al ascender por la caldera, pasan a través de un sistema de inyección de NH_3 (amoníaco) y H_2O (agua). Actualmente, este sistema opera siguiendo una receta impuesta de forma manual por el operario: en función de la temperatura medida en el punto más alto del primer paso de la caldera, se inyecta una cantidad determinada de NH_3 y H_2O . Adicionalmente, el valor de NH_3 inyectado es regulado en continuo por un controlador PID, que recibe las señales del analizador situado al final del proceso de limpieza de gases y ajusta (mediante un factor entre 0 y 1) el valor de NH_3 fijado por la receta. Esta regulación depende de la lectura del analizador, por lo que un control exhaustivo de la temperatura y de los datos del analizador resulta crítico para el éxito del proyecto, dado que ambas variables están fuertemente interrelacionadas.

1.1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

El origen de este proyecto se encuentra en mi periodo de prácticas como estudiante en la planta de valorización energética que FCC Environment opera en Lincoln (Reino Unido). Esta experiencia me permitió conocer de primera mano los desafíos diarios de una instalación crítica para la gestión de residuos y la generación de energía en la región. Como estudiante de ICAI y trabajador de una de las empresas de ingeniería más punteras de España, mi motivación principal ha sido aplicar mis conocimientos para lograr una mejora tangible en la eficiencia técnica del sistema de denoxización (SNCR), optimizando el rendimiento del amoníaco inyectado, cumpliendo con la normativa ambiental vigente y, al mismo tiempo, generando un ahorro económico significativo para la planta.

Vivimos en un mundo cada vez más afectado por la contaminación atmosférica, donde la calidad del aire se ha convertido en uno de los principales retos medioambientales y de salud pública. La reducción de emisiones nocivas es, por tanto, una prioridad ineludible. En particular, los óxidos de nitrógeno (NO_x) son responsables de problemas como la lluvia

ácida, la formación de smog fotoquímico y el agravamiento de enfermedades respiratorias. Por otro lado, un exceso de amoníaco (NH_3) no reaccionado (conocido como ammonia slip) puede dar lugar a emisiones secundarias igualmente dañinas, como la formación de aerosoles de sulfato amónico. Por ello, el equilibrio entre la eliminación eficaz de NO_x y la minimización del amoníaco no consumido constituye un reto técnico de gran relevancia.

A lo largo de mi estancia en la planta, sentí una fuerte motivación personal por contribuir a una institución que realiza una labor enormemente importante para la región: transformar residuos en energía, reducir el volumen de vertido y disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero. Además, el hecho de que los resultados de este trabajo pudieran ser potencialmente escalables a otras plantas de FCC en el Reino Unido me impulsó a plantear un enfoque riguroso pero práctico. El impacto económico derivado de un menor consumo de amoníaco, unido a la mejora de las condiciones de operación (menor riesgo de fugas, menos necesidad de ajustes manuales), supondría una ayuda tanto para los operarios de planta como para la cuenta de resultados global de la compañía.

Por último, la posibilidad de que una optimización exitosa pudiera replicarse en varias instalaciones del país añadió un aliciente extra: no solo se trataría de mejorar una planta concreta, sino de beneficiar a miles de personas, desde los propios trabajadores hasta los ciudadanos que respiran un aire más limpio. La correcta eliminación de gases nocivos, combinada con el ahorro económico derivado del uso más eficiente de NH_3 , redundaría en entornos de operación más seguros, en una menor huella ambiental y en un ahorro económico que, proyectado a las múltiples plantas de FCC en Reino Unido, podría traducirse en cientos de miles de euros anuales. Todo ello ha sido la fuerza motriz que me ha llevado a desarrollar este Trabajo de Fin de Máster.

1.2 CONTEXTO: PROBLEMÁTICA DEL NO_x EN INCINERADORAS Y COSTE DEL AMONIACO

En la planta donde se desarrolla el presente proyecto, el sistema empleado para la eliminación de los óxidos de nitrógeno (NO_x) de los gases de combustión es un SNCR,

acrónimo inglés de Selective Non-Catalytic Reduction (Reducción Selectiva No Catalítica). A diferencia del otro sistema posible dentro de las tecnologías de denoxización, el SCR (Selective Catalytic Reduction), el SNCR no requiere un catalizador para facilitar la reacción entre los NO_x y el amoníaco (NH₃). En lugar del catalizador, el SNCR opera a temperaturas más elevadas (típicamente entre 850 °C y 1050 °C) para favorecer la reducción de los NO_x mediante la inyección de NH₃ disuelto en agua.

El SCR, por su parte, consigue reducir un mayor porcentaje de NO_x (estimado en torno al 90 %), pero exige una inversión inicial más alta y unos costes de mantenimiento superiores. Además, el catalizador utilizado se degrada con el tiempo y, al ser reemplazado, debe gestionarse como residuo peligroso, lo que añade complejidad operativa y costes adicionales.

En cambio, el sistema SNCR de la planta Energy from Waste de Lincoln, aunque alcanza una eficiencia de reducción de NO_x más moderada, presenta ventajas significativas para este tipo de instalaciones: es más simple, requiere menor mantenimiento y su inversión es más reducida. Por otro lado, en las plantas de incineración de residuos, las altas temperaturas de los gases tras la combustión dificultan a menudo la aplicación del SCR, ya que el catalizador se vería sometido a condiciones extremas que acortarían su vida útil. Asimismo, la presencia de partículas y compuestos en los gases de combustión puede envenenar o ensuciar el catalizador, obligando a recambios frecuentes.

Además de lo anteriormente comentado, uno de los principales impulsores de este proyecto es el elevado coste asociado al consumo de amoníaco, que constituye uno de los gastos variables más importantes en la operación del SNCR. El amoníaco anhidro o en disolución acuosa (NH₃) es un producto químico cuyo precio está sujeto a una notable volatilidad, influenciada por factores geopolíticos, el coste de la energía y las dinámicas de oferta y demanda a nivel global. La producción en el Reino Unido es especialmente sensible a los precios del gas natural; de hecho, se ha reportado que los costes marginales de producción superan las 2.000 libras por tonelada, muy por encima del precio de mercado global, lo que subraya la dependencia de las importaciones y la exposición a la volatilidad de los mercados internacionales.

Además del coste de adquisición del reactivo, la planta debe afrontar los costes y requisitos de seguridad asociados al almacenamiento de amoníaco. Dependiendo de si se utiliza amoníaco anhidro (más concentrado y peligroso) o amoníaco acuoso (menos concentrado y más seguro, aunque con mayores costes de transporte por su dilución), la inversión en infraestructura de almacenamiento puede variar significativamente. Los sistemas para amoníaco anhidro, aunque más económicos en cuanto al reactivo en sí, requieren tanques a presión, sistemas de contención y estrictas medidas de seguridad.

Ya no solo en el foco económico, el amoníaco es una sustancia tóxica y corrosiva que representa un riesgo significativo para la salud de los operarios y para la población cercana en caso de fuga o accidente. La exposición a altas concentraciones de amoníaco puede causar graves irritaciones y quemaduras en la piel, los ojos, la garganta y los pulmones. Niveles muy elevados pueden provocar daño pulmonar, ceguera e incluso la muerte. Debido a estos riesgos, el manejo y almacenamiento de amoníaco están sujetos a estrictos protocolos de seguridad, planes de emergencia y sistemas de detección de fugas, lo que añade una capa adicional de complejidad y coste operativo a la planta.

Por último, la optimización del uso del amoníaco no solo responde a criterios económicos, sino también a una profunda motivación medioambiental. El ammonia slip, o amoníaco no reaccionado que escapa del sistema SNCR, tiene un impacto negativo en el medio ambiente. Puede contribuir a la formación de lluvia ácida y a la eutrofización (exceso de nutrientes) de ecosistemas acuáticos, así como reaccionar con otros contaminantes para formar partículas secundarias nocivas para la salud respiratoria. Por lo tanto, reducir la dosis de amoníaco inyectada a la mínima necesaria para cumplir con la normativa de NOx no solo genera un ahorro económico directo, sino que también minimiza el riesgo de emisiones secundarias no deseadas, mejorando el balance ambiental global de la instalación.

1.3 OBJETIVOS DEL PROYECTO

A pesar de barajar varios posibles objetivos y de que el hecho de que sea una planta tan grande sea algo que inclina a tratar de abarcar numerosos objetivos, para la realización del

proyecto he decidido agrupar una serie de objetivos concretos, los cuales fijarán la hoja de ruta y los métodos aplicados al mismo.

Los objetivos propuestos a continuación, han sido elaborados en base al proceso de estudio, recopilación y análisis de datos, y tras escuchar y comentar con operarios y jefes de operación los problemas e ineficiencias que arrastraba el proceso actual de denoxización.

Es por ello, que los objetivos a cumplir serán:

1. Reducción del exceso de NH_3 a un valor menor de 4.5 mg/Nm^3 con el fin de disminuir emisiones y fomentar el ahorro económico.
2. Reducir el consumo de NH_3 en la planta en un 5 % con vistas a potenciar las ganancias de la planta minimizando costes de operación sin comprometer viabilidad.
3. Mejorar la eficiencia del proceso de denoxización en un 10% aplicando las medidas propuestas, ya que inyectando el NH_3 a distintas temperaturas puede llegar a haber una variación en la eficiencia del 40%.
4. Mantener las emisiones de NO_x en valores reducidos, pues actualmente la planta cumple con esos estándares incluso dejando un margen para posibles imprevistos.
5. Facilitar y automatizar la tarea de los operarios.
6. Obtener beneficio económico y cuantificarlo gracias a la reducción del uso de NH_3 .

Con todo ello, el problema sería solucionado de una manera amplia y eficaz, abordando el entorno técnico y económico y proponiendo una solución que pueda ser escalable a más plantas a lo largo de Reino Unido. Esto permitiría no solo a la empresa, sino al conjunto de la ciudadanía británica, beneficiarse de las medidas implementadas en esta planta.

1.4 ALINEACIÓN CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS)

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) representan una hoja de ruta global

adoptada por Naciones Unidas en 2015, enmarcada dentro de la Agenda 2030. Se trata de 17 grandes metas concebidas para hacer frente a algunos de los retos más urgentes de nuestra época.

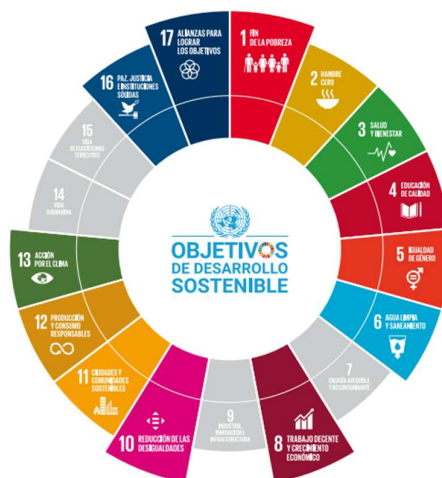


Figura 1 "Representación de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030 relacionados con el proyecto"

Cada uno de estos objetivos está compuesto por una serie de metas concretas, pensadas para abordar los problemas actuales desde una perspectiva conjunta y colaborativa. Cuando los países, las empresas o incluso las comunidades locales asumen el compromiso de trabajar alineados con los ODS, están contribuyendo activamente a construir sociedades más justas, responsables y capaces de resistir crisis.

La presente planta, al igual que el mismo proyecto, se alinea con varios de estos objetivos, pues como se ha indicado antes juega un papel clave en la sociedad británica y, además contribuye de una enorme manera en la economía circular, en la producción de energía libre de emisiones y en la reducción de emisiones, pues los residuos almacenados en vertedero acostumbran a emitir CH₄, el cual, no siendo correctamente extraído y tratado, puede provocar serios problemas de salud y medioambientales.

Por ello, los Objetivos de Desarrollo Sostenible con los que este proyecto se alinea serían:

- ODS 7 - Energía Asequible y No Contaminante.

El proyecto contribuye a este objetivo al optimizar el consumo de amoníaco en el proceso de denoxización de una planta de valorización energética. Al reducir el exceso de NH_3 y mejorar la eficiencia del sistema, se minimiza el gasto de un reactivo cuya producción y transporte conllevan un consumo energético asociado, lo que repercute en una generación de energía más limpia y con menor huella indirecta, manteniendo el carácter asequible de la electricidad y el calor producidos para la comunidad.

- ODS 9 - Industria, Innovación e Infraestructura.

El proyecto encarna la innovación aplicada a la infraestructura industrial existente al buscar una mejora tangible del proceso de denoxización mediante el ajuste de parámetros de inyección, la automatización de tareas y la reducción del consumo de reactivo. La propuesta de una solución escalable a otras plantas del Reino Unido refuerza su vocación de modernizar el sector de la valorización energética con criterios de eficiencia y sostenibilidad técnica.

- ODS 11 - Ciudades y Comunidades Sostenibles.

Al perseguir la reducción de las emisiones de NO_x y de amoníaco fugitivo a valores aún más ajustados que los actuales, el proyecto protege la calidad del aire que respira la población de Lincoln y su entorno. Mantener las emisiones en niveles reducidos, incluso con margen para imprevistos, y facilitar la tarea de los operarios implicados en un servicio público de gestión de residuos más confiable, seguro y respetuoso con la salud de la comunidad.

- ODS 13 - Acción por el Clima.

El proyecto actúa directamente sobre la mitigación del cambio climático al minimizar el deslizamiento de amoníaco y optimizar la eficiencia de la reducción de NO_x . Un menor consumo de NH_3 implica una reducción de las emisiones asociadas a su fabricación, y un control más preciso de las emisiones de óxidos de nitrógeno evita la formación de ozono troposférico, un potente gas de efecto invernadero. Todo ello contribuye a la acción climática desde la mejora continua de un proceso industrial ya alineado con la reducción de emisiones.

1.5 METODOLOGÍA DE TRABAJO

Al beneficiarme del programa que ofrece ICAI para aquellos estudiantes que hemos podido encontrar prácticas en el extranjero, el plan de trabajo que he ido llevando para el presente proyecto ha sido diario y de avance progresivo a medida que iba aprendiendo acerca del funcionamiento de la planta y de los procesos llevados a cabo. Es por ello por lo que, a diferencia de un trabajo de fin de máster o grado convencional, el presente proyecto ha sido realizado todos los días en los que he acudido a la oficina, ya que, al trabajar y colaborar en las mejoras y correcto funcionamiento de la planta, contribuía a la vez a mi propio proyecto final de máster. Esta integración entre la actividad profesional diaria y la elaboración del TFM ha permitido un aprendizaje continuo y una aplicación práctica inmediata de los conocimientos adquiridos.

La estrategia llevada a cabo se puede resumir en haber aplicado métodos analíticos, cuantitativos y lógicos al proyecto. Para el desarrollo de esta planta, primero tuve que comprender y estudiar cómo funcionaba en la actualidad, identificando cada una de las etapas del proceso de limpieza de gases y el papel que desempeña el sistema SNCR en el conjunto de la instalación. Después comencé a analizar el comportamiento de esta y los posibles entornos de operación basándome en los datos recopilados a lo largo de los años por los sensores. Este análisis me permitió detectar y cuantificar aquellos errores o ineficiencias que se estaban cometiendo, así como entender sus causas raíz. Una vez identificados los puntos de mejora, pude plantear cómo atacar y solventar los mismos de una manera eficaz, proponiendo ajustes en los parámetros de control y en la lógica de regulación.

Para hacerlo de una manera más visual e interactiva, he realizado el siguiente gráfico en el que se puede apreciar las fases del proyecto y cómo en cada fase he ido aplicando un enfoque y métodos distintos:

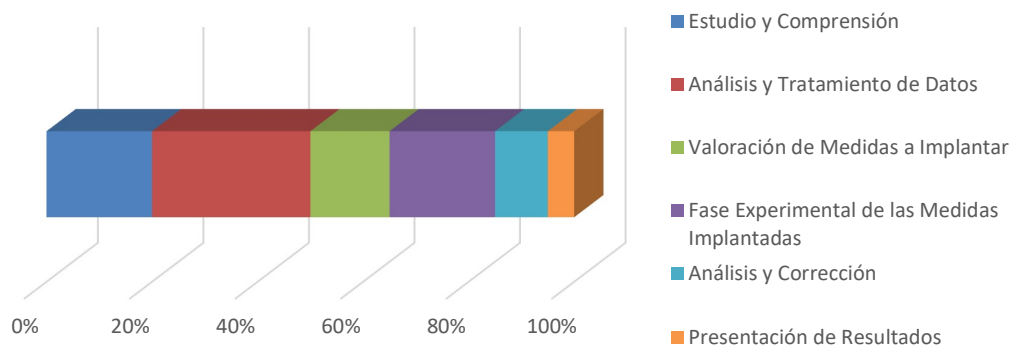


Tabla 1 “Organigrama General de Trabajo”

Capítulo 2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO Y TECNOLOGÍA

La planta objeto de estudio es una planta de revalorización energética, la cual tiene como principal objetivo la eliminación del residuo mediante una correcta combustión y así de esta manera no aumentar el espacio ocupado por estos en vertedero a la vez que se obtiene un producto de altísimo valor como lo es la energía eléctrica. Dentro de la misma planta, existen distintas maquinarias de alta complejidad que operan las veinticuatro horas del día aportando una función esencial en distintos procesos en los que se ve involucrado tanto los residuos al quemarse como la limpieza y aprovechamiento de los gases y calor desprendidos durante la combustión.

2.1 PROCESO DE INCINERACIÓN DE RESIDUOS Y GENERACIÓN DE ENERGÍA (WASTE-TO-ENERGY)

El inicio del proceso ocurre con la descarga de los camiones de transporte de residuos en la playa de almacenaje. Los camiones acceden al recinto previo paso por una báscula operada de manera totalmente automática, la cual lee la matrícula y pesa el camión tanto a su entrada como a su salida del recinto.

De esta manera, mediante el programa informático de la báscula, la planta sabe exactamente que camiones y cuantos residuos han sido depositados en la planta a diario y sin necesidad de requerir de un operario que haga este trabajo de manera manual. La báscula además lee y almacena varios camiones a la vez, por lo que pueden entrar varios camiones de manera ininterrumpida ya que la báscula guarda su información de pesaje según su matrícula y es capaz de recordar la matrícula de cada camión para poder obtener la cantidad descargada.



Figura 2 "Vista de la planta de Energy from Waste de Lincoln"

Tras la descarga en la playa de almacenaje los residuos son recogidos mediante un pulpo mecánico que actúa como brazo de una grúa industrial. Este pulpo es operado manualmente las veinticuatro horas del día para asegurar que la planta recibe residuo para incinerar constantemente. El pulpo es bajado hasta el suelo de la playa y tras ello es ascendido más de veinte metros para descargar los residuos en un buffer que conecta con la parrilla de incineración.

Tras la descarga de los residuos, hay un buffer que conecta directamente con la parrilla de incineración. Este buffer es misión del operario de la grúa que esté constantemente a máxima capacidad, para así poder crear un vacío dentro de la parrilla y la caldera que evite que los gases de incineración puedan salir por otra salida que no sea la chimenea, situada tras el proceso de limpieza de gases. Al final del buffer hay un sistema de arietes que empujan horizontalmente los residuos hacia la parrilla.

Una vez que los residuos son empujados por los arietes y caen sobre la parrilla, se encuentran con un lecho formado por barras escalonadas fijas y móviles, fabricadas con aleaciones resistentes a altas temperaturas. Estas barras se mueven de forma alternativa gracias a actuadores hidráulicos o mecánicos, generando un movimiento de vaivén que hace avanzar los residuos a la vez que los agita constantemente. Esta agitación mecánica es clave, ya que

expone continuamente nuevas superficies de combustible al aire, evita que se formen canales por donde el aire se escape sin reaccionar y consigue que el calor se libere de manera uniforme a lo largo de todo el horno.

El proceso de combustión sobre esta parrilla móvil no ocurre de golpe, sino por etapas bien diferenciadas. Nada más entrar, el residuo pasa por una primera fase de secado en la que se evapora toda la humedad que contiene. Una vez seco y al alcanzar la temperatura suficiente, se produce la ignición. La zona central de la parrilla corresponde a la combustión principal, donde se libera la mayor parte de la energía térmica. Finalmente, en la zona de agotamiento se oxida el carbono residual que aún pudiera quedar, de forma que las escorias salen completamente quemadas antes de ser descargadas.

Para que cada etapa reciba justo el oxígeno que necesita, la parrilla trabaja con un control de aire por zonas. El aire primario se sopla desde debajo de la parrilla a través de cajas de viento independientes, cada una regulable mediante compuertas y controles de presión. De este modo, el caudal de aire se ajusta a los requisitos de cada fase: menos aire en el secado y el agotamiento, y más en la combustión principal. Además de aportar oxígeno, este flujo de aire primario refrigera las propias barras de la parrilla, alargando su vida útil y evitando que la escoria se adhiera a ellas. Sobre el lecho de residuos se inyecta el aire secundario o de sobre fuego, cuya misión principal es completar la combustión de los gases volátiles y del monóxido de carbono que se liberan durante la combustión primaria. Este aire secundario se introduce de forma repartida para generar turbulencia, estabilizar la geometría de la llama y reducir las emisiones de compuestos orgánicos y CO.

Todo el sistema se gobierna mediante una automatización avanzada que integra en tiempo real las señales de analizadores de oxígeno, sensores de temperatura, monitores de CO y la producción de vapor. Un algoritmo de control en lazo cerrado ajusta continuamente los caudales de aire y la velocidad de la parrilla para mantener las condiciones óptimas de combustión a pesar de la enorme variabilidad del residuo. Gracias a esta coordinación entre el movimiento del lecho y la aireación zonificada se consigue trabajar con muy poco exceso de oxígeno, limitar la formación de óxidos de nitrógeno y obtener unas escorias con un

contenido mínimo de inquemados. Un ajuste preciso reduce además el arrastre de cenizas volantes, protegiendo la caldera y los sistemas de depuración de gases aguas abajo, todo ello manteniendo el vacío necesario en el hogar para que los gases solo encuentren salida hacia la chimenea tras su limpieza.

Sobre la parrilla se sitúa la caldera, cuyas paredes están formadas por tubos de agua soldados con aletas que conforman un recinto estanco y trabajan en depresión. Los gases calientes ceden su calor a través de intercambiadores de tubos con aletas y de tubos lisos. La circulación del agua y de la emulsión agua-vapor se produce de forma natural por diferencia de densidades: el agua fría desciende y la emulsión caliente asciende hasta el tambor superior, donde se separa el vapor.

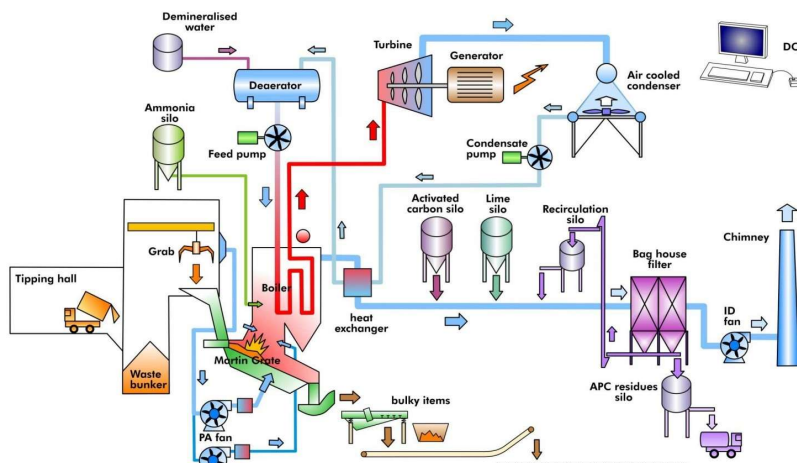


Figura 3 "Esquema de la caldera de tubos de agua con intercambiadores de calor y sistema de generación de vapor sobrecalentado"

De esta manera se consigue que los gases de combustión mientras que se dirigen a la zona donde serán limpiados y habilitados para ser expedidos por la chimenea, cedan su calor para aprovecharla y producir energía eléctrica.

2.2 TECNOLOGÍAS DE ELIMINACIÓN DE NO_x: PRIMARIAS Y SECUNDARIAS

A la hora del tratamiento de NO_x, existen diversos métodos a través de los cuales podemos evitar, disminuir o eliminar la presencia de estos gases de efecto nocivo. Así pues, en función del momento de actuación, diferenciamos las tecnologías de eliminación de NO_x primarias y secundarias.

Relacionado con las tecnologías de eliminación primarias, encontramos aquellos métodos empleados con el fin de evitar una formación excesivamente mayor a la esperada de NO_x o una formación irregular de estos agentes contaminantes durante los procesos de combustión llevados a cabo. Estos métodos son el por ejemplo empleado en la parrilla de incineración mediante la inyección de gases por arriba y por debajo de la misma. De esta manera, controlando el exceso de aire y manteniendo una buena aireación de la zona se consigue evitar una sobre producción de NO_x a la vez que garantizas unas condiciones de combustión óptimas.

Acerca de las tecnologías secundarias de eliminación, tenemos la empleada en la planta de revalorización energética de Lincoln, la Reducción No Catalítica Selectiva (SNCR) y la Reducción Catalítica Selectiva (SCR). Ambas enfocadas en la reducción de los NO_x una vez ya formados con condiciones de operación y estructuras distintas y que en función del régimen de operación de la planta puede aportar rendimientos distintos.

En definitiva, ambas tecnologías son complementarias una de la otra y en ningún caso son excluyentes en ningún servicio regulado como el de la planta de Lincoln, ya que el mal funcionamiento de uno repercute directamente sobre el otro y puede producir grandes sanciones económicas además del impacto medioambiental y sobre la salud de la población que puede causar.

Es por ello por lo que un uso óptimo de ambas tecnologías, al igual que un correcto mantenimiento de los sistemas de ambas tecnologías juegan un papel clave en la operación de la planta.

2.3 REDUCCIÓN NO CATALÍTICA SELECTIVA (SNCR): FUNDAMENTOS DE OPERACIÓN Y PARÁMETROS CLAVE

La reducción no catalítica selectiva, en adelante SNCR fundamenta su operación en un principio relativamente sencillo. Se inyecta un agente reductor, normalmente una disolución de urea o amoníaco, en el caso del régimen de operación de la planta de Lincoln, este agente es amoníaco disuelto en agua al 25%, directamente en la corriente de gases de combustión en un punto donde la temperatura se sitúa de forma natural entre los ochocientos cincuenta y los mil grados centígrados. En esa ventana térmica el reactivo se descompone y genera radicales que reaccionan selectivamente con los óxidos de nitrógeno para convertirlos en nitrógeno molecular y vapor de agua, ambos inocuos. Fuera de esa banda de temperatura la reacción pierde eficacia de manera notable y, si la temperatura es demasiado baja, aparece el riesgo de que el amoníaco no reaccione y escape como amoníaco fugitivo, lo que compromete tanto el rendimiento de la denoxización como el cumplimiento de los límites de emisión y genera problemas de olores y de formación de incrustaciones u obstrucciones en los equipos aguas abajo. Por eso, uno de los aspectos críticos del diseño y de la operación de la SNCR es garantizar que la inyección se produzca exactamente en la zona donde los gases mantienen la temperatura adecuada y que la mezcla entre reactivo y gases es lo más homogénea posible.

Actualmente en la planta no hay un medidor exacto que nos permita saber de manera constante y con exactitud la eficiencia del sistema empleado, pero sabemos que por diseño y cuando las condiciones de operación lo permiten, esta es de entorno el 60% pudiendo llegar a rondar valores cercanos al 70% en casos muy puntuales de operación.

Por su parte, la reducción catalítica selectiva, SCR en adelante, introduce un catalizador sólido, generalmente a base de óxidos metálicos sobre una estructura de panal, a través del

cual se hace pasar la corriente de gases. Aguas arriba se inyecta amoníaco como agente reductor y la reacción tiene lugar sobre la superficie del catalizador a temperaturas mucho más moderadas, del orden de trescientos a cuatrocientos grados centígrados. Esto permite alcanzar eficacias de reducción de entre el ochenta y el noventa y cinco por ciento, manteniendo además muy bajo el deslizamiento de amoníaco. Ahora bien, esta mayor eficacia lleva aparejada una inversión inicial notablemente más elevada, tanto por el reactor como por el propio catalizador, que debe ser reemplazado periódicamente por envenenamiento o ensuciamiento. A ello se suma, en muchos diseños, la necesidad de recalentar los gases de escape para situarlos en la ventana de temperatura del catalizador, lo que penaliza el rendimiento energético global de la planta y, en consecuencia, su balance económico.

Capítulo 3. ESTADO DE LA CUESTIÓN

El sistema de tratamiento y los agentes reductores y contaminantes que se van a estudiar en el presente proyecto juegan un papel fundamental tanto para la planta como para la seguridad de las personas y entorno que rodea a la planta. Respecto a los agentes reductores, hay varios posibles compuestos a utilizar y emplearlos de distinta forma, por lo que es algo que merece ser tratado con meditación, pues una mala elección puede tener consecuencias muy negativas en la operación y resultados técnicos y económicos.

El cómo afectan estos agentes a la sociedad siendo emitidos sin control es algo que ya se ha estudiado y demostrado y de ahí, la importancia de encontrar un sistema que dosifique de la manera más eficiente su uso.

3.1 *IMPORTANCIA DE LA VIGILANCIA SOBRE EL NOX*

Los óxidos de nitrógeno (NO_x), generados en toda combustión en presencia de aire, constituyen una amenaza de primer orden para la salud y el medio ambiente. El NO_x provoca inflamación de las vías aéreas, afecciones cardiovasculares y mayor susceptibilidad a infecciones respiratorias, hasta el punto de que la OMS equipara la carga de enfermedad asociada a la contaminación atmosférica con la del tabaquismo. En el plano ambiental, los NO_x actúan como precursores de ozono troposférico, deposición ácida, eutrofización y smog fotoquímico.

La historia ofrece ejemplos contundentes de lo que ocurre cuando estas emisiones no se vigilan adecuadamente. La Gran Niebla de Londres de 1952, con miles de muertos, tuvo como desencadenante la transformación de SO₂ en ácido sulfúrico catalizada precisamente por el NO₂ presente en la niebla. El smog fotoquímico de Los Ángeles, cuyo primer gran episodio se remonta a 1943, demostró que los NO_x y los hidrocarburos de los vehículos generan bajo la luz solar oxidantes irritantes que colapsaron la ciudad. En Donora (Pensilvania, 1948), una inversión térmica atrapó las emisiones industriales causando

decenas de muertos y miles de afectados. La lluvia ácida que devastó bosques y lagos en Europa y Norteamérica durante los años setenta y ochenta confirmó el alcance transfronterizo del problema.

Cada uno de estos episodios impulsó avances legislativos fundamentales y dejó una enseñanza inequívoca: la vigilancia y el control de los NO_x resultan imprescindibles. Este escenario justifica el desarrollo de tecnologías como la SNCR y la SCR, que han encontrado una aplicación particularmente relevante en las plantas de valorización energética de residuos.

3.2 AGENTES REDUCTORES DISPONIBLES Y DIFERENCIA ENTRE ELLOS

A la hora de eliminar los óxidos de nitrógeno ya formados, la elección del agente reductor resulta determinante. Los dos reactivos que dominan el panorama industrial son el amoníaco y la urea, cada uno con un perfil de ventajas e inconvenientes que los hace más adecuados según el contexto.

El amoníaco puede emplearse en forma anhidra, en disolución acuosa, la empleada en la presenta planta o en fase gaseosa. La forma anhidra ofrece la máxima eficiencia y el menor coste de transporte, además de generar menos problemas de ensuciamiento y corrosión aguas abajo. Sin embargo, es una sustancia tóxica e inflamable, y su almacenamiento en cantidades superiores a diez toneladas somete a la instalación a normativas estrictas de accidentes graves. La disolución acuosa, por su parte, reduce drásticamente estos riesgos al eliminar el peligro de explosión y permitir el almacenamiento en condiciones atmosféricas, constituyendo un término medio entre eficacia y seguridad.

La urea presenta un perfil de seguridad difícilmente igualable: no es peligrosa, no es inflamable ni explosiva, y puede manipularse sin formación específica, lo que la convierte en la opción preferente por motivos de seguridad. Ahora bien, la urea no actúa directamente, sino que debe descomponerse térmicamente en amoníaco antes de reaccionar con los NO_x,

lo que la hace intrínsecamente menos efectiva. Además, su uso puede generar emisiones adicionales de óxido nitroso, mayor ensuciamiento y corrosión, y riesgo de obstrucción en las boquillas de inyección si la disolución se prepara con agua dura.

Con todo ello, es evidente que el uso del amoníaco en disolución acuosa aporta mayoritariamente todos los beneficios que los otros métodos de uso de amoníaco y el uso de urea y además representa menos riesgo para la operación, convirtiéndolo en el mejor uso de cara a cumplir la estricta regulación británica en términos medioambientales y de condiciones de operación segura en el sector laboral.

Capítulo 4. DEFINICIÓN DEL TRABAJO

El trabajo realizado se centra en torno al estudio, análisis y optimización del actual sistema de limpieza de los óxidos de nitrógeno generados a raíz de la combustión del residuo en la parrilla de incineración.

Este análisis es completamente pionero en la planta pues, aunque es de conocimiento general que el sistema a día de hoy no dosifica el amoníaco de manera correcta o como se espera que lo haga, no se ha hecho un análisis en detalle de este, pues, a fin de cuentas, aunque se sabe que hay un consumo excesivo de NH_3 , los valores de NO_x son correctos y no se opera cerca de los límites.

4.1 JUSTIFICACIÓN

A día de hoy, la manera de proceder con el sistema de denoxización en la planta consiste en que las 24 horas del día, un operario esté en la sala de control donde está el DCS desde la cual se pueden ver todos los valores de emisión de la planta en tiempo real y donde llega cualquier tipo de alerta o advertencia sobre posibles valores o dinámicas negativas de valores que pudiesen representar un riesgo para la operación segura en la planta.



Figura 4 "Representación visual del funcionamiento del proceso completo "

Es una vez que el operario detecta o bien que los valores de emisión de NO_x están incrementando, o bien que los valores de NH₃ que no reaccionan alcanzan valores inusualmente altos, cuando este ha de o bien internarse dentro de la planta o avisar a otro operario que esté en la parte de operación de la planta para que vaya al PLC personalmente para tocar o bien el límite de emisión deseable de NO_x o bien el límite máximo de emisión de NH₃, según cual haya sido el problema detectado en la sala de control. Esto lo convierte en un sistema semiautomático que da cabida al error humano y por tanto a un escenario en el que o bien nos excedemos del límite de NO_x o bien en el uso de NH₃.

El sistema de denoxización fue un sistema implantado en 2013 por la empresa YARA, a través de su filial en Gran Bretaña, YARA UK. Para aquel entonces, las condiciones de operación y previsiones tanto de entrada como de salida eran muy distintas a las condiciones actuales de operación. Ya en los primeros momentos de operación, allá por 2013, las condiciones reales de operación variaban de una manera notable respecto a algunos parámetros utilizados en los cálculos iniciales pre-operación. Sin embargo, con el paso de los años estas diferencias han ido incrementándose, hasta unas condiciones de operación que, tras más de 13 años, hay en la planta. Durante estos años la planta ha ido recibiendo modificaciones, arreglos y cambios de ciertos componentes importantes en el proceso, pero

el cambio más importante ha sido referido con el incremento de la cantidad total de residuos tratada por la planta anualmente. El incremento de la cantidad a tratar por la planta ha hecho aún más patentes las diferencias que existían ya desde un principio de los cálculos previos a la operación real y provoca que a día de hoy, el sistema denox de la planta necesite ser configurado manualmente por operarios de manera periódica para no exceder límites de emisión y a la vez no exceder en gran manera el empleo de NH₃.

4.2 OBJETIVOS

4.2.1 MEJORA ECONÓMICA

En base a lo anteriormente comentado, desde el primer momento que tuve conocimiento del problema que existía en la planta y que no se había tomado ninguna medida más allá de anotar el problema, dediqué la mayor parte de mi estancia a tratar de solucionar este problema, con el fin de optimizar el sistema de manera que se siguiese cumpliendo los límites de emisión para el NO_x pero se pudiese obtener un ahorro económico en el uso de NH₃ lo que iba a suponer un beneficio para la empresa y los alrededores de la planta.

4.2.2 MEJORA AMBIENTAL

Al comienzo, el enfoque del proyecto fue el de obtener un ahorro económico del uso de amoníaco, lo que permita aumentar los márgenes de beneficio de la explotación. Sin embargo, a medida que fui avanzando y progresando en el proyecto y conociendo más acerca de los beneficios que se obtienen de una correcta dosificación en el uso del NH₃, comprendí que estos beneficios también se verían reportados en la salud y bienestar de las personas que trabajan en el parque industrial en el que opera la planta, al igual que el entorno natural que abraza a todo este parque industrial.

4.2.3 MEJORA DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN

Otro de los objetivos, que además coincide con uno de los principales objetivos de FCC tanto aquí en Reino Unido como en todas sus operaciones a nivel mundial, era incrementar la seguridad en sus operaciones. Mediante el método expuesto a continuación, mi objetivo

además de los anteriormente comentados ha sido el de garantizar las condiciones de operación más seguras y autónomas posibles, siempre respetando la normativa vigente y unos parámetros de calidad muy altos, que son los que ofrece FCC a todos sus clientes a nivel global

4.3 PLANIFICACIÓN Y METODOLOGÍA

La metodología de trabajo seguida para la consecución de los objetivos ha constado de varias partes.

4.3.1 FASE DE ESTUDIO Y COMPRENSIÓN

Inicialmente, al llegar a la planta de Energy from Waste, partía de una base en la que, a pesar de conocer las bases de la operación de este tipo de plantas durante un año de prácticas extracurriculares en la sede central de FCC en España, nunca había estado en contacto con ellas, pues en España la revalorización energética no es un método muy comúnmente empleado ni que cuente con apoyo desde las instituciones públicas. Es por ello, por lo que durante las primeras semanas lleve a cabo un estudio integral de la planta, incluyendo aquellas partes no relacionadas con la denoxización llegando incluso a visitar otras plantas de Energy from Waste y participando en reuniones entre los operarios para conocer más acerca del funcionamiento previsto y real de la planta.

4.3.2 ANÁLISIS Y COMPRENSIÓN

Tras estas primeras semanas, comencé a comprender mejor acerca de este funcionamiento y comencé a enfocarme más en la denoxización, con el fin de comprender de una manera más amplia y detallada el cómo debería funcionar, como funcionaba realmente y que era aquello que hacía que el sistema no funcionase como estaba previsto. Para ello comencé a exportar cantidades masivas de datos desde el DCS de la planta para analizar el comportamiento histórico de la planta a raíz de detectar patrones de funcionamiento, anomalías en la operación y comprender en un entorno más numérico cómo y por qué sucedían ciertos escenarios en los que el funcionamiento de la denoxización era poco o nada óptimo. Además

de todo ello, y gracias a los operarios de la planta, pude ver y comprender el funcionamiento del software que permite y rige la lógica de funcionamiento automático del sistema denox. Pude ver los diagramas de bloques, variables y la arquitectura del programa con el fin de poder sentar las bases para una futura modificación.

4.3.3 PROPUESTA Y EJECUCIÓN DE SOLUCIONES

Finalmente, tras analizar datos e identificar patrones en los que mejorar el funcionamiento, implementé soluciones numéricas y lógicas con las que poder actuar justamente de una manera efectiva en estos casos. Esto conllevó una gran complejidad, pues este paso consistió en conseguir mediante prueba y error, que una serie de valores y órdenes en la lógica de operación se aplicasen solo cuando se cumpliesen unas condiciones muy concretas en la operación del sistema. A todo ello, sumado a que debido a la falta de sensores que pudiesen facilitar una mayor comprensión de por qué fallaban algunas soluciones propuestas, provocó que este paso fuese de extrema complejidad.

Tras las complejidades experimentadas y tras alcanzar las soluciones expuestas más adelante y obtener el visto bueno por parte de los responsables de operación de la planta de Lincoln, comenzamos a implementar las modificaciones planteadas y observar el efecto de estos cambios en el comportamiento del sistema.

Capítulo 5. SISTEMA/MODELO DESARROLLADO

El desarrollo, implantación y funcionamiento del proyecto ha constado de varias etapas y ha sido un proceso cuyo desarrollo ha sido meticuloso y por ello en ciertos momentos ha sufrido demoras dado a que otras operaciones necesarias en la planta se anteponían al mismo.

A la vez dadas las limitaciones de sensores y personal en la planta ha habido ciertas partes que han tenido que ser modificadas o han sufrido demoras y no han podido ser implementadas a tiempo, pero sí que se mostrarán resultados experimentales de lo que se esperaba obtener de haber podido ser implementado y en un futuro se espera implementar en la planta de Lincoln.

5.1 ANÁLISIS DEL SISTEMA

El actual control de inyección de NH_3 de la planta de Energy from Waste de Lincoln se rige por un sistema PID. Este control PID obtiene información desde el DCS acerca de los valores de emisión en la chimenea, combustión en la parrilla y funcionamiento general de la planta, como puede ser valores de temperatura en el tejado de la caldera, valores de presión en distintas partes del proceso y posibles alarmas por fugas o roturas.

5.1.1 CONTROL EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA

Al ser el NO_x un compuesto, cuya formación depende altamente de la temperatura y del oxígeno en la que se dé la reacción de combustión, el PLC permite al operario fijar manualmente unos valores máximos de inyección tanto de NH_3 como de H_2O en función de la temperatura medida en el tejado de la caldera.

Este sistema permite hasta 8 posibles ventanas de operación, en las cuales, en función del rango de temperatura que nos encontremos se podrá fijar un valor máximo de inyección de NH_3 , un valor de inyección de H_2O y el nivel de inyección del NH_3 .

Al igual que en la formación del NO_x, la eficiencia del NH₃ inyectado dependerá en gran medida de la temperatura a la cual se inyecta. Esta temperatura dependerá en gran medida del valor de temperatura medido en el tejado de la caldera. A pesar de ello, debido a la falta de sensores en los niveles de inyección se desconoce el valor exacto de la temperatura a la cual se inyecta la solución de amoníaco con agua.

El sistema denox dispone de 8 posibles boquillas de inyección, las cuales son colocadas a distintos niveles equitativamente para poder inyectar en un nivel o en otro según convenga dependiendo de la temperatura medida. En un principio, se dispondría de cuatro posibles niveles de inyección cada uno con cabida para cuatro boquillas por nivel. En la actualidad, debido a la corrosión hay dos disponibles (los usados habitualmente) ya que los otros dos, el inferior y el superior, son niveles que apenas han sido empleados durante la operación histórica de la planta. De esta manera mediante el panel configurable del PLC se puede seleccionar que boquillas operan en qué nivel según que temperatura, de manera que inyecten la cantidad de agua deseada y una cantidad máxima de NH₃ que será regulada por el control PID.

La pantalla de operación del PLC también permite fijar un valor de histéresis que será los grados que se desea que se mantengan los niveles de operación, aunque estén fuera de su rango de temperatura.

5.1.2 PRESENT Y SETPOINT VALUES (SP Y PV)

A raíz de esos valores obtenidos desde el DCS, el cual es nutrido directamente por los sensores colocados meticulosamente en cada punto de operación de la planta, se obtienen lo que se conoce como Present Values. Estos valores serán los que le indican al control de denoxización, cuanto NO_x se está emitiendo por la caldera y cuanto amoníaco está quedando sin utilizar.

Aparte de estos valores, el sistema permite al operario que maneja manualmente el PLC fijar los valores en torno a los cuales desea que la emisión de NH₃ y NO_x se muevan. Estos valores fijados manualmente por un operario se conocen como Set Point Value (SP) y fijan

el objetivo de operación del sistema de denoxización. Es de entender que estos Set Point Values han de ser inferiores siempre a los límites de operación impuestos por las autoridades competentes y servirán de guía al sistema de inyección de NH_3 para suministrar mayor o menor dosis de NH_3 .

Con los valores SP fijados, estos actuarán a modo de factor de corrección para los valores PV. En función del valor PV, el sistema PID fijará un factor de corrección u otro que puede variar entre 0 y 1, siendo mayor para cuando el sistema detecte que se está emitiendo demasiado NO_x y bajo NH_3 o menor para el caso contrario.

5.1.3 LÓGICA DE OPERACIÓN

Cada módulo de mezcla cuenta con dos reguladores de flujo, uno para el agente reductor y otro para el agua. En la línea de combustión se dispone de dos reguladores de emisiones, uno para el NO_x y otro para el deslizamiento de NH_3 (NH_3 slip).

La función de los reguladores de flujo es controlar el caudal conforme a la receta, a través del regulador de NO_x o del regulador de NH_3 slip.

La función del regulador de NH_3 es controlar el deslizamiento de amoníaco. Si el deslizamiento de NH_3 supera el valor de consigna (SP), el regulador reduce la cantidad de agente reductor. El regulador de NH_3 slip es prioritario frente al regulador de NO_x .

La función del regulador de NO_x es controlar el nivel de óxidos de nitrógeno. Cuando el nivel se sitúa por debajo del valor de consigna, el regulador compensa disminuyendo la cantidad de agente reductor calculada por la receta.

Tanto el regulador de NO_x como el de NH_3 slip funcionan a modo de freno; nunca aumentarán la cantidad de agente reductor fijado en la receta.

5.2 PRINCIPALES INCONVENIENTES DETECTADOS

De lo anteriormente comentado, a la hora de realizar el proyecto y tratar de proponer soluciones innovadoras, he ido encontrando distintos contratiempos e inconvenientes respecto a lo que tuviese planteado en un primer momento.

Inicialmente comencé tratando de identificar una receta óptima para configurarla en la pantalla del DCS. Esta receta en un principio estaría optimizada para usar distintos niveles de inyección con valores de NH₃ que variarían dependiendo de la temperatura y nivel de inyección.

5.2.1 TEMPERATURAS DE OPERACIÓN

El primer inconveniente a la hora de tratar de optimizar la receta se encontraba en la temperatura exacta de inyección del NH₃. Este inconveniente tenía su origen en que la planta disponía del primer sensor de temperatura en el tejado de la caldera y no se sabía el grado de temperatura en cada nivel de inyección, por lo que la variabilidad a la hora de inyectar en un punto o en otro y según el momento de operación podía variar considerablemente.

Es por ello por lo que, gracias a los operarios de la planta, conseguimos introducir un termómetro especial en ambos agujeros de inyección mediante lo cual pudimos medir la temperatura a modo de prueba anotando la medida de temperatura en el tejado y la medida de temperatura en cada nivel en el mismo instante. Con ello, a pesar de seguir sin disponer de una medida exacta en cada momento de la operación pudimos llevar a cabo una estimación de la temperatura en cada punto ya que hasta ese momento usamos estimaciones basadas en el diseño de la caldera, que estaban extremadamente alejadas de lo que comprobamos con la inyección del termómetro.

Sumado a este problema y sin abandonar las temperaturas, se añadía el no saber la temperatura exacta a la que combustionaban los residuos. Esto producía que a la hora de hacer aproximaciones este último valor que marcaría el límite máximo de la aproximación fuese una incógnita y que hubiese que recurrir a condiciones de diseño y adaptarlas las

mismas a la operación actual para poder tratar de despejar la incógnita y poder aumentar la precisión de la aproximación.

5.2.2 PRODUCCIÓN DE NO_x INICIAL

Otro gran inconveniente fue el no saber cuánto NO_x se está generando en cada momento. El diseñar un sistema que tiene que hacer frente a una cantidad de contaminante de la cual no sabemos su comportamiento hasta que no llega al punto final del proceso, fue algo que ha causado grandes problemas y ha incrementado en gran medida la complejidad del asunto. A pesar de este gran problema, fue algo por lo que opte por dedicarme a este proyecto, pues el hecho de despejar o por lo menos tratar de predecir de una manera aproximada con cierta precisión esta incógnita sería algo que proporcionaría a este proyecto un gran impacto en el sistema de denoxización. Además de ello, el no conocer la temperatura de combustión nos dificultaba los cálculos para aproximar la cantidad de NO_x que se producía en cada momento.

5.2.3 COMPOSICIÓN DEL RESIDUO

Un hecho que provoca que a pesar de crear el sistema perfecto de denoxización, siempre haya un factor impredecible y que pueda causar picos en la emisión e inyección de NH₃ o NO_x es el hecho de que se quema residuo urbano. Un método que en España sí se aplica y que podría ayudar a reducir esta componente sería el hecho de hacer un proceso de pretratamiento del residuo recibido separando de los residuos de entrada fracciones plásticas o metálicas que pudiesen ser de utilidad tanto para el reciclaje o para ser reutilizadas. Esto provocaría que el residuo quemado finalmente en la parrilla fuese más homogéneo y provocaría menor variabilidad en la cantidad de NO_x producido y por tanto menor variabilidad en la lectura de valores de este en el analizador que sería lo que provocaría picos y sobresaltos en la inyección de NH₃

5.3 SOLUCIÓN PROPUESTA

Basándome en la información anterior y en los medios disponibles en la planta de Energy from Waste de Lincoln, he diseñado una mejora del control PID junto con una receta optimizada para reducir al máximo el uso de NH_3 , lo que supone un importante ahorro económico, a la vez que se aprovecha mucho mejor el reactivo inyectado. Todo ello respetando y garantizando que nunca se superen los límites de emisión y permitiendo una operación más automática y segura.

La clave del nuevo enfoque está en adelantarse a la medida, no en perseguirla. El control deja de apoyarse en la lectura instantánea que llega al final del proceso, en chimenea, para pasar a basarse en datos recogidos antes de la inyección, respaldados por patrones de comportamiento observados y por el propio diseño de la caldera. Esa inmediatez de lo que se mide al final pierde terreno frente a la capacidad de anticipar lo que va a ocurrir. Como el retardo entre la inyección de NH_3 y la emisión de los gases es muy grande, en lugar de una medida final instantánea utilizaremos la media de los últimos 30 minutos de operación. De este modo, la corrección se calcula sobre una señal que sí representa el verdadero comportamiento del sistema —no sobre un valor puntual desfasado— y la inyección se vuelve mucho más estable, eficiente y respetuosa con los límites.

Esta forma de trabajar nos permite reaccionar a lo que realmente está sucediendo dentro del hogar de la caldera, sin esperar a que el pico de emisión ya se haya producido. Al conocer de antemano cómo responde el proceso ante cambios de carga, variaciones del combustible o ajustes del aire de combustión, podemos ajustar la cantidad de NH_3 exactamente cuándo se necesita, ni antes ni después. Así se evitan tanto los excesos como los periodos en los que la dosificación se queda corta, y la inyección pasa a ser una acción preventiva y suave, en lugar de una carrera a ciegas contra un valor que llega cuando la situación ya ha cambiado. El resultado es un uso mucho más inteligente del reactivo: menos consumo, mayor seguridad frente a los límites de emisión y una operación global más tranquila y automática para la planta.

5.3.1 OBTENCIÓN Y PRETRATAMIENTO DE DATOS

En primera instancia el método utilizado ha sido el de extraer cantidades masivas de datos para su correcto tratamiento y posterior análisis. Para este paso he extraído de la base de datos del DCS, los valores registrados en un intervalo de 5 minutos desde enero de 2020 hasta abril de 2026 referentes a el valor de NOx medido en la chimenea en mg/Nm³, el valor de slip de NH₃ (El NH₃ final que no ha reaccionado de la reacción de denoxización) en mg/Nm³, las Tn/h de residuos introducidos en la parrilla de incineración, la inyección en L/h de NH₃, el present value en % de O₂ medido en la caldera, el setpoint value en % de O₂ medido en la caldera, el valor de la temperatura del tejado de la caldera en grados centígrados y la caudal total de gases expedidos por la chimenea Nm³/h.

Con todo ello he obtenido una cantidad masiva de datos los cuales representaban el comportamiento de la planta y recogían los distintos puntos de operación y situaciones que se han ido dando en la misma. En base a ello he ido limpiando los datos para descartar momentos en los que la operación de la planta se ha visto pausada o modificada por parones de mantenimiento o roturas de equipos, ya que estos momentos no representaban puntos de operación reales. Tras ello he llevado a cabo distintos análisis y cálculos con el fin de estimar las mejores opciones para reducir el NH₃ inyectado y mantener o incluso reducir los niveles de NOx expedidos.

5.3.2 PRIMERA OPERACIÓN

El primer factor de corrección estará basado en los valores de diseño de la planta. Mediante esta primera corrección trataremos de identificar el punto de operación en el que nos encontramos (de una manera aproximada) para saber si debemos incrementar o reducir la dosis de NH₃. Esto es basado en que a pesar de que la cantidad de NOx depende mucho de la temperatura y el oxígeno, otro componente es el residuo y cuanto de este se está quemando en cada momento. Es por ello por lo que en esta primera operación nos basamos en un documento de diseño de la planta en el que establece el régimen de operación nominal en un valor de temperatura y residuo introducido por hora y diferencia un régimen de operación un 10% superior al nominal y otro punto de operación un 15% inferior.

Es basándonos en ello en lo que se ha determinado la siguiente operación con la finalidad de determinar que factor de corrección se aplica en cada caso:

$$T_{ROOF} * Tn/h_{INTRODUCIDOS} \begin{cases} > 873 * 21,125 \rightarrow Fc = 1,025 \\ > 877 * 19,24 \rightarrow Fc = 1 \\ \leq 877 * 19,24 \rightarrow Fc = 0,95 \end{cases}$$

- **TROOF:** Temperatura medida en el tejado de la caldera
- **Tn/h INTRODUCIDOS:** Kilos de residuo introducidos por hora

Mediante este método tratamos de adaptar el uso de NH₃ a la escala de operación en la que nos encontramos, por lo que evitaremos usar demasiado NH₃ en situaciones en las que a pesar de tener valores altos de temperatura no se esté introduciendo mucho residuo y por tanto no haya compuesto que genere el NO_x.

Llevando este control a lógica de operación e incluyendo aquellos sensores reales que se emplearán para poder implementar el control planteado, el diagrama de bloques inicial que se seguiría sería el siguiente:

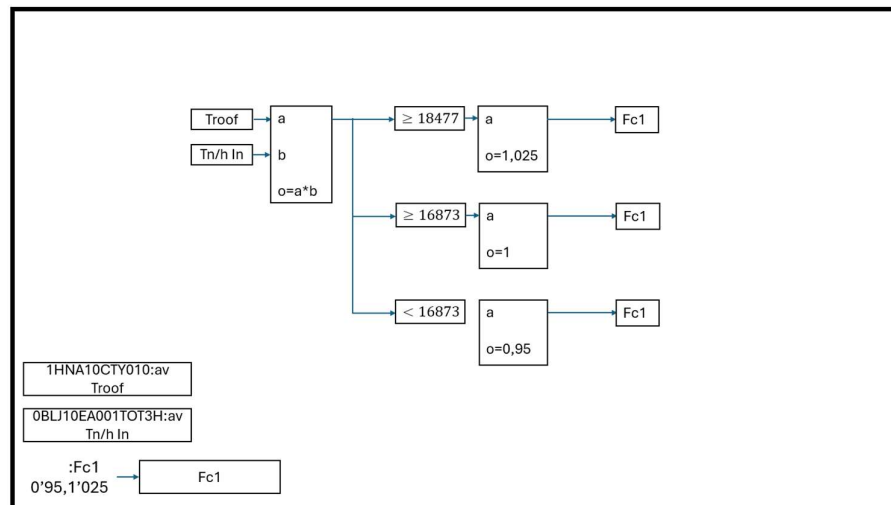


Figura 5 "Diagrama de bloques del primer factor de corrección de la dosis de NH₃ basado en el régimen de operación de la caldera (temperatura y toneladas entrantes)"

Como se puede apreciar no son valores grandes de corrección pues, aunque para más del 90% de los casos se pudiese incrementar estos factores de corrección, el control diseñado ha de cumplir las 24 horas los 365 días del año con las restricciones de emisión y se prima la operación segura y autónoma cerciorándonos de que no se sobrepasan los límites de emisión y minimizando la necesidad en operación por parte de un operario.

5.3.3 SEGUNDA OPERACIÓN

En este caso el factor de corrección aplicado vendrá determinado por la concentración de O₂ en la caldera en el momento y lugar de la combustión. La caldera, como ya se explicó en capítulos anteriores, dispone de un sistema que inyecta aire por arriba y por debajo del fuego para controlar la combustión, garantizando que la quema del residuo es correcta y tratando de minimizar la producción de NO_x.

Para el control del % de O₂ en la parrilla de combustión, se sigue un sistema un tanto similar al actual proceso de denoxización. El operario desde el DCS de la sala de control fija un valor de Set Point en % de O₂ el cual el sistema de inyección de aire ha de respetar. De esta manera los sopladores inferiores y superiores inyectan aire en mayor o menor cuantía dependiendo del % de O₂ en la caldera. De esta manera se garantiza que el % de O₂ en la caldera se moverá en una ventana próxima a la del Set Point de manera que se garantizan unas condiciones de quemado relativamente estables.

Sin embargo, en la realidad, el Present Value del % O₂ varía mucho en el régimen transitorio y dependiendo de su valor se observan picos de NO_x y NH₃ slip dependiendo de si este valor alcanza valores máximos o mínimos. En concreto, el Present Value de % de O₂ puede variar un 25% tanto arriba como abajo del Set Point en un régimen normal y controlado de operación llegando a poder verse aumentado estos márgenes dependiendo de si ocurren contratiempos y según los residuos introducidos y la temperatura producida. Toda esta variación en el valor de O₂ se ve traducida en una gran variación del NO_x leído a final del proceso, así como variación en el slip de NH₃. Una mayor concentración de O₂ de la debida se traduce generalmente en un incremento del NO_x producido, así como un incremento del

slip de NH₃, mientras que cuando ese valor es inferior al Set Point, generalmente obtenemos menores valores de NO_x, así como de NH₃ Slip.

En base a lo anterior, he llevado a cabo el diseño de este segundo factor de corrección mediante el cual trato de ajustar en tiempo real el valor de NH₃ inyectado:

$$O_{2(PV)} \geq O_{2(SP)} \rightarrow Fc = 1 - \left(\frac{O_{2(PV)}}{O_{2(SP)}} - 1 \right) * 0,5 \begin{cases} > 0,85 \rightarrow Fc = 1 - \left(\frac{O_{2(PV)}}{O_{2(SP)}} - 1 \right) * 0,5 \\ \leq 0,85 \rightarrow Fc = 0,85 \end{cases}$$

$$O_{2(PV)} < O_{2(SP)} \rightarrow Fc = 1 + \left(1 - \frac{O_{2(PV)}}{O_{2(SP)}} \right) * 0,5 \begin{cases} < 1,03 \rightarrow Fc = 1 + \left(1 - \frac{O_{2(PV)}}{O_{2(SP)}} \right) * 0,5 \\ \geq 1,03 \rightarrow Fc = 1,03 \end{cases}$$

- **O_{2SP}**: Valor en % de O₂ medidos en parrilla que se busca mantener.
- **O_{2PV}**: Valor en % de O₂ medidos en parrilla reales.

De la misma manera que para la operación anterior, se ha diseñado un diagrama aproximado de los bloques que habría que introducir para conseguir esta operación en la planta. Se incluye también el nombre de sensores reales de la planta que entrarían a formar parte del sistema:

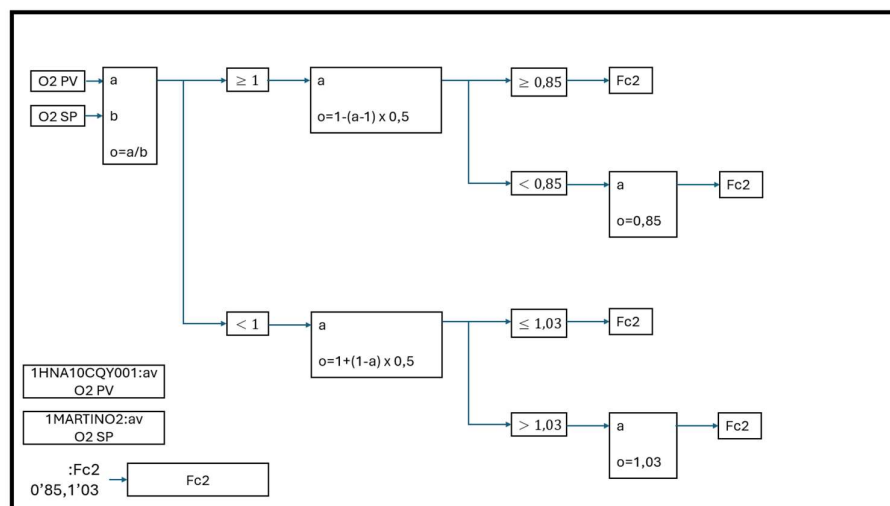


Figura 6 "Diagrama de bloques del segundo factor de corrección de la dosis de NH₃ basado en la concentración de O₂ en la caldera"

Mediante este método lo que se pretende hacer es aprovechar aquellos momentos en los que el slip de NH₃ es menor dada la reducción de O₂ e inyectar mayor cantidad de NH₃ y minimizar la inyección de NH₃ en aquellos momentos en los que la cantidad de Slip pueda ser mayor. A pesar de registrar mayores valores de NO_x en los momentos de mayor % de O₂, esto es algo que veremos que se puede solucionar con el tercer factor de corrección para casos en los que se mantenga constante ese valor alto de O₂ y necesitemos inyectar NH₃ para no exceder los límites de emisión

5.3.4 TERCERA OPERACIÓN

Por último y siendo este el más importante de todos los anteriormente comentados, tenemos el factor de corrección basado en la emisión que se está registrando. Este factor de corrección estará basado en una nueva variable introducida en el sistema que será la media de 30 minutos registrada de NO_x. Mediante la introducción de esta nueva variable, el sistema tendrá un mejor control de cuanto NO_x se está emitiendo de una manera más rápida y se podrá regular la dosis para garantizar que no excedemos los límites de emisión, pero a la vez no se usa el amoníaco de una manera completamente ineficiente. Con la introducción de esta variable y, por ende, de este nuevo factor de corrección se trata de movernos en un rango de

emisión de NOx que tal vez pueda ser más alto que en el que nos movemos actualmente pero siempre garantizando que no excedemos valores que puedan quedarse altos o cercanos a los límites. De esta manera reduciremos el NH3 utilizando el necesario en todo momento para asegurar un régimen de operación en el que el valor de NOx emitido sea correcto, pero no extremadamente bajo, lo que conlleva un sobre coste por un uso superior al necesario de NH3, ni extremadamente alto, lo que supondría una sanción por exceder los límites. Con todo ello, el factor de corrección aplicado en este último control sería el siguiente:

$$\text{Media de 30 min de NOx:} \left\{ \begin{array}{l} = 0 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3} \rightarrow Fc = 1 \\ < 145 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3} \rightarrow Fc = 0,7 \\ < 155 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3} \rightarrow Fc = 0,8 \\ < 165 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3} \rightarrow Fc = 0,9 \\ < 175 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3} \rightarrow Fc = 1 \\ < 185 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3} \rightarrow Fc = 1,15 \\ \geq 185 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3} \rightarrow Fc = 1,25 \end{array} \right.$$

A pesar de todo ello y para evitar incurrir en medidas erróneas y momentos en los que esta media de 30 minutos incluya puntos de operación incorrectos o que no sean realmente normales, se ha incluido un control para que la media solo se registre si durante las 12 horas previas se han registrado de manera continuada valores de NOx superiores a 50 mg/Nm³. En caso de registrar un valor inferior en alguna de las medidas durante 12 horas anteriores, el valor de la media se reiniciará automáticamente y proporcionará el valor de 0 hasta que no reciba valores validos de manera continuada durante 12 horas.

Para proporcionar una perspectiva visual de lo comentado, se ha preparado un diagrama de bloques incluyendo los nombres de sensores que entrarían a formar parte del sistema, lógica y la operación que se llevaría a cabo:

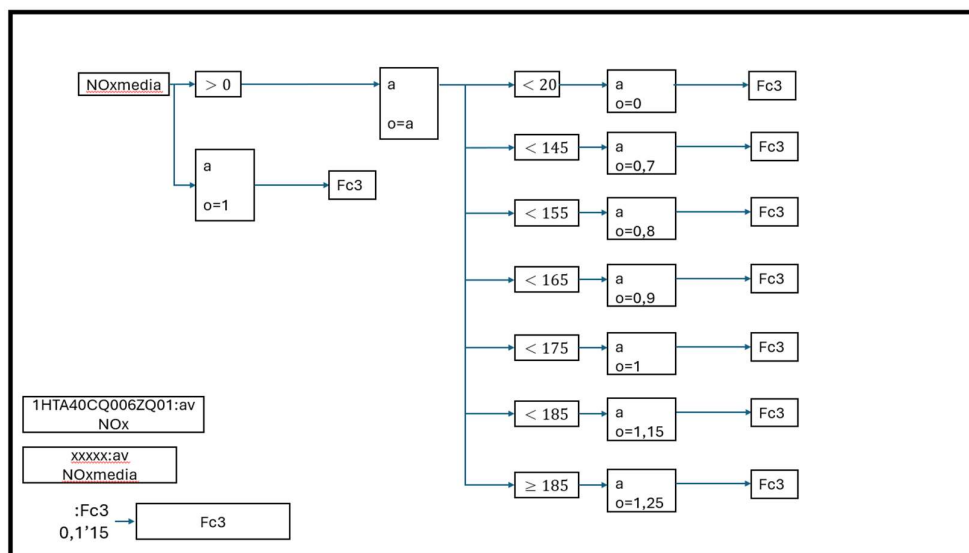


Figura 7 "Diagrama de bloques del tercer factor de corrección de la dosis de NH₃ basado en la media móvil de 30 minutos de las emisiones de NOx"

Con todo lo anterior expuesto y explicado, la operación final que daría lugar a la salida del sistema y por tanto sería el factor final de corrección que regularía la dosificación del sistema de inyección de NH₃ en la planta de EfW de Lincoln sería tal que así:

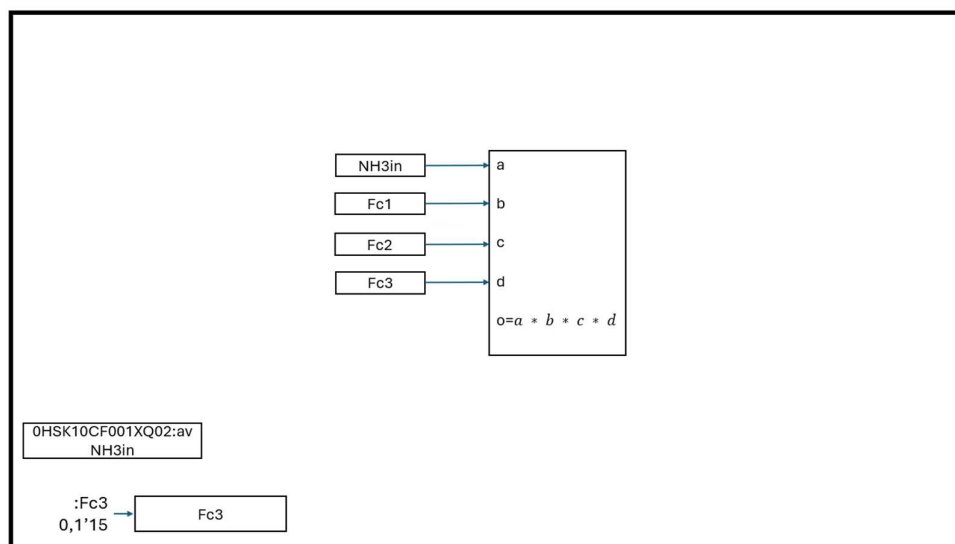


Figura 8 "Esquema de la operación final de combinación en cascada de los tres factores de corrección para obtener la señal de dosificación del sistema de inyección de NH₃"

The diagram illustrates the fuzzy inference engine for the water control system, showing the flow of data from sensors through various fuzzy inference blocks to produce a final output.

WATER CONTROL

REDUCTION AGENT CONTROL

Fuzzy Inference Rules:

- <20=0
- <145=0.7
- <155=0.8
- <165=0.9
- <175=1
- <185=1.15
- >185=1.25

Fuzzy Inference Process Table:

Rule	IF	THEN	Output
1	SP	SP	SP
2	SP	SP	SP
3	SP	SP	SP
4	SP	SP	SP
5	SP	SP	SP
6	SP	SP	SP
7	SP	SP	SP
8	SP	SP	SP
9	SP	SP	SP
10	SP	SP	SP
11	SP	SP	SP
12	SP	SP	SP
13	SP	SP	SP
14	SP	SP	SP
15	SP	SP	SP
16	SP	SP	SP
17	SP	SP	SP
18	SP	SP	SP
19	SP	SP	SP
20	SP	SP	SP
21	SP	SP	SP
22	SP	SP	SP
23	SP	SP	SP
24	SP	SP	SP
25	SP	SP	SP
26	SP	SP	SP
27	SP	SP	SP
28	SP	SP	SP
29	SP	SP	SP
30	SP	SP	SP
31	SP	SP	SP
32	SP	SP	SP
33	SP	SP	SP
34	SP	SP	SP
35	SP	SP	SP
36	SP	SP	SP
37	SP	SP	SP
38	SP	SP	SP
39	SP	SP	SP
40	SP	SP	SP
41	SP	SP	SP
42	SP	SP	SP
43	SP	SP	SP
44	SP	SP	SP
45	SP	SP	SP
46	SP	SP	SP
47	SP	SP	SP
48	SP	SP	SP
49	SP	SP	SP
50	SP	SP	SP
51	SP	SP	SP
52	SP	SP	SP
53	SP	SP	SP
54	SP	SP	SP
55	SP	SP	SP
56	SP	SP	SP
57	SP	SP	SP
58	SP	SP	SP
59	SP	SP	SP
60	SP	SP	SP
61	SP	SP	SP
62	SP	SP	SP
63	SP	SP	SP
64	SP	SP	SP
65	SP	SP	SP
66	SP	SP	SP
67	SP	SP	SP
68	SP	SP	SP
69	SP	SP	SP
70	SP	SP	SP
71	SP	SP	SP
72	SP	SP	SP
73	SP	SP	SP
74	SP	SP	SP
75	SP	SP	SP
76	SP	SP	SP
77	SP	SP	SP
78	SP	SP	SP
79	SP	SP	SP
80	SP	SP	SP
81	SP	SP	SP
82	SP	SP	SP
83	SP	SP	SP
84	SP	SP	SP
85	SP	SP	SP
86	SP	SP	SP
87	SP	SP	SP
88	SP	SP	SP
89	SP	SP	SP
90	SP	SP	SP
91	SP	SP	SP
92	SP	SP	SP
93	SP	SP	SP
94	SP	SP	SP
95	SP	SP	SP
96	SP	SP	SP
97	SP	SP	SP
98	SP	SP	SP
99	SP	SP	SP
100	SP	SP	SP

Con el esquema anterior se establece el diagrama inicial mediante el cual se tratará de implementar los controles propuestos. Cada caja con el fondo negro son los controles diseñados que operarán con los valores recibidos y darán un valor u otro en función del resultado obtenido. Las celdas blancas con bordes oscuros simbolizan lecturas de sensor directamente recibidas desde el DCS de la planta, estos valores son sensores y por tanto entradas que ya están en operación a excepción de la media de 30 minutos de los valores de NOx emitidos, el SP de O2 y las Tn/h entrantes a la parrilla. Para introducir todas estas

variables se ampliará el profibus existente creando nuevas direcciones donde se guardará la información del DCS y se enviará al programa para medir con precisión las variaciones del sistema.

A continuación, se adjunta una imagen del menú que gestiona el intercambio de datos. En ella se observa que las variables nuevas introducidas al sistema para poder leer la medida en el programa aparecen remarcadas de naranja mientras que las ya existentes no. También vemos información sobre las unidades de medida, los valores máximos, mínimos, el sentido de la información y la dirección KKS que es donde se almacena la información desde el DCS para entregarla al programa:

SNCR	Signal	KKS	SCADA	Raw Zero	Raw Span	Min	Max	Eng unit	Signal Type	Remarks	Tested/Sign/D	Observation
PIWS00.0	Start SNCR	0CMH10EA001-YB02	In=0.0						Bool 5s Pulse	To SNCR from customer	(DCS-test)*	
PIWS00.1	Stop SNCR	0CMH10EA001-YB20	In=0.1						Bool 5s Pulse	To SNCR from customer		
PIWS00.2	Reset SNCR	0CMH10EA001-YB15	In=0.2						Bool 5s Pulse	To SNCR from customer		
PIWS00.3	Boiler running	0CMH10EA001-YB09	In=0.3						Bool	To SNCR from customer		
PIWS00.4	Fast Stop SNCR	0CMH10EA001-YB20	In=0.4						Bool 5s Pulse	To SNCR from customer		
PIWS00.5			In=0.5						Bool	To SNCR from customer		
PIWS00.6			In=0.6						Bool	To SNCR from customer		
PIWS00.7			In=0.7						Bool	To SNCR from customer		
PIWS01.0			In=1.0						Bool	To SNCR from customer		
PIWS01.1			In=1.1						Bool	To SNCR from customer		
PIWS01.2			In=1.2						Bool	To SNCR from customer		
PIWS01.3			In=1.3						Bool	To SNCR from customer		
PIWS01.4			In=1.4						Bool	To SNCR from customer		
PIWS01.5			In=1.5						Bool	To SNCR from customer		
PIWS01.6			In=1.6						Bool	To SNCR from customer		
PIWS01.7	Watchdog	0CMH10EA001-YB78	In=1.7						Bool 1s	To SNCR from customer		
PIWS02	NOx	0CMH10EA001A-YQ02	PIW n=2	0	32767	0	600	mg/m3n wet	INT	To SNCR from customer		
PIWS04	NH3-slip	0CMH10EA001B-YQ02	PIW n=4	0	32767	0	50	mg/m3n wet	INT	To SNCR from customer		
PIWS06	Total steam flow	0CMH10EA001C-YQ02	PIW n=6	0	32767	0	60	t/h	INT	To SNCR from customer		
PIWS08	Temp	0CMH10EA001D-YQ02	PIW n=8	0	32767	0	250	C	INT	To SNCR from customer		
PIWS10	CO	0CMH10EA001E-YQ02	PIW n=10	0	32767	0	150	mg/m3n wet	INT	To SNCR from customer		
PIWS12	O2	0CMH10EA001F-YQ02	PIW n=12	0	32767	0	20	%	INT	To SNCR from customer		
PIWS14	Tmsh	0CMH10EA001G-YQ02	PIW n=14	0	32767	0	29	tn/h	INT	To SNCR from customer		
PIWS16	O2SP	0CMH10EA001H-YQ02	PIW n=16	0	32767	0	7	%	INT	To SNCR from customer		
PIWS18	NOx30av	0CMH10EA001I-YQ02	PIW n=18	0	32767	0	600	mg/m3n wet	INT	To SNCR from customer		
PIWS20			PIW n=20						INT	To SNCR from customer		
PIWS22			PIW n=22						INT	To SNCR from customer		
PIWS24			PIW n=24						INT	To SNCR from customer		
PIWS26			PIW n=26						INT	To SNCR from customer		
PIWS28			PIW n=28						INT	To SNCR from customer		
PIWS30			PIW n=30						INT	To SNCR from customer		
Q500.0	PMW Pump 1 running	0GTC10AP001-XB27	Q n=0.0						Bool	From SNCR to customer		
Q500.1	PMW Pump 2 running	0GTC10AP002-XB27	Q n=0.1						Bool	From SNCR to customer		
Q500.2	PMW A Alarm	0GTC10GH001A-XM79	Q n=0.2						Bool	From SNCR to customer		
Q500.3	PMW B Alarm	0GTC10GH001B-XM79	Q n=0.3						Bool	From SNCR to customer		601-High priority
Q500.4	PMR Pump 1 running	0HSK10AP001-XB27	Q n=0.4						Bool	From SNCR to customer		401-Low priority
Q500.5	PMR Pump 2 running	0HSK10AP002-XB27	Q n=0.5						Bool	From SNCR to customer		
Q500.6	PMR A Alarm	0HSK10GH002A-XM79	Q n=0.6						Bool	From SNCR to customer		601-High priority
Q500.7	PMR B Alarm	0HSK10GH002B-XM79	Q n=0.7						Bool	From SNCR to customer		401-Low priority

Figura 10 "Menú de intercambio de datos entre el DCS y el PLC con indicación de las variables nuevas incorporadas (en naranja), unidades de medida, rangos y direcciones KKS"

Respecto al cuadro gris grande que se ve en la esquina superior izquierda, corresponde a la receta introducida en el momento y refleja como en función del nivel se da un valor de inyección de agua que corresponde a la línea superior y otro valor de NH3, línea inferior.

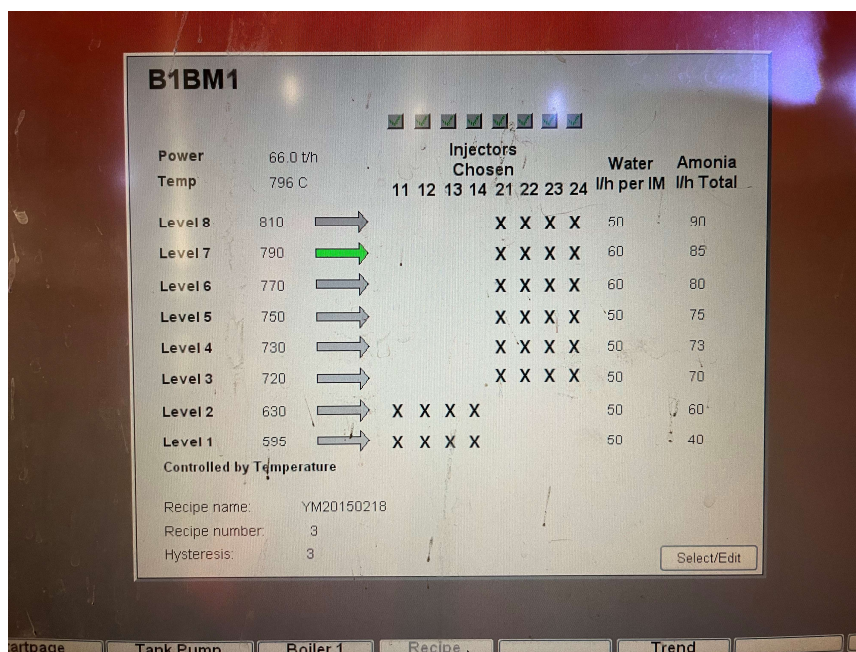


Figura 11 . "Vista del dashboard del PLC de la planta de Lincoln con la receta de inyección activa y los niveles configurados de NH₃ y H₂O"

En la foto mostrada, la cual es tomada directamente del PLC de la planta de Lincoln, se observa toda la información perteneciente al dashboard del mismo. En la opción de "Edit" se puede cambiar cualquier valor numérico de los que aparece en la pantalla.

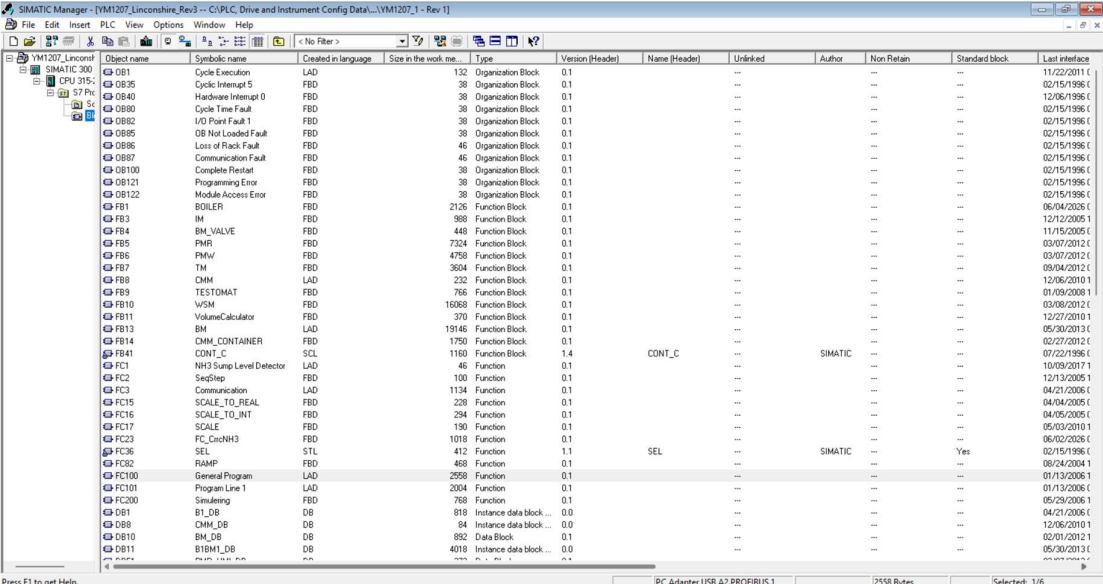
Continuando con el esquema inicial del apartado y siguiendo la línea inferior a la receta del PLC, podemos observar como el valor comienza a entrar en distintas cajas de más pequeñas que representan operaciones matemáticas como la multiplicación, la división o la resta. Todo ello para finalmente llegar a un puerto similar al que llega el valor del agua que refleja el valor final que se envía a inyectar a la caldera desde los puertos de inyección establecidos por la receta del PLC.

Ampliando un poco más en las cajas negras grandes podemos observar qué valores se obtendrían de salida en base a los valores recibidos por estas cajas, se han preparado los siguientes planos a modo de poder observar más ampliamente cada caja negra como se estructuraría dentro del software que rige la operación y qué sensores recibiría como datos y qué salidas aportarían.

5.5 MANEJO E IMPLANTACIÓN EN SIMATIC MANAGER

SIMATIC Manager es la plataforma de ingeniería con la que se configura y programa el PLC encargado del sistema de denoxización. Dentro de este entorno se define el hardware del autómatas, se establecen las interfaces de comunicación con el DCS y se construye el programa de control mediante diagramas de bloques funcionales (FBD). En la planta de Lincoln, esos diagramas contienen los lazos de regulación y las secuencias que determinan cuándo y cuánto agente reductor se inyecta, utilizando en tiempo real las señales locales de campo y los datos remotos que el DCS transfiere cíclicamente al PLC. SIMATIC Manager compila esos esquemas gráficos y los carga en la memoria del procesador, donde se ejecutan de forma cíclica para materializar la lógica de control diseñada. Además, permite la monitorización online para verificar directamente sobre los bloques que las lecturas, los cálculos y las órdenes se corresponden con la realidad de la caldera.

A la hora de implementar las medidas descritas anteriormente, tuve acceso al proyecto de SIMATIC actual mediante el cual se gestiona la dosificación de NH₃. Sobre este programa pude ver las lógicas de programación empleadas, así como todos los OB (Organization Block), FC (Function), FBD (Function Block Diagram), FB (Function Blocks) y los DB (Data Block). Pude comprender y analizar este proyecto y saber cómo implementar mi sistema sobre el actual con el fin de optimizarlo como he diseñado y explicado durante este documento.



Object name	Symbolic name	Created in language	Size in the work. me.	Type	Version (Header)	Name (Header)	Unlinked	Author	Non Retain	Standard block	Last interface
OB1	Cycle Execution	LAD	132	Organization Block	0.1						11/22/2011 C
OB95	Cyclic Interrupt 5	FBD	38	Organization Block	0.1						02/15/1996 C
OB40	Hardware Interrupt 0	FBD	38	Organization Block	0.1						12/06/1996 C
OB80	Cycle Time Fault	FBD	38	Organization Block	0.1						02/15/1996 C
OB82	I/O Point Fault 1	FBD	38	Organization Block	0.1						02/15/1996 C
OB85	OB Not Loaded Fault	FBD	38	Organization Block	0.1						02/15/1996 C
OB86	Loss of Rack Fault	FBD	46	Organization Block	0.1						02/15/1996 C
OB87	Communication Fault	FBD	46	Organization Block	0.1						02/15/1996 C
OB100	Complete Restart	FBD	38	Organization Block	0.1						02/15/1996 C
OB121	Programming Error	FBD	38	Organization Block	0.1						02/15/1996 C
OB122	Module Access Error	FBD	38	Organization Block	0.1						02/15/1996 C
FB1	BOILER	FBD	2135	Function Block	0.1						05/04/2003 C
FB3	BM	FBD	988	Function Block	0.1						12/12/2005 C
FB4	BM_VALVE	FBD	448	Function Block	0.1						11/15/2005 C
FB5	PMR	FBD	7324	Function Block	0.1						03/07/2012 C
FB6	PMR	FBD	4750	Function Block	0.1						03/07/2012 C
FB7	TM	FBD	3604	Function Block	0.1						09/04/2012 C
FB8	OMM	LAD	232	Function Block	0.1						12/06/2010 C
FB9	TESTOMAT	FBD	766	Function Block	0.1						01/09/2008 C
FB10	VSM	FBD	16368	Function Block	0.1						03/08/2012 C
FB11	ValueCalculator	FBD	370	Function Block	0.1						12/27/2010 C
FB13	BM	LAD	19146	Function Block	0.1						05/30/2013 C
FB14	OMM_CONTAINER	FBD	1750	Function Block	0.1						02/27/2012 C
FC1	CONT_C	SCL	1160	Function Block	1.4	CONT_C		SIMATIC			07/22/1996 C
FC2	NH3 Pump Level Detector	LAD	46	Function	0.1						10/09/2011 C
FC2	SeqStep	FBD	100	Function	0.1						12/13/2005 C
FC3	Communication	LAD	1134	Function	0.1						04/21/2006 C
FC15	SCALE_TO_REAL	FBD	228	Function	0.1						04/04/2005 C
FC16	SCALE_TO_INT	FBD	294	Function	0.1						04/05/2005 C
FC17	SCALE	FBD	190	Function	0.1						05/03/2010 C
FC23	FC_CndNH3	FBD	1018	Function	0.1						06/02/2005 C
FC36	SEL	STL	412	Function	1.1	SEL		SIMATIC		Yes	02/15/1996 C
FC32	PMR	FBD	468	Function	0.1						08/24/2004 C
FC100	General Program	LAD	2558	Function	0.1						01/13/2006 C
FC101	Program Line 1	LAD	2004	Function	0.1						01/13/2006 C
FC200	Simulating	FBD	768	Function	0.1						05/29/2006 C
DB1	B1_DB	DB	818	Instance data block...	0.0						04/21/2006 C
DB8	OMM_DB	DB	84	Instance data block...	0.0						12/06/2010 C
DB10	BM_DB	DB	882	Data Block	0.1						02/01/2012 C
DB11	B1BM1_DB	DB	4018	Instance data block...	0.0						05/30/2013 C

Figura 12 "Árbol de bloques del proyecto en SIMATIC Manager con los bloques OB, FC, FB y DB que componen el programa de control de denoxización"

Sobre este proyecto existen principalmente dos bloques Function, el FC100 "General Program" y el FC 101 "Program Line 1". El bloque FC100 actúa como el bloque organizador principal que centraliza las llamadas a los módulos de control de la instalación. Básicamente, sin encargarse del sistema de dosificación ni PID, coordina y ejecuta cíclicamente toda la lógica de supervisión y mando de los equipos de amoníaco y agua. Mientras tanto, el bloque FC101 se encarga del control central del proceso. Administra la comunicación con el sistema DCS, gestiona el modo de operación de la planta y ejecuta toda la lógica de regulación de emisiones (NOx y NH₃-slip) junto con su función de freno. Además, gobierna la unidad de proceso en su conjunto: controla las secuencias de arranque y parada, y mantiene los lazos de regulación PID tanto para la dosificación de agua como para la de amoníaco.

5.5.1 RECONOCIMIENTO DE SENSORES Y TRANSPOSICIÓN A ESCALA DE LOS VALORES

Dentro de este bloque FC101, precisamente en el FB1 que es el primer bloque al que llama esta función, es donde hemos tenido que empezar a introducir las modificaciones que queremos aplicar. En el bloque FB1, a la vez que se ha tenido que trabajar para que el DCS

enviase la información requerida a las nuevas variables guardadas en el programa, hemos tenido que introducir los sensores y dentro del FB1 pasarlos a escala del programa ya que el programa recibía los valores de cada sensor en Tn/h, % y mg/Nm3 y tenía que pasarlos a escala del programa siendo el valor mínimo 0 y valor máximo 32.767 (Valores mostrados en la imagen anterior).

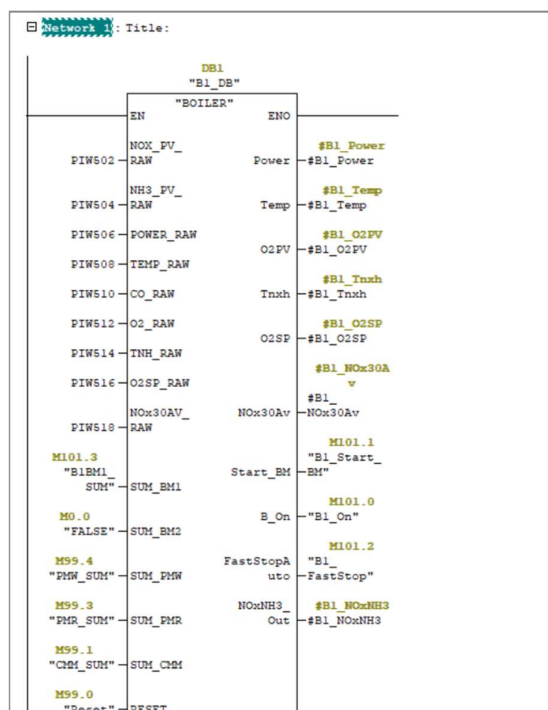


Figura 13 . "Redes del bloque FB1 dentro del FC101 donde se realiza el reconocimiento de sensores y la transposición a escala de los valores recibidos desde el DCS"

A la hora de pasar a escala cada valor recibido por los sensores se ha recurrido a unos bloques creados previamente, FC15 "Integer to Real". Estos bloques reciben el valor del sensor y según la variable a pasar a escala un valor de los vectores RAW_S, RAW_Z, Span y Zero. Estos vectores registran cada valor que albergan en el DB1 y sirven para establecer el valor mínimo y máximo que puede medir el sensor (Zero y Span) y de la misma manera para los valores que puede registrar el programa para la variable a pasar a escala (RAW_Z y RAW_S). Con ello, en función del valor recibido se pasa a escala del programa (0-32.767) el valor recibido por el DCS.

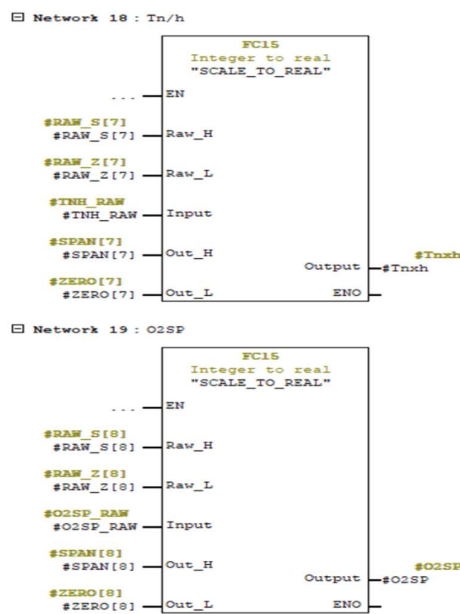


Figura 14 "Bloques FC15 'Integer to Real' empleados para convertir a la escala del programa (0–32.767) los valores en unidades físicas recibidos de cada sensor"

5.5.2 NETWORKS DE OPERACIÓN Y LOCALIZACIÓN DE LAS MEJORAS

Una vez con los valores pasados a escala, FC 101 pasa a llamar al FB13, el cual es un bloque muy grande con más de 200 Networks de trabajo que albergan distintos bloques FC y es el encargado de gobernar los componentes de la unidad de proceso, incluyendo la secuencia de arranque y parada, así como los lazos PID de regulación de agua y de amoníaco. Por tanto, la salida de este bloque será la que se está tratando de mejorar y es dentro del mismo donde albergaremos los cambios introducidos con el fin de obtener el ahorro buscado. Precisamente en el Network 173 dentro del bloque FB13, mediante el bloque “#AmmoniaPID”, se genera la salida actual del sistema que queremos eficientar y seguido de este network, en el 174, se pasa la salida generada a unidades de operación dando el valor final entre 0 y 1 para regular la dosis de amoníaco a inyectar en función de la temperatura y receta introducida. En base a ello, la estrategia en este caso a llevar a cabo será introducir un network entre el actual Network 173 y Network 174 para recibir la salida del Network 173 que es la final antes de pasarla a escala de operación, multiplicar esta

salida por los tres factores de corrección y dar la salida al actual Network 174 para pasarla a valores de operación de la planta.

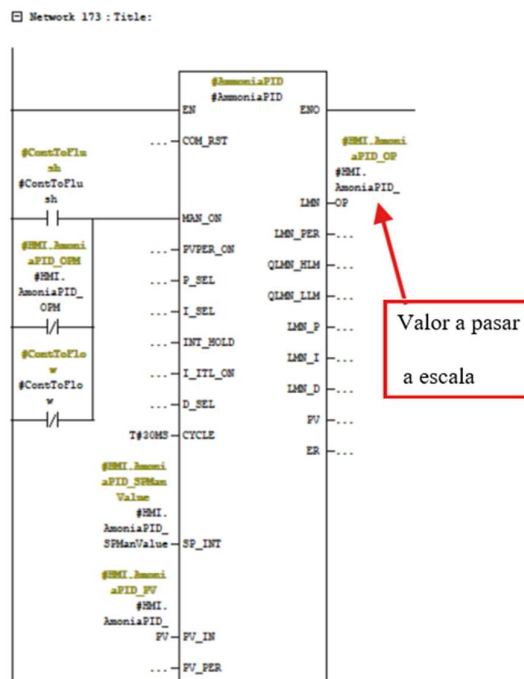


Figura 15 "Vista del Network 173 del bloque FB13, donde el bloque #AmmoniaPID genera la salida actual del sistema PID antes de ser escalada a unidades de operación"

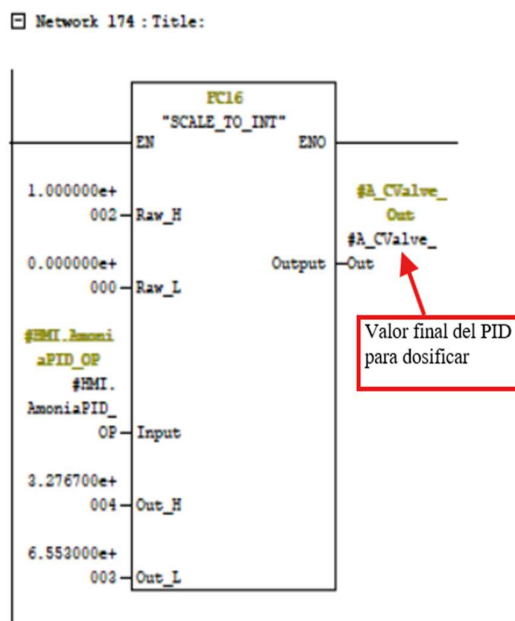


Figura 16 "Vista del Network 174 del bloque FB13, donde la salida del PID es convertida al rango de operación (0 a 1) para regular la dosis de NH_3 en función de la receta"

Por tanto, con todo ello se ha diseñado el bloque FC23 el cual recibirá las entradas ya mencionadas previamente junto al valor final del Network 173 y obtendrá un valor que pasará a escala de operación para que pueda ser implementado correctamente en la planta.

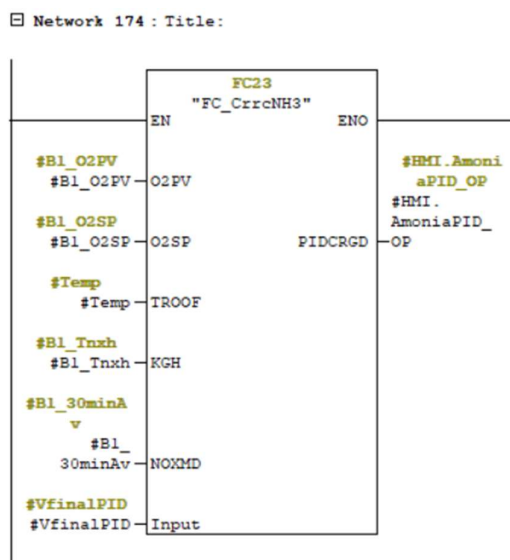


Figura 17. "Estructura del nuevo bloque FC23 con las conexiones de entrada procedentes de los sensores del DCS y la salida hacia el Network 175 del PLC"

Finalmente, el bloque FC23 quedaría de la siguiente manera vista en la figura superior. Al tratarse la salida de antes del bloque “AmmoniaPID” de un HMI el cual es un valor proyectado en el dashboard del PLC se ha cambiado esa salida por la salida “#VfinalPID” con el fin de que la salida del bloque FC23 sea la que se envía al dashboard y la que se envía al Network 175, que será el antiguo Network 174.

Dentro del bloque FC23 encontramos la distribución de networks que albergan distintos bloques de operación lógica y matemática con el fin de cumplir las órdenes de operación planteadas y proporcionar los distintos valores para cada factor de corrección en función de las condiciones de operación. Para el bloque FC23 se va a incluir una ampliación de información la cual comienza por los valores introducidos, obtenidos durante el proceso y los que se reportarán finalmente como salidas del bloque siendo los siguientes:

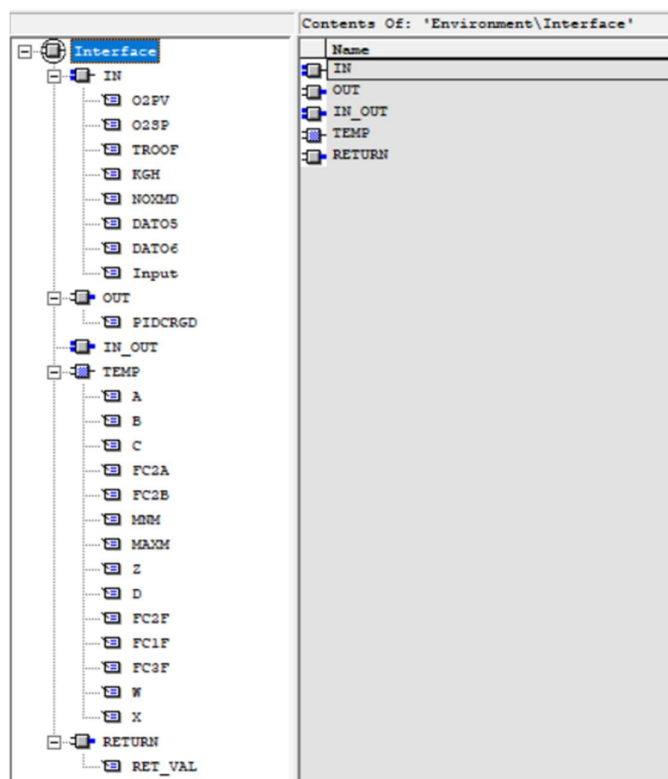


Figura 18 "Declaración de variables del bloque FC23 con los valores de entrada (IN), las variables temporales de cálculo (TEMP) y el valor de corrección de salida (OUT)"

Entre estos valores encontramos la sección IN los cuales hacen referencia a todos los inputs comentados en capítulos anteriores del proyecto. Los valores TEMP son aquellos que obtenemos como fruto de operar matemáticamente a raíz de los valores IN y el valor OUT en este caso que será fruto de la multiplicación de los tres factores de corrección que se desean introducir por la salida que se reporta a día de hoy con el sistema existente.

5.5.3 CORRECTOR POR OXIGENO

Una vez ya con los networks dentro del FC23 que hacen referencia a los factores de corrección, encontramos los dos primeros networks, los cuales están diseñados fielmente a lo explicado en el capítulo 5 apartado 5.3.3 y reflejan la lógica llevada a cabo en el programa para que se cumpla el factor de corrección por oxígeno. Se puede observar como en el primer bloque esta la principal diferencia referente a si el O2 PV es menor o no del O2 SP. En

función de eso, el FC23 activará el network 1 o el network 2 para obtener finalmente el factor de corrección final.

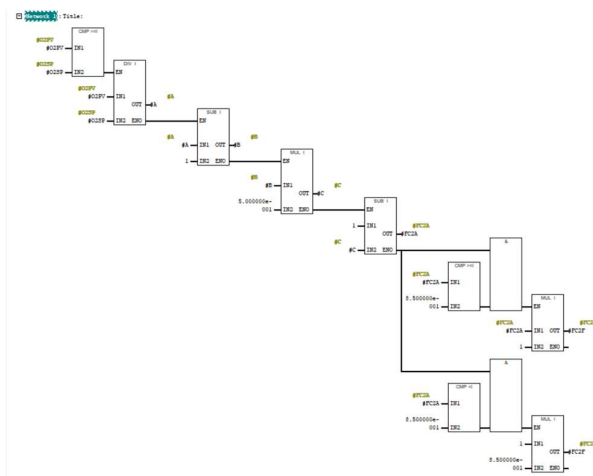


Figura 19 "Network 1 del bloque FC23: lógica del corrector por O₂ aplicado cuando el valor PV de O₂ es inferior al valor SP fijado por el operario"

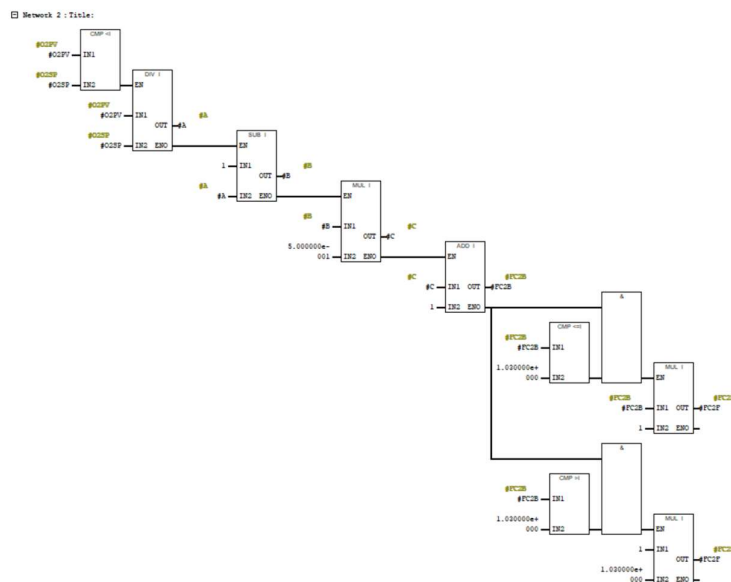


Figura 20 "Network 2 del bloque FC23: lógica del corrector por O₂ aplicado cuando el valor PV de O₂ es igual o superior al valor SP fijado por el operario"

Network 3 : Title:

The diagram illustrates a logic network with three parallel processing paths. Each path begins with a 'MUL 1' block where 'EN' is connected to 'IN1' and 'IN2' is connected to 'EMO'. The 'OUT' of each 'MUL 1' block is connected to a 'CMP <= >' block. The 'IN1' of each 'CMP' block is connected to a '#Z' signal. The 'IN2' of each 'CMP' block is connected to a constant value: 18477, 16873, and 16873 respectively. The 'OUT' of each 'CMP' block is connected to an 'AND' block. The 'OUT' of each 'AND' block is connected to a 'MUL 1' block. The 'IN1' of each 'MUL 1' block is connected to a constant value: 1, 1, and 1 respectively. The 'IN2' of each 'MUL 1' block is connected to 'EMO'. The 'OUT' of each 'MUL 1' block is connected to an 'FCIF' block. The 'OUT' of each 'FCIF' block is connected to a '#VCL1' signal.

5.5.5 CORRECTOR POR NIVELES DE EMISIÓN DE NOx Y SALIDA FINAL

60

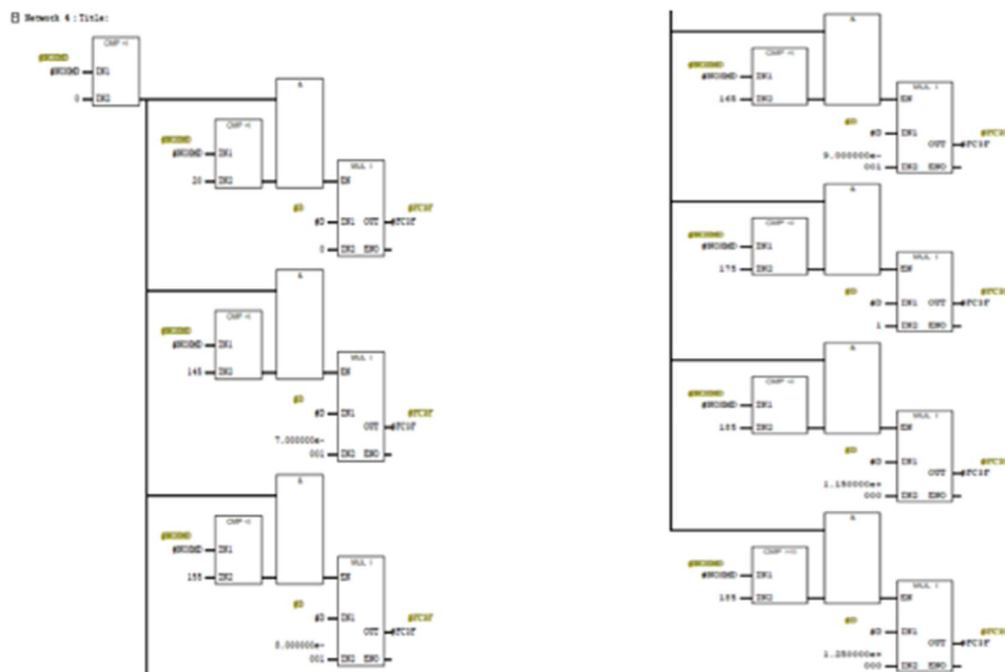


Figura 22 "Network 4 del bloque FC23: lógica del corrector por media móvil de 30 minutos de NOx para los rangos de emisión inferiores"

Dentro del mismo control, pero en un network distinto se incluye la opción de que la media de 30 minutos no sea válida debido a labores de mantenimiento o porque ha habido fallos en el analizador que es el aparato de la planta encargado de reportar las medidas. Con el fin de no incidir en dosificaciones erróneas tanto por sobreinyección o infrainyección se ha diseñado el network 5 para cancelar este factor de corrección en esos casos:

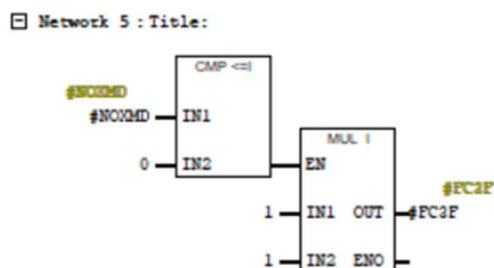


Figura 23 "Network 5 del bloque FC23: lógica de cancelación del factor de corrección por NOx cuando la media de 30 minutos no es válida por labores de mantenimiento o fallo del analizador"

Por último, para dar el output del bloque FC23 y por ende la salida final del sistema PID encargado de dosificar el uso de NH₃ establecido en la receta del PLC de la planta de Lincoln está el Network 6. En este network se multiplican en cascada los distintos factores de corrección por el valor recibido del actual sistema PID. De esta manera está planteado que obtengamos el valor de corrección a la receta establecida que supondrá los ahorros planteados y la optimización del sistema de denoxización de la planta de Energy from Waste de Lincoln:

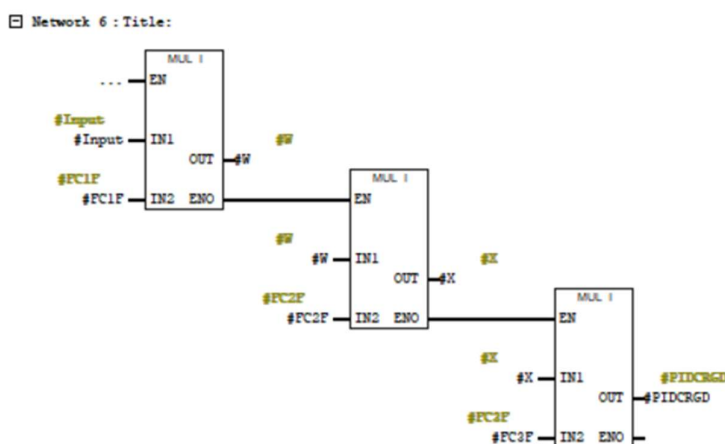


Figura 24 "Network 6 del bloque FC23: multiplicación en cascada de los tres factores de corrección por la salida del sistema PID actual para obtener la dosis final de NH₃ a inyectar"

5.6 OPTIMIZACIÓN DE LA RECETA

5.6.1 VARIABILIDAD DE LA TEMPERATURA

Con lo anteriormente expuesto, el siguiente paso es optimizar el diseño de una receta en el panel de control del PLC que controla el sistema de denoxización. De esta manera, aunque la cantidad de NH₃ que fijemos vaya a ser modificada por el control diseñado, se tratará de establecer unos valores para no excedernos en el uso de NH₃.

A la hora de optimizar el uso del NH₃, el punto de inyección juega un papel fundamental en la eficiencia de la reducción de NO_x, pues dependiendo de la temperatura habrá que usar un nivel u otro. Dependiendo de los puntos de inyección seleccionados podemos ver nuestra eficiencia drásticamente afectada, por lo que este aspecto ha merecido un estudio sobre como determinar a qué temperatura se cambia el nivel de inyección.

La principal problemática a día de hoy referida al estudio de la temperatura en la caldera es que no se tiene ningún tipo de sensor de temperatura antes del tejado de la caldera. Para que se vea de manera más gráfica he preparado la siguiente imagen sobre el plano de AutoCAD de la caldera con medidas exactas incluidas:

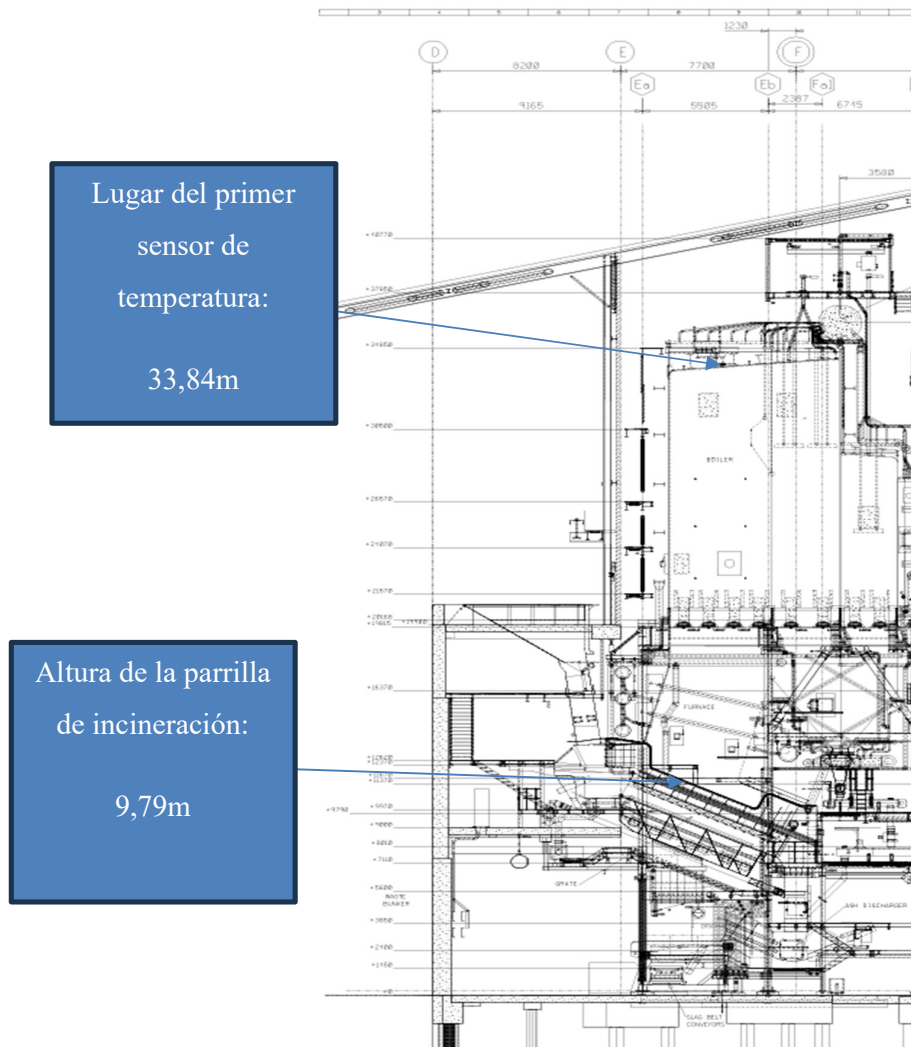


Figura 25 "Plano de la caldera de la planta de Lincoln sobre AutoCAD con indicación de la altura de la parrilla de incineración y la posición del primer sensor de temperatura en el tejado"

Para determinar esto mismo inicialmente se trató de llevar a cabo un estudio de la evolución de temperaturas dentro de la caldera. Por ello se recurrió al documento oficial que proporcionó Yara U.K en 2012 cuando se diseñó la caldera. En ella encontramos el siguiente análisis del comportamiento de temperaturas en la caldera:

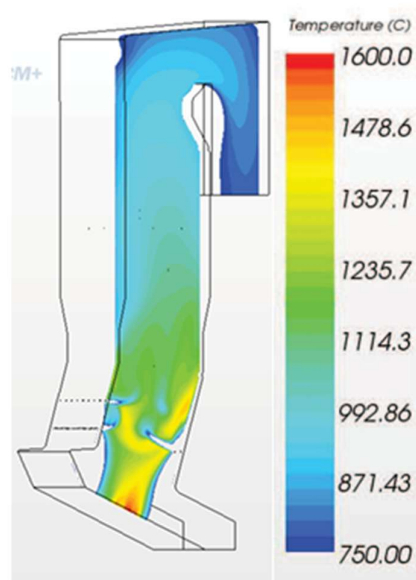


Figure 4-2 : Temperature field (From CNIM CFD modeling)

Figura 26 "Mapa de comportamiento de temperaturas en la caldera según el documento de diseño proporcionado por YARA U.K. en 2012"

En la imagen anterior, como se puede apreciar, no se encontraban medidas y dado que no había ningún mapa de calor más detallado que el mostrado, decidí continuar con el mismo y apoyarme en planos oficiales de AutoCAD de la caldera en el que sí venían las medidas reales en metros de la caldera.

Además de ello, y a modo de chequeo, solicité a los técnicos de la empresa FCC que me proporcionasen más información de otras calderas de la compañía. Tanto fue así que se me proporcionó el documento de diseño de la caldera de la planta de Gloucester:

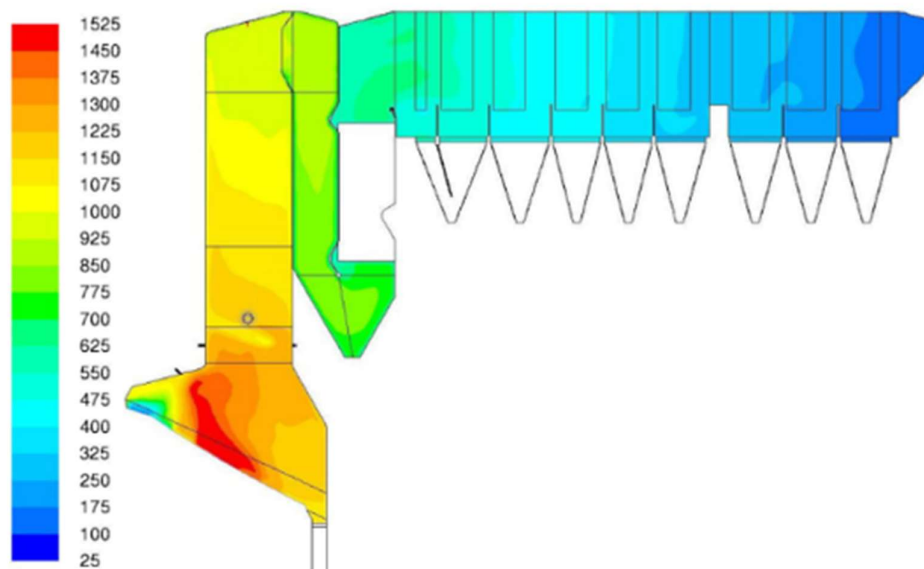


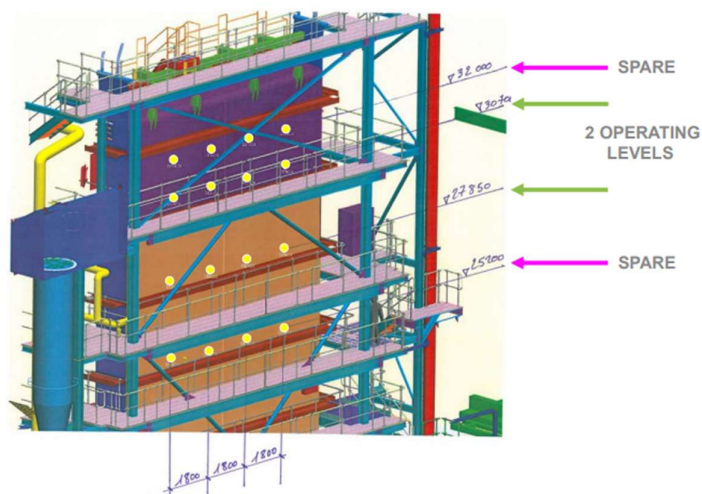
Figura 27 "Documento de diseño de la caldera de la planta de Gloucester (FCC) utilizado como referencia comparativa para el estudio del perfil de temperaturas"

Aun con la anterior imagen, seguía sin tener información bien detallada sobre estimaciones de la evolución de la temperatura. Fue por ello por lo que solicite al personal de la planta la posibilidad de poder introducir medidores de temperatura de manera breve para determinar a modo de contraste de hipótesis los valores de la temperatura en cada nivel de inyección.

En la planta hay 2 puertos de inyección de repuesto, conocidos como “Spare Ports” que ocupan los puertos situados en nivel superior e inferior y los puertos de inyección habitual y siendo actualmente los únicos disponibles para operar son los dos situados entre estos “Spare Ports”:

5. DENOX SYSTEM

LEVELS OF INJECTION



CNIM
Imaginer et Agir

Figura 28 "Representación de los niveles de inyección de NH_3 en la caldera de Lincoln, con identificación de los puertos operativos (DENOX 2 y DENOX 3) y los puertos de repuesto"

Para anotar las mediciones realizadas, identifiqué la temperatura en el tejado de la caldera como “Troof”, el puerto disponible superior como “DENOX 2” y el inferior como “DENOX 3” los cuales están situados a 30,7m y 27,85m sobre el nivel del mar, estando a 9,79m la parrilla de incineración. Tras la medición, obtuve los siguientes datos:

CONTRASTE DE HIPÓTESIS DE TEMPERATURAS	
MEDICIÓN 1	MEDICIÓN 2
Troof: 804 °C	Troof: 812°C
T _{DENOX 2} : 880°C	T _{DENOX 3} : 967°C

Tabla 2 "Contraste de hipótesis de temperaturas: mediciones empíricas de Troofy temperatura en DENOX 2 y 3 para dos condiciones distintas de operación"

Una vez con esa información, basándome en los datos históricos de funcionamiento de la planta comencé a filtrar los datos de operación eliminando outliers para obtener la media de temperatura medida en el tejado.

Para determinar la condición de operación normal, filtré por aquellos valores que quedasen dentro del intervalo de la media más y menos la raíz cuadrada de su variación poblacional. Repetí esta operación para 7 de las 8 columnas extraídas, excluyendo de hacerlo en la de la temperatura del tejado y finalmente obtuve una media de temperatura en operación normal de 812°C.

Con ello, fijé los valores que sabía con exactitud o por lo menos empíricamente, que fue la temperatura del tejado de la caldera y del DENOX 2 y DENOX 3 para cada caso. También fijé la temperatura en la parrilla de incineración en 1500 °C ya que era un valor repetido tanto en los mapas de calor como en los cálculos de diseño.

De esta manera obtuve los dos siguientes resultados, primero para la medición de temperatura en el Denox 2:

Y	T
33.85	804
32	
30.7	880
27.85	
25.2	
19.77	
16.37	
12.65	
9.79	1450

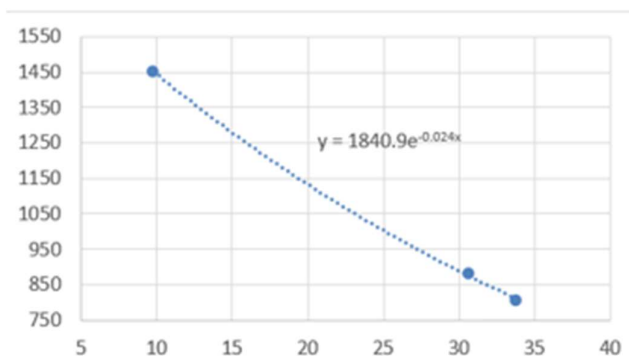


Figura 29 "Ajuste de la curva exponencial del perfil de temperatura a lo largo de la caldera para la Medición 1 y 2 referida al puerto DENOX 2"

La misma operación repetí para la medición de temperatura referente al Denox 3 estableciendo igualmente el límite superior de temperatura en 1500 °C:

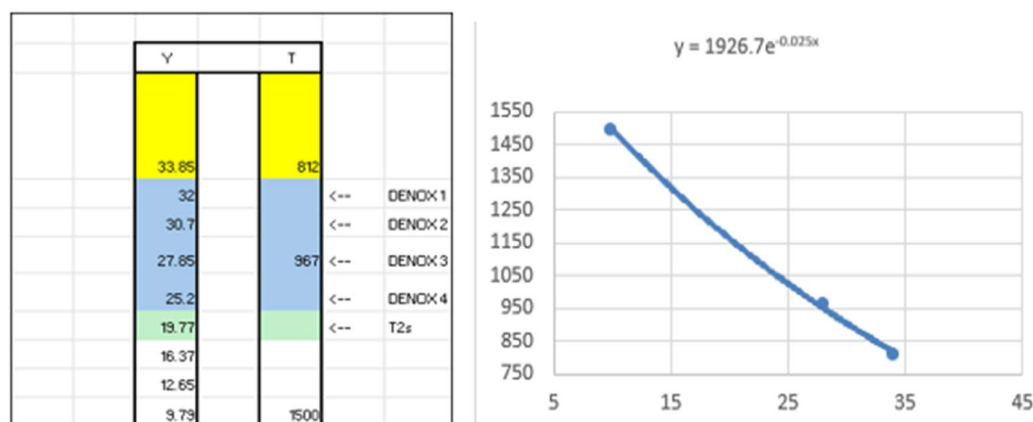


Figura 30 “Ajuste de la curva exponencial del perfil de temperatura a lo largo de la caldera para la Medición 1 y 2 referida al puerto DENOX 3”

Una vez obtenidos los perfiles de temperatura correspondientes a las dos condiciones de operación analizadas, se observa que cada una queda descrita por su propia ecuación exponencial, con parámetros ligeramente distintos. Con el objetivo de disponer de una única expresión matemática que sea representativa del comportamiento global del sistema y que pueda implementarse de forma directa en la herramienta de cálculo, se decide obtener una ecuación de ajuste unificada que recoja simultáneamente la información de ambas condiciones.

El criterio adoptado para la unificación consiste en otorgar igual peso a ambas condiciones de operación, dado que no existe evidencia técnica que justifique priorizar una sobre la otra. Bajo este supuesto, se trabaja con los siguientes puntos de referencia, que son los determinantes para la correcta dosificación de NH_3 en los puntos de inyección:

— De la Medición 1: temperatura de 880 °C en el punto de inyección situado a $x = 30,7$ m, con temperatura de referencia de 804 °C en $x = 33,84$ m.

— De la Medición 2: temperatura de 967 °C en el punto de inyección situado a $x = 27,85$ m, con temperatura de referencia de 812 °C en $x = 33,84$ m.

Dado que las dos condiciones comparten la misma posición de referencia ($x = 33,84$ m) pero presentan temperaturas distintas en ese punto (812 °C y 804 °C respectivamente), se calcula un valor promedio ponderado con pesos iguales (0,5 cada condición):

$$T(x = 33,84) = \frac{812 + 804}{2} = 808 \text{ °C}$$

Este valor medio actúa como punto de anclaje de la curva unificada en la posición de referencia, asegurando que la ecuación resultante no favorezca sistemáticamente a ninguna de las dos condiciones de operación.

Se mantiene el modelo exponencial de la forma:

$$T(x) = A * e^{(b*x)}$$

justificado por la naturaleza física del proceso de enfriamiento del gas a lo largo del conducto, tal y como se ha establecido en las secciones anteriores. Los parámetros A (K) y b (m^{-1}) se determinan a partir de dos puntos representativos del conjunto de referencia unificado:

- **P₁:** $x_1 = 33,84$ m $\rightarrow T_1 = 808$ °C (promedio ponderado de ambas condiciones)
- **P₂:** $x_2 = 27,85$ m $\rightarrow T_2 = 960$ °C (punto de inyección de NH₃, Punto intermedio)

La elección de P₂ como segundo punto de anclaje se justifica por ser el punto de intermedio de temperatura entre usar la fórmula de la medición 1 para $x=27,85$ y el valor con la fórmula de la medición 2 para el mismo punto. De esta manera fijamos el objetivo en el punto de mayor temperatura que será el que marque el error más crítico posible.

Planteando el sistema de ecuaciones:

$$808 = A * e^{(b*33,84)} \quad (1)$$

$$960 = A * e^{(b*27,85)} \quad (2)$$

Dividiendo (2) entre (1) se elimina el parámetro A :

$$\frac{960}{808} = e^{(b*(27,85-33,84))} \rightarrow 1,188 = e^{(b*(-5,99))}$$

$$b = \frac{\ln(1,188)}{-5,99} = -0,02878$$

Sustituyendo en (1):

$$808 = A * e^{(-0,03*33,84)} \rightarrow A = \frac{808}{e^{(-0,02878*33,84)}} = 2139.567$$

La ecuación exponencial unificada que describe el perfil de temperatura del gas en función de la posición axial es:

$$T(x) = 2139.56703476 * e^{(-0.02877649849*x)}$$

A partir de la expresión, el modelo interpola linealmente para obtener la temperatura en cada punto de inyección de NH_3 en función del valor introducido por el usuario en $x = 33,84$ m.

STANDAR CONDITIONS					TEMPERATURE CALCULATOR					
SENSOR		Y	T		APROX: Troof=165=DNX 3					
	-->	33.84	808							
		32	851.9355	<=	DENOX 1					
		30.7	884.4096	<=	DENOX 2	Prooed: Troof=804 T DNX2=88 0				
		27.85	960	<=	DENOX 3	Troof=812 T DNX3=96 7				
		25.2	1036.071	<=	DENOX 4					
		19.77	1211.296	<=	T2s					
		16.37	1335.802							
		12.65	1486.733							
		9.79	1614.268							

La Tabla siguiente recoge la comparación entre los valores de temperatura calculados mediante la interpolación usando la tabla de la izquierda como referencia y la de la derecha como calculadora para distintos valores de temperatura medidos en el tejado de la caldera. A partir de ahí, introduciendo en la casilla amarilla de temperatura de la tabla derecha (que funciona como calculadora para conocer la temperatura en cada punto en base a la Troof medida), los valores calculados en los distintos puntos de inyección para las temperaturas medidas en su día en comparación con la medida que se obtuvo empíricamente son:

Punto de inyección (x, m)	T calculada (°C)	T ref. Cond. A (°C)	T ref. Cond. B (°C)	Error máx. (%)
30,7	880.03	-	880	≈0 %
27,85	964.75	967	-	±0,3 %

Tabla 3 "Validación de la ecuación exponencial unificada mediante comparación entre las temperaturas calculadas y las medidas empíricamente en los puntos de inyección DENOX 2 y DENOX 3"

El error relativo máximo sobre los puntos de inyección prioritarios es inferior al 1 %, lo que se considera suficientemente preciso para el dimensionado del sistema de dosificación de NH₃.

La ecuación obtenida reproduce con mucha exactitud el punto más sensible del ajuste (x = 27,85 m, medición 2) y se mantiene dentro de márgenes aceptables en el resto de las posiciones, validando su uso como curva de referencia única en la herramienta de cálculo

5.6.2 TEMPERATURA DE CAMBIO DE NIVEL

Una vez determinado el comportamiento de variabilidad de la temperatura a lo largo de la caldera ya podemos determinar la temperatura de tejado de caldera, a partir de la cual, se cambiará el nivel de inyección de NH₃ con el fin de o bien no excedernos de la temperatura máxima o mínima de inyección a partir de la cual, el NH₃ inyectado perdería eficiencia.

Para determinar este nivel de nuevo he respaldado mi procedimiento tanto con documentos de diseño de la caldera, con documentos técnicos y teóricos, como el que se comentará y detallará en el capítulo 6.2, ya que entre el 5 de marzo y el 8 de marzo, antes de llevar a cabo la medición de temperatura en los puntos de inyección, se llevó a cabo una prueba con una receta que establecía un valor de temperatura de cambio muy alto.

Aunque esta prueba fue a modo experimental y durante unas condiciones abruptas de operación, aquello provocó que se viese evidente como a una buena temperatura de inyección, el NH₃ tenía una gran eficiencia y permitía eliminar la misma cantidad de NO_x inyectando menos NH₃ y todo ello en unas condiciones de operación muy exigentes debido a las altas temperaturas.

De manera teórica, además de lo ya comentado, el propio instalador del sistema denox de la planta de Lincoln, YARA U.K diseñó el sistema de manera que, según ellos mismos, la temperatura de operación para el sistema denox se establecería entre los 850-950°C. También añadieron que la mejor eficiencia de operación se estimaba en torno a los 900°C. Todo lo dicho se recoge en el training preparado por la empresa de cara a formar a los operarios en los aspectos técnicos del sistema denox:

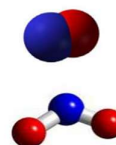
5. DENOX SYSTEM

WET SNCR (Selective Non Catalytic Reduction)

- Reagent : aqueous ammonia
- Main reactions

$$4 \text{ NO} + 4 \text{ NH}_3 + \text{O}_2 \rightarrow 4 \text{ N}_2 + 6 \text{ H}_2\text{O}$$

$$2 \text{ NO}_2 + 4 \text{ NH}_3 + \text{O}_2 \rightarrow 3 \text{ N}_2 + 6 \text{ H}_2\text{O}$$
- Temperature range : 850 to 950° C
- Best efficiency around 900° C



ENIM

Figura 32 "Diapositiva del manual de formación de YARA U.K. en la que se establece el rango de temperatura de operación del sistema SNCR (850–950 °C) y la eficiencia óptima estimada en torno a 900 °C"

Además de ello, la empresa Weston Myer, proveedora integral de sistemas y maquinaria ligadas a procesos industriales relacionadas con el reciclaje y valorización energética, que entre muchos de sus servicios también provee de sistemas SNCR como el de la planta de Lincoln, publicó un pequeño estudio con propósito meramente informativo acerca de la variabilidad de la eficiencia del NH₃ en función de la temperatura de aplicación.

En este estudio se resume que la temperatura de aplicación del agente reductor ha de estar entre 850°C y los 1100°C, 50°C por encima de lo establecido por la empresa proveedora de la planta de Lincoln. Además de ello, aporta el siguiente gráfico que representa la evolución de la eficiencia y slip en función de la temperatura:

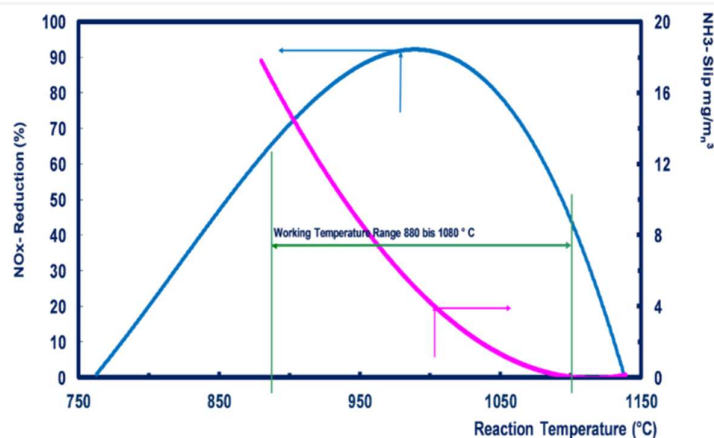


Figura 33 . "Gráfica de Weston Myer sobre la variación de la eficiencia de reducción de NOx y el slip de NH₃ en función de la temperatura de inyección del agente reductor"

A raíz de toda la información recogida en estos documentos y también teniendo en cuenta la información aportada por Weston Myerse y la agencia medioambiental americana, se ha establecido como temperatura a partir de la cual se cambiará el puerto de inyección en 960°C medidos desde el punto de inyección. Este punto surge como punto intermedio entre las demostraciones teóricas y lo indicado por YARA.

Para saber cuál es la temperatura leída en el tejado de la caldera, que indicara que en el puerto de inyección inferior se ha alcanzado la temperatura de 960°C, gracias al nuevo modelo para la estimación de la temperatura en distintos puntos de la caldera, se ha realizado la siguiente operación:

$$960 = T_{roof} * \frac{2139.567 * e^{(-0,02878*27,85)}}{2139.567 * e^{(-0,02878*33,84)}}$$

$$T_{roof} = \frac{960 * 807.77}{960} = 807,77^{\circ}\text{C}$$

A modo de corrección se pondrá la temperatura de cambio en 805°C ya que la aproximación tiene un margen de error por arriba del 0,2%.

Por lo que para conciliar los resultados vistos en la operación real y los obtenidos, se establece esta temperatura medida en el tejado como temperatura a partir de la cual entra la histéresis aplicada en el sistema (la cual será de 3 unidades) y se procederá a cambiar al nivel superior en caso de seguir aumentando la temperatura o inferior en caso de estar la temperatura en una tendencia a la baja.

Mediante los ajustes planteados, tal y como estaría previsto en un punto de vista teórico, el sistema denox estaría inyectado NH_3 para temperaturas menores de 805°C medidas en el tejado de la caldera que equivaldrían a 960°C en el puerto de inyección. A partir de esta temperatura, el sistema cambiaría de inyectores, usando los del puerto superior introduciendo el amoníaco a $881,7^\circ\text{C}$ medidos desde el puerto de inyección superior.

De esta manera cumpliríamos con los parámetros de eficacia establecidos por la agencia medioambiental americana que establece el límite inferior para obtener eficacia significativa en el uso de amoníaco en 880°C de temperatura en la inyección, mientras que estaríamos terminando de inyectar amoníaco por el puerto inferior a una temperatura similar a la óptima de 950°C .

5.6.3 CANTIDAD INYECTADA POR NIVEL

A la hora de determinar la cantidad máxima de amoníaco inyectada para cada nivel sobre la cual se aplicarán los controles del diseño propuesto en anteriores capítulos, es importante conocer la operación histórica de la planta para priorizar nunca quedarnos cortos.

Esto es debido a que el control principal nunca amplía la dosis, sino que su máximo valor será 1 por lo que es importante que haya suficiente amoníaco disponible para poder inyectar si las condiciones de operación así lo requieren.

De cara a establecer un máximo y un mínimo en el rango de temperaturas he decidido coger en torno al 95% de los datos de temperatura dentro de un rango de operación normal de la caldera. Este rango de operación normal de la caldera está establecido por normativa interna de la planta en que, para poder operar, la temperatura mínima medida en el tejado ha de ser de 500°C y que la máxima no puede sobrepasar los 950°C medidos en el tejado.

Debido a que los datos siguen una distribución normal, en función de cuantas veces restes y sumes a la media poblacional la desviación típica poblacional resultante de la raíz cuadrada de la varianza poblacional, obtienes mayor o menor porcentaje de representación de la población.

Por tanto, de cara a la representación he seguido la siguiente ecuación con los siguientes términos:

$$\mu \pm k * \sigma \left\{ \begin{array}{l} k = 1 \rightarrow 68,3\% \\ k = 2 \rightarrow 86,6\% \\ k = 3 \rightarrow 95,4\% \\ k = 4 \rightarrow 98,8\% \end{array} \right.$$

$$\mu = 806 ; k = 3 ; \sigma = 26.5$$

Con ello presente y en base a la operación histórica de la planta he preparado el siguiente gráfico de cajas agrupando la cantidad media de NH₃ por hora inyectada para cada nivel, junto a la máxima y mínima inyección registrada filtrando outliers multiplicando por 3 la desviación típica poblacional y obteniendo el rango de temperaturas de entre 727°C a 885°C. Como los 885°C no se suelen alcanzar he fijado el tope de temperatura a leer en el tejado en 835°C. Además, a modo de cubrir aquellos puntos de operación en la caldera en las que se opere a temperaturas muy inferiores, pero dentro de los límites de operación, he establecido el primer valor en 600°C. Esto quiere decir que hasta que la temperatura medida en el tejado no pase de 600°C, el sistema inyectará como máximo el valor asignado a ese nivel.

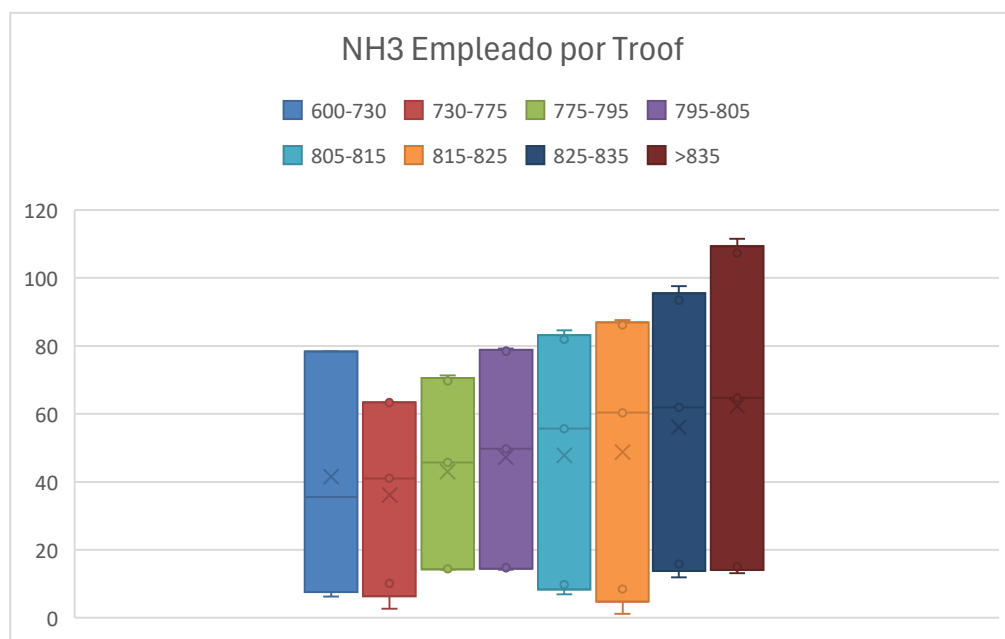


Figura 34 "Diagrama de cajas del consumo histórico de NH_3 (L/h) agrupado por intervalo de temperatura medida en el tejado de la caldera, con indicación de medias, máximos y mínimos filtrados"

Como se puede apreciar el consumo aumenta a medida que se incrementa la temperatura pudiendo llegar a sobrepasar puntualmente los 100 L/h. Es importante saber que esto es basado en lapsos de 5 minutos por lo que aquí el valor predominante será la media de las medidas y no el valor máximo ni mínimo. Estos valores se han incluido a modo representativo para tener en cuenta como puede de llegar a ser los incrementos de uso en función de la temperatura.

De esta manera, el valor de medias de uso de NH_3 por intervalo de temperatura queda de la siguiente forma:

Rango de Temperaturas (°C)	Cantidad de NH_3 empleada(L/h)
600-730	35,5154
730-775	40,983

775-795	45,7
795-805	49,72
805-815	55,62
815-825	60,343
825-835	61,856
>835	64,67

Tabla 4 "Consumo histórico medio de NH₃ (L/h) por intervalo de temperatura medida en el tejado de la caldera, obtenido del análisis de la operación de la planta entre 2020 y 2026"

De cara al diseño de la receta, se aplicará un factor de seguridad sobre los valores medios a modo de nunca suministrar por debajo de lo exigido por el sistema. Estos valores cubrirán el 99% de los casos ya que dado el factor impredecible de el residuo entrante pueden darse puntos de operación en el que el sistema no sea capaz de aportar más amoniaco. Sin embargo, estos casos serán completamente marginales y no durarían más de un lapso de 5 minutos.

En base al gráfico de cajas y a los valores medios de la tabla mostrada, se aplicará un factor de seguridad del 1.5 y se redondeará al número entero acabado en 0 o 5 inmediatamente superior más cercano a modo de garantizar la seguridad de operación.

Como aplicando el método anterior, el primer intervalo se quedaba muy por debajo de su máxima registrada, se ha establecido el mínimo de suministro de NH₃ en 70 L/h. De esta manera, el suministro de NH₃ por intervalo quedaría:

Rango de Temperaturas (°C)	Cantidad de NH ₃ empleada(L/h)
600-730	70
730-775	75

775-795	80
795-805	85
805-815	90
815-825	95
825-835	100
>835	105

Tabla 5 "Caudal máximo de NH₃ a inyectar por nivel de temperatura con factor de seguridad de 1,5 aplicado sobre los valores medios históricos"

Respecto a la histéresis empleada, se dejará de la misma manera la cual es de 3 unidades y en cuanto al agua a emplear también se fijará la misma cantidad, siendo 50 litros para cuando el amoníaco empleado sea menor de 95 L/h y de 60 en el resto de los casos.

Con todo ello, el panel diseñado que sería exactamente igual que el que se introduciría en el dashboard del PLC que controla el sistema de denoxización sería:

Level	T	L/h Water	Injector	L/h Ammonia
Level 8	835	60	DENOX 2	105
Level 7	825	60	DENOX 2	100
Level 6	815	50	DENOX 2	95
Level 5	805	50	DENOX 2	90
Level 4	795	50	DENOX 3	85
Level 3	775	50	DENOX 3	80
Level 2	730	50	DENOX 3	75
Level 1	600	50	DENOX 3	70

Tabla 6 "Panel de la receta de inyección diseñada para el PLC de denoxización con los 8 niveles de temperatura, caudal de agua, inyector activo y caudal de NH₃"

Cabe destacar que el sistema electrónico encargado de la denoxización no vierte la dosis mostrada en todo el rango de valores para cada escalón. El sistema, primero lee la temperatura en el tejado de la caldera y en base a ese valor interpola en el escalón de temperatura que se encuentra el valor medido para inyectar la cantidad de NH₃ proporcional a la temperatura en la que nos encontremos.

De esta manera y a modo de ejemplo, si en el tejado de la caldera se leyese el valor de 810°C, el sistema detectaría que nos encontramos en el nivel 5 de operación del denox y mandaría la señal de inyectar el valor intermedio entre los 90 L/h correspondientes a 805°C y los 95L/h correspondientes a 815°C, en este caso 92,5 L/h. Más tarde sobre este valor actuarían los controles ya comentados anteriormente para asegurarnos el no inyectar en exceso ni superar valores límite de inyección.

Capítulo 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A lo largo de este capítulo se tratará de diseccionar y explicar de una manera práctica y detallada los pasos llevados a cabo para alcanzar las soluciones propuestas. También se mostrarán los resultados comparándolos con los números actuales y se comentará la escalabilidad que tiene lo obtenido.

6.1 COMPARATIVA ENTRE SITUACIÓN ACTUAL Y ESCENARIO OPTIMIZADO

Para apreciar el progreso seguido con el fin de valorar la mejora y poder detectar posibles puntos de mejora y la escalabilidad del proceso llevado a cabo llevaremos un análisis de este hasta el día hoy en la planta con los datos recogidos, lo que ello significa y de esta manera valoraremos el funcionamiento:

6.1.1 SITUACIÓN ACTUAL

De los datos obtenidos, podemos obtener dos principales corrientes, aquella recibida en crudo que representa el complejo total de operación desde el 1 de enero de 2020 hasta el 23 de abril de 2026 siendo cada línea del Excel obtenido de las medidas la información recogida cada 5 minutos, o bien filtrando esta información y eliminando ciertos outlayers, que pueden ser aquellos momentos en los que la planta ha operado de una manera inusual por el fallo de un cierto componente o por el cúmulo de ciertas casuísticas que se han dado durante la operación.

De cualquiera de las maneras, la clave para saber si el método empleado final ha sido correcto o no, este ha de funcionar y cuadrar bien tanto para outlayers como para no outlayers.

Inicialmente sin filtrar los datos, obtenemos un total de 663541 líneas de datos para cada una de las columnas generadas. Si las columnas generadas totales son 8, llegamos a operar con un total de 5.308.328 datos extraídos desde el DCS.

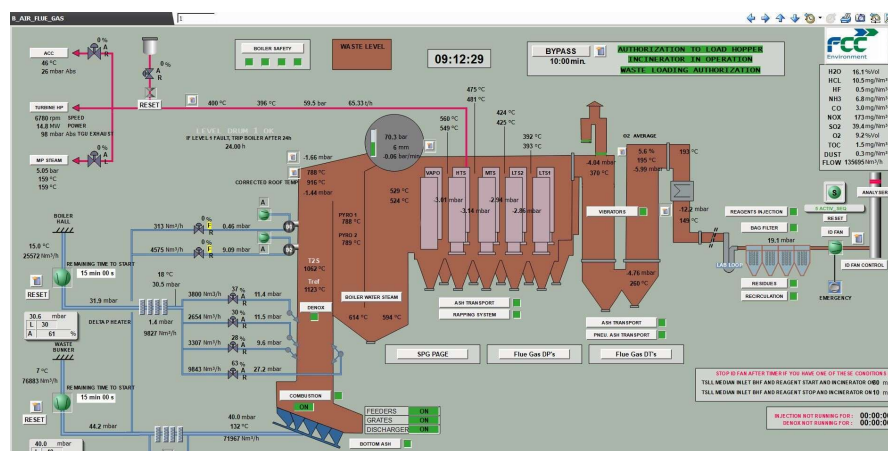


Figura 35 "Captura real del DCS de la planta de Lincoln correspondiente a la operación de la caldera"

La importancia de que este número fuese así de grande es que, alcanzando una solución, esta podría ser aplicada y demostrada tanto en el corto y largo plazo pues filtrando y desfiltrando datos para visualizar distintos puntos de funcionamiento o condiciones de operación, se puede comprobar si los métodos empleados eran o no correctos. Esto ha provocado que varias soluciones alcanzadas con los factores de corrección previamente expuestos funcionasen para varios casos, pero al no funcionar para un cierto caso concreto hubiese que descartar los avances realizados y replantear la ecuación y valores introducidos.

Con todo ello en la siguiente tabla se muestran los valores medios de L/h de amoniaco y el valor medio de emisiones de NH₃. También se muestran los valores medios de caudal emitido total por hora en Nm³/h, el % medio de O₂ en la caldera y los días totales que desde 2020 se han excedido los límites de emisión de NO_x, el cual es de 180 mg/Nm³:

Valor Medio de NO _x Emitido (mg/Nm ³)	139,4877 (174.86) *
Valor Medio de NH ₃ Empleado (L/h)	50,50248

Valor Medio de O ₂ en la caldera (%)	6,403
Número de días con NO _x >180mg/Nm ³	16 (Siendo el último el 03/11/2022)
Valor Medio de Caudal Emitido (Nm ³ /h)	116.979,3
Slip Medio de NH ₃ (mg/Nm ³)	4,521

Tabla 7 "Valores medios de operación del sistema de denoxización actual: NO_x emitido, NH₃ empleado, O₂ en caldera, días con exceso de emisión, caudal total y slip de NH₃"

*Respecto al valor de NO_x Emitido, a la hora de reportar el valor de NO_x a la agencia gubernamental se está permitido reducir un 20% aproximadamente la medida ya que el analizador y el propio sistema de medición y reporte tiene un cierto fallo.

Con los valores anteriores podemos deducir lo siguiente:

- El sistema cumple de manera correcta con los límites ya que a excepción de 16 días sobre 2.304 días el sistema denox ha conseguido cumplir con los límites de emisión. Eso se traduce en que tiene un margen de error de menos del 0,7%.
- La media de emisiones de NO_x está muy por debajo de los límites. Esto es bueno desde el punto de vista medioambiental, pero viéndolo desde un lado económico, sería óptimo poder emitir más si eso implica ahorrar NH₃ y de esa manera seguir cumpliendo perfectamente con la normativa mientras aumentas los beneficios reduciendo los costes de operación.
- El valor de NH₃ medio implica un gran uso del agente reductor por lo que o bien la cantidad de NO_x emitida es muy alta o la eficiencia con la que se usa ese NH₃ es baja.

Teniendo en cuenta que, por estimaciones de diseño que se han realizado al alza comparándolo con la operación actual, el caudal de NO_x introducido es de 39 kg/h. Este dato está basado en unas condiciones de operación en la que la cantidad de O₂ es del 7,51%.

Teniendo en cuenta que la media total de % de O₂ en la caldera es del 6,403% los 39kg/h se verían reducidos. Ya que no es lineal la relación O₂-Nox producido y para no infravalorar los kg/h producidos, podríamos decir que los kg/h de NO_x introducidos al sistema serán de:

$$39 * \left(1 - \left(1 - \frac{6,403}{7,51}\right) * 0.9\right) = 33,826 \frac{kg}{h}$$

$$\frac{33,826 * 10^6}{116.979,3} = 289,16 \text{ mg/Nm}^3$$

Si cogemos el dato del caudal medio emitido por la chimenea, obtenemos que inicialmente se producen 289,16 mg/Nm³ de NO_x. Con ello, cogiendo el dato del NO_x emitido antes de ser reportado, que es de 174.86 mg/Nm³, sabemos que se reduce un total de 114,303 mg/Nm³.

Teniendo lo anterior calculado, sabemos que inyectando 10,89 kg/h de amoníaco, ya que la densidad del amoníaco es de 0,88Kg/L y la concentración en la mezcla de amoníaco empleada es del 25%, se traduce en 93,093 mg/Nm³ inyectado al caudal de gases. Estequiométricamente, este caudal de NH₃ inyectado debería equivaler a lo siguiente mediante la ecuación de referencia de eliminación:



En base a la reacción y en unas condiciones óptimas de operación, cada mol introducido de NH₃ tendría que equivaler a cada mol introducido de NO. Al equivaler un mol de NH₃ a 17 g/mol y un mol de NO a 30 g/mol, estaríamos hablando que 17 gramos de NH₃ reaccionarían con 30g de NO evitando su emisión por la chimenea.

Con el caudal de NH₃ inyectado y con el NO_x esperado obtenemos que:

$$\text{Eficiencia NH}_3 (\%) = \frac{\text{Caudal Reducido de Nox}}{\text{Supuesto Caudal a reducir de Nox}} = \frac{114,303}{93,093 * \frac{30}{17}} = 69,4\%$$

Se aprecia como en líneas generales para lo que se podría esperar, no es mala la eficiencia del proceso ya que hay que tener en cuenta el factor impredecible de lo que combustiona y por tanto hay que lidiar con los distintos residuos que entren.

Sin embargo, tras obtener estos números podemos sacar en claro que hay mucho margen entre lo emitido y el límite gubernamental y que con una eficiencia de menos del 70% sería aún más importante ahorrar NH₃ y si es posible subir la eficiencia. De ahí, el diseñar la receta en función de la temperatura y los controles diseñados para incrementar el uso de NH₃ en función de las condiciones en tiempo real de operación y no solo en función de un valor medido en chimenea que además varía bruscamente constantemente.

Otro factor a tener en cuenta fue cuando realice el análisis de medias de inyección por intervalos de emisión. El resultado obtenido fue el siguiente:

Intervalo de NOx emitido (mg/Nm ³)	Media de L/h de NH ₃
< 145	38,476
145 – 155	58,8577
155 – 165	53,0535
165 – 175	45,8515
175 – 185	40,113
>185	35,496

Tabla 8 "Media de NH₃ inyectado (L/h) desglosada por intervalos de emisión de NOx con el sistema actual de dosificación"

En base al desglose realizado podemos llegar a la conclusión de que el uso de NH₃ no es el óptimo ya que se usan grandes cantidades de NH₃ para mantener la emisión en unos valores los cuales están muy alejados del límite, mientras que conforme nos acercamos a los límites máximos de emisión se usa cada vez menos NH₃ para contrarrestar ese exceso de NO_x.

Este error nace de la lógica del control previamente explicada, que es cuando un operario fija manualmente un valor de Slip NH₃ y ese valor se pasa, sin importar que ese valor se hubiese fijado varios días atrás, el control da prioridad a reducir el NH₃ slip y no hay control que amplíe el uso de NH₃, aunque la emisión de NO_x sea alta, pues el control de Slip NH₃ prima sobre el de NO_x. De ahí nace la necesidad de implementar un control que en función de las condiciones de operación vaya regulando el uso de NO_x para reducir el uso de amoníaco cuando mayor O₂ haya, lo que reducirá el slip y aumente el NH₃ cuando el NO_x pase de ciertos umbrales y los reduzca cuando el NO_x se mueva en unos niveles de emisión bajos.

En base a todo lo anteriormente expuesto, se plantean desarrollan e implementan las soluciones comentadas anteriormente y desarrolladas a continuación.

6.1.2 EFECTOS OBSERVADOS

Llevando el foco al trabajo realizado, una vez detectados y focalizados los problemas a resolver se llevó a cabo el diseño de los controles mostrados ya en el capítulo anterior y que solucionan en gran medida la problemática mostrada.

Los controles diseñados tratan cada uno de los problemas señalados cuando curren y a pesar de poder experimentar un incremento en la cantidad media de NO_x emitida, el control es mucho más estricto a la hora de garantizar que no se excederá el tope máximo reduciendo incluso el margen de error del actual sistema.

Es por todo ello por lo que, a modo de comparación y para sentar las bases del análisis de la solución obtenida, los datos del sistema de denoxización con el nuevo sistema propuesto referidos al valor de NO_x emitido, litros por hora de NH₃ y el número de días en los que la planta excedería su límite de emisión de NO_x, serían:

Valor Medio de NOx Emitido (mg/Nm3)	149,4218 (185,4284) *
Valor Medio de NH3 Empleado (L/h)	47,3418
Número de días con NOx >180mg/Nm3	1 (Siendo el último el 28/02/2021)
Slip Medio de NH3 (mg/Nm3)	4,382

Tabla 9 "Valores medios de operación del sistema de denoxización propuesto: NOx emitido, NH₃ empleado, días con exceso de emisión y slip de NH₃"

Para la estimación del NOx emitido, al no disponer de datos o aproximaciones similares he multiplicado para cada medida de 5 minutos la lectura de NOx emitido con el anterior sistema por la diferencia de NH3 inyectado. De esta manera para cuando se inyectase un 20% menos de NH3, la medida de NOx esperada sería un 20% superior. Cabe destacar que esta medida podría ser inferior, pues de la manera que he procedido he asegurado el 100% de efectividad del NH3 que se estaba retirando cuando en la realidad no es así. Sin embargo, a modo de garantizar la operación segura, he decidido aplicar este criterio.

Viendo los datos recogidos en base a los controles aplicados podemos llegar a las siguientes conclusiones:

- La emisión media de NOx aun siendo aumentada sigue estando muy por debajo de los límites máximos de emisión, casi un 17% aun.
- El hecho de no subir incluso más la media de emisión a un valor entre 150 y 160 que sería en mi opinión el intervalo perfecto de emisiones se debe a que se ha priorizado la operación segura de la planta favoreciendo reducir aún más el mínimo margen de error permitiendo con ello mayor autonomía de operación al sistema, pues si la operación es lejana a los límites de emisión no será necesaria la intervención humana del sistema. Tanto es así que el margen de error en este caso es de 0,0434%.

Con todo ello, se puede observar cómo es evidente que el ahorro de NH₃ es notable ya que se estima en que este será de entorno al 6,67% pudiendo llegar a ser mayor en caso de asumir un poco más de riesgo, pero sin llegar a sobrepasar límites.

De hecho, a modo de comparación esta sería la tabla referente a las últimas 5 ocasiones en las que con el sistema actual se excedieron los límites y a la derecha, los valores de emisión de NO_x que se obtendrían:

COMPARATIVA DE EMISIÓN		
Fechas	Valores Actuales	Valores Previstos
06/10/2022	180,4041	174,5003
09/10/2022	180,0517	175,5797
11/10/2022	185,8135	178,7267
12/10/2022	182,6182	175,6017
03/11/2022	180,8009	178,3016

Tabla 10 "Comparativa de las emisiones diarias de NO_x entre el método actual y el método previsto para las cinco últimas fechas en que se superó el límite de 180 mg/Nm³"

Como se puede observar el sistema planteado sería mucho más eficiente en cumplir con límites impuestos. Otro hecho a tener en cuenta es que la planta lleva 4 años sin faltar un solo día ya a los límites de emisión, ya que para las fechas de 2022 el límite de emisiones de aquel entonces era de 200 mg/Nm³. Aunque este valor se consideraba emisiones muy altas no alcanzaban a superar las emisiones máximas, por lo que, si el sistema de por si reduce más el NO_x con el método propuesto de operación en valores altos de emisión, esto podría permitir reducir el uso de NH₃ incluso a niveles mayores del 10% a la vez que reduces picos de emisión, lo que supondría una diferencia clave en la viabilidad económica de la planta.

También para comprobar y verificar el ahorro y como mejora el sistema propuesto al actual en cuanto a lógica de operación y eficiencia en la manera de actuar, se plantea la siguiente tabla:

Intervalo de NOx emitido* (mg/Nm3)	Media de L/h de NH3 (Actual)	Media de L/h de NH3 (Previsto)
*Respecto a Previsto		
145 – 155	57,085	49,706
155 – 165	58,838	54,854
165 – 175	49,4865	48
175 – 185	38,33	38,561

Tabla 11 "Comparativa de la media de NH₃ inyectado (L/h) entre el sistema actual y el sistema previsto para cada intervalo de emisión de NOx"

De esta manera vemos como el sistema priorizaría mucho más el ahorro cuando detecte que no es eficiente inyectar NH₃ ya sea por cantidad de NOx, por O₂ o por el rango de operación de la caldera y se asemejaría mucho más e incluso incrementaría la dosis del método actual cuando sí que fuese realmente necesario.

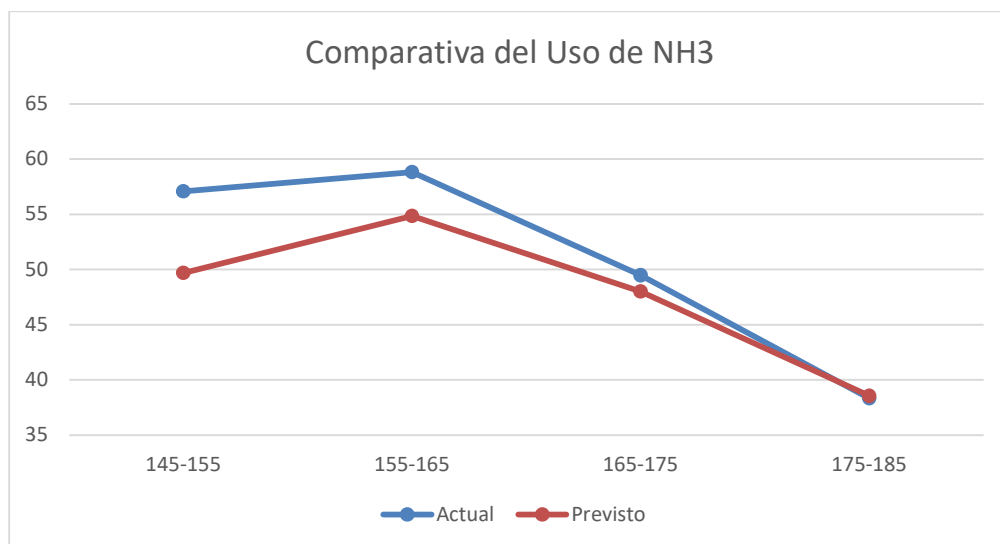


Figura 36 "Comparativa del uso de NH3 por intervalos de emisión de NOx"

Llevándolo a Rstudio desde donde he realizado un análisis y aprovechando las grandes capacidades de graficación de esta herramienta, he podido graficar la emisión de NOx con el nuevo método y compararlo con la emisión actual.



Figura 37 "Comparativa gráfica de las emisiones de NOx entre el sistema de dosificación actual y el sistema propuesto, generada en RStudio"

Aquí se puede observar como a pesar de ser casi constantemente un poco menor, las emisiones en valores cercanos a 180 son siempre mucho menores al del método actual mientras que las emisiones en valores inferiores a 150 mg/Nm3 son mayores con el nuevo método que con el actual. Mediante este gráfico se evidencia por ende el buen

funcionamiento de la tercera operación explicada anteriormente y el cumplimiento del sistema con los límites máximos de emisión

6.2 VALORES PARA INTRODUCIR EN EL PLC

A la hora de fijar los valores deseados en el PLC que regirán la primera parte del control de dosificación del sistema de denoxización, el presente proyecto tratará de fijar unos valores de manera que se minimice la intervención manual del sistema para garantizar la operación segura y automática.

De cara a ello, se ha estudiado el comportamiento de la eficiencia del NH₃ en función de la temperatura con el objetivo de establecer unos valores tanto para el NH₃ como para el NO_x medidos a final del proceso que cuenten con suficiente margen para no requerir intervención manual y que se puedan ir autoajustando gracias a los controles implementados.

El estudio se ha realizado teniendo en cuenta estudios oficiales publicados sobre la materia, así como la observación en operación real gracias al DCS de la planta de Lincoln.

6.2.1 ANÁLISIS TEÓRICO

Desde el punto de vista teórico, se ha llevado a cabo el estudio del informe publicado por la agencia de protección medioambiental de Estados Unidos en abril de 2019 “Selective Non-Catalytic Reduction”.

En este informe se detalla acerca de la formación del NO_x y la eficiencia, costes y análisis de los sistemas SNCR. En este informe, se asegura que la máxima eficiencia del amoníaco introducido en un sistema SNCR se alcanza cuando se inyecta en temperaturas aproximadamente de 950°C, aunque afirma que la temperatura de inyección es correcta desde 870°C hasta los 1100°C. Además, el mismo informe incluye el siguiente gráfico en el que se aprecia la variación de la eficiencia del NO_x introducido en % en función de la temperatura:

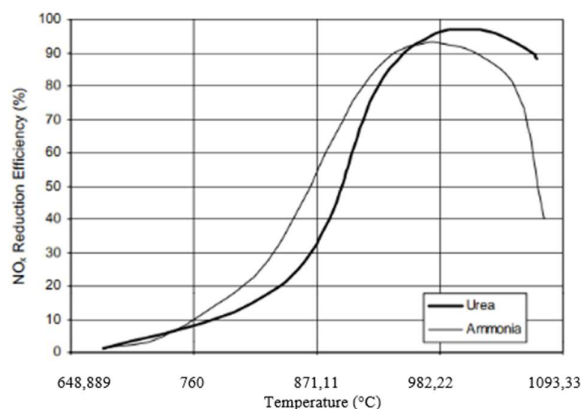


Figura 38 "Curva de eficiencia de reducción de NOx en función de la temperatura de inyección del NH₃, extraída del informe de la EPA (2019) y adaptada a grados Celsius"

Como se puede observar en el gráfico anterior, la curva para el uso de amoníaco (la más fina) alcanza valores muy significativos para una ventana de temperaturas muy estrecha, de ahí la importancia de este factor en este proyecto.

Respecto a los valores de eficiencia, son valores teóricos para situaciones perfectamente controladas e ideales. En operación real de la planta esos valores habrá que reducirlos a la mitad o incluso menos según el punto de operación que nos encontremos ya que hay que tener en cuenta que la caldera y el sistema de limpieza de gases no se modela específicamente para el sistema denox, sino para la correcta quema de residuos y la limpieza de numerosos gases además del NOx. Además, el estudio está realizado para la eliminación de NOx utilizando un cierto combustible en condiciones de operación precisas, algo que no se podrá dar en nuestro caso ya que el residuo recibido tiene características muy dispares en función del momento de combustión y periodo del año.

Con todo ello presente y a modo de establecer unos parámetros sobre los que se aplicaran factores de reducción, establecemos la siguiente ventana de eficiencias en la denoxización de la planta:

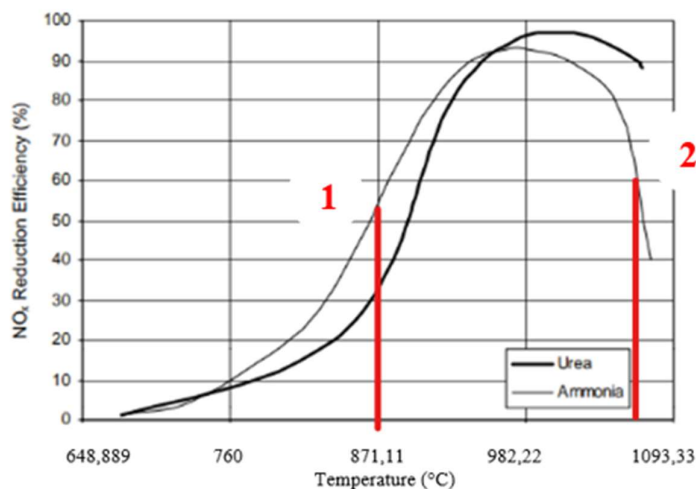


Figura 39 "Ventana de operación del sistema SNCR de la planta de Lincoln con los rangos de eficiencia mínima y máxima estimados en función de la temperatura de inyección"

Con la imagen anterior tendremos nuestra ventana de operación del sistema, la cual comprenderá valores de eficiencia desde el 55% para la temperatura mínima, la cual será de en torno a 870°C hasta la temperatura máxima de operación, la cual se fijará alrededor de los 1060°C con un rendimiento teórico del 60%.

Cabe destacar que estos son valores mínimos y máximos deseables pero que en ningún momento fajaran o mandaran sobre las condiciones de operación por lo que en relación al dashboard del PLC la temperatura mínima implicara el uso del nivel 8 mientras que para la temperatura máxima se usara el nivel 1 aunque no sean las condiciones óptimas. Esto es debido a que el sistema denox deberá funcionar y cumplir los parámetros de emisión siempre, aunque las condiciones no sean las óptimas ni estén cerca de poder serlo.

Otro documento también influyente en la eficiencia del NH3 introducido es el de la eficiencia teórica según los cálculos de diseño del sistema denox correspondientes al fabricante. A pesar de no ser muy concretos, ni justificarlo con explicaciones extensas, el fabricante del sistema, YARA, asegura que la eficiencia del sistema se movería en torno al 56% según su documento titulado "CALCULATION NOTES DENOX SYSTEM" el 11 de junio de 2012.

Como ya se detalló anteriormente, estos documentos de diseño distan bastante numéricamente de los valores de operación real, aunque con cierta corrección pueden ser de cierta utilidad. La siguiente imagen muestra una parte del documento en el que se establece la cantidad de NOx que se espera recibir por parte del sistema de denoxización, la cantidad de slip de amoniaco que se estima y la eficiencia del sistema:

4 NOx						
NOx in	mg/Nm ³	400	400	400	400	400
NO ₂ molar weight		46	46	46	46	46
NO _x in	kg/h	40	39	38	28	29
Mol NO ₂	kmol/h	0,87	0,86	0,83	0,60	0,62
5 NH₃-consumpt. (25%)						
NO _x out	mg/Nm ³	200	200	200	200	200
NH ₃ slip	mg/Nm ³	10	10	10	10	10
N ₂ O	mg/Nm ³	12	12	12	12	12

Reduction	%	50%	50%	50%	50%	50%
Efficiency	%	56%	56%	56%	56%	56%
Stoichiometry						
NH ₃ molar weight		17	17	17	17	17
NH ₃	kg/h	53	53	51	37	38

Figura 40 "Extracto del documento 'Calculation Notes Denox System' de YARA (2012) con los valores de diseño estimados del sistema"

Como se puede observar, los valores estimados de NOx final y slip de NH3 están muy alejados de los reales de operación ya que la media de NOx se sitúa muy por debajo de lo mostrado y el Slip de NH3 es también inferior al estimado. Es por ello por lo que de cara a utilizar el factor de eficiencia del sistema se ha calculado un factor de corrección basándonos en los datos históricos de emisión de NOx y slip de NH3 desde 2020 a 2026.

Respecto a los datos de operación en comparación con los teóricos, teniendo en cuenta que la densidad del amoniaco es de 0,88 Kg/L y que los valores mostrados son teniendo en cuenta solo los valores de operación real (quitando outlayers) tenemos que:

Valores Medidos	Valores Estimados	Variación
-----------------	-------------------	-----------

Valor Medio de NOx Emitido (mg/Nm3)	188,09 (Valor en crudo)	200	6%
Valor Medio de NH3 Empleado (L/h)	58,938	60,227	2,14%
Valor Medio de Slip NH3 (mg/Nm3)	3,5	10	65%

Tabla 12 "Comparación entre los valores medidos de operación real (2020–2026) y los valores estimados en el documento de diseño de YARA para el NOx emitido, el NH₃ empleado y el slip"

Basándonos en la tabla anterior, vemos como la gran diferencia entre lo calculado y la operación real está en el slip de NH₃. Con ello, calculamos el siguiente factor de corrección respecto a la eficiencia teórica:

$$56\% * \left(\frac{6 + 2,14 + 65}{3 * 100} + 1 \right) = 69,65\%$$

Esto comparado con la eficiencia del NH₃ actualmente según funciona la planta nos da a entender la eficiencia general del sistema puede andar en unas condiciones buenas de operación entorno al 65-70%.

Con el objetivo de tratar de llevar el proyecto a una operación real, nos quedaremos con el escenario más pesimista estableciendo la eficiencia del sistema en un 65%. De esta manera cualquier mejora en la operación será bienvenida y en el caso de que fuese peor de lo esperado aun contaríamos con margen respecto al 56% planteado por parte del fabricante.

Con todo ello, teniendo en cuenta la eficiencia del NH₃ introducido en el sistema y la eficiencia del NH₃ en función de la temperatura se ha elaborado la siguiente tabla de datos para los distintos valores de temperatura en función de donde se inyecte el NH₃:

Troof (°C)	Efenc. D2 (%)	Efenc. D3 (%)	Troof (°C)	Efenc. D2 (%)	Efenc. D3 (%)
750	18%	46%	790	34%	57%
751	18%	47%	791	34%	57%
752	18%	48%	792	34%	58%
753	18%	48%	793	35%	58%
754	19%	49%	794	35%	58%
755	19%	49%	795	36%	58%
756	19%	49%	796	36%	58%
757	19%	50%	797	37%	59%
758	20%	50%	798	37%	59%
759	20%	50%	799	38%	59%
760	21%	50%	800	38%	59%
761	21%	51%	801	39%	59%
762	22%	51%	802	39%	60%
763	22%	51%	803	40%	60%
764	23%	51%	804	41%	60%
765	23%	52%	805	41%	60%
766	24%	52%	806	42%	60%

767	25%	52%	807	42%	60%
768	25%	52%	808	43%	60%
769	26%	53%	809	43%	60%
770	26%	53%	810	44%	60%
771	26%	53%	811	45%	60%
772	27%	53%	812	45%	60%
773	27%	54%	813	46%	60%
774	28%	54%	814	46%	60%
775	28%	54%	815	47%	60%
776	28%	54%	816	47%	60%
777	29%	55%	817	48%	60%
778	29%	55%	818	49%	60%
779	29%	55%	819	49%	60%
780	30%	55%	820	49%	60%
781	30%	55%	821	49%	60%
782	31%	56%	822	50%	60%
783	31%	56%	823	50%	60%
784	31%	56%	824	50%	60%

785	32%	56%	825	50%	60%
786	32%	56%	826	51%	60%
787	33%	57%	827	51%	60%
788	33%	57%	828	51%	60%
789	33%	57%	829	51%	60%

Tabla 13 "Eficiencias teóricas del sistema SNCR de la planta de Lincoln por temperatura en el tejado de la caldera (Troof) para los puertos de inyección DENOX 2 y DENOX 3, en el rango de 750 a 829 °C"

A nivel teórico esto sería el resumen de eficiencias por temperaturas en el sistema denox para cada puerto de inyección.

6.2.2 PRUEBA EN OPERACIÓN REAL

Una vez obtenida la tabla de eficiencias del sistema en función de la temperatura queda la duda de por qué usar el puerto superior si teóricamente el puerto inferior aporta mejores eficiencias al sistema.

Esta duda se despejó cuando el 5 de marzo y experimentalmente se demostró cómo era mejor inyectar NH₃ por el puerto más inferior posible hasta cierta temperatura.

Los resultados obtenidos a raíz del experimento fueron los siguientes:

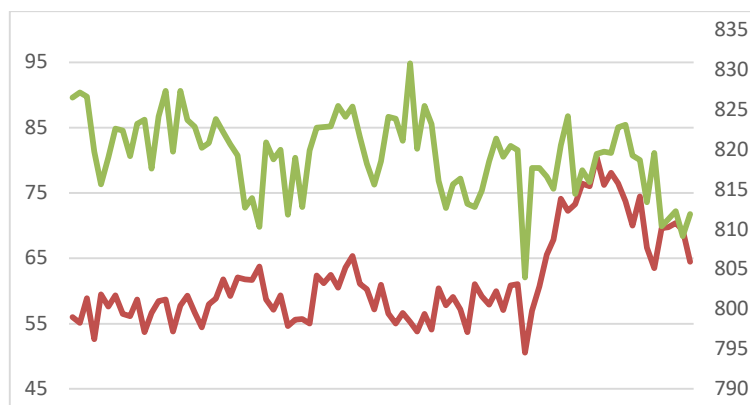


Figura 41 "Gráfica de L/h de NH₃ (Rojo)-Temperatura °C (Verde)"

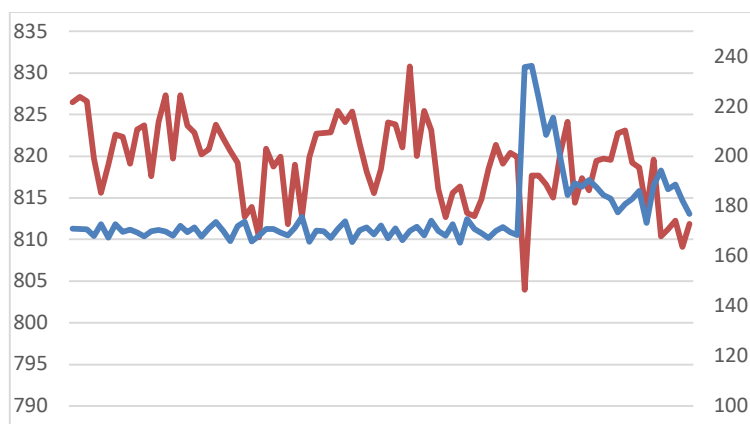


Figura 42 "Gráfica NO_x emitido mg/Nm³ (Azul)-Temperatura °C (Rojo)"

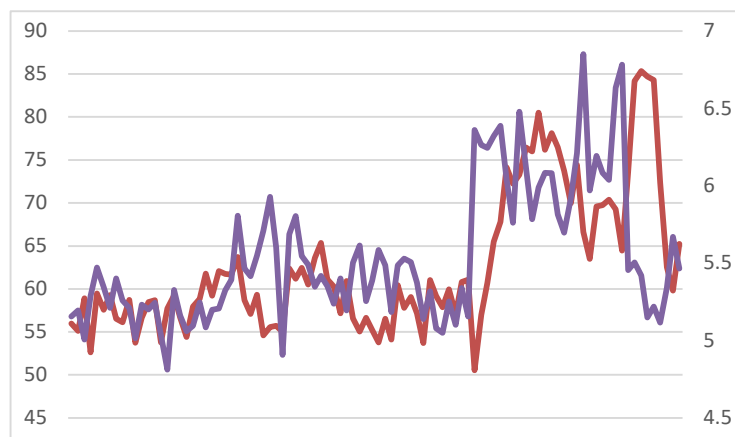


Figura 43 "Gráfica % O₂ (Violeta)-NH₃ L/h (Rojo)"

Se puede observar un desdoblamiento del NOx emitido y por tanto también de la cantidad de NH3 inyectado. Sin embargo, también se puede ver como la temperatura justo en el momento del desdoblamiento cae y además la concentración de O2 en la caldera se dispara.

Esto lo que provocó fue el desdoblamiento que vemos ya que se redujo la cantidad de NH3 inyectado por una caída de temperatura que es lo que regula el caudal máximo inyectado y a la vez un incremento del % de O2 en la caldera favorecía una mayor producción del NOx.

Esto fue un cúmulo de circunstancias que ocurrían dado que esta prueba se llevó a cabo justamente tras una parada de mantenimiento y por tanto los arranques tanto como la operación los días posteriores a estas paradas son muy inusuales y volátiles produciéndose escenarios muy adversos en los que se precisa por momentos mayor temperatura, entradas de aire o menor cantidad de residuos hasta que se estabiliza la combustión en la caldera. A pesar de ello, se puede observar cómo los desdoblamientos producidos son corregidos rápidamente y hasta entonces el sistema estaba manteniendo los valores de emisión en niveles bajos de una manera eficaz y óptima.

De hecho, si observamos los valores medios durante este periodo y los valores medios con las mismas características de operación en otros escenarios inyectando desde el puerto superior podemos ver como la eficacia del NH3 introducido y la gestión del uso de este es mucho mejor:

	VALORES MEDIOS DURANTE LA OPERACIÓN EN “DENOX 3” MOSTRADA	VALORES MEDIOS INYECTANDO EN “DENOX 2” PARA (T media) >= 821
NOx (mg/Nm3)	178,03	187,24
NH3 (L/h)	62,699	61,53

O ₂ (%)	5,54	5,615
NH ₃ (mg/Nm ³)	1,615	2,776
T(°C)	821,16	821

Tabla 14 "Comparativa de valores medios de operación (NO_x, NH₃, O₂, slip y temperatura) entre la inyección en DENOX 3 y la inyección en DENOX 2 para temperatura media igual o superior a 821 °C"

Como se puede observar, los valores de operación durante este periodo fueron mucho mejores a los valores que se suele obtener cuando se inyectaba el NH₃ en el puerto superior. A pesar de emplear más NH₃, los valores de emisión y el slip fueron menores. Esto nos indica que, implementando los controles previamente planteados, conseguiremos utilizar menos NH₃ manteniendo valores correctos de NO_x y slip NH₃ emitidos.

Hay que aclarar que las condiciones de operación cuando se implementó el nuevo sistema fueron unas condiciones extraordinarias ya que el valor medio de la temperatura fue de 821°C mientras que de normal esta temperatura está en torno a 800°C y luego hubo un desdoblamiento que produjo unos picos inusuales en la emisión tanto como en la inyección. Es por ello por lo que, a pesar de incluir el ejemplo y analizarlo, se precisaría de más experimentación y operación similar ya que el razonamiento y argumentación se sostiene en bases mayoritariamente teóricas ya que cambiar los métodos de operación en la planta requieren de mucho tiempo y procedimiento burocrático.

6.3 RELACIÓN AHORRO-RIESGO

Durante todo el proyecto se ha ido mostrando y explicando una solución la cual, no solo mejoraba la actual situación del sistema de dosificación de amoníaco en la planta, sino que además nos permitía correr menos riesgo de incurrir en excesos en las emisiones de NO_x.

Se ha mostrado como comparando el sistema planteado obteníamos una tasa de error en las emisiones inferior al sistema actual mientras que a la vez conseguíamos un ahorro en el uso

de amoniaco de entorno al 7%. Sin embargo, todo ello ha sido mostrado y realizado siguiendo unas directrices de máxima cautela y seguridad que pueden llegar a ser excesivas ya que en los momentos que se superó el límite de 180 mg/Nm³ con el método actual, la regulación de emisiones establecía el límite horario en 200 mg/Nm³.

AC	AD	AE	AF	AG
Días sin repe		Media/Día con Nuevo Sistema		Media/Día con Antiguo Sistema
28/02/2021		181.6691292		180.1747568
16/05/2021		179.6045593		180.3537465
19/05/2021		176.9106982		183.5211331
20/05/2021		179.424366		191.0426005
21/05/2021		173.4877516		180.941039
04/06/2021		175.1279985		183.5042473
22/06/2021		172.9140631		182.3145456
22/07/2021		176.4570362		181.9332229
06/07/2022		177.7433242		185.4864699
07/07/2022		175.263146		181.7170289
08/07/2022		174.3973508		180.73938
06/10/2022		174.5003315		180.4040862
09/10/2022		175.5797141		180.0517198
11/10/2022		178.7266965		185.8135082
12/10/2022		175.6017013		182.618224
03/11/2022		178.3016075		180.8008668

Figura 44 . "Evolución temporal de las emisiones de NO_x de la planta de Lincoln con indicación del cambio del límite regulatorio de 200 a 180 mg/Nm³ en diciembre de 2023"

Como se puede observar en la imagen superior, mediante la operación del método actual de dosificación, la última vez que se incurrió en una emisión de NO_x superior a 180 mg/Nm³ fue el 3 de noviembre de 2022, mientras que la regulación hasta el 3 de diciembre de 2023 establecía el límite de emisiones horarias en 200 mg/Nm³. A partir de este 3 de diciembre, se estableció el límite en 180 mg/Nm³ con el objetivo de que en futuras actualizaciones del reglamento, este límite fuese incluso menor, algo para lo cual el presente sistema estaría preparado para cumplir mediante simples modificaciones numéricas en el software de control del PID.

Esto quiere decir que en el momento que se reportaron esas medidas no se estaba incurriendo en emisiones excesivas por encima del límite legal, sin embargo, a pesar de que no se incumplió ningún límite regulatorio de aquel entonces y por tanto podemos afirmar que FCC no opero de manera errónea la planta aquellos días, se ha preferido establecer el límite de emisiones de NOx en 180 mg/Nm³ incluso antes de que entrase en vigor la reducción del límite de emisiones con el fin de garantizar que el sistema propuesto, hasta operando en unas condiciones no favorables para cumplir el límite de 180 mg/Nm³ es capaz de autorregularse para no sobrepasar este límite y mantener las bajas emisiones de NOx.

A pesar de todo ello y a modo de estudio se va a llevar a cabo un análisis de las posibilidades de potenciar el ahorro incurriendo en un mayor riesgo a la hora de emitir NOx. Se va a estudiar precisamente, cuanto ahorro conseguiríamos en la planta si aplicamos el límite de emisiones actual de NOx desde la fecha que entró en vigor y no para toda la operación de la planta desde 2020. Para ello, se modificarán parámetros de distintos controles hasta que se obtenga la combinación de ellos que resulte en una media de emisión diaria entorno a los 180 mg/Nm³, pero sin llegar a dicho valor.

La modificación que se llevará a cabo será principalmente la de aumentar el rango de valores del tercer factor de corrección. Este control será clave en futuras actualizaciones que se quieran llevar a cabo ya que nos permitirá adaptar el sistema rápidamente y sin mucho esfuerzo ni modificaciones mayores a nuevas regulaciones ya sean más o menos estrictas con los límites. Al distinguir este control hasta de 7 rangos de emisión, esto nos permite más fácil el discernir claramente y regular así el sistema para operar siempre en un rango de valores de emisión intermedios.

Para el estudio de la relación entre ahorro y riesgo se llevarán a cabo dos aproximaciones. La primera y es la que se muestra a continuación se ha realizado una modificación del tercer factor de corrección para las operaciones de dosificación previas al 3 de diciembre de 2023. Para este análisis se ha establecido la misma operación por ventanas de emisión, pero empezando en 180 mg/Nm³ y acabando en 210 mg/Nm³ de la siguiente manera:

$$\text{Media de 30 min de NOx: } \left\{ \begin{array}{l} \geq 210 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3} \rightarrow Fc = 1,25 \\ < 210 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3} \rightarrow Fc = 1,15 \\ < 200 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3} \rightarrow Fc = 1 \\ < 195 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3} \rightarrow Fc = 0,95 \\ < 190 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3} \rightarrow Fc = 0,8 \\ < 180 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3} \rightarrow Fc = 0,7 \\ = 0 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3} \rightarrow Fc = 1 \end{array} \right.$$

Desde el 3 de diciembre de 2023 se ha mantenido la misma operación del factor de corrección que se venía aplicando ya en el nuevo método. Una vez aplicado ello se ha comprobado que no se superaba el límite de 200 mg/Nm³ para operaciones previas al 3 de diciembre de 2023 y que se seguía sin superar los 180 mg/Nm³ para operaciones posteriores y con ello se han obtenido los siguientes datos de operación.

Acción	Resultado
L/h empleados en total	44,237
Ahorro de amoníaco (%)	14,15%
Variación respecto a método planteado	+7,487%

Tabla 15 "Resultados del Escenario 1 de la relación ahorro-riesgo: ahorro total de amoníaco aplicando el límite regulatorio de 200 mg/Nm³ para el periodo anterior a diciembre de 2023"

Este estudio por lo pronto lo que demuestra es que el método de operación propuesto amplía el ahorro a mayores límites de emisión. Esto significa que si se regulase sobre los actuales límites de emisión para cambiar la forma de medir estos gases de manera que aumentase los valores límite podríamos incrementar la cantidad de NH₃ ahorrado.

La segunda parte de este estudio radica en apretar los límites de emisión para operaciones posteriores al 3 de diciembre de 2023 tratando de no incidir en sobre emisiones, pero tratando de maximizar el ahorro de amoniaco. Para ello se han seleccionado aquellos días en los que se sobrepasa los 170 mg/Nm³ con el método nuevo y se ha observado un pico de 174,69 mg/Nm³ para el 10 de septiembre de 2025. La idea ahora sería incrementar las ventanas de operación de la misma manera que se ha hecho para el caso anterior, pero para las operaciones posteriores al 3 de diciembre manteniendo el límite de 180 mg/Nm³ sin sobrepasar, poniendo como objetivo óptimo alcanzar los 179,99 mg/Nm³.

Días sin rej.	Media/Día con Nuev.	Media/Día con Antigü.
27/02/2025	171.7207872	167.0195694
28/04/2025	172.5974133	168.0529
16/06/2025	170.1119862	170.2631732
08/09/2025	172.9493744	159.9462185
09/09/2025	170.0104795	168.7824676
10/09/2025	174.6920891	174.7144126
30/09/2025	170.2452711	166.9772571
13/10/2025	170.5271309	168.3790843
07/04/2026	170.6310217	155.9726049

Figura 45 "Representación de las ventanas de operación del tercer factor de corrección optimizadas para el escenario de máximo ahorro manteniendo el límite de 180 mg/Nm³"

Una vez aplicados los cambios, las ventanas de operación para la dosificación serían las siguientes:

$$\text{Media de 30 min de NOx: } \left\{ \begin{array}{l} \geq 185 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3} \rightarrow Fc = 1,25 \\ < 185 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3} \rightarrow Fc = 1,15 \\ < 180 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3} \rightarrow Fc = 1 \\ < 175 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3} \rightarrow Fc = 0,95 \\ < 170 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3} \rightarrow Fc = 0,8 \\ < 160 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3} \rightarrow Fc = 0,7 \\ = 0 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3} \rightarrow Fc = 1 \end{array} \right.$$

Con ello obtenemos un valor máximo de emisión para el 10 de septiembre de 2025 de 179,77 mg/Nm³, cumpliendo por tanto con el límite legal de emisiones y dando por ende los siguientes datos de operación finales combinando las modificaciones previas y posteriores al 3 de diciembre de 2023:

Acción	Resultado
L/h empleados en total	43.314
Ahorro de amoniaco (%)	16,59%
Variación respecto a método planteado	+9,92%

Tabla 16 "Resultados del Escenario 2 combinado de la relación ahorro-riesgo: ahorro máximo obtenido respetando el límite vigente de 180 mg/Nm³ en todo el periodo analizado"

Se demuestra, por ende, que el método planteado es un sistema que podría reportar grandísimos ahorros en la operación de la planta referidos al uso de amoniaco, pero priorizando correr prácticamente riesgos nulos, se convierte en un sistema que mantiene un ahorro importante a la vez que libera de preocupaciones y manipulación humana un sistema del que depende el bienestar social y económico de la planta.

El método planteado que maximiza el ahorro podría implantarse de facto en la planta en futuras ampliaciones, sin embargo, con el fin de garantizar no incidir en emisiones superiores a 180 mg/Nm³ y manejar un margen cómodo respecto a los 180 mg/Nm³ por futuras condiciones de operación que sean nuevas en la planta se instalara el método comentado y desarrollado en los apartados anteriores al actual. A pesar de que se ha decidido apostar por la operación segura y sin riesgos, ya que la planta ha cumplido siempre con los límites establecidos de emisión de NO_x, quedará a disposición de la dirección general de la planta pivotar hacia versiones de este modelo de operación que puedan fomentar el ahorro en el consumo de amoníaco pudiendo encontrar soluciones intermedias que sigan sin comprometer en gran medida los límites de emisión y maximicen el ahorro a costa de reducir un poco el “colchón” existente tras la aplicación del método explicado en el apartado 5.3.

Igualmente e independientemente del método de operación empleado, la planta de Energy from Waste de Lincoln siempre escogerá el método de operación más seguro y comprometido con las medidas medioambientales antes de los intereses económicos pues es la forma en la que ha operado desde sus inicios y porque los costes de incurrir en emisiones superiores no solo tendría costes económicos por las sanciones sino que empeoraría la imagen pública de FCC con respecto a la sociedad y la administración pública para futuras concesiones.

6.4 BENEFICIOS REPORTADOS

Respecto a los beneficios obtenidos en la planta una vez acabado el proyecto, se comentarán los mismos desde un punto de vista teórico. Es cierto que el objetivo inicial del proyecto era poder hablar de unos beneficios prácticos respecto a los resultados obtenidos una vez implantado el proyecto, pero debido a cuestiones operativas de la planta, disponibilidad del personal y cuestiones administrativas aún no ha sido posible implantar el proyecto o al menos no con suficiente duración para poder hablar de unos resultados con una duración fiable. A señalar que el proyecto ha sido aprobado para poder implantarse, por lo que todo lo expuesto en el documento ha sido presentado, explicado, analizado y aprobado por el

personal de la planta de Energy from Waste de Lincoln, sin embargo, aún no ha dado tiempo a poder ser implantado y de ahí que hablemos de los resultados esperados teóricamente.

6.4.1 BENEFICIOS OPERATIVOS

Respecto al impacto operativo que reportará este sistema a la planta, los operarios de esta disfrutarán de un sistema mucho más automático y autorregulable que reducirá significativamente el número de veces que un operario ha de ir personalmente hasta el PLC para modificar valores o tener que estar siguiendo los valores de emisión de NOx o empleo de NH3 de manera diaria.

El controlador PID existente opera bajo un esquema de retroalimentación pura, en el que la señal de error se calcula a partir de la medición de NOx obtenida aguas abajo del punto de inyección de NH3. Esta arquitectura introduce un retardo de proceso significativo, estimado entre 15 y 30 minutos, correspondiente al tiempo necesario para que el reactivo se distribuya, reaccione con los óxidos de nitrógeno y la variación resultante sea detectada por el analizador. En presencia de un retardo de esta magnitud, la acción derivativa del controlador pierde efectividad práctica, dado que su contribución se basa en la tasa de cambio del error y, cuando dicha variación es detectada, la perturbación que la originó ya ha atravesado completamente el sistema. El resultado es que el término derivativo actúa sobre un error cuya causa ya no es corregible en tiempo real, quedando su aportación reducida a un papel marginal dentro de la ley de control.

El nuevo sistema de control incorpora mediciones aguas arriba del punto de inyección, integrando variables de proceso relativas a las condiciones operativas de la caldera. Dado que la producción de NOx está estrechamente vinculada al régimen de combustión y a la carga térmica del equipo, las franjas de operación definidas en el diseño de la caldera permiten establecer una estimación anticipada de la concentración de NOx esperada y, por tanto, de la dosificación de NH3 requerida antes de que la perturbación se manifieste en la medición de salida. Este enfoque introduce una componente de prealimentación que complementa el lazo de retroalimentación existente, reduciendo el retardo efectivo con el que el sistema de control percibe los cambios en la variable de proceso.

Esta reducción del retardo efectivo tiene una repercusión directa sobre el comportamiento del término derivativo. Al disponer de información anticipada sobre la evolución del error, la acción derivativa puede responder a cambios reales en la dinámica del proceso y no únicamente a variaciones ya consolidadas en la señal de retroalimentación. En consecuencia, sin modificar el algoritmo PID subyacente ni los parámetros de sintonía, el nuevo esquema de medición dota indirectamente al término derivativo de una contribución funcional real dentro de la ley de control, mejorando la capacidad de respuesta del sistema ante perturbaciones transitorias en la carga de la caldera.

Con lo anterior, he preparado mediante el lenguaje de programación R, en la plataforma Rstudio con la versión R 4.5.3, un análisis respecto al uso de NH₃ y lo que se ahorra comparándolo con el sistema actual de manera que se pueda observar la evolución con el paso del tiempo del uso de NH₃ y el cómo se hubiese ido ahorrando NH₃ durante ese periodo de haber implementado con el sistema propuesto.

Para hacer este análisis he introducido en R los datos referentes al Excel que he operado y he llevado a cabo un filtrado, análisis y reconocimiento de tendencias, con ello obtengo datos visuales como el siguiente:

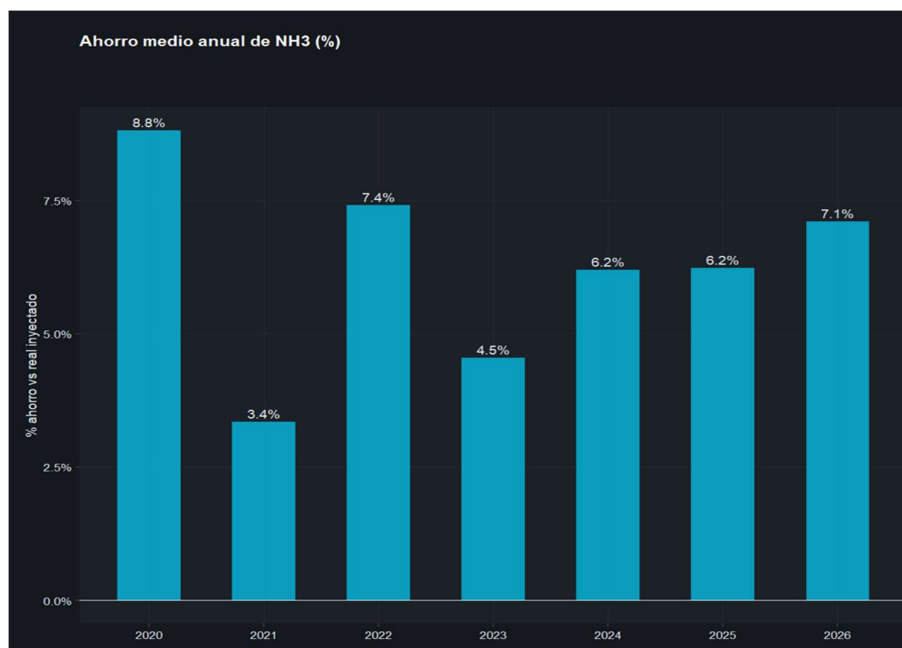


Figura 46 "Desglose anual del ahorro de NH₃ (L/h) obtenido con el sistema propuesto frente al sistema actual de dosificación, representado en RStudio"

En el gráfico podemos ver el desglose de ahorro de NH₃ para cada año de operación. Además, para observar el comportamiento histórico también se han graficado los datos recogidos del slip en la planta tanto en un gráfico que se puede observar la evolución del slip durante toda la operación, incluyendo paradas de mantenimiento, como para ver la versión resumida comparativa:

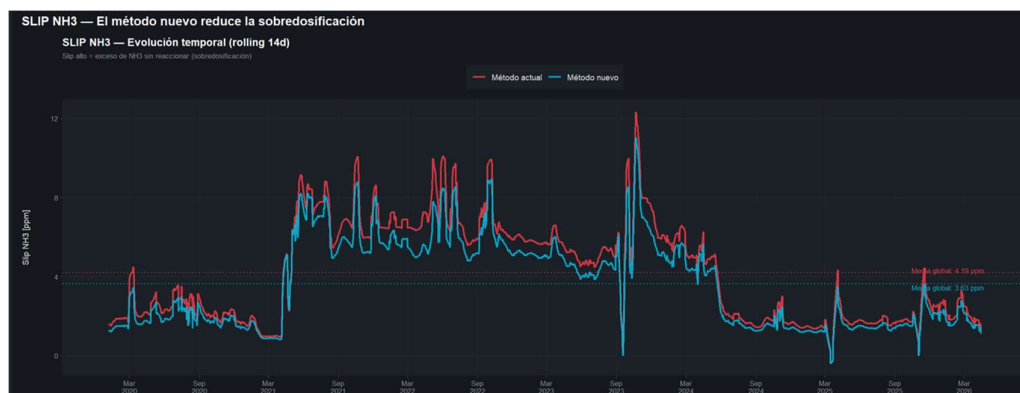


Figura 47 "Evolución histórica completa del slip de NH₃ medido en la planta de Lincoln entre 2020 y 2026, incluyendo periodos de parada de mantenimiento"

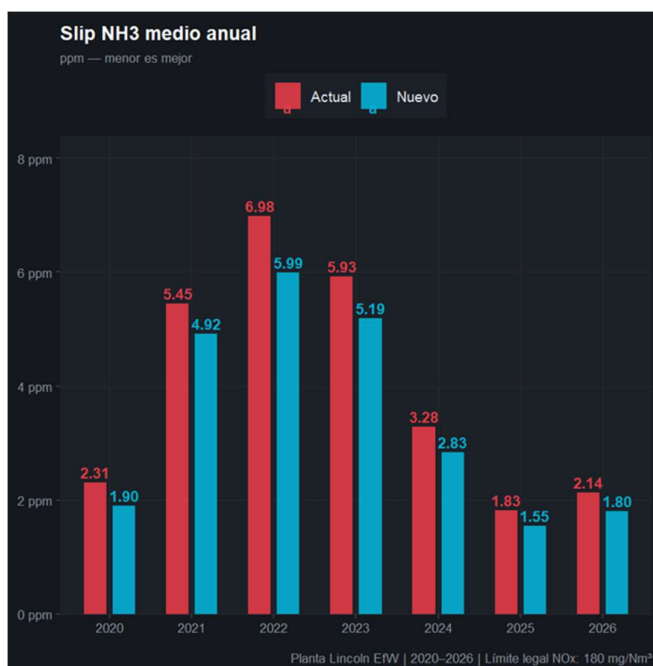


Figura 48 "Comparativa resumida del slip medio de NH₃ entre el sistema actual y el sistema propuesto en periodos de operación normal"

6.4.2 IMPACTO ECONÓMICO

Respecto al beneficio económico que este proyecto causara en la planta, en este ámbito se podría dividir el impacto en tanto de un punto de vista de impacto directo y de impacto indirecto.

Referido al impacto directo para el apartado financiero de la planta de Lincoln, el proyecto permitiría ahorrar dinero en la compra y manipulación de NH₃. Basándonos en los datos internos, en los años 2024 y 2025 el gasto por parte de la planta en NH₃ fue de £123.000 y £124.000 respectivamente, que pasado a euros serían 142.680€ y 143.840€. Además, viendo los datos históricos de operación expuestos anteriormente se observa como la tendencia en el uso de NH₃ es alcista por lo que se puede esperar que este gasto en amoníaco de aquí a años venideros sea incluso mayor y todo ello sujeto a precios que varían en función de las condiciones de mercado, lo cual dado la compleja situación geopolítica actual puede repercutir en mayores gastos de lo esperado.

Es por ello por lo que, gracias al ahorro medio esperado mediante la implantación del presente proyecto, esperando un ahorro en amoníaco de 6,67% anual se podría afirmar que el proyecto podría introducir un ahorro de en torno a 9.000€ anuales, o llevado a la moneda local, £7.800. Este valor, en función del riesgo que se quiera asumir podría elevarse incluso a valores mayores del 10% ya que el diseño planteado prima el asumir ningún tipo de riesgo al ahorro económico. Entorno al impacto económico directo de la planta, podríamos asumir una relación inversamente proporcional entre el dinero ahorrado y el riesgo a poder concurrir en un exceso de emisión. A su vez un exceso en emisiones disminuiría la confianza y apoyo por parte de las administraciones públicas a la planta y a FCC. De ahí que haya decidido reducir ese riesgo al mínimo imprescindible, aunque hay cierto margen en el que se puede obtener un mayor ahorro manteniendo niveles de riesgo mínimos. A pesar de ello opino que ese aspecto sería un paso más allá del actual proyecto en que se podría proceder una vez que este proyecto se implantase y funcionase correctamente con los resultados esperados durante un periodo de tiempo prolongado ya sea de 6 meses o un año.

Respecto a los impactos económicos indirecto que puede causar este proyecto en la operatividad de la planta considero que una mejora en la tasa de error a la hora de incurrir en excesos de emisión puede ayudar a la compañía en obtener primas de seguros más bajas al igual que puede ayudar en obtener un mayor respaldo por parte de las administraciones públicas en futuros proyectos. Todo ello, a pesar de no poder ser cuantificado a día de hoy sí que puede repercutir en ahorros de decenas de miles de euros o ingresos de cientos de millones en el caso de obtener adjudicaciones en proyectos futuros relacionados con el medioambiente.

De la misma manera, el NH₃ tiene un alto impacto en la corrosión de los equipos y la infraestructura de la planta. Conseguir reducir la emisión o poder tener más controlada esta nos permitirá minimizar estos impactos causados por la corrosión, lo que a la larga puede repercutir en ahorros en el OPEX de la planta.

6.5 OBJETIVOS ALCANZADOS VS OBJETIVOS PROPUESTOS

A continuación, se recoge una comparativa estructurada entre los objetivos definidos en el apartado 1.3 y los resultados cuantitativos obtenidos tras el análisis de la operación histórica simulada con el sistema propuesto:

Objetivo	Meta planteada	Resultado obtenido	Valoración
Reducción del amonía slip	< 4,5 mg/Nm ³	Slip medio sistema actual: 4,521 mg/Nm ³ Slip medio sistema propuesto: 4,382 mg/Nm ³ Reducción conseguida: 3,1 %	✓ Cumplido

Objetivo	Meta planteada	Resultado obtenido	Valoración
Reducción del consumo de NH₃	$\geq 5 \%$ de ahorro	Escenario conservador (base): ahorro del 6,67 % Escenario de máximo ahorro (Esc. 2): ahorro del 16,59 % NH ₃ medio actual: 50,50 L/h → propuesto: 47,34 L/h	✓ Superado
Mejora de la eficiencia de denoxización	$\geq 10 \%$ de mejora	Mejora cualitativa confirmada: inyección en ventana óptima 850–960 °C. Cuantificación directa no realizable por ausencia de sensor in-situ. Validación pendiente de instalación de sensores en puertos de inyección.	~ Parcial
Cumplimiento del límite de NO_x (≤ 180 mg/Nm³)	0 excesos diarios	Sistema actual: 16 días con exceso (último: 03/11/2022) Sistema propuesto: 1 día con exceso (último: 28/02/2021) Tasa de error: 0,70 % → 0,04 % Margen medio respecto al límite: 17 %	✓ Superado
Automatizar y facilitar la operación	Menor intervención	Sistema autorregulable con tres factores de corrección en cascada.	✓ Cumplido

Objetivo	Meta planteada	Resultado obtenido	Valoración
	manual en el PLC	Cancelación automática del factor NOx ante fallos del analizador. Reducción estructural de la necesidad de intervención manual.	
Ahorro económico significativo	Reducción del gasto en NH ₃	Ahorro anual estimado en escenario base: ~9.000 €/año. Ahorro en escenario Esc. 2: ~27.500 €/año. (Base: gasto de ~143.000 €/año en 2024–2025)	✓ Cumplido

Tabla 17 “Comparativa de Objetivos Alcanzados y Propuestos”

Del análisis anterior se desprende que cuatro de los cinco objetivos cuantitativos han sido cumplidos o superados. El único objetivo que no puede verificarse de manera directa es la mejora de la eficiencia de denoxización en un 10 %, dado que la ausencia de sensores de temperatura en los puertos de inyección impide calcular con precisión la eficiencia real en tiempo de operación. No obstante, desde un punto de vista cualitativo, la corrección del punto de inyección hacia la ventana térmica óptima (850–960 °C en el punto de inyección) implica una mejora estructural de la eficiencia cuya cuantificación exacta queda pendiente de la instalación de los sensores contemplados en los trabajos futuros.

Cabe destacar igualmente que el escenario base presentado corresponde al criterio de máxima prudencia operativa. Los valores reales tras la implantación podrían ser superiores, especialmente en lo relativo al ahorro de amoniaco, al operar con un margen todavía conservador respecto al límite regulatorio de 180 mg/Nm³.

Capítulo 7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

El presente capítulo tiene como finalidad sintetizar el trabajo desarrollado a lo largo del proyecto, evaluar el grado de consecución de los objetivos planteados al inicio de este, reconocer de manera explícita las limitaciones metodológicas inherentes al estudio y, por último, proponer una hoja de ruta concreta y ordenada para los trabajos futuros que permitan dar continuidad a los resultados obtenidos y ampliar su alcance.

7.1 SÍNTESIS Y REFLEXIÓN

El proyecto ha abordado la optimización integral del sistema de denoxización por Reducción Selectiva No Catalítica (SNCR) de la planta de Energy from Waste gestionada por FCC Environment en Lincoln (Reino Unido), instalación que procesa aproximadamente 500 toneladas diarias de residuos sólidos urbanos y genera en torno a 300 MWh de energía eléctrica.

Para ello se han desarrollado dos contribuciones principales e interrelacionadas. En primer lugar, se ha diseñado una receta de inyección optimizada por temperatura, apoyada en el estudio del perfil térmico de la caldera mediante una ecuación exponencial unificada derivada de mediciones experimentales directas en los puertos de inyección, con un error de validación inferior al 1 %. A partir de dicha ecuación se ha determinado con precisión la temperatura de cambio de nivel de inyección, fijada en 805 °C en el tejado —equivalente a 960 °C en el punto de inyección—, y se han establecido ocho niveles de caudal máximo de NH_3 (70–105 L/h) con un factor de seguridad de 1,5 sobre los valores medios históricos de operación.

En segundo lugar, se han diseñado e implementado en SIMATIC Manager tres factores de corrección automáticos que actúan en cascada sobre la salida del lazo PID existente: el primero en función del régimen de operación de la caldera (temperatura y toneladas de residuo entrantes por hora); el segundo en función del porcentaje de O_2 respecto a su valor

de consigna; y el tercero —el de mayor impacto— basado en la media móvil de 30 minutos de las emisiones de NOx registradas en chimenea.

El conjunto del sistema ha sido analizado sobre una base de más de 5,3 millones de registros operativos extraídos del DCS de la planta entre enero de 2020 y abril de 2026. Los resultados obtenidos han sido presentados, explicados y aprobados por el personal de operación de la planta de Lincoln, si bien su implantación física definitiva está pendiente de disponibilidad operativa

7.2 LIMITACIONES DEL ESTUDIO

Un trabajo riguroso exige reconocer de forma explícita las limitaciones que condicionan la validez y el alcance de los resultados presentados. En el caso de este proyecto, dichas limitaciones son de naturaleza diversa y se agrupan a continuación en cinco categorías:

7.2.1 NÚMERO REDUCIDO DE MEDICIONES EXPERIMENTALES DE TEMPERATURA

La ecuación exponencial unificada que describe el perfil de temperatura a lo largo de la caldera, fundamento técnico de la temperatura de cambio de nivel de inyección, se ha derivado a partir de únicamente dos mediciones experimentales directas:

- Medición 1: temperatura de tejado 804 °C → 880 °C en el puerto DENOX 2.
- Medición 2: temperatura de tejado 812 °C → 967 °C en el puerto DENOX 3.

Con solo cuatro puntos de datos disponibles, el ajuste exponencial ofrece un error de validación inferior al 1 % en los puntos de anclaje conocidos, pero su capacidad de generalización a condiciones muy alejadas de las medidas —temperaturas extremas en el tejado, residuos con poderes caloríficos atípicos o cargas de residuo inusuales— no ha podido ser verificada. Un mayor número de mediciones distribuidas en distintos rangos de temperatura y condiciones de carga reforzaría considerablemente la robustez del modelo.

7.2.2 CONDICIONES NO REPRESENTATIVAS DURANTE EL EXPERIMENTO DE VALIDACIÓN

La prueba en operación real llevada a cabo entre el 5 y el 8 de marzo, que sirvió para validar experimentalmente la ventaja de inyectar desde el puerto inferior (DENOX 3) hasta la temperatura de cambio, se realizó inmediatamente después de una parada de mantenimiento. Los arranques y los días de operación posteriores a estas paradas son especialmente inusuales y volátiles, con escenarios adversos hasta que la combustión en la caldera se estabiliza completamente.

Por este motivo, la conclusión extraída de dicha prueba —que inyectar desde el puerto inferior resulta más eficiente hasta cierta temperatura— debe considerarse evidencia orientativa y de respaldo cualitativo a las predicciones teóricas, pero no como una validación definitiva en condiciones estacionarias. Una segunda prueba en condiciones de régimen estable, con temperatura y carga de residuo estabilizadas, reforzaría esta conclusión de forma decisiva.

7.2.3 ESTIMACIÓN INDIRECTA DEL NO_x EMITIDO CON EL SISTEMA PROPUESTO

Al no disponer de datos de operación real con el nuevo sistema ya implantado, el NO_x esperado con el sistema propuesto se ha calculado de forma indirecta: para cada medida de cinco minutos, se ha multiplicado la lectura de NO_x del sistema actual por la proporción de NH₃ que se reduciría. Este enfoque asume implícitamente que la eficiencia de reducción por litro de NH₃ inyectado es perfectamente constante e igual a la del sistema anterior, lo cual constituye una simplificación considerable.

En la práctica, la relación entre la dosis de NH₃ y el NO_x reducido no es lineal ni constante, ya que depende del punto de inyección, la temperatura en ese instante y la composición del residuo. La metodología adoptada garantiza el criterio más conservador posible —al asumir el 100 % de efectividad del NH₃ retirado—, pero los resultados reales una vez implantado el sistema podrían diferir, tanto al alza como a la baja, respecto a los valores simulados.

7.2.4 SISTEMA NO IMPLANTADO FÍSICAMENTE: RESULTADOS DE CARÁCTER ANALÍTICO

En el momento de la redacción del presente documento, el sistema ha recibido la aprobación formal del personal de operación de la planta, pero aún no ha sido implantado de forma definitiva en el entorno productivo. Todos los resultados cuantitativos presentados en el Capítulo 6 son, por tanto, de naturaleza analítica y simulada sobre la base histórica de datos operativos, no valores medidos tras la implantación real.

Esta limitación es la de mayor peso académico, ya que implica que la validación final del sistema solo podrá realizarse una vez que el bloque FC23 esté cargado y ejecutándose de forma continua en el PLC, y se disponga de un periodo de operación estable y suficientemente largo —estimado en un mínimo de seis meses— para comparar los indicadores de forma estadísticamente significativa.

7.2.5 OTRAS LIMITACIONES DE CONTEXTO

- La composición del residuo urbano entrante es impredecible y genera variabilidad en la producción de NOx que ningún sistema de control basado en parámetros físicos de la caldera puede eliminar por completo. Este factor impredecible sigue siendo fuente de excursiones puntuales de emisión independientemente de la calidad del control.
- La ausencia de sensores de temperatura en los puertos de inyección impide verificar en tiempo real si las condiciones de operación coinciden con las previstas por el modelo exponencial, lo que limita la capacidad de diagnóstico ante comportamientos anómalos.
- Los factores de corrección han sido calibrados sobre datos del periodo 2020–2026. Si las condiciones de operación cambian de forma estructural —aumento de capacidad, cambios en la tipología del residuo o modificaciones del hardware de la caldera—, los umbrales y coeficientes definidos podrían requerir recalibración.

7.3 TRABAJOS FUTUROS

El presente proyecto debe considerarse como un punto de partida sólido, no como un destino final. A continuación, se propone una hoja de ruta de trabajos futuros, ordenada de manera cronológica y por nivel de dependencia técnica:

7.3.1 IMPLANTACIÓN DEFINITIVA Y FASE DE OBSERVACIÓN (0–12 MESES)

La primera y más urgente tarea es la carga del bloque FC23 en el PLC de la planta y el inicio de la operación real con el sistema propuesto. Durante los primeros seis a doce meses desde la implantación, el sistema deberá ser monitorizado de forma continua para:

- Comparar los indicadores reales de NO_x, NH₃ y slip con los valores históricos preimplantación y con los resultados simulados presentados en este TFM.
- Detectar comportamientos no previstos en los factores de corrección y recalibrar los umbrales y coeficientes si fuera necesario.
- Calcular el retorno real de la inversión en función del ahorro de amoniaco medido, para validar la viabilidad económica ante la dirección de FCC.

La herramienta de análisis desarrollada en RStudio, basada en la extracción masiva de datos del DCS, facilita esta tarea al permitir comparar directamente la operación real post-implantación con el escenario histórico de referencia.

7.3.2 INSTALACIÓN DE SENSORES DE TEMPERATURA EN LOS PUERTOS DE INYECCIÓN (CORTO-MEDIO PLAZO)

La limitación técnica más significativa es la ausencia de sensores continuos de temperatura en los puertos DENOX 2 y DENOX 3. Disponer de esta medida en tiempo real permitiría:

- Sustituir el modelo exponencial de estimación por una medida directa, eliminando la incertidumbre del modelo y mejorando la precisión de la temperatura de cambio de nivel.

- Validar la ecuación exponencial obtenida en este proyecto bajo un mayor número de condiciones de operación distintas.
- Enriquecer los factores de corrección con la temperatura real de inyección como variable de control directa, aumentando la precisión del sistema.

7.3.3 ACTIVACIÓN DE ESCENARIOS DE MAYOR AHORRO (TRAS VALIDACIÓN DEL ESCENARIO BASE)

Una vez que el sistema base lleve al menos seis meses en operación real y se hayan validado sus resultados, la dirección de la planta podrá evaluar la activación de los escenarios que potencien un mayor ahorro descritos en el 6.3. Este escenario amplía las ventanas del tercer factor de corrección hasta operar con una media de NOx próxima a los 179,99 mg/Nm³, elevando el ahorro de amoniaco del 6,67 % del escenario base al 16,59 %. Esto representaría un ahorro económico adicional de aproximadamente 18.500 €/año sobre la base de gasto de 2024–2025. Su implementación requeriría únicamente una modificación numérica de los umbrales del bloque FC23, sin cambios de hardware ni de arquitectura del sistema.

7.3.4 AUTOMATIZACIÓN COMPLETA Y ELIMINACIÓN DE LA INTERVENCIÓN MANUAL EN EL PLC (MEDIO PLAZO)

El sistema actual, incluso tras la implantación del FC23, sigue requiriendo que el operario acceda físicamente al PLC para modificar los valores de la receta ante cambios estructurales en las condiciones de operación. Un trabajo futuro de mayor alcance consistiría en automatizar completamente este proceso, integrando la lógica de ajuste dinámico de la receta directamente en el programa del PLC. Esto podría implementarse a través de:

- Bloques de lógica adaptativa que ajusten los parámetros de la receta en función de tendencias estadísticas de largo plazo calculadas sobre los datos del DCS.
- Una interfaz HMI avanzada accesible desde la sala de control que permita al operario modificar parámetros clave sin necesidad de acceder físicamente al PLC, reduciendo el tiempo de intervención y el riesgo de errores de configuración.

- La incorporación de un modelo predictivo de NOx —posiblemente basado en técnicas de aprendizaje automático entrenadas sobre los datos históricos disponibles— que anticipe la concentración de NOx en chimenea con un horizonte temporal superior al retardo actual de 15–20 minutos, dotando al sistema de una capacidad de prealimentación mucho más robusta.

7.3.5 ESTUDIO DE VIABILIDAD DE PRETRATAMIENTO DEL RESIDUO ENTRANTE (MEDIO-LARGO PLAZO)

Uno de los factores identificados como fuente de variabilidad irreducible en la producción de NOx es la heterogeneidad de la composición del residuo urbano entrante. A diferencia de otros países donde se aplica un proceso de pretratamiento mecánico-biológico previo a la valorización energética, la planta de Lincoln incinera el residuo sin pretratamiento previo. Un estudio de viabilidad sobre la implantación de un proceso de pretratamiento que homogeneizase la fracción combustible reduciría la variabilidad del poder calorífico de entrada, estabilizaría la temperatura de combustión y, en consecuencia, disminuiría la amplitud de las excursiones de NOx que el sistema SNCR debe absorber. Aunque esta modificación requeriría una inversión significativa en infraestructura, su impacto potencial sobre la eficiencia global del sistema de denoxización justifica al menos un análisis técnico-económico preliminar.

7.3.6 ESCALABILIDAD AL RESTO DE PLANTAS DE FCC EN EL REINO UNIDO (LARGO PLAZO)

Una vez validado el funcionamiento del sistema en Lincoln, la metodología desarrollada en este proyecto es directamente transferible al resto de plantas de Energy from Waste del grupo FCC en el Reino Unido. El proceso de escalabilidad comprendería las siguientes etapas secuenciales:

1. Auditoría del sistema de denoxización de cada planta: extracción y análisis de sus datos históricos de DCS para cuantificar el margen de mejora existente respecto a la situación actual.

2. Medición experimental de temperatura en los puertos de inyección de cada planta para derivar su propia ecuación exponencial de perfil térmico, dada la variabilidad geométrica entre calderas.
3. Adaptación y calibración de los factores de corrección y de la receta de inyección a las condiciones específicas de cada instalación.
4. Implantación del bloque FC equivalente en el SIMATIC Manager correspondiente y seguimiento durante una fase de madurez de seis a doce meses.



Figura 49 "Mapa de localización de las plantas de Energy from Waste operadas por FCC en el Reino Unido, con indicación de su antigüedad relativa respecto a la planta de Lincoln"

Dado que las plantas del grupo FCC en el Reino Unido son en su mayoría más antiguas que la planta de Lincoln —lo que sugiere que sus sistemas de dosificación pueden acumular

desviaciones aún mayores respecto a las condiciones de diseño originales—, el impacto agregado de esta escalabilidad podría traducirse en ahorros económicos anuales de varios cientos de miles de euros a nivel de grupo, además de contribuir positivamente a la reducción de emisiones de NOx y de ammonia slip en el conjunto de las instalaciones.

7.4 REFLEXIÓN FINAL

El presente Trabajo de Fin de Máster ha demostrado que es posible mejorar de forma significativa el rendimiento operativo de un sistema SNCR industrial a través de la optimización analítica de sus parámetros de control, sin necesidad de modificaciones estructurales de hardware ni de inversiones de capital elevadas. La clave ha residido en la capacidad de extraer conocimiento útil de más de cinco millones de registros operativos, en la validación experimental de las hipótesis de diseño mediante mediciones directas en planta y en la traducción de los resultados analíticos a una implementación real en el entorno de programación del PLC.

Las limitaciones identificadas no invalidan los resultados obtenidos, sino que señalan con precisión las hipótesis sobre las que estos se apoyan y los pasos necesarios para consolidarlos. Los trabajos futuros propuestos ofrecen una hoja de ruta concreta, ordenada por prioridad, para que el proyecto pueda madurar desde su estado actual —analíticamente validado y formalmente aprobado por el personal de la planta— hasta convertirse en un sistema plenamente implantado, autónomo y escalable al conjunto de instalaciones de FCC en el Reino Unido.

Desde una perspectiva más amplia, el proyecto ilustra el valor de integrar el análisis masivo de datos operativos históricos, la experimentación controlada en planta y la ingeniería de control en un enfoque unificado orientado a resultados reales y medibles. Esta metodología, exportable a otros procesos industriales regulados en los que la eficiencia energética y el cumplimiento normativo sean objetivos concurrentes, puede servir como referencia para la modernización de los sistemas de denoxización en el sector de la valorización energética de residuos, en el contexto más amplio de la transición hacia economías bajas en carbono.

Capítulo 8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Naciones Unidas. “Objetivos y metas de desarrollo sostenible”. Desarrollo Sostenible – ONU, 2020. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-development-goals/>.
- [2] Argus Media. “Argus Ammonia”. Argus Media, 2026. <https://www.argusmedia.com/es/solutions/products/argus-ammonia>.
- [3] FCC Environment. “FCC Environment : Home”. FCC Environment, 2026. <https://www.fccenvironment.co.uk/>.
- [4] Yara UK. “Yara UK – Find the best fertilisers for your farm”. Yara United Kingdom, Octubre 2021. <https://www.yara.co.uk/>.
- [5] Weston Myer. “SNCR DeNOx System by ERC”. Weston Myer, Abril 2025. <https://www.westonmyer.com/en/product-service/sncr-denox-system-by-erc/>.
- [6] The R Foundation. “The R Project for Statistical Computing”. R-project.org, 2026. <https://www.r-project.org/>.
- [7] Sorrels, J.L.; Randall, D.D.; Richardson Fry, C.; Schaffner, K.S. “Selective Noncatalytic Reduction”. EPA Air Pollution Control Cost Manual, 7th Edition. Abril 2019. <https://www.epa.gov/economic-and-cost-analysis-air-pollution-regulations/chapter-1-selective-non-catalytic-reduction>
- [8] FCC Environment. “Home Page – FCC Lincolnshire EfW”. FCC Lincolnshire EfW, 2026. <https://lincolnshire.fccenvironment.co.uk/>.
- [9] FCC Lincoln Internal SharePoint <https://fccs.sharepoint.com/sites/NewLincolnshireEfW> .

ANEXO I

Capturas del pdf completo “CALCULATION NOTES DENOX SYSTEM” realizado por YARA U.K, el 11/06/2012:

CNIM Lincolnshire

Calculation notes 0102 / FFI 2001 to 2009

/CH-Persson

		2 MCR	1 NOM	5	7	8	9
Waste	kg/h	21 165	19 240	13 765	13 470	17 395	21 165
1 Flue gas data							
O ₂ (wet)	Nm ³ /h	100 250	98 520	94 360	68 970	73 070	88 910
H ₂ O	%	17,92%	16,57%	12,34%	16,57%	20,26%	20,26%
O ₂ (dry)	Nm ³ /h	82 285	82 200	82 713	57 545	58 265	70 895
2 O₂-cont							
O ₂ (wet)	%	7,29%	7,51%	8,34%	7,51%	6,94%	6,94%
O ₂	Nm ³ /h	7 303	7 394	7 872	5 176	5 069	6 168
O ₂ (dry)	%	8,9%	9,0%	9,5%	9,0%	8,7%	8,7%
3 Norm							
O ₂	%	11%	11%	11%	11%	11%	11%
O ₂ (dry)	Nm ³ /h	99 767	98 681	94 982	69 083	71 667	87 203
4 NO_x							
NO _x in	mg/Nm ³	400	400	400	400	400	400
NO ₂ molar weight		46	46	46	46	46	46
NO _x in	kg/h	40	39	38	28	29	35
Mol NO ₂	kmol/h	0,87	0,86	0,83	0,60	0,62	0,76
5 NH₃-consumpt. (25%)							
NO _x out	mg/Nm ³	200	200	200	200	200	200
NH ₃ slip	mg/Nm ³	10	10	10	10	10	10
N ₂ O	mg/Nm ³	12	12	12	12	12	12
Reduction	%	50%	50%	50%	50%	50%	50%
Efficiency	%	56%	56%	56%	56%	56%	56%
Stoichiometry							
NH ₃ molar weight		17	17	17	17	17	17
NH ₃	kg/h	53	53	51	37	38	46
7 Flue gas speed							
Furnace width	m	9,30					
depth	m	4,50					
Area	m ²	41,85	-	-	-	-	-
Flue gas flow	m ³ /h	467 466	459 399	440 001	321 607	340 726	414 588
Flue gas speed	m/s	3,10					
8 Injectors							
		<u>Installed</u>	<u>In operation</u>				
# of inj / level		4	4				
# of levels		2	1				
NH ₃ / inj	l/h	15					
Water/inj.	kg/h	80					
Tot. flow/inj	l/h	95					
9 Consumption							
		<u>Guarantee</u>	<u>Expected</u>				
NH ₃	kg/h	53	42				
Water/inj.	kg/h	80	64				
Water	kg/h	320	256				
Inj. air	kg/h	80	64				
	Nm ³ /h	63	50				

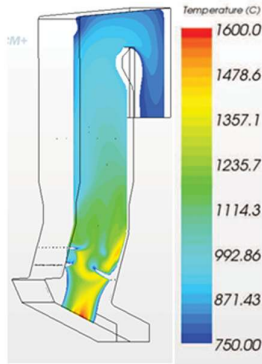


Figure 4-2 : Temperature field (From CNIM CFD modeling)

The injectors can in principle be placed either in the front of the furnace or at both sides. Both solutions will cover the cross section of the furnace. To handle the load variations, two levels are required. 4 injectors per level. Location will be in the upper part of the furnace where the temperatures doesn't exceed 950 °C for the selected injector level and load case.

Captura de pantalla del Excel donde se ha realizado el análisis de datos y operaciones numéricas:

Apartado “7.3 BOILER OPERATING CHARACTERISTICS” del PDF “BOILER OPERATING GUIDE” del 12/09/2013:

7.3 BOILER OPERATING CHARACTERISTICS

The expected operating characteristics⁴⁰ are shown in the tables below.

THE NUMERICAL VALUES SHOWN IN THIS DOCUMENT ARE NOT CONTRACTUALLY BINDING AND ARE NOT GUARANTEED VALUES

These values are to be understood for typical dirt levels corresponding to an operating period of the order of two months.

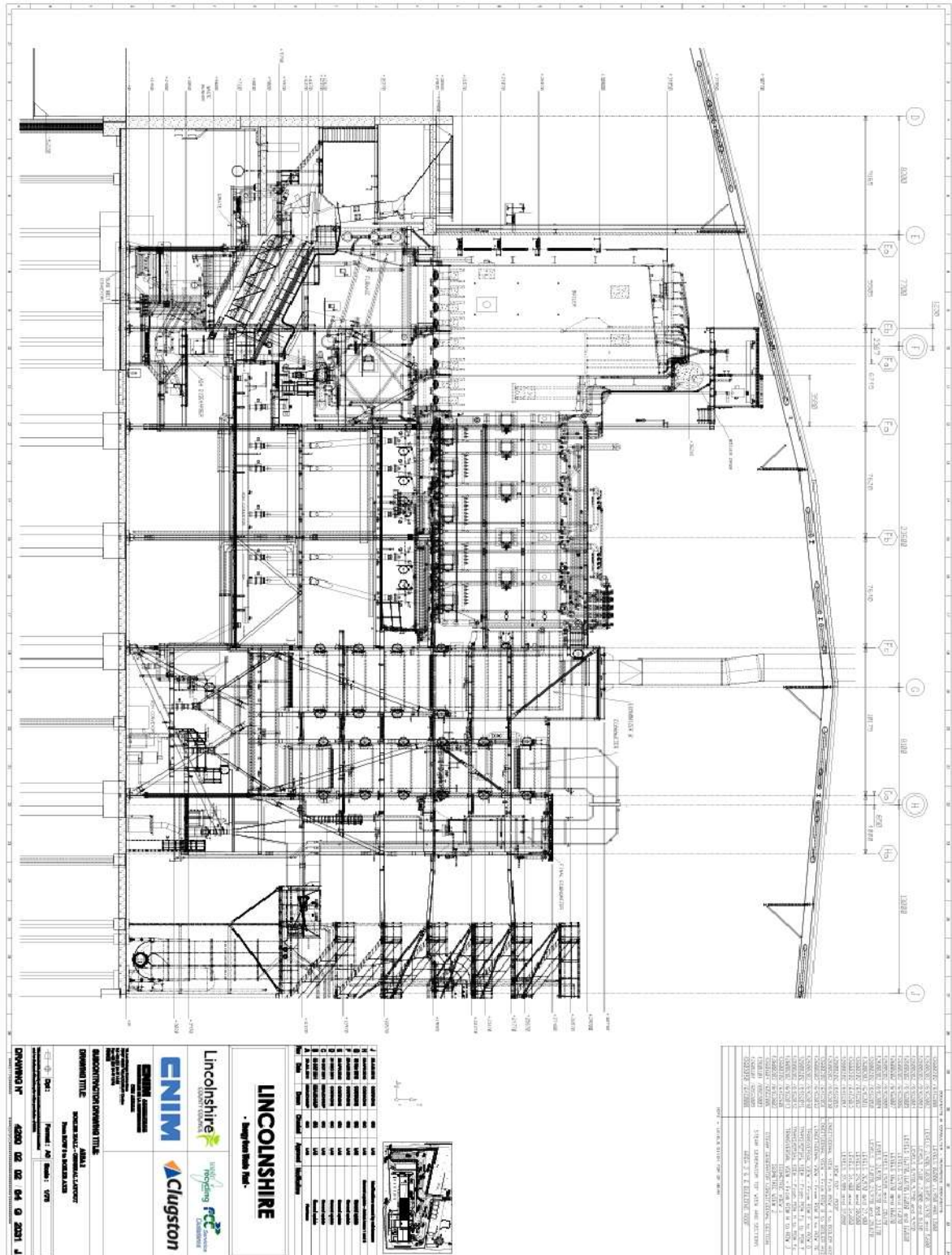
LINCOLNSHIRE operation case (reference: Stoker capacity diagram - v2)		1 = DSG	2 = MCR	7	9
Heat input	%	100%	100%	70%	85%
Heat input	GJ/h	178,90	178,90	125,80	152,40
Heat input	MW	49,69	49,69	34,94	42,33
Refuse throughput	kg/h	19 240	21 165	13 470	21 165
Refuse throughput	%	100	110	70	110
NCV (LCV)	kcal/kg	2 220	2 018	2 220	1 718
NCV (LCV)	kJ/kg	9 300	8 455	9 300	7 200
refuse combustion air					
Excess air	%	1,72	1,70	1,72	1,61
Total air combustion flow rate	Nm ³ /h	85 370	85 480	60 050	73 800
Primary air (UFA)					
UFA Pressure	mbar	40	40	40	40
UFA Temperature	°C	150	150	150	170
UFA flow	Nm ³ /h	53 610	54 210	37 530	47 390
Secondary air (OFA)					
Common OFA pressure	mbar	50	50	50	50
OFA temperature	°C	150	150	150	170
OFA Flow	Nm ³ /h	30 800	30 310	21 560	25 450
Other air	Nm ³ /h	960	960	960	960
Flue gas characteristics					
Combustion temperature	°C	1 224	1 200	1 216	1 156
first pass outlet temperature	°C	877	873	814	839
Third pass inlet temperature	°C	690	688	610	651
Horizontal pass inlet temperature (vaporisateur bank inlet)	°C	615	613	537	578
superheater III inlet (HTS inlet)	°C	588	587	513	552
superheater II inlet (MTS inlet)	°C	509	508	454	483
superheater I inlet (LTS 2 inlet)	°C	442	441	401	423
economiser 2 inlet	°C	376	377	346	363
economiser 1 inlet	°C	251	253	226	245
boiler outlet (boiler economiser outlet)	°C	180	182	167	177
Boiler outlet flue gas flow	Nm ³ /h	99 480	101 210	69 930	89 870
O2 (on dry basis)	%	9,03	8,92	9,05	8,75
H2O	%	217,09	18,43	17,32	20,81
O2 (monitored value, on wet basis)	%	7,49	7,27	7,48	6,93

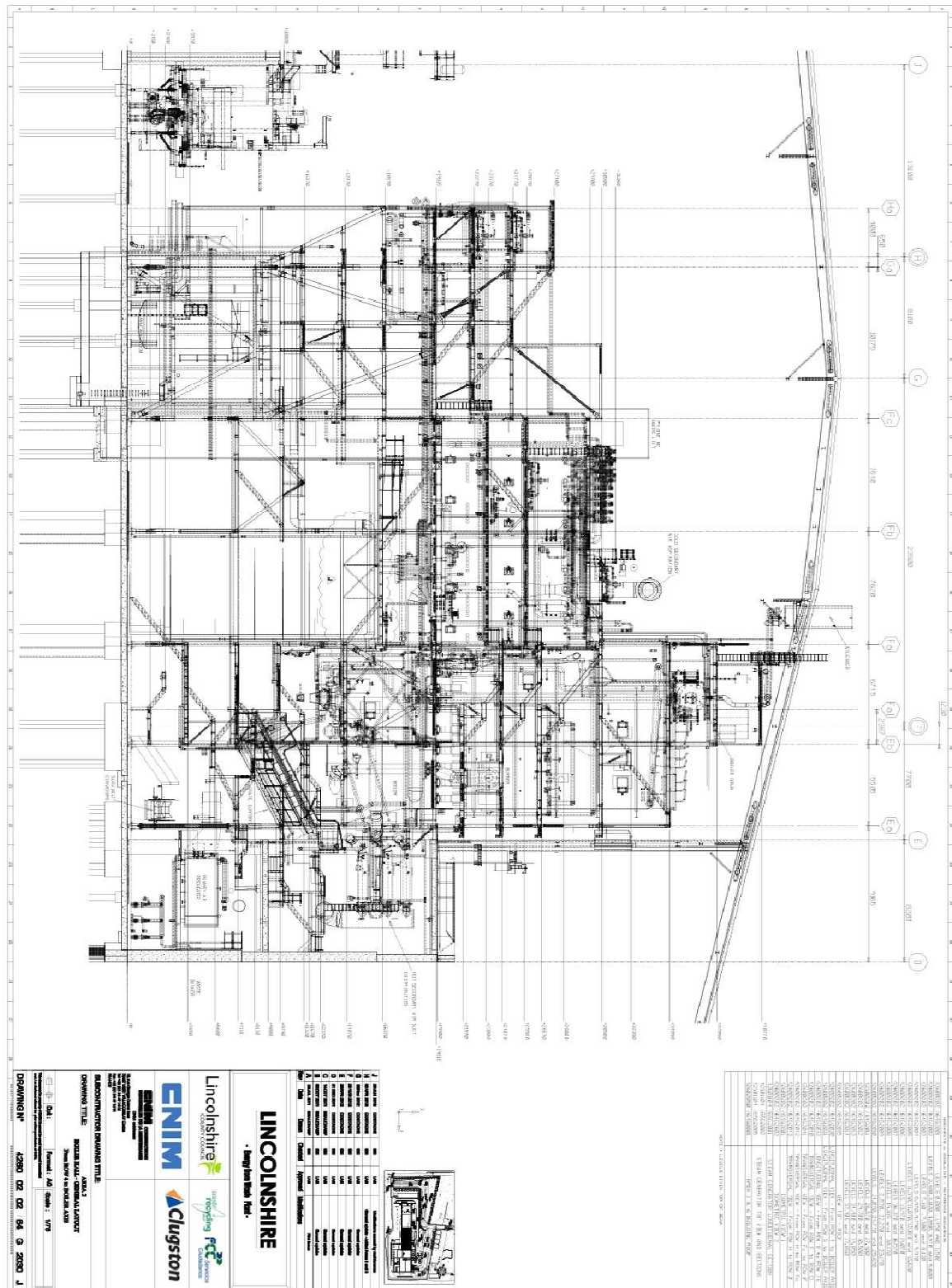
Figure 21

LINCOLNSHIRE operation case (reference: Stoker capacity diagram - v2)		1 = DSG	2 = MCR	7	9
Heat input	%	100%	100%	70%	85%
Heat input	GJ/h	178,90	178,90	125,80	152,40
Heat input	MW	49,69	49,69	34,94	42,33
Refuse throughput	kg/h	19 240	21 165	13 470	21 165
Refuse throughput	%	100	110	70	110
NCV (LCV)	kcal/kg	2 220	2 018	2 220	1 718
NCV (LCV)	kJ/kg	9 300	8 455	9 300	7 200
Water & steam circulation					
feed water temperature	°C	140	140	140	140
economiser 1 inlet feed water tempertaure	°C	140	140	140	140
economiser 1 outlet feed water tempertaure	°C	178	180	170	179
economiser 2 outlet feed water tempertaure	°C	244	246	230	244
superheater I inlet (LTS 1 inlet) steam tempertaure	°C	302	303	295	300
superheater I outlet (LTS 2 outlet) steam tempertaure	°C	335	336	323	334
superheater II inlet (MTS inlet) steam tempertaure	°C	318	317	323	317
superheater II outlet (MTS outlet) steam tempertaure	°C	362	362	357	362
superheater III inlet (HTS inlet) steam tempertaure	°C	343	342	357	345
superheater III outlet (HTS outlet) steam tempertaure	°C	400	400	398	400
Boiler outlet steam flow	t/h	63,83	63,39	44,12	51,98
Air heater steam flow	t/h	0,00	0,00	0,97	2,41
First desuperheater water flow	t/h	1,40	1,59	0,00	1,14
second desuperheater water flow	t/h	1,36	1,44	0,00	1,02
Total Feed water flow	t/h	61,06	60,36	45,09	52,22
boiler outlet steam pressure	bar abs	60	60	60	60

Figure 22

Vista de los planos de diseño de la caldera de la planta de Energy from Waste de Lincoln. Incluyen medidas exactas, información de los sensores y vistas detalladas:





Código en Rstudio realizado por mi apoyándome en la IA para graficar más estéticamente y con mayor claridad:

```
library(readxl); library(dplyr); library(tidyr); library(lubridate)
library(ggplot2); library(scales); library(patchwork)
library(plotly); library(htmlwidgets); library(zoo)
EXCEL_PATH <- "H3_FORMULAS.xlsx"
NOX_LIMIT <- 180
dir.create("output_efficiency", showWarnings = FALSE)
C_ACTUAL <- "#e63946"
C_NUEVO <- "#00b4d8"
C_LIMITE <- "#ff9f1c"
C_FONDO <- "#0d1117"
C_PANEL <- "#161b22"
C_GRID <- "#21262d"
C_TEXTO <- "#e6edf3"
C_SUBTEXT <- "#8b949e"
tema <- theme(
  plot.background = element_rect(fill = C_FONDO, color = NA),
  panel.background = element_rect(fill = C_PANEL, color = NA),
  panel.grid.major = element_line(color = C_GRID, linewidth = 0.35),
  panel.grid.minor = element_blank(),
  axis.text = element_text(color = C_SUBTEXT, size = 8),
  axis.title = element_text(color = C_TEXTO, size = 9),
  plot.title = element_text(color = "ffffff", size = 12, face = "bold"),
  plot.subtitle = element_text(color = C_SUBTEXT, size = 8),
  plot.caption = element_text(color = C_SUBTEXT, size = 7),
  legend.background = element_rect(fill = C_PANEL, color = NA),
  legend.key = element_rect(fill = C_PANEL, color = NA),
  legend.text = element_text(color = C_TEXTO, size = 9),
  legend.title = element_blank(),
  strip.background = element_rect(fill = C_GRID, color = NA),
  strip.text = element_text(color = C_TEXTO, size = 9, face = "bold")
)
# CARGA Y LIMPIEZA
raw <- read_excel(EXCEL_PATH, skip = 1, col_names = TRUE)
df <- raw %>%
  transmute(
    ts = as.POSIXct(DATE, origin = "1899-12-30", tz = "UTC"),
    nox_actual = `Nox Corected`,
    slip_actual = `Slip NH3`,
    nh3_actual = `Inyecc NH3`,
    nh3_nuevo = `NH3 Final`,
    nox_nuevo = Nox,
    slip_nuevo = `Slip NEW`,
    media_nuevo = `Media/Dia con Nuevo`,
    media_actual = `Media/Dia con Antiguo`
  ) %>%
  filter(!is.na(ts)) %>%
  arrange(ts)
quitar_outliers <- function(x) {
  m <- mean(x, na.rm = TRUE); s <- sd(x, na.rm = TRUE)
  ifelse(abs(x - m) > 3.5 * s, NA_real_, x)
}
df <- df %>% mutate(across(where(is.numeric), quitar_outliers))
# Agregados diarios
df_d <- df %>%
  mutate(fecha = as.Date(ts)) %>%
  group_by(fecha) %>%
```

```

summarise(
  nox_actual_med = mean(nox_actual, na.rm = TRUE),
  nox_nuevo_med = mean(nox_nuevo, na.rm = TRUE),
  nh3_actual_med = mean(nh3_actual, na.rm = TRUE),
  nh3_nuevo_med = mean(nh3_nuevo, na.rm = TRUE),
  slip_actual_med = mean(slip_actual, na.rm = TRUE),
  slip_nuevo_med = mean(slip_nuevo, na.rm = TRUE),
  pct_exc_actual = mean(nox_actual > NOX_LIMIT, na.rm = TRUE) * 100,
  pct_exc_nuevo = mean(nox_nuevo > NOX_LIMIT, na.rm = TRUE) * 100,
  .groups = "drop"
) %>%
mutate(
  anio = year(fecha),
  mes = month(fecha),
  anio_mes = floor_date(fecha, "month"),
  nox_act_r14 = rollmean(nox_actual_med, 14, fill = NA, align = "center"),
  nox_nvo_r14 = rollmean(nox_nuevo_med, 14, fill = NA, align = "center"),
  nh3_act_r14 = rollmean(nh3_actual_med, 14, fill = NA, align = "center"),
  nh3_nvo_r14 = rollmean(nh3_nuevo_med, 14, fill = NA, align = "center"),
  slip_act_r14 = rollmean(slip_actual_med, 14, fill = NA, align = "center"),
  slip_nvo_r14 = rollmean(slip_nuevo_med, 14, fill = NA, align = "center"),
  ahorro_nh3 = nh3_actual_med - nh3_nuevo_med
)
# Agregados mensuales
df_mo <- df_d %>%
  group_by(anio_mes) %>%
  summarise(
    nox_actual_med = mean(nox_actual_med, na.rm = TRUE),
    nox_nuevo_med = mean(nox_nuevo_med, na.rm = TRUE),
    nh3_actual_med = mean(nh3_actual_med, na.rm = TRUE),
    nh3_nuevo_med = mean(nh3_nuevo_med, na.rm = TRUE),
    slip_actual_med = mean(slip_actual_med, na.rm = TRUE),
    slip_nuevo_med = mean(slip_nuevo_med, na.rm = TRUE),
    pct_exc_actual = mean(pct_exc_actual, na.rm = TRUE),
    pct_exc_nuevo = mean(pct_exc_nuevo, na.rm = TRUE),
    dias_exc_actual = sum(nox_actual_med > NOX_LIMIT, na.rm = TRUE),
    dias_exc_nuevo = sum(nox_nuevo_med > NOX_LIMIT, na.rm = TRUE),
    .groups = "drop"
  )
# Agregados anuales
df_anio <- df_d %>%
  group_by(anio) %>%
  summarise(
    nh3_actual_med = mean(nh3_actual_med, na.rm = TRUE),
    nh3_nuevo_med = mean(nh3_nuevo_med, na.rm = TRUE),
    slip_actual_med = mean(slip_actual_med, na.rm = TRUE),
    slip_nuevo_med = mean(slip_nuevo_med, na.rm = TRUE),
    dias_exc_actual = sum(nox_actual_med > NOX_LIMIT, na.rm = TRUE),
    dias_exc_nuevo = sum(nox_nuevo_med > NOX_LIMIT, na.rm = TRUE),
    dias_total = n(),
    .groups = "drop"
  ) %>%
  mutate(
    pct_ahorro_nh3 = (nh3_actual_med - nh3_nuevo_med) / nh3_actual_med * 100,
    reduccion_dias = dias_exc_actual - dias_exc_nuevo
  )
# KPIs globales
kpi_dias_actual <- sum(df_d$nox_actual_med > NOX_LIMIT, na.rm = TRUE)
kpi_dias_nuevo <- sum(df_d$nox_nuevo_med > NOX_LIMIT, na.rm = TRUE)
kpi_ahorro_pct <- (mean(df_d$nh3_actual_med, na.rm = TRUE) -

```

```

    mean(df_d$nh3_nuevo_med, na.rm = TRUE)) /
    mean(df_d$nh3_actu_med, na.rm = TRUE) * 100
kpi_slip_actu <- mean(df_d$slip_actu_med, na.rm = TRUE)
kpi_slip_nuevo <- mean(df_d$slip_nuevo_med, na.rm = TRUE)
# GRÁFICO 1 — DOSIS NH3
p1a <- ggplot(df_d, aes(x = fecha)) +
  geom_line(aes(y = nh3_act_r14, color = "Método actual (Inyecc NH3)"),
    linewidth = 1.0, alpha = 0.9) +
  geom_line(aes(y = nh3_nvo_r14, color = "Método nuevo (NH3 Final)"),
    linewidth = 1.0, alpha = 0.9) +
  scale_color_manual(values = c(
    "Método actual (Inyecc NH3)" = C_ACTUAL,
    "Método nuevo (NH3 Final)" = C_NUEVO
  )) +
  scale_x_date(date_breaks = "6 months", date_labels = "%b\n%Y") +
  scale_y_continuous(labels = label_number(suffix = " L/h")) +
  labs(
    title = "DOSIS NH3 INYECTADO — Método Actual vs Método Nuevo",
    subtitle = sprintf("Rolling 14 días | Ahorro medio global: %.1f%% menos reactivo con el método nuevo",
      kpi_ahorro_pct),
    y = NULL, x = NULL
  ) +
  tema + theme(legend.position = "top")
p1b <- ggplot(df_d, aes(x = fecha)) +
  geom_ribbon(aes(ymin = 0, ymax = pmax(ahorro_nh3, 0)),
    fill = C_NUEVO, alpha = 0.35) +
  geom_ribbon(aes(ymin = pmin(ahorro_nh3, 0), ymax = 0),
    fill = C_ACTUAL, alpha = 0.35) +
  geom_hline(yintercept = 0, color = "white", linewidth = 0.5) +
  scale_x_date(date_breaks = "6 months", date_labels = "%b\n%Y") +
  scale_y_continuous(labels = label_number(suffix = " L/h")) +
  labs(
    title = "Ahorro diario de reactivo (Actual – Nuevo)",
    subtitle = "Azul = el método nuevo consume menos NH3 | Rojo = el nuevo necesita más",
    y = NULL, x = NULL
  ) +
  tema
p1 <- (p1a / p1b) +
  plot_annotation(
    theme = theme(plot.background = element_rect(fill = C_FONDO, color = NA))
  )
ggsave("output_efficiency/01_nh3_actu_vs_nuevo.png", p1,
  width = 16, height = 9, dpi = 150, bg = C_FONDO)
# GRÁFICO 2 — DÍAS POR ENCIMA DE 180
df_anio_long <- df_anio %>%
  select(anio, dias_exc_actu, dias_exc_nuevo) %>%
  pivot_longer(-anio, names_to = "metodo", values_to = "dias_exc") %>%
  mutate(metodo = recode(metodo,
    "dias_exc_actu" = "Método actual",
    "dias_exc_nuevo" = "Método nuevo"
  ))
p2 <- ggplot(df_anio_long, aes(x = factor(anio), y = dias_exc, fill = metodo)) +
  geom_col(position = position_dodge(0.7), width = 0.6, alpha = 0.92) +
  geom_text(aes(label = dias_exc, color = metodo),
    position = position_dodge(0.7),
    vjust = -0.5, size = 4.5, fontface = "bold") +
  scale_fill_manual(values = c("Método actual" = C_ACTUAL, "Método nuevo" = C_NUEVO)) +
  scale_color_manual(values = c("Método actual" = C_ACTUAL, "Método nuevo" = C_NUEVO)) +
  annotate("text",
    x = length(unique(df_anio_long$anio)) + 0.5,

```

```

y = max(df_anio_long$dias_exc, na.rm = TRUE) * 0.85,
label = sprintf("TOTAL\nActual: %d días\nNuevo: %d días",
  kpi_dias_actual, kpi_dias_nuevo),
color = C_TEXTO, size = 3.8, hjust = 1, lineheight = 1.4) +
scale_y_continuous(expand = expansion(mult = c(0, 0.15))) +
labs(
  title = "DÍAS CON MEDIA DIARIA NOx > 180 mg/Nm³ — por año",
  subtitle = sprintf("2020–2026 | El método nuevo reduce de %d a %d días por encima del límite legal",
    kpi_dias_actual, kpi_dias_nuevo),
  x = NULL, y = "Nº de días"
) +
tema + theme(legend.position = "top")
ggsave("output_efficiency/02_dias_excedencia_anual.png", p2,
  width = 13, height = 7, dpi = 150, bg = C_FONDO)
# GRÁFICO 3 — DISTRIBUCIÓN NOx
pct_act_d <- mean(df_d$nox_actual_med > NOX_LIMIT, na.rm = TRUE) * 100
pct_nvo_d <- mean(df_d$nox_nuevo_med > NOX_LIMIT, na.rm = TRUE) * 100
hist_data <- bind_rows(
  df_d %>% transmute(nox = nox_actual_med, metodo = "Método actual"),
  df_d %>% transmute(nox = nox_nuevo_med, metodo = "Método nuevo")
)
p3 <- ggplot(hist_data, aes(x = nox, fill = metodo, color = metodo)) +
  geom_histogram(aes(y = after_stat(density)),
    bins = 80, alpha = 0.45, position = "identity") +
  geom_density(linewidth = 1.1, fill = NA) +
  geom_vline(xintercept = NOX_LIMIT, color = C_LIMITE,
    linewidth = 1.3, linetype = "dashed") +
  annotate("label",
    x = NOX_LIMIT + 2, y = Inf, vjust = 1.4,
    label = "Límite\n180 mg/Nm³",
    fill = C_PANEL, color = C_LIMITE, size = 3.2, label.size = 0.4) +
  annotate("label",
    x = 250, y = Inf, vjust = 1.3, hjust = 1,
    label = sprintf(
      "Días media > 180 mg/Nm³\n Método actual : %.1f%% (%d días)\n Método nuevo : %.1f%% (%d días)",
      pct_act_d, kpi_dias_actual, pct_nvo_d, kpi_dias_nuevo),
    fill = C_PANEL, color = C_TEXTO, size = 3.2, label.size = 0.4, lineheight = 1.5) +
  scale_fill_manual(values = c("Método actual" = C_ACTUAL, "Método nuevo" = C_NUEVO)) +
  scale_color_manual(values = c("Método actual" = C_ACTUAL, "Método nuevo" = C_NUEVO)) +
  scale_x_continuous(limits = c(0, 280), labels = label_number(suffix = " mg/Nm³")) +
  labs(
    title = "DISTRIBUCIÓN DE NOx (media diaria) — Método Actual vs Método Nuevo",
    subtitle = "La curva azul se desplaza a la izquierda del límite 180 — menos días en zona de incumplimiento",
    x = "NOx medio diario [mg/Nm³]", y = "Densidad"
  ) +
  tema + theme(legend.position = "top")
ggsave("output_efficiency/03_distribucion_nox_diaria.png", p3,
  width = 14, height = 7, dpi = 150, bg = C_FONDO)
# GRÁFICO 4 — NOx SERIE TEMPORAL
p4 <- ggplot(df_d, aes(x = fecha)) +
  annotate("rect",
    xmin = min(df_d$fecha, na.rm = TRUE),
    xmax = max(df_d$fecha, na.rm = TRUE),
    ymin = NOX_LIMIT, ymax = Inf,
    fill = C_LIMITE, alpha = 0.08) +
  geom_hline(yintercept = NOX_LIMIT, color = C_LIMITE,
    linewidth = 0.9, linetype = "dashed") +
  annotate("text",
    x = min(df_d$fecha, na.rm = TRUE) + 15,
    y = NOX_LIMIT + 4,

```

```

label = "Límite legal 180 mg/Nm³",
color = C_LIMITE, size = 3.2, hjust = 0) +
geom_line(aes(y = nox_act_r14, color = "Método actual"),
  linewidth = 0.85, alpha = 0.9) +
geom_line(aes(y = nox_nvo_r14, color = "Método nuevo"),
  linewidth = 0.85, alpha = 0.9) +
scale_color_manual(values = c("Método actual" = C_ACTUAL, "Método nuevo" = C_NUEVO)) +
scale_x_date(date_breaks = "6 months", date_labels = "%b\\n%Y") +
scale_y_continuous(labels = label_number(suffix = " mg/Nm³")) +
labs(
  title = "NOx MEDIO DIARIO — Método Actual vs Método Nuevo",
  subtitle = "Rolling 14 días | Zona naranja = zona de incumplimiento > 180 mg/Nm³",
  y = NULL, x = NULL
) +
tema + theme(legend.position = "top")
ggsave("output_efficiency/04_nox_serie_temporal.png", p4,
  width = 16, height = 6, dpi = 150, bg = C_FONDO)
# GRÁFICO 5 — SLIP NH3
slip_long_d <- bind_rows(
  df_d %>% transmute(fecha, anio, slip = slip_actual_med, metodo = "Método actual"),
  df_d %>% transmute(fecha, anio, slip = slip_nuevo_med, metodo = "Método nuevo")
)
p5a <- ggplot(df_d, aes(x = fecha)) +
  geom_line(aes(y = slip_act_r14, color = "Método actual"),
    linewidth = 0.9, alpha = 0.9) +
  geom_line(aes(y = slip_nvo_r14, color = "Método nuevo"),
    linewidth = 0.9, alpha = 0.9) +
  geom_hline(yintercept = kpi_slip_actual,
    color = C_ACTUAL, linewidth = 0.5, linetype = "dotted") +
  geom_hline(yintercept = kpi_slip_nuevo,
    color = C_NUEVO, linewidth = 0.5, linetype = "dotted") +
  annotate("text", x = max(df_d$fecha, na.rm = TRUE),
    y = kpi_slip_actual + 0.12,
    label = sprintf("Media global: %.2f ppm", kpi_slip_actual),
    color = C_ACTUAL, size = 2.9, hjust = 1) +
  annotate("text", x = max(df_d$fecha, na.rm = TRUE),
    y = kpi_slip_nuevo - 0.18,
    label = sprintf("Media global: %.2f ppm", kpi_slip_nuevo),
    color = C_NUEVO, size = 2.9, hjust = 1) +
  scale_color_manual(values = c("Método actual" = C_ACTUAL, "Método nuevo" = C_NUEVO)) +
  scale_x_date(date_breaks = "6 months", date_labels = "%b\\n%Y") +
  labs(title = "SLIP NH3 — Evolución temporal (rolling 14d)",
    subtitle = "Slip alto = exceso de NH3 sin reaccionar (sobredosisificación)",
    y = "Slip NH3 [ppm]", x = NULL) +
  tema + theme(legend.position = "top")
p5b <- ggplot(slip_long_d %>% filter(!is.na(slip)),
  aes(x = factor(anio), y = slip, fill = metodo)) +
  geom_boxplot(position = position_dodge(0.75), width = 0.6,
    outlier.size = 0.4, outlier.alpha = 0.3,
    alpha = 0.8, color = C_GRID) +
  scale_fill_manual(values = c("Método actual" = C_ACTUAL, "Método nuevo" = C_NUEVO)) +
  scale_y_continuous(labels = label_number(suffix = " ppm")) +
  labs(title = "Distribución anual del Slip NH3", x = NULL, y = "Slip NH3 [ppm]") +
  tema + theme(legend.position = "none")
p5 <- (p5a / p5b) +
plot_annotation(
  title = "SLIP NH3 — El método nuevo reduce la sobredosisificación",
  theme = theme(
    plot.title = element_text(color = "#ffffff", face = "bold", size = 14),
    plot.background = element_rect(fill = C_FONDO, color = NA)
  )
)

```

```
)
)
ggsave("output_efficiency/05_slip_nh3_comparativa.png", p5,
       width = 16, height = 11, dpi = 150, bg = C_FONDO)
# GRÁFICO 6 — PANEL KPIs
p6a <- ggplot(df_anio, aes(x = factor(anio), y = pct_ahorro_nh3)) +
  geom_col(fill = C_NUEVO, alpha = 0.85, width = 0.6) +
  geom_text(aes(label = sprintf("%.1f%%", pct_ahorro_nh3)),
            color = C_TEXTO, vjust = -0.4, size = 4, fontface = "bold") +
  geom_hline(yintercept = 0, color = "white", linewidth = 0.4) +
  scale_y_continuous(labels = label_percent(scale = 1),
                    expand = expansion(mult = c(0.05, 0.2))) +
  labs(title = "% Ahorro NH3 por año",
       subtitle = "(Actual - Nuevo) / Actual",
       x = NULL, y = NULL) +
  tema
p6b <- ggplot(df_anio, aes(x = factor(anio), y = reduccion_dias)) +
  geom_col(fill = C_NUEVO, alpha = 0.85, width = 0.6) +
  geom_text(aes(label = paste0("-", reduccion_dias, " días")),
            color = C_TEXTO, vjust = -0.4, size = 3.8, fontface = "bold") +
  scale_y_continuous(expand = expansion(mult = c(0.05, 0.25))) +
  labs(title = "Reducción días NOx > 180",
       subtitle = "Días evitados por año con método nuevo",
       x = NULL, y = "días") +
  tema
p6c <- df_anio %>%
  select(anio, slip_actual_med, slip_nuevo_med) %>%
  pivot_longer(-anio, names_to = "metodo", values_to = "slip") %>%
  mutate(metodo = recode(metodo,
    "slip_actual_med" = "Actual",
    "slip_nuevo_med" = "Nuevo"
  )) %>%
  ggplot(aes(x = factor(anio), y = slip, fill = metodo)) +
  geom_col(position = position_dodge(0.7), width = 0.55, alpha = 0.9) +
  geom_text(aes(label = sprintf("%.2f", slip), color = metodo),
            position = position_dodge(0.7),
            vjust = -0.4, size = 3.2, fontface = "bold") +
  scale_fill_manual(values = c("Actual" = C_ACTUAL, "Nuevo" = C_NUEVO)) +
  scale_color_manual(values = c("Actual" = C_ACTUAL, "Nuevo" = C_NUEVO)) +
  scale_y_continuous(expand = expansion(mult = c(0, 0.2)),
                    labels = label_number(suffix = " ppm")) +
  labs(title = "Slip NH3 medio anual",
       subtitle = "ppm — menor es mejor",
       x = NULL, y = NULL) +
  tema + theme(legend.position = "top")
p6 <- (p6a | p6b | p6c) +
  plot_annotation(
    title = "RESUMEN KPIs: MÉTODO NUEVO vs MÉTODO ACTUAL",
    caption = "Planta Lincoln EfW | 2020–2026 | Límite legal NOx: 180 mg/Nm³",
    theme = theme(
      plot.title = element_text(color = "#ffffff", face = "bold", size = 14),
      plot.caption = element_text(color = C_SUBTEXT, size = 8),
      plot.background = element_rect(fill = C_FONDO, color = NA)
    )
  )
ggsave("output_efficiency/06_resumen_kpis.png", p6,
       width = 17, height = 6, dpi = 150, bg = C_FONDO)
# DASHBOARD INTERACTIVO PLOTLY
fig <- plot_ly() %>%
  add_trace(data = df_mo, x = ~anio_mes, y = ~nox_actual_med,
```

```

type = "scatter", mode = "lines", name = "NOx Actual", yaxis = "y1",
line = list(color = C_ACTUAL, width = 2.5),
hovertemplate = "NOx Actual: % {y:.1f} mg/Nm³<extra></extra>") %>%
add_trace(data = df_mo, x = ~anio_mes, y = ~nox_nuevo_med,
type = "scatter", mode = "lines", name = "NOx Nuevo", yaxis = "y1",
line = list(color = C_NUEVO, width = 2.5),
hovertemplate = "NOx Nuevo: % {y:.1f} mg/Nm³<extra></extra>") %>%
add_trace(data = df_mo, x = ~anio_mes, y = ~nh3_actual_med,
type = "scatter", mode = "lines", name = "NH3 Actual", yaxis = "y2",
line = list(color = C_ACTUAL, width = 2),
hovertemplate = "NH3 Actual: % {y:.1f} L/h<extra></extra>") %>%
add_trace(data = df_mo, x = ~anio_mes, y = ~nh3_nuevo_med,
type = "scatter", mode = "lines", name = "NH3 Nuevo", yaxis = "y2",
line = list(color = C_NUEVO, width = 2),
hovertemplate = "NH3 Nuevo: % {y:.1f} L/h<extra></extra>") %>%
add_trace(data = df_mo, x = ~anio_mes, y = ~slip_actual_med,
type = "scatter", mode = "lines", name = "Slip Actual", yaxis = "y3",
line = list(color = C_ACTUAL, width = 1.8),
hovertemplate = "Slip Actual: % {y:.2f} ppm<extra></extra>") %>%
add_trace(data = df_mo, x = ~anio_mes, y = ~slip_nuevo_med,
type = "scatter", mode = "lines", name = "Slip Nuevo", yaxis = "y3",
line = list(color = C_NUEVO, width = 1.8),
hovertemplate = "Slip Nuevo: % {y:.2f} ppm<extra></extra>") %>%
layout(
title = list(
text = paste0("<b>LINCOLN EfW — EFICIENCIA DEL MÉTODO NUEVO vs ACTUAL</b><br>",
"<span style='font-size:12px;color:#8b949e>",
sprintf("NH3: -% .1f%% | Días NOx>180: %d→%d | Slip: % .2f→% .2f ppm",
kpi_ahorro_pct, kpi_dias_actual, kpi_dias_nuevo,
kpi_slip_actual, kpi_slip_nuevo),
"</span>"),
font = list(size = 16, color = "#e6edf3")
),
paper_bgcolor = C_FONDO,
plot_bgcolor = C_PANEL,
font = list(color = C_TEXTO, family = "monospace"),
xaxis = list(title = "", type = "date",
gridcolor = C_GRID, domain = c(0, 1)),
yaxis = list(title = "NOx [mg/Nm³]",
titlefont = list(color = C_ACTUAL), tickfont = list(color = C_SUBTEXT),
gridcolor = C_GRID, domain = c(0.70, 1.0)),
yaxis2 = list(title = "NH3 [L/h]",
titlefont = list(color = C_NUEVO), tickfont = list(color = C_SUBTEXT),
gridcolor = C_GRID, domain = c(0.37, 0.63), anchor = "x"),
yaxis3 = list(title = "Slip NH3 [ppm]",
titlefont = list(color = "#a8dadc"), tickfont = list(color = C_SUBTEXT),
gridcolor = C_GRID, domain = c(0.00, 0.30), anchor = "x"),
shapes = list(
list(type = "line",
x0 = min(df_mo$anio_mes), x1 = max(df_mo$anio_mes),
y0 = NOX_LIMIT, y1 = NOX_LIMIT, yref = "y1",
line = list(color = C_LIMITE, dash = "dash", width = 1.8))
),
hovermode = "x unified",
legend = list(orientation = "h", y = -0.06, font = list(color = C_TEXTO)),
height = 880,
annotations = list(
list(x = 0.01, y = 0.99, xref = "paper", yref = "paper",
text = "<b>NOx CORREGIDO</b> · línea naranja = límite 180 mg/Nm³",
showarrow = FALSE, font = list(color = C_TEXTO, size = 10)),

```

```
list(x = 0.01, y = 0.62, xref = "paper", yref = "paper",
     text = "<b>DOSIS NH3 INYECTADO</b>",
     showarrow = FALSE, font = list(color = C_TEXTO, size = 10)),
list(x = 0.01, y = 0.29, xref = "paper", yref = "paper",
     text = "<b>SLIP NH3</b> · indicador de sobredosificación",
     showarrow = FALSE, font = list(color = C_TEXTO, size = 10))
)
)
saveWidget(fig, "output_efficiency/dashboard_eficiencia.html", selfcontained = TRUE)
# CSV KPIs anuales
write.csv(
  df_anio %>%
    select(anio,
           `NH3 actual (L/h)` = nh3_actual_med,
           `NH3 nuevo (L/h)` = nh3_nuevo_med,
           `% ahorro NH3` = pct_ahorro_nh3,
           `Días exc. actual` = dias_exc_actual,
           `Días exc. nuevo` = dias_exc_nuevo,
           `Días evitados` = reduccion_dias,
           `Slip actual (ppm)` = slip_actual_med,
           `Slip nuevo (ppm)` = slip_nuevo_med) %>%
    mutate(across(where(is.numeric), ~round(.x, 2))),
  "output_efficiency/kpis_anuales.csv",
  row.names = FALSE
)
```