



ESCUELA UNIVERSITARIA DE POSGRADO

MODELO DINÁMICO PARA EL CONTROL DE FACTORES DE COMBUSTIÓN
QUE INFLUYEN EN LA GENERACIÓN DE NITRÓGENO REACTIVO DE UNA
CENTRAL TERMOELÉCTRICA

Línea de investigación:

Tecnologías para residuos y pasivos ambientales. Biorremediación

Tesis para optar el Grado Académico de Doctor en Ingeniería Ambiental

Autor

Peralta Medina, Juan Alberto

Asesor

Rodriguez Rodriguez, Ciro

ORCID: 0000-0003-2112-1349

Jurado

Alva Velásquez, Miguel

Zamora Talaverano, Noé Sabino

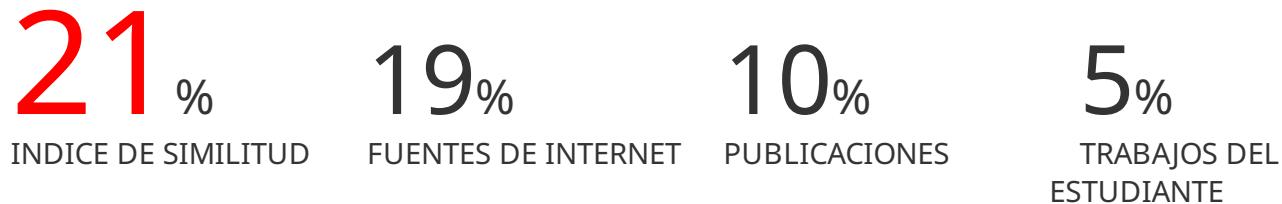
Quispe Prado, Wilber

Lima - Perú

2025

MODELO DINÁMICO PARA EL CONTROL DE FACTORES DE COMBUSTIÓN QUE INFLUYEN EN LA GENERACIÓN DE NITRÓGENO REACTIVO DE UNA CENTRAL TERMOELÉCTRICA

INFORME DE ORIGINALIDAD



FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.lamolina.edu.pe	1 %
2	idoc.pub	1 %
3	Ricardo Novella Rosa. "Estudio de la influencia de los ciclos Atkinson y Miller sobre el proceso de combustión y las emisiones contaminantes en un motor Diesel.", Universitat Politecnica de Valencia, 2009	<1 %
4	www.minem.gob.pe	<1 %
5	dokumen.pub	<1 %
6	patents.google.com	<1 %



ESCUELA UNIVERSITARIA DE POSGRADO

MODELO DINÁMICO PARA EL CONTROL DE FACTORES DE
COMBUSTIÓN QUE INFLUYEN EN LA GENERACIÓN DE NITRÓGENO
REACTIVO DE UNA CENTRAL TERMOELÉCTRICA

Línea de investigación:

Tecnologías para residuos y pasivos ambientales. Biorremediación

Tesis para optar el Grado Académico de Doctor en Ingeniería Ambiental

Autor

Peralta Medina, Juan Alberto

Asesor

Rodriguez Rodriguez, Ciro

ORCID: 0000-0003-2112-1349

Jurado

Alva Velásquez, Miguel

Zamora Talaverano, Noé Sabino

Quispe Prado, Wilber

Lima - Perú

2025

Dedicatoria

A mis padres, porque siempre están conmigo espiritualmente, a mi familia por su amor y paciencia constante durante mis estudios.

Para Elsa mi esposa, Moisés y Alicia mis hijos que son el faro de mi vida.

Agradecimientos

A mis maestros por sus enseñanzas, al Dr. Ciro Rodríguez quien me brindo su valiosa y desinteresada orientación y guía en la elaboración del presente trabajo de investigación.

Y a mis colegas y amigos que de una u otra forma me apoyaron en la culminación de este trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

Resumen.....	10
Abstract.....	11
I. INTRODUCCIÓN	12
1.1. Planteamiento del problema.....	13
1.2. Descripción del problema	15
1.3. Formulación del problema	19
1.4. Antecedentes	19
1.5. Justificación de la investigación	30
1.6. Limitaciones de la investigación.....	33
1.7. Objetivos	33
1.8. Hipótesis.....	34
II. MARCO TEÓRICO.....	37
2.1. Bases teóricas	37
2.2. Marco conceptual	47
2.3. Marco filosófico	66
2.4. Marco legal.....	74
III. MÉTODO	77
3.1. Tipo de Investigación.....	77
3.2. Población y muestra.....	79
3.3. Operacionalización de variables.....	80
3.4. Instrumentos	85
3.5. Procedimientos	86
3.6. Análisis estadístico de datos.....	92
3.7. Consideraciones éticas	95
3.8. Propuesta de solución	96
IV. RESULTADOS	119
4.1. Determinación de la influencia de la variación de los principales factores de combustión de gas natural.....	119
4.2. Verificación de la aplicación de la tecnología Dry Low NOx (DLN) de baja emisión de NOx	133
4.3. Predicción de la influencia de los principales factores de combustión de gas natural sobre la generación de nitrógeno reactivo	145
4.4. Prueba de hipótesis y evaluación de resultados	154
V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	158
5.1. Determinación de la influencia de la variación de los principales factores de combustión de gas natural.....	158
5.2. Verificación de la aplicación de la tecnología Dry Low Nox (DLN) de baja emisión de NOx	162

5.3. Predicción de la influencia de los principales factores de combustión de gas natural sobre la generación de nitrógeno reactivo	164
5.4. Prueba de hipótesis y evaluación de resultados	167
VI. CONCLUSIONES	168
VII. RECOMENDACIONES	170
VIII. REFERENCIAS	170
IX. ANEXOS.....	178

Anexo A Ubicación geográfica de las centrales termoeléctricas en el Nodo Energético Chilca.	178
Anexo B Cinética química de formación de NOx – Mecanismo de Zeldovich.....	179
Anexo C Matriz de consistencia	181
Anexo D Validación de instrumentos	183

I. Tratamiento y procesamiento de la información del monitoreo.

Ficha 1: Resumen de resultados de monitoreo pontual – MP y Monitoreo Continuo – MC de las turbinas a gas.

Ficha 2: Cálculos de ingeniería: Consiste en los 4 formatos siguientes:

- i. Composición del combustible.
- ii. Reporte de mediciones y resultados corregidos (conversiones).
- iii. Relaciones estequiométricas y flujos.
- iv. Determinación de concentración y flujos de emisiones de NOx.

Ficha 3: Balance de materia y energía de la turbina a gas.

II. Método de cálculo de la cinética química de la formación de óxido nítrico - NO.

Ficha 4: Instrucciones para la verificación de la aplicación de la tecnología Dry Low NOx (DLN) de baja emisión de NOx.

III. Desarrollo del modelo dinámico para determinar la influencia de los principales factores de combustión de gas natural.

Ficha 5: Registro de parámetros para el modelo dinámico.

Anexo E Confiabilidad de instrumentos	195
Anexo F Información del fabricante Siemens.....	197
Anexo G Comandos y resultados del programa R	199

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Información de EIA de centrales termoeléctricas del NEC	17
Tabla 2	Analizador portátil de emisiones atmosféricas	42
Tabla 3	LMP para los óxidos de nitrógeno (NOx) de turbina a gas	75
Tabla 4	Estándares de Calidad Ambiental para Aire	76
Tabla 5	Componentes del proyecto de investigación.....	78
Tabla 6	Operacionalización de las subvariables	84
Tabla 7	Información de emisiones a la atmósfera.....	87
Tabla 8	Resultados del monitoreo puntual y continuo de emisiones de la turbina a gas 1	96
Tabla 9	Resultados de emisiones obtenidos en los puntos de medición – Monitoreo puntual	97
Tabla 10	Monitoreo de emisiones atmosféricas de turbinas a gas	98
Tabla 11	Resultados del monitoreo continuo de emisiones de turbinas a gas	99
Tabla 12	Resultados en los puntos de medición – Monitoreo continuo	100
Tabla 13	Composición del combustible.....	102
Tabla 14	Relaciones estequiométricas y flujos	103
Tabla 15	Determinación de concentración y flujos de emisiones de NOx	105
Tabla 16	Balance de materia y energía para la turbina a gas (consolidado).....	107
Tabla 17	Instrucciones para determinar la temperatura de llama	108
Tabla 18	Formato para los factores de combustión de gas natural obtenidos y los parámetros del proceso	110
Tabla 19	Determinación de la energía libre estándar.....	112
Tabla 20	Determinación de la concentración de NO mediante el mecanismo de Zeldovich	113
Tabla 21	Valores de las variables del modelo.....	118
Tabla 22	Resumen de resultados de Monitoreo Puntual (M.P.) y Monitoreo Continuo (M.C.) de las turbinas a gas	120
Tabla 23	Registro de los valores de las mediciones y los resultados de los cálculos de ingeniería	126
Tabla 24	Factores de combustión de gas natural	129
Tabla 25	Rango de valores para los factores de combustión de gas natural y los parámetros del proceso	132
Tabla 26	Temperatura teórica de llama máxima vs. Concentración de NO (ppm).....	133
Tabla 27	Temperatura adiabática de llama vs. Concentración medida de NO (TG1)	135
Tabla 28	Temperatura de llama adiabática vs. Concentración medida de NO (TG2)	136
Tabla 29	Temperatura de llama adiabática vs. Concentración medida de NO (TG3)	137
Tabla 30	Variación de la temperatura teórica y la temperatura adiabática del combustor (TG1)	138
Tabla 31	Variación de la temperatura teórica y la temperatura adiabática del combustor (TG2)	139
Tabla 32	Variación de la temperatura teórica y la temperatura adiabática del combustor (TG3)	140
Tabla 33	Variación de la CmNO y Tllc vs. % O ₂ (TG1)	141
Tabla 34	Variación de la CmNO y Tllc vs. % O ₂ (TG2)	143
Tabla 35	Variación de la CmNO y Tllc vs. % O ₂ (TG3)	144
Tabla 36	Datos de ingreso al modelo.....	147
Tabla 37	Cantidad de nitrógeno reactivo con relación al % de exceso de aire	149
Tabla 38	Cantidad de nitrógeno reactivo con relación a la temperatura de gases de salida	152
Tabla 39	Prueba de análisis de regresión – Porcentaje de exceso de aire (%).....	154
Tabla 40	Análisis de varianza – Anova	154
Tabla 41	Prueba de análisis de regresión – Temperatura de gases de salida (°C)	155
Tabla 42	Análisis de varianza – Anova	156
Tabla 43	Prueba de análisis de correlación.....	157
Tabla 44	Prueba de normalidad	157
Tabla 45	Composición del gas natural seco estandarizada	160

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Potencia instalada eléctrica a nivel nacional, por tipo de generación.....	17
Figura 2	Variación de la concentración y el equilibrio de la reacción.....	40
Figura 3	Esquema de la Central Térmica de La Costa.....	41
Figura 4	Enfoques de sistemas de combustión convencional	46
Figura 5	Influencia de la temperatura de llama respecto a la formación de NOx.....	51
Figura 6	Influencia del exceso de aire respecto a la formación de NOx.....	52
Figura 7	Ciclo del dióxido de nitrógeno – ozono.....	55
Figura 8	Esquema generalizado de la formación de neblumo o smog fotoquímico	56
Figura 9	Evaluación por fases de cumplimiento de ECA NO ₂	57
Figura 10	Proceso de nitrificación	58
Figura 11	Ciclo del nitrógeno	59
Figura 12	Componentes de la turbina a gas	61
Figura 13	Sistemas de combustión convencional y premezcla pobre (DLE)	62
Figura 14	Contaminantes primarios que reaccionan en presencia de la luz solar.....	65
Figura 15	Esquema de la adaptación de un modelo a condiciones reales.....	69
Figura 16	Procedimiento de retroalimentación y elaboración de diagrama causal.....	70
Figura 17	Diagrama causal del modelo dinámico para el Nodo Energético Chilca	71
Figura 18	Lenguaje de la simulación dinámica	72
Figura 19	Sistema hidrodinámico	73
Figura 20	Ecuaciones diferenciales básicas del sistema	74
Figura 21	Algoritmo en diagrama de bloques para el modelamiento dinámico	92
Figura 22	Diagrama de combustión.....	101
Figura 23	Diagrama de flujo del ciclo combinado.....	107
Figura 24	Modelo dinámico para la determinación de la huella de nitrógeno de una turbina a gas	117
Figura 25	Concentración de NO vs. períodos de operación para las turbinas a gas	123
Figura 26	Curva de concentración teórica de emisiones de NO	134
Figura 27	Temperatura adiabática de llama vs. Concentración medida de NO (TG1).....	135
Figura 28	Temperatura de llama adiabática vs. Concentración medida de NO (TG2).....	136
Figura 29	Temperatura de llama adiabática vs. Concentración medida de NO (TG3).....	137
Figura 30	Variación de la temperatura teórica y la temperatura adiabática del combustor (TG1)	138
Figura 31	Variación de la temperatura teórica y la temperatura adiabática del combustor (TG2)	139
Figura 32	Variación de la temperatura teórica y la temperatura adiabática del combustor (TG3)	140
Figura 33	Variación de la CmNO vs. % O ₂ (TG1).....	141
Figura 34	Variación de la CmNO y Tllc vs. % O ₂ (TG1).....	142
Figura 35	Variación de la CmNO vs. % O ₂ (TG2).....	143
Figura 36	Variación de la CmNO y Tllc vs. % O ₂ (TG2).....	143
Figura 37	Variación de la CmNO vs. % O ₂ (TG3)	144
Figura 38	Variación de la CmNO y Tllc vs. % O ₂ (TG3).....	145

Figura 39 Diagrama causal del modelo dinámico.....	146
Figura 40 Modelo dinámico para la variación del porcentaje de exceso de aire	149
Figura 41 Flujo de óxidos de nitrógeno con relación al % de exceso de aire	151
Figura 42 Modelo dinámico para la variación de la temperatura de gases de salida	152
Figura 43 Flujo de óxidos de nitrógeno con relación a la temperatura de gases de salida	153
Figura 44 Dispersión del porcentaje de exceso de aire (%) respecto a la concentración de NOx (mg/Nm ³)	155
Figura 45 Dispersión de la temperatura de gases de salida (°C) respecto a la concentración de NOx (mg/Nm ³)	156
Figura 46 Concentración de NO (ppm) vs. Porcentaje de O ₂ (%) para las turbinas a gas	159
Figura 47 Formación de las llamas de difusión y de premezcla	162
Figura 48 Efecto del exceso de oxígeno sobre las emisiones de NOx.....	165
Figura 49 Relación de la formación de NOx térmico y la temperatura	166

LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS

BM	Banco Mundial
CEMS	Continuous Emission Monitoring System
COES	Comité de Operación Económica del Sistema
COV	Compuestos orgánicos volátiles
DLN	Dry Low NOx
ECA	Estándar de Calidad Ambiental
EIA	Estudio de Impacto Ambiental
EPA	Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GWP	Potencial de Calentamiento Global
LGA	Ley General del Ambiente
LMP	Límite Máximo Permisible
MINAM	Ministerio del Ambiente
MP	Monitoreo Puntual
MC	Monitoreo Continuo
NEC	Nodo Energético Chilca
OLM	Ozone Limiting Method
OMS	Organización Mundial de la Salud
MASS	Guías sobre Medio Ambiente, Salud y Seguridad
PMA	Plan de Manejo Ambiental
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
RPAAE	Reglamento de Protección Ambiental en las Actividades Eléctricas
SEIN	Sistema Eléctrico Interconectado Nacional
STELLA	Structural Thinking Experimental Learning Laboratory with Animation
WWW	World Wide Fund for Nature

RESUMEN

Objetivo: Desarrollar un modelo dinámico para predecir las variaciones de los factores de combustión del gas natural que influyen en la generación de emisiones gaseosas de óxidos de nitrógeno (NOx) por una central termoeléctrica en el Nodo Energético Chilca. **Método:** La investigación fue de enfoque cuantitativo, tipo aplicativo, nivel explicativo - predictivo causal, diseño pre-experimental y transversal; con la población de 11 turbinas a gas del Nodo Energético Chilca y la muestra de 3, seleccionadas por tener sus resultados completos de mediciones, aplicando métodos de cálculos de ingeniería, el balance de materia y energía y cinética química para obtener parámetros de combustión. **Resultados:** Determinación del factor de emisión promedio de la turbina de gas de 0.98 kg de NOx/MWh, el modelamiento de los factores de combustión porcentaje de exceso de aire y temperatura de gases de salida determinó la huella de nitrógeno reactivo de 475.67 t/año y de 1,609.91 t/año, respectivamente para un período de 20 años. Asimismo, la prueba de Shapiro – Wilk determinó que la variable respuesta cumple con la normalidad y la varianza homogénea, por tanto, corresponde usar un modelo de regresión no lineal respecto a los datos de entrada validando la primera hipótesis específica. **Conclusiones:** El modelo dinámico utiliza las variaciones de los factores de combustión del gas natural que influyen en la generación de emisiones gaseosas de óxidos de nitrógeno (NOx), pronosticando los valores de la huella de nitrógeno vs. el tiempo de una central termoeléctrica en el Nodo Energético Chilca.

Palabras claves: contaminación atmosférica, factor de combustión, huella de nitrógeno, modelo de simulación dinámica.

ABSTRACT

Objective: Develop a dynamic model to predict the variations of natural gas combustion factors that influence the generation of gaseous emissions of nitrogen oxides (NOx) by a thermoelectric power plant in the Chilca Energy Node. **Method:** The research had an explanatory - causal predictive approach with a pre-experimental, cross-sectional design; with the population of 11 gas turbines of the Chilca Energy Node and the sample of 3, selected for having their complete measurement results, applying engineering calculation methods, material and energy balance and chemical kinetics to obtain combustion parameters. **Results:** As a result, the average emission factor of the gas turbine of 0.98 kg of NOx/MWh, the modeling of the combustion factors percentage of excess air and exhaust gas temperature determined the reactive nitrogen footprint of 475.67 t/year and 1,609.91 t/year, respectively, likewise, the Shapiro-Wilk test determined that the variable response complies with normality and homogeneous variance and that it is appropriate to use a non-linear regression model with respect to the input data, validating the first specific hypothesis. **Conclusions:** The dynamic model uses variations in natural gas combustion factors that influence the generation of gaseous emissions of nitrogen oxides (NOx) predicting the values of nitrogen footprint vs. time of a thermoelectric plant in the Chilca Energy Node.

Keywords: air pollution, combustion factor, nitrogen footprint, dynamic simulation model.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad el conocimiento de la contaminación atmosférica es fundamental, debido a que los estudios epidemiológicos comprueban el aumento del riesgo de las enfermedades pulmonares y del corazón como los efectos directos sobre la salud humana. Así, el 17 de octubre de 2013 la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) de la Organización Mundial de la Salud (OMS), informó que la contaminación del aire clasifica como carcinógeno para los humanos en el Grupo 1 que significa que la exposición a dicha contaminación es cancerígena para los seres humanos. (Da Silva et al., 2025)

El estudio se centra en entender cómo predecir, empleando un modelo dinámico para el control de los factores de combustión que influyen en la generación de nitrógeno reactivo de una central termoeléctrica.

A noviembre de 2024, el Perú tuvo la máxima demanda a nivel nacional de 14 334,5 MW, parte de dicha demanda fue suministrada por la actividad de generación de energía termoeléctrica, la cual tuvo al mismo período una potencia instalada operativa total de 3 005,46 MW representando aproximadamente el 20,9 % de la máxima demanda. En el Nodo Energético Chilca (NEC) se encuentran cinco (05) centrales termoeléctricas actuales funcionando, específicamente en la cuenca baja del río seco o Chilca, distrito del mismo nombre, provincia de Cañete, Región Lima, a aproximadamente 65 km del centro de la capital. (Comité de Operación Económica del Sistema, 2025)

Cada central termoeléctrica tiene turbinas a gas que consumen el gas natural suministrado desde Camisea (Cusco), teniendo un sistema de regulación de los factores de combustión y también un Sistema de Monitoreo Continuo de Emisiones (CEMS por sus siglas en inglés) para el control de la generación de las emisiones gaseosas, las cuales deben cumplir los valores Límites Máximos Permisibles (LMP) exigidos por la norma legal.

Las turbinas a gas de ciclo combinado generan emisiones gaseosas, que consisten en sustancias químicas como los óxidos de nitrógeno (NOx), que son una mezcla de gases contaminantes como el óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂), ambos con efectos perjudiciales para la salud humana y los ecosistemas, en ese sentido, los Estudios de Impacto Ambiental exigieron a todas las centrales instaladas en el NEC la aplicación de la tecnología Dry Low NOx (DLN) de baja emisión de NOx. (Ahmed, 2017)

Conociendo la importancia de las turbinas a gas para la actividad de generación de energía eléctrica y del control de los factores de combustión para evitar los riesgos a la salud humana debido a la generación de emisiones gaseosas de NOx, el presente estudio tiene como objetivo principal la utilización sistemática de la información de mediciones de los análisis de los gases de combustión y establecer el modelamiento dinámico para el control de los factores mencionados, específicamente los que influyen como la temperatura de combustión del gas natural y el porcentaje de exceso de aire, con la finalidad de predecir la generación del nitrógeno reactivo (Nr) de una central termoeléctrica.

1.1. Planteamiento del problema

A partir del uso del gas natural de Camisea en nuestro país a partir de 2007, se produce la instalación de nuevas centrales termoeléctricas con turbinas a gas y sus sistemas auxiliares, originando la problemática ambiental asociada debido a la generación de emisiones gaseosas, el nivel de ruido y otros aspectos ambientales.

En este contexto, se instalaron nuevas centrales termoeléctricas en el Nodo Energético Chilca que lleva el nombre de la ciudad, las cuales tienen sus Estudios de Impacto Ambiental (EIA), así como sus respectivos Planes de Manejo Ambiental (PMA) de sus ampliaciones y conversión a ciclo combinado aprobados por el Ministerio de Energía y Minas.

Así, la evaluación realizada por el Estudio de Impacto Ambiental – EIA de una empresa generadora de energía eléctrica cuyo nombre no se incluye por confidencialidad, señala el aspecto ambiental de la generación de emisiones gaseosas siguiente:

La turbina consume gas natural que al quemarse genera emisiones gaseosas contaminantes (de la familia del carbono y del nitrógeno), así como hidrocarburos no combustionados (HC). El suministro de gas natural no tiene partículas, sin embargo, el proceso de combustión además la admisión del aire añade trazas que se emiten por la chimenea. Asimismo, la turbina no genera dióxido de azufre (SO₂) debido a que el contenido del gas natural no presenta compuestos de azufre. (Resolución Directoral N° 051-2006-MEM/AAE, 2006)

El Ministerio de Energía y Minas emitió la resolución correspondiente que aprobó el PMA adjuntando el informe técnico de evaluación del proyecto de ciclo combinado, el cual evaluó el efecto acumulativo y el planteamiento en relación a la operación de las nuevas centrales termoeléctricas, señalando que: "Se reducirá gradualmente y proporcionalmente la potencia de todas las centrales que operan en Chilca de manera tal que la emisión de NOx se reduzca niveles que permitan el cumplimiento de los ECA". (Resolución Directoral N° 335-2009-MEM/AAE, 2009, p. 12)

En ese sentido, conociendo la importancia de las emisiones para no afectar la calidad del aire, se propone la aplicación de un modelo dinámico que permita predecir la generación de nitrógeno reactivo o huella de nitrógeno, conociendo los factores o variables independientes de la combustión del gas natural. Cabe indicar que, en el contexto de la combustión, el término factor puede ser similar al término variable, ambos se refieren a elementos que influyen en el proceso de combustión y pueden cambiar o variar. (Guevara, 2013)

Se plantea el desarrollo siguiente:

Determinación de la variación unifactorial de dos importantes factores de combustión del gas natural y de los otros asociados (denominados parámetros) al proceso que influyen sobre la generación de óxidos de nitrógeno (NOx) por una turbina a gas de ciclo combinado. Se emplea la información de las mediciones de análisis de los gases de escape de chimeneas, correspondiente a los factores de combustión siguientes: Temperatura del gas de chimenea y temperatura del aire ambiente (°C), % de exceso de aire (% de O₂), índice de exceso de aire (n), así como de los óxidos de nitrógeno (NOx) expresados en ppm.

Verificación de la aplicación de la tecnología Dry Low NOx (DLN) de baja emisión de NOx respecto a que la temperatura de combustión del gas natural o el porcentaje de exceso de aire influyen sobre la generación de emisiones gaseosas de óxidos de nitrógeno (NOx) en una turbina a gas de ciclo combinado.

Predicción de la influencia de los principales factores de combustión de gas natural sobre la generación de nitrógeno reactivo o huella de nitrógeno en una turbina a gas de ciclo combinado, mediante un modelo dinámico.

1.2. Descripción del problema

A nivel global:

En los países de mayor territorio y población, como China, Rusia, Estados Unidos, entre otros, la generación termoeléctrica viene utilizando el carbón mineral, combustibles fósiles (derivados del petróleo), biomasa; originando el impacto en la calidad del aire por los gases contaminantes atmosféricos y el material particulado conocido como carbón negro u hollín, el cual origina efectos negativos en la salud de la población. En ese sentido, las grandes empresas internacionales de generación energía eléctrica vienen efectuando proyectos de descarbonización, con la finalidad de promover a las energías renovables.

En ese sentido, los óxidos de nitrógeno (NOx) vienen influyendo en el efecto invernadero, calentamiento global, la lluvia ácida y el agotamiento de la capa de ozono, dependiendo del tipo de combustible utilizado y la tecnología del equipo térmico.

A nivel local:

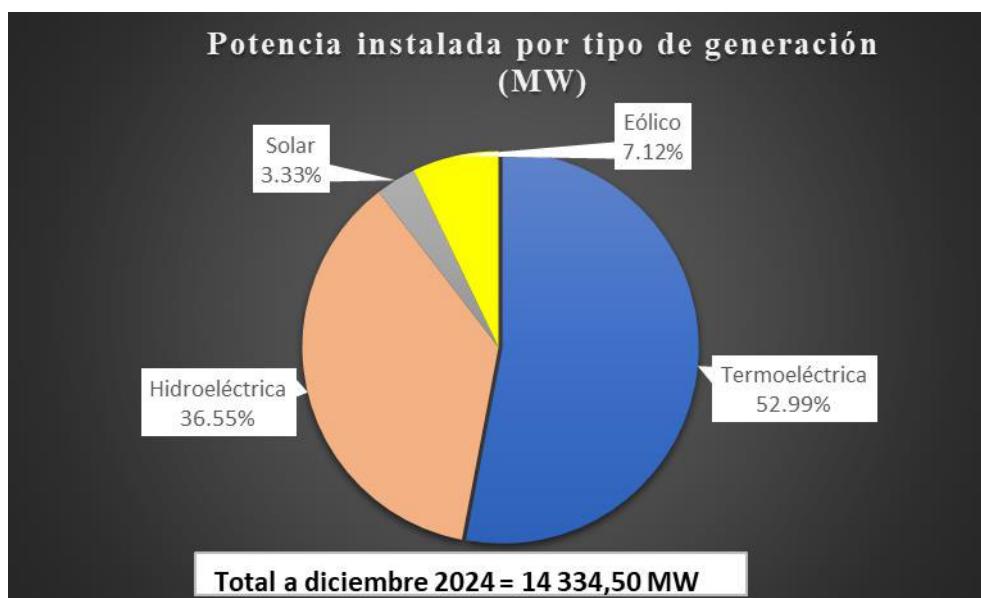
El Decreto Supremo N° 014-2019-EM, Reglamento de Protección Ambiental en las Actividades Eléctricas (RPAAE) de 2019 vigente, no incluye la evaluación de la contaminación atmosférica producida por las emisiones gaseosas producidas por las centrales termoeléctricas, que sí contemplaba el reglamento anterior de 1994 (en su Anexo 2 Informe sobre generación de emisiones y/o vertimientos de residuos de la actividad eléctrica, en su numeral 4. Emisiones a la atmósfera), por ello en la actualidad, la verificación de las emisiones consiste en la comparación de los valores de las mediciones puntuales o continuas de las emisiones gaseosas de chimeneas de las turbinas a gas con los valores de los límites máximos permisibles, sin tener un procedimiento técnico de determinación y control de la generación de emisiones gaseosas al ambiente.

Se conoce que los óxidos de nitrógeno (NOx) originan el smog fotoquímico que afecta la salud humana, de los animales y la vegetación, debido a la generación de ozono (O_3) un compuesto muy oxidante y a la vez otros cancerígenos como los aldehídos, etc. (Doadrio, 2013, pp. 43-44)

Con respecto a la oferta eléctrica nacional y el consumo de gas natural, según el Comité de Operación Económica del Sistema (COES) a diciembre de 2024 la potencia instalada total fue de 14 334,50 MW, siendo el 36,55 % proveniente de centrales hidroeléctricas, el 52,99 % de centrales termoeléctricas, 7,12 % de centrales eólicas y 3,33 % de centrales solares. La Figura 1 presenta la información anterior de la distribución de la potencia instalada eléctrica nacional del 2024, que adiciona la potencia instalada por la autogeneración y el sistema aislado. (Comité de Operación Económica del Sistema, 2025)

Figura 1

Potencia instalada eléctrica a nivel nacional, por tipo de generación



Nota. Adaptada de *Potencia efectiva por tipo de generación* [Infografía], por COES/Publicaciones/Estadísticas anuales, 2024. <https://www.coes.org.pe/Portal/publicaciones/estadisticas/estadistica?anio=2024#>.

La Tabla 1 presenta la información técnica proveniente de los EIA de cada una de las empresas que desarrollan actividades de generación de energía eléctrica en la ciudad de Chilca.

Tabla 1

Información de EIA de centrales termoeléctricas del NEC

Nº	ADMINISTRADO / CENTRAL	POTENCIA INSTALADA (MW)	TIPO DE CENTRAL	Nº DE TURBINA A GAS	POTENCIA INSTALADA DE TURBINA A GAS (MW)	MARCA	MODELO
1	ENGIE Energía Perú (EX ENERSUR S.A.) / Central Chilca 1	862.20	CC	TG11	185.00	Siemens	SG76
			CC	TG12	185.00	Siemens	SG76
			CC	TG21	193.00	Siemens	SG76
			CC	TV21	299.20	General Electric	-
		112.80	CC	TG41	75.40	General Electric	
			CC	TV41	37.40	Siemens	-
2	FÉNIX POWER PERÚ S.A. / Central Chilca	535.00	CC	TG11	173.00	General Electric	9FA

Nº	ADMINISTRADO / CENTRAL	POTENCIA INSTALADA (MW)	TIPO DE CENTRAL	Nº DE TURBINA A GAS	POTENCIA INSTALADA DE TURBINA A GAS (MW)	MARCA	MODELO
3	KALLPA GENERACIÓN S.A. / Central Kallpa	873.90	CC	TG12	173.00	General Electric	9FA
				TV10	189.00	General Electric	-
				TG1	189.80	Siemens	501FD2
				TG2	193.50	Siemens	501FD2
				TG3	197.80	Siemens	501FD2
4	TERMOCHILCA S.A.C. / Central Santo Domingo de los Olleros	297.56	CS	TV	292.80	General Electric	-
				TG5	210.00	Siemens	SGT5000F
				TV	114.00		
				TV1	99.96	Siemens	SST-700 HP
5	HOLEK Y LENNOX S.A. / Centrales Pampa Salinas - Chilca (02)	1,160	CC	-	-	-	-
6	TINKU GENERACIÓN S.A. / Central las Higueras	390	CS	-	-	-	-
7	LUZ DEL SUR S.A. /Central Pacífico Sur	460	-	-	-	-	-
POTENCIA INSTALADA TOTAL (MW) DE TODAS LAS CENTRALES							5,015.46
POTENCIA INSTALADA OPERATIVA TOTAL (MW) A NOVIEMBRE 2024							3,005.46

En el Anexo 1 se presenta la ubicación geográfica de las centrales termoeléctricas en el Nodo Energético Chilca.

El Nodo Energético Chilca a noviembre 2024, tuvo una potencia instalada operativa total de 3 005,46 MW con las centrales termoeléctricas actuales funcionando, representando aproximadamente el **20,9 %** de la máxima **demand**a del mismo año a nivel nacional (14 334,5 MW). El Nodo se encuentra en la cuenca baja del río seco o Chilca, distrito del mismo nombre, provincia de Cañete, Región Lima, a aproximadamente 65 km del centro de la capital.

1.3. Formulación del problema

Según el planteamiento del problema, el presente estudio formula lo siguiente:

1.3.1. *Problema general*

¿Cómo predecir las tendencias de variaciones de los factores de combustión del gas natural que influyen en la generación de emisiones gaseosas de óxidos de nitrógeno (NOx) por una central termoeléctrica en el Nodo Energético Chilca?

1.3.2. *Problemas específicos*

a. ¿Cuáles son los métodos de cálculo de ingeniería para determinar la influencia de la variación de dos principales factores de combustión de gas natural: Porcentaje de exceso de aire (%) y el nivel de temperatura del gas de chimenea (°C), sobre la generación de emisiones gaseosas de óxidos de nitrógeno (NOx) por una turbina a gas de ciclo combinado?

b. ¿Cuál es el método de cálculo para verificar la aplicación de la tecnología Dry Low NOx (DLN) de baja emisión de NOx respecto a que la temperatura de combustión del gas natural o el porcentaje de exceso de aire influyen sobre la generación de emisiones gaseosas de óxidos de nitrógeno (NOx) en una turbina a gas de ciclo combinado?

c. ¿Cómo predecir la influencia de dos principales factores de combustión de gas natural sobre la generación de nitrógeno reactivo o huella de nitrógeno en una turbina a gas de ciclo combinado, mediante un modelo dinámico?

1.4. Antecedentes

Los antecedentes de la investigación tienen los componentes siguientes:

1.4.1. *Desde cuando existe o se conoce el problema*

El problema existe desde el inicio del período industrial en nuestro país, principalmente en la ciudad de Lima con la instalación de los parques industriales, centrales termoeléctricas y el transporte vehicular, debido al consumo de combustibles derivados del petróleo como el diésel, así como de petróleos industriales.

A partir de 1994 con la aprobación de la legislación ambiental en el sector energético y minero se establecen los límites máximos permisibles de los gases y partículas contaminantes y posteriormente se dan los estándares de calidad ambiental del aire.

La Organización Mundial de la Salud en sus Directrices Mundiales sobre la Calidad del Aire publicadas en 2005, actualizó sus recomendaciones para los contaminantes atmosféricos, incluyendo el dióxido de nitrógeno (NO₂). Los niveles de NO₂ en el aire, especialmente en las ciudades, son un problema de salud pública y la OMS proporciona valores objetivo para proteger la salud de la población. Aunque las directrices de la OMS no son vinculantes, sirven como una herramienta práctica y basada en la evidencia para que los países establezcan normas y objetivos nacionales de calidad del aire. Su implementación puede contribuir significativamente a la reducción de la morbilidad y mortalidad asociadas a la contaminación del aire. (Oficina Regional de la OMS para Europa, 2021)

En lo referente a la contaminación atmosférica como un problema mundial y local causado por la generación de energía:

Esta revisión proporciona información sobre la generación y el consumo de energía, con su mezcla de contaminantes: gases, líquidos y partículas, en relación al deterioro de la salud ambiental humana y la sostenibilidad local-global debido al calentamiento global. Se han estudiado los componentes contaminantes resultantes de la quema de combustibles fósiles (petróleo y gas) y carbón, como el dióxido de azufre, el dióxido de carbono, los óxidos de nitrógeno y las partículas. Tanto el dióxido de azufre como los óxidos de nitrógeno interactúan con el agua para producir lluvia ácida. Las emisiones actuales y futuras de las centrales térmicas de gas y petróleo podrían mitigarse incorporando las fuentes de energía renovables. Los resultados indican que las centrales eléctricas de gas son, en general, más rápidas y eficientes, y menos contaminantes que las centrales eléctricas de petróleo y carbón. Se realizó una evaluación completa del

tratamiento de gases de escape. La captura de dióxido de carbono, la desulfuración, la desnitrificación y la recolección de partículas resultaron ser mecanismos de control del tratamiento eficaces. (Abdul Razzaq y Hannun, 2022, p. 1)

En relación con la contaminación atmosférica por centrales termoeléctricas y teniendo una matriz energética razonablemente estructurada y orientada a fomentar las energías renovables no convencionales:

Las centrales termoeléctricas de ciclo simple y ciclo combinado con gas natural son a la fecha las únicas tecnologías energéticas de generación que operan y despachan usando fuentes convencionales en el Perú. Del mismo modo desde el año 2010 se cuenta en el pool de generación del SEIN, centrales de generación de energía con recursos energéticos renovables, entre las cuales tenemos centrales solares, eólicas, biomasa, residuos sólidos urbanos y centrales hidroeléctricas con potencia efectiva de hasta 20 MW. El trabajo de investigación es del tipo pre -experimental, de naturaleza descriptiva. Toma como modelo de estudio el desempeño de la central termoeléctrica TG6 (el cual es la central termoeléctrica que actualmente cubre los picos de máxima demanda del sistema) y la central de ciclo combinado de Termochilca, la cual es la central de ciclo combinado de menor capacidad de potencia efectiva instalada en el Perú. Del mismo se toma el comportamiento de operación de las centrales con recursos energéticos renovables del Perú como son la Central Solar Fotovoltaica Rubí y la Central Eólica Wayra I. Para ello se hace uso del diagrama de carga típicos de generación del mes de diciembre, el cual es el mes de mayor producción energética. Dentro de los resultados tenemos que para reemplazar a la central termoeléctrica TG6 se requiere tan solo de 1 central solar equivalente a la central Rubí y 1 central eólica equivalente a la central Wayra I. Del mismo modo se ha cuantificado la prima RER con la central eólica la cual es 1,058 US\$/MWh lo que representa 2,93 % sobre el valor del

costo de generación de la central termoeléctrica a gas ciclo simple. El reemplazo de la central termoeléctrica con turbina a gas ciclo simple involucra dejar de emitir 0,51 t CO₂/día o 15,41 t CO₂/mes. (Gutiérrez & Palacios, 2022)

En lo referente a la contaminación atmosférica por los óxidos de nitrógeno que se generan por las diferentes actividades en el país:

El informe de transparencia bienal de 2024 del Ministerio del Ambiente en Perú a la UNFCCC por sus siglas en inglés (United Nations Framework Convention on Climate Change), es la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, incluye datos sobre emisiones de gases precursores, incluyendo NOx, para el año 2021, en ese año, las emisiones de NOx fueron de 247,91 kt (Huangal y Mora, 2024, p. 19).

1.4.2. Estudios o investigaciones anteriores

En lo referente a la combustión de gas natural y la tecnología de control de las emisiones de NOx en equipos térmicos:

Se espera que el hidrógeno sea una fuente de energía de próxima generación que no emita dióxido de carbono. Sin embargo, al usarse como combustible, el problema radica en el aumento de NOx causado por el aumento de la temperatura de la llama. El estudio investiga experimentalmente la tasa de emisiones de NOx al quemar hidrógeno en un quemador de gas de hidrocarburos, que se utiliza en un amplio rango de temperaturas. Como resultado de los experimentos, la cantidad de NOx al quemar hidrógeno en un quemador mixto de boquillas fue el doble que al quemar gas ciudad. Sin embargo, al aumentar la velocidad del flujo del aire de combustión, se pudo reducir la cantidad de NOx. Además, al reducir el número de boquillas de aire de combustión en lugar de disminuir el diámetro de las boquillas, se logró generar un mayor flujo de recirculación en el horno, lo que permitió reducir la cantidad de NOx hasta en un 51 %. Además, la cantidad de recirculación de gases de escape se estimó a partir de la tasa de reducción de NOx, y su validez se confirmó mediante la relación entre la temperatura de

llama adiabática y el NOx, calculada a partir del cálculo de equilibrio mediante un software de simulación de cinética química (Kikuchi et al., 2022).

Para estudiar la estimación de las emisiones de NOx, se utilizan métodos de optimización numérica y ajuste de datos para estudiar la ley de emisiones de NOx en la cámara de combustión de turbinas de gas de servicio pesado. La presión de entrada Pin, el caudal másico de aire ma y la temperatura media en la zona de combustión Tpz se utilizan para ajustar la fórmula de estimación de las emisiones de NOx bajo el efecto multiparamétrico. Los resultados muestran que este es un método de investigación rápido y eficaz para la estimación de las emisiones de NOx en la cámara de combustión, garantizando la precisión, lo que permite obtener emisiones de NOx muy por debajo del nivel medio en condiciones de presión de entrada óptima. (Zhao et al., 2021)

En este estudio, se simula la combustión sin premezcla de un combustible tradicional (gas natural) y un combustible alternativo (biogás) en una cámara de combustión de turbina de gas industrial con geometría de flujo turbulento, que incluye el revestimiento y la carcasa exterior, para replicar el flujo y la combustión en una cámara de combustión real. Se validan las simulaciones de combustión en 3D y se analizan los resultados de la combustión de ambos gases para comparar y evaluar la viabilidad del biogás como combustible alternativo en cámaras de combustión de turbinas de gas industriales. El rendimiento de la combustión se evalúa en función de múltiples parámetros de optimización, como la eficiencia, el factor patrón y las emisiones contaminantes (CO y NO). Se examinan los efectos de dos parámetros de diseño (número de remolinos y diámetro del inyector) sobre los parámetros de optimización. Se analizan los resultados para identificar el mejor caso para cada parámetro y se propone un equilibrio adecuado para ambos gases. Además, la comparación del rendimiento de combustión de ambos gases reveló que, a pesar de poseer un contenido de metano mucho menor y por lo tanto, un poder calorífico inferior (PCI), la combinación del número de remolinos y el diámetro

del inyector de combustible para biogás de una composición específica resulta en un rendimiento de combustión comparable al del gas natural, junto con una menor emisión de NO, aunque a expensas de una mayor emisión de CO. Por lo tanto, el biogás podría utilizarse como combustible alternativo en cámaras de combustión de turbinas de gas industriales, y podrían diseñarse métodos para reducir las emisiones de CO. (Rahman et al., 2022)

En lo referente a la huella de nitrógeno o la generación de nitrógeno reactivo (NOx) en centrales termoeléctricas, es un desafío ambiental significativo debido a su contribución a la contaminación atmosférica, diversos estudios han abordado este problema desde distintas perspectivas:

Ante las múltiples crisis ambientales que enfrentamos (p. ej., cambio climático, contaminación por nutrientes, escasez de agua dulce), a menudo existe una desconexión entre las actividades de una entidad y la contaminación resultante de ellas. Las herramientas de huella ambiental ayudan a abordar esta desconexión. Son eficaces para educar a personas, instituciones y comunidades sobre cómo el uso de sus recursos genera contaminación ambiental y qué podemos hacer para moderarla. Estas herramientas conectan las actividades de una entidad con la contaminación asociada. Además, las herramientas de huella ambiental evolucionan constantemente. A medida que comprendemos mejor cómo estimar las emisiones, especialmente las de fuentes más alejadas, como las de la cadena de suministro, las directrices y los métodos para calcular las huellas ambientales cambian y mejoran. Este documento analiza las herramientas de huella ambiental para personas, instituciones y comunidades, centrándose en las herramientas de huella de nitrógeno en inglés Nitrogen Footprint Tools (NFT). También ofrece ejemplos de cómo se han aplicado estas herramientas para lograr reducciones de la contaminación. Concluye con una evaluación de cómo las herramientas de huella de nitrógeno y multielementos se integran en el tema general de la gestión ambiental, y analiza sus beneficios y limitaciones. (Galloway et al., 2024)

La concentración de material particulado fino (PM2.5) en China ha disminuido entre un 30 % y un 50 % durante el período 2013-2018 debido a los estrictos controles de emisiones. Sin embargo, el componente nitrato de PM2.5 no ha respondido eficazmente a la disminución de las emisiones de óxidos de nitrógeno y de hecho, ha aumentado durante los eventos de contaminación por neblina invernal en la llanura del norte de China. Aquí, mostramos que el modelo de química atmosférica GEOS-Chem simula con éxito las concentraciones y tendencias de nitrato. Encontramos que el nitrato medio invernal habría aumentado durante 2013-2018 si no hubiera sido por la meteorología favorable. La causa principal de este aumento de nitrato es una deposición más débil. La fracción de nitrato inorgánico total como nitrato particulado en lugar de ácido nítrico gaseoso sobre la llanura del norte de China en invierno aumentó del 90% en 2013 al 98% en 2017, ya que las emisiones de óxidos de nitrógeno y dióxido de azufre disminuyeron, mientras que las emisiones de amoníaco se mantuvieron altas. Este pequeño aumento en la fracción de partículas ralentiza considerablemente la deposición de nitrato inorgánico total y, por lo tanto, impulsa el aumento de nitrato particulado. Nuestros resultados sugieren que la disminución de las emisiones de amoníaco disminuiría el nitrato particulado al acelerar la deposición de nitrato inorgánico total. La disminución de las emisiones de óxidos de nitrógeno es menos efectiva porque acelera la oxidación de los óxidos de nitrógeno y ralentiza la deposición de nitrato inorgánico total. (Zhai et al., 2021)

En la tesis “Estimación de la huella de nitrógeno de una central térmica de generación eléctrica a gas natural”, el objetivo fue determinar la influencia de las emisiones de los diferentes compuestos de nitrógeno denominadas Nitrógeno reactivo (Nr) distinto al N₂, transformando el ciclo del nitrógeno, asimismo, que la masa total de Nr antrópico identifica a la Huella de Nitrógeno en la atmósfera. Los resultados de la investigación muestran que la Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía del Perú informó que la generación termoeléctrica a gas natural fue de 42,9 %, motivo por el cual se determinó la cantidad de Nr

por dicha actividad. La conclusión del estudio muestra la relación 0,26091 kg de N/MWh tomando como base las emisiones de gases de una turbina a gas de una central termoeléctrica a gas natural en Perú (Luque, 2019).

En lo referente a los modelos dinámicos y el control de emisiones de NOx se tienen estudios relacionados a la combustión de gas natural:

En este estudio, se desarrolló un modelo de equilibrio para la emisión de NOx en cámaras de combustión de turbinas de gas. El modelo se basa en las ecuaciones que rigen la termodinámica, los materiales y el balance energético. Los resultados obtenidos de la simulación del modelo se compararon con los datos operativos de una central eléctrica de turbina de gas local. Se observó una desviación de entre el 3 % y el 6 % durante los períodos considerados. En consecuencia, el modelo es fiable para el diseño de nuevas cámaras de combustión y para la evaluación de las emisiones contaminantes durante la operación. Se estableció que los factores que afectan la formación de NOx incluyen la temperatura de la llama y la cantidad de aire sobrante utilizado. Además, los resultados revelaron que el parámetro más importante que rige la formación de NOx es la temperatura de la llama, ya que la formación de NOx aumenta exponencialmente con el aumento de la temperatura de la llama de la cámara de combustión (Ighodaro et al., 2022).

Las centrales eléctricas de ciclo combinado, que combinan turbinas de gas y vapor, tienen un impacto adverso en las poblaciones y estructuras circundantes. Los datos de entrada pueden ajustarse para reducir este efecto. Si se determinan correctamente los parámetros que afectan al valor de NOx ($\text{NOx} = \text{NO}_2 + \text{NO}$) medido como resultado, el sistema puede evolucionar en la dirección deseada. En este estudio, se estimó la emisión de NOx mediante un sistema de inferencia neurodifusa adaptativa (ANFIS) utilizando datos del Sistema de Monitoreo Predictivo de Emisiones (PEMS) de una central eléctrica de ciclo combinado alimentada con gas natural. Posteriormente, se optimizó el parámetro mediante un algoritmo

genético (AG) para reducir el error de predicción. El marco ANFIS-AG propuesto se ha desarrollado, entrenado y probado con estos conjuntos de datos. Se utilizan diversas medidas de rendimiento (error cuadrático medio (MSE), desviación estándar del error (ED), coeficiente de correlación (R), error medio (EM) y error cuadrático medio (RMSE)) para mostrar la capacidad del modelo y evaluar su rendimiento. Los resultados muestran que el AG tiene un impacto considerable en el rendimiento del entrenamiento ANFIS y aumenta significativamente la precisión predictiva del modelo. Dado que el modelo ANFIS-AG es un método de optimización realista para modelos ANFIS, los resultados obtenidos con este modelo son más precisos que los obtenidos con otros enfoques. (Dirik, 2022)

Los sistemas de monitoreo predictivo de emisiones (PEMS) son soluciones de software para la validación y complementación de costosos sistemas de monitoreo continuo de emisiones para turbinas de generación eléctrica a gas natural. Los PEMS se basan en modelos predictivos entrenados con datos históricos para estimar los componentes de las emisiones. El conjunto de datos de procesos de turbinas de gas del repositorio de datos abiertos de la Universidad de California en Irvine ha dado lugar a un desafío para investigar la calidad de los modelos de diversos métodos de aprendizaje automático con el fin de construir un modelo que prediga las emisiones de CO y NOx en función de las variables ambientales y los parámetros del proceso tecnológico. Las novedades y características de este artículo son: (i) una contribución al estudio de las características del conjunto de datos abiertos sobre emisiones de CO y NOx para turbinas de gas, lo que permitirá comparar de forma más objetiva diferentes métodos de aprendizaje automático para futuras investigaciones; (ii) por primera vez para las emisiones de CO y NOx, se presenta un modelo basado en regresión simbólica y un algoritmo genético, cuya ventaja reside en la transparencia de la influencia de los factores y la interpretabilidad del modelo; (iii) se propone un nuevo modelo de clasificación basado en el modelo de regresión simbólica y un sistema de inferencia difusa. Los coeficientes de

determinación de los modelos desarrollados son: $R^2=0,83$ para las emisiones de NOx, $R^2=0,89$ para las emisiones de CO. (Kochueva & Nikolskii, 2021)

Para superar la crisis del cambio climático, el gobierno indonesio está desarrollando una solución basada en la naturaleza, una de las cuales es el hidrógeno verde. Esta es una investigación cuantitativa que utiliza datos de emisiones y energía en Indonesia durante los últimos 20 años. Construimos un modelo dinámico y realizamos simulaciones por computadora en Python. Cada 1 millón de Barrel of Oil Equivalent (BOE) que significa barril de petróleo equivalente de consumo de hidrógeno verde puede reducir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) entre 0,06 y 0,51 mil millones de toneladas de CO₂e. La resistividad del agua y la energía utilizada en ella son los principales factores durante la producción de hidrógeno verde. El mejor tipo de agua es el agua de mar costera con una resistividad de 0,3 Ωm. Utilizando un excedente de energía de 0,1 GW a una tasa de 1,1 GW por año en agua de mar costera, se estima que Indonesia producirá 608 millones de BOE de hidrógeno verde y alcanzará cero emisiones netas para 2030. Esta investigación puede continuar para construir un prototipo de hidrógeno verde. (Monalisa y Sudrajat, 2024)

La contaminación del aire en las megaciudades de todo el mundo ha sido un grave problema ambiental y de salud pública; contribuye al cambio climático y amenaza la vida. Entre todos los servicios, el sector del transporte representa la mayor parte de estos contaminantes. Sin embargo, a pesar de las estrategias implementadas para reducir estos contaminantes, mitigar sus efectos y promover la prosperidad y la sostenibilidad, los objetivos de reducción de emisiones siguen sin cumplirse, lo que provoca que las temperaturas globales promedio sigan aumentando. En este estudio, la contaminación del aire en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) se estima mediante el diseño de un modelo de simulación ambiental utilizando dinámica de sistemas, lo que constituye una posibilidad para que las autoridades prevean la evolución de la calidad del aire en la ZMCM al evaluar las

emisiones del sector transporte desde una perspectiva holística, con base en los factores de análisis DESTEP de la región. Los resultados de la simulación estiman una reducción más significativa que la prevista por el pronóstico actual del gobierno local; esta reducción de emisiones sería hasta un 106 % menor para PM10, 176 % para PM2.5, 34 % para NOx y 17 % para COV. La conclusión demostró que uno de los principales factores con mayor impacto en el control y reducción de emisiones es el uso y promoción del transporte público, junto con la mejora de su infraestructura vial. (Godinez et al., 2024)

La contaminación por dioxinas ha sido problemática en Taiwán. Si bien el gobierno ha establecido normas de emisión y un inventario de emisiones para controlar la contaminación por dioxinas, estos esfuerzos solo se aplican a las emisiones contaminantes; no se ha intentado comprender el flujo de dioxinas en diferentes medios ambientales. En este estudio, se utilizó el software STELLA para modelar el patrón de flujo de dioxinas en diversos medios. Este modelo y el modelo RAIDAR, establecido por el Centro Canadiense de Investigación de Modelos Ambientales, se utilizaron para simular el flujo de dioxinas en Taiwán, y sus resultados se compararon con los valores medidos. La precisión de los modelos RAIDAR y STELLA fue del 63,92 % y del 49,78 %, respectivamente. Esto demuestra que la simulación con el modelo STELLA arrojó resultados más cercanos a los valores medidos y que el error fue diez veces menor que el del modelo RAIDAR, lo que indica que el modelo propuesto es predictivo. Además, utilizamos los resultados de un modelo de dinámica de sistemas para el flujo de dioxinas y un modelo de cobeneficios de los recursos atmosféricos (ARCoB) para aplicar los resultados obtenidos al sector energético y cuantificar los cobeneficios de la reducción de las emisiones de dioxinas, gases de efecto invernadero y contaminantes atmosféricos, con base en el objetivo de política para el año 2030. Los cobeneficios totales de los escenarios de gas natural y energías renovables (ER) fueron de US\$ 9,63 billones y US\$ 12,57 billones de dólares, respectivamente; las relaciones costo-beneficio fueron de 2,89 y 20,67, respectivamente. El

desarrollo de una política de ER como alternativa a una política de generación de energía a carbón contribuirá a optimizar los cobeneficios de las reducciones integradas y también contribuirá a la salud humana. (Tseng et al., 2021)

En este artículo, proponemos un modelo de dinámica de sistemas (DS) para examinar la dinámica de una cadena de suministro de Minería de oro Artesanal y de Pequeña Escala (MAPE) informal que interactúa con la cadena de suministro de oro ilegal en la región de la selva amazónica, Madre de Dios (MdD), Perú. Para examinar el sistema bajo los impactos climáticos y validar el modelo, lo ejecutamos bajo un escenario de inundación, que es uno de los principales impactos climáticos que causa disrupción en las actividades mineras. Nuestros hallazgos sugieren que la dinámica de las minas informales se ve altamente afectada por el suministro ilegal de mercurio, el suministro de combustible y la disponibilidad de trabajadores. Además, el modelo bajo el escenario de inundación sugiere que cualquier variable externa que pudiera afectar directamente el suministro de combustible y mercurio resultaría en una disrupción de la producción informal e ilegal de oro. (Aranoglu et al., 2022)

En resumen, la tendencia más reciente en la investigación sobre el control de emisiones en centrales termoeléctricas es el uso de modelos dinámicos y sistemas inteligentes que permiten una gestión más eficiente y precisa de los factores de combustión, contribuyendo así a la reducción de nitrógeno reactivo y otros contaminantes.

1.5. Justificación de la investigación

La creciente acumulación de gases como los óxidos de nitrógeno NOx y el ozono O₃, este último un gas de efecto invernadero (GEI) presente en las áreas urbanas y que inciden directamente en el cambio climático, viene generando preocupaciones sobre la sostenibilidad ambiental y la salud pública. Al respecto, se muestra la relevancia del presente estudio en los aspectos siguientes:

1.5.1. Teórica

Se contribuye con un modelo dinámico que pueda ser implementado para la gestión ambiental de las emisiones de NOx y O₃ que inciden en la sostenibilidad de las comunidades urbanas, para evitar los efectos directos en la salud humana e impactos ambientales.

La investigación se fundamenta en el análisis de los factores de combustión de gas natural, aplicando los cálculos de ingeniería siguientes: Estequiometría de la combustión, Balance de materia y energía del proceso térmico desarrollado para las turbinas a gas, la cinética química de la formación del óxido nítrico mediante el mecanismo de Zeldovich para la verificación de la aplicación de la tecnología Dry Low NOx (DLN) de baja emisión de NOx y la predicción mediante el modelo de simulación dinámica empleando el programa informático Structural Thinking Experimental Learning Laboratory with Animation (STELLA), a fin de determinar la generación de nitrógeno reactivo o huella de nitrógeno en una turbina a gas de ciclo combinado durante los próximos años.

1.5.2. Práctica

La regulación de los parámetros de combustión del gas natural es clave para optimizar la eficiencia energética del proceso, así como verificar las condiciones del diseño de los quemadores de las turbinas de gas, reduciendo las emisiones de los contaminantes primarios NOx y CO debido a las actividades de generación de energía eléctrica que consumen gas natural en el Nodo Energético Chilca, considerando que a diciembre de 2024 la potencia instalada fue de 52,99 %.

1.5.3. Metodológica

Este estudio aporta con un enfoque innovador para el tratamiento y procesamiento de la información de mediciones de emisiones gaseosas.

El método permite determinar las relaciones causales entre los factores de combustión en turbinas a gas natural cuyo control influye directamente para la formación de emisiones de

NOx, desarrollando el modelo dinámico como una herramienta necesaria para la prospectiva de las actividades de las empresas privadas y la supervisión específica de las entidades públicas, garantizando las inversiones en nuevos proyectos de centrales termoeléctricas en el distrito de Chilca.

Asimismo, la importancia de la investigación consiste en el aporte del método científico para la cuantificación de las emisiones gaseosas de NOx aplicable a centrales termoeléctricas con turbinas de gas con o sin control, proyectándolas a largo plazo, mediante la aplicación del modelamiento y considerando el estado del arte de la tecnología de combustión del gas natural.

1.5.4. Social

Actualmente no se tiene la metodología para establecer la proyección de los aspectos ambientales que originan contaminación atmosférica, tales como el efecto acumulativo de las emisiones, las externalidades atmosféricas, la innovación tecnológica para la mitigación de los óxidos de nitrógeno generados por la combustión, en relación a las centrales termoeléctricas con turbinas a gas natural de Camisea desde el año 2007, ni los estudios epidemiológicos relacionados a la salud de la población en riesgo ubicada en el entorno.

En tal sentido, el beneficio de la investigación corresponde a la salud de la población que reside en el área de influencia directa de las centrales termoeléctricas del Nodo Energético Chilca, la cual requiere aporte de información, así como al personal técnico de las autoridades competentes que pueda tomar decisiones y que deberán implementar las acciones preventivas para reducir los efectos de los contaminantes a nivel del suelo, que podrían originar la elevación de los casos de mortalidad y morbilidad de personas, originados por las concentraciones elevadas de contaminantes en el aire, según lo comprueban los estudios epidemiológicos provenientes de países industrializados.

1.6. Limitaciones de la investigación

Se presentan algunas limitaciones debido a que en los instrumentos de gestión ambiental (estudios, informes o planes) de la empresa seleccionada no se incluye (o se hace de forma incompleta), la siguiente información técnica:

- 1.6.1. Datos del monitoreo puntual de las emisiones gaseosas de NOx en los informes de monitoreo ambiental, debido a que no se efectúan por no ser exigible a la empresa debido a la normativa ambiental vigente, asimismo,
- 1.6.2. Información técnica del monitoreo continuo de emisiones gaseosas.
- 1.6.3. Información técnica específica respecto al: Diseño, características técnicas, tiempo de vida útil, mantenimiento, cambio por antigüedad y estado de la turbina a gas, así como de la cámara de combustión.
- 1.6.4. Información técnica referida a los parámetros que inciden en la eficiencia de la combustión del gas natural.
- 1.6.5. Información específica de la elaboración del balance de materia y energía aplicado a la turbina a gas, incluyendo registros de potencia, composición y consumo del combustible.

Asimismo, se presenta la dificultad de la ausencia de la norma técnica ambiental que permita verificar los parámetros de combustión en relación con la generación de emisiones gaseosas de NOx en turbinas a gas.

1.7. Objetivos

Los objetivos son los siguientes:

1.7.1. *Objetivo general*

Desarrollar un modelo dinámico mediante la aplicación de métodos de cálculo de ingeniería para predecir las variaciones de los factores de combustión del gas natural que

influyen en la generación de emisiones gaseosas de óxidos de nitrógeno (NOx) por una central termoeléctrica en el Nodo Energético Chilca.

1.7.2. *Objetivos específicos*

- a.** Determinar la influencia de la variación de dos principales factores de combustión de gas natural: Porcentaje de exceso de aire (%) y el nivel de temperatura del gas de chimenea (°C), así como de los parámetros del proceso en relación con la generación de emisiones gaseosas de óxidos de nitrógeno (NOx) por una turbina a gas de ciclo combinado.
- b.** Verificar la aplicación de la tecnología Dry Low NOx (DLN) de baja emisión de NOx respecto a que la temperatura de combustión del gas natural o el porcentaje de exceso de aire influyen sobre la generación de emisiones gaseosas de óxidos de nitrógeno (NOx) en una turbina a gas de ciclo combinado.
- c.** Predecir la influencia de dos principales factores de combustión de gas natural con relación a la generación de nitrógeno reactivo o huella de nitrógeno en una turbina a gas de ciclo combinado, mediante un modelo dinámico.

1.8. *Hipótesis*

Las hipótesis son las siguientes:

H_0 = Hipótesis nula, H_1 = Hipótesis de trabajo.

1.8.1. *Hipótesis general*

H_0 : El desarrollo de un modelo dinámico aplicando métodos de cálculo de ingeniería, no predice las variaciones de los factores de combustión de gas natural que influyen en la generación de emisiones gaseosas de NOx por una central termoeléctrica en el Nodo Energético Chilca.

H_1 : El desarrollo de un modelo dinámico aplicando métodos de cálculo de ingeniería, predice las variaciones de los factores de combustión de gas natural que influyen en la

generación de emisiones gaseosas de NOx por una central termoeléctrica en el Nodo Energético Chilca.

1.8.2. *Hipótesis específicas*

Hipótesis específica 1

H_0 : La aplicación de los métodos de cálculos de ingeniería, no determinan la influencia de la variación de dos factores de combustión de gas natural: Porcentaje de exceso de aire (%) y el nivel de temperatura del gas de chimenea (°C) sobre la generación de óxidos de nitrógeno (NOx) por una turbina a gas en ciclo combinado.

H_1 : La aplicación de los métodos de cálculos de ingeniería, determinan la influencia de la variación de dos factores de combustión de gas natural: Porcentaje de exceso de aire (%) y el nivel de temperatura del gas de chimenea (°C) sobre la generación de óxidos de nitrógeno (NOx) por una turbina a gas en ciclo combinado.

Hipótesis específica 2

H_0 : La aplicación del método de cálculo de la cinética según el mecanismo de Zeldovich, no verifica que la aplicación de la tecnología Dry Low NOx (DLN) de baja emisión de NOx respecto a que la temperatura de combustión del gas natural o el porcentaje de exceso de aire influyen sobre la generación de emisiones gaseosas de óxidos de nitrógeno (NOx) en una turbina a gas de ciclo combinado.

H_1 : La aplicación del método de cálculo de la cinética según el mecanismo de Zeldovich, verifica que la aplicación de la tecnología Dry Low NOx (DLN) de baja emisión de NOx respecto a la temperatura de combustión del gas natural o el porcentaje de exceso de aire influyen sobre la generación de emisiones gaseosas de óxidos de nitrógeno (NOx) en una turbina a gas de ciclo combinado.

Hipótesis específica 3

H_0 : La utilización de un modelo dinámico no predice la influencia de dos principales factores de combustión de gas natural sobre la generación de nitrógeno reactivo o huella de nitrógeno en una turbina a gas de ciclo combinado.

H_1 : La utilización de un modelo dinámico predice la influencia de dos principales factores de combustión de gas natural sobre la generación de nitrógeno reactivo o huella de nitrógeno en una turbina a gas de ciclo combinado.

II. MARCO TEÓRICO

La presente investigación contiene las principales definiciones relacionadas a las variables seleccionadas, en ese sentido, se muestran las bases teóricas de la combustión.

2.1. Bases teóricas

2.1.1. *Teoría de la combustión*

En lo referente al proceso de combustión vinculado a sus efectos ambientales:

La combustión es un proceso de oxidación reactiva que libera energía ligada a compuestos químicos utilizados como combustibles, energía necesaria para la generación de energía, el transporte, la calefacción y fines industriales. Debido a las emisiones de gases de efecto invernadero y contaminantes locales asociadas a los combustibles fósiles, la ciencia y las aplicaciones de la combustión se enfrentan al reto de abandonar las vías convencionales y adaptarse a la demanda de una futura neutralidad de carbono. (Kohse-Hoinghaus, 2023)

La combustión es un fenómeno cuyo mecanismo se fundamenta básicamente en la reacción química de dos sustancias: El combustible y el comburente, emitiendo energía térmica y luminosa. En todos los casos, el combustible contiene elementos y moléculas que pueden oxidarse con la presencia de oxígeno del aire (agente oxidante), siempre a la temperatura de ignición requerida para llevar a cabo la combustión.

Con relación a los componentes del proceso García (2001) definió:

La combustión para iniciar su proceso requiere la presencia de: El combustible, el comburente y la energía de activación o chispa. (triángulo de fuego).

La energía de activación es el elemento desencadenante de la reacción de combustión; en los quemadores habitualmente suele obtenerse mediante una chispa eléctrica entre dos electrodos, en las calderas individuales de gas se obtiene por llama piloto, tren de chispas, etc.

2.1.2. *Química de los óxidos del nitrógeno*

Existe un amplio número de óxidos de nitrógeno, pero solamente tres de ellos son de interés en los procesos de combustión:

- a. Óxido nítrico o monóxido de nitrógeno (NO) (gas inodoro, sin color, sin sabor y tóxico);
- b. Dióxido de nitrógeno (NO₂) (gas marrón rojizo, olor acre, irritante y asfixiante parecido al del cloro y más tóxico que el NO).
- c. Óxido de di-nitrógeno u óxido nitroso, N₂O o gas de la risa (hilarante), cuya presencia es baja y depende de la temperatura en la cámara de combustión. Se utiliza en odontología debido a sus propiedades narcóticas.

El primero y segundo, NO y NO₂ son referidos colectivamente como NOx y contribuyen esencialmente a la lluvia ácida o problemas de smog. Los gases de salida de chimeneas de calderas de plantas de potencia convencionales y de muchas industrias con procesos de calentamiento, contienen algo de 90 % de NO con el resto de NO₂.

El tercer óxido, N₂O, se encuentra en los gases de salida de chimeneas, entre otros, las cámaras de lecho fluidizado y los gases de escape de motores después del sistema de conversión catalítica (Hesselmann & Rivas, 2001).

El N₂O no es un óxido ácido y normalmente no se incluye en la abreviación NOx. Sin embargo, N₂O es un GEI que contribuye a la destrucción del ozono estratosférico. Tiene un Potencial de Calentamiento Global, GWP (de sus siglas en inglés) de 296.

Existen básicamente tres mecanismos reconocidos sobre la formación de NOx: 1) Térmica, 2) del combustible e 3) instantáneo (Hesselmann & Rivas, 2001).

Con respecto al mecanismo 1), se tiene:

El gas natural no tiene nitrógeno, solo el oxígeno y el nitrógeno atmosféricos a temperaturas elevadas son los principales elementos del mecanismo dominante para la

formación térmica de los compuestos de nitrógeno, NO 90 % y NO_2 10 %, así como más óxidos que por su baja concentración no se incluyen en la fórmula general del NO_x térmico. El óxido nítrico, NO se forma a altas temperaturas de combustión ocurriendo la siguiente reacción según la ecuación (1):



En condiciones modernas basadas en mediciones satelitales, la vida atmosférica del GEI óxido nitroso (N_2O) se estima en ≈ 117 años (Prather, 2023). En contraste, el óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO_2), componentes del NO_x , presentan vidas atmosféricas mucho más cortas, con valores promedio que oscilan entre 2 y 6 horas en entornos urbanos (Pommier, 2022); (Zhang, Qianqian et al., 2025). Estas diferencias reflejan la complejidad en el comportamiento químico de los contaminantes atmosféricos y su interacción con factores ambientales como la radiación solar, la humedad y la vegetación.

En relación con el equilibrio de la reacción química se tiene que:

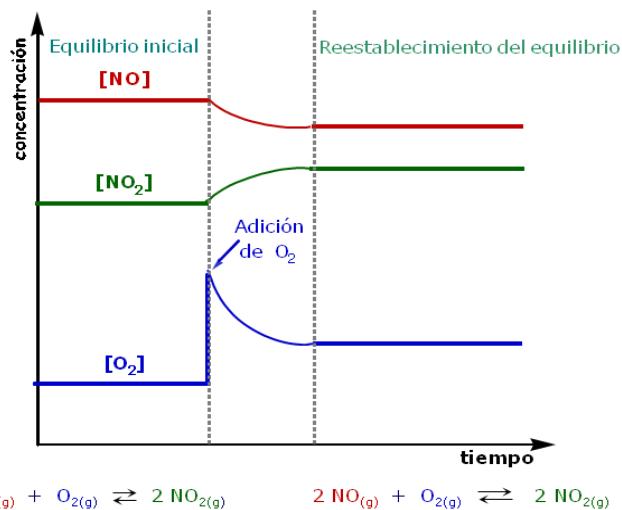
El equilibrio químico representa un balance entre las reacciones directa e inversa, el cual puede alterarse por la variación de la temperatura, presión, volumen y la concentración. Según el Principio de Le Chatelier cuando un sistema en equilibrio se somete a un cambio de condiciones, esté se desplazará hacia una nueva posición, a fin de contrarrestar el efecto que lo perturbó y recuperar el estado de equilibrio. En la siguiente reacción de equilibrio, en la ecuación (2):



Si se agrega oxígeno, el sistema reacciona consumiendo parte del exceso, hasta restablecer el equilibrio, tal como se muestra en la Figura 2. (Pontificia Universidad Católica del Perú, 2011).

Figura 2

Variación de la concentración y el equilibrio de la reacción

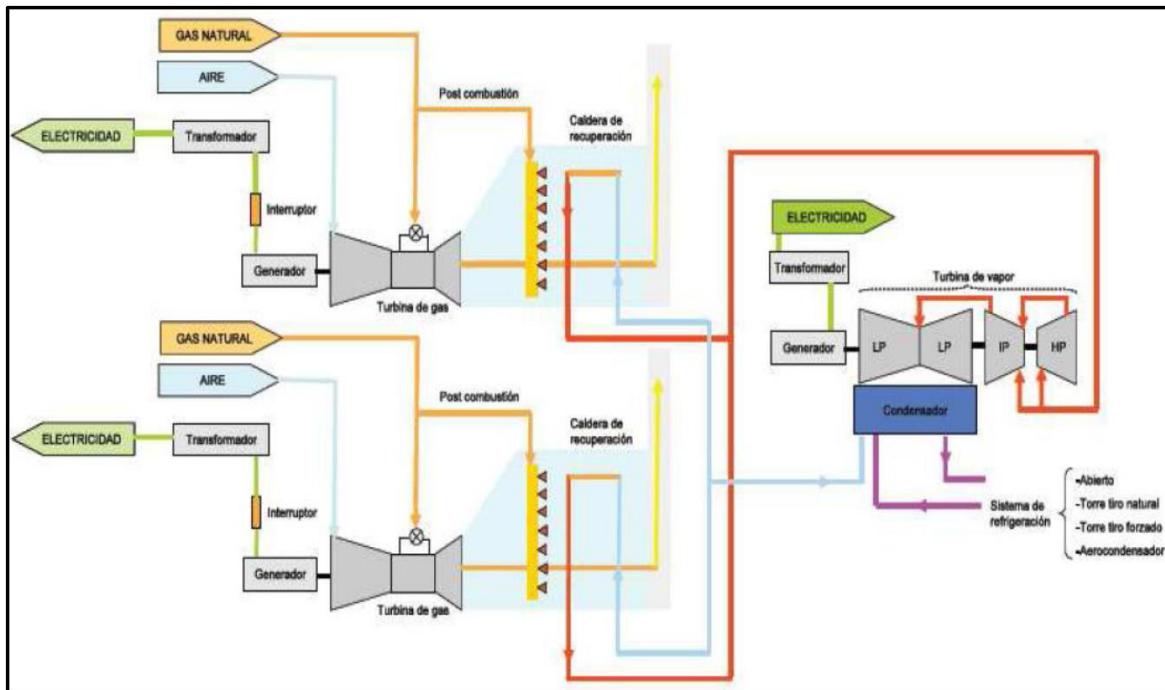


Nota. Presenta la reacción de equilibrio de la formación de NO₂. Adaptada de *Química general* [Curso], por Cedrón J.; Landa V.; Robles J., Pontificia Universidad Católica del Perú, 2011, (<http://corinto.pucp.edu.pe/quimicageneral/contenido/32-principio-de-le-chatelier.html>).

2.1.3. Operación de la central termoeléctrica

Según la información de los instrumentos de gestión ambiental de la empresa, el ciclo combinado tiene una capacidad total final de 842,19 MW, que consiste en tres turbinas a gas con potencia total de 562,1 MW y una turbina de vapor de 280 MW.

La Figura 3 muestra el esquema de operación de una central termoeléctrica con un ciclo combinado. (Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, 2014)

Figura 3*Esquema de la Central Térmica de La Costa*

Nota. Adaptada de *Apunte Central CC* (p.13), por FACET-UNT, 2014, (<https://catedras.facet.unt.edu.ar/centraleselectricas/wp-content/uploads/sites/19/2014/10/Apunte-Central-CC.pdf>).

2.1.4. *Medición de la concentración de emisiones gaseosas*

Las mediciones de concentración de las emisiones gaseosas fueron realizadas con un instrumento analizador de gases de combustión portátil de marca TESTO (modelo 350 S), que cuenta con la aprobación de la USEPA para la determinación de la concentración de los gases de combustión mediante el Conditional Test Method (CTM-030). Este equipo utiliza celdas electroquímicas para sus análisis y la lectura de las concentraciones es realizada en forma directa.

La Tabla 2 siguiente muestra los rangos de medición del analizador TESTO 350 S.

Tabla 2

Analizador portátil de emisiones atmosféricas

Parámetro	Unidad	Intervalo de medición	Exactitud	Resolución
Dióxido de azufre (SO ₂)	ppm	0 – 5000	± 5%	± 1
Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	ppm	0 – 500	± 5%	± 1
Monóxido de carbono (CO)	ppm	0 – 50000	± 5%	± 1
Monóxido de nitrógeno (NO)	ppm	0 – 3000	± 5%	± 1
Oxígeno (% O ₂)	%	0 – 25	± 0,8%	± 0,1

Nota. Según las impresiones del instrumento midió el índice de exceso de aire, temperatura ambiente (°C), temperatura del gas de salida (°C) y el % de CO₂ (mediante cálculo). Adaptada por el autor.

La mayoría de los equipos operan con el factor de carga alta obteniendo por su diseño la mayor potencia y óptimas eficiencias de combustión completa, por la alta temperatura no se generan CO ni VOC (Compuestos Orgánicos Volátiles), por otro lado, se incrementa la cantidad de NOx.

Asimismo, las emisiones de CO se presentan aún a alta temperatura, si en la cámara de combustión resulta insuficiente el tiempo de residencia. Cuando disminuye el factor de carga de la turbina, la temperatura baja y se origina la presencia elevada de emisiones de CO y VOC, debido a que se reduce la eficiencia de la combustión, siendo incompleta.

En relación a este aspecto Bacharach (2019) señala: La eficiencia de combustión es el cálculo/medición, en porcentaje, que indica la capacidad del quemador para combustionar el combustible específico, si es completa (100 %) extraería toda la energía disponible en el combustible, sin embargo, no es posible lograr ello en la práctica, variando de 0 % a más de 95 % (hasta 99 % para las turbinas a gas natural según la marca y la potencia).

Los cálculos de eficiencia de combustión suponen una combustión completa del combustible y se basan en tres factores:

- a. La química del combustible.
- b. La temperatura neta de los gases de chimenea
- c. El porcentaje de oxígeno o CO₂ por volumen después de la combustión.

Este término no se debe confundir con la eficiencia térmica o energética (para turbinas a gas lo correcto es indicar la eficiencia eléctrica, para ciclo simple varía entre 24 – 36 %, según el documento emitido por U.S. Environmental Protection Agency, Combined Heat and Power Partnership, Septiembre 2017) de un equipo como la turbina a gas, que considera el valor calorífico del combustible debido a las pérdidas de la chimenea y otras. (Bacharach, 2019)

2.1.5. *Medidas y control de la formación de NOx*

Las medidas para mitigar la contaminación por los gases óxidos de nitrógeno (NOx), se pueden clasificar en medidas primarias que controlan la formación de NOx en la caldera y las secundarias que comprende equipos de tratamiento de las emisiones gaseosas.

Las medidas primarias necesitan tomar en cuenta los diferentes mecanismos de formación, además de los principales parámetros de NOx siguientes:

- a. Reduciendo la temperatura de combustión;
- b. Reduciendo el tiempo de residencia de los gases, especialmente el nitrógeno en la zona de combustión, donde existen altas temperaturas;
- c. Disminuyendo la relación oxígeno-combustible. Al reducir el contenido de O₂ en la zona de combustión se disminuye considerablemente la generación de NOx;
- d. Conociendo el contenido de nitrógeno del combustible (excepto el gas natural).

La formación de los NOx térmico disminuye aplicando las medidas siguientes: La disminución de la temperatura máxima de llama, del tiempo de residencia y de la concentración de oxígeno atómico en zonas de alta temperatura, sin embargo, es imposible eliminar la generación de óxidos de nitrógeno (NOx).

Las medidas secundarias para el tratamiento de los gases de combustión que se fundamentan en reacciones químicas, no se incluyen en el presente estudio. (Prieto, 1994)

El control de los NOx emitidos por turbinas a gas es aplicado al proceso de la combustión y la post-combustión mediante las tecnologías siguientes:

e. Control de la combustión: Se realiza según el tipo de ciclo y combustor.

Ciclo con inyección de agua o de vapor.

Ciclo con humidificación en cascada.

Combustor seco de bajo NOx.

Combustor catalítico.

f. Control de la post-combustión: Se realiza en ciclo combinado.

Ciclo con reducción catalítica selectiva.

El presente ítem se orienta a explicar el diseño y el funcionamiento de los combustores donde ocurre la quema del combustible.

2.1.6. *Combustores secos bajos en NOx (Dry Low NOx Combustor, DLNC)*

Tibaquirá & Burbano, (2003) menciona que la reducción de los NOx sin inyección de agua tiene las alternativas siguientes: Combustión pobre, reducción de tiempo de combustión, combustión premezclada pobre y combustión de dos etapas, mostradas a continuación:

a. **Combustión pobre.** Según la definición Φ es la relación de equivalencia y se expresa: Aire estequiométrico para el combustible/Aire real, es la inversa de la relación lambda (λ). Si $\Phi = 1$, determina el equilibrio y que existe mezcla estequiométrica del combustible y aire. Si $\Phi < 1$ determina exceso de aire y que existe mezcla pobre con menor cantidad de combustible. En condiciones de mezcla pobre, el exceso de aire disminuye la temperatura debido al enfriamiento de la llama y por tanto decrece la formación de NOx. (Tibaquirá & Burbano, 2003)

b. Disminución del tiempo de residencia. El exceso de aire origina la dilución de la mezcla aire-combustible que entra al combustor, además, la temperatura alta de los gases de combustión disminuye antes de ingresar a los alabes de la turbina. Al disminuir el tiempo de residencia de la mezcla en el combustor, la dilución de aire se produce a mayor velocidad comparando con los combustores estándar. En consecuencia, la permanencia de los gases de combustión en el combustor por un tiempo más corto reduce su temperatura y por tanto también la formación térmica de los NOx. (Tibaquirá & Burbano, 2003)

c. Combustores de premezclado pobre. Consisten en una zona previa de premezclado pobre del aire y el combustible, dicha mezcla luego ingresa a la zona de combustión. La pobre con exceso de aire disminuye la temperatura de llama, reduciendo significativamente los niveles de NOx. El premezclado pobre reduce en menor proporción las emisiones de NOx cuando se utilizan combustibles con contenido de nitrógeno elevado. (Tibaquirá & Burbano, 2003)

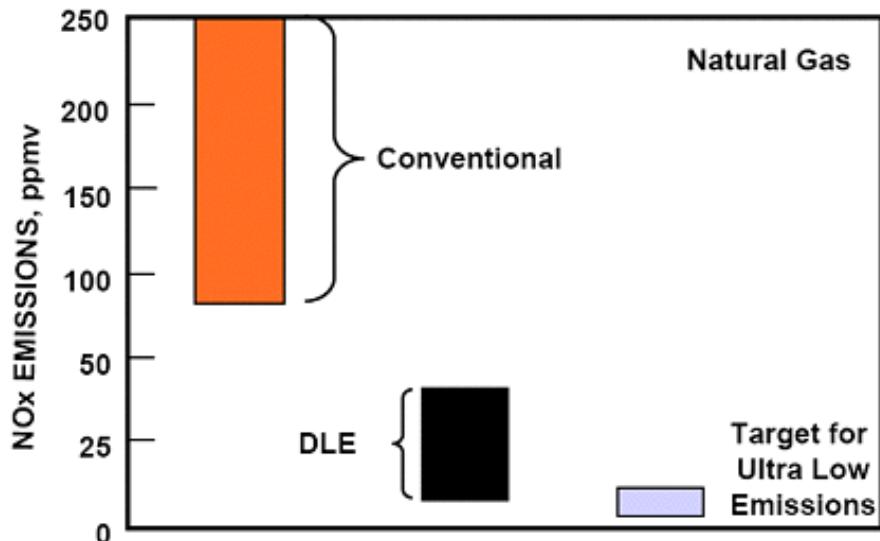
d. Combustor de dos etapas. Consisten en una zona primaria que combusciona la mezcla rica (con defecto de aire) y una zona secundaria para la combustión de la mezcla pobre en la zona secundaria. La zona primaria presenta la combustión incompleta del combustible produciendo concentración elevada de monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H₂), los cuales sustituyen parte del oxígeno del aire que genera los NOx, además, intervienen reduciendo a los NOx formados en la zona primaria, de tal modo que el nitrógeno contenido en el combustible es emitido con baja conversión a NOx. (Tibaquirá & Burbano, 2003)

La Figura 4 presenta los enfoques de sistemas de combustión convencional desde 1970 se aplican para la reducción de emisiones de NOx, desde niveles de 90 a 250 ppmv,

partes por millón por volumen seco a 15 % de oxígeno, a menos de 50 ppmv, usando varias técnicas de inyección de agua y vapor. (Holcomb et al., 2007)

Figura 4

Enfoques de sistemas de combustión convencional



Nota. Adaptada de *Ramgen Power Systems for Military Engine Applications* (p.47), por Holcomb et al., 2007, (<https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA478293>).

El enfoque de emisiones bajas secas, DLE (por sus siglas en inglés Dry Low Emissions) fue establecido a finales de la década de 1980, a fin de eliminar el costo de introducir agua o su vapor, lo cual dio lugar a nuevas reducciones de los NOx en equipos industriales a niveles entre 10 y 25 ppmv. (Ramgen Power Systems, 2008)

En el Perú, las centrales termoeléctricas ubicadas en Chilca vienen aplicando medidas primarias de control, es decir, modificaciones en la combustión, tales como los quemadores de baja producción de NOx, inyección de agua o vapor a la cámara de combustión, etc., sin embargo, la reducción de NOx alcanzada no sobrepasa más del 50 – 60 %. (Fundación CRANA, 2014, p. 4)

2.2. Marco conceptual

El marco conceptual presenta los conceptos relacionados a las variables de la investigación.

2.2.1. Química de la formación de emisiones de NOx

En relación con la química de la formación de emisiones de NOx, se tiene:

La comprensión de la química de la formación de emisiones de NOx permite presentar con claridad el continuo desarrollo de técnicas y equipos de control de los óxidos de nitrógeno (NOx).

2.2.1.1. Formación de NOx térmico. El NOx térmico es producido por la reacción del oxígeno atmosférico y el nitrógeno a temperaturas elevadas, se considera que contribuye alrededor del 20 % de la emisión total de NOx en la combustión del carbón pulverizado, pero es el mecanismo dominante cuando el combustible contiene poco o no tiene nitrógeno inherente (es decir combustión de gas). Cuando se emplean altas temperaturas de precalentamiento del aire, por ejemplo, en hornos de cemento, el NOx térmico también puede contribuir considerablemente a la emisión global de NOx.

Las reacciones son descritas por el mecanismo de Zeldovich según las ecuaciones (3), (4) y (5) de la siguiente manera:



La primera etapa es la velocidad límite y debido a su alta energía de activación (314 kJ / mol) se requieren altas temperaturas para el proceso. La reacción (3) solo es significativa bajo condiciones reductoras (el oxígeno como agente oxidante gana electrones del nitrógeno que es el agente reductor).

Por análisis cinético es posible derivar una expresión global para la tasa de formación térmica de NOx según la ecuación (6). (Bowman, 1975)

$$\frac{d[NOx]}{dt} = (6,0 \cdot 10^{16}) / T^{0.5} \cdot \exp\{(-69\,090) / T\} \cdot [N_2] \cdot [O_2]^{0.5} \quad (6)$$

Dónde:

T = Temperatura absoluta (K)

$[N_2], [O_2]$ = Concentración de nitrógeno, oxígeno (mol / cm³)

$d[NOx] / dt$ = Índice de formación de NOx (mol / cm³ / s)

En la práctica, el control / minimización del NOx térmico se logra principalmente tomando medidas, las cuales reducen la temperatura, sin embargo, la dilución del oxígeno disponible también es beneficiosa.

2.2.1.2. Formación de NOx del combustible. El NOx del combustible surge de la reacción del nitrógeno orgánicamente ligado en el combustible con el oxígeno. El proceso es complejo (los esquemas de reacción típicamente consideran del orden de 50 especies intermedias y varios cientos de reacciones reversibles separadas y todavía hay considerable incertidumbre en cuanto al valor real de las diversas constantes de velocidad, etc.), pero puede ser simplificado expresándolo como sigue:

1. El nitrógeno volátil del combustible se transforma principalmente como HCN (y NH₃) durante los procesos.
2. El HCN reacciona con diversas especies de radicales libres (O, OH) para formar intermedios, tales como CN, NCO, HNCO y finalmente reacciona con H para producir NH, NH₂.

El NOx del combustible se puede minimizar de la manera más eficaz quemando el combustible por combustión progresiva, lo que implica un retraso en la mezcla entre el gas combustible y el aire.

2.2.1.3. Formación del NOx instantáneo. La reacción de radicales hidrocarbonados con el nitrógeno atmosférico genera HCN y también NOx instantáneo a través de una serie compleja de reacciones en fase gaseosa. La contribución del NOx instantáneo a la emisión total en la combustión de carbón pulverizado es pequeña (aproximadamente

5%). Las medidas que son efectivas para minimizar los NOx térmicos y de combustible, también son efectivas para minimizar el NOx inmediato. (Hesselmann & Rivas, 2001)

2.2.2. Balance de materia y energía en la turbina a gas

El funcionamiento de la turbina a gas depende de su factor de carga, disponibilidad, fiabilidad y factor de utilización, asimismo, de la eficiencia neta del equipo.

El balance de materia utiliza mediciones y datos de la turbina a gas y permite la comparación de los resultados obtenidos de los informes de monitoreo ambiental de emisiones gaseosas de una empresa de generación de energía eléctrica.

El balance de energía utiliza como dato principal la eficiencia neta de la turbina proporcionada por el fabricante, lo cual permite establecer la distribución energética de cada salida.

El balance de materia y energía permite analizar las posibles mejoras energéticas en la turbina a gas, con el objetivo de mantener o superar su eficiencia neta y controlar o reducir los contaminantes gaseosos.

En lo referente a la temperatura adiabática de llama del proceso de combustión:

2.2.2.1. Temperatura adiabática de llama. La temperatura adiabática de llama de (flama) presenta las condiciones siguientes: 1) La reacción química adiabática, es decir, sin transmisión de calor entre la cámara de combustión y el ambiente y 2) No existen otras formas de energía como: Eléctrica, ionización, formación de radicales libres, trabajo, etc. Si considera que los gases salen a la temperatura adiabática de llama, (reacción adiabática), la medición de la temperatura de los gases será igual a la temperatura adiabática. (Sánchez, 2014)

La temperatura adiabática de llama considera la combustión completa para los cálculos, no obstante, en un proceso real se da la combustión incompleta debido a desequilibrios inherentes. Así, la temperatura de flama en condición adiabática para la oxidación de

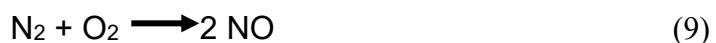
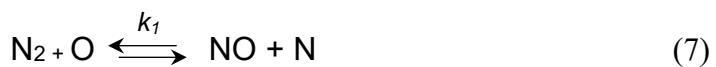
CH_4 que reacciona con aire teórico según los cálculos es de 2010 °C; pero teniendo la combustión incompleta se obtiene el valor de 1 920 °C, sin embargo, la temperatura real según medición es de 1 885°C.

Respecto a este punto se señala: La temperatura de combustión (o de llama) tiene el valor máximo calculado a condiciones adiabáticas de la reacción, en ese sentido, la temperatura medida real es menor. Así, la temperatura adiabática de llama calculada permite seleccionar el material del cámara de combustión del equipo térmico, considerando que el rango varía de una temperatura máxima de 2 500 K hasta 3 000 K, esta última se obtiene al utilizar oxígeno puro u otros oxidantes, a mayor valor de temperatura surgen dificultades de seguridad y control. (Himmelblau, 1997, pp. 457-458)

2.2.3. *Cinética química de formación de NOx*

En lo referente a las reacciones de formación de NOx:

Las reacciones químicas que se muestran en las ecuaciones (7), (8) y (9) corresponden al mecanismo térmico de Y.B. Zeldovich, científico ruso que en 1947 investigó la generación de nitrógeno activo a partir de nitrógeno molecular en la fase gaseosa.



La velocidad de formación de óxido nítrico, NO desde el nitrógeno atmosférico, se desarrolla de forma matemática y se expresa mediante la ecuación (10) siguiente:

$$d[\text{NO}]/dt = k_G [\text{O}_2]^{(0.5)} * [\text{N}_2] \quad (10)$$

Donde: $k_G = 2 * k_1 ((k_p * P^\circ) / (R * T))^{(0.5)}$ que es acorde con la constante experimental.

k_G = Constante global del mecanismo.

k_p = Constante de equilibrio de presión.

P° = Presión atmosférica.

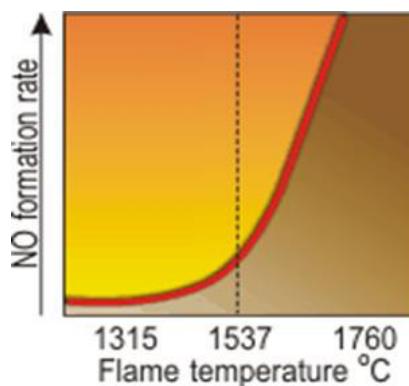
T = Temperatura de calentamiento del aire.
 R = Constante universal de los gases ideales.

La fórmula anterior permite determinar la concentración de NO en relación con la concentración del aire y en el Anexo 2. Cinética química de formación de NOx – Mecanismo de Zeldovich se muestra su desarrollo.

La tasa de formación de los compuestos de nitrógeno (NOx) se desarrolla según la variación de temperatura. En la Figura 5, debajo de 1 425°C (2 600°F) la formación de NOx no es significativa, pero sobre esta temperatura ocurre un rápido incremento, como lo mostrado en la figura. (AZoM, 2002)

Figura 5

Influencia de la temperatura de llama respecto a la formación de NOx



Nota. Adaptada de *Using Oxy-Fuel in Steel Reheat Furnaces*, por AZoM (AZo Materials), 2002, (<https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1509>).

El desarrollo de quemadores de bajo NO_x ha avanzado notablemente en los últimos años, enfocándose en reducir la temperatura de la llama para disminuir la formación de óxidos de nitrógeno. Tecnologías como la recirculación interna de gases y el diseño aerodinámico optimizado han permitido alcanzar emisiones inferiores a 20 mg/Nm³, como en el caso del quemador LN30 de Oilon según su página oficial (Oilon, 2025). Asimismo, los quemadores ACT-Gideon Ultra Low NO_x y Zeeco FREE JET Gen 3 han logrado emisiones tan bajas como 6 ppm y 12 ppm respectivamente, sin necesidad de

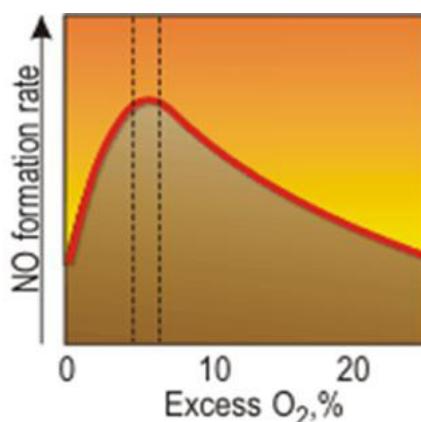
catalizadores o químicos adicionales (ACT-Gideon, 2024); (Zeeco, 2024). Estos avances representan un progreso significativo hacia soluciones energéticas más eficientes y sostenibles desde el punto de vista ambiental.

La disminución de la temperatura de la flama con un quemador aire - combustible se logra mediante la recirculación de los gases de escape o mediante el disparo con exceso de aire o una combinación de ambos. Al inyectar una cantidad pequeña de aire en exceso en la región de 5 – 7 %, la formación de NOx aumenta debido al nitrógeno y oxígeno adicionales disponibles como se observa en la Figura 6. Sin embargo, a niveles más altos, el exceso de aire es suficiente para enfriar la llama a tal grado que comienza a suprimir la formación de NOx. (AZoM, 2002)

Con la combustión oxi-combustible, un exceso de nivel de oxígeno aumentaría drásticamente la tasa de formación de NOx sin que se produzca un efecto de enfriamiento de la llama, a menos que se utilicen niveles impracticablemente altos. (Brown et al., 2002)

Figura 6

Influencia del exceso de aire respecto a la formación de NOx



Nota. El incremento del exceso de aire enfriá la llama y reduce la formación de NOx. Adaptada de Using Oxy-Fuel in Steel Reheat Furnaces, por AZoM (AZo Materials), 2002, (<https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1509>).

Utilizando la gráfica de la ecuación cinética del mecanismo de Zeldovich elaborada con los datos de mediciones, se calculará la *temperatura adiabática de llama* en función de la concentración medida de los óxidos de nitrógeno NOx. Luego, se comparará con la temperatura del gas de escape obtenida del balance de energía de la turbina a gas, a condiciones adiabáticas, es decir, sin pérdidas de radiación y convección al ambiente (máxima potencia y energía generada).

2.2.4. Formación del ozono troposférico

Siendo un constituyente esencial de la estratosfera, el ozono es un contaminante secundario presente en la troposfera y principal constituyente el smog fotoquímico o neblumo, afecta la salud humana, de animales y vegetales, además a materiales como el caucho o hule. La ruptura de moléculas de O₂ para generar átomos de O que forman el ozono necesita la radiación ultravioleta energética, la cual no penetra a la troposfera, en ese sentido, las reacciones de diferentes especies en cadena generan el ozono troposférico. (Manahan, 2017, p. 383)

Con relación a los contaminantes secundarios: “En la tropósfera a partir de dos contaminantes primarios: Los NOx y los Compuestos Orgánicos Volátiles, COV reaccionan mediante un proceso fotocatalítico generando el ozono...”. (Doadrio, 2013, pp. 43-44)

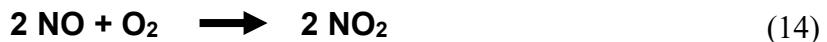
Excluyendo la catálisis fotoquímica, los NOx reaccionan generando o destruyendo el ozono troposférico, según las ecuaciones (11) y (12) *generación* y la ecuación (13) *destrucción*:



Según la ecuación (11) se generan óxido nítrico (NO) y oxígeno atómico, los cuales tienen reactividad elevada. Asimismo, las ecuaciones (12 y 13) muestran el equilibrio

dinámico de las especies O_3 , O_2 , O y NOx, de formación y destrucción de ozono, por lo que en el centro de las ciudades donde existe contaminación alta, las concentraciones medidas de ozono sean bajas, debido a que el parque vehicular de las ciudades grandes genera concentraciones elevadas de NO, destruyendo el ozono, lo cual se observa en la ecuación (13).

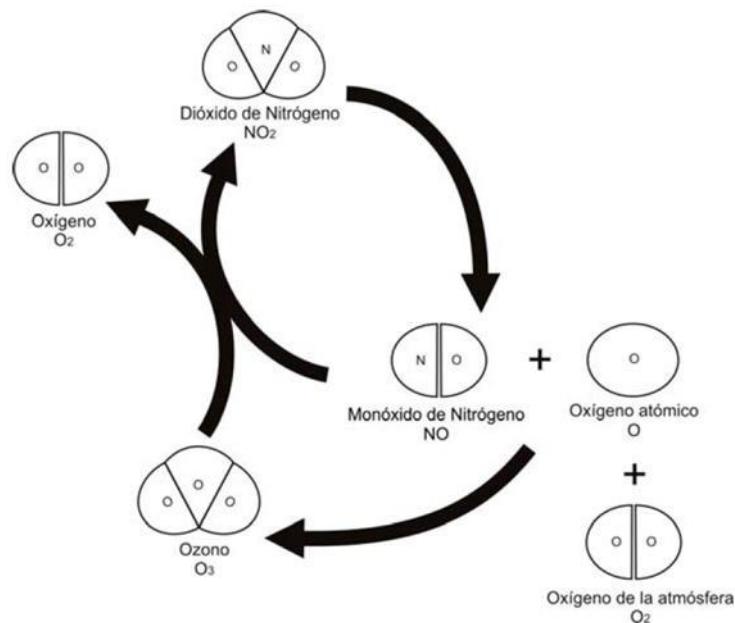
En efecto, los NOx efectúan acciones opuestas, así si el NO_2 es precursor del ozono, el NO lo destruye, de allí la importancia del equilibrio de la relación NO/ NO_2 , lo cual presenta dificultad, debido a que los NOx provienen de actividades antrópicas y biogénicas difíciles de controlar. Según la ecuación [14], el NO reacciona rápido con el oxígeno atmosférico obteniendo NO_2 .



Por lo anterior, el NO interviene como amortiguador debido a que no disminuye mucho la concentración del ozono troposférico. Los NO_2 también son generados por los COV, disminuyendo el NO de la atmósfera, como consecuencia el equilibrio NO/ NO_2 tiene desplazamiento hacia la formación de NO_2 lo cual implica la generación de ozono.

El NO es un regulador del incremento de la concentración atmosférica del ozono, sobre todo en la ciudad, sin embargo, siempre existe la mayor generación del ozono que su destrucción. (Doadrio, 2013, pp. 43-44)

El ciclo del dióxido de nitrógeno (NO_2) – ozono (O_3) se muestra en la Figura 7. El NO_2 al recibir la luz del sol reacciona formando monóxido de nitrógeno y oxígeno atómico. El oxígeno atmosférico se combina con el oxígeno atómico formando ozono. Completando el ciclo, el ozono y el monóxido de nitrógeno reaccionan formando dióxido de nitrógeno y oxígeno molecular.

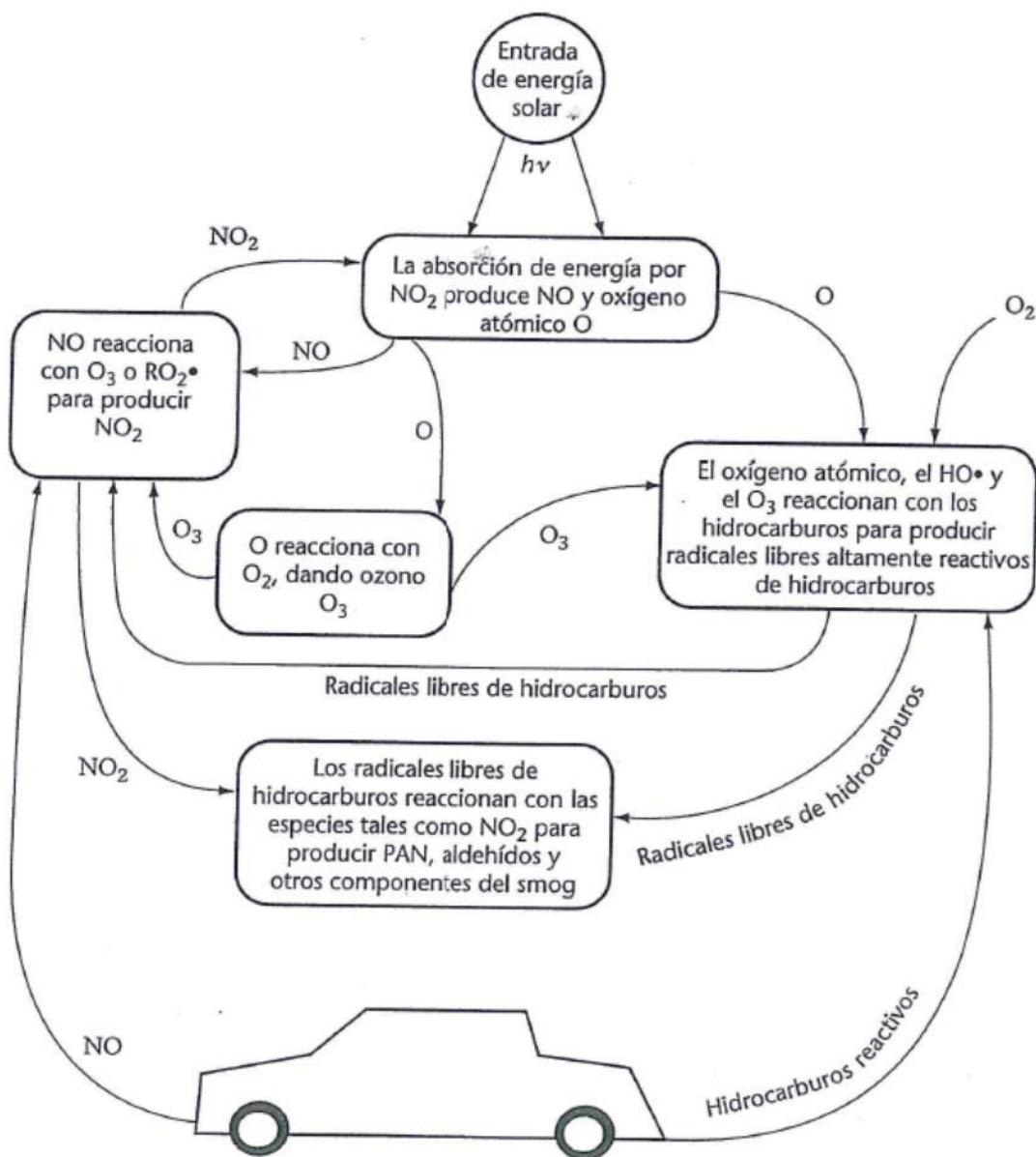
Figura 7*Ciclo del dióxido de nitrógeno – ozono*

Nota. Las ecuaciones del ciclo mostrado utilizan las constantes de la cinética de cada reacción de generación del smog fotoquímico. Adaptada de Capítulo I – Controles de NO_x, recuperado de (<http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/18046/Capitulo1.pdf>).

Se observa en la Figura 8 el esquema de la reacción global de la formación del neblumo o smog que se basa en las reacciones iniciadas fotoquímicamente, que ocurren en una atmósfera que contiene óxidos de nitrógeno, hidrocarburos reactivos y oxígeno. (Manahan, 2017, p. 428)

Figura 8

Esquema generalizado de la formación de neblumo o smog fotoquímico



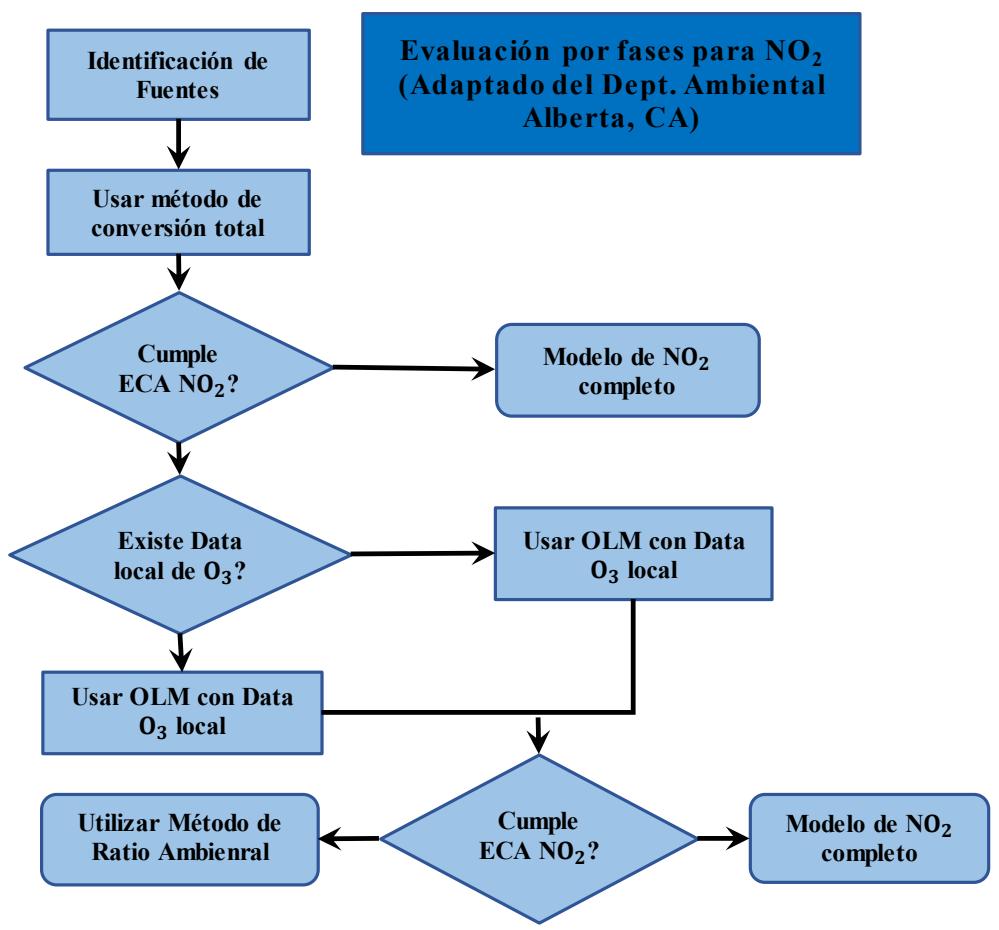
Nota. Adaptada de *Introducción a la química ambiental* (p. 428), por Manahan, Stanley E., 2007, Editorial Reverte.

El Ministerio del Ambiente de Nueva Zelanda, el Departamento de Protección Ambiental de Hong Kong, el Departamento Ambiental de Alberta y el Departamento de Calidad Ambiental de Nuevo México, establecen que se debe utilizar una evaluación por fases para determinar el cumplimiento de los estándares para NO_2 , mostrada en la

Figura 9. (Alberta Environment and Parks, 2021)

Figura 9

Evaluación por fases de cumplimiento de ECA NO₂



Nota. Adaptada de *Air Quality Model Guideline*, por Alberta Environment and Parks, Government of Alberta, 2021, (<https://open.alberta.ca/publications/air-quality-model-guideline-2021>).

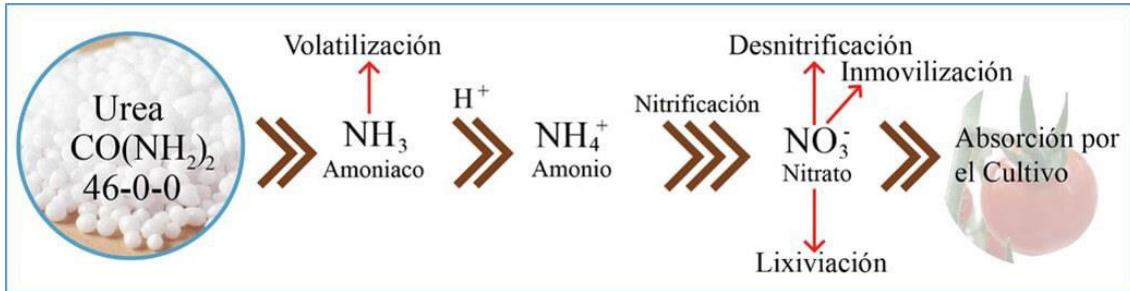
2.2.5. Huella de nitrógeno

La atmósfera se compone de 79 % de N₂, molécula muy estable y fuente de N que no es accesible para los organismos (ENA, 2011). La transformación de la molécula de N₂ a otros compuestos químicos con mayor reactividad, como el nitrógeno reactivo. Los átomos de N unidos por el enlace triple necesitan energía elevada para fraccionar dicho enlace. En el medio natural solo hay dos procesos de transformación: La descarga de energía eléctrica durante las tempestades y el proceso biológico de nitrificación. (Gallego Picó et al., 2012, pp. 33-34)

En lo referente al proceso de nitrificación la Figura 10 visualiza el proceso de nitrificación, según lo mostrado en la imagen de la Guía de fertilizantes nitrogenados para cultivos. (Instituto para la Innovación Tecnológica en la Agricultura, 2012)

Figura 10

Proceso de nitrificación



Nota. Adaptada de *Guia de fertilizantes Nitrogenados para Cultivos* [Imagen], por INTAGRI, 2012, (<https://www.intagri.com/articulos/nutricion-vegetal/guia-de-fertilizantes-nitrogenados-para-cultivos>).

El nitrógeno reactivo proviene de los gases NOx emitidos a la atmósfera, los cuales se generan de la combustión de combustibles derivados del petróleo, utilizados por las actividades antrópicas como son la producción de energía eléctrica y el transporte, asimismo por la industria de fertilizantes agrícolas, los procesos anteriores se realizan en zonas templadas con mayor intensidad que los biológicos, asimismo, dependen del crecimiento demográfico y el desarrollo de las industrias...

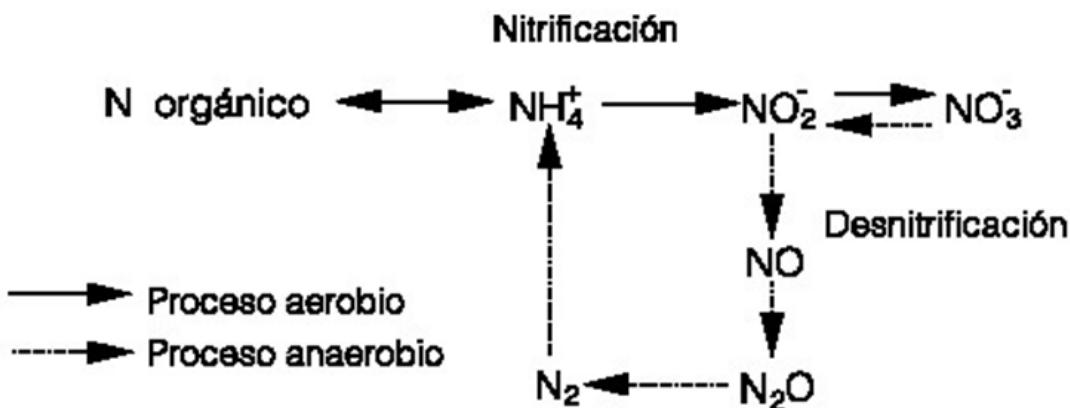
El gas N₂O proviene de la transformación del nitrógeno reactivo, tiene características de estabilidad y su elevada presencia en la atmósfera contribuye al efecto invernadero, reaccionando con el O₃ al llegar a la estratosfera.

El N₂O debido a la desnitrificación directa desde el suelo, agua, o reacciones químicas en el aire produce la regeneración del N₂ atmosférico, lo cual resulta en la etapa final del ciclo. (Gallego Picó et al., 2012, pp. 34-35)

La Figura 11 muestra el ciclo del nitrógeno y la desnitrificación correspondiente (Jarpa et al., 2007).

Figura 11

Ciclo del nitrógeno



Nota. Adaptada de Determinación de la capacidad nitrificante de un sedimento marino proveniente de un centro de cultivo de salmones, por Jarpa, Mayra et al., 2007, *Interciencia*, n.10 (vol.32).

El uso humano de nitrógeno reactivo (Nr, todas las especies de nitrógeno excepto el N_2) en el ambiente tiene beneficios profundos e impacto perjudicial sobre todas las personas. Los usos agrícolas, incluyendo al mismo tiempo la producción y el consumo de alimentos, contribuyen en gran medida al Nr para el ambiente global; la siguiente mayor contribución es la combustión de los combustibles fósiles. Los impactos beneficiosos del uso agrícola de Nr están relacionados con la producción de alimentos utilizando fertilizantes nitrogenados y fijación biológica de nitrógeno mejorada por el hombre. Estos dos procesos proporcionan al Nr para sostener la mitad de la población mundial (Erisman et al., 2008). El impacto perjudicial se debe a que la mayor parte del Nr utilizado en la producción de alimentos y la cantidad total del Nr generado durante la combustión de combustibles fósiles son descargados al ambiente. (Leach, 2017, p. 41)

El nitrógeno (N) es un nutriente clave, indispensable para la subsistencia de la población humana y los demás organismos vivos. Mientras que el gas biatómico (N₂) es abundante en la atmósfera, gran parte de los organismos vivos no pueden usarlo en esta forma que es químicamente no reactiva. En primer lugar, se lo debe convertir o “fijar” en una forma reactiva como el amoníaco (NH₃) o el óxido de nitrógeno (NOx). Estas y otras formas de nitrógeno reactivo (Nr) son relativamente escasas y representan un recurso limitante en la mayoría de los hábitats naturales y suelos para cultivos. De hecho, la composición de gran parte de la biodiversidad terrestre del mundo es el resultado de las limitaciones en la disponibilidad de nitrógeno reactivo. (World Wide Fund for Nature (WWF) Países Bajos, 2015)

2.2.6. Reducción de NOx en turbinas de gas

La empresa utilizará quemadores de baja generación de NOx y mantendrá sus emisiones iguales o menores a 25 ppm.

El Sistema Continuo de Monitoreo de Emisiones (CEMS por sus siglas en inglés) evaluará el desempeño de las medidas de prevención y control de emisiones, registrando los valores emitidos de NOx y CO, la eficiencia de combustión y la concentración de las emisiones, lo cual permitirá efectuar el control operacional en tiempo real desde la sala de monitoreo.

Los resultados de las mediciones del CEMS serán comparados con los LMP establecidos en el EIA. (Resolución Directoral N° 051-2006-MEM/AAE, 2006, p. 317)

El PMA del proyecto a ciclo combinado en el ítem 6.4.4.2 Etapa de operación, sobre las medidas para mitigar la contaminación atmosférica indica que la empresa aplicará la mejor tecnología de prevención y control disponible para disminuir el impacto de las emisiones gaseosas, para lo cual implementará un sistema de combustión seco de baja emisión de NOx (Dry Low NOx), mediante el cual el combustible y aire se mezcla previamente a la combustión

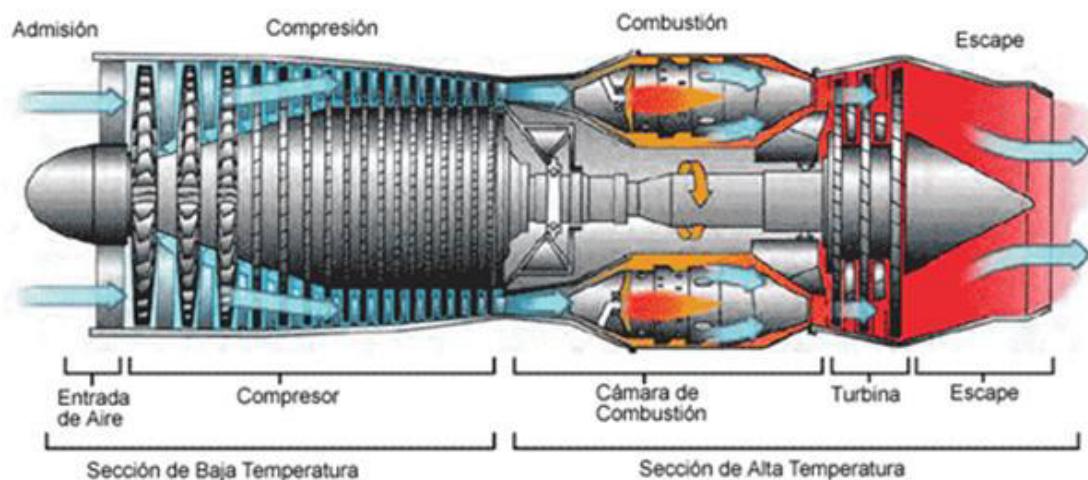
por etapas de dicha mezcla reduciendo la temperatura máxima de la llama. La temperatura incide directamente en la formación de los NOx, por lo que al disminuirla lo mismo ocurre con su formación.

El PMA de forma similar que en el EIA establece que el CEMS verificará el compromiso de no exceder los LMP según la norma vigente. (Resolución Directoral N° 335-2009-MEM/AAE, 2009, p. 71).

La Figura 12 presenta el diagrama del interior de una turbina a gas. (Enciclopedia de energía, 2022).

Figura 12

Componentes de la turbina a gas

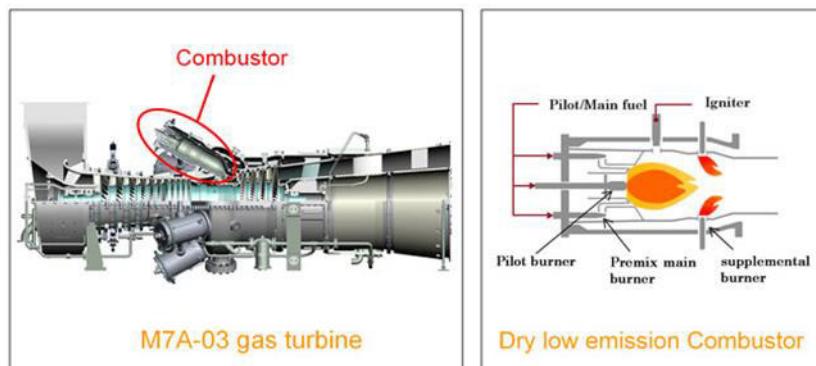


Nota. Adaptada de *Motor de combustión interna* [Imagen], por Enciclopedia de Energía, 2022, (https://energyeducation.ca/Enciclopedia_de_Energia/index.php/Motor_de_combusti%C3%B3n_interna).

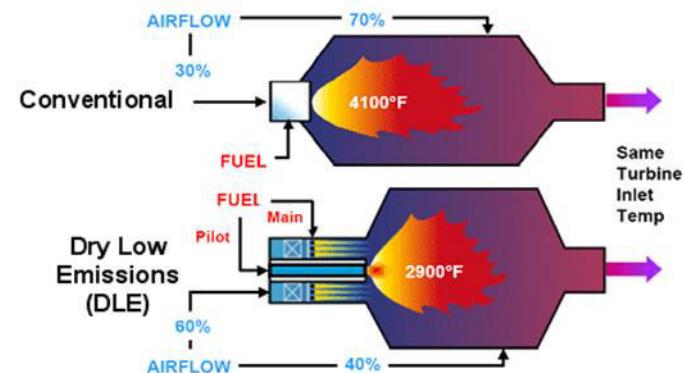
La Figura 13 muestra el esquema del proceso de combustión en una turbina de gas para el quemador de diseño convencional y otro seco de bajo NOx. Por ser las emisiones de NOx altamente dependientes de la temperatura pico de combustión, cualquier reducción de esa temperatura reduce la generación de NO₂. (Kurz, 2020)

Figura 13

Sistemas de combustión convencional y premezcla pobre (DLE)



Mezcla parcial de combustible y aire antes de la combustión, por etapas, a fin de reducir la temperatura máxima de la llama.



Nota. Adaptada de *Gas turbine performance for mechanical drive applications*, por Kurz, Rainer, 2020, ResearchGate,

(https://www.researchgate.net/publication/344544399_GTEN2019_201_GTPerf_07),

El NOx es formado por tres mecanismos: NOx térmico (Zeldovich), NOx rápido (Prompt) y NOx Fuel-Bound.

El mecanismo NOx predominante asociado con las turbinas de gas es el NOx térmico. Los avances en la tecnología de combustión de premezcla pobre Dry Low NOx (DLN) han reducido las emisiones de NOx de aproximadamente 150-300 ppm en la década de 1980 a 15-40 ppm en la actualidad, dependiendo del tamaño y el tipo de unidad, representando la reducción del 90 % (de 3 kg/MWh a 0,3-0,5 kg/MWh) mediante una prevención de la contaminación rentable. (Klein, 2019)

2.2.7. *Efecto en la salud y el ambiente*

En lo referente a los óxidos de nitrógeno y su efecto en la salud:

Desde el punto de vista de protección a la salud, una exposición breve al NO₂ puede provocar irritación del sistema respiratorio y ocular. A largo plazo, los principales efectos pueden ser un desarrollo pulmonar más lento en los niños y la aparición de enfermedades respiratorias crónicas y cerebrovasculares.

Aunque toda la población esté expuesta a los contaminantes atmosféricos, no afectan por igual a todo el mundo. Los niños, los ancianos y las personas con problemas de salud (como asma, enfermedades del corazón y pulmonares) pueden sufrir más daños.

Entre estos compuestos solo el NO₂ es tóxico para las plantas. (Márquez, 2015, p. 11)

Con respecto al transporte, dispersión y deposición de las emisiones contaminantes:

La contaminación atmosférica se puede cuantificar calculando la cantidad emitida y generada de emisiones menos la cantidad de emisiones que se mitigan por los mecanismos de autodepuración como son: Captación por los sumideros, la precipitación y absorción por el suelo, los cuerpos de agua y la vegetación, así como la deposición. (Marcano, 2015)

En ciertos casos, los mecanismos de autodepuración de la atmósfera causan contaminación debido a la acumulación elevada de contaminantes en los suelos, la vegetación, los cuerpos de agua, etc., también a distancia de la fuente debido a que los vientos los transportan. (Marcano, 2015)

La cantidad elevada de fuentes fijas o móviles en una zona origina concentración elevada de contaminantes y por tanto eventos de contaminación atmosférica de una localidad, debido a condiciones meteorológicas desfavorables para la dispersión de los contaminantes. (Marcano, 2015)

Cabe indicar, que los eventos presentan excesiva concentración de los gases contaminantes en un radio más o menos amplio alrededor de las fuentes, además, puede aumentar debido a las condiciones especiales de la topografía o la instalación de edificios, etc., favoreciendo el efecto acumulativo de los contaminantes. (Marcano, 2015)

En cuanto al NO, además de su papel contaminante en la atmósfera, presenta propiedades muy importantes desde un punto de vista biológico. En 1987 se descubrió que el cuerpo humano produce pequeñas cantidades de NO a partir del aminoácido arginina. Actualmente se sabe que el NO participa en procesos que permiten la supervivencia de los organismos, tales como la regulación de la presión sanguínea, el desarrollo del sistema nervioso central, la transmisión nerviosa en los procesos de aprendizaje y memoria, y la activación de la respuesta inmune. Finalmente, el NO también sirve como conservante. Es liberado del nitrito que se utiliza en la conservación de la carne; de hecho, algunos virus y microorganismos liberan NO para matar células. (Fundación CRANA, 2014)

En lo referente a los compuestos de nitrógeno y su efecto en la atmósfera:

Las principales fuentes de emisión de NOx son: Vehículos de transporte, Fuentes estacionarias de combustión, tal como instalaciones eléctricas y calderas industriales, así como los relámpagos.

Los NOx emitidos a la atmósfera contribuyen en las reacciones relativas al agotamiento del ozono estratosférico, también al efecto invernadero, la formación de ozono/huminiebla fotoquímica, la lluvia ácida, la eutrofización en las zonas costeras (cuerpo de agua con notable incremento de nutrientes, en este caso los nitratos que reducen el oxígeno disuelto), material particulado suspendido y emisiones gaseosas con

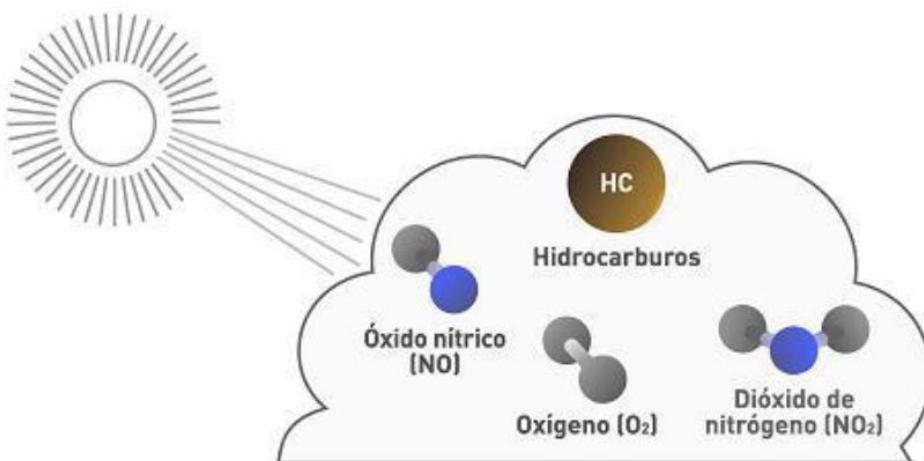
riesgo cancerígeno, originando el impacto significativo para la salud de la población, así como para el entorno. (Portal de calidad del aire, 2023)

Ozono/huminiebla fotoquímica: Corresponde al ozono originado por la actividad antrópica, es un contaminante secundario presente en la tropósfera, formado a partir de la reacción de los Compuestos Orgánicos Volátiles (COV) y los NOx durante el día por acción de la luz solar, constituye el componente principal de la humniebla urbana fotoquímica, junto con el NO₂ y la gran variedad de otros compuestos. (Portal de calidad del aire, 2023)

El NO contenido en las emisiones de chimeneas, se oxida para formar NO₂ que es un gas oxidante de color amarillo-marrón (que absorbe la radiación solar y origina la neblina de color amarillo-marrón que a veces se observa sobre las ciudades, siendo uno de los principales componentes del smog). La Figura 14 muestra los contaminantes primarios generados por reacción fotoquímica. (Portal de calidad del aire, 2023)

Figura 14

Contaminantes primarios que reaccionan en presencia de la luz solar



Nota. Adaptada de *Efectos de la contaminación atmosférica sobre la vegetación* [Imagen], por Portal de Calidad del aire, 2023, (<https://airedemadrid.madrid.es/portales/calidadaire/es/Contaminacion-atmosferica/Efectos/Sobre-la-vegetacion/>).

Lluvia ácida: El dióxido de azufre (SO_2) y los óxidos nitrógeno (NO_x) forman con el vapor de agua la solución líquida a baja concentración que consiste en los compuestos de ácido sulfúrico y ácido nítrico, así como trazas de ácidos orgánicos y ácido carbónico, lo cual representa más del 90 % de la composición total de la lluvia. La prioridad de control se enfoca en el SO_2 y luego los NO_x que representan menos del 30 % de la composición.

Partículas sólidas en suspensión: Los óxidos de nitrógeno (NO_x) y el dióxido de azufre (SO_2) son precursores clave en la formación de partículas secundarias en la atmósfera, reaccionando con otros compuestos químicos para generar nitratos y sulfatos, que constituyen una gran fracción del material particulado en suspensión. (Peng, 2024)

2.3. Marco filosófico

En lo referente al marco filosófico del presente estudio:

Ludwing von Bertalanffy en la década de 1940 da comienzo al nuevo paradigma dentro de las ciencias: el enfoque sistémico, que sostiene que la ciencia no debe centrarse en el estudio de las partes sin tener en cuenta el todo. Esta llamada teoría de sistemas, o pensamiento sistémico, significa pensar en los términos del contexto, las relaciones, las formas y los procesos, a través de un pensamiento no-lineal. La teoría de sistemas nos dice que la esencia de la vida no yace en las moléculas, sino en los patrones y procesos en que estas moléculas están implicadas. (Bertalanffy, 1969)

La ciencia ambiental origina el cambio de paradigma social, económico y científico que deja atrás el enfoque cartesiano, considerando los procesos naturales y sociales como un todo, por ejemplo, la teoría Gaia.

La **teoría GAIA** (diosa Tierra en griego) fue propuesta por el químico James Lovelock en 1969, quien en su libro “Gaia: una nueva mirada a la vida en la tierra”, establece que

la Tierra presenta las condiciones para ser reconocida como un solo macroorganismo vivo.

La Hipótesis Gaia se fundamenta en que la biosfera (ecosistema global), atmósfera, hidrosfera y litosfera constituyen un sistema cibernetico que autorregula globalmente las condiciones principalmente de temperatura, composición atmosférica y salinidad oceánica (constantes) para obtener un ambiente físico y químico óptimo en equilibrio dinámico (homeostasis) con las especies de vida que habitan en la superficie del planeta.

Según la segunda ley de la termodinámica, un sistema cerrado tiende a la máxima entropía (hacia el equilibrio). En el caso del planeta Tierra, su atmósfera debería hallarse en equilibrio químico, todas las posibles reacciones químicas ya se habrían producido y su atmósfera se compondría mayoritariamente de CO₂ (Se estimó que la atmósfera debería componerse de, aproximadamente, un 99 % de CO₂) sin apenas vestigios de oxígeno y nitrógeno. Según la teoría de Gaia, el que al día de hoy la atmósfera la compongan un 78 % de nitrógeno, 21 % de oxígeno y apenas un 0,03 % de dióxido de carbono se debe a que la vida, con su actividad y su reproducción, mantiene estas condiciones que la hacen habitable para muchas clases de vida. (Lovelock, 1985, p. 34)

La composición química estable de la atmósfera evitando la afectación de los seres vivos, se podría relacionar con la hipótesis que según Lovelock (1985) menciona que: “Nuestra atmósfera oxidante actualmente contiene nitrógeno, metano y óxido nitroso, lo cual constituye un fenómeno químico que permite plantear que la atmósfera es una estructura biológica con vida y no un producto reciente de la naturaleza, (...)” (p. 15).

Se ha llamado Gaia a la diosa de la Tierra o a la Tierra considerada como un organismo. Estas frases pueden conducir a conclusiones equivocadas ... Rechazamos la analogía

de que Gaia es un organismo individual, principalmente porque no hay ningún organismo que se nutra de sus propios residuos ni que recicle por sí mismo su propio alimento. Es mucho más apropiado decir que Gaia es un sistema interactivo cuyos componentes son seres vivos. (Margulis, 2003, pp. 227-229)

2.2.8. *Dinámica de sistemas*

En lo referente a la dinámica de sistemas:

El modelado dinámico es un subconjunto del pensamiento sistémico desarrollado como técnica para representar y simular el comportamiento de sistemas complejos en el tiempo, permitiendo obtener conclusiones respecto a la explicación de comportamientos dinámicos en aspectos de proyección, previsión y simulación. En el ámbito de la ingeniería, Beasley y Ingram (2020) destacan cómo la ingeniería de sistemas y el pensamiento sistémico facilitan la innovación mediante la comprensión y simulación de sistemas complejos, contribuyendo a la toma de decisiones informadas en entornos dinámicos y cambiantes (Beasley & Ingram, 2020).

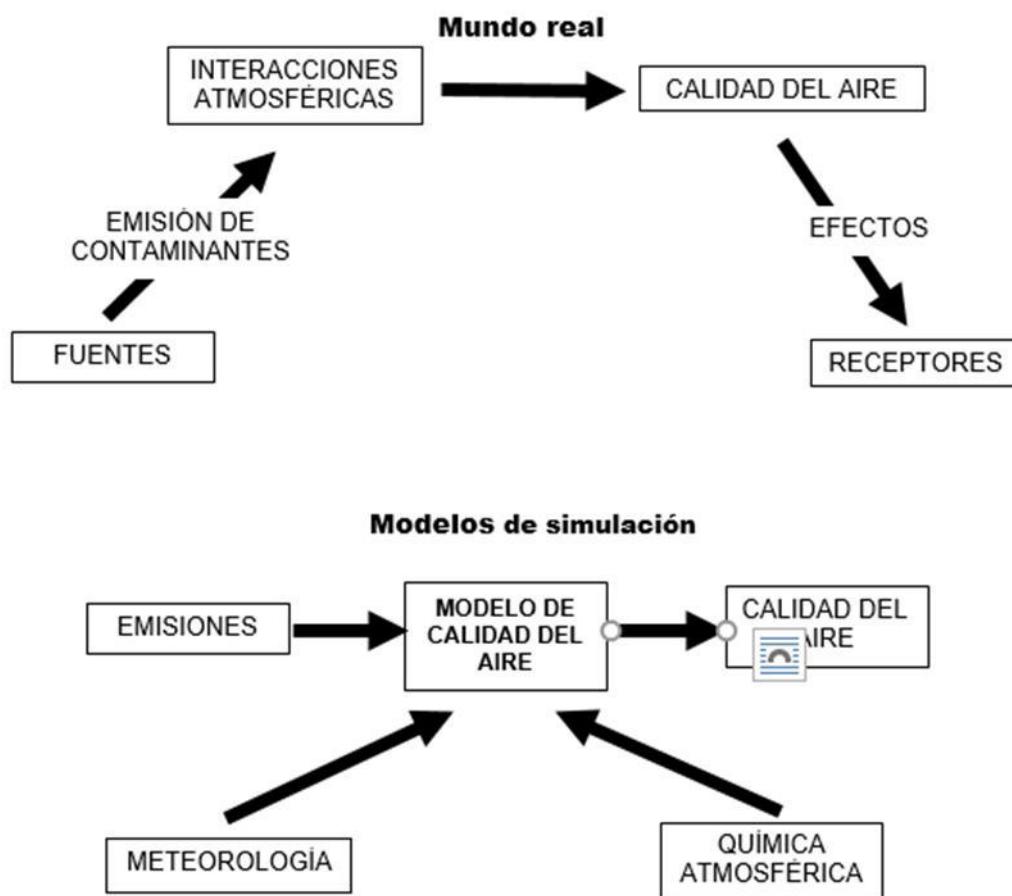
2.2.8.1. Fundamentos de la dinámica de sistemas. La dinámica de sistemas combina la teoría, los métodos y la filosofía para analizar el comportamiento de los sistemas (Jay Forrester), surgiendo como necesidad de comprender la administración, sin embargo, se aplica en el campo ambiental, política, economía, educación, medicina e ingeniería, etc. Asimismo, muestra el cambio de un problema en el tiempo, cuyo comportamiento no deseable se tiene que corregir.

Por otro lado, la modelación de la dispersión de la contaminación atmosférica consiste en la representación matemática de los procesos de transferencia y difusión en la atmósfera, también se les denomina modelos de simulación o de pronóstico y permiten el control de las emisiones en la atmósfera y en interiores.

Un modelo permite el conocimiento parcial de las condiciones reales de las operaciones físicas y los procesos químicos producidos durante el transporte, dispersión, transformación y deposición de los contaminantes, debido a que aún los modelos más elaborados no consiguen configurar la turbulencia atmosférica que está en función de varios factores de estabilidad. La Figura 15 muestra el esquema de la adaptación de un modelo con las condiciones reales.

Figura 15

Esquema de la adaptación de un modelo a condiciones reales



Nota. La figura representa el modelo de simulación y su adaptación a las condiciones reales.

Un modelo de dispersión permite pronosticar la posible afectación de los contaminantes atmosféricos emitidos por una o varias fuentes a la calidad del aire.

2.2.8.2. Diagrama causal. El modelo conceptual en DS se fundamenta en relaciones causa – efecto (cadenas causales) y realimentación (cadena causal forma un ciclo o bucle). La

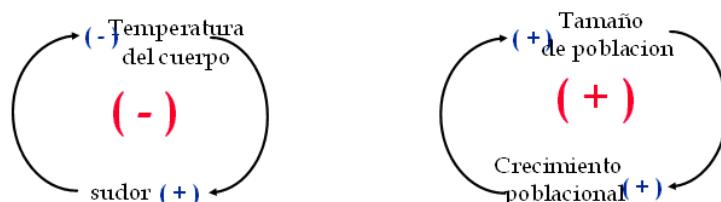
cadena de relaciones causales establece el Diagrama Causal (CLD, Casual Loop Diagram), que puede incluir elementos exógenos, retardos y bucles anidados.

La retroalimentación del sistema puede ser de cambio reforzador (+) o compensador (-), para el tipo negativo el cambio es contrarrestado, mediante la estabilización, autorregulación, “búsqueda de objetivo”, homeostático (equilibrio dinámico). El cambio para el tipo positivo lleva a más cambio en la misma dirección, originando el crecimiento reforzador, potencial desestabilizante, finito en extensión. La Figura 16 muestra el procedimiento de retroalimentación y elaboración de diagramas de lazo causal.

Figura 16

Procedimiento de retroalimentación y elaboración de diagrama causal

1. Escriba los nombres de las variables vinculadas
2. Conecte las variables con flechas
3. Etiquete el tipo de flechas
 - (+) significa que las variables cambian en la misma dirección
 - (-) significa que las variables cambian en dirección opuesta
4. Etiquete el loop (+) o (-)
 - (+) si el # (-) es par, (-) si el # de (-) es impar



Nota. La figura muestra los tipos de bucles o lazos, (+) reforzador y (-) compensador.

La figura anterior presenta los lazos de retroalimentación positivo y negativo, la polaridad positiva muestra que la variable explicativa influye sobre la variable resultante en relación directa, es decir, si la variable causa se incrementa la variable efecto también y viceversa. Por el contrario, la polaridad negativa indica que la variación de la variable causa influye de forma inversa sobre la variable efecto. El diagrama causal o hipótesis dinámica es una técnica para graficar las relaciones de un problema y sus posibles causas, siendo útil para

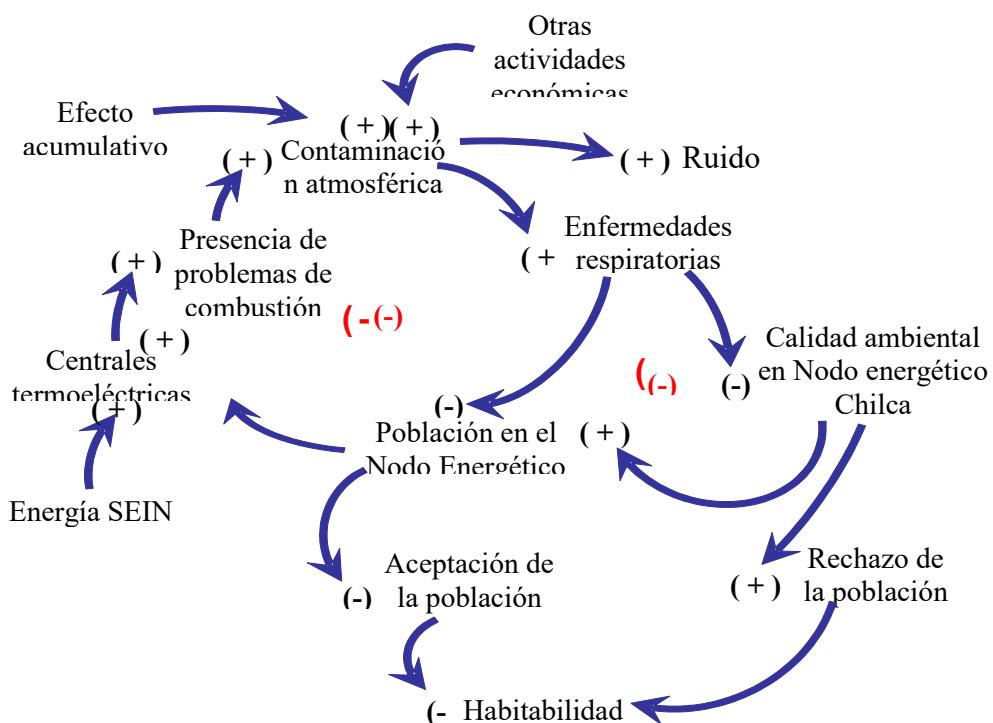
la dinámica de sistemas, se recopilarán los datos de resultados de las mediciones de los contaminantes representativos y de mayor incidencia en la población, luego de elaborar los diagramas casuales se transfieren a diagramas de flujos y finalmente se realizará la simulación utilizando el software STELLA, considerando estadísticas y tasas reales.

A. Diseño causal. El principio de causalidad es fundamental para la investigación científica, suponiendo que la mejor forma de entender y explicar un evento es conociendo las causas, a fin de tomar las medidas de control y de prevención de los efectos.

El diseño causal analiza la relación causa – efecto de las variables, con la finalidad de mostrar resultados secuenciales y verdaderos de casos reales, asimismo, debe cumplir con los requisitos siguientes: Covarianza (grado de variación conjunta de dos variables), proceso lógico, precedencia en el tiempo y eliminación de posibles relaciones espurias. La Figura 17 presenta el Diagrama causal del modelo dinámico en versión general; mostrando las diferentes variables que influyen en la contaminación del aire en el Nodo Energético Chilca (NEC).

Figura 17

Diagrama causal del modelo dinámico para el Nodo Energético Chilca



Nota. La figura muestra las variables propuestas por el autor para el diagrama causal del NEC.

2.2.8.3. Modelo dinámico de sistemas. Jay Forrester es el creador de la Dinámica de Sistemas, DS, método utilizado para modelar y evaluar el comportamiento dinámico (en función del tiempo) de todo tipo de sistemas. Los modelos dinámicos representan procesos que relacionan las partes que lo componen y simulan mecanismos de cambio que permiten estudiar la sucesión temporal del fenómeno.

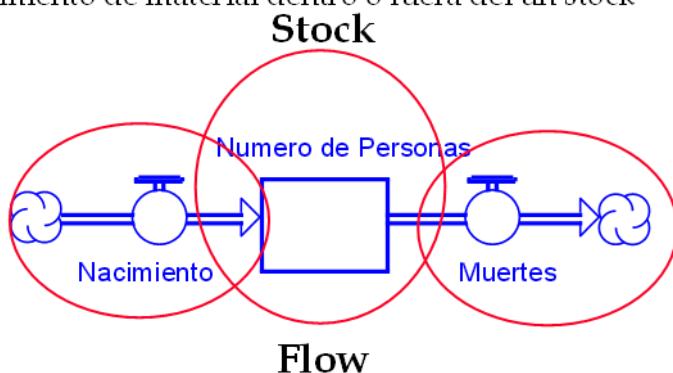
El modelo en general se define como la representación abstracta y simplificada de la realidad, que se comunica mediante símbolos y analogías, que permiten realizar simulación y por ende determinar tendencias. Existen los tipos de modelos mentales, conceptuales, matemáticos y físicos. Como parte de los modelos matemáticos tenemos los modelos de simulación estáticos y dinámicos, los modelos de simulación dinámica siguen los cambios a través del tiempo, el cual se considera como variable independiente.

En esta etapa se traduce el diagrama causal a un Diagrama de Forrester o diagrama de niveles y flujos, teniendo los almacenamientos o existencias (stocks) llamados niveles y los flujos mostrados en la Figura 18.

Figura 18

Lenguaje de la simulación dinámica

- **Stock** = variable de estado:
 - Cantidad de material almacenada en varias partes de un sistema
- **Flow** = entrada & salida = tasa de cambio = ecuación diferencial :
 - Movimiento de material dentro o fuera del un stock



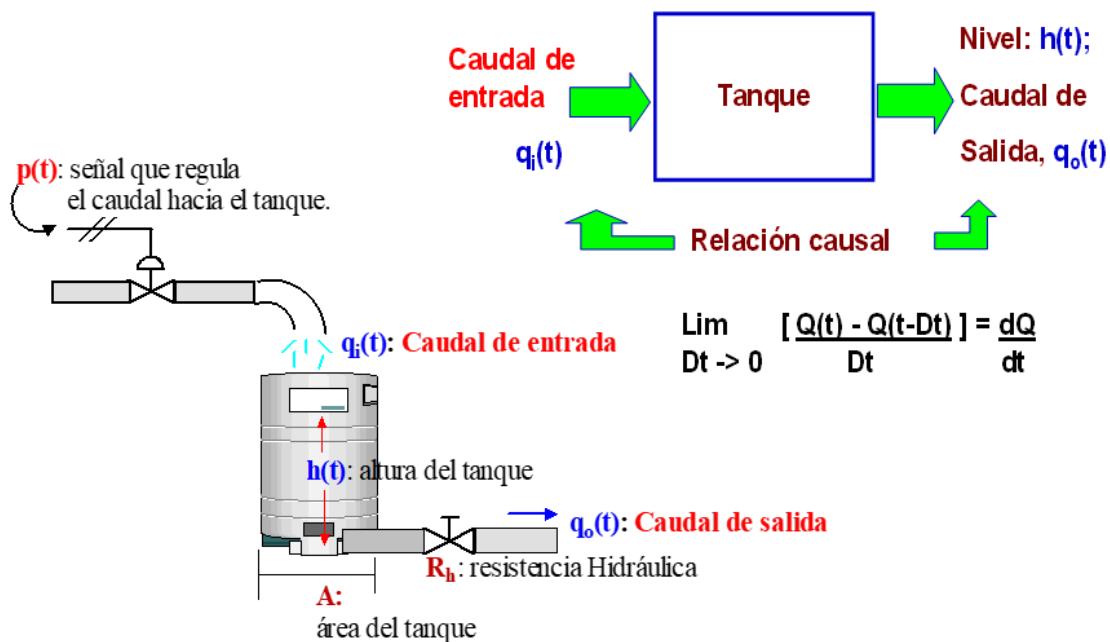
Nota. La figura muestra el proceso dinámico consistente en las variables de stock o estado y las variables de flujos de entrada y salida.

El modelado de simulación de sistemas complejos utiliza métodos de sistemas duros (tecnológicos), conceptos de **retroalimentación** y sistema dinámico, análisis numérico y tiene como objetivo el estudio de los problemas no estructurados o sistemas blandos (sociales).

La simulación utiliza las técnicas de integración numérica a las variables, obteniendo tendencias o proyecciones, a fin de entender como la estructura del sistema determina sus características y establecer las posibles soluciones de los problemas formulados. Por ejemplo, la Figura 19 muestra la aplicación dinámica a un sistema hidrodinámico, interpretando el funcionamiento, estableciendo la matemática y la relación causal de variables.

Figura 19

Sistema hidrodinámico



Nota. La figura muestra la aplicación de la relación causal a un sistema hidrodinámico.

El software a utilizar STELLA consiste en el modelo matemático y conceptual de ecuaciones diferenciales de 1er orden, que tiene una estructura interna que procesa funciones externas, utilizado para la práctica / filosofía / ideas de pensamiento de sistemas.

El modelo lógico matemático utilizado en el Diagrama de Forrester es de un sistema de ecuaciones diferenciales que generalmente no tienen solución analítica, utilizando la técnica de cálculos numéricos de resolución del sistema (integración o aproximación).

Los flujos (flows) representan funciones que calculan las variaciones respecto a los valores de cada *stock*, por ejemplo: los flujos de nacimientos y muertes de la figura anterior dependen del estado del stock en el tiempo, asimismo, el valor del stock del número de personas en un instante dado depende a su vez del valor inicial y de la suma de lo acumulado. La Figura 20 presenta las ecuaciones diferenciales básicas del sistema y su integral en función del tiempo.

Figura 20

Ecuaciones diferenciales básicas del sistema



- Ecuación diferencial:

$$\frac{dL}{dt} = R_1(t) - R_2(t)$$

- Ecuación integral:

$$L(t) = \int_{t_0}^t (R_1(s) - R_2(s)) \, ds + L(t_0)$$

Nota. La figura muestra las expresiones matemáticas empleadas por el modelo dinámico.

El modelo establece las relaciones gráficas causa – efecto que se cuantifican, asignando unidades a las variables y fijando los intervalos de tiempo desde la causa al efecto, de ser el caso.

2.4. Marco legal

La Ley General del Ambiente – LGA, Ley N° 28611, en su artículo 117°.- Del control de emisiones, establece que el control de las emisiones se realiza a través de los Límites Máximos Permisibles (LMP) y demás instrumentos de gestión ambiental, asimismo, que la infracción de los LMP es sancionada de acuerdo con las normas correspondientes.

2.4.1. Límites máximos permisibles de emisión

En el subsector electricidad se tiene el Decreto Supremo N° 030-2021-MINAM aprobando los Límites Máximos Permisibles para emisiones atmosféricas de las actividades de generación termoeléctrica (2021), con relación a gases y material particulado provenientes de equipos térmicos (calderas, turbinas de gas o motores de combustión interna) en centrales termoeléctricas. La Tabla 3 muestra los LMP específicamente para los óxidos de nitrógeno según el rango de potencia de los equipos, tomados del Anexo I del decreto mencionado.

Tabla 3

LMP para los óxidos de nitrógeno (NOx) de turbina a gas

Contaminante	Tipo de carburante	LMP (mg/Nm ³)	
		Intervalo de potencia 0.5 a ≤ 20 MW	> 20 MW
Óxidos de Nitrógeno (NOx)	Líquido	200	120
	Gaseoso	180	180

Nota. Adaptada del Decreto Supremo N° 030-2021-MINAM Límites Máximos Permisibles para emisiones atmosféricas de las actividades de generación termoeléctrica, 30 de octubre de 2021, por Ministerio del Ambiente, (<https://www.gob.pe/institucion/minam/normas-legales/2305280-030-2021-minam>).

Asimismo, según las Guías sobre Medio Ambiente, Salud y Seguridad (MASS) – Plantas de Energía Térmica del Banco Mundial - 2008, Cuadro 6 (B) se tiene que para turbinas de combustión a gas natural (todos los tipos de turbinas de una unidad > 50 MWh) el límite para NOx de 51 mg/Nm³ (25 ppm), gas seco @ 15 % de contenido de O₂.

Según el artículo Análisis del Ciclo de Vida de Tecnologías de Generación de Electricidad: Revisión, Comparación y Limitaciones, para las fuentes de energía a gas natural, se obtiene de la Tabla 2 - Factores de emisión de ciclo de vida para generación

de electricidad desde tecnologías seleccionadas, el rango del factor de emisión siguiente: 0,2 - 3,8 kg NOx/MWh. (Turconi et al., 2013)

2.4.2. *Estándares de Calidad Ambiental*

El Decreto Supremo N° 003-2017-MINAM (2017) de la legislación ambiental nacional vigente tiene aprobados los nuevos Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire, mediante publicación del 7 de junio de 2017. La Tabla 4 muestra los valores específicos para el NO₂, CO y O₃.

Tabla 4

Estándares de Calidad Ambiental para Aire

Parámetros	Período	Valor [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Criterios de evaluación	Método de análisis [1]
Dióxido de Nitrógeno (NO ₂)	1 hora	200	NE más de 24 veces al año	Quimioluminiscencia (Método automático)
	Anual	100	Media aritmética anual	
Monóxido de Carbono (CO)	1 hora	30000	NE más de 1 vez al año	Infrarrojo no dispersivo (NDIR) (Método automático)
	8 horas	10000	Media aritmética móvil	
Ozono (O ₃)	8 horas	100	Máxima media diaria NE más de 24 veces al año	Fotometría de absorción ultravioleta (Método automático)

NE: No Exceder.

[1] o método equivalente aprobado.

Nota. Adaptada del Decreto Supremo N° 003-2017-MINAM, 7 de junio de 2017, por el Ministerio del Ambiente, (<https://www.minam.gob.pe/disposiciones/decreto-supremo-n-003-2017-minam/>).

Asimismo, se tiene el Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Aire aprobado mediante Decreto Supremo N° 010-2019-MINAM, donde se establecen las pautas para la ubicación, los métodos de toma de muestra, los métodos de análisis de muestra, calibración, operación y mantenimiento, procesamiento y el reporte de la información del monitoreo, aseguramiento y control de la calidad del monitoreo.

III. MÉTODO

Según lo mencionado en el ítem 2.1. Bases teóricas (páginas 35-36), así como en el ítem 2.1.4. Tecnologías de control de emisiones de NOx (páginas 38,45), las turbinas a gas de las centrales termoeléctricas tienen diferentes factores de combustión (variables independientes) que influyen en la generación de gases contaminantes, tales como: El porcentaje de exceso de aire, la presión, la temperatura de salida de gases, las características de la cámara de combustión, la turbulencia, el tiempo de residencia y la homogeneidad de la mezcla.

El presente estudio describe, analiza y modela los principales factores de combustión (un factor es un elemento, circunstancia, influencia que contribuye a producir un resultado) seleccionados por el autor que influyen durante la quema del gas natural, originando la generación de emisiones de NOx de turbinas a gas de centrales termoeléctricas.

3.1. Tipo de Investigación

El presente estudio tiene un enfoque de investigación cuantitativa secundaria es un método de investigación que implica el uso de datos ya existentes o datos secundarios. Los datos existentes se resumen y cotejan para aumentar la efectividad general de la investigación (Callejo & Viedma, 2005).

Según el propósito es de tipo básico porque desarrolla un modelo teórico y aplicativo ya que el modelo permite predecir emisiones en el tiempo, según el nivel de conocimientos es explicativo – predictivo, aplicando el método de modelación de simulación dinámica. La Tabla 5 muestra los componentes del proyecto de investigación.

Tabla 5*Componentes del proyecto de investigación*

Método	Enfoque	Tipo de investigación / nivel	Hipótesis	Diseño de investigación
Deductivo (Método donde se va de lo general a lo específico)	Cuantitativo	Aplicada / Explicativa - Predictiva	Correlacional - Explicativa - Predictiva causal	Pre-experimental

Nota. Adaptada por el autor.

3.1.1. Diseño de investigación

El diseño de investigación es el denominado pre-experimental, el cual “Consiste en administrar un estímulo o tratamiento a un grupo y después aplicar una medición de una o más variables para observar cuál es el nivel del grupo en ellas. Este diseño no cumple con los requisitos de un experimento “puro”. No hay manipulación de la variable independiente (niveles o modalidades) o grupos de contraste; …” (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2018).

Asimismo, como es un diseño preexperimental unifactorial, los diferentes niveles de la variable independiente pueden considerarse como subvariables, ya que cada nivel representa una condición distinta que se somete a evaluación (Ramos-Galarza, 2021).

En ese sentido, se considera como variable independiente al factor de combustión con dos (02) subvariables (niveles o condiciones) de dicha variable.

En tal sentido, el programa de modelamiento a utilizar se denomina “Structural Thinking Experimental Learning Laboratory with Animation”, sus siglas son STELLA y es utilizado para educación e investigación, asimismo, se debe señalar que se trata de una herramienta que salva muchas dificultades operativas en la enseñanza y práctica de la Dinámica de Sistemas, DS.

3.2. Población y muestra

El universo comprende la información del monitoreo de las emisiones gaseosas en todas las turbinas a gas de las centrales termoeléctricas del país, que utilizan combustible gas natural.

La población de estudio que considera la investigación corresponde a la información correspondiente de diez (10) las turbinas a gas que pertenecen a todas las centrales termoeléctricas de las empresas de generación eléctrica instaladas en el Nodo Energético Chilca, debido a que tienen similares características de capacidad y operación.

La muestra del presente estudio corresponde al registro de mediciones de la base de datos con la información del monitoreo puntual de emisiones gaseosas completa, como referencia se muestra:

Para el proceso cuantitativo, la muestra es un subgrupo de la población de interés sobre el cual se recolectarán datos y que tiene que definirse y delimitarse de antemano con precisión, además de que debe ser representativo de la población (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2018).

El muestreo del presente estudio no es probabilístico y es determinado *por conveniencia*, es decir, se procede a seleccionar la muestra de tres (03) turbinas a gas que pertenecen solo a una central termoeléctrica, las cuales tienen la información completa de las mediciones efectuadas de los gases de chimenea, así como los resultados del balance de materia de las turbinas a gas necesarios para desarrollar el estudio.

La información recopilada se compara con los valores obtenidos según las técnicas de los cálculos de ingeniería utilizados, “determinando el porcentaje de error entre valores experimental (medido) y teórico, que resultan menores del 10 %, lo cual según convención es aceptable, validando con este criterio de calidad que los resultados son confiables” (Santo & Lecumberry, 2005).

En ese sentido, los resultados obtenidos de las turbinas evaluadas pueden extrapolarse a las otras turbinas similares en marca, potencia y carga, sin embargo, es factible la aplicación de la misma metodología para los equipos con diferentes características técnicas.

3.3. Operacionalización de variables

La presente investigación se fundamenta en el diseño unifactorial con una sola variable independiente: Factores de combustión del gas natural (X_1) y su relación con la concentración de emisiones gaseosas de NOx (Y_1), seleccionando las subvariables siguientes:

3.3.1. Subvariable: Exceso de aire

En lo referente a las definiciones de la variable independiente:

3.3.1.1. Definición conceptual. Es un parámetro de referencia que representa la parte del oxígeno que no se ha consumido en el proceso de combustión permanece como excedente en los gases de salida, además, su valor expresado en rangos determina la eficiencia energética de un equipo térmico. Asimismo, el índice de exceso de aire se utiliza para el cálculo de relaciones estequiométricas y de los parámetros del proceso de combustión. (TESTO, 2018, p. 20)

3.3.1.2. Definición operacional. La cantidad total del aire suministrado se calcula a partir de la cantidad de oxígeno estequiométrico necesario (combustión completa ideal) según el tipo de combustible más la cantidad de exceso de oxígeno requerido y la composición relativa del oxígeno presente en el aire ambiente, por ejemplo, en el caso del aire ambiente se tiene 20,95 % en volumen de O₂ bajo presión atmosférica para aire seco. Sin embargo, el aire ambiente real que se usa para la combustión tiene humedad, la cual también debe incluirse en los cálculos exactos de la cantidad de aire real total suministrado. (TESTO, 2018, p. 16)

En lo referente a sus dimensiones:

A. Parámetros de combustión. La producción de energía eléctrica mediante turbinas a gas es confiable, requiriendo elevado suministro de combustible y emitiendo alta cantidad de gases. La optimización de la eficiencia de la combustión demanda la interrelación de sus parámetros y la puesta a punto de la instalación. (TESTO, 2018, p. 10)

B. Eficiencia de la combustión. Se define como la relación de la energía utilizada o requerida por el proceso (para calentar un fluido, fundición, sinterizado, etc.) entre la energía total ingresada. La eficiencia se expresa en porcentaje y su nivel siempre es menor del 100 % considerando que la potencia es constante durante la operación del equipo. (TESTO, 2018, p. 23)

3.3.2. *Subvariable independiente): Temperatura del gas de chimenea*

En lo referente a las definiciones de la variable independiente:

3.3.2.1. Definición conceptual. Se indica que: La eficiencia de la combustión se expresa por la diferencia de la temperatura máxima de llama, la temperatura de los gases de escape, con respecto a la temperatura de referencia o del ambiente. El potencial motriz de la transferencia de calor depende de las diferencias de temperaturas, con rangos altos se consigue mayor velocidad del flujo térmico para el calentamiento y de su conversión de energía a trabajo útil. (General Energetic Engineering, 2023)

3.3.2.2. Definición operacional. Según General Energetic Engineering (2023) la mejora de la eficiencia de la combustión consiste en alcanzar la temperatura máxima de llama con la disminución del flujo de combustible, incrementando el trabajo. La diferencia de la temperatura teórica calculada que alcanzaría los gases de salida en un proceso adiabático con la temperatura teórica de llama medida mediante un pirómetro en un proceso de combustión, permite conocer la desviación del proceso ideal.

En lo referente a sus dimensiones:

A. Temperatura adiabática de llama. La temperatura máxima de un proceso de combustión se conoce como la temperatura adiabática de llama considerando que la reacción presenta condiciones que no existe el flujo de calor, pero en la práctica, se obtienen temperaturas reales menores. Conociendo dicha temperatura máxima, es posible seleccionar los tipos de materiales a especificar para la cámara del equipo térmico. (Himmelblau, 1997, pp. 457-458)

3.3.3. Variable dependiente (Y_1): Generación de emisiones de NOx

En lo referente a las definiciones de la variable dependiente:

3.3.3.1. Definición conceptual. La generación de óxidos nítricos depende de la temperatura de combustión y la relación aire-combustible. La cantidad de los NOx aumenta debido a que en la cámara de combustión la temperatura se eleva de forma exponencial, tomando como referencia a la temperatura del aire suministrado, la presión de entrada y el tiempo de permanencia de la llama en el área. Si se incrementa la inyección de agua o vapor, el NOx disminuye de forma exponencial, aumentando la humedad específica. (TESTO, 2018, p. 4)

3.3.3.2. Definición operacional. Según la autoridad ambiental nacional:

El nitrógeno es el elemento más común del aire que respiramos (79 %) y conforma un grupo de óxidos como el óxido nítrico (NO) y dióxido de nitrógeno (NO₂); el primero es relativamente inofensivo, pero el segundo puede causar efectos adversos en la salud y bienestar.

Las fuentes naturales más comunes son la descomposición bacteriana de nitratos orgánicos, incendios forestales y de pastos, y la actividad volcánica; en tanto que la principal fuente antropogénica es la quema de combustibles fósiles.

En presencia de hidrocarburos y luz ultravioleta es la principal fuente de ozono troposférico (precursor de O₃) y de aerosoles de nitratos que constituyen una fracción

importante de la masa de Material Particulado, MP del aire. (Ministerio del Ambiente, 2015, p. 19)

En lo referente a sus dimensiones:

A. Contaminación atmosférica. Según la Organización Mundial de la Salud tenemos:

Como contaminante atmosférico, el NO₂ puede correlacionarse con varias actividades:

- a.** En concentraciones de corta duración superiores a 200 mg/m³, es un gas tóxico que causa una importante inflamación de las vías respiratorias.
- b.** Es la fuente principal de los aerosoles de nitrato, que constituyen una parte importante de las PM_{2.5} y en presencia de luz ultravioleta del ozono. (Organización Mundial de la Salud, 2016)

B. Huella de nitrógeno. Cantidad total de Nitrógeno reactivo (Nr) emitido al ambiente como resultado del consumo de recurso por una entidad, expresado en unidad total de Nr. Consiste en el Nr incorporado en el consumo y producción de alimentos, así como el NOx emitido por la combustión de combustibles fósiles. (Leach, 2017, p. 43)

3.3.4. Unidad de análisis

Turbina a gas de una central termoeléctrica del Nodo Energético Chilca con la base de datos de la información del monitoreo puntual de emisiones gaseosas completa desde la etapa de inicio de operación hasta el período de culminación de dicho monitoreo.

El período para modelar comprende del 2010 al 2030.

La Tabla 6 muestra la operacionalización de las variables del proyecto, incluyendo sus definiciones y dimensiones establecidas en el ítem 3.3. Operacionalización de variables.

En el Anexo 3 Matriz de consistencia se muestra la relación lógica entre el título, formulación del problema, los objetivos, las hipótesis, las variables, los indicadores y el diseño de investigación.

Tabla 6*Operacionalización de las subvariables*

Variable	Subvariable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala de medición	Instrumento
Variable independiente Factor de combustión (X_1)	Exceso de aire.	La parte del oxígeno que no se ha consumido en el proceso de combustión permanece como parte de los gases de combustión y es un factor de medición para determinar la <i>eficacia energética</i> de la combustión. Se usa para determinar los <i>parámetros de combustión</i> y también como parámetro de referencia.	La necesidad real de aire se calcula a partir de los requerimientos mínimos de oxígeno necesarios para una combustión ideal (depende del combustible), el exceso de oxígeno deseado y la proporción relativa de oxígeno en el aire.	Parámetros de combustión.	Flujo volumétrico (Nm ³ /h). Flujo másico (kg/h). Velocidad del gas (m/s).	Razón	Formatos que se muestran en el anexo 4.
	Temperatura del gas de chimenea.	La calidad de un proceso de combustión se mide por la relación entre la temperatura que puede alcanzar la llama, la temperatura de los productos de la combustión y la temperatura ambiente o de referencia. Estas diferencias de temperatura marcan el potencial motriz del proceso de transferencia de calor y en la medida que se alcancen valores más altos, más rápido será el calentamiento y más energía se podrá convertir en trabajo.	La eficiencia de combustión puede determinarse de la diferencia de la temperatura de llama teórica con el valor de la temperatura de llama real medida en la cámara de combustión usando un pirómetro, esto permite determinar la mejora de obtener valores más cercanos al proceso ideal.	Eficiencia de la combustión.	(Energía útil / Energía total) * 100.	Razón	Formatos que se muestran en el anexo 4.
Variable dependiente (Y_1)	Generación de emisiones de NOx.	La generación de óxidos nítricos depende de la relación aire-combustible y la temperatura de combustión. NOx sube en la cámara de combustión si hay un incremento de la temperatura y de forma exponencial con relación al incremento de la temperatura del aire de entrada en el quemador, la presión de inyección al combustor y el tiempo de permanencia en el área de la llama.	Los principales óxidos de nitrógeno generados durante la combustión son el óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO ₂), el primero no es dañino, sin embargo, el segundo provoca efectos adversos a la salud y el bienestar.	Contaminación atmosférica.	Concentración de emisiones de NOx (ppm).	Razón	Formatos que se muestran en el anexo 4.
				Huella de nitrógeno.	Modelo dinámico. Flujo de emisiones gaseosas de Nr (t/año)	Razón	

3.4. Instrumentos

Los instrumentos de medición corresponden a los equipos que registran los valores obtenidos durante las mediciones directas correspondientes al monitoreo de tipo puntual (utilizando el analizador de gases) y de tipo continuo (mediante el CEMS).

El monitoreo puntual (de frecuencia trimestral y luego anual) utiliza un equipo portátil o analizador de gases de combustión (dando cumplimiento a su compromiso ambiental). El lugar de toma de muestra se realiza en las chimeneas de las turbinas a gas, para ello tienen los respectivos lugares acondicionados, en donde se introduce una sonda de muestreo del equipo electrónico de análisis de gases, correspondiente al método activo.

El monitoreo continuo (establecido para declaración con frecuencia mensual y promedio trimestral) utiliza el Sistema de Monitoreo Continuo de Emisiones (Continuous Emission Monitoring System, CEMS por sus siglas en Inglés), correspondiente al método automático.

Los instrumentos documentales facilitan la recolección de datos de las mediciones directas y de los resultados de cálculos para la determinación de parámetros, dichos valores provienen de los informes de monitoreo ambiental con frecuencia trimestral de la central.

Los instrumentos de que se emplearon en el presente estudio se muestran en el Anexo 4 Validación de instrumentos, consisten en archivos en Excel con formatos elaborados por el autor con la finalidad de recopilar y procesar la información.

3.4.1. Tratamiento y procesamiento de la información del monitoreo

Comprende las fichas para la recopilación de la información relacionada con los resultados del monitoreo, cálculos de ingeniería y el balance de materia y energía.

3.4.1.1. Ficha 1. Resumen de resultados de Monitoreo Puntual – MP y Monitoreo Continuo – MC de turbinas a gas, utilizada para registrar la información proveniente del monitoreo de emisiones gaseosas de NOx de las tres turbinas a gas en ciclo simple (desde el 4°

trimestre de 2007 hasta el 2º trimestre de 2012) y en ciclo combinado (desde el 3º trimestre de 2012 hasta el 2º trimestre de 2020), debido a que en adelante solo se presenta información de monitoreo continuo resumida.

3.4.1.2. Ficha 2. Cálculos de ingeniería, que comprende: i. Composición del combustible, ii. Reporte de mediciones y resultados corregidos (conversiones), iii. Relaciones estequiométricas y iv. Determinación de concentración y flujos de emisiones de NOx.

3.4.1.3. Ficha 3. Balance de materia y energía de la turbina a gas.

3.4.2. *Método de cálculo de la cinética química de la formación de NO*

Comprende la ficha para la determinación de la concentración de NO mediante la información relacionada con la cinética química.

3.4.2.1. Ficha 4. Instrucciones para la verificación de la aplicación de la tecnología Dry Low NOx (DLN) de baja emisión de NOx.

3.4.3. *Desarrollo del modelo dinámico para determinar la influencia de los principales factores de combustión de gas natural*

Comprende la ficha para recopilación de la información de los cálculos de ingeniería requerida para ingresar al proceso de modelamiento dinámico.

3.4.3.1. Ficha 5. Registro de parámetros para el modelo dinámico.

3.5. Procedimientos

Este ítem presenta la planificación del desarrollo de cada uno de los objetivos específicos, desglosando sus actividades y tareas a realizar.

3.5.1. *Determinación de la influencia de la variación de los principales factores de combustión de gas natural*

Se muestra el desarrollo del objetivo específico 1 que permitirá la: Determinación del rango de variación de los valores de los principales factores de combustión del gas natural y de

los parámetros del proceso, en relación con la generación de emisiones de NOx, realizando las actividades siguientes:

Tratamiento de la información del monitoreo.

3.5.1.1. Verificación de los resultados del monitoreo. Comprende la recolección, la revisión, el ordenamiento y el análisis de los datos del monitoreo efectuado desde el período 2007 al 2012 en ciclo simple y del período 2012 al 2020 en ciclo combinado, según el formato mostrado en el Anexo 4 Validación de instrumentos, Ficha 1: Resumen de resultados de Monitoreo Puntual – MP y Monitoreo Continuo – MC de turbinas a gas.

Procesamiento de la información del monitoreo.

3.5.1.2. Cálculos de ingeniería. Consiste en la elaboración de la hoja Excel de las relaciones estequiométricas de la combustión, con la finalidad de determinar los valores teóricos y compararlos con los obtenidos según el reporte de mediciones y resultados de los parámetros requeridos por la Tabla 7, según la exigencia de la norma.

Tabla 7

Información de emisiones a la atmósfera

Fuentes de emisión * Nº/Nombre	Tiempo de emisión		Flujo y velocidad de salida de los gases		Flujo de masa y temperatura de salida de los gases		Altura y diámetro de la chimenea		Análisis de las emisiones en $\mu\text{g}/\text{m}^3$					
	hr/día	días/año	m^3/s	m/s	kg/h	$^{\circ}\text{C}$	m	m **	PTS ***	SO_2	CO	NO_2	Pb	O_2

* Especificar el combustible utilizado considerando, cantidad y composición química.

** Si la chimenea no es circular especificar sus dimensiones.

*** Partículas totales en suspensión y/o humos de combustión (opacidad).

Nota. Corresponde al RPAAE de 1994, Anexo 2 Informe sobre generación de emisiones y/o vertimientos de residuos de la actividad eléctrica, numeral 4. Emisiones a la atmósfera.

La Hoja Excel para los cálculos de ingeniería tiene la estructura siguiente:

- c. Diagrama del proceso de combustión.
- d. Datos del combustible.

- e. Reporte de mediciones y resultados.
- f. Relaciones estequiométricas y flujos.
- g. Generación de óxidos de nitrógeno (NOx), adicionalmente la generación de CO₂.

Los cálculos permiten el ingreso de los datos necesarios para obtener las relaciones estequiométricas del aire de combustión, que permiten la determinación de los flujos másicos del aire total de entrada, asimismo, obtener las relaciones estequiométricas de los gases de salida y por ende los flujos volumétricos y másicos, así como la velocidad de dichos gases (parámetros) en base seca y húmeda.

También obtiene los resultados de la conversión de unidades de la concentración (ppm a mg/Nm³) de los gases CO, NOx y material particulado, adicionalmente se calcula el flujo promedio anual en t/año para los gases NOx y CO₂, producidos por la combustión completa.

El Anexo 4 Validación de instrumentos muestra la Ficha 2: Cálculos de ingeniería que comprende 4 formatos empleados para recopilar y procesar la información.

3.5.1.3. Elaboración del balance de materia y energía de la turbina a gas. El balance de materia y energía de las turbinas de gas, también se efectúa en una hoja Excel, la cual incluye la información principal de los cálculos estequiométricos y de los parámetros de flujo determinados anteriormente.

El Hoja Excel para el balance de materia y energía tiene la estructura siguiente:

- h. Cálculos del balance de materia y energía de la turbina a gas.
- i. Instrucciones para determinar la temperatura de llama.

Como resultados, el balance de materia de las turbinas a gas determina el flujo másico y flujo volumétrico de cada uno de los gases de combustión CO₂, N₂, NOx y O₂ en exceso en base seca, asimismo, el balance de energía puede determinar los consumos de energía eléctrica, calor cedido y la temperatura de llama.

El Anexo 4 Validación de instrumentos muestra la Ficha 3: Balance de materia y energía de la turbina a gas.

3.5.2. Verificación de la aplicación de la tecnología Dry Low NOx (DLN) de baja emisión de NOx

Se muestra el desarrollo del objetivo específico 2 que permitirá la: Determinación de la variación de la temperatura teórica de llama máxima y la temperatura adiabática de llama en el combustor (obtenida mediante el balance de energía), así como el porcentaje de exceso de aire en función de la concentración de NOx, realizando la actividad siguiente:

Método de cálculo de la cinética química de la formación de óxido nítrico - NO.

3.5.2.1. Determinación de la temperatura y la concentración teórica de las emisiones de NO. Consiste en la elaboración de la hoja Excel para el cálculo mediante la ecuación cinética obtenida del mecanismo de Zeldovich que determina la concentración teórica de óxido nítrico (NO) (con mayor proporción) en los gases de chimenea en función de la temperatura de llama teórica máxima, a fin de obtener la gráfica de la curva de temperatura teórica de llama máxima vs. concentración de NO.

3.5.2.2. Determinación de la temperatura adiabática de llama en el combustor. Con la información de la concentración de NO medida a la salida de la turbina y utilizando el balance de materia y energía se calcula la temperatura adiabática de llama en el combustor a condiciones de mejora, comparando la generación de emisiones de NO medidas en relación con la temperatura teórica de llama máxima, así como la temperatura adiabática de llama en el combustor utilizando la tecnología de baja emisión de NOx, DLN.

3.5.2.3. Comparación de la temperatura teórica de llama máxima y la temperatura adiabática de llama en el combustor. Consiste en la elaboración de las gráficas para la determinación del grado de variación de la temperatura teórica de llama máxima y la temperatura adiabática de llama en el combustor (como diferencia ΔT) en función de la

concentración medida de las emisiones de NO para cada turbina, incluyendo el porcentaje de exceso de oxígeno.

3.5.2.4. Determinación de la influencia del porcentaje de exceso de aire. Consiste en la elaboración de las gráficas de la generación de emisiones de NO en función del porcentaje de exceso de aire provenientes de los valores obtenidos de las mediciones.

En el Anexo 4 Validación de instrumentos muestra la Ficha 4: Instrucciones para la verificación de la aplicación de la tecnología Dry Low NOx (DLN) de baja emisión de NOx, presentando el formato que permite obtener la concentración de NO de las tres turbinas a gas, que se obtienen con la información de temperatura y presión aproximadas en la cámara de combustión con la mejora tecnológica, la temperatura medida de los gases de chimenea se compara con el valor obtenido de la ecuación cinética, expresando también la relación con el porcentaje de exceso de oxígeno.

3.5.3. *Predicción de la influencia de los principales factores de combustión de gas natural sobre la generación de nitrógeno reactivo*

Se muestra el desarrollo del objetivo específico 3 que permitirá la: Elaboración del modelo dinámico aplicando los factores de combustión de gas natural asociados con los parámetros de proceso requeridos, a fin de predecir la generación de nitrógeno reactivo o huella de nitrógeno en una turbina a gas de ciclo combinado, realizando la actividad siguiente:

Desarrollo del modelo dinámico para determinar la influencia de los principales factores de combustión de gas natural con relación a la generación de nitrógeno reactivo.

3.5.3.1. Elaboración del diagrama causal del sistema. En esta etapa se elabora la **hipótesis dinámica** o causal, determinando las relaciones entre los elementos del sistema proyectando las condiciones futuras, lo cual requiere el conocimiento de las relaciones causales entre las variables del sistema, a fin de obtener como resultado del Diagrama de Influencias o Diagrama Causal.

3.5.3.2. Elaboración del modelo matemático del sistema. El presente trabajo utilizará el programa informático STELLA para el modelamiento y simulación dinámica basada en iconos, el cual permitirá evaluar la tendencia de la generación de las emisiones gaseosas de NOx, producidas por el proceso energético de la central termoeléctrica de estudio, para futuros escenarios ambientales.

El modelo permite determinar la cantidad de nitrógeno reactivo emitido que constituye el contenido de las moléculas de nitrógeno que podrían tener reacciones secundarias con otros gases presentes en la atmósfera.

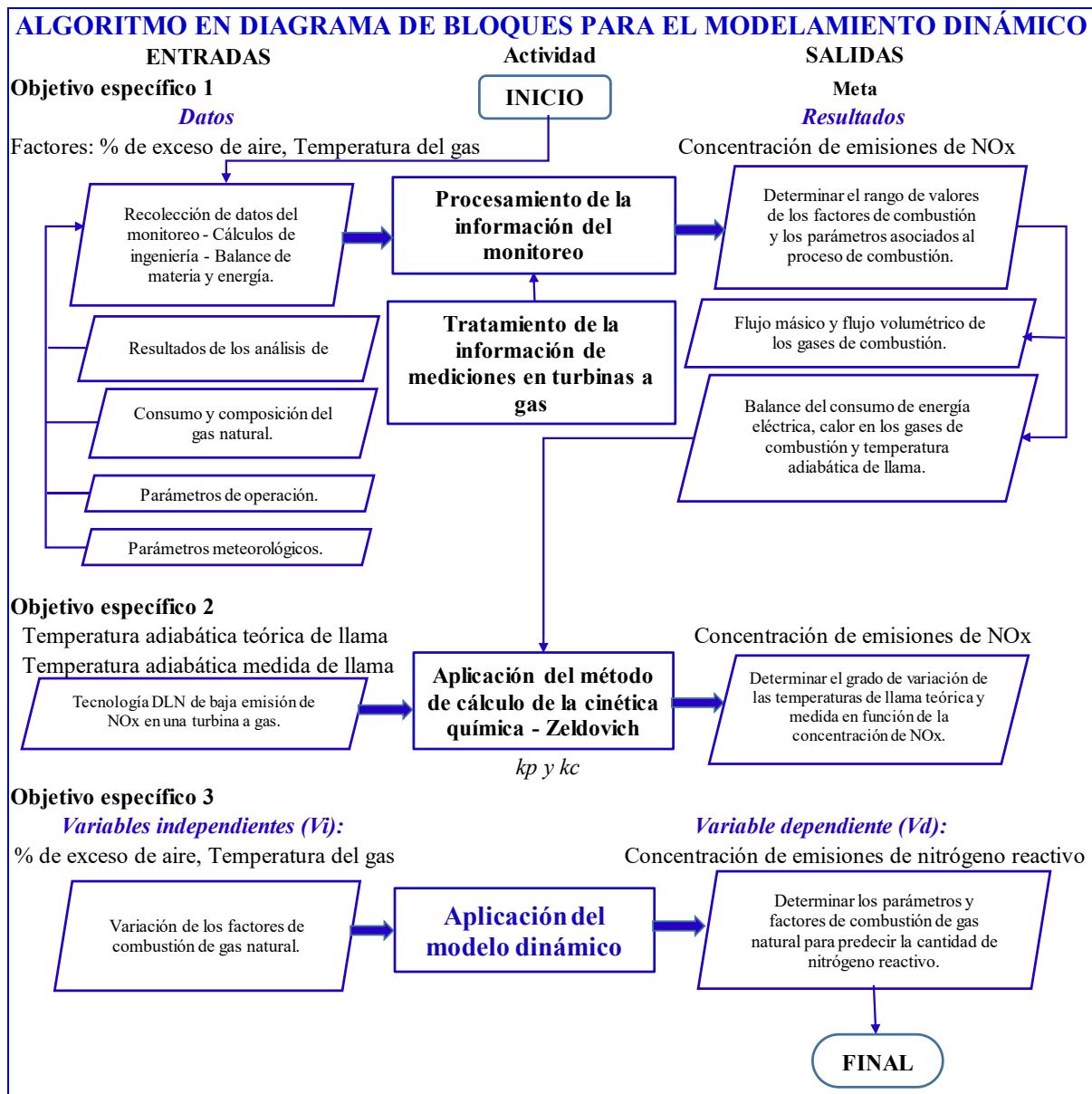
En el Anexo 4 Validación de instrumentos, se muestra la Ficha 5: Registro de parámetros para el modelo dinámico.

A partir de la información anterior se propone como estrategia el desarrollo de un algoritmo para efectuar el análisis del comportamiento dinámico aplicando el modelamiento de los parámetros de combustión relacionados a la generación de emisiones de óxidos de nitrógeno.

El algoritmo muestra la secuencia de operaciones basadas en métodos de cálculos de ingeniería que se observan en el ítem 3.5 Procedimientos (subalgoritmos) aplicándolos en forma secuencial, incluyendo los resultados de los parámetros asociados a los factores de combustión de gas natural. La Figura 21 muestra el algoritmo o proceso sistematizado en un diagrama de bloques para efectuar el modelamiento dinámico.

Figura 21

Algoritmo en diagrama de bloques para el modelamiento dinámico



Nota. Elaborada por el autor.

3.6. Análisis estadístico de datos

Se utilizará la data de las fuentes secundarias, que consisten en los resultados de los informes de monitoreos puntuales de emisiones gaseosas con frecuencia trimestral del 2007 al 2020.

La data comprende a los parámetros de combustión y la concentración de las emisiones gaseosas (medición real de contenido de NOx) de las chimeneas de cada turbina a gas, la cual

fue obtenida utilizando el analizador electroquímico de gases de combustión en actividades de campo.

Posteriormente, los cálculos de ingeniería (estequiometría), permitieron determinar el porcentaje del nitrógeno atmosférico que ingresa a la turbina generando la conversión a los óxidos de nitrógeno, además, el balance de materia y energía de la turbina a gas determinó los flujos y masa y energía de cada emisión.

Asimismo, empleando las ecuaciones de la cinética química de formación de NOx de Zeldovich, se obtiene la concentración teórica de NOx en función de la temperatura de llama adiabática (teórica), asimismo, el balance de energía de las turbinas a gas permitió obtener la temperatura de llama en el combustor (real) en condiciones del uso de la tecnología de baja emisión de NOx. Luego, los resultados real y teórico obtenidos se comparan para determinar la diferencia de valores.

El análisis estadístico se realizó con los valores obtenidos del monitoreo puntual mediante el programa R que es un lenguaje de programación gratuito que permite utilizar técnicas de estadística y genera gráficos, aplicando la interfaz RStudio que es el entorno de desarrollo integrado para manejar R utilizando paneles que facilitan el análisis y la visualización de datos.

El nivel de significancia aplicado en las pruebas siguientes fue de $\alpha = 0.05$.

3.6.1. Análisis de regresión

Con la finalidad de descartar las relaciones espurias (que no tienen conexiones lógicas o causales), se controlan los niveles del factor mediante la herramienta estadística del análisis de regresión.

Se emplea el modelo de regresión lineal simple que consiste en el método de los mínimos cuadrados para hallar la línea de tendencia según la ecuación (16).

$$y = ax + b \quad (16)$$

$$a = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad b = \frac{\sum y - a \sum x}{n}$$

Donde:

y: Variable respuesta – Concentración de óxidos de nitrógeno – NOx (mgNm³).

x: Variable predictora – Porcentaje de exceso de aire (%) / Temperatura de gases de salida (°C).

Las hipótesis planteadas para las variables analizadas son las siguientes:

Ho: No existe influencia del porcentaje de exceso de aire / temperatura de gases de salida sobre la concentración de NOx.

Ha: Existe influencia del porcentaje de exceso de aire / temperatura de gases de salida sobre la concentración de NOx.

Según la prueba de hipótesis no existe relación lineal entre las variables predictoras y de respuesta, por lo que se realizó el análisis de correlación.

3.6.2. Análisis de correlación

Se emplea el coeficiente de correlación lineal - r de Pearson para determinar si existe la relación directa o inversa.

$$r = \frac{\sum(x-\bar{x})(y-\bar{y})}{\sqrt{\sum(x-\bar{x})^2} \sqrt{\sum(y-\bar{y})^2}} \quad (17)$$

Donde:

y: Variable respuesta – Concentración de óxidos de nitrógeno – NOx (mgNm³).

x: Variable predictora – Porcentaje de exceso de aire (%) / Temperatura de gases de salida (°C).

Las hipótesis planteadas para las variables analizadas son las siguientes:

Ho: No existe correlación entre el porcentaje de exceso de aire / temperatura de gases de salida sobre la concentración de NOx.

Ha: Existe correlación entre el porcentaje de exceso de aire / temperatura de gases de salida sobre la concentración de NOx.

Según la prueba de hipótesis no existe correlación lineal entre las variables predictoras y de respuesta, por lo que se realizó el análisis de normalidad.

3.6.3. Prueba de normalidad

Se emplea la ecuación de Shapiro-Wilk como prueba de normalidad, expresada con el estadístico W, según la ecuación siguiente:

$$W = \frac{(\sum_{i=1}^n a_i x_{(i)})^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (18)$$

Donde:

$x_{(i)}$: Número de la i-ésima posición en la muestra.

a_i : Coeficiente tabulado para cada tamaño de muestra y la posición i de las observaciones.

\bar{x} : Media muestral.

Las variables que intervienen en el modelo son:

y: Variable respuesta – Concentración de óxidos de nitrógeno – NOx (mgNm³).

x: Variable predictora – Porcentaje de exceso de aire (%) / Temperatura de gases de salida (°C).

Las hipótesis planteadas para el modelo lineal son las siguientes:

Ho: El modelo presenta una distribución normal.

Ha: El modelo no presenta una distribución normal.

La prueba de normalidad aplicada a los residuos del modelo de regresión lineal para ambas variables predictoras determinó que presentan normalidad con la variable de respuesta.

3.7. Consideraciones éticas

Los datos utilizados provienen de la solicitud al acceso de información pública por transparencia, asimismo, se utilizaron programas informáticos originales de descarga gratuita, sin embargo, los resultados obtenidos no serán difundidos sin la autorización del autor, manteniendo la confidencialidad respectiva.

3.8. Propuesta de solución

En este subcapítulo se describen las actividades y las tareas planteadas para el cumplimiento de cada objetivo.

3.8.1. Determinación de la influencia de la variación de los principales factores de combustión de gas natural

Se presenta el proceso para determinar la influencia de la variación de los principales factores de combustión de gas natural como son el porcentaje de exceso de aire (%) y el nivel de temperatura del gas de chimenea (°C), así como de los parámetros del proceso sobre la generación de emisiones gaseosas de óxidos de nitrógeno (NOx) por una turbina a gas de ciclo combinado.

Las actividades para este objetivo consisten en el desarrollo del:

3.8.1.1. Tratamiento de la información del monitoreo

Comprende la tarea siguiente:

A. Verificación de los resultados del monitoreo. Comprendió a la información de las mediciones directas y el cumplimiento de los resultados según los cálculos exigidos por el reglamento correspondiente; para las etapas siguientes:

Ciclo simple. La Tabla 8 muestra las mediciones del monitoreo puntual y continuo de la primera turbina instalada en ciclo simple.

Tabla 8

Resultados del monitoreo puntual y continuo de emisiones de la turbina a gas 1

Parámetros	Concentración @ CO y % O ₂ medido (ppm)	Concentración @ CN y 15 % O ₂ (ppm)	Concentración @ CN y 15 % O ₂ (mg/Nm ³)	Límites Máximos Permisibles	
	TG1		EIA (ppm)	EIA (mg/Nm ³)	Referencial (mg/Nm ³)
% O ₂	15.54	15.00	15.00	-	-
Partículas ⁽¹⁾	-	-	3.58	-	50.00 ⁽²⁾
CO	0.00	0,00	0.00	-	100.00 ⁽³⁾
NOx	19.67	21.63	44.34	25.00	51.25

Fecha: 11/03/2008

(1) Cálculo por EPA AP-42 (mg/Nm³)

(2) LMP del Banco Mundial

(3) LMP norma de Venezuela, Decreto 638

Datos adicionales:

% O₂ medido: 15.54

% O₂ referencial: 15.00

Parámetros	Concentración @ CN y 15 % O ₂ (ppm)				Límites Máximos Permisibles	
	TG1 ⁽¹⁾					
	Ene-08	Feb-08	Mar-08	Promedio 1er Trimestre 2008	EIA (ppm)	EIA (mg/Nm ³)
NOx	21.92	22.13	22.71	22.25	25.00	51.25

(1) El sistema de monitoreo continuo de emisiones entró en operación el 13/10/2017, desde esa fecha se registra la data respectiva.

Nota. Información de resultados de 2008 – 1° trimestre, donde CO = Condiciones de operación y CN = Condiciones Normales.

Los datos recolectados son las concentraciones expresadas en ppm y las conversiones a mg/Nm³ @ Condiciones Normales de dilución a 15 % de O₂ del monitoreo puntual.

La Tabla 9 muestra los resultados de las emisiones desde el 4° trimestre del 2007 en adelante, obtenidos en los puntos de medición que corresponden al monitoreo puntual con el analizador de gases en chimenea, los flujos volumétricos y másico, así como la velocidad de salida de los gases obtenidos según cálculos matemáticos.

Tabla 9

Resultados de emisiones obtenidos en los puntos de medición – Monitoreo puntual

Fuentes de emisión	Tiempo de emisión (hr/mes)	Flujo y velocidad de salida de los gases		Flujo de masa y temperatura de salida de los gases		Altura y diámetro de la chimenea		Resultados de las mediciones de emisiones corregidos al 15 % de oxígeno CN: T=0°C, P=1 atm			
		Nm ³ /s	m/s	(kg/h)	(°C)	Alto (m)	Diámetro eq. (m)	Partículas ⁽¹⁾ (mg/Nm ³)	CO (mg/Nm ³)	NO ₂ (mg/Nm ³)	O ₂ (%)
TG1	245.03	370.89	32.92	808,155.02	553.33	9.14	6.63	3.58	0.00	44.34	15.54
DPH	16.58	0.69	45.68	1,509.40	293.73	7.92	0.20	8.71	7.47	47.98	6,31

Combustible: Gas natural

Fecha: 11/03/2008

(1) Cálculo por EPA AP-42

Nota. Primer cuadro de resultados 2008 – 1° trimestre, según el formato exigido por el reglamento ambiental anterior.

La revisión de cada informe incluye el anexo con los resultados de las mediciones del monitoreo puntual que es la más completa presentando la información siguiente: La concentración de las emisiones contaminantes (Partículas, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno), así como los flujos, velocidad y tiempo de emisión. La Tabla 10 muestra los parámetros complementarios, las características del combustible y los datos generales (potencia

y producción de energía mensual). En el Anexo 5. Confiabilidad de instrumentos se incluyen las impresiones térmicas de las tres (03) mediciones realizadas y el correspondiente certificado de calibración del instrumento analizador de gases.

Tabla 10

Monitoreo de emisiones atmosféricas de turbinas a gas

Contaminantes	Fecha:	1	2	3	Promedio aritmético	Coeficiente variación (%)	Límite Máximo Permisible (*)						
		11/03/2008	11/03/2008	11/03/2008									
Flujo volumétrico	Hora: 15:02	Nm ³ /h 1,351,993.67	1,337,927.41	1,315,717.53	1,335,212.87	1.26	-						
Partículas	mg/Nm ³	3.54	3.57	3.63	3.58	1.25	50.00						
Velocidad	m/s	33.27	33.07	32.43	32.92	1.05	-						
Tiempo de emisión	h/d	24.00	24.00	24.00	24.00	0.00	-						
Flujo másico	kg/h	815,523.39	811,337.80	797,603.86	808,155.02	0.91	-						
Monóxido de carbono	mg/Nm ³	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	500.00						
Óxidos nitrógeno	mg/Nm ³	42.41	45.72	44.89	44.34	4.35	125.00						
Dióxido de azufre	mg/Nm ³	12.76	16.34	19.25	16.12	0.00	2,000.00						
VOC	mg/Nm ³	2.56	2.59	2.63	2.59	1.25	20.00						
<hr/>													
Parámetros complementarios		Fecha: 11/03/2008	11/03/2008	11/03/2008	<hr/>								
		Hora: 15:02	15:07	15:12	<hr/>								
Oxígeno	% O ₂	15.49	15.62	15.52	15.54	0.34	-						
Temperatura de gases	°C	562.00	557.00	541.00	553.33	1.57	-						
Temperatura ambiente	°C	28.80	27.20	27.30	27.77	3.72	-						
Dióxido de carbono	%	4.08	2.97	3.03	3.36	21.42	-						
Exceso de aire	%	255.00	251.20	245.20	250.47	1.81	-						
Eficiencia de combustión	%	42.67	41.66	44.47	42.93	0.61	-						
<hr/>													
Características de la chimenea		Notas:											
Altura, m	9.14	Las concentraciones de las emisiones están referidas al 15 % de O ₂ .											
Diámetro equivalente, m	6.63	LMP del Banco Mundial (General Environmental Guidelines).											
<i>LMP de monóxido de carbono CO de la normativa venezolana.</i>													
<hr/>													
Características del combustible													
Tipo de combustible	Gas natural												
Consumo, m ³ /mes	9,635,874.00												
Porcentaje de azufre (%)	0.00												

Nota. Información del informe de monitoreo de 2008 – 1º trimestre.

La información anterior muestra los resultados de los parámetros del flujo y la velocidad de escape de gases por la chimenea, sin embargo, no indica el método aplicado para el cálculo o la información básica relacionada al desarrollo de dichos resultados.

El monitoreo continuo utilizando el CEMS inició las mediciones desde el 1º trimestre de 2008 hasta el 1º trimestre del 2010 mostrando la concentración en ppm y el flujo másico en g/s, en adelante los resultados solo muestran directamente el flujo másico en g/s y algunas mediciones de la concentración expresada en mg/Nm³ para las tres turbinas a gas. La Tabla 11 muestra dichos resultados.

Tabla 11

Resultados del monitoreo continuo de emisiones de turbinas a gas

Parámetros	Concentración @ CN y 15 % O ₂					Límites Máximos Permisibles	
	Fuente de generación	Referencias	Julio	Agosto	Septiembre	Promedio 3er Trimestre 2011	PMA g/s
NOx	TG1 ⁽¹⁾	Concentración (mg/Nm ³)	37.04	36.29	36.84	36.72	19.00
		Flujo (g/s)	13.42	13.15	13.35	13.39	
	TG2 ⁽²⁾	Concentración (mg/Nm ³)	40.02	41.92	41.76	41.23	20.00
		Flujo (g/s)	15.15	15.87	15.81	15.61	
	TG3 ⁽³⁾	Concentración (mg/Nm ³)	0.00	47.56	0.00	47.56	20.00
		Flujo (g/s)	0.00	18.08	0.00	18.08	

(1) El Continuous Emission Monitoring System (CEMS) de la TG1 entró en operación el 13/10/2007, desde esa fecha se registra la data respectiva.

(2) El CEMS de la TG2 entró en operación el 25/06/2009, desde esa fecha se registra la data respectiva.

(3) El CEMS de la TG3 entró en operación el 24/03/2010, desde esa fecha se registra la data respectiva.

Flujo promedio TG-3 1,368,757.75 Nm³/h

Flujo promedio TG-2 1,362,654.74 Nm³/h

Flujo promedio TG-1 1,304,476.02 Nm³/h

Nota. Información de resultados de 2011 – 3º trimestre. Incluye el flujo volumétrico de gases de salida de cada turbina a gas.

La Tabla 12 muestra el resumen de resultados de 2011 – 3º trimestre de emisiones en los puntos de medición que corresponden al monitoreo continuo, sin embargo, no incluye los flujos y la velocidad de los gases de salida, tampoco los cálculos en un anexo.

Tabla 12*Resultados en los puntos de medición – Monitoreo continuo*

Fuentes de emisión	Tiempo de emisión (hr/mes)	Flujo y velocidad de salida de los gases		Flujo de masa y temperatura de salida de los gases		Altura y diámetro de la chimenea		Resultados de las mediciones de emisiones corregidos al 15 % de oxígeno CN: T=0°C, P=1 atm			
		Nm ³ /s	m/s	(kg/h)	(°C)	Alto (m)	Diámetro eq. (m)	Partículas ⁽¹⁾ (mg/Nm ³)	CO (mg/Nm ³)	NO ₂ (mg/Nm ³)	O ₂ (%)
TG1*	720	-	-	-	-	41.00	6.88	-	-	36.72	15.00
TG2*	590	-	-	-	-	41.00	6.88	-	-	41.23	15.00
TG3*	687	-	-	-	-	41.00	6.88	-	-	47.56	15.00

Combustible: Gas natural

Fecha: 21/09/2011

(1) Cálculo por EPA AP-42

* Los datos de la TG1, TG2 y TG3 corresponden al Sistema de Monitoreo Continuo de Emisiones

En el Anexo 6 se muestra información del fabricante Siemens respecto al flujo del gas de salida que es 1 745 634 kg/h y el flujo de combustible que es 36 417 kg/h, a fin de tener los valores de referencia de los parámetros de combustión para una turbina a gas de la misma marca y potencia.

Ciclo combinado. A partir de la conversión a ciclo combinado efectuada el 3º trimestre del 2012 la empresa efectuó durante un año con frecuencia trimestral las mediciones puntuales con un equipo portátil (monitoreo puntual) hasta el 2º trimestre del 2013, cuyos valores se contrastaron con los del sistema de monitoreo continuo de las turbinas en ciclo combinado mediante el CEMS, el cual entró en operación en octubre del 2012. Despues del año 2 se inicia el monitoreo puntual con frecuencia anual.

Los informes deben contener los valores promedio registrados por el sistema de monitoreo continuo de emisiones, con frecuencia trimestral, también incluirán las mediciones puntuales con analizador de gases portátil, cuando corresponda.

(Resolución Directoral N° 335-2009-MEM/AAE, 2009)

3.8.1.2. Procesamiento de la información del monitoreo

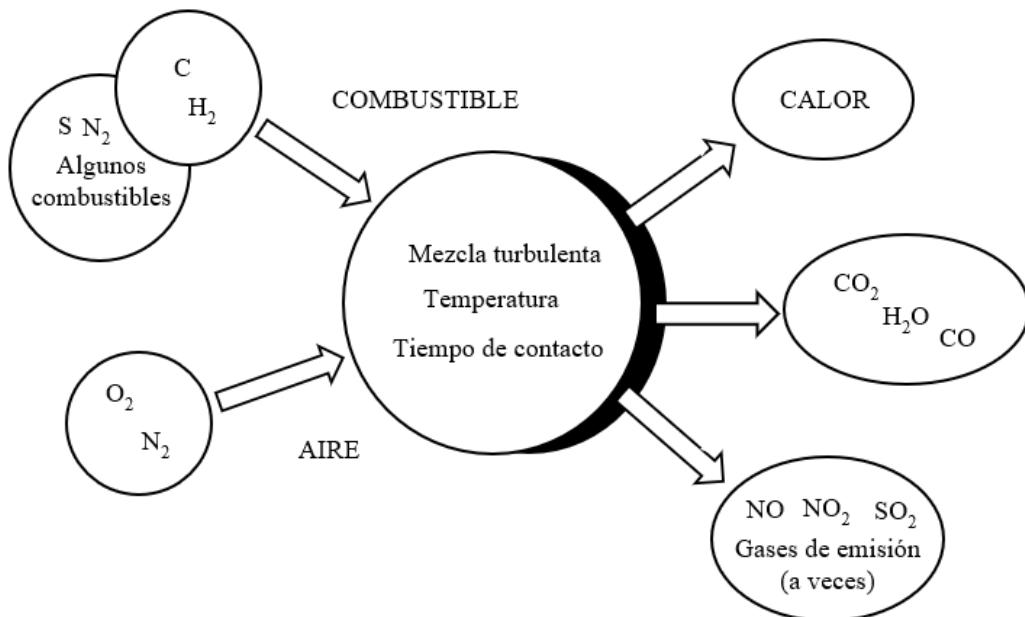
Esta actividad comprende las tareas siguientes:

A. Cálculos de ingeniería. La información utilizada proviene del monitoreo puntual y su desarrollo utilizando los cálculos de ingeniería (hoja de Excel) es el siguiente:

Diagrama de bloques del proceso de combustión. La Figura 22 muestra la formación real de emisiones gaseosas posibles durante la combustión de un combustible.

Figura 22

Diagrama de combustión



Nota. El diagrama muestra el proceso de combustión real de cualquier combustible. Elaborada por el autor.

Composición del combustible. Requiere la información para ingresar la composición molar del gas natural, del flujo de consumo, los parámetros meteorológicos, la temperatura de operación, incluyendo la altura y el diámetro de la chimenea.

Cabe señalar, que el gas natural de Camisea tiene poder calorífico elevado por su contenido de etano alto, que puede ser utilizado en la industria petroquímica. (Santillán, 2011, pp. 12-13).

La Tabla 13 muestra la composición del gas natural previa extracción de los líquidos, utilizada para los cálculos.

Tabla 13*Composición del combustible*

Composición del combustible (% Molar)	Tipo Gas natural (Volumen compuesto/volumen combustible)					Total (g)
	Masa C (g)	Masa H (g)	Masa O (g)	Masa N (g)		
Metano	83.01	996.12	204			
Etano	9.81	235.44	58.86			
Propano	3.59	129.24	28.72			
Butano	1.34	64.32	13.4			
Pentanos y +	1.31	78.6	15.72			
Dióxido de C	0.23	2.76		7.36		
Nitrógeno	0.71				9.94	
Total	100.00	1506.48	320.70	7.36	9.94	1844.48
Densidad relativa =		0.6	adimensional			
Densidad combustible @ sta =		0.7327	kg/m ³ _{GN}		Pe = D com. / D aire	

Nota. Adaptada por el autor.

Reporte de mediciones y resultados corregidos (conversiones). Requiere la entrada de las mediciones de los análisis de gases de chimenea: Temperatura ambiente, la *temperatura de gases*, la concentración de los gases CO, NOx en ppm, porcentajes de CO₂ y O₂, la eficiencia de combustión, el *exceso de aire* (utilizando el instrumento analizador de gases de combustión).

Muestra como salidas la fuente y el tiempo de emisión, el flujo volumétrico y el flujo másico, así como la velocidad del gas de chimenea, la altura y el diámetro de la chimenea, así como las concentraciones convertidas a mg/Nm³ (en condiciones normales corregidas a 15 % de oxígeno, 0 °C y 1 atm de presión) de las emisiones, según el formato establecido por la norma mostrado en la Tabla 8 Información de emisiones a la atmósfera.

Relaciones estequiométricas y flujos. Requiere la entrada de los datos generales (como el número de la turbina, el año, el trimestre), datos del combustible, datos de los parámetros meteorológicos, las relaciones estequiométricas del aire de combustión, flujos másicos del aire, relaciones y los flujos volumétricos y los flujos másicos de los gases de salida. Asimismo, el *exceso de aire y la temperatura de gases*.

La Tabla 14 muestra los cálculos de ingeniería de las relaciones estequiométricas y flujos que determinan los parámetros principales siguientes: Flujo volumétrico y el flujo

másico de los gases de salida, la velocidad y la composición de los contaminantes emitidos en porcentaje en volumen y el índice del exceso de aire (n).

Tabla 14

Relaciones estequiométricas y flujos

CÁLCULOS DE INGENIERÍA

		El ingreso de los datos a la hoja se realiza en las celdas marcadas con este color. Las demás celdas no se modifican.					
1. Datos generales							
<i>Turbina</i>	<i>Ciclo</i>	<i>Año/Trimestre</i>	<i>Fecha</i>				
2	Simple	2011 - 1 T	9/03/2011				
2. Datos del combustible							
<i>Composición: Proviene de la hoja respectiva.</i>							
Consumo mensual de gas natural (GN):	9,291,110	$\text{m}^3/\text{mes} @ T$ operación					
Consumo mensual de gas natural corregido:	8,873,030	$\text{Sm}^3/\text{mes} @ 15$ $^{\circ}\text{C}$					
Horas mensuales de operación:	217.8	h/mes					
Flujo volumétrico de combustible:	40,739	$\text{Sm}^3_{\text{GN}}/\text{h}$					
Densidad del combustible:	0.7327	$\text{kg}_{\text{GN}}/\text{Sm}^3_{\text{GN}}$					
Flujo másico de combustible:	29,850	kg comb/h					
3. Parámetros meteorológicos							
Presión atmosférica:	760.00	mm Hg					
Temperatura ambiente:	28.57	$^{\circ}\text{C}$					
Humedad relativa del aire:	83.08	%					
4. Relaciones estequiométricas del aire de combustión							
Factor lambda medición (1):	" λ "	2.74	aire real / aire mínimo				
Porcentaje de exceso de aire:	$n * 100$	173.97	%				
Índice de exceso de aire medición:	n	1.7397	#				
Factor lambda calculado:	" λ "	2.74	aire real / aire mínimo				
Peso molecular aire seco:	28.84	kg/mol-kg					
Densidad del aire seco @ C.N.:	1.29	kg aire seco/ Nm^3 aire seco					
Humedad absoluta del aire de combustión:	0.0206	kg vap. $\text{H}_2\text{O}/\text{kg}$ a.s.					
Relación volumétrica de aire seco estequiométrico @ C.N.:	11.31	Nm^3 aire est. seco/ m^3_{GN}					
Relación volumétrica de aire real @ C.N.:	30.98	Nm^3 aire real/ m^3_{GN}					
Relación másica de aire_{in} seco estequiométrico por comb.:	14.55	kg aire est. seco/ m^3_{GN}					
Relación másica de aire real:	39.87	kg aire real/ m^3_{GN}					

CÁLCULOS DE INGENIERÍA

5. Flujos másicos del aire

Flujo másico de aire real seco:	1,624,417.60	kg aire real seco/h
Flujo de humedad del aire real:	33,463.00	kg H ₂ O/h
Flujo másico de aire húmedo:	1,657,880.61	kg aire húmedo/h

6. Relaciones y flujos volumétricos de los gases de salida

Relación volumétrica a C.N. (base seca):	29.87	Nm ³ gas/m ³ _{GN}
Relación volumétrica a C.N. (base húmeda):	32.12	Nm ³ gas/m ³ _{GN}
Flujo volumétrico total @ CN (base seca):	1,216,927.17	Nm ³ gas/h
Flujo volumétrico total @ CN (base húmeda):	1,308,332.37	Nm ³ gas/h

7. Relaciones y flujos másicos de los gases de salida

Relación másica (base seca):	38.37	kg gas/m ³ _{GN}
Relación másica (base húmeda):	40.18	kg gas/m ³ _{GN}
Flujo másico total (base seca):	1,563,303.94	kg gas/h
Flujo másico total (base húmeda):	1,636,721.76	kg gas/h
Flujo de agua generada:	73,417.83	kg H ₂ O/h

Densidad del gas seco @ CN: **1.28** kg gas/Nm³gas

Densidad del gas seco @ T salida: **0.41** kg gas/m³gas

Temperatura de salida del gas: 592.07 °C

(1) Ametek Land Technical Bulletin

Se considera combustión completa

Notas

CN = Condiciones normales (gas @ 1 atm de presión y 0°C)

GN = Gas natural

1 ppm = 10⁻⁴ %

Nota. Se considera la combustión completa y el análisis de gases en base seca. Elaborada por el autor.

Para la determinación del porcentaje de error se emplea la fórmula (19) como sigue:

$$\% \text{ error} = \frac{|Valor_{aproximado} - Valor_{exacto}|}{Valor_{exacto}} * 100 \quad (19)$$

Considerando los resultados del monitoreo puntual como valores exactos o teóricos comparados con los valores aproximados o calculados, se obtiene 7 % de porcentaje de error.

Asimismo, la información elaborada permite establecer el rango de variación para los factores de combustión y los parámetros del proceso de combustión considerando tres valores

(mínimo, promedio y máximo) que correspondan a la concentración de las emisiones de los óxidos de nitrógeno NOx.

Determinación de concentración y flujos de emisiones de NOx. Requiere la entrada de la concentración de NOx y el flujo volumétrico de los gases de salida, indicando las condiciones de operación. La Tabla 15 muestra el cálculo del flujo mísico horario de N₂ que reacciona, el flujo mísico anual generado de los óxidos de nitrógeno, la conversión de la concentración a ppm masa o volumen, comparando con el LMP respectivo generado por cada turbina a gas. Los resultados de los flujos volumétricos (m³/h) y mísicos (kg/h) serán utilizados para la elaboración detallada del balance de materia y energía de la turbina a gas.

Tabla 15

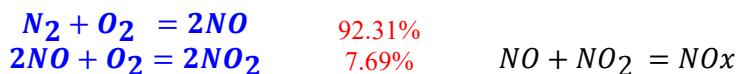
Determinación de concentración y flujos de emisiones de NOx

Flujo mísico de NOx

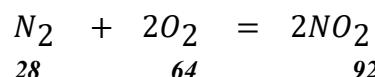
$$\text{Flujo mísico (G. N. + aire)} = \text{Flujo mísico}[(CO_2 + CO + COV)g + N_2 + O_2 \text{ exceso} + NOx]$$

Dato	Dato	?	Dato	Dato
------	------	---	------	------

Reacciones a elevada temperatura:



Base estequiométrica (kg/h)



19.78 45.20 64.98 kg/h

DATOS

Concentración de NOx (según medición)	53.39	mg/Nm ³ gas
Factor lambda (λ)	2.74	aire real / aire mínimo
Flujo volumétrico total de gases a CN	1 216 927	Nm ³ gas/h
Flujo mísico de NOx medido	64.98	kg NO _x /h
Nº de horas de operación anual	2 614	h/año
		169.82 t/año

Balance de masa en base seca:

RESULTADOS

Relación mísica de aire _{in} estequiométrico	14.55	kg aire seco/m ³ _{GN}
Flujo de combustible	40739	m ³ _{GN} /h
Flujo mísico de aire total que ingresa	1 624 418	kg aire seco/h
Flujo mísico de N ₂ que ingresa	1 245 928	kg N ₂ /h

Flujo másico de NO_x

Flujo másico de N ₂ que reacciona	19.78	kg N ₂ /h	
Flujo másico de N ₂ a la salida	1 245 909	kg N ₂ /h	
Porcentaje másico de N ₂ para generar NO _x	0.001587	%	
Concentración de NO_x	41.56	ppm masa	kg NO _x /kg gas seco
Concentración de NO_x	26.20	ppm volumen	m ³ NO _x /m ³ gas seco

Nota. Cálculo realizado en la hoja Excel respectiva. Elaborada por el autor.

B. Elaboración del balance de materia y energía de la turbina a gas. El balance de materia y energía utiliza la información de los cálculos de ingeniería y su desarrollo es el siguiente:

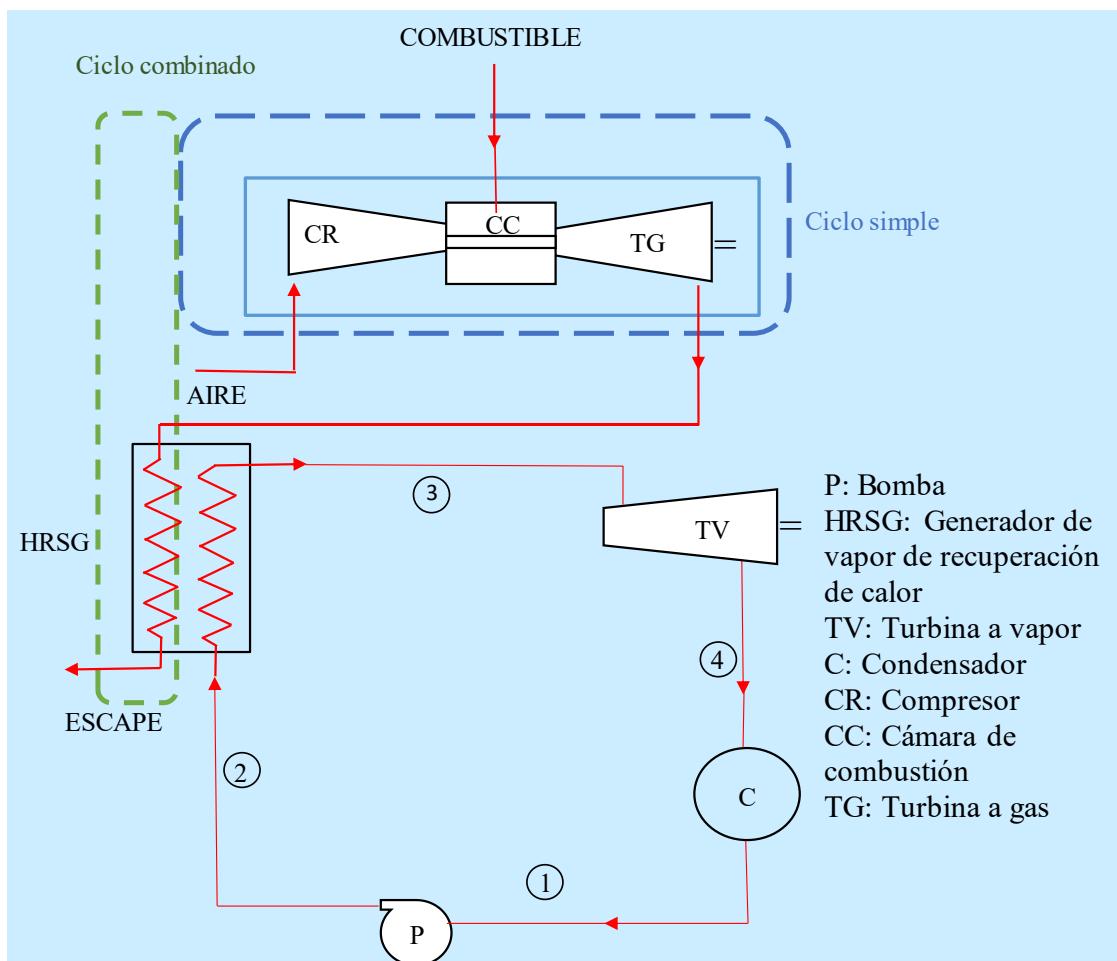
Cálculos del balance de materia y energía de la turbina a gas. Comprende la información siguiente:

- j. Diagrama de flujo del ciclo combinado.
- k. Los cálculos del balance de materia requieren: Datos de la turbina, condiciones ambientales, condiciones de referencia, la potencia instalada, la producción de energía eléctrica y las horas de operación, los datos del combustible, los datos del aire de combustión, la estequiometría de la reacción, los datos del gas de chimenea, el % de error de mediciones de NO_x, los cálculos del flujo másico de NO₂.
- l. Cuadro resumen del balance de materia con las entradas y salidas según el diagrama.
- m. Cálculos del balance de energía que comprenden: Cálculo de la eficiencia eléctrica, cálculo de la entalpía de gases de salida.
- n. Cuadro resumen del balance de energía con las entradas y salidas según la ecuación termodinámica del sistema abierto.

La Figura 23 muestra el diagrama respectivo, incluyendo el volumen de control utilizado.

Figura 23

Diagrama de flujo del ciclo combinado



Nota. Elaborada por el autor.

En la Tabla 16 se observa el balance de materia y energía para la turbina a gas (consolidado).

Tabla 16

Balance de materia y energía para la turbina a gas (consolidado)

BALANCE DE MATERIA					
Entradas (E)	kg	Nm ³	Salidas (S)	kg	Nm ³
Combustible:	31,870	43,495	Gases (base seca):	1,694,042	1,298,345
Aire seco de combustión:	1,734,337	1,347,057	CO ₂	107,210	54,604
O ₂	404,100	282,882	O ₂	256,548	179,549
N ₂	1,330,236	1,064,175	N ₂	1,330,215	1,064,159
			NO ₂	69.37	34
			H ₂ O gen.	78,386	97,590
Humedad del aire:	35,727	44,727	Humedad del aire:	35,727	142,318

Total	1,801, 934	1,390,553	Total	1,808,155	1,298,345
BALANCE DE ENERGÍA					
<i>Entradas (E)</i>	kJ	%	<i>Salidas (S)</i>	kJ	%
Aire:	0		Energía útil:	7.052E+05	37.23
Calor de reacción del combustible:	1.894E+06	100.00	Gases secos de chimenea:	1.106E+09	58.41
			Radiación y otros:	8.262E+07	4.36
Total	1.894E+06	100.00	Total	1.894E+06	100.00

Eficiencia térmica (%): **37.23**

Nota. El balance de materia y energía tiene la base de 1 hora. Elaborada por el autor.

Instrucciones para determinar la temperatura de llama. Comprende la información para determinar la temperatura de llama utilizando el balance de energía. La Tabla 17 muestra las instrucciones correspondientes.

Tabla 17

Instrucciones para determinar la temperatura de llama

Cálculo de la temperatura de llama.

Calor de reacción = Energía útil (eléctrica) + Gases calientes + Calor cedido (Q)

Considerando proceso adiabático $Q = 0$, se calcula la temperatura de combustión (temperatura de llama). A condiciones adiabáticas, el flujo de calor (Q) es cero, entonces la energía del término radiación y otros es 0.

La energía de los gases de combustión por tanto se debe incrementar, a fin de alcanzar el 100 %.

Energía a T de llama en gases secos = Gases secos + Radiación y otros (Q)

Por ejemplo, para los valores del balance, se tiene:

Energía a T de llama en gases secos = **1.189E+09** kJ/h Representa: **62.77 %**

Método

Iterar la temperatura de chimenea hasta que **Hout** alcance el porcentaje de **62.77**

Considera eliminar las pérdidas de energía por radiación y otros.

Iterar la temperatura manteniendo el % de la energía útil en su valor inicial = **37.23**

La temperatura resulta en 631,65 °C.

Nota. Elaborada por el autor.

El tratamiento y el procesamiento de la información proveniente del monitoreo puntual de los óxidos de nitrógeno emitidos, permite aproximar la influencia del rango de variación utilizando tres valores (mínimo, promedio, máximo) para los factores de combustión de gas

natural: Exceso de aire (%) y la temperatura del gas de escape (°C), asociados a los parámetros del proceso como son los flujos volumétrico y másico, así como la velocidad de los gases de salida.

La Tabla 18 muestra el formato actualizado para indicar el rango de valores para los factores de combustión de gas natural y también los parámetros del proceso determinados mediante la aplicación de los cálculos de ingeniería para el cumplimiento del primer objetivo específico.

En el capítulo siguiente se muestra el registro de las mediciones y los resultados de los cálculos de ingeniería empleando el formato mencionado.

Los cálculos mostrados mediante la Tabla 14 Relaciones estequiométricas y flujos, permite determinar los parámetros de combustión que se muestran en la Tabla 23 Registro de los valores de las mediciones y los resultados de los cálculos de ingeniería ubicada en el Capítulo V. Resultados, la cual resume la información del procesamiento de la data.

Tabla 18

Formato para los factores de combustión de gas natural obtenidos y los parámetros del proceso

Código del equipo/ Año - Trimestre	Datos del combustible (1)		Datos de los gases de salida (2)						Datos de la chimenea		Datos de las emisiones en (mg/Nm ³) (3)						
	Flujo (u/t)	Energía (MWh)	Potencia (MW)	h/mes	Volumétrico (Nm ³ /h)	Másico (kg/h)	Velocidad (m/s)	Temperatura (°C)	Altura (m)	Diámetro (m)	PM ₁₀	CO ₂	CO	NO ₂	NO	O ₂	n (%)

Nota. u = unidad de volumen o masa, t = tiempo, n = Índice de exceso de aire.

- (1) Especificar su composición, flujo y densidad ρ a la temperatura de ingreso a la turbina.
- (2) Para los cálculos de ingeniería, además se requiere la temperatura del aire ambiente, humedad relativa, heat rate (consumo específico) de la turbina.
- (3) Las tres mediciones de emisiones de NOx se ordenan según su valor mínimo, promedio y máximo.

Adaptada por el autor.

3.8.2. Verificación de la aplicación de la tecnología Dry Low NOx (DLN) de baja emisión de NOx

Se presenta el proceso para verificar la aplicación de la tecnología Dry Low NOx (DLN) de baja emisión de NOx, respecto a que la temperatura de combustión del gas natural o el porcentaje de exceso de aire influyen sobre la generación de emisiones gaseosas de óxidos de nitrógeno (NOx) en una turbina a gas de ciclo combinado. En el Anexo 4 Validación de instrumentos, en la Ficha 4: Instrucciones para la verificación de la aplicación de la tecnología Dry Low NOx (DLN) de baja emisión de NOx, se muestra el detalle de los pasos del proceso correspondiente.

La actividad para este objetivo consiste en el desarrollo del:

3.8.2.1 Método de cálculo de la cinética química de la formación de óxido nítrico

– **NO.** Comprende las tareas siguientes:

A. Determinación de la temperatura y la concentración teórica de las emisiones de NO. Consiste en la determinación de la temperatura teórica de llama máxima (Tllt), empleando el balance de energía (según los cálculos de la hoja Excel respectiva) y la concentración de NO (C_{NO}) mediante las ecuaciones del mecanismo de Zeldovich, a fin de graficar la curva C_{NO} vs. Tllt.

Determinación de la energía libre estándar para la disociación del oxígeno. La determinación de la concentración de NO utilizando las ecuaciones del mecanismo de Zeldovich requieren hallar la energía libre de Gibbs para las temperaturas de llama en el rango de 800 a 2500 K (en intervalos de 50 K). En el Anexo 4, la Ficha 4 muestra las instrucciones, siguiendo el paso 1 se puede realizar el cálculo incluyendo las fuentes de información con las tablas termodinámicas y la Tabla 19 muestra el cálculo para determinación de la energía libre estándar a la temperatura de 2500 K (como un ejemplo).

Tabla 19*Determinación de la energía libre estándar*

Cálculo de la energía libre a la temperatura de:	2500 K		
Compound	ΔH°_f a $T_{ref}=298K$ (kJ/mol)	ΔH a $T=2500$ (kJ/mol)	ΔS°_T (kJ/mol K)
O_2	0	78.375	0.277207
O	249.197	46.12	0.2058

Calcular ΔG°_{2500}

$$\Delta G^\circ_T = 2\Delta G^\circ_T O - \Delta G^\circ_T O_2 \quad [1]$$

$$\Delta G^\circ_T = 2 * (h - TS)O - 1 * (h - TS)O_2 \quad \text{De la formula } \Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

$$\Delta G^\circ_T = 2 * [(h_f + h_{2500} - h_{298}) - TS_T]O - 1 * [(h_f + h_{2500} - h_{298}) - TS_T]O_2$$

$$\Delta G^\circ_T = 2 * [(249,197 + 46,12) - 2500 * 0,2058]O - 1 * (0 + 78,375) - 2500 * 0,2773]O_2$$

$$\Delta G^\circ_T = 176,509 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \quad \text{Reemplazando en [1]}$$

$$176\,455 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} = 2 * \Delta G^\circ_T O - 1 * (0) O_2$$

$$2 * \Delta G^\circ_{2500} O = 176.2765$$

$$\Delta G^\circ_{2500} O = 88.138$$

Nota. Cálculo realizado en la hoja Excel respectiva, según el rango de la temperatura adiabática de llama. Elaborada por el autor.

Determinación de la concentración de NO. La Tabla 20 muestra el proceso según el Anexo 4, Ficha 4, paso 2, que aplica la ecuación del mecanismo propuesto por Zeldovich para calcular el *valor teórico* de la concentración de óxido nítrico (NO) en función de la temperatura teórica de llama máxima.

Tabla 20*Determinación de la concentración de NO mediante el mecanismo de Zeldovich***CINÉTICA QUÍMICA****DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE NO**

Usamos la ecuación según el mecanismo propuesto por Zeldovich.

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2k_{1f} \left[\frac{k_p P^0}{R_u T} \right]^{1/2} [N_2][O_2]^{1/2}$$

DATOS

Ingresar solo en celdas en amarillo.

1 atm = 101325 Pa

Presión del aire (P°)	=	3	atm	303.975	kPa
Temperatura de llama	=	2227	°C	2500	K
Tiempo	=	0.25	ms	2.50E-04	s
X N ₂ (fracción molar)	=	0.79			
X O ₂ (fracción molar)	=	0.21			
R (constante universal)	=	8.315	m ³ *kPa/kmol*K		
Coeficiente k _{1f}	=	1.82*10 ¹⁴ *exp(-38370/T (K))	cm ³ /molg-s		

Determinar la concentración de NO en 25 milisegundos.**SOLUCIÓN**

a. Conversión de fracción molar a concentración molar:

$$[N_2] = 1.155E-02 \text{ kmol/m}^3$$

$$[N_2] = X_{N2} \frac{P}{R_u T}$$

$$[O_2] = 3.071E-03 \text{ kmol/m}^3$$

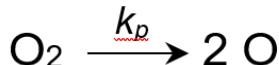
$$[O_2] = X_{O2} \frac{P}{R_u T}$$

b. Determinación del coeficiente de velocidad:

$$k_{1f} = 1,82 * 10^{14} * \exp\left(-\frac{38370}{2500}\right)$$

$$\text{Coeficiente } k_{1f} = 3.93E+07 \text{ cm}^3/\text{mol*s}$$

$$\text{Coeficiente } k_{1f} = 3.93E+04 \text{ m}^3/\text{kmol*s}$$

c. Determinación de la energía libre asociada a la constante de equilibrio k_p: $\ln k_p = \frac{\Delta G^0 T}{R_u T}$ *Espontaneidad de la reacción.*

Aplicando la variación de energía libre estándar para la reacción anterior a partir de la formación.

d. Evaluación de d[NO]/dt:
$$\frac{d[NO]}{dt} = 2k_{1f} \left[\frac{k_p P^0}{R_u T} \right]^{1/2} [N_2][O_2]^{1/2}$$

Nota: Conversión de R = 8315 Pa

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2 * (3,93 * 10^4) \left[\frac{21,03}{8315 * (2500)} \right]^{1/2} 1.155 * 10^{-2} (3,071 * 10^{-3})^{1/2} =$$

$$d[NO]/dt = 0.0506 \text{ kmol/m}^3*\text{s}$$

En términos de ppm.

$$\frac{dX_{NO}}{dt} = \frac{R_u T}{P^0} * \frac{d[NO]}{dt}$$

$$\frac{dX_{NO}}{dt} = \frac{8315 * (2500)}{3 * 101325} * 0,0505 = 3,45 \text{ (kmol/kmol)/s}$$

$$\begin{aligned} \frac{dX_{NO}}{dt} &= 3,46 \text{ (kmol/kmol)/s} \\ \frac{dX_{NO}}{dt} &= 3,46E+06 \text{ ppm/s} \end{aligned}$$

e. Expresando en ppm al tiempo de residencia.

$$\int^{[NO](t)} d[NO] \int_0^t k_G [N_2][O_2]^{1/2} dt$$

$$[NO](t) = k_G [N_2][O_2]^{1/2} t$$

$$[NO](t) = 0,0506 * (0,25 * 10^{-3}) = 1.266 * 10^{-5} \text{ kmol/m}^3$$

$$[NO](t) = 1.266E-05 \text{ kmol/m}^3$$

$$X_{NO} = [NO] \frac{R_u T}{P}$$

$$X_{NO} = 1,266 * 10^{-5} \left(\frac{8315 * (2500)}{3 * (101325)} \right) = 8,64 * 10^4 \text{ kmol/kmol}$$

$$\begin{aligned} X_{NO} &= 8.656E-04 \text{ kmol/kmol} \\ X_{NO} &= 865.58 \text{ ppm} \end{aligned}$$

Nota. Cálculo realizado en la hoja Excel respectiva. Elaborada por el autor.

Los cálculos de la cinética química requieren: Datos de la presión y las fracciones molares del aire ambiente, temperatura adiabática de llama en el combustor, el tiempo de residencia (según el dato de fabricante), la constante universal de los gases ideales (expresada en 8,315 m³*kPa/kmol*K) y el coeficiente de velocidad de la reacción en función de la temperatura. Asimismo, la determinación de valores de energía libre estándar asociada a la constante de equilibrio kp de la reacción de disociación del oxígeno.

En el capítulo IV Resultados, la Figura 26 Curva de concentración teórica de emisiones de NO muestra los valores obtenidos del proceso de cálculo utilizando la ecuación cinética del mecanismo de Zeldovich.

B. Determinación de la temperatura adiabática de llama en el combustor. Según el Anexo 4, Ficha 4, siguiendo los pasos 3 y 4 se grafican la temperatura de llama máxima (Tll) y la temperatura de llama del combustor (Tllc) (calculada según el ítem 4.1.2.2. Elaboración del balance de materia y energía de la turbina a gas, inciso B).

La T_{llc} se calcula utilizando el balance de energía de la turbina a gas en condiciones de operación en ciclo combinado (en el ciclo combinado la recuperación de calor en el generador de vapor disminuye la temperatura de los gases de salida), es decir, considerando la aplicación de la tecnología de reducción de emisiones de NOx denominada Dry Low NOx (DLN), obteniendo los valores de la temperatura adiabática de llama en el combustor (T_{llc}),

C. Comparación de la temperatura teórica de llama máxima y la temperatura adiabática de llama en el combustor. La información elaborada para mostrar la comparación de la temperatura teórica de llama máxima y la temperatura adiabática de llama en el combustor (diferencia), se muestra en el capítulo V Resultados, ítem 5.2.1.3 Comparación de la temperatura teórica de llama máxima y la temperatura adiabática de llama en el combustor.

D. Determinación de la influencia del porcentaje de exceso de aire. Según el Anexo 4, Ficha 4, siguiendo los pasos 5 y 6 se determinan los valores y elaboran las gráficas correspondientes.

Las tablas y figuras obtenidas se muestran en el capítulo V Resultados, ítem 5.2.1.4 Determinación de la influencia del porcentaje de exceso de aire.

La aplicación del método de cálculo de la cinética química de la formación de óxido nítrico – NO determinará la influencia del rango de variación de la temperatura adiabática de llama en el combustor, la concentración medida de NO (utilizando los valores mínimos, promedio, máximo) en función del porcentaje de exceso de oxígeno.

Por lo tanto, se determinará el cumplimiento de la disminución de la temperatura adiabática de llama en el combustor y la disminución de la concentración medida de NO como emisión obtenida según el proceso de cálculo descrito anteriormente, verificando que si existe la reducción de la generación de óxidos de nitrógeno relacionado al óxido nítrico (NO) en los gases de chimenea en función de la aplicación de la tecnología Dry Low NOx (DLN).

3.8.3. Predicción de la influencia de los principales factores de combustión de gas natural sobre la generación de nitrógeno reactivo

Se presenta la estrategia para predecir la generación de nitrógeno reactivo o huella de nitrógeno mediante el empleo del modelo dinámico de Forrester, mostrando la influencia de los principales factores de combustión de gas natural tales como el porcentaje de exceso del aire y la temperatura del gas de salida en la generación de los óxidos de nitrógeno por una turbina a gas de ciclo combinado.

La actividad para este objetivo consiste en:

3.8.3.1. Desarrollo del modelo dinámico para determinar la influencia de los principales factores de combustión de gas natural

Comprende las tareas siguientes:

A. Elaboración del diagrama causal del sistema. Teniendo identificado correctamente el problema de investigación y el análisis del comportamiento, en esta etapa se establecen los conceptos relacionados y los límites del sistema, Se recopila la información y enumeran todas las variables requeridas para el sistema, seleccionando las variables clave asociadas para determinar la realimentación que gobierna su dinámica, así como analizar sus comportamientos.

La recolección de datos, formulación del procesamiento y la obtención de resultados (hojas Excel), está definido mediante el uso de fichas, que se muestran en el ítem 3.4.3.1 Ficha 5. Registro de parámetros para el modelo dinámico.

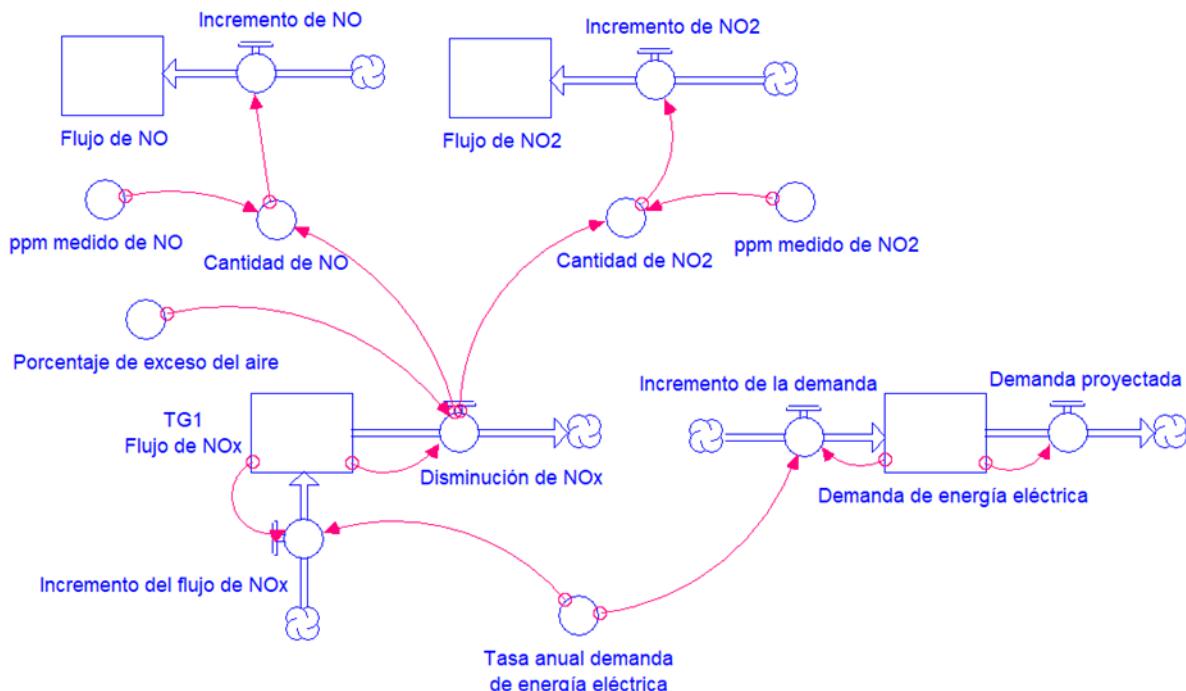
B. Elaboración del modelo matemático del sistema. El modelo establece las ecuaciones que relacionan el porcentaje de exceso de aire y la temperatura de los gases de

salida con la generación de nitrógeno reactivo con sus respectivas tasas de crecimiento obteniéndose la simulación cuantitativa de su comportamiento para los próximos años.

La Figura 24 muestra el modelo dinámico elaborado, el cual se desarrolla dinámicamente en una interacción permanente entre dos lazos. Los flujos de cada una de las variables y explicaciones del desarrollo de cada caso han sido interrelacionados con el programa Stella 10.0.6.

Figura 24

Modelo dinámico para la determinación de la huella de nitrógeno de una turbina a gas



Nota. La figura muestra el modelo dinámico propuesto por el autor.

La secuencia del flujo es la siguiente: Calculado el flujo másico de NO_x es relacionado con el porcentaje de exceso de aire (o temperatura de gases de salida), lo cual produce el incremento del flujo mencionado, incluyendo la tasa anual de demanda de energía eléctrica para ambos casos. La salida del flujo másico de NO_x de la turbina a gas 1 al ambiente ocasiona la disminución del flujo de NO_x debido a que origina cantidades proporcionales de NO y de NO_x que corresponden a las partes por millón (ppm) medidas mostrando luego los incrementos de los flujos másicos de cada gas, determinando la huella de nitrógeno total.

C. Variables del diagrama. La Tabla 21 muestra y explica con mayor detalle las variables del diagrama de Forrester mostrado en la Figura 24 anterior.

Tabla 21

Valores de las variables del modelo

Factores endógenos	Unidad	Escenario 1 – Exceso de aire	Escenario 2 – Temperatura de gases
Δ Porcentaje de exceso de aire	%	5	-
ΔTemperatura de gases de salida	°C	-	11.6
Incremento de flujo de NOx	t/año	-	-
Flujo de NOx TG1	t/año	284	284
Disminución de NOx	t/año	-	-
ppm medido de NO	-	16/17	16/17
Cantidad de NO	t/año	-	-
Incremento de NO	t/año	-	-
Flujo de NO	t/año		-
ppm medido de NO ₂	-	1/17	1/17
Cantidad de NO ₂	t/año	-	-
Incremento de NO ₂	t/año	-	-
Flujo de NO ₂	t/año	-	-
Demanda de energía eléctrica	MW	1,631,280	1,631,280
Tasa anual de demanda de energía eléctrica	%	1.85	1,85
Generación de nitrógeno reactivo.	t/año	-	-

Nota. TG1 = Turbina a gas 1, t = tiempo, n = Índice de exceso de aire

Por lo tanto, la utilización del algoritmo permite predecir el flujo másico de nitrógeno reactivo obteniendo los resultados mediante el programa informático STELLA, el cual es un modelo informático basado en conceptos matemáticos fundamentado en el método de Dinámica de Sistemas.

IV. RESULTADOS

Se presentan los principales hallazgos en relación con los objetivos y sus actividades descritas en el capítulo anterior.

4.1. Determinación de la influencia de la variación de los principales factores de combustión de gas natural

Se realizaron las actividades siguientes:

4.1.1. Tratamiento de la información del monitoreo

En relación con esta actividad se presenta los resultados siguientes:

4.1.1.1. Verificación de los resultados del monitoreo. Desde el 2º trimestre del 2014 en adelante la empresa prosiguió el monitoreo puntual en ciclo combinado solo con frecuencia anual teniendo los datos hasta el año 2020, es decir, viene cumpliendo su compromiso de la comparación de los resultados del monitoreo puntual con los del monitoreo continuo.

La Tabla 22 muestra el Resumen de resultados de Monitoreo Puntual (M.P.) y Monitoreo Continuo (M.C.) de las turbinas a gas, que corresponde al registro histórico recolectado mediante la Ficha 1, de los valores de las mediciones puntuales y continuas de las emisiones gaseosas de NOx efectuadas con frecuencia trimestral del período 2007 al 2019, en ciclo simple y ciclo combinado para las tres (3) Turbinas a Gas (TG) evaluadas.

Se observa en la Tabla 23 que los valores promedios del monitoreo puntual de concentración medida de NOx están expresados en ppm (promedio de tres mediciones), luego son convertidos a mg/Nm³ a Condiciones Normales (C.N.) de presión y temperatura y también normalizadas para dilución a 15 % de O₂. Además, muestra el resumen del monitoreo continuo con los valores de NOx en concentración expresados en mg/Nm³ y el flujo másico en g/s, a fin de compararlos con los LMP.

Tabla 22

Resumen de resultados de Monitoreo Puntual (M.P.) y Monitoreo Continuo (M.C.) de las turbinas a gas

CICLOS	AÑO/ TRIMESTRE	PROMEDIO DE CONCENTRACIÓN MEDIDA DE NO _x (1)						CONVERSIÓN DE RESULTADOS PROMEDIO DE NO _x (2)									CONCENTRACIÓN NOx (3)			CONCENTRACIÓN NO _x (4)			
		M.P. (ppm)			M.C. (ppm)			M.P. (mg/Nm ³) @ C.N.			M.P. (mg/Nm ³) @ C.N. y 15 % O ₂			M.P. (g/s)			M.C. (mg/Nm ³)			M.C. (g/s)			
		TG1	TG2	TG3	TG1	TG2	TG3	TG1	TG2	TG3	TG1	TG2	TG3	TG1	TG2	TG3	TG1	TG2	TG3	TG1	TG2	TG3	
CICLO SIMPLE	2007 4T	29.33	-	-	-	-	-	60.24	-	-	49.25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2008 1T	19.67	-	-	22.25	-	-	40.39	-	-	44.39	-	-	-	-	-	-	46	-	-	-	-	-
	2008 2T	29.67	-	-	22.57	-	-	60.92	-	-	50.36	-	-	-	-	-	-	46	-	-	-	-	-
	2008 3T	-	-	-	22.93	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	47	-	-	-	-	-
	2008 4T	-	-	-	23.77	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	49	-	-	16.38	-	-
	2009 1T	-	-	-	20.28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	42	-	-	12.76	-	-
	2009 2T	20.33	24.00	-	17.84	19.26	-	41.76	49.29	-	35.15	42.25	-	-	-	-	-	37	39	-	3.72	3.96	-
	2009 3T	-	-	-	18.64	18.48	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	38	38	-	13.5	14.07	-
	2009 4T	16.67	8.33	-	18.49	17.51	-	34.23	17.11	-	41.24	15.10	-	-	-	-	-	38	36	-	13.95	12.00	-
	2010 1T	19.33	29.43	-	16.62	16.31	-	39.70	45.86	-	35.56	38.39	-	-	-	-	-	34	33	-	10.12	10.90	-
	2010 2T	21.67	-	-	-	-	-	44.49	-	-	38.15	-	-	15.56	-	-	36.45	35.89	41.13	13.10	13.40	15.44	
	2010 3T	-	-	23.00	-	-	-	-	-	47.23	-	-	39.53	-	-	17.06	-	-	-	-	15.38	18.31	15.69
	2010 4T	-	-	21.00	-	-	-	-	-	43.13	-	-	35.45	-	-	15.13	-	-	-	-	12.52	13.15	13.6
	2011 1T	-	26.07	18.00	-	-	-	-	53.39	36.96	-	45.64	30.02	-	17.72	12.71	-	-	-	-	11.83	12.42	13.61
	2011 2T	21.67	-	-	-	-	-	44.49	-	-	38.15	-	-	15.56	-	-	36.45	35.89	41.13	13.07	13.40	15.44	
	2011 3T	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	36.72	41.23	47.56	13.39	15.61	18.08	
	2011 4T	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	36.71	37.43	37.02	13.29	14.17	14.08	
	2012 1T	-	18.37	20.67	-	-	-	-	38.33	42.44	-	32.49	34.19	-	12.4	11.84	-	-	-	-	11.05	11.15	10.47
	2012 2T	19.33	-	-	-	-	-	39.70	-	-	33.18	-	-	13.26	-	-	33.95	33.22	40.18	11.84	11.10	11.88	

CICLOS	AÑO/ TRIMESTRE	PROMEDIO DE CONCENTRACIÓN MEDIDA DE NO _x (1)						CONVERSIÓN DE RESULTADOS PROMEDIO DE NO _x (2)						CONCENTRACIÓN NO _x (3)			CONCENTRACIÓN NO _x (4)					
		M.P. (ppm)			M.C. (ppm)			M.P. (mg/Nm ³) @ C.N.			M.P. (mg/Nm ³) @ C.N. y 15 % O ₂			M.P. (g/s)			M.C. (mg/Nm ³)					
		TG1	TG2	TG3	TG1	TG2	TG3	TG1	TG2	TG3	TG1	TG2	TG3	TG1	TG2	TG3	TG1	TG2	TG3			
2017	4T	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
2018	1T	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
2018	2T	15.47	14.57	14.70	-	-	-	-	-	-	27.2	26.45	26.76	12.04	9.31	11.4	30.27	32.66	32.53	9.92	10.90	10.48
2018	3T	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2018	4T	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	29.97	34.03	35.54	8.70	12.45	12.73
2019	1T	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	23.85	32.56	30.34	6.34	8.14	9.20
2019	2T	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2019	3T	-	-	-	15.26	16.08	16.90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	31.28	32.97	34.65	11.02	11.04	11.78
2019	4T	-	-	-	14.18	15.37	16.62	-	-	-	-	-	-	-	-	-	29.06	31.50	34.07	7.92	8.46	11.94
2020	1T	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2020	2T	16.3	-	17.9	-	-	-	-	-	-	29.70	-	31.60	3.53	-	3.81	32.92	18.10	32.27	9.67	6.93	11.93

Nota. (1) Mediciones en ppm: MP hasta 2015-2º trimestre según la frecuencia establecida y operación de cada turbina, de MC solo hasta 2010-1º trimestre.

(2) Conversión a mg/Nm³: MP desde 2010-2º trimestre. Los años anteriores no se informó el flujo volumétrico de gases, necesario para determinar el flujo másico en g/s.

(3) Conversión a mg/Nm³: MC desde 2008-1º trimestre hasta 2010-1º trimestre, en adelante estos datos fueron registrados directamente.

(4) Flujo másico (g/s): El MC para todas las turbinas en ciclo simple inició el 2010-2º trimestre y siguió luego con ciclo combinado.

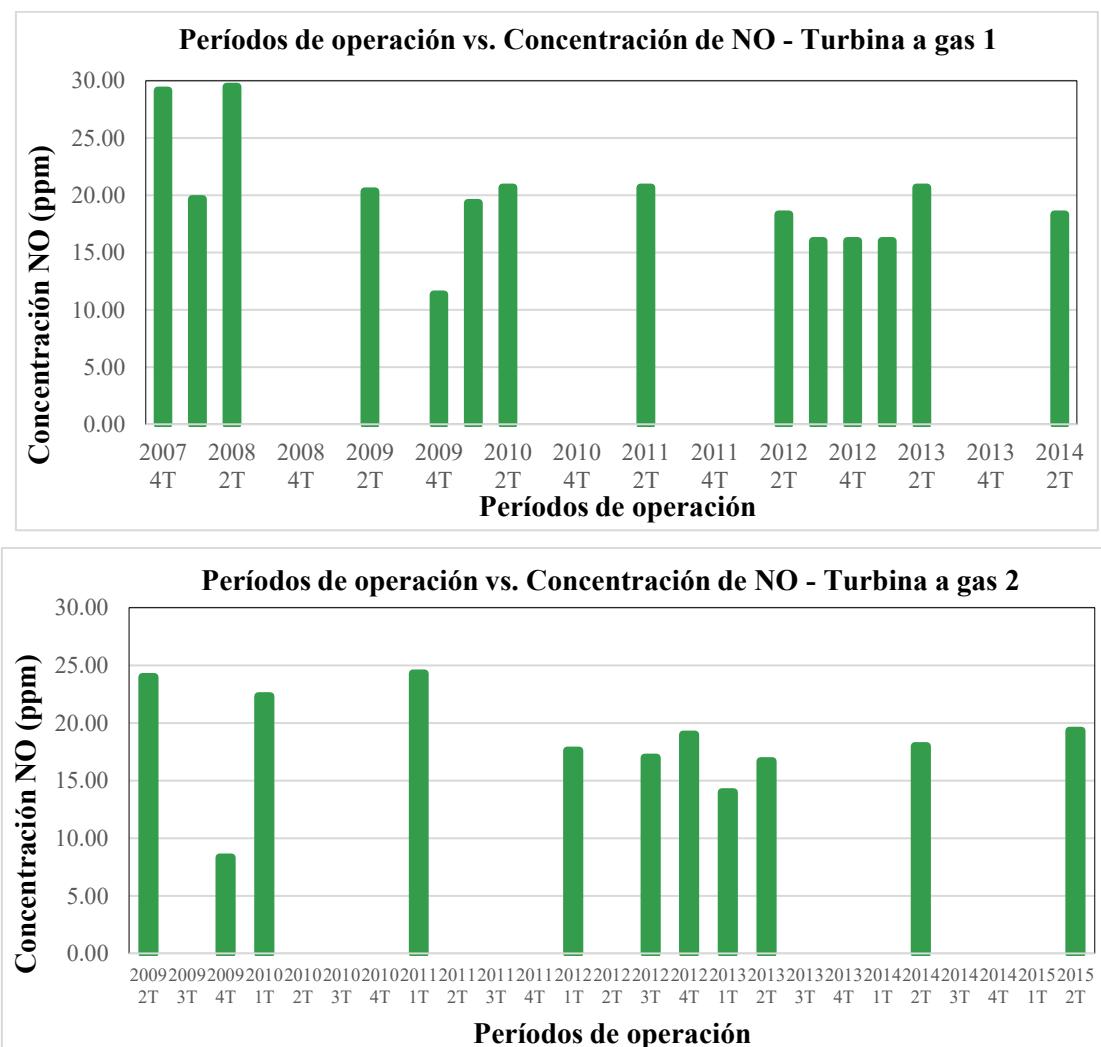
Adaptada por el autor.

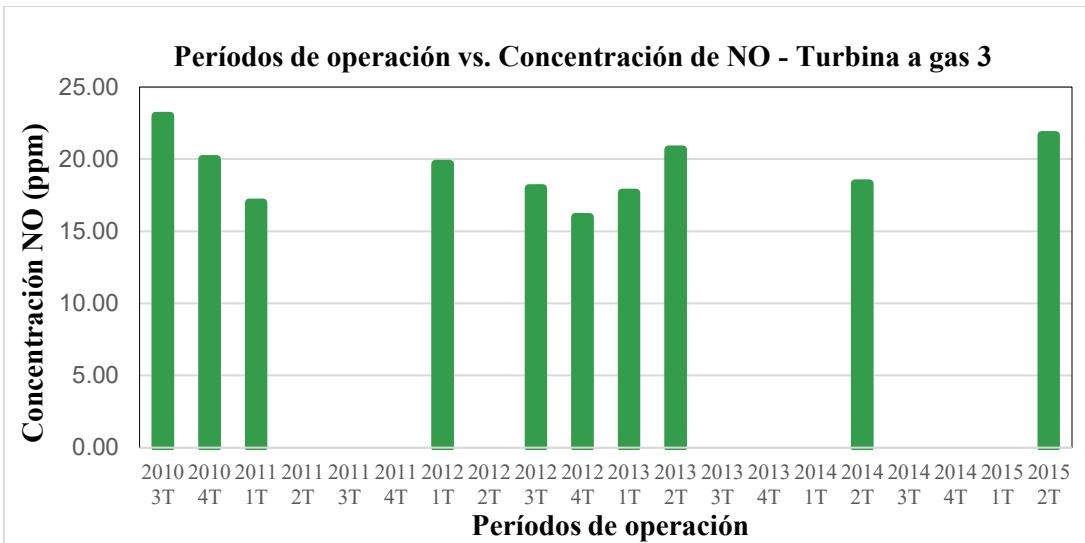
Del 4º trimestre de 2007 al 1º trimestre de 2010, se utilizaron los valores LMP de comparación de NOx de 25,00 ppm y 51,25 mg/Nm³ correspondientes @ CN y 15 % de O₂ referido a base seca, establecidos en el EIA para ambos tipos de monitoreo. En adelante, la información revisada muestra los valores Límites Máximos Permisibles (LMP) de flujo (g/s) para comparación de la turbina a gas TG1 (19) y las TG2 y TG3 (20) establecidos en el PMA y el otro LMP del World Bank (WB) para la concentración de 125 mg/Nm³, según el Summary of Air Emission and Efluent Discharge Requirements Presented in the Industry Guidelines.

La Figura 25 muestra la variación de la concentración de NO en ppm en función de los períodos de operación en ciclo simple y luego en ciclo combinado de cada turbina.

Figura 25

Concentración de NO vs. períodos de operación para las turbinas a gas





Nota. La diferencia de las mediciones efectuadas a las TG: La turbina a gas 1 (14), turbina a gas 2 (11) y la turbina a gas 3 (10) se debe a la instalación progresiva de cada equipo. Elaborada por el autor.

4.1.2. Procesamiento de la información del monitoreo

En relación con esta actividad se tiene:

4.1.2.1. Cálculos de ingeniería. La evaluación de la información del monitoreo puntual y la verificación de los cálculos permitió detectar los hallazgos siguientes:

A. Combustible. Por omisión de la composición volumétrica, temperatura de ingreso a la turbina a gas.

B. Relaciones estequiométricas y flujos. Por omisión de la referencia en base seca o húmeda de los flujos de los gases de salida.

Por la diferencia de los resultados relacionados a los valores del flujo máscico del gas de salida según los resultados del monitoreo corresponden aproximadamente a la mitad del valor teórico calculado. Asimismo, se determinó la relación de los valores de velocidad del gas de salida de las mediciones con respecto a los calculados en el valor de 1 a 1.69 respectivamente, para el ciclo combinado.

La Tabla 23 muestra el registro de los parámetros de combustión correspondiente al registro de los valores de las mediciones y los resultados de los cálculos de ingeniería para la turbina a gas 1 (TG1) tomando como referencia el formato de la Tabla 19 (referida a la norma).

Además, los factores de combustión de gas natural: Porcentaje de exceso de aire (%), temperatura del gas de salida (°C), así como los parámetros de proceso: Flujo volumétrico del gas de salida (Nm³/h), el flujo mísico de NOx (t/año), ambos valores obtenidos mediante las relaciones estequiométricas, formuladas en la Ficha 2 correspondientes a cada turbina a gas a condiciones de operación actual en ciclo combinado.

Los valores del flujo mísico de NOx calculado (t/h) se utilizan en el balance de materia de cada turbina a gas.

Tabla 23

Registro de los valores de las mediciones y los resultados de los cálculos de ingeniería

Turbina a gas 1 (TG1) Año - Trimestre	Datos del combustible	Datos de producción			Datos de los gases de salida				Datos de la chimenea		Datos de las emisiones en (mg/Nm ³)				
	Flujo (m ³ /mes)	Potencia (MW)	Energía (MWh)	h/mes	Flujo volumétrico (Nm ³ /h)	Flujo máscio (kg/h)	v (m/s)	T (°C)	Altura (m)	Diámetro (m)	PTS	CO	NOx	O ₂	n (%)
Ciclo simple															
2007 4T	10,915,753	159.00	39,164.60	246.32	1,099,713.29	1,434,070	8.85	569.4	9.14	6.63	4.74	7.49	49.25	13.66	162.57
2008 1T	9,635,874	-	-	245.03	1,294,272.29	1,682,062	10.41	553.3	9.14	6.63	3.58	0.00	44.39	15.54	250.47
2008 2T	9,635,874	-	-	245.03	997,270.13	1,300,311	8.02	579.67	9.14	6.63	4.69	2.07	50.24	13.74	165.10
2008 3T	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2008 4T	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2009 1T	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2009 2T	26,672,000	160.66	94,709.43	589.50	1,165,094.49	1,518,773	9.37	591.6	9.14	6.63	4.61	0.70	36.23	13.87	169.83
2009 3T	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2009 4T	12,771,700	171.7	45,504.30	265.02	1,128,661.53	1,465,735	9.08	483.2	9.14	6.63	3.33	3.51	41.24	16.02	278.57
2010 1T	15,855,500	171.7	45,504.30	265.02	1,019,463.06	1,327,655	8.20	578.0	9.14	6.63	4.29	4.48	35.56	14.30	191.00
2010 2T	31,082,500	171.7	94,262.25	548.99	1,258,696.64	1,640,090	10.13	584.4	41.0	6.63	4.47	1.43	38.15	14.00	178.80
2010 3T	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2010 4T	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2011 1T	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2011 2T	31,082,500	171.7	94,262.25	548.99	1,258,696.64	1,640,090	10.13	584.4	41.0	6.63	4.47	1.43	38.15	14.00	178.80
2011 3T	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2011 4T	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2012 1T	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2012 2T	30,580,200	171.7	111,675.0	650.41	1,202,561.17	1,567,447	9.68	582.1	41	6.63	4.58	0	33.18	13.82	172.00

Turbina a gas 1 (TG1) Año - Trimestre	Datos del combustible	Datos de producción			Datos de los gases de salida				Datos de la chimenea		Datos de las emisiones en (mg/Nm ³)					
		Flujo (m ³ /mes)	Potencia (MW)	Energía (MWh)	h/mes	Flujo volumétrico (Nm ³ /h)	Flujo másico (kg/h)	v (m/s)	T (°C)	Altura (m)	Diámetro (m)	PTS	CO	NO _x	O ₂	n (%)
2019 3T	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2019 4T	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2020 1T	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2020 2T	-	-	-	304.5	429,834.43	594 078	6.7	102.3	60	5.6	3.28	0	29.7	14.25	-	-

Nota. v = Velocidad, T = Temperatura.

Nota. Las horas de operación de cada turbina depende del modelo de despacho económico óptimo asignado por el COES, el cual proviene de la evaluación del sistema eléctrico considerando los efectos de las estaciones climáticas.

La Tabla 24 muestra el resumen de los resultados de los factores de combustión de gas natural, porcentaje de exceso de aire y temperatura del gas de salida, así como el parámetro del proceso flujo volumétrico de gases de salida de las tres turbinas seleccionadas.

Tabla 24

Factores de combustión de gas natural

Año	PORCENTAJE DE EXCESO DE AIRE (%)			TEMPERATURA DEL GAS DE SALIDA (°C)			FLUJO VOLUMÉTRICO DE GASES DE SALIDA (Nm ³ /h)			
	Trimestre	TG1	TG2	TG3	TG1	TG2	TG3	TG1	TG2	TG3
2017 2T	-	-	-	-	96.03	-	100.73	1,066,706.14	-	1,358,031.10
2017 3T	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2017 4T	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2018 1T	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2018 2T	-	-	-	105.33	92.37	92.8	1,593,316.72	1,266,373.4	1,533,649.81	
2018 3T	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2018 4T	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2019 1T	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2019 2T	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2019 3T	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2019 4T	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2020 1T	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2020 2T	-	-	-	102.3	-	100.4	429,834.43	-	432,020.91	

Nota. El porcentaje de exceso de aire y la temperatura de gas de salida se obtienen de las mediciones. El flujo volumétrico proviene del balance de materia de la turbina a gas. Adaptada por el autor.

4.1.2.2. Elaboración del balance de materia y energía de la turbina a gas. Con respecto al balance de materia y energía se tienen los hallazgos siguientes:

A. Cálculos del balance de materia y energía de la turbina a gas. Por omisión de la información correspondiente al monitoreo puntual a partir del período 2016, sin incluir los anexos con los valores las mediciones (consumo de combustible, horas de operación, % de exceso de aire) y resultados necesarios para comparar los parámetros del proceso exigidos por la norma, en ese sentido, no es posible efectuar la verificación de los cálculos de ingeniería.

Las horas de operación de las turbinas no corresponden a la generación de energía eléctrica (MWh) declarada por mes y la potencia promedio (MW).

Los flujos volumétricos y másicos mostrados en las tablas de los informes difieren de los valores en anexos, por ejemplo: Turbinas 1 y 2 del 2º trimestre de 2013, es decir, los valores no son verificables.

La información elaborada anteriormente según el ítem 5.1.2.1. Cálculos de ingeniería, se incluye en la Ficha 3: Balance de materia y energía de la turbina a gas para un ciclo

combinado (una turbina a gas y una turbina de vapor) elaborada por el autor y que se muestra en el Anexo 4. Validación de instrumentos. La utilización del balance mencionado determina los resultados de los flujos de entrada y salida de materia y energía de cada equipo para cada trimestre.

La Tabla 25 muestra el resultado final del proceso de elaboración de los cálculos de ingeniería para la determinación de flujos de los gases de salida y de las emisiones de NOx, empleando los datos de las mediciones de concentraciones y verificándolos mediante el balance de materia y energía. Esta información se utilizará en la Ficha 5. Registro de parámetros para el modelo dinámico.

Por tanto, se presenta como resultado de la meta establecida, la determinación del rango de valores de los factores de combustión y de los parámetros del proceso en relación con los valores: Mínimo, promedio y máximos determinados para las concentraciones de las emisiones de NOx convertidos a mg/Nm³ a condiciones normales de presión y temperatura también normalizadas para dilución a 15 % de O₂.

Tabla 25

Rango de valores para los factores de combustión de gas natural y los parámetros del proceso

Turbina a gas	Valor	Año/ Trimestre	% de exceso de aire	Temperatura del gas (°C)	Concentración NOx (mg/Nm ³) @ C.N, 15 % de O ₂	Flujo volumétrico gases secos (Nm ³ /h)	Flujo másico NOx (kg/h)	Flujo másico NOx (t/año)	Flujo másico CO ₂ (t/año)
TG 1	Máximo	2013/2T	211.33	106.67	42.72	1,349,579.87	60.05	518.82	818,573.23
	Promedio	2014/2T	175.23	106.70	33.94	1,226,862.10	48.71	344.28	691,645.31
	Mínimo	2013/1T	169.57	108.77	28.90	941,262.81	32.83	261.44	610,337.06
TG 2	Máximo	2015/2T	170.8	109.63	34.94	1,026,174.02	42.85	261.29	507,599.52
	Promedio	2012/3T	179.6	97.83	31.78	1,181,540.68	43.67	257.86	547,375.54
	Mínimo	2013/1T	172.2	105.77	25.17	931,861.46	28.07	234.08	627,048.35
TG 3	Máximo	2015/2T	166.6	108.60	37.70	1,097,842.10	50.35	423.41	761,134.01
	Promedio	2012/3T	174.93	96.97	32.93	1,191,649.96	46.50	401.72	822,139.18
	Mínimo	2012/4T	167.6	99.23	31.82	38,275.77	1.34	305.75	719,257.98

Nota. Adaptada por el autor.

4.2. Verificación de la aplicación de la tecnología Dry Low NOx (DLN) de baja emisión de NOx

Se realizó la actividad siguiente:

4.2.1. *Método de cálculo de la cinética química de formación de óxido nítrico - NO*

En relación con esta actividad se presentan los resultados siguientes:

4.2.1.1. Determinación de la temperatura y la concentración teórica de las emisiones de NO. La aplicación de la cinética química permite el ingreso de los datos de la presión (de 3 atm), la temperatura de combustión (de llama máxima) y el tiempo de permanencia del flujo de la mezcla de aire en el combustor (tiempo de residencia de 0,25 milisegundos), obteniendo como resultado la concentración de NO expresado en ppm.

La Ficha 4 del Anexo 4 muestra las instrucciones para la verificación de la aplicación de la tecnología Dry Low Nox (DLN) de baja emisión de NOx, que incluye el cálculo de la concentración de NO utilizando el mecanismo térmico de Zeldovich, el cual utiliza la relación termodinámica de la constante de equilibrio de las presiones parciales con la energía libre de Gibbs de la reacción considerada.

La Tabla 26 muestra la variación de la Temperatura teórica de llama máxima vs. Concentración teórica de NO, teniendo un rango desde 800 a 2 500 K y generando la curva teórica (utilizada como referencia).

Tabla 26

Temperatura teórica de llama máxima vs. Concentración de NO (ppm)

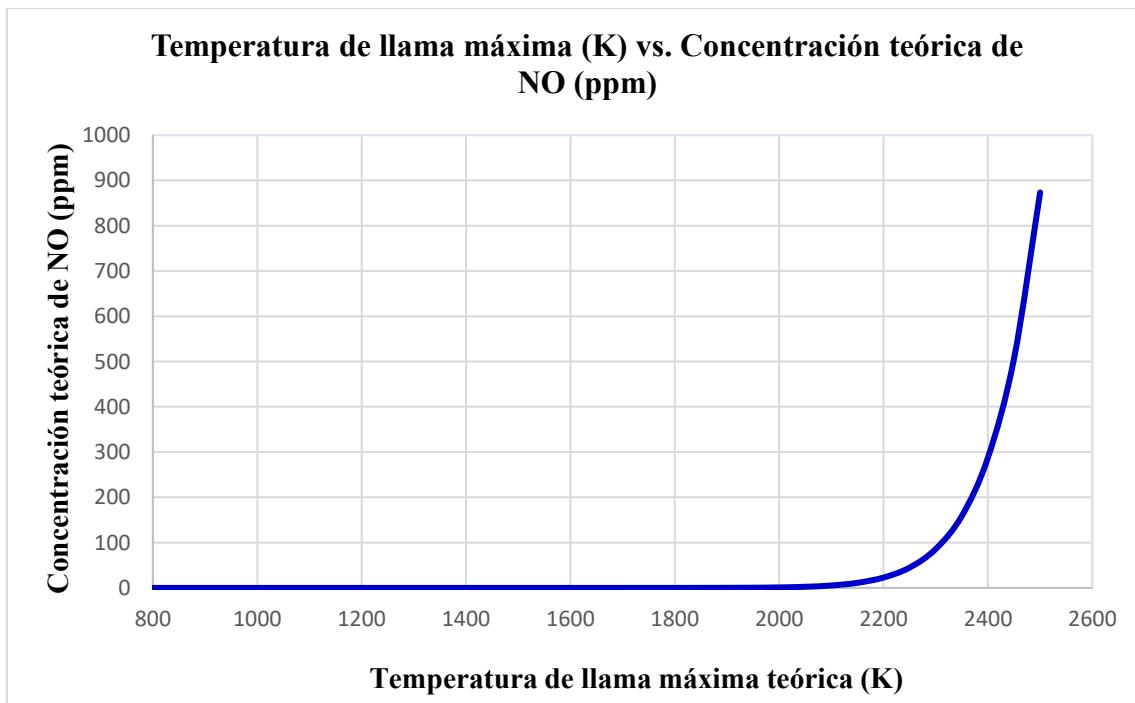
Temperatura de llama		Concentración de NO (ppm)
°C	K	
827	1,100	0
927	1,200	0
1027	1,300	0
1127	1,400	0
1227	1,500	0
1327	1,600	0

Temperatura de llama		Concentración de NO (ppm)
°C	K	
1427	1,700	0
1527	1,800	0.03
1627	1,900	0.19
1727	2,000	1.09
1827	2,100	5.35
1927	2,200	22.88
2027	2,300	102.35
2127	2,400	287.74
2227	2,500	865.58

Con los datos de la Tabla 26 se obtiene la Figura 26, la cual muestra la curva de referencia de Temperatura teórica de llama máxima vs, Concentración teórica de NO.

Figura 26

Curva de concentración teórica de emisiones de NO



Nota. Elaborada por el autor.

4.2.1.2. Determinación de la temperatura de llama en el combustor. La determinación de la temperatura de llama adiabática en el interior del combustor se realiza utilizando el balance de energía considerando la turbina a gas como un sistema abierto

adiabático, es decir, que no existen pérdidas de energía por las emisiones gaseosas u otras salidas.

Los resultados muestran la variación de la concentración medida de NO ($C_m\text{NO}$), es decir, toma los valores medidos en función de la temperatura adiabática de llama en el combustor (T_{llc}) que corresponden a los monitoreos de emisiones gaseosas de diferentes períodos (año - trimestre) para las turbinas a gas de ciclo combinado (considerando los valores máximo, promedio y mínimo de las mediciones de concentración de NOx). La Tabla 27 y la Figura 27 muestran los resultados para la turbina a gas 1 de ciclo combinado.

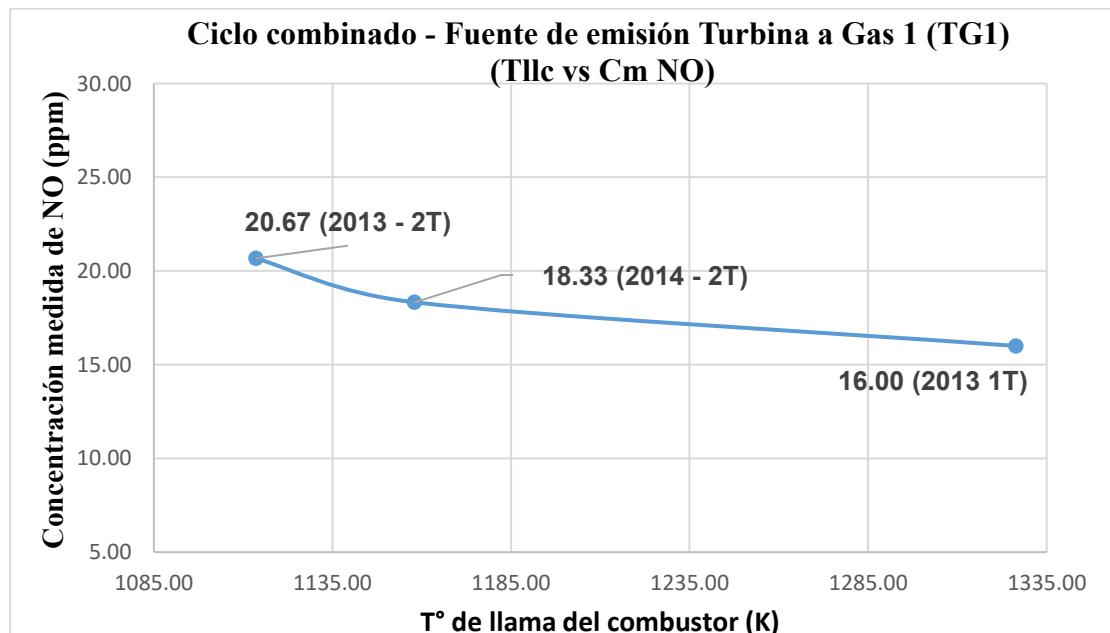
Tabla 27

Temperatura adiabática de llama vs. Concentración medida de NO (TG1)

Ciclo combinado – Turbina 1 (TG1)		
Tll combustor vs. Concentración medida de NO		
Año - Trimestre	Tllc (K)	Cm NO (ppm)
2013 - 2T	1,113.60	20.67
2014 - 2T	1,158.00	18.33
2013 - 1T	1,326.40	16.00

Figura 27

Temperatura adiabática de llama vs. Concentración medida de NO (TG1)



La temperatura de llama en el combustor de cada turbina varía entre 1100 a 1400 y no exceden las 25 ppm establecido como LMP.

La Tabla 28 y la Figura 28 muestran los resultados para la turbina a gas 2 en ciclo combinado.

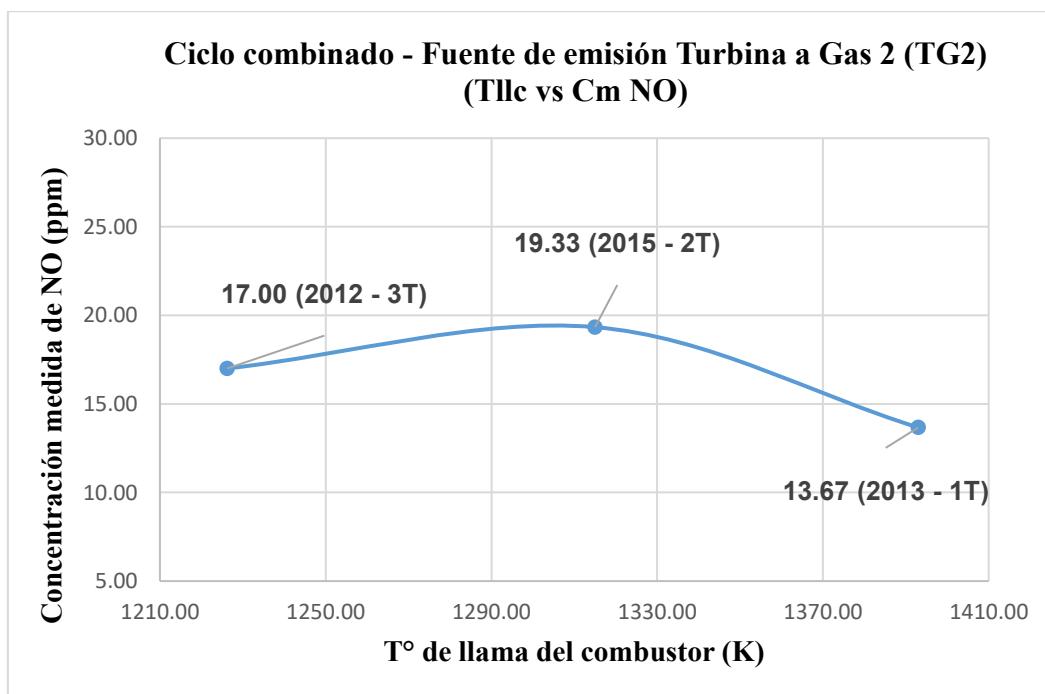
Tabla 28

Temperatura de llama adiabática vs. Concentración medida de NO (TG2)

Ciclo combinado - Turbina 2 (TG2)		
Tll combustor vs. Concentración medida de NO		
Año - Trimestre	Tllc (K)	Cm NO (ppm)
2012 - 3T	1,226.20	17.00
2015 - 2T	1,315.00	19.33
2013 - 1T	1,393.00	13.67

Figura 28

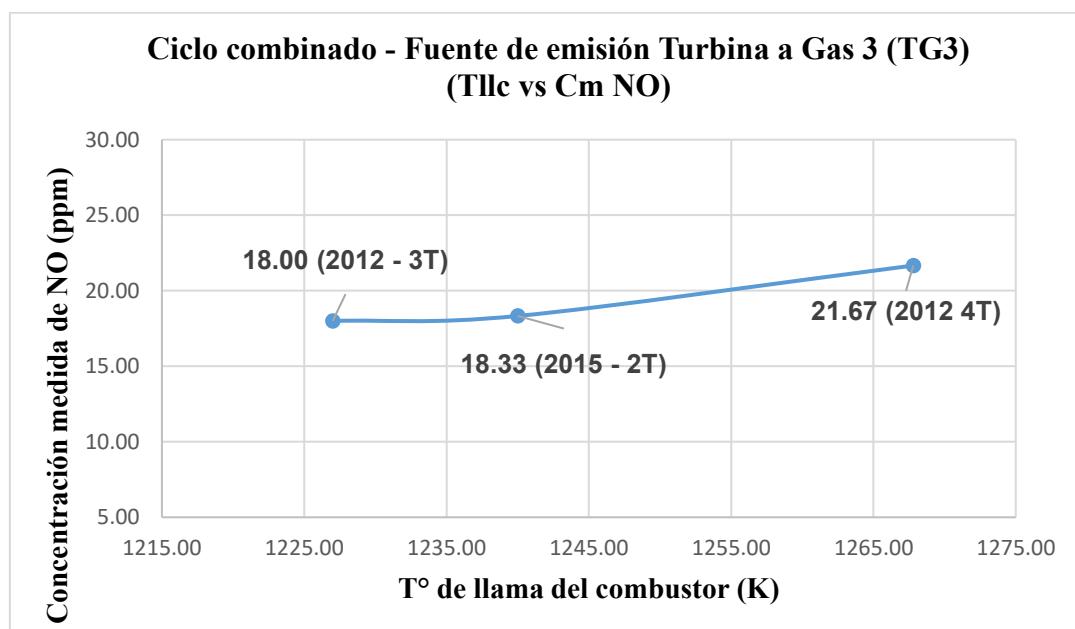
Temperatura de llama adiabática vs. Concentración medida de NO (TG2)



La Tabla 29 y la Figura 29 muestran los resultados para la turbina a gas 3 en ciclo combinado.

Tabla 29*Temperatura de llama adiabática vs. Concentración medida de NO (TG3)*

Ciclo combinado - Turbina 3 (TG3)		
Tll combustor vs. Concentración medida de NO		
Año - Trimestre	Tllc (K)	Cm NO (ppm)
2012 - 3T	1,227.00	18.00
2014 - 2T	1,240.00	18.33
2015 - 2T	1,267.80	21.67

Figura 29*Temperatura de llama adiabática vs. Concentración medida de NO (TG3)*

4.2.1.3. Comparación de la temperatura teórica de llama máxima y la temperatura adiabática de llama en el combustor. Los resultados muestran la variación de la temperatura teórica de llama máxima (Tllt) obtenida a partir de la lectura de la concentración medida de NO en la curva teórica según el mecanismo de Zeldovich y de la temperatura adiabática de llama en el combustor (Tllc) obtenida del balance de energía en función de la concentración de NO (C_{NO}) que corresponda a valores medidos.

La información corresponde a los monitoreos de emisiones gaseosas de diferentes períodos (año - trimestre), para las turbinas a gas en ciclo combinado, también incluye el

contenido de O₂ (%) y el porcentaje de exceso de aire (%), considerando los valores máximo, promedio y mínimo de las mediciones de NOx.

La Tabla 30 y la Figura 30 muestran los resultados para la turbina a gas 1 en ciclo combinado.

Tabla 30

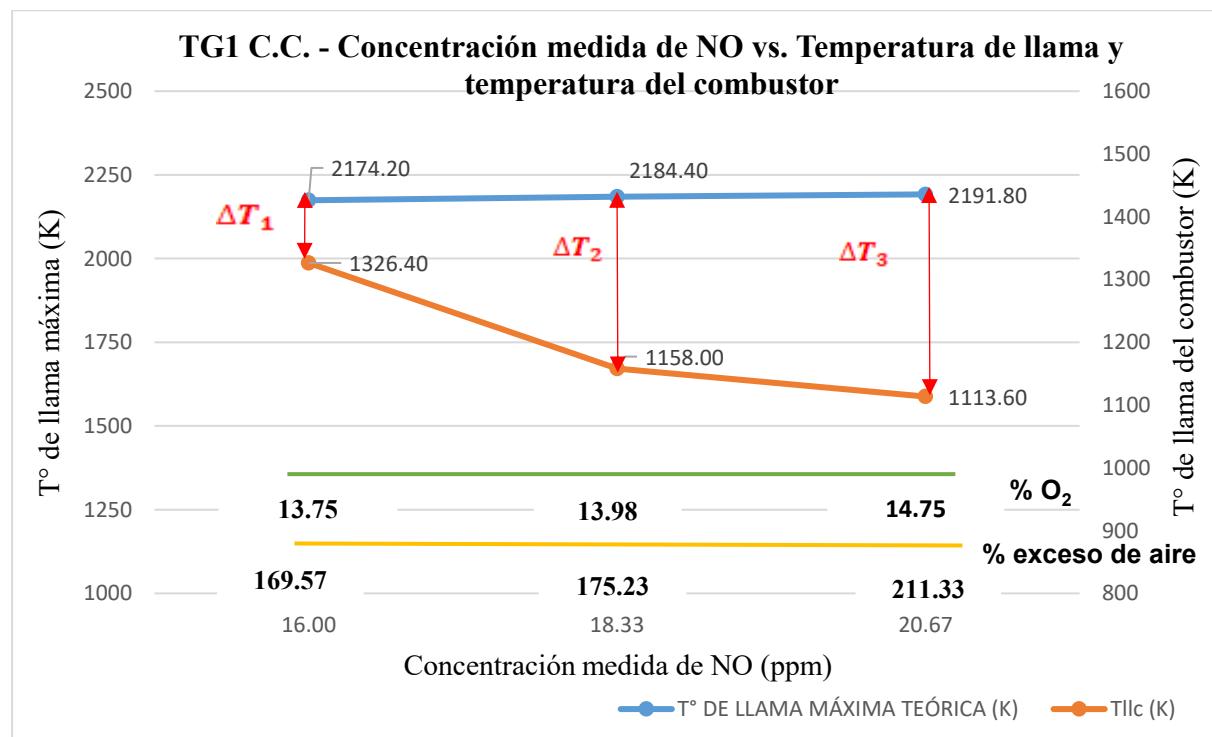
Variación de la temperatura teórica y la temperatura adiabática del combustor (TG1)

Ciclo combinado - Fuente de emisión TG1				
Cm NO (ppm)	Temperatura teórica de llama máxima (K)	Temperatura adiabática del combustor (K)	% O ₂ vol	Exceso de aire (%)
16.00	2,174.20	1,326.40	13.75	169.57
18.33	2,184.40	1,158.00	13.98	175.23
20.67	2,191.80	1,113.60	14.75	211.33

Nota. Valores de temperatura en función de la concentración medida (Cm) de NO. Elaborada por el autor.

Figura 30

Variación de la temperatura teórica y la temperatura adiabática del combustor (TG1)



Nota. Elaborada por el autor.

La Tabla 31 y la Figura 31 muestran los resultados para la turbina a gas 2 en ciclo combinado.

Tabla 31

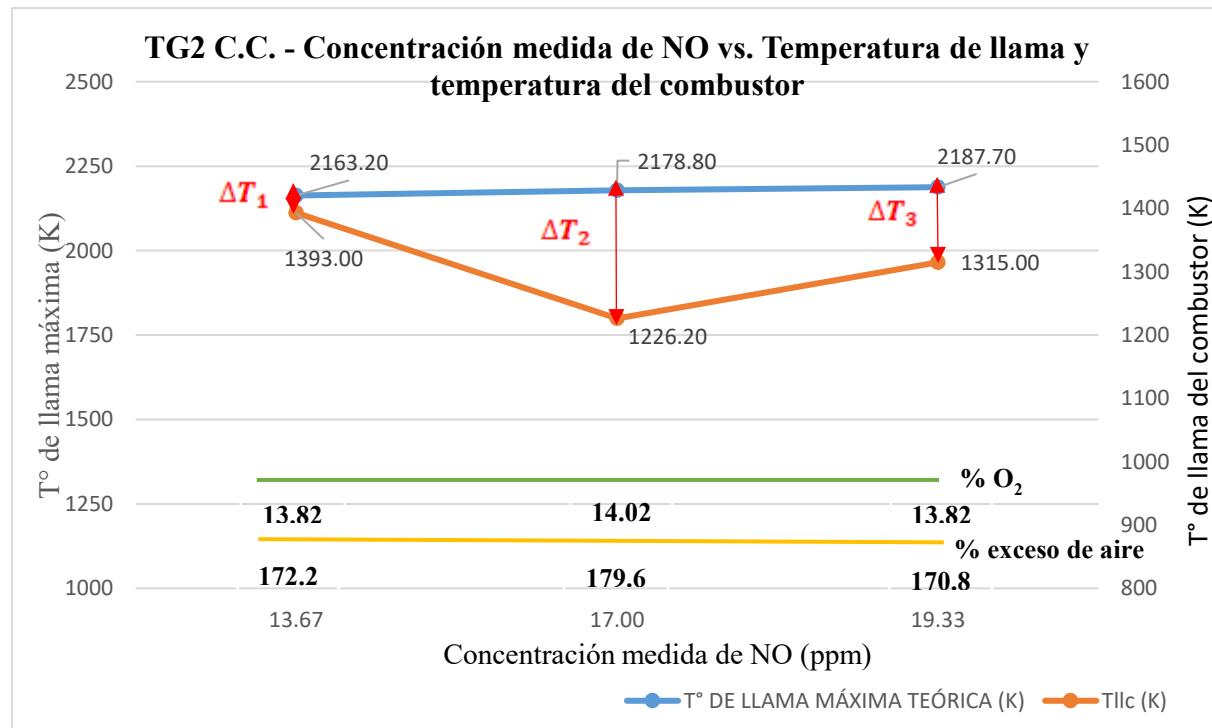
Variación de la temperatura teórica y la temperatura adiabática del combustor (TG2)

Ciclo combinado – Fuente de emisión TG2				
Cm NO (ppm)	Temperatura teórica de llama máxima (K)	Temperatura adiabática del combustor (K)	% O ₂ vol	Exceso de aire (%)
13.67	2,163.20	1,393.00	13.82	172.2
17.00	2,178.80	1,226.20	14.02	179.60
19.33	2,187.70	1,315.00	13.82	170.8

Nota. Valores de temperatura en función de la concentración medida (Cm) de NO. Elaborada por el autor.

Figura 31

Variación de la temperatura teórica y la temperatura adiabática del combustor (TG2)



Nota. Elaborada por el autor.

La Tabla 32 y la Figura 32 muestran los resultados para la turbina a gas 3 en ciclo combinado.

Tabla 32

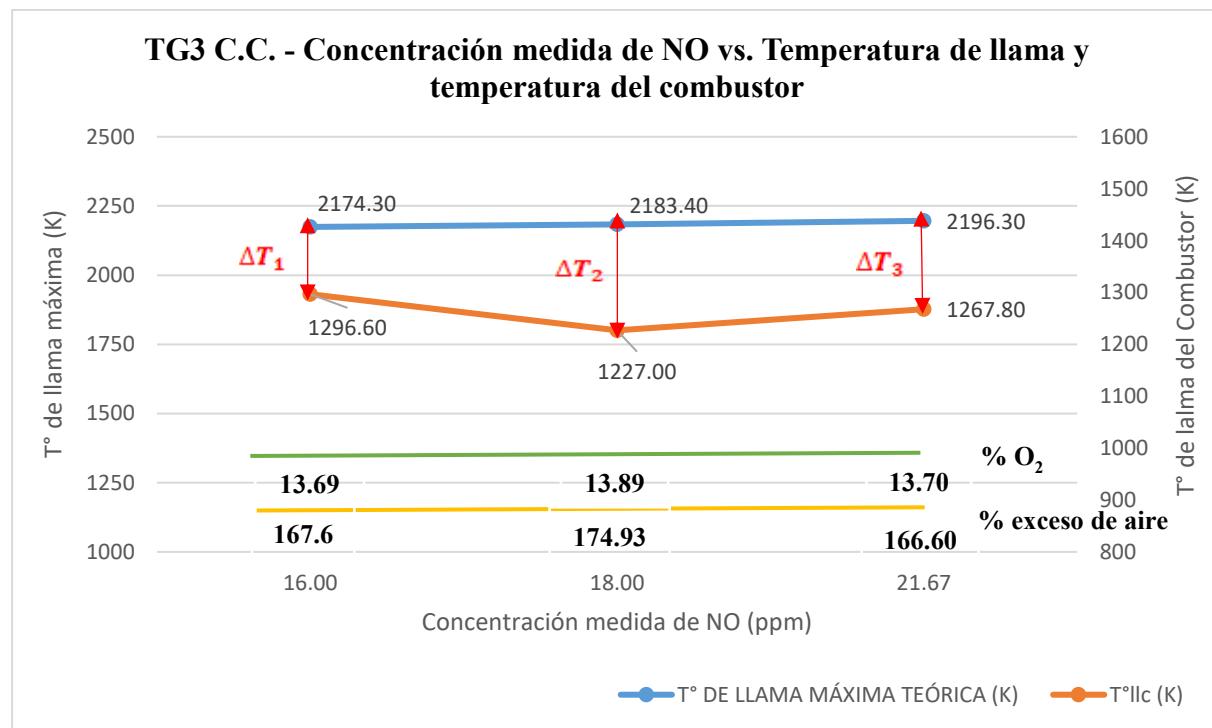
Variación de la temperatura teórica y la temperatura adiabática del combustor (TG3)

Ciclo combinado - Fuente de emisión TG3				
Cm NO (ppm)	Temperatura teórica de llama máxima (K)	Temperatura adiabática del combustor (K)	%O ₂ vol	Exceso de aire (%)
16.00	2,174.30	1,296.60	13.69	167.6
18.00	2,183.40	1,227.00	13.89	174.93
21.67	2,196.30	1,267.80	13.70	166.60

Nota. Valores de temperatura en función de la concentración medida (Cm) de NO. Elaborada por el autor.

Figura 32

Variación de la temperatura teórica y la temperatura adiabática del combustor (TG3)



Nota. Elaborada por el autor.

Según la comparación de la temperatura teórica de llama máxima y la temperatura adiabática de llama en el combustor, se obtiene la diferencia mínima de 847.8 K para la turbina a gas 1 y la diferencia máxima de 1,078.2 K también para la turbina a gas 1.

4.2.1.4. Determinación de la influencia del porcentaje de exceso de aire. Los resultados muestran la variación de la concentración medida de NO en función de la

concentración de O₂ (expresado en %), que corresponden a los monitoreos de emisiones gaseosas de diferentes períodos (año - trimestre), para las turbinas a gas en ciclo combinado, considerando los valores máximo, promedio y mínimo de las mediciones de NO.

Cabe indicar, que la temperatura de salida de los gases de combustión del ciclo combinado es menor debido a la recuperación de calor de los gases (existe un recorrido de los gases por la caldera de recuperación de calor).

La Tabla 33 y las Figura 33 y 34 muestran los resultados de la Concentración medida de NO - CmNO (ppm) y la temperatura de llama del combustor – Tllc (K) en función del porcentaje de exceso de oxígeno (% de O₂) para la turbina a gas 1 en ciclo combinado.

Tabla 33

Variación de la CmNO y Tllc vs. % O₂ (TG1)

Ciclo combinado - CmNO y Tllc vs. % O ₂ (TG1)			
Año - Trimestre	% O ₂	Concentración medida de NO (ppm)	Tllc (K)
2013 - 1T	13.75	16.00	1,326.40
2014 - 2T	13.98	18.33	1,158.00
2013 - 2T	14.75	20.67	1,113.60

Nota. Elaborada por el autor.

Figura 33

Variación de la CmNO vs. % O₂ (TG1)

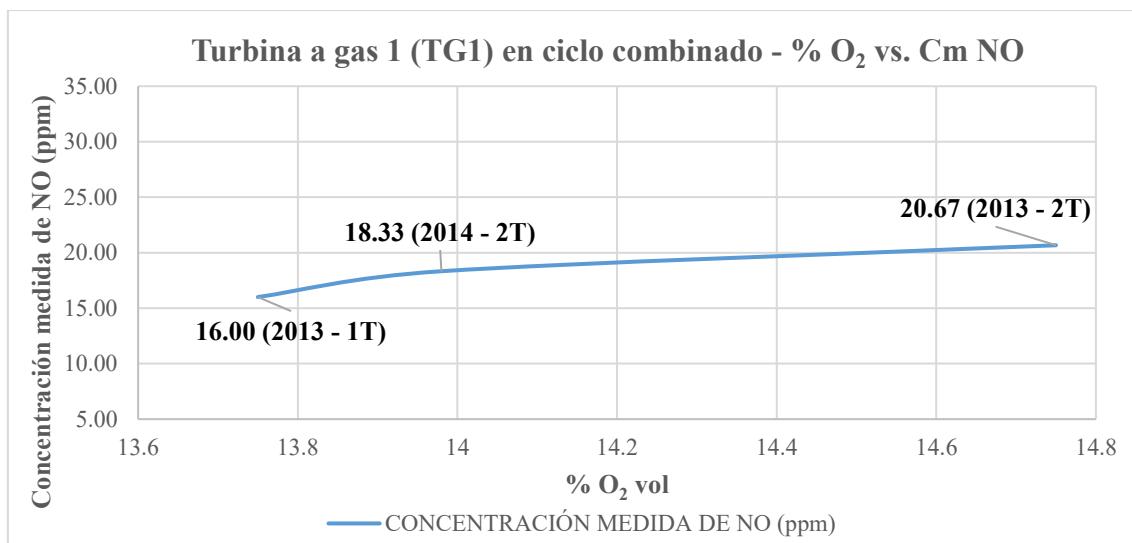
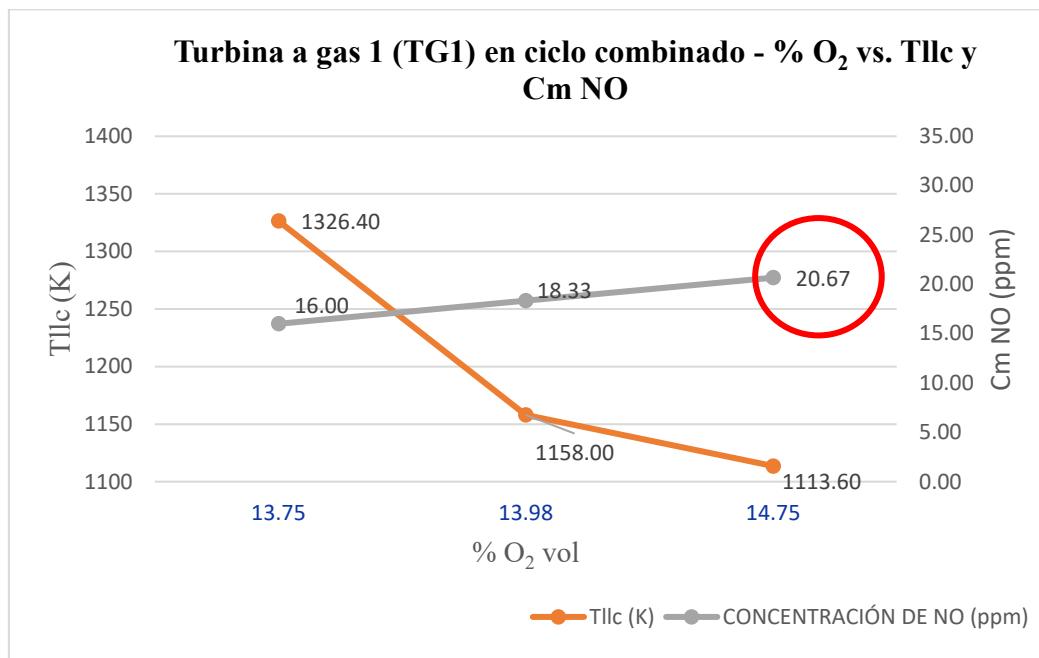


Figura 34

Variación de la CmNO y Tllc vs. % O₂ (TG1)



Nota. Elaborada por el autor.

Los resultados para el ciclo combinado de la TG1 muestran que si el contenido de O₂ aumenta la temperatura de llama del combustor (Tllc) disminuye, lo cual corresponde a lo establecido por la literatura. Si el contenido de O₂ aumenta se tiene que la concentración de NO aumenta hasta 20,67 ppm a menor temperatura de llama en el combustor superando el LMP, lo cual no cumpliría con el mecanismo de formación de los NOx en la turbina a gas, esto se debería a que las lecturas de las mediciones corresponden a diferentes períodos, considerando las variaciones de las condiciones externas como la presión del gas natural, temperatura y humedad del aire ambiente, así como las condiciones internas de turbulencia, el tiempo de residencia, el mantenimiento del combustor, etc.

La Tabla 34 y las Figuras 35 y 36 señalan los valores de la Concentración medida de NO (ppm) y la temperatura de llama del combustor (K) vs. el % de O₂ para la turbina a gas 2 en ciclo combinado.

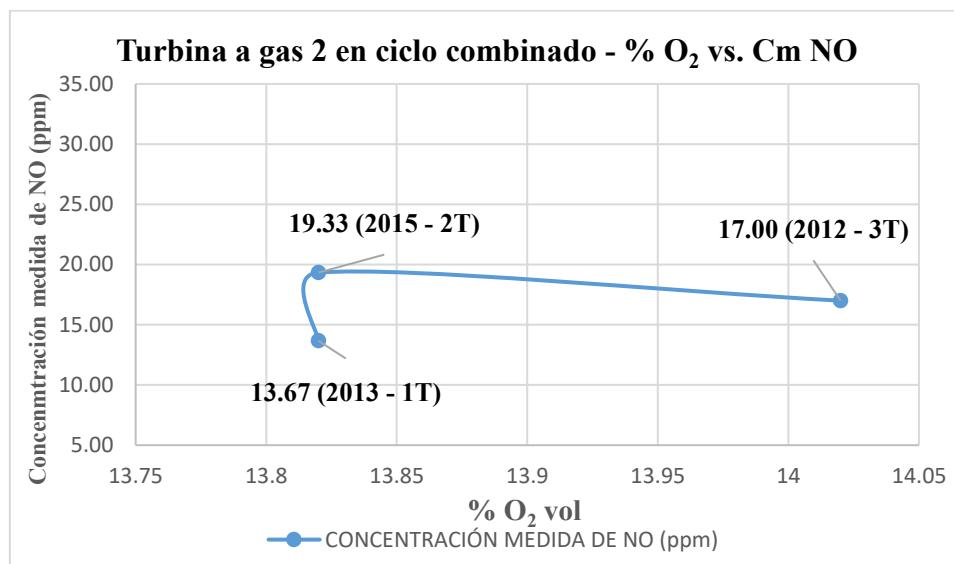
Tabla 34

Variación de la CmNO y Tllc vs. % O₂ (TG2)

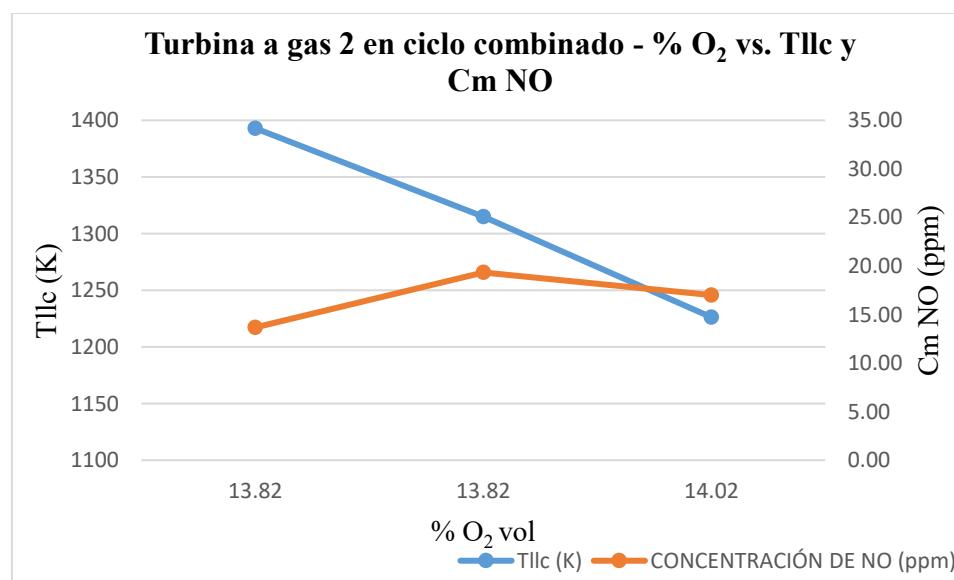
Ciclo combinado - CmNO y Tllc vs. % O ₂ (TG2)			
Año - Trimestre	% O ₂	Concentración medida de NO (ppm)	Tllc (K)
2013 - 1T	13.82	13.67	1,393.00
2015 - 2T	13.82	19.33	1,315.00
2012 - 3T	14.02	17.00	1,226.20

Figura 35

Variación de la CmNO vs. % O₂ (TG2)

**Figura 36**

Variación de la CmNO y Tllc vs. % O₂ (TG2)



Los resultados para el ciclo combinado de la TG2 muestran que son similares a la turbina a gas 1 con respecto a la temperatura y también la concentración de NO, así como las consideraciones, además, se observa que para un mismo valor de % O₂ se tienen concentraciones de NO con la diferencia de 6 ppm.

Cabe indicar, que el rango de medición de % O₂ es muy pequeño de 0,2 ppm y el valor promedio de NO corresponde a aproximadamente a 17 ppm.

La Tabla 35 y las Figuras 37 y 38 muestran los resultados de la Concentración medida de NO (ppm) y la temperatura de llama del combustor (K) vs. el % de O₂ para la turbina a gas 3 en ciclo combinado.

Tabla 35

Variación de la CmNO y Tllc vs. % O₂ (TG3)

Ciclo combinado - CmNO y Tllc vs. % O ₂ (TG2)			
Año - Trimestre	% O ₂	Concentración medida de NO (ppm)	Tllc (K)
2015 - 2T	13.70	21,67	1,267.80
2014 - 2T	13.77	18,33	1,240.00
2012 - 3T	13.89	18.00	1,227.00

Figura 37

Variación de la CmNO vs. % O₂ (TG3)

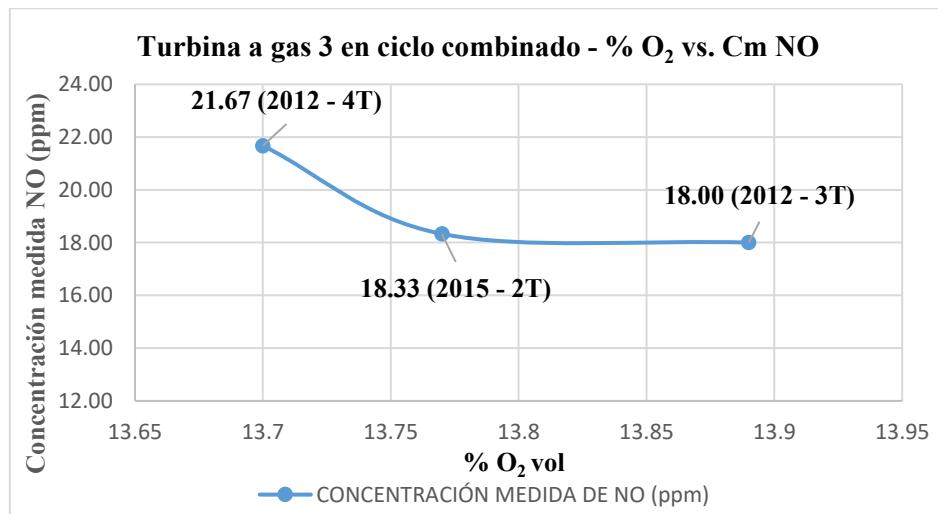
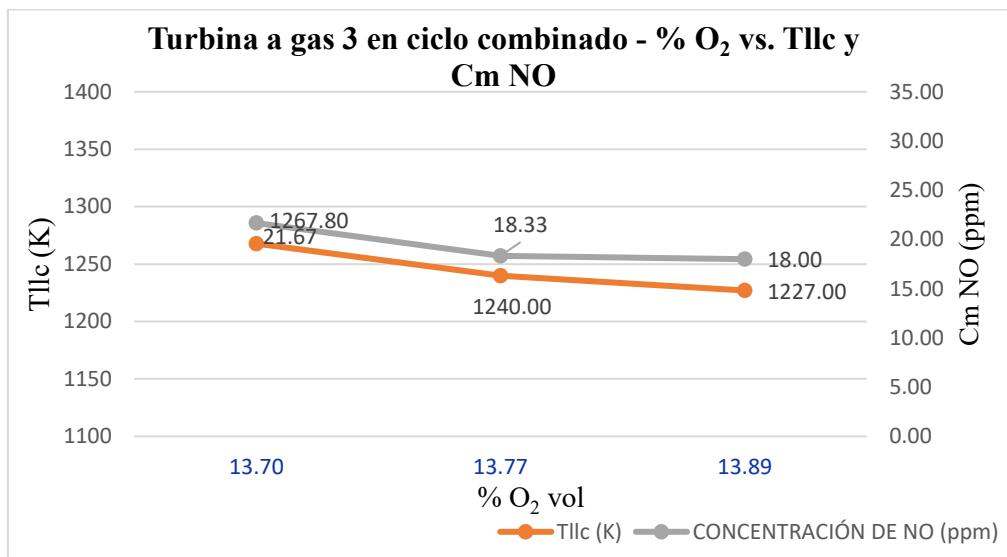


Figura 38

Variación de la CmNO y Tllc vs. % O₂ (TG3)



Los resultados para el ciclo combinado de la *TG3* muestran la influencia del porcentaje de exceso de aire ya que si el contenido de O₂ aumenta, la temperatura de llama del combustor (Tllc) y el contenido de NO disminuyen, lo cual cumple el mecanismo de formación de los NOx. Por ello, para efectuar el modelamiento se selecciona esta turbina.

Cabe indicar, que el rango de medición de % O₂ es de 0,2 ppm y el valor promedio de NO corresponde a 18 ppm.

4.3. Predicción de la influencia de los principales factores de combustión de gas natural sobre la generación de nitrógeno reactivo

Se realizó la actividad siguiente:

4.3.1. Desarrollo del modelo dinámico para determinar la influencia de los principales factores de combustión de gas natural

En relación con esta actividad se presentan los resultados siguientes:

4.3.1.1. Elaboración del diagrama causal del sistema.

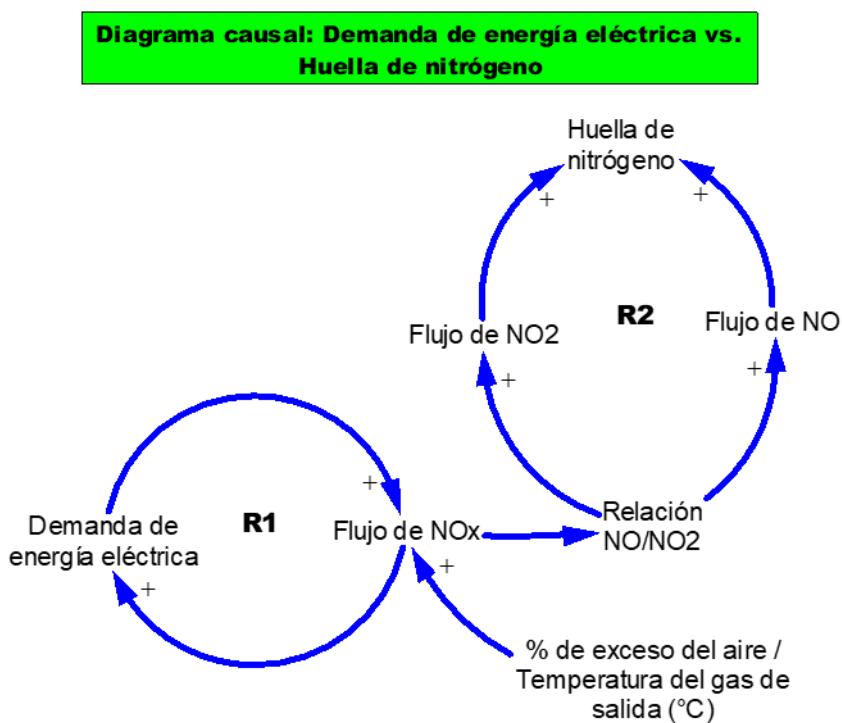
Los resultados de los parámetros de la combustión de gas natural en una turbina a gas obtenidos mediante el balance

de materia y energía permiten elaborar el diagrama causal, el cual muestra las relaciones entre las variables seleccionadas de forma cualitativa.

La Figura 39 muestra el Diagrama causal elaborado mediante el programa Vensim versión 8.1.1 para la determinación de la huella de nitrógeno de la turbina a gas, incluyendo los principales factores como el % de exceso de aire y la temperatura del gas de salida que influyen en la generación de las emisiones de óxidos de nitrógeno NO y NO₂, considerando la variación de la demanda de energía eléctrica.

Figura 39

Diagrama causal del modelo dinámico



Nota. La figura muestra los lazos con la entrada de los principales factores de combustión de gas natural: % de exceso de aire o de la temperatura del gas de salida (°C). Elaborada por el autor.

El diagrama causal del modelo que tiene dos ciclos positivos (expansión), también se podrían considerar los ciclos negativos (control) relacionados al cuerpo receptor (inmisiones), pero que no se desarrollan en el presente estudio.

Cabe indicar que los ciclos de control permiten la regulación del sistema, en tal caso se desarrollarían las reacciones químicas de formación del ozono troposférico (O_3), cuyas ecuaciones pueden observarse en el ítem 2.2.4.

La determinación de la huella de nitrógeno consiste en la suma de los flujos máximos del óxido nítrico (NO) y del dióxido de nitrógeno (NO_2); considerando la variable de la demanda de energía eléctrica. El modelo establece la proyección de las emisiones desde el período 2010 hasta el 2030.

4.3.1.2. Elaboración del modelo matemático del sistema. El diseño del modelo requiere la información de los factores y parámetros seleccionados para la determinación de las emisiones de NOx son el porcentaje de **aire en exceso** y la **temperatura de las emisiones gaseosas** de salida de las chimeneas.

A. Datos de ingreso al modelo. La información de la Tabla 36 corresponde a los datos de ingreso empleados en el modelo, mostrando los valores máximo, promedio y mínimo de las concentraciones de mediciones puntuales de NOx de la turbina a gas 3 en ciclo combinado que representa la generación de la central termoeléctrica; así como de los parámetros correspondientes obtenidos de los cálculos estequiométricos.

Tabla 36

Datos de ingreso al modelo

Parámetros de operación	Variable		
	Óxidos de nitrógeno (NOx)		
Valores	Mínimo	Promedio	Máximo
Año	2014-2T	2012-3T	2015-2T
Potencia nominal (MW) = 197,8	197.8	197.8	194.2
Factor de carga (%) = 98 - 100 (1)			
Horas/día	24	24	23.36
Días/año	300.00	360.00	350.39
Concentración de NOx (mg/Nm ³) @ C.N. y 15 % O ₂ (2)	31.82	32.93	37.70
Flujo volumétrico de gases (Nm ³ /h) (3)	1,238,062	1,191,650	1,097,842

Parámetros de operación	Variable		
	Óxidos de nitrógeno (NOx)		
Valores	Mínimo	Promedio	Máximo
Flujo másico de gases (t/año)	1,614.0	1,553.0	1,431.3
Flujo másico de NOx (t/año)	284	339	339
Partes por millón de NO en volumen (ppm vol)	18.33	18	21.67
Partes por millón de NO ₂ en volumen (ppm vol)	0.34	1	0.66
Exceso de aire (%)	170.37	174.93	166.60
Exceso de O ₂ (%)	13.77	13.89	13.70
Temperatura de gases de salida (°C)	105.3	96.97	108.60
Temperatura ambiente (°C)	20.97	21.07	25.5
Temperatura de llama del combustor (K)	1,240	1,227	1,267
Factor de emisión (kg de NOx/MWh gas natural)	1.13	0.91	0.90

Nota 1: El factor de carga es la relación de la producción de energía real requerida entre la energía producida considerando operación a plena carga durante un período anual de la central termoeléctrica.

Nota 2: Reportes – Archivo 3. Resultados finales – Hoja 1.

Nota 3: Reportes – Archivo 2. Resultados del Balance (corridas) – Hoja 4.

Cabe señalar, que los valores de concentración de NOx no superan el Límite Máximo Permisible nacional (180 mg/Nm³) establecido en el numeral 2.4.1. Además, los valores de los factores de emisión de los óxidos de nitrógeno se encuentran en el rango de referencia mostrado en el numeral mencionado (0.2 – 3.8 kg NOx/MWh).

B. Resultados del modelo. El desarrollo y los resultados del modelo comprenden los escenarios siguientes:

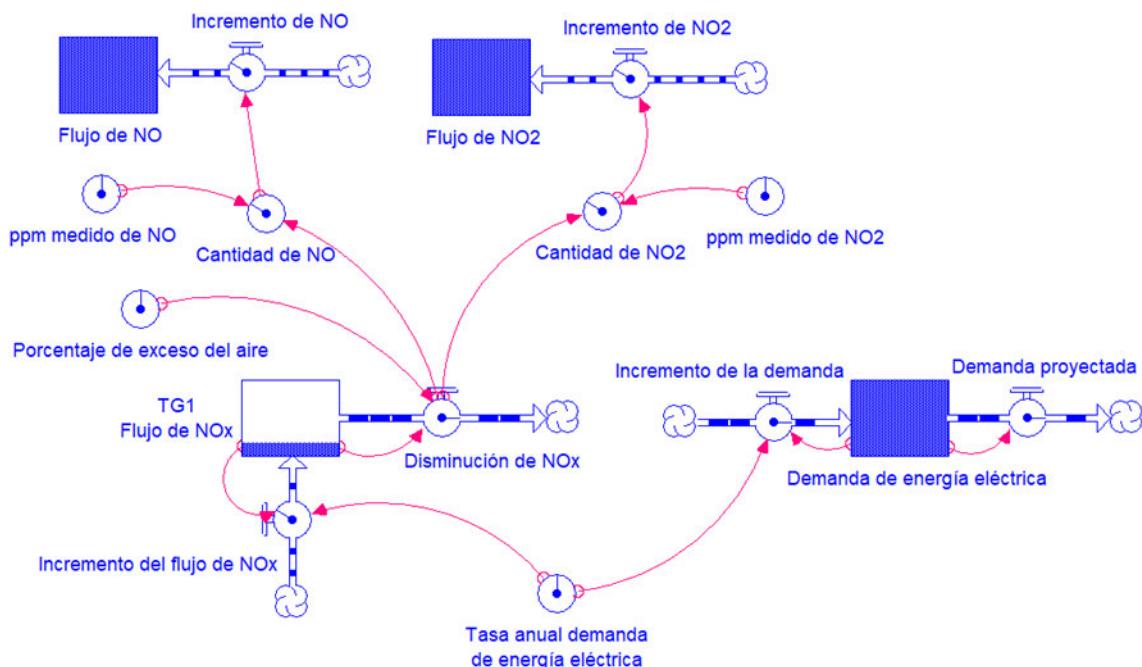
Escenario 1: Variación del porcentaje de exceso de aire

La modelación corresponde a la turbina a gas 3 con el factor de carga de 98-100 % (operación eficiente), a fin de determinar la huella de nitrógeno proveniente de los óxidos de nitrógeno durante el período del 2010 al 2030 (20 años) en el escenario de variación desde el

valor mínimo al valor máximo del porcentaje de exceso del aire que resulta de 5.0 %, así como suponiendo la tasa anual de demanda de energía eléctrica de 1.85 %, lo cual resulta incrementando el flujo másico de NOx en la turbina a gas 3 en ciclo combinado, según el modelo mostrado en la Figura 40.

Figura 40

Modelo dinámico para la variación del porcentaje de exceso de aire



Nota. La figura muestra el modelo dinámico propuesto por el autor.

La Tabla 37 presenta los resultados de la cantidad de nitrógeno reactivo considerando la influencia de la variación del porcentaje de exceso de aire, el cual incrementa el flujo másico de los óxidos de nitrógeno.

Tabla 37

Cantidad de nitrógeno reactivo con relación al % de exceso de aire

Año	Óxidos de nitrógeno - NOx (t/año)	Óxido nítrico - NO (t/año)	Dióxido de nitrógeno - NO ₂ (t/año)	Huella de nitrógeno – Nr (t/año)
2010	284.00	267.29	16.71	124.25
2011	303.72	285.85	17.87	132.88
2012	324.80	305.70	19.11	141.75

Año	Óxidos de nitrógeno - NOx (t/año)	Óxido nítrico - NO (t/año)	Dióxido de nitrógeno - NO ₂ (t/año)	Huella de nitrógeno – Nr (t/año)
2013	347.35	326.92	20.43	151.97
2014	371.47	349.62	21.85	162.52
2015	397.26	373.89	23.37	173.80
2016	424.84	399.84	24.99	185.87
2017	454.33	427.60	26.73	198.77
2018	485.87	457.29	28.58	212.57
2019	519.60	489.04	30.56	227.33
2020	555.68	522.99	32.69	243.11
2021	594.25	559.30	34.96	259.98
2022	635.51	598.13	37.38	278.04
2023	679.63	639.65	39.98	297.34
2024	726.81	684.06	42.75	317.98
2025	777.27	731.55	45.72	340.06
2026	831.23	782.34	48.90	363.66
2027	888.94	836.65	52.29	388.91
2028	950.66	894.74	55.92	415.91
2029	1,016.66	956.85	59.80	444.79
2030	1,087.24			475.67

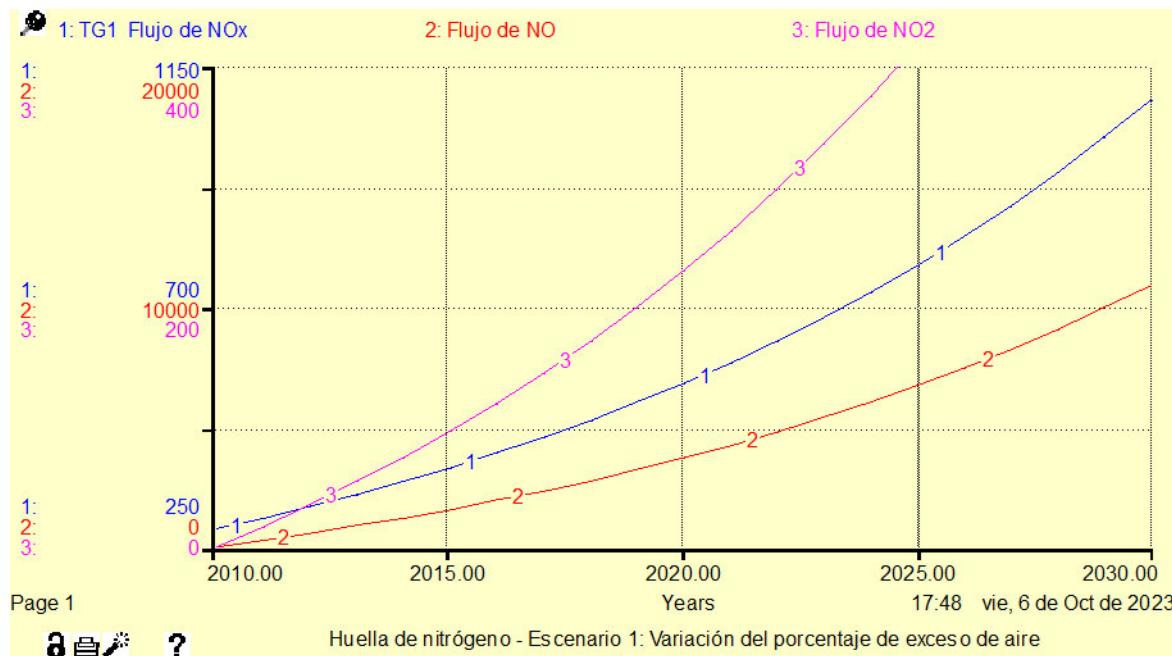
Nota. La cantidad de nitrógeno reactivo es calculada utilizando la masa molecular promedio obtenida según el contenido de cada óxido de nitrógeno (la masa molecular de NOx se obtiene considerando 10 % NO₂ (MM=46 g/mol-g) y 90 % NO (MM=30 g/mol-g), obteniendo como resultado 32 g/mol-g. Asimismo, se tiene 14 t de Nr por cada mol-t de NOx).

El flujo másico de NOx total del período señalado (20 años) en función de la variación del porcentaje de exceso de aire es de 1,087.24 t/año. La huella de nitrógeno reactivo total desde el 2010 hasta el período 2030 alcanza el valor de 475.67 t/año (nitrógeno reactivo).

La Figura 41 muestra la variación del flujo total de los gases NOx y de cada uno de sus componentes expresado en toneladas anuales, se observa el incremento a lo largo del período determinado.

Figura 41

Flujo de óxidos de nitrógeno con relación al % de exceso de aire

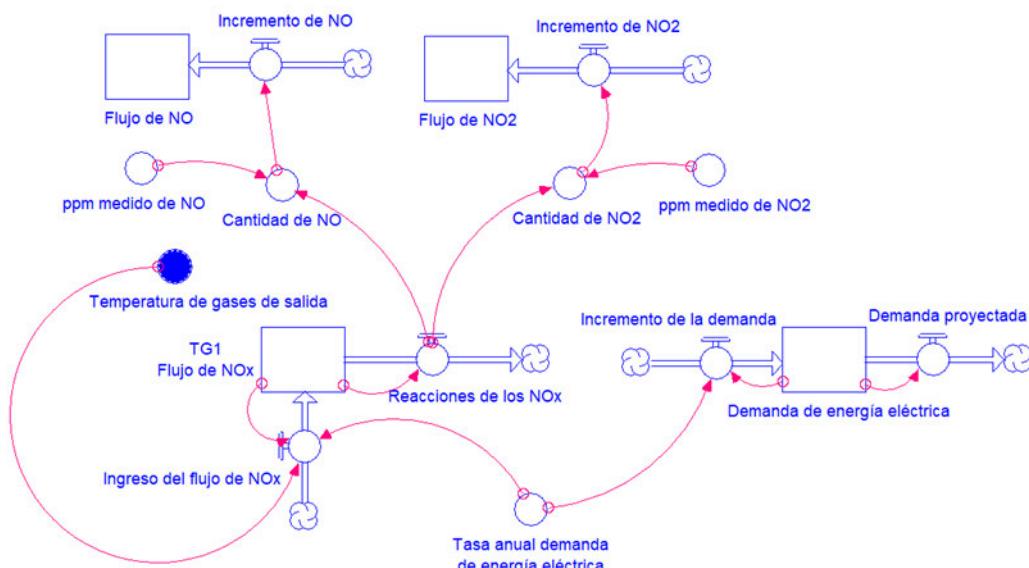


Escenario 2: Variación de la temperatura de gases de salida

La modelación corresponde a una turbina a gas con el factor de carga de 98 - 100 % (operación eficiente), a fin de determinar la huella de nitrógeno proveniente de los óxidos de nitrógeno durante el período del 2010 al 2030 (20 años) en el escenario de variación desde el valor mínimo al valor máximo de la temperatura de gases de salida que resulta de 11.6 °C (debido al enfriamiento de la mezcla gaseosa por el exceso de aire), así como suponiendo la tasa anual de demanda de energía eléctrica de 1.85 %, lo cual resulta incrementando el flujo másico de NOx en 19.4 % para la turbina a gas 3 en ciclo combinado, según el modelo mostrado en la Figura 42.

Figura 42

Modelo dinámico para la variación de la temperatura de gases de salida



Nota. La figura muestra el modelo dinámico propuesto por el autor.

La Tabla 38 presenta los resultados de la cantidad de nitrógeno reactivo considerando la influencia de la variación de la temperatura de gases de salida de chimenea, el cual incrementa el flujo másico de los óxidos de nitrógeno.

Tabla 38

Cantidad de nitrógeno reactivo con relación a la temperatura de gases de salida

Año	Óxidos de nitrógeno - NOx (t/año)	Óxido nítrico - NO (t/año)	Dióxido de nitrógeno - NO ₂ (t/año)	Huella de nitrógeno - Nr (t/año)
2010	284.00	267.29	16.71	124.25
2011	322.81	303.82	18.99	141.23
2012	366.92	345.33	21.58	160.53
2013	417.06	392.52	24.53	182.46
2014	474.04	446.16	27.88	207.40
2015	538.82	507.13	31.70	235.73
2016	612.45	576.42	36.03	267.95
2017	696.14	655.19	40.95	304.56
2018	791.26	744.72	46.54	346.18
2019	899.38	846.48	52.90	393.48
2020	1,022.28	962.15	60.13	447.25
2021	1,161.97	1,093.62	68.35	508.36

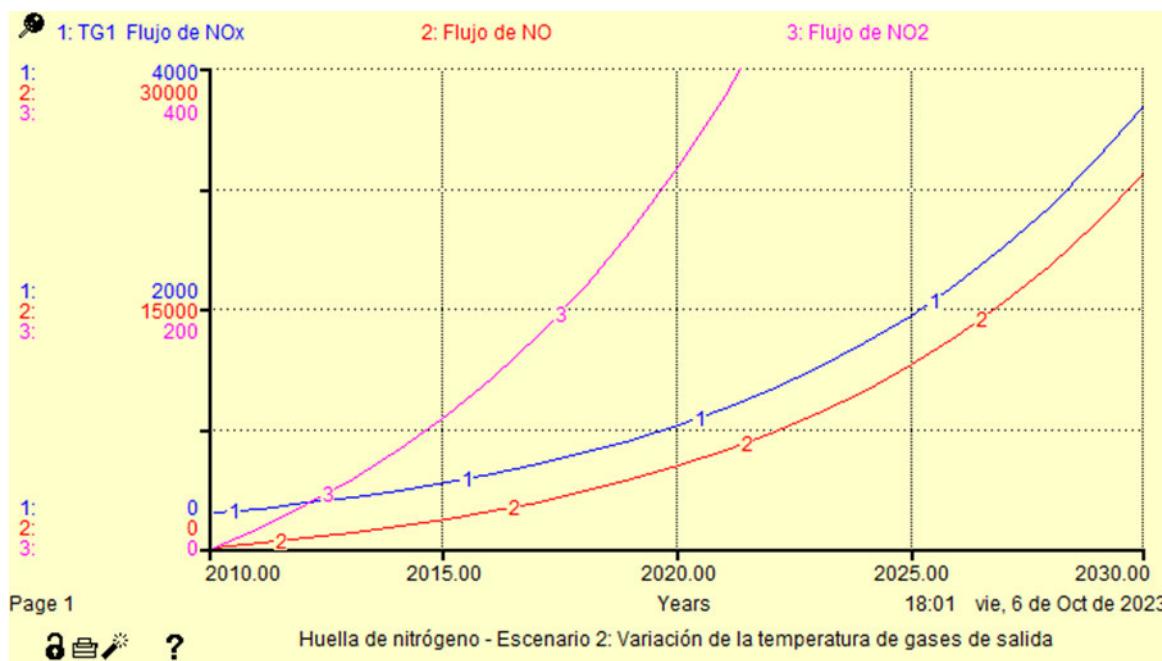
Año	Óxidos de nitrógeno - NOx (t/año)	Óxido nítrico - NO (t/año)	Dióxido de nitrógeno - NO ₂ (t/año)	Huella de nitrógeno – Nr (t/año)
2022	1,320.75	1,243.06	77.69	577.83
2023	1,501.23	1,412.92	88.31	656.79
2024	1,706.36	1,605.99	100.37	746.53
2025	1,939.53	1,825.44	114.09	848.54
2026	2,204.56	2,074.88	129.68	964.49
2027	2,505.80	2,358.40	147.40	1,096.29
2028	2,848.21	2,680.67	167.54	1,246.09
2029	3,237.41	3,046.97	190.44	1,416.37
2030	3,679.79			1,609.91

El flujo másico de NOx total del período señalado (20 años) en función de la variación de la temperatura de gases de salida es de 3,679,24 t/año. La huella de nitrógeno total hasta el período 2030 alcanza el valor de 1,609.91 t/año (nitrógeno reactivo).

La Figura 43 muestra la variación del flujo total de los gases NOx y de cada uno de sus componentes expresado en toneladas anuales, se observa el incremento a lo largo del período determinado.

Figura 43

Flujo de óxidos de nitrógeno con relación a la temperatura de gases de salida



4.4. Prueba de hipótesis y evaluación de resultados

Según el ítem 3.6 Análisis estadístico de datos se realizaron pruebas estadísticas a las mediciones efectuadas en la turbina a gas 1 de ciclo combinado, el Anexo 7. Comando y resultados del programa R muestra el detalle de cada prueba estadística.

4.4.1. Análisis de regresión

La Tabla 39 muestra los resultados de probabilidad p con el nivel de significancia $\alpha = 0.05$ para la prueba de análisis de regresión lineal Concentración de NOx – Porcentaje de exceso de aire y la Tabla 40 el análisis de varianza que complementa determinando el F-Fisher.

Tabla 39

Prueba de análisis de regresión – Porcentaje de exceso de aire (%)

Residuales					
1	2	3	4	8	12
- 1.6638	- 3.6150	- 0.3936	1.0737	- 1.4908	6.0895
Coeficientes					
	Estimate	Error estándar	Valor de t	Pr ($> t $)	
(Intercepto)	- 16.9658	34.4200	- 0.493	0.648	
Porcentaje de exceso de aire	0.2945	0.2001	1.472	0.215	
Error estándar residual: 3.757 sobre 4 Grados de Libertad.					
(16 observaciones borradas debido a que faltan)					
R - cuadrado múltiple: 0.3513, R – cuadrado ajustado: 0.1891					
F-estadístico: 2.166 sobre 1 y 4 GL, valor-p: 0.2151					

Nota. El valor $p > 0,05$ por lo que se acepta H_0 : No existe influencia del porcentaje de exceso de aire sobre la concentración de NOx.

Tabla 40

Análisis de varianza – Anova

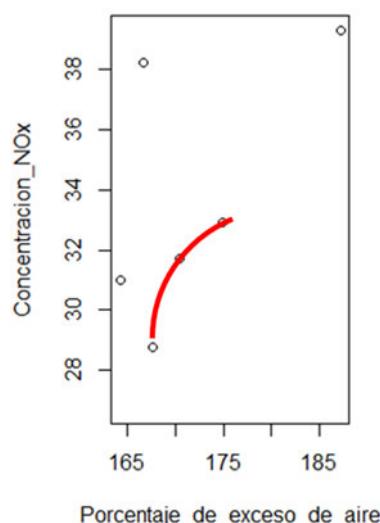
	GL	Suma de cuadrados	Suma de promedios	Valor de F	Pr ($>F$)
Porcentaje de exceso de aire	1	30.56	30.56	2.166	0.215
Residuales	4	56.45	14.11		
(16 observaciones borradas debido a que faltan)					

Nota. El valor $p > 0,05$ por lo que se acepta H_0 : No existe influencia del porcentaje de exceso de aire sobre la concentración de NOx.

La Figura 44 muestra la dispersión del porcentaje de exceso de aire (%) respecto a la concentración de NOx (mg/Nm³).

Figura 44

Dispersión del porcentaje de exceso de aire (%) respecto a la concentración de NOx (mg/Nm³)



La Tabla 41 muestra los resultados de probabilidad p con el nivel de significancia $\alpha = 0.05$ para la prueba de análisis de regresión lineal Concentración de NOx – Temperatura de gases de salida (°C) y la Tabla 42 el análisis de varianza que complementa el análisis determinando el F-Fisher.

Tabla 41

Prueba de análisis de regresión – Temperatura de gases de salida (°C)

Residuales					
1	2	3	4	8	12
2.376	- 2.753	- 4.161	4.662	- 2.552	2.429
Coeficientes					
	Estimate	Error estándar	Valor de t	Pr (> t)	
(Intercepto)	- 13.2396	39.9340	- 0.332	0.757	

Temperatura de gases de salida	0.4512	0.3840	1.175	0.305	
Error estándar residual: 4.021 sobre 4 Grados de Libertad.					
(16 observaciones borradas debido a que faltan)					
R - cuadrado múltiple: 0.2566, R – cuadrado ajustado: 0.07069					
F-estadístico: 1.38 sobre 1 y 4 GL, valor-p: 0.3052					

Nota. El valor p > 0,05 por lo que se acepta H_0 : No existe influencia de la temperatura de gases de salida sobre la concentración de NOx.

Tabla 42

Análisis de varianza – Anova

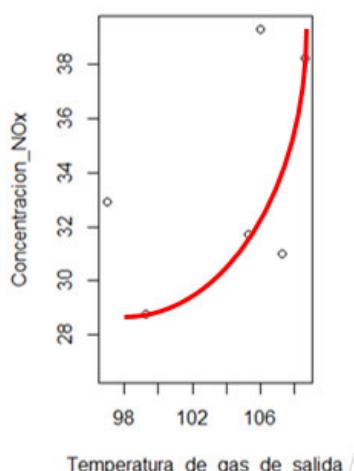
	GL	Suma de cuadrados	Suma de promedios	Valor de F	Pr (>F)
Porcentaje de exceso de aire	1	22.32	22.32	1.38	0.305
Residuales	4	64.69	16.17		
(16 observaciones borradas debido a que faltan)					

Nota. El valor p > 0,05 por lo que se acepta H_0 : No existe influencia de la temperatura de gases de salida sobre la concentración de NOx.

La Figura 45 muestra la dispersión de la temperatura de gases de salida ($^{\circ}\text{C}$) respecto a la concentración de NOx (mg/Nm^3).

Figura 45

Dispersión de la temperatura de gases de salida ($^{\circ}\text{C}$) respecto a la concentración de NOx (mg/Nm^3)



4.4.2. Análisis de correlación

La Tabla 43 muestra los resultados de probabilidad p con el nivel de significancia $\alpha = 0.05$ para la prueba de análisis de correlación Concentración de NOx – Porcentaje de exceso de aire / Temperatura de gases de salida.

Tabla 43

Prueba de análisis de correlación

	Concentración de NOx	Porcentaje de exceso de aire	Temperatura de gases de salida
Concentración de NOx	1	NA	NA
Porcentaje de exceso de aire	NA	1	NA
Temperatura de gases de salida	NA	NA	1

Nota. NA indica que no existe resultado de correlación.

4.4.3. Prueba de normalidad

La Tabla 44 muestra los resultados de probabilidad p con el nivel de significancia $\alpha = 0.05$ para la prueba de normalidad Concentración de NOx – Porcentaje de exceso de aire / Temperatura de gases de salida.

Tabla 44

Prueba de normalidad

	W	Valor de p
Porcentaje de exceso de aire	0.89428	0.3412
Temperatura de gases de salida	0.88412	0.2885

Nota. El valor $p > 0.05$ por lo que se acepta H_0 : El modelo presenta una distribución normal.

V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Este capítulo sintetiza los principales hallazgos o resultados, interpreta, apoya y compara los resultados encontrados con respecto a la formulación de la hipótesis, la teoría o un autor.

5.1. Determinación de la influencia de la variación de los principales factores de combustión de gas natural

Se tienen los hallazgos siguientes:

5.1.1. Tratamiento de la información del monitoreo

En lo referente a esta actividad se presenta lo siguiente:

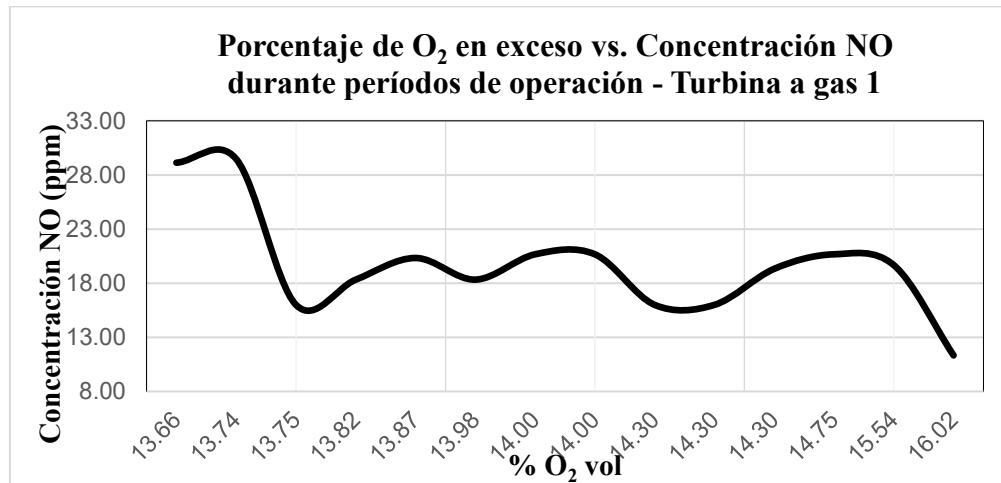
5.1.1.1. Resultados del monitoreo. Como se indicó en la Tabla 13, el monitoreo continuo *no muestra los parámetros del proceso exigidos por la norma* (Decreto Supremo N° 29-94-EM, Reglamento de Protección Ambiental en las Actividades Eléctricas (RPAAE) de 1994), en ese sentido, los resultados no son aplicables para el presente estudio, debido a que no tiene los resultados de dichos parámetros que puedan compararse con los obtenidos mediante los cálculos.

Por consiguiente, los datos seleccionados para el desarrollo de la presente investigación corresponden al monitoreo puntual y en ciclo combinado, debido a que tiene la información básica para efectuar la verificación de los valores de los factores de combustión de gas natural y los parámetros del proceso mediante cálculos y la comparación de resultados.

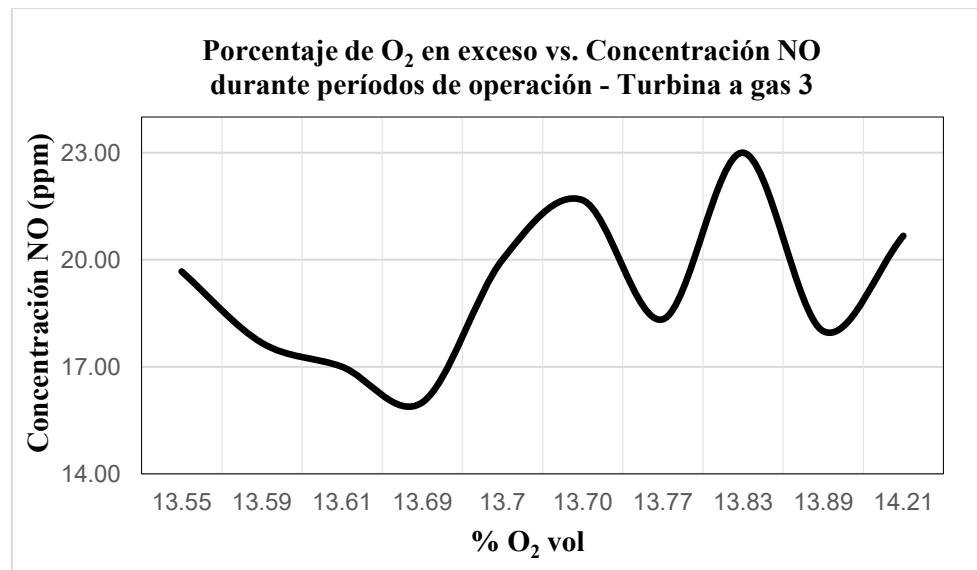
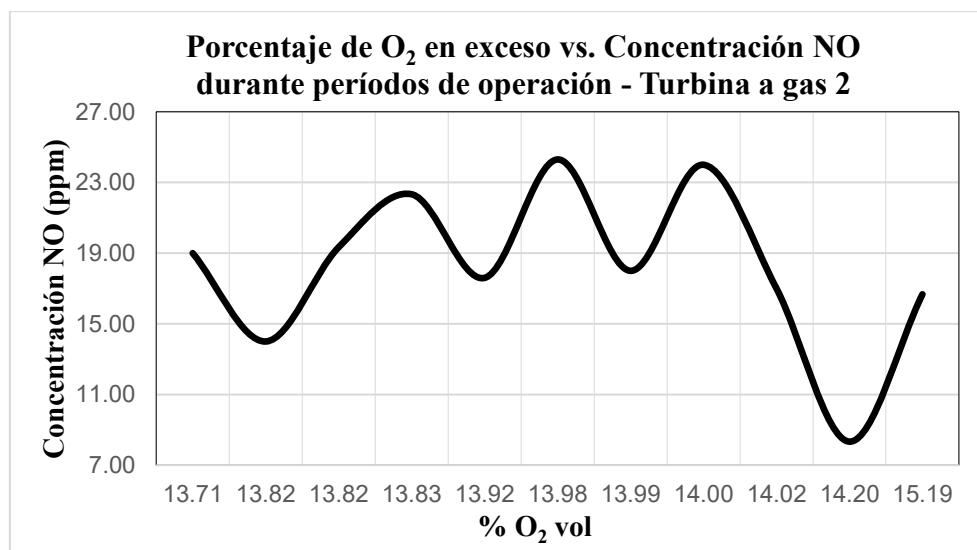
Por consiguiente, la Figura 46 muestra el monitoreo puntual de la variación de la concentración de NO (ppm) en función del porcentaje de O₂ en exceso durante la operación de la central. Se observó que la concentración de NO de la turbina a gas 1 tuvo el valor de 29.47 ppm excediendo el LMP de 25 ppm, lo cual sucedió durante el período de 2007 a 2008.

Figura 46

Concentración de NO (ppm) vs. Porcentaje de O₂ (%) para las turbinas a gas



Nota. Elaborada por el autor.



5.1.2. Procesamiento de la información del monitoreo

En lo referente a esta actividad la norma anterior y la actual tienen ausencia de la información básica para la elaboración de los cálculos, por lo que debe indicar lo siguiente:

5.1.2.1. Cálculos de ingeniería. El reglamento mencionado debe incorporar la información básica siguiente:

A. Combustible. El desarrollo de los cálculos requiere la composición volumétrica o molar del gas natural seco estandarizada, tal como la mostrada en la Tabla 45.

Tabla 45

Composición del gas natural seco estandarizada

Componentes	% molar	BTU/mol	BTU
Metano	89.07	1,012.3	901.66
Etano	9.58	1,773.7	170.04
Propano	0.0779	2,521.9	1.965
Isobutano	0	3,259.4	0
Nbutano	0	3,269.8	0
CO ₂	0.2833	0	0
Neopentano	0	3,993.8	0
Isopentano	0	4,010.2	0
Npentano	0	4,018.2	0
Hexano	0	5,288.7	0
Nhexano	0	-	0
Nitrógeno - N ₂	0.9818	0	0
Oxígeno - O ₂	0	0	0
Total	100	-	1,073.66

BTU dry 1,073.66 BTU/PC
 Temperatura promedio 108.1 °F
 Gravedad específica 0.6092

Nota. La composición corresponde a la información proveniente de la Planta de separación de gas natural de Malvinas, después de salir de la planta criogénica.

En relación con la temperatura de ingreso del gas natural a la turbina a gas, se considera que es similar a la temperatura del ambiente.

B. Relaciones estequiométricas y flujos. La Tabla 23 muestra el registro de los valores de las mediciones y los resultados de los cálculos de ingeniería en ciclo simple y combinado

para la turbina a gas 1. El % de exceso de aire promedio varía entre 170.17 a 211.33 %, la concentración de NOx (mg/Nm³) @ C.N. promedio varía entre 26.79 a 42.72.

Los resultados anteriores muestran la influencia del exceso de aire respecto a la formación de NOx, según lo describe el artículo Using Oxy-Fuel in Steel Reheat Furnaces, por AZoM (AZo Materials), 2002, mostrada en la Figura 6.

5.1.2.2. Elaboración del balance de materia y energía de la turbina a gas. Con la finalidad de estandarizar los resultados obtenidos, la norma ambiental aplicable a las centrales termoeléctricas deberá incluir la información siguiente:

A. Cálculos del balance de materia y energía de la turbina a gas. Las horas de operación registradas en algunos casos exceden las 720 horas por mes, además, debe incluirse la información de la potencia generada durante las mediciones puntuales, sin embargo, para la operación promedio de las turbinas a gas se puede considerar el factor de carga establecido durante la operación aproximadamente en el rango de 75 a 100 %, según el fabricante Siemens Westinghouse W501F Econopac.

El balance muestra el desarrollo de los cálculos para determinar los flujos básicos y volumétricos de entrada de combustible y salida de gases de combustión incluyendo el NO₂, expresados en mg/Nm³ a condiciones normales de presión y temperatura y normalizadas para dilución a 15 % de O₂, también muestra los flujos energéticos de energía eléctrica (energía útil), el flujo de energía térmica de las emisiones gaseosas y de las pérdidas por radiación y convección.

El balance de materia y energía es una herramienta que debe utilizarse para la verificación del cumplimiento de la norma ambiental, incluyendo la información de los datos de entrada de las condiciones ambientales, composición del combustible (gas de Camisea), los parámetros de mediciones del gas de chimenea, del exceso de aire y de las emisiones de NOx.

Asimismo, desarrolla mediante cálculos de estequiométría de la reacción química y termodinámica para el cálculo de la temperatura de llama.

5.2. Verificación de la aplicación de la tecnología Dry Low Nox (DLN) de baja emisión de NOx

Se tienen los hallazgos siguientes:

5.2.1. Método de cálculo de la cinética química de la formación de óxido nítrico - NO

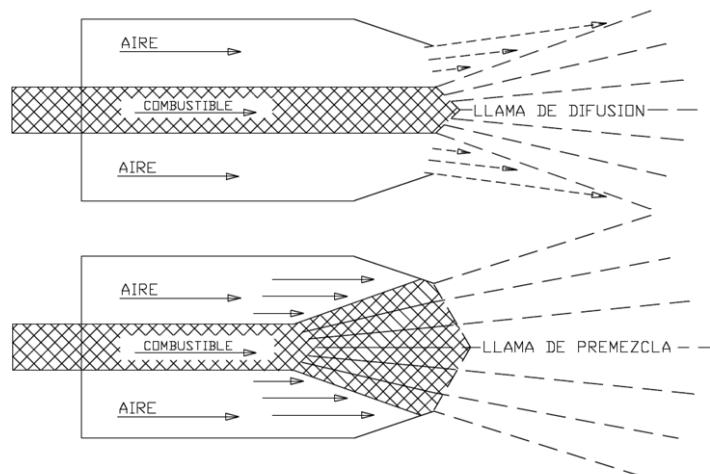
En lo referente a esta actividad se realizó la determinación de: La temperatura de llama y la concentración teórica de las emisiones de NO empleando el mecanismo propuesto por Zeldovich.

El Capítulo V. Resultados muestra el desarrollo del método de cálculo de la cinética química de formación de óxido nítrico – NO, así como de la influencia de la temperatura de llama en el combustor respecto a la formación de NOx.

Así, para la turbina a gas 1 operando en ciclo combinado, considerando la misma concentración medida de NO se tiene que la temperatura de llama del combustor es menor que la temperatura de llama máxima, debido a la utilización de la tecnología de llama de premezcla a diferencia de la de llama de difusión, tal como se muestra en la Figura 47.

Figura 47

Formación de las llamas de difusión y de premezcla



Nota. Adaptada de *La combustión* (p. 41), por Prieto, Ismael.

Observando la figura anterior se aprecia, que la llama de difusión incorpora el aire secundario durante la combustión alcanzando una alta temperatura, por el contrario, para el caso de la llama de premezcla, como el combustible se mezcla con el aire secundario antes del inicio de la ignición, la combustión será más rápida y con menor temperatura.

Por tanto, la tecnología de baja emisión en función del exceso de aire permite reducir la concentración de NO mediante la premezcla del ingreso de aire en el interior del combustor que optimiza la combustión, según lo mostrado en la Figura 30 Grado de variación de la temperatura teórica y la temperatura adiabática del combustor (TG1) incluida en el ítem 5.2.1.3. Comparación de la temperatura teórica de llama máxima y la temperatura adiabática de llama en el combustor.

Así, la diferencia de temperatura (ΔT) mínima de llama máxima teórica menos la temperatura de llama del combustor de la turbina a gas 1 resulta de 847.8 °C y la diferencia máxima correspondiente es de 1,078.2 °C, en función del rango de 13.75 a 14.75 % de contenido de O₂ que corresponde al rango de 169.57 a 211.33 % del porcentaje de exceso de aire en volumen, aplicando la tecnología de baja emisión de NOx.

También se muestra que el contenido de O₂ (%) y el porcentaje de exceso de aire (%) influyen como factores principales que determinan el contenido de NO, resultando que, al aumentar el exceso de aire, la temperatura de llama adiabática del combustor disminuye (relación inversa) alrededor de 212,8 K, según lo mostrado en la Figura 34 Variación de la CmNO y Tllc vs. % O₂ (TG1) incluida en el ítem 5.2.1.4. Determinación de la influencia del porcentaje de exceso de aire.

El resultado anterior corresponde y confirma lo descrito por el artículo Using Oxy-Fuel in Steel Reheat Furnaces, por AZoM (AZo Materials), 2002, según lo mostrado en la Figura 5 Influencia de la temperatura de llama respecto a la formación de NOx incluida en el ítem 2.2.3. Cinética química de la formación de NOx.

Cabe señalar, que la ligera disminución de la concentración de NO con la temperatura de llama mostradas en las figuras comparativas se debe a que las mediciones corresponden a diferentes períodos y condiciones de operación que pueden variar, por ejemplo, un menor valor de NOx debido al mayor exceso de aire.

Por lo tanto, con relación al exceso de aire (o mayor contenido de O₂) si este se incrementa disminuye la temperatura y por ende debe disminuir la concentración de las emisiones de óxido nítrico NO, sin embargo, la concentración aumenta, este último comportamiento es contrario a lo establecido por el artículo mencionado. Como explicación se debe considerar que la información corresponde a períodos diferentes en un rango de medición pequeño (de solo 4 ppm), según lo mostrado en la Figura 34 Variación de la CmNO y Tllc vs. % O₂ (TG1) incluida en el ítem 5.2.1.4. Determinación de la influencia del porcentaje de exceso de aire.

5.3. Predicción de la influencia de los principales factores de combustión de gas natural sobre la generación de nitrógeno reactivo

Se tienen los hallazgos siguientes:

5.3.1. Desarrollo del modelo dinámico para determinar la influencia de los principales factores de combustión de gas natural

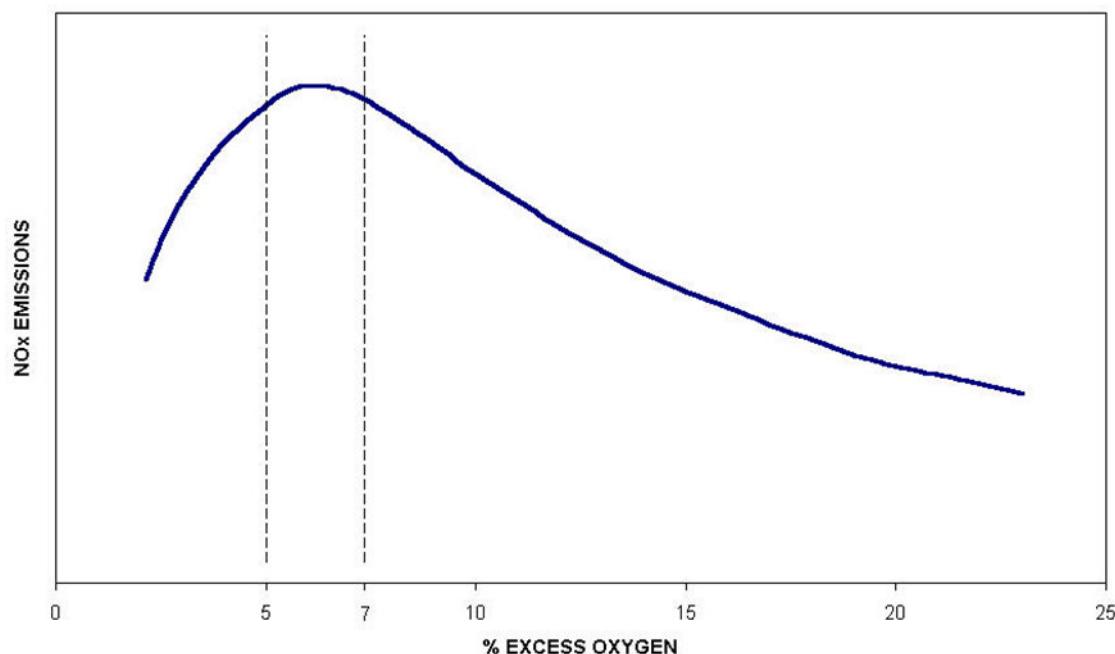
Se utiliza el modelo dinámico como herramienta matemática que permite simular la variación de los factores de combustión de gas natural para una turbina a gas, los cuales influyen en la generación de emisiones gaseosas de óxidos de nitrógeno (NOx), así como predecir la tendencia del cambio. De forma específica, se muestra la interpretación de los resultados de predicción de la generación de nitrógeno reactivo o huella de nitrógeno, en relación con los escenarios siguientes:

Escenario 1: Variación del porcentaje del exceso de aire

Para el caso de la turbina a gas 3 en ciclo combinado, según la Tabla 36 Datos de ingreso al modelo en el ítem 5.3.1.2. Elaboración del modelo matemático del sistema, muestra que el aumento del porcentaje de exceso de aire diluye las emisiones y el enfriamiento interno del combustor disminuye la temperatura de la mezcla aire – combustible reduciendo la concentración de los óxidos de nitrógeno, lo cual comprueba la relación determinada en el documento publicado por la USEPA, APTI 418, NOx Emissions Control from Stationary Sources, tal como se observa debajo en la Figura 48 (United States Environmental Protection Agency, 2017).

Figura 48

Efecto del exceso de oxígeno sobre las emisiones de NOx



Nota. Adaptada de NOx Control [Curso], por USEPA, APTI 418, NOx Emissions Control from Stationary Sources, (https://nanopdf.com/download/1-418_pdf).

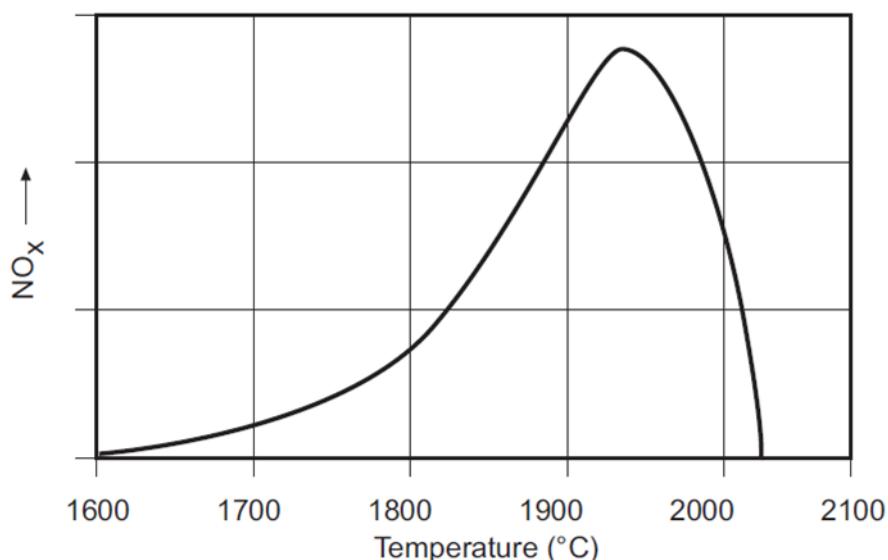
Escenario 2: Variación de la temperatura de gases de salida

Para el caso de la turbina a gas 3 en ciclo combinado, según la Tabla 37 Datos de ingreso al modelo en el ítem 5.3.1.2. Elaboración del modelo matemático del sistema, muestra que el

aumento de la temperatura de llama del combustor también aumenta la concentración de las emisiones de los óxidos de nitrógeno, lo cual comprueba la relación determinada en el documento publicado por la USEPA, APTI 418, NOx Emissions Control from Stationary Sources, tal como se observa debajo en la Figura 49. (United States Environmental Protection Agency, 2017)

Figura 49

Relación de la formación de NOx térmico y la temperatura



Nota. Adaptada de NOx Control [Curso], por USEPA, APTI 418, NOx Emissions Control from Stationary Sources, (https://nanopdf.com/download/1-418_pdf).

En ambos escenarios, se determinó el rango de variación del flujo de óxidos de nitrógeno en función de los factores ya mencionados, obteniendo la proyección de la huella de nitrógeno de la turbina a gas.

En ese sentido, el modelo predictivo planteado permite de forma similar al estudio “Modelación dinámica de la contaminación atmosférica y la lluvia ácida de Sistema de Energía y Transportes de Kosovo”, modelar el impacto de las emisiones de NOx con la finalidad posterior de desarrollar y aplicar medidas de control (Kabashi et al., 2012).

5.4. Prueba de hipótesis y evaluación de resultados

Las pruebas de análisis de regresión lineal y de correlación establecen que no existe influencia de las variables predictoras Porcentaje de exceso de aire y Temperatura de gases de salida con la variable respuesta Concentración de NOx.

La prueba de Shapiro – Wilk determinó que la variable respuesta cumple con la normalidad y la varianza homogénea y que corresponde usar un modelo de regresión no lineal.

En ese sentido, se demuestra que existe la relación no lineal entre las variables predictoras y la variable respuesta cumpliendo así con la tendencia de las curvas mostradas en la Figura 48 Efecto del exceso de oxígeno sobre las emisiones de NOx y la Figura 49 Relación de la formación de NOx térmico y la temperatura, según el documento publicado por la USEPA, APTI 418, NOx Emissions Control from Stationary Sources,

Los resultados obtenidos del presente trabajo se compararon con el de Valero (2019) quien utilizó método de factores de emisión (que tienen niveles de incertidumbre) determinando que la cantidad de Nitrógeno reactivo - Nr emitida por una central termoeléctrica equivale a 0.26091 kg de Nr/MWh, mientras que por el presente estudio utilizando el método de cálculos de ingeniería se obtuvo como resultado promedio 0.98 kg de NOx/MWh, el cual es más preciso (precisión se refiere a la dispersión del conjunto de valores obtenidos de mediciones repetidas de una magnitud. Cuanto menor es la dispersión mayor la precisión. Una medida común de la variabilidad es la desviación estándar de las mediciones y la precisión se puede estimar como una función de ella), que el resultado anterior ya que genera conocimiento basado en las condiciones propias de la instalación.

VI. CONCLUSIONES

Se presentan los principales hallazgos como síntesis de la investigación.

6.1. Se desarrolló el modelo dinámico mediante la aplicación de los métodos de cálculo de ingeniería logrando predecir las variaciones de los factores de combustión del gas natural que influyen en la generación de emisiones gaseosas de óxidos de nitrógeno (NOx) por una **central termoeléctrica** en el Nodo Energético Chilca, el modelo presenta el diagrama causal que incluye los lazos con la entrada de los factores de combustión considerando la variación de demanda de energía eléctrica. Asimismo, el modelo matemático presenta dos escenarios en función del porcentaje de aire y la temperatura de gases de salida de chimenea, los cuales utilizan los valores de los parámetros de proceso obtenidos previamente y determinan los valores en el tiempo de la huella de nitrógeno.

6.2. Se logró determinar la influencia de la variación de los principales factores de combustión de gas natural: Porcentaje de exceso de aire (%) y el nivel de temperatura del gas de chimenea (°C), así como de los parámetros del proceso en relación con la generación de emisiones gaseosas de óxidos de nitrógeno (NOx) por una turbina a gas de ciclo combinado, obteniendo mediante el tratamiento y el procesamiento de los datos del monitoreo puntual, el rango de valores mínimo, promedio y máximo (Tablas 24 y 26) para los factores mencionados asociados a los parámetros del proceso como son los flujos volumétrico y másico, así como la velocidad de los gases de salida. Asimismo, los resultados del monitoreo puntual como valores exactos o teóricos comparados con los valores aproximados o calculados, se obtuvo 7 % de porcentaje de error, además, el factor de emisión promedio de la turbina de gas 3 fue de 0.98 kg de NOx/MWh.

6.3. Se verificó la aplicación de la tecnología Dry Low NOx (DLN) de baja emisión de NOx respecto a que la temperatura de combustión del gas natural o el porcentaje de exceso de aire influyen sobre la generación de emisiones gaseosas de óxidos de nitrógeno (NOx) en una

turbina a gas de ciclo combinado, según la comparación de la temperatura teórica de llama máxima y la temperatura adiabática de llama en el combustor, se obtuvo la diferencia mínima de 848 K y la máxima de 1078 K correspondientes a la turbina a gas 1. Asimismo, se comprobó que la generación de NOx tiene una relación directa muy dependiente de la temperatura, así cuando esta aumenta la formación de NO aumenta y viceversa.

6.4. Se logró predecir la influencia de los principales factores de combustión de gas natural con relación a la generación de nitrógeno reactivo o huella de nitrógeno en una turbina a gas de ciclo combinado, aplicando un modelo dinámico que fue elaborado con el programa informático STELLA, determinando la huella de nitrógeno reactivo para 20 años (2010 – 2030) de 475.67 t/año según la variación del porcentaje de exceso de aire y de 1,609.91 t/año según la variación de la temperatura de gases de salida.

VII. RECOMENDACIONES

7.1. Con la finalidad de implantar el método del modelo dinámico para predecir la huella de nitrógeno se recomienda identificar mediante un estudio la normativa legal y la información técnica requerida para que sea procesada convenientemente por la administración de la central termoeléctrica.

7.2. Con respecto a la influencia de los factores de combustión en relación con la generación de contaminantes, se recomienda incluir en la fuente de información la variación de la composición del gas natural estandarizada y actualizada, así como el método de la Environmental Protection Agency – EPA vigente que se debe utilizar para la determinación de la velocidad de salida de los gases de combustión, a fin de obtener resultados más confiables de los valores de los flujos volumétrico y másico de los contaminantes.

7.3. Se recomienda para la tecnología Dry Low NOx (DLN) de baja emisión de NOx en turbina a gas de ciclo combinado, el control técnico y validación mediante la investigación de los resultados dicha tecnología por los especialistas en eficiencia energética y ambiente para efectuar acciones de mejora, tales como: Verificación de la optimización de la combustión, del porcentaje de exceso de aire, de la reducción de contaminantes y otras específicas como resultado de la cuantificación de las emisiones.

7.4. En relación al modelo matemático para predecir la huella de nitrógeno se recomienda la elaboración de un sistema informático que realice los cálculos de ingeniería y el modelo dinámico con los datos del monitoreo puntual, comparando sus resultados de forma simultánea con los de la tecnología aplicada en los Continuous Emission Monitoring Systems – CEMS y conforme a las disposiciones de una normativa nacional (red de vigilancia) para la prevención de los efectos en la salud y el ambiente de la población en el área de influencia de cada proyecto.

VIII. REFERENCIAS

Abdul Razzaq, A., & Hannun, R. (2022). Air pollution resulted from coal, oil and gas firing in thermal power plants and treatment: A review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1002(1), 012008. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1002/1/012008>

ACT-Gideon. (2024). *State of the art*. <https://www.act-gideon.com.tw/about/state-of-the-art>

Ahmed, A. (Dirección). (2017). *DLN 1.0 (Dry Low NOx) combustion system* [Película]. https://www.youtube.com/watch?v=atCfX_j9lek

Alberta Environment and Parks. (2021). *Air quality model guideline*. Government of Alberta. <https://open.alberta.ca/publications/air-quality-model-guideline-2021>

Aranoglu, F., Flamand, T., & Duzgun, S. (2022). Analysis of artisanal and small-scale gold mining in Peru under climate impacts using system dynamics modeling. *Sustainability*, 14(12), 7390. <https://doi.org/10.3390/su14127390>

AZoM. (2002). Using oxy-fuel in steel reheat furnaces. <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1509>

Bacharach, I. (2019). *¿Qué es la eficiencia de la combustión?* <https://www.mybacharach.com/es/que-es-la-eficiencia-de-la-combustion%C3%B3n/>

Beasley, R., & Ingram, C. (2020). How systems engineering and systems thinking enable innovation. *NCOSE International Symposium*, 30(1), 1032-1048. <https://doi.org/10.1002/j.2334-5837.2020.00770.x>

Bertalanffy, L. v. (1969). *General system theory: Foundations, development, applications*. George Braziller. <https://doi.org/No disponible>

Brown, A., Ekman, T., & Axelsson, C. (2002). *Using oxy-fuel in steel reheat furnaces*. AZo Materials: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1509>

Callejo, J., & Viedma, A. (2005). *Proyectos y estrategias de investigación social: La perspectiva de la intervención*. McGraw Hill. <https://online-tesis.com/datos-secundarios-investigacion/#:~:text=La%20investigaci%C3%B3n%20cuantitativa%20secundaria%20es,efectividad%20general%20de%20la%20investigaci%C3%B3n>

Comité de operación económica del sistema. (2025). *Subdirección de gestión de información*. <https://www.coes.org.pe/Portal/publicaciones/estadisticas/estadistica?anio=2024#>

da Silva, D., Dudeque, M., & Pereira de Carvalho, N. (2025). Environmental pollution and cancer. *Jornal de pediatria*, 101(S1), S18-S26. <https://doi.org/10.3322>

Dirik, M. (2022). Prediction of NOx emissions from gas turbines of a combined cycle power plant using an ANFIS model optimized by GA. *Fuel*, 321. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124037>

Doadrio, A. (2013). *NOx, COV y CFC: Química de formación y destrucción del ozono atmosférico*. Real academia nacional de farmacia. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7612388>

Enciclopedia de energía. (2022). *Motor de combustión interna*. Enciclopedia de energía: https://energyeducation.ca/Enciclopedia_de_Energia/index.php/Motor_de_combusti%C3%B3n_interna

Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología. (2014). *Apunte central ciclo combinado*. Universidad Nacional de Tucumán (FACET-UNT). <https://catedras.facet.unt.edu.ar/centraleselectricas/wp-content/uploads/sites/19/2014/10/Apunte-Central-CC.pdf>

Fundación CRANA. (2014). *Óxidos de nitrógeno*. <https://es.scribd.com/document/421087956/Oxidos-de-nitrogeno-NOX-NO-NO2>

Gallego Picó, A., González Fernández, I., Sánchez Gimeno, B., Fernández Hernando, P., Garcinuño Martínez, R., Bravo, J., Durand Alegría, J. S. (2012). *Contaminación atmosférica*. Universidad Nacional de Educación a Distancia.

Galloway, J., Castner, E., Fox, J., Leach, A., & Dukes, E. (2024). Footprint tools tiptoeing towards nitrogen sustainability. *Environmental Research Letters*, 19(10), 103003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad677c>

General Energetic Engineering. (2023). *Combustión: Cálculo de la temperatura de combustión*. http://www.energianow.com/tools/tool1/comb_llama.php

Godinez, H., Ramírez, A., Miranda, A., & Lezama, M. (2024). Environmental simulation model using system dynamics to estimate air pollution: A case study of Mexico City Metropolitan Area. *Sustainability*, 16(19), 8359. <https://doi.org/10.3390/su16198359>

Guevara, R. (2013). *Diagnósticos energéticos en sistemas térmicos*. Universidad Nacional del Santa. http://biblioteca.uns.edu.pe/saladocentes/archivoz/curzoz/002_modulo_ii_unidad.pdf

Gutiérrez, S., & Palacios, J. (2022). *Reemplazo de una central termoeléctrica por una central RER en el sistema de generación de energía del Perú*. [Tesis de grado, Universidad Nacional del Santa, Facultad de Ingeniería]. Repositorio institucional de la Universidad Nacional del Santa. <https://repositorio.uns.edu.pe/handle/20.500.14278/3976>

Hernández-Sampieri, R., & Mendoza, C. (2018). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta* [Libro electrónico]. http://www.biblioteca.cij.gob.mx/Archivos/Materiales_de_consulta/Drogas_de_Abuso/Articulos/SampieriLasRutas.pdf

Hesselmann, G., & Rivas, M. (2001). *What are the main NOx formation processes in combustion plant?* International Flame Research Foundation (IFRF) online combustion handbook: <https://es.scribd.com/document/122610778/What-are-the-main-NOx-formation-processes-in-combustion-plant-pdf>

Himmelblau, D. M. (1997). *Principios básicos y cálculos en ingeniería química* (6.a ed. ed.). Prentice-Hall Hispanoamericana. <https://repositorio.uvm.edu.ve/handle/123456789/274>

Holcomb, F. H., Sohn, C. W., Tamm, G., Brown, D., Mahoney, D., Baldwin, P., Witmer, D. (2007). *Ramgen Power Systems for Military Engine Applications* (Report No. ADA478293). Defense Technical Information Center. <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA478293>

Huangal, S., & Mora, J. (2024). *Primer Informe Bienal de Transparencia del Perú 2024 [Informe técnico]*. <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/BTR1%20PERU.pdf>

Ighodaro, O., Ilori, S., Aburime, E., & Obanor, A. (2022). An equilibrium model of NOx emission in gas turbine combustors. *Nigerian Journal of Technology*, 41(4), 778-788. <https://doi.org/10.4314/njt.v41i4.15>

Instituto para la Innovación Tecnológica en la Agricultura. (2012). *El nitrógeno en la nutrición vegetal*. <https://www.intagri.com/articulos/nutricion-vegetal/guia-de-fertilizantes-nitrogenados-para-cultivos>

Jarpa, M., Aguilar, A., Belmonte, M., Decap, J., Abarzúa, M., & Vidal, G. (2007). Determinación de la capacidad nitrificante de un sedimento marino proveniente de un centro de cultivo de salmones. *Interciencia*, 32(10), 679–685. https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442007001000008

Kabashi, S., Bektoshi, S., Ahnetaj, S., Kabashi, G., Podrimqaku, K., Veliu, V., Zidansek, A. (2012). Modelación dinámica de la contaminación atmosférica y la lluvia ácida de Sistema de Energía y Transportes de Kosovo. *Open Journal of Air Pollution*, 1(3), 15. <https://doi.org/10.4236/ojap.2012.13011>

Kikuchi, K., Hori, T., & Akamatsu, F. (2022). Fundamental Study on Hydrogen Low-NOx Combustion Using Exhaust Gas Self-Recirculation. *Processes*, 10(1), 130. <https://doi.org/10.3390/pr10010130>

Klein, M. (2019). Air emission prevention. *Turbomachinery Magazine*, 42(5), 12-15. <https://www.turbomachinerymag.com/view/air-emission-prevention>

Kochueva, O., & Nikolskii, K. (2021). Data Analysis and Symbolic Regression Models for Predicting CO and NOx Emissions from Gas Turbines. *Computation*, 9(12), 139. <https://doi.org/10.3390/computation9120139>

Kohse-Hoinghaus, K. (2023). Combustion, Chemistry, and Carbon Neutrality. *Chemical Reviews*, 123(8), 5139-5219. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c00828>

Kurz, R. (2020). *Gas turbine performance for mechanical drive applications*. Paper presentado en GTEN 2019. ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/344544399_GTEN2019_201_GTPerf_07

Leach, A. M. (2017). A nitrogen footprint model to help consumers understand their role in nitrogen losses to the environment. *Sustainability The Journal of Record*, 10(2), 79-88. <https://doi.org/10.1089/sus.2017.29098.eac>

Lovelock, J. E. (1985). *Gaia, una nueva visión de la vida sobre la Tierra*. Ediciones Orbi. <http://biblioteca-repositorio.clacso.edu.ar/handle/CLACSO/37154>

Luque, P. (2019). *Estimación de la huella de nitrógeno de una central térmica de generación eléctrica a gas natural*. [Tesis de grado, Universidad Nacional Agraria La Molina]. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/4028>

Manahan, S. E. (2017). *Environmental chemistry*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315160474>

Marcano, J. (2015). *Educación ambiental en la República Dominicana*. J. Marcano: <http://www.jmarcano.com/recursos/contamin/catmosf5.html>

Margulis, L. (2003). *Una revolución en la evolución: Escritos seleccionados*. (J. Peretó, Ed.) Universitat de València. Galeon: https://upv.uv.es/documents/get/document/id/6312/una_revolucion_en_la_evolucion_mostra.pdf

Márquez, S. (2015). *La contaminación del aire en Badajoz y sus niveles de ozono troposférico*. Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla, Universidad de Sevilla. Repositorio BibIng (e-Reding). <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproj/70627>

Ministerio del Ambiente. (2015). *Informe Nacional de la Calidad del Aire 2013-2014*. <http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2016/07/Informe-Nacional-de-Calidad-del-Aire-2013-2014.pdf>

Monalisa, G. Y., & Sudrajat, A. (3 de julio de 2024). Green Hydrogen Modeling in Indonesia: Potential for Production, Consumption, and Greenhouse Gases Emissions. *Proceedings*

of the 2nd International Conference on Nature-Based Solution in Climate Change, RESILIENCE 2023, 24 November 2023, Jakarta, Indonesia.
<https://doi.org/10.4108/eai.24-11-2023.2346491>

Oficina Regional de la OMS para Europa. (2021). *Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire: Resumen ejecutivo*. Organización Mundial de la Salud.
<https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/346062/9789240035461-spa.pdf?sequence=1>

Oilon. (2025). *Less than 20 mg NOx reached with Oilon burner*. <https://oilon.com/en-gb/less-than-20-mg-nox-reached-with-oilon-burner/>

Organización Mundial de la Salud. (2016). *Calidad del aire ambiente*.
<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/>

Peng, J. C. (2024). Application of stable isotopes in identifying the sources and formation of sulfate and nitrate in PM_{2.5}: A review. *Atmosphere*, 15(11), 1312.
<https://doi.org/10.3390/atmos15111312>

Pommier, M. (2022). Estimations of NO_x emissions, NO₂ lifetime and their temporal variation over three British urbanised regions in 2019 using TROPOMI NO₂ observations. *Environmental Science*, 3, 408-421. <https://doi.org/10.1039/D2EA00086E>

Pontificia Universidad Católica del Perú. (2011). *Química general*.
<http://corinto.pucp.edu.pe/quimicageneral/contenido/32-principio-de-le-chatelier.html>

Portal de calidad del aire. (2023). *Efectos de la contaminación atmosférica sobre la vegetación*. Ayuntamiento de Madrid:
<https://airedemadrid.madrid.es/portales/calidadaire/es/Contaminacion-atmosferica/Efectos/Sobre-la-vegetacion/>

Prather, M. J. (2023). Observed changes in stratospheric circulation: Decreasing lifetime of N₂O, 2005–2021. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23, 843-849.
<https://doi.org/10.5194/acp-23-843-2023>

Prieto, I. (1994). *Tecnologías de reducción de contaminantes en procesos termoenergéticos*. Universidad de Oviedo. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=49537>

Rahman, T., Khan, S., Asrar, W., & Hoda, A. (2022). A comparative study of natural gas and biogas: Combustion in a swirling flow gas turbine combustor. *Combustion Science and Technology*, 194(13), 2613-2640. <https://doi.org/10.1080/00102202.2021.1882441>

Ramgen Power Systems. (2008). *Advanced Vortex Combustor – Conventional Combustion Systems*. Ramgen Power Systems. (Documento previamente disponible en línea; actualmente no accesible).

Ramos-Galarza, C. (2021). Diseños de investigación experimental. *CienciAmérica*, 10(1), 1-10. <https://doi.org/10.33210/ca.v10i1.356>

Resolución Directoral N° 051-2006-MEM/AAE. (2006). *Aprobación del Estudio de Impacto Ambiental*. Dirección General de Asuntos Ambientales Energéticos. <https://www.gob.pe/institucion/minem/normas-legales/354245-051-2006-mem-aae>

Resolución Directoral N° 335-2009-MEM/AAE. (2009). *Aprobación del Plan de Manejo Ambiental Conversión a Ciclo Combinado de la Central Termoeléctrica*. Dirección General de Asuntos Ambientales Energéticos. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/431014/335-2009-MEM-AAE.pdf>

Sánchez, E. (abril de 2014). *Temperatura adiabática de llama [Material educativo no publicado]*. Escuela de química, Universidad Tecnológica de Pereira. (Documento previamente disponible en línea; actualmente no accesible).

Santillán, S. (2011). El gas natural de Camisea: una oportunidad para la petroquímica peruana. *Energy Press*(552). (Documento previamente disponible en línea; actualmente no accesible).

Santo, M., & Lecumberry, G. (2005). *El proceso de medición: Análisis y comunicación de datos experimentales*. Universidad Nacional de Río Cuarto. https://www.unrc.edu.ar/unrc/digital/El_proceso_de_med.pdf

Srinivas, Y. (31 de enero de 2020). *NOx emission - Zeldovich mechanism*. Coursehero: <https://www.coursehero.com/file/17327224/211315023-NOx-emission/>

TESTO. (2018). *Ánalisis de gases de la combustión industrial*. Lenzkirch: Testo in Germany and Worldwide. <http://www.testo.de>

TESTO. (2018). *Parámetros de medición e influencia en turbinas de gas y su significado para la optimización del grado de eficiencia y las emisiones*. Testo. <https://static-int.testo.com/media/20/8a/1c3633ab50a1/Whitepaper-testo-350-turbines-ES.pdf>

Tibaquirá, J., & Burbano, J. (julio de 2003). *Técnicas para controlar las emisiones de NOx en turbinas de gas*. Universidad Tecnológica de Pereira. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4847294.pdf>

Tseng, C. H., Chen, L. L., & Su, S. M. (2021). Development of a system dynamics model for dioxin flow and its application to the energy sector. *Helijon*, 7(11), e08361. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08361>

Turconi, R., Boldrin, A., & Astrup, T. (2013). Life cycle assessment (LCA) of electricity generation technologies: Overview, comparability and limitations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28, 555-565. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.013>

United States Environmental Protection Agency. (2017). *NOx Emissions Control from Stationary Sources*. Nanopdf: https://nanopdf.com/download/1-418_pdf

World Wide Fund for Nature (WWF) Países Bajos. (2015). *Nitrógeno: Un recurso vital en demasia*. WWF Países Bajos. <https://www.louisbolt.nl/sites/default/files/publication/pdf/3005.pdf>

Zeeco. (2024). *Advancements in burner technology*. <https://es.zeeco.com/resources/news/advancements-in-burner-technology>

Zhai, S., Jacob, D., Wang , X., Liu, Z., & Wen, T. (2021). Control of particulate nitrate air pollution in China. *Nature Geoscience*, 14, 389-395. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00726-z>

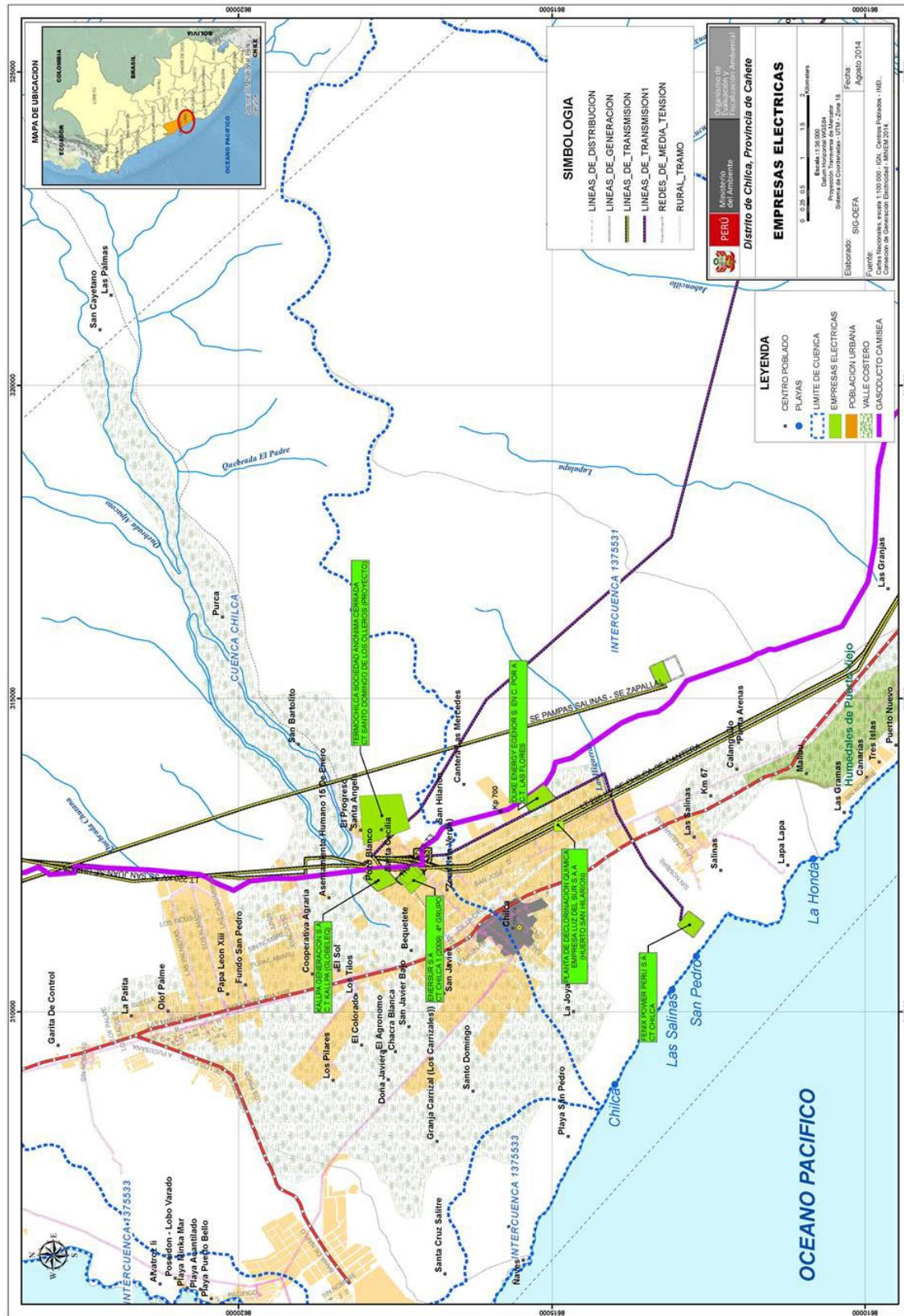
Zhang, Qianqian, Boersma, K. F., van der Laan, C., Mols, A., Zhao, B., Li, S., & Pan, Y. (2025). Estimating the variability in NO_x emissions from Wuhan with TROPOMI NO₂ data during 2018 to 2023. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 25(6), 3313-3326. <https://doi.org/10.5194/acp-25-3313-2025>

Zhao, Q., Wang, G., Zhang, H., Xu, Y., & Yang, S. (2021). Estimation of NOx emissions from the combustion chamber of heavy-duty gas turbines. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 657, 012004. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/657/1/012004>

IX. ANEXOS

En el presente proyecto de investigación se muestran los anexos siguientes:

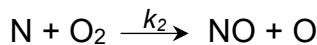
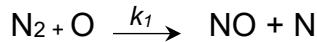
Anexo A Ubicación geográfica de las centrales termoeléctricas en el Nodo Energético Chilca



Anexo B Cinética química de formación de NOx – Mecanismo de Zeldovich

La cinética química de la formación de NOx se fundamenta en el mecanismo térmico de Zeldovich, que considera que las emisiones de NOx no se forman en cantidades significativas hasta que la temperatura de llama alcanza 2 500 °C. (Srinivas, 2020)

A partir de las siguientes ecuaciones de Zeldovich se puede determinar la concentración de NO, así tenemos:



La velocidad de formación con respecto al N atómico suponiendo estado estacionario, en las reacciones anteriores es la siguiente:

$$\frac{d[N]}{dt} = k_1[O][N_2] - k_2[N][O_2] \quad (1)$$

$$\frac{d[N]}{dt} = 0 \quad (2)$$

$$0 = k_1[O][N_2] - k_2[N]_{ss}[O_2]$$

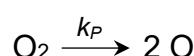
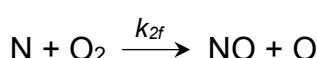
$$[N]_{ss} = \frac{k_1[O][N_2]}{k_2[O_2]} \quad (3)$$

Donde: ss significa steady state = Estado estable.

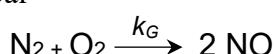
✓ Formación de NO a partir de N₂

Considerando las ecuaciones anteriores, estableceremos la ecuación de velocidad desde las reacciones siguientes:

k_{1f}



Elaboración del mecanismo global



La velocidad instantánea de la reacción se representa como:

$$\frac{d[NO]}{dt} = k_G [N_2]^m [O_2]^n \quad (4)$$

La ecuación tiene las incógnitas k_G (constante de velocidad), m y n (ordenes parciales), que se determinaron utilizando los coeficientes de la velocidad elemental, a partir del mecanismo detallado.

De las reacciones elementales, tenemos:

$$\frac{d[NO]}{dt} = k_{1f}[O][N_2] + k_{2f}[N][O_2] \quad (5)$$

$$\frac{d[N]}{dt} = k_{1f}[O][N_2] - k_{2f}[N][O_2] \quad (6)$$

Donde asumimos que las velocidades de reacciones inversas son despreciables. Con la aproximación $d[N]/dt = 0$; entonces:

$$[N]_{ss} = \frac{k_{1f}[O][N_2]}{k_{2f}[O_2]} \quad (7)$$

Sustituyendo la ecuación (7) $[N]_{ss}$ en la expresión (5) debajo para $d[NO]/dt$, obteniendo:

$$\frac{d[NO]}{dt} = k_{1f}[O][N_2] + k_{2f}[O_2] \left(\frac{k_{1f}[O][N_2]}{k_{2f}[O_2]} \right)$$

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2k_{1f}[O][N_2] \quad (8)$$

Eliminando $[O]$ mediante la siguiente aproximación de equilibrio:

$$k_p = \frac{P^2 O}{P O_2 P^0} = \frac{[O]^2 (R_u T)^2}{[O_2] (R_u T) P^0} = \frac{[O]^2 R_u T}{[O_2] P^0}$$

Despejando la concentración $[O]$

$$[O] = \left[[O_2] \frac{k_p P^0}{R_u T} \right]^{1/2} \quad (9)$$

Entonces la ecuación de velocidad (8) es la siguiente:

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2k_{1f} \left[\frac{k_p P^0}{R_u T} \right]^{1/2} [N_2] [O_2]^{1/2} \quad (10)$$

De la ecuación anterior identificamos los parámetros globales.

$$k_G = 2k_{1f} \left[\frac{k_p P^0}{R_u T} \right]^{1/2}$$

$$m = 1 \text{ y } n = 1/2$$

Anexo C Matriz de consistencia

TÍTULO: Modelo dinámico para el control de factores de combustión que influyen en la generación de nitrógeno reactivo de una central termoeléctrica – Chilca - 2023

	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	INDICADORES	DISEÑO
GENERAL	¿Cómo predecir las tendencias de variaciones de los factores de combustión del gas natural que influyen en la generación de emisiones gaseosas de óxidos de nitrógeno (NOx) por una central termoeléctrica en el Nodo Energético Chilca?	Desarrollar un modelo dinámico mediante la aplicación de métodos de cálculo de ingeniería para predecir las variaciones de los factores de combustión del gas natural que influyen en la generación de emisiones gaseosas de óxidos de nitrógeno (NOx) por una central termoeléctrica en el Nodo Energético Chilca.	La implementación del modelo dinámico causal de predicción del impacto ambiental, permitirá controlar los factores de combustión de gas natural en una central termoeléctrica que genera emisiones gaseosas de NOx, a fin de mejorar la calidad del aire en el Nodo Energético Chilca.	Independiente Factores de combustión del gas natural	-	Causal Pre - experimental Método: Deductivo
ESPECÍFICO 1	¿Cuáles son los métodos de cálculo de ingeniería para determinar la influencia de la variación de los principales factores de combustión de gas natural: Porcentaje de exceso de aire (%) y el nivel de temperatura del gas de chimenea (°C), así como de los parámetros del proceso sobre la generación de emisiones gaseosas de óxidos de nitrógeno (NOx) por una turbina a gas de ciclo combinado?	Determinar la influencia de la variación de los principales factores de combustión de gas natural: Porcentaje de exceso de aire (%) y el nivel de temperatura del gas de chimenea (°C), así como de los parámetros del proceso sobre la generación de emisiones gaseosas de óxidos de nitrógeno (NOx) por una turbina a gas de ciclo combinado.	La aplicación de los métodos de cálculos de ingeniería, determinan la influencia de la variación de los factores de combustión de gas natural: Porcentaje de exceso de aire (%) y el nivel de temperatura del gas de chimenea (°C) sobre la generación de emisiones gaseosas de óxidos de nitrógeno (NOx) por turbinas a gas en ciclo combinado.	Subvariable: Exceso de aire Temperatura de combustión	(%)	Enfoque: Cuantitativo Tipo de investigación Explicativa - Predictiva Hipótesis: Correlacional Explicativa – Predictiva causal (bivariada)
ESPECÍFICO 2	¿Cuál es el método de cálculo para verificar la aplicación de la tecnología Dry Low NOx (DLN) de baja emisión de NOx respecto a que la temperatura de combustión del gas natural o el porcentaje de exceso de aire influyen sobre la generación de emisiones gaseosas de óxidos de nitrógeno (NOx) en una turbina a gas de ciclo combinado?	Verificar la aplicación de la tecnología Dry Low NOx (DLN) de baja emisión de NOx respecto a que la temperatura de combustión del gas natural o el porcentaje de exceso de aire influyen sobre la generación de emisiones gaseosas de óxidos de nitrógeno (NOx) en una turbina a gas de ciclo combinado.	La aplicación del método de cálculo de la cinética según el mecanismo de Zeldovich, verifica que la aplicación de la tecnología Dry Low NOx (DLN) de baja emisión de NOx respecto a la temperatura de combustión del gas natural o el porcentaje de exceso de aire influyen sobre la generación de emisiones gaseosas de óxidos de nitrógeno (NOx) en una turbina a gas de ciclo combinado.	Subvariable: Temperatura del gas de chimenea	(°C)	Instrumentos Formatos en el anexo 2

ESPECÍFICO 3	<p>¿Cómo predecir la influencia de los principales factores de combustión de gas natural sobre la generación de nitrógeno reactivo o huella de nitrógeno en una turbina a gas de ciclo combinado, aplicando un modelo dinámico?</p>	<p>Predecir la influencia de los principales factores de combustión de gas natural sobre la generación de nitrógeno reactivo o huella de nitrógeno en una turbina a gas de ciclo combinado, aplicando un modelo dinámico.</p>	<p>La aplicación de un modelo dinámico de sistemas, predice la influencia de los principales factores de combustión de gas natural sobre la generación de nitrógeno reactivo o huella de nitrógeno en una turbina a gas de ciclo combinado.</p>	<p>Dependiente: Generación de emisiones de NOx</p>	<p>Concentración de NOx ($\mu\text{g/m}^3$)</p>	
---------------------	---	---	---	---	--	--

Anexo D Validación de instrumentos

Los instrumentos del presente plan de tesis permiten registrar la información requerida para la investigación, la cual consiste en formatos elaborados para la recolección de los datos de entrada relacionada a los factores establecidos, que luego se procesarán en el modelo dinámico.

Según Herrera (1998), la validez permitirá conocer el grado en el que un instrumento realmente mide la variable de interés. En tal sentido, se utilizará la *validez de contenido*, la cual se efectuará de manera subjetiva mediante el *juicio de expertos*, es decir el grado en que el instrumento refleja el dominio específico de contenido de lo que se mide.

En este anexo, se adjuntan los formatos elaborados para la recolección de la data necesaria, así como de los resultados. Además, se puede incluir la ficha de validación de instrumento para dichos formatos, que será suscrita por tres expertos.

I. Tratamiento y procesamiento de la información del monitoreo.

Ficha 1: Resumen de resultados de Monitoreo Puntual – MP y Monitoreo Continuo – MC de las turbinas a gas

CICLO SIMPLE

CICLO COMBINADO

I. Tratamiento y procesamiento de la información del monitoreo

Ficha 2: Cálculos de ingeniería

i. Composición del combustible

Tipo	Gas natural				
Composición del combustible (% Molar)		(Volumen compuesto/volumen combustible)			
		Masa C (gr)	Masa H (gr)	Masa O (gr)	Masa N (gr)
Metano					
Etano					
Propano					
Butano					
Pentanos y +					
Dióxido de C					
Nitrógeno					
Total	100.00				
Densidad relativa =		adimensional @ CN			
Densidad combustible =		kg/Nm ³ _{GN}			

Datos de chimenea		
Equipo	Altura (m)	Diámetro (m)

I. Tratamiento y procesamiento de la información del monitoreo

Ficha 2: Cálculos de ingeniería

ii. Reporte de mediciones y resultados corregidos (conversiones)

Resultados corregidos a Condiciones Normales (C.N.) y 15 % de O₂

I. Tratamiento y procesamiento de la información del monitoreo

Ficha 2: Cálculos de ingeniería

iii. Relaciones estequiométricas y flujos

CÁLCULOS DE INGENIERÍA

El ingreso de los datos a la hoja se realiza en las celdas marcadas con este color. Las demás celdas no se modifican.

1. Datos generales

	<i>Turbina</i>	<i>Ciclo</i>	<i>Año/Trimestre</i>	<i>Fecha</i>
	2	Simple	2011 - 1 T	9/03/2011

2. Datos del combustible

Composición: Proviene de la hoja respectiva.

Consumo mensual de gas natural (GN):	9,291,110	m ³ /mes @ T operación
Consumo mensual de gas natural corregido:	8,873,030	Sm ³ /mes @ 15 °C
Horas mensuales de operación:	217.8	h/mes
Flujo volumétrico de combustible:	40,739	Sm ³ _{GN} /h
Densidad del combustible:	0.7327	kg _{GN} /Sm ³ _{GN}
Flujo másico de combustible:	29,850	kg comb/h

3. Parámetros meteorológicos

Presión atmosférica:	760.00	mm Hg
Temperatura ambiente:	28.57	°C
Humedad relativa del aire:	83.08	%

4. Relaciones estequiométricas del aire de combustión

Factor lambda medición (1):	"λ"	2.74	aire real / aire mínimo
Porcentaje de exceso de aire:	n*100	173.97	%
Índice de exceso de aire medición:	n	1.7397	#
Factor lambda calculado:	"λ"	2.74	aire real / aire mínimo
Peso molecular aire seco:		28.84	kg/mol-kg
Densidad del aire seco @ C.N.:		1.29	kg aire seco/Nm ³ aire seco
Humedad absoluta del aire de combustión:		0.0206	kg vap. H ₂ O/kg a.s.
Relación volumétrica de aire seco estequiométrico @ C.N.:		11.31	Nm ³ aire est. seco/m ³ _{GN}
Relación volumétrica de aire real @ C.N.:		30.98	Nm ³ aire real/m ³ _{GN}
Relación másica de aire _{in} seco estequiométrico por comb.:		14.55	kg aire est. seco/m ³ _{GN}
Relación másica de aire real:		39.87	kg aire real/m ³ _{GN}

5. Flujos másicos del aire

Flujo másico de aire real seco:	1,624,417.60	kg aire real seco/h
---------------------------------	--------------	---------------------

CÁLCULOS DE INGENIERÍA

Flujo de humedad del aire real:	33,463.00	kg H ₂ O/h
Flujo másico de aire húmedo:	1,657,880.61	kg aire húmedo/h

6. Relaciones y flujos volumétricos de los gases de salida

Relación volumétrica a C.N. (base seca):	29.87	Nm ³ gas/m ³ _{GN}
Relación volumétrica a C.N. (base húmeda):	32.12	Nm ³ gas/m ³ _{GN}
Flujo volumétrico total @ CN (base seca):	1,216,927.17	Nm ³ gas/h
Flujo volumétrico total @ CN (base húmeda):	1,308,332.37	Nm ³ gas/h

7. Relaciones y flujos másicos de los gases de salida

Relación másica (base seca):	38.37	kg gas/m ³ _{GN}
Relación másica (base húmeda):	40.18	kg gas/m ³ _{GN}
Flujo másico total (base seca):	1,563,303.94	kg gas/h
Flujo másico total (base húmeda):	1,636,721.76	kg gas/h
Flujo de agua generada:	73,417.83	kg H ₂ O/h
Densidad del gas seco @ CN:	1.28	kg gas/Nm ³ gas
Densidad del gas seco @ T salida:	0.41	kg gas/m ³ gas
Temperatura de salida del gas:	592.07	°C

(1) Land Technical Bulletin

Se considera combustión completa

Notas

CN = Condiciones normales (gas @ 1 atm de presión y 0°C)

GN = Gas natural

1 ppm = 10⁻⁴ %

Nota. Se considera la combustión completa y el análisis de gases en base seca. Elaborada por

el autor.

I. Tratamiento y procesamiento de la información del monitoreo

Ficha 2: Cálculos de ingeniería

iv. Determinación de concentración y flujos de emisiones de NOx

<i>Flujo másico de NOx</i>				
<i>Flujo másico (G.N. + aire) = Flujo másico[(CO₂ + CO + COV)g + N₂ + O₂ exceso + NOx]</i>				
Dato	Dato	?	Dato	Dato
Reacciones a elevada temperatura:	$N_2 + O_2 = 2NO$	92.31%	$2NO + O_2 = 2NO_2$	7.69%
Base estequiométrica (kg/h)	$N_2 + 2O_2 = 2NO_2$			$NO + NO_2 = NOx$
	28	64	92	
	19.78	45.20	64.98	kg/h
DATOS				
Concentración de NOx (según medición)	53.39	mg/Nm ³ gas		
Factor lambda (λ)	2.74	aire real / aire mínimo		
Flujo volumétrico total de gases a CN	1 216 927	Nm ³ gas/h		
Flujo másico de NOx medido	64.98	kg NO _x /h	169.82	t/año
Nº de horas de operación anual	2 614	h/año		
Balance de masa en base seca:				
RESULTADOS				
Relación másica de aire _{in} estequiométrico	14.55	kg aire seco/m ³ GN		
Flujo de combustible	40739	m ³ GN/h		
Flujo másico de aire total que ingresa	1 624 418	kg aire seco/h		
Flujo másico de N ₂ que ingresa	1 245 928	kg N ₂ /h		
Flujo másico de N ₂ que reacciona	19.78	kg N ₂ /h		
Flujo másico de N ₂ a la salida	1 245 909	kg N ₂ /h		
Porcentaje másico de N ₂ para generar NO _x	0.001587	%		
Concentración de NO_x	41.56	ppm masa	kg NO _x /kg gas seco	
Concentración de NO_x	26.20	ppm volumen	m ³ NO _x /m ³ gas seco	

Nota. Cálculos realizados en la hoja Excel respectiva. Elaborada por el autor.

I. Tratamiento y procesamiento de la información del monitoreo

Ficha 3: Balance de materia y energía de la turbina a gas

Base de cálculo : 1 hora	INSTRUCCIÓN
I. CÁLCULOS DEL BALANCE DE MATERIA	
1.1 Datos de la turbina	
Potencia nominal:	195 900 kW
Consumo específico de energía (base PCI):	
Heat rate (inverso de la eficiencia)	9165.50 BTU / kWh
1.2 Condiciones ambientales	
Presión atmosférica:	760 mm Hg
Temperatura de referencia aire:	0 °C
Temperatura aire ambiente:	28.57 °C
Humedad relativa:	83.08 %
1.3 Condiciones de referencia para el balance	
Temperatura:	28.57 °C
Poder calorífico del Combustible	
PCI = 1 / PCS = 2:	1 #
1.4 Datos del combustible	
Tipo de combustible:	Gas natural
Flujo volumétrico de combustible:	43 495 m ³ /h
Flujo mísico de combustible:	31 870 kg/h
Composición:	% CH ₄
Poder Calorífico Inferior (PCI):	802.42 kJ/mol CH ₄
Masa molar combustible:	19.6412 g/mol-g
Densidad normal del com.	0.877 kg/Nm ³
Densidad a T medición de flujo:	0.794 kg/m ³
1.5 Datos del aire de combustión	
Composición	
O ₂	21 % vol.
N ₂	79 % vol.
Temperatura de ingreso:	28.57 °C
Humedad absoluta:	0.0206 kg vap. H ₂ O/kg
Flujo mísico de aire seco real:	1 734 337 kg/h
Masa molar aire:	28.84 g/mol-g

1.6 Esteqüimetría de la reacción	
$\text{CH}_4 + 2 \text{ O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2 \text{ H}_2\text{O}$	
Flujo volumétrico de CO_2	54803.93 m^3/h
Flujo volumétrico de H_2O gen.	97590.28 m^3/h
Flujo volumétrico de $\text{O}_{2\text{air}}$	103299.03 $\text{m}^3/\text{O}_{2\text{air}}/\text{h}$
Flujo volumétrico de $\text{N}_{2\text{air}}$	388801.13 $\text{m}^3/\text{N}_{2\text{air}}/\text{h}$
Flujo volumétrico de aire est.	491900.16 $\text{Nm}^3/\text{aire est}/\text{h}$
Flujo máximo de aire est.	533033.65 $\text{kg}/\text{aire est}/\text{h}$
Índice de exceso de aire (R)	2.74 #
Porcentaje de exceso de aire	174 %
1.7 Datos del gas de chimenea	
Temperatura:	392.37 $^{\circ}\text{C}$
Composición:	865.07 K
O_2	13.8 % volumen
CO_2	4.2 % volumen
CO	0.0 % volumen
N_2	82.9 % volumen
1.8 Emisiones de NOx	
Datos de mediciones (ppm)	NO NO _x NOx
Porcentaje de cada emisión (%)	24.9 1.9 26
Porcentaje en volumen (%)	0.0024 0.00019 0.0026
Datos de balance (ppm)	24.1 1.9 26
Porcentaje en volumen (%)	0.0024 0.00019 0.0026
Diferencia de mediciones (%)	0.50 0.50 0.50
1.9 Cálculos de mediciones	
Flujo máx. de N_2 consumo	21.11 kg/h
Flujo máx. de O_2 consumo	48.26 kg/h
Flujo máx. de NO_x generado	69.37 kg/h

Nota. Cálculos realizados en la hoja Excel respectiva. Elaborada por el autor.

II. Método de cálculo de la cinética química de la formación de óxido nítrico - NO

Ficha 4: Instrucciones para la verificación de la aplicación de la tecnología Dry Low NOx (DLN) de baja emisión de NOx

A. Revisión de teoría:

Revisar el libro Mecanismo de Zeldovich (los cálculos provienen del archivo word 1).

Revisar el libro del cálculo de energía libre, que tiene un cuadro para llenar según las tablas en archivo word 2. Energía libre de Gibbs y el pdf 3. Tablas-Termodinámica-Cengel.

El fundamento teórico se muestra en el apéndice. *La temperatura de llama corresponde a la formación de NO en la cámara de combustión.*

B. Método para calcular la temperatura de llama:

Elabora el cuadro de concentración de NO calculado que corresponde a la temperatura de llama, en el rango de 800 a 2500 K, según los pasos siguientes:

Paso 1

Elabora el cuadro de cálculo de energía libre para las temperaturas de llama en el intervalo de 800 a 2500 K, **con frecuencia de 50 K**.

Paso 2

Con los valores del cuadro anterior, utiliza el mecanismo de Zeldovich de la forma siguiente:

Considerar la $P = 3$ bar y el $t = 25$ ms como constantes.

2.1 Determinar la concentración de NO calculado (ppm), para cada temperatura de llama. Como referencia en el intervalo de 800 - 1800 K, se tiene:

El valor 800 K corresponde a la temperatura de llama mínima aproximada según la hoja de balance, obtenida por el sistema de enfriamiento de combustores actuales.

El valor 1800 K corresponde a la información del fabricante, puede alcanzar un valor máximo de 1800 K, según la resistencia de los materiales actuales.

2.2 Incluye los valores de h , s para calcular la energía libre que corresponde a cada temperatura de llama.

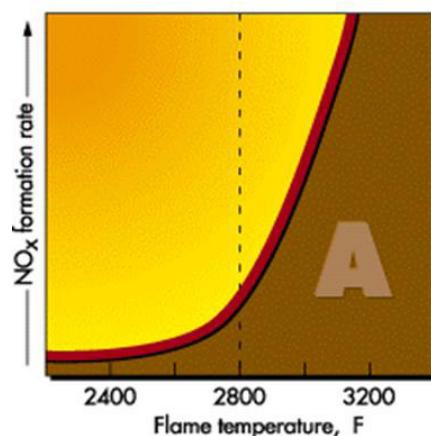
Elabora el cuadro con la data de temperatura de llama máxima (Tll) vs. Concentración teórica de NO (Ct) en ppm, para el intervalo de temperatura indicado.

x vs. y

2.3 Grafica de la curva teórica Tll vs. Ct.

La gráfica obtenida representa la temperatura máxima en la cámara de combustión. Según la figura adjunta A.

Paso 2 →



Paso 3

Grafica la temperatura de llama del combustor (T_{llc}) vs. Concentración medida de NO a condiciones de operación (C_m), para cada turbina.

La temperatura de llama del combustor se calcula mediante el balance de energía (ver instrucción en la hoja respectiva).

La temperatura de llama del combustor corresponde a la obtenida por la tecnología de Dry Low NOx, para disminuir los NOx.

Con el **valor de C_m de NO** leer en la curva de T_{ll} vs C_t y determinar su temperatura de llama máxima (teórica). Elabora un cuadro.

Paso 4

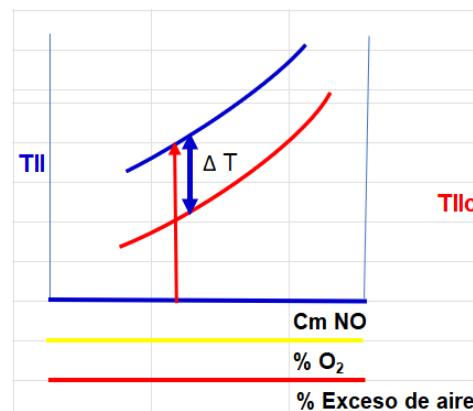
Grafica la C_m vs. Temperatura de llama máxima (T_{ll}) y temperatura de llama del combustor (T_{llc}), para cada turbina.

Los valores de T_{llc} se *calculan en el balance de energía*.

Presenta un cuadro de **la diferencia** de la T_{ll} menos la T_{llc} , de la C_m de NO para cada turbina.

Dibuja en el eje x el % de exceso de O_2 y el % de exceso de aire que corresponden a C_m .

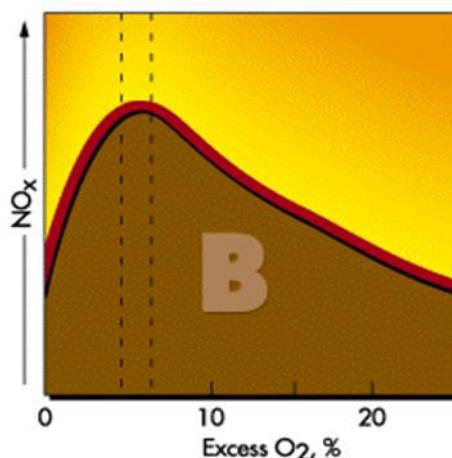
Paso 4



Paso 5

Elabora el cuadro de % de O_2 y concentración medida de NOx, tomando las mediciones de cada turbina.

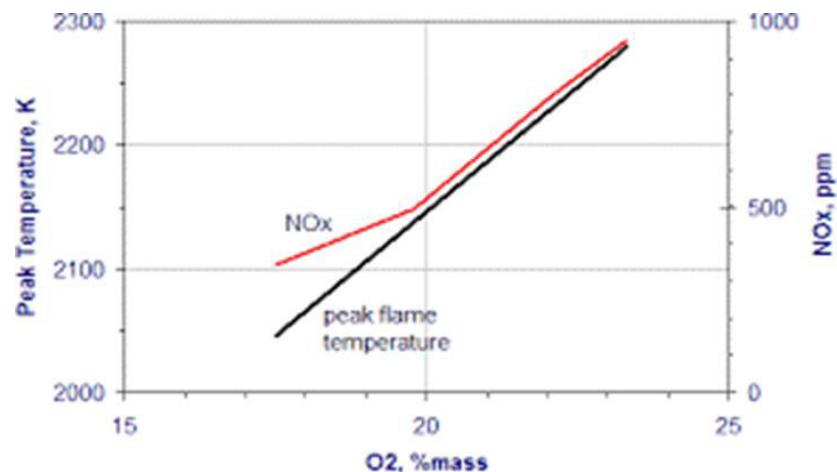
Grafica el % O_2 vol vs. C_m de NO. Según la figura adjunta B.



Paso 6

Elabora el cuadro de % de O₂ vol, Cm NO y temperatura de llama máxima Tll, para cada turbina. Gráfica el % de O₂ vol vs. Tll y Cm NO.

Elabora el cuadro de % de O₂ vol, Cm NO y temperatura de llama del combustor Tllc, para cada turbina. Grafica el % de O₂ vol vs. Tllc y Cm NO.



III. Desarrollo del modelo dinâmico para determinar la influencia de los principales factores de combustión de gas natural

Ficha 5: Registro de parámetros para el modelo dinâmico

Parámetros de operación	Variable		
	Óxidos de nitrógeno (NOx)		
Valores	Mínimo	Promedio	Máximo
Año			
Potencia nominal (MW) = 197,8			
Factor de carga (%) = 98 - 100 (1)			
Horas/día			
Días/año			
Concentración de NOx (mg/Nm ³) @ C.N. y 15 % O ₂ (2)			
Flujo volumétrico de gases (Nm ³ /h) (3)			
Flujo másico de gases (t/año)			
Flujo másico de NOx (t/año)			
Partes por millón de NO en volumen (ppm vol)			
Partes por millón de NO ₂ en volumen (ppm vol)			
Exceso de aire (%)			
Exceso de O ₂ (%)			
Temperatura de gases de salida (°C)			
Temperatura ambiente (°C)			
Temperatura de llama del combustor (K)			
Factor de emisión (kg de NOx/MWh gas natural)			

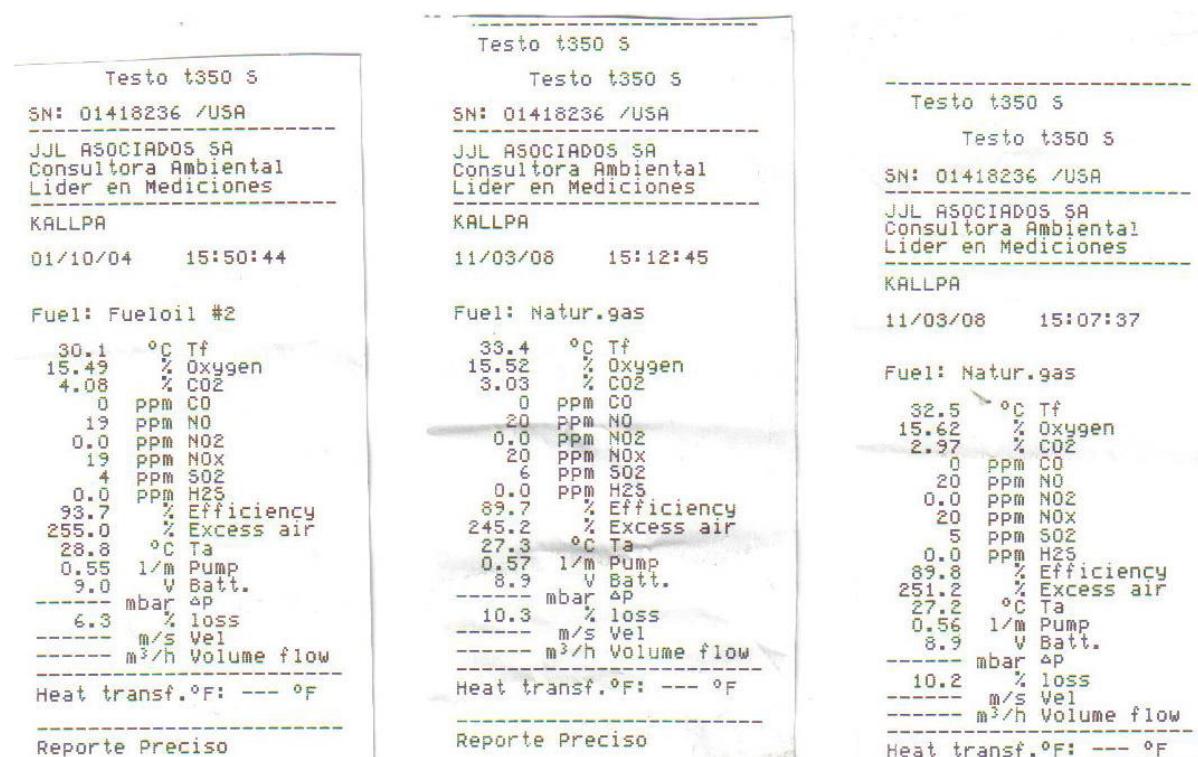
Anexo E Confiabilidad de instrumentos

La confiabilidad permitirá conocer el grado en el que un instrumento produce resultados consistentes y coherentes, es decir, que su aplicación repetida al mismo sujeto u objeto, produce resultados iguales. (Kerlinger, 2002)

Los instrumentos del presente plan consisten en formatos que permiten recolectar datos de mediciones y cálculos registrados anteriormente en informes de monitoreo de calidad del aire procedentes de una institución de supervisión ambiental reconocida, dichas mediciones se efectuaron empleando analizadores de gases de combustión teniendo vigentes sus respectivos certificados de calibración, cumpliendo los requisitos legales. En la Figura A siguiente se muestra la impresión de los resultados de las mediciones obtenidas del analizador de gases que corresponden al primer trimestre de 2008.

Figura A

Impresión de los resultados de las mediciones de análisis de gases



Nota. Las impresiones no muestran los valores de flujo volumétrico ni la velocidad de salida de gases.

La Figura B presenta un certificado de calibración del instrumento respectivo, acreditando la confiabilidad de la información relacionada a las mediciones de las emisiones gaseosas efectuadas en chimeneas de la central termoeléctrica evaluada.

Figura B

Certificado de calibración del instrumento analizador de gases de chimenea



Kalibrier-Protokoll

Certificate of conformity • Protocole d'étalonnage
Protocollo di collaudo • Informe de calibración

Gerät / Module type / Type de modèle / Prodotto / Modelo: **t350 S**
Serien-Nummer / Serial No. / No. de série / No. Serie strumento / n° de serie: **1418236**

Temperaturmessung Temperature measurement Mesure de température Misura della temperatura Medición de temperatura	Sollwert Reference Référence Valore campione Referencia	Istwert Actual value Valeur effect. Valore misurato Valor medido	zulässige Abweichung Permissible deviation Différence admissible Scostamento ammesso Desviación permitida
--	---	--	---

Verbrennungslufttemp. / Ambient air temp. Température d'air de combustion Temperatura aria comburente Temperatura ambiente	100.0 °C	100.1 °C	+- 0.5 °C
---	----------	----------	-----------

Abgastemperatur / Flue gas temperature Température des fumées Temperatura fumi Temperatura gases	100.0 °C	100.1 °C	+- 0.5 °C
---	----------	----------	-----------

Zug-/Druckmessung Draught/pressure measurement Mesure de tirage/de pression Misura della pressione/ tiraggio Medición de tiro/presión	10.00 mbar	10.00 mbar	+- 0.12 mbar
---	------------	------------	--------------

Gasmeßwerte / Gas values / Valeurs de gaz mesurées / Parametri di misura dei gas / Gases patrón

Reg. Nr. Reg. No. Reg. No. Num.reg. nº certi	Gas	Sollwert Reference Référence Valore campione Referencia	Istwert Actual value Valeur effect. Valore misurato Valor medido	zulässige Abweichung Permissible deviation Différence admissible Scostamento ammesso Desviación permitida
--	-----	---	--	---

2461A	O2	0.0 %	0.0 %	+- 0.2 %
1864A	O2	1.4 %	1.4 %	+- 0.2 %
D173753	O2	5.0 %	5.0 %	+- 0.2 %
2461A	CO	101 ppm	101 ppm	+- 10 ppm
D173753	CO	408 ppm	408 ppm	+- 20 ppm
1864A	CO	1001 ppm	1003 ppm	+- 50 ppm
2461A	NO	150 ppm	149 ppm	+- 7 ppm
D102392	SO2	99 ppm	98 ppm	+- 5 ppm
D745822	NO2	103.0 ppm	106.0 ppm	+- 5.0 ppm

Anexo F Información del fabricante Siemens

El Anexo muestra el desempeño para las turbinas Siemens SGT6-5000F (formalmente Siemens Westinghouse W501F Econopac) indicando la diferencia de la inyección de agua y la inyección de vapor puede hacer a las clasificaciones de potencia nominal.

Table 6. Net Ref. Performance for the Siemens SGT6-5000F.

Combustor Type	DLN Dry	Conventional Water Injection	Conventional Steam Injection	DLN * Steam Augmentation
Fuel	Natural Gas	Natural Gas	Natural Gas	Natural Gas
Net Power Output (kW)	186,500	196,900	205,400	204,420
Net Heat Rate (Btu/kWh) (LHV)	9,260	9,700	8,995	9,035
Net Heat Rate (kJ/kWh) (LHV)	9,770	10,233	9,490	9,532
Exhaust Temperature (°F/ °C)	1,087/586	1,063/573	1,090/588	1,090/588
Exhaust Flow (lb/hr)	3,848,400	3,963,600	3,981,600	3,971,324
Exhaust Flow (kg/hr)	1,745,634	1,797,889	1,806,054	1,801,393
Fuel Flow (lb/hr)	80,284	88,787	85,892	85,840
Fuel Flow (kg/hr)	36,417	40,274	38,961	38,897
Fuel	Liquid	Liquid	Liquid	Liquid*
Net Power Output (kW)	179,200	185,000	196,500	
Net Heat Rate (Btu/kWh) (LHV)	9,536	9,794	9,027	
Net Heat Rate (kJ/kWh) (LHV)	10,060	10,333	9,524	
Exhaust Temperature (°F/ °C)	1,050/566	1,037/558	1,062/572	
Exhaust Flow (lb/hr)	3,895,200	3,963,600	4,006,800	
Exhaust Flow (kg/hr)	1,766,863	1,797,889	1,817,484	
Fuel Flow (lb/hr)	91,940	98,709	96,143	
Fuel Flow (kg/hr)	41,704	44,548	43,610	

* Steam injected through the combustor section casing into the compressor discharge air to increase output.
* Steam augmentation with liquid fuel available on a case-by-case basis.

Table 2. Alstom's GT 24/ GT 26 (188MW 60Hz, 281MW 50Hz). Both used in simple cycle, combined cycle and other co-generation applications.

GT24 (ISO 2314:1989)	
Fuel	Natural gas
Frequency	60 Hz
Gross Electrical output	187.7 MW*
Gross Electrical efficiency	36.9 %
Gross Heat rate	9251 Btu/kWh
Turbine speed	3600 rpm
Compressor pressure ratio	32:1
Exhaust gas flow	445 kg/s
Exhaust gas temperature	612 °C
NOx emissions (corr. to 15% O ₂ ,dry)	< 25 vppm

Simple cycle power generation		
Power output	187 MW	
Fuel	Natural gas, LNG, syngas, blast furnace gas, biogas, ethane, propane, condensate, distillate oil, heavy and crude oils, bio-diesel, alcohols, naphtha, kerosene	
Frequency	50 Hz	
Gross efficiency	36.2%	
Heat rate	9,945 kJ/kWh (9,427 Btu/kWh)	
Turbine speed	3,000 rpm	
Pressure ratio	12.1:1	
Exhaust mass flow	558 kg/s (1,230 lb/s)	
Exhaust temperature	536 °C (997 °F)	
NO _x emissions	<25 ppmvd at 15% O ₂ on fuel gas (without water injection for NO _x control), <42 ppmvd at 15% O ₂ on fuel oil (with water injection for NO _x control)	

Combined cycle power generation		
Siemens combined cycle power plant	1 x 1	2 x 1
Net plant power output	275 MW	551 MW
Net plant efficiency	53.3%	53.3%
Net heat rate	6,755 kJ/kWh (6,403 Btu/kWh)	6,755 kJ/kWh (6,403 Btu/kWh)
Number of gas turbines	1	2
Pressure/reheat	Dual/No	Dual/No

Physical dimensions		
Approx. weight	189,000 kg (417,000 lb)	
Length	10.3 m (34 ft)	
Width	4.0 m (13 ft)	
Height	4.0 m (13 ft)	

Anexo G Comandos y resultados del programa R

Se presentan los comandos utilizados para el desarrollo de los cálculos estadísticos utilizando el programa R.

Análisis de regresión

Comandos utilizados en la consola

```
> reg<-lm(Concentracion_NOx~Porcentaje_de_exceso_de_aire,data='2023TesisCC')
> summary(reg)
```

Call:

```
lm(formula = Concentracion_NOx ~ Porcentaje_de_exceso_de_aire,
  data = '2023TesisCC')
```

Residuals:

1	2	3	4	8	12
-1.6638	-3.6150	-0.3936	1.0737	-1.4908	6.0895

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	-16.9658	34.4200	-0.493	0.648
Porcentaje_de_exceso_de_aire	0.2945	0.2001	1.472	0.215

Residual standard error: 3.757 on 4 degrees of freedom

(16 observations deleted due to missingness)

Multiple R-squared: 0.3513, Adjusted R-squared: 0.1891

F-statistic: 2.166 on 1 and 4 DF, p-value: 0.2151

Ho: No existe influencia del % de exceso de aire sobre la Conc Nox.

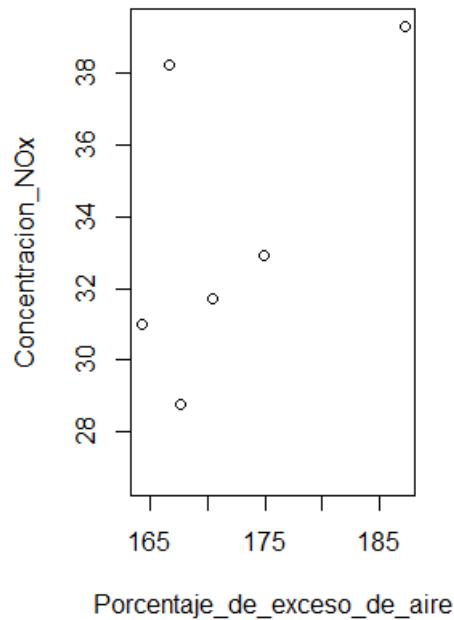
Como p-value>0.05 entonces se acepta la hipótesis nula.

```
> summary(aov(reg))#F-Fisher tabla ANOVA
```

	Df	Sum	Sq Mean	Sq F value	Pr(>F)
Porcentaje_de_exceso_de_aire	1	30.56	30.56	2.166	0.215
Residuals	4	56.45	14.11		

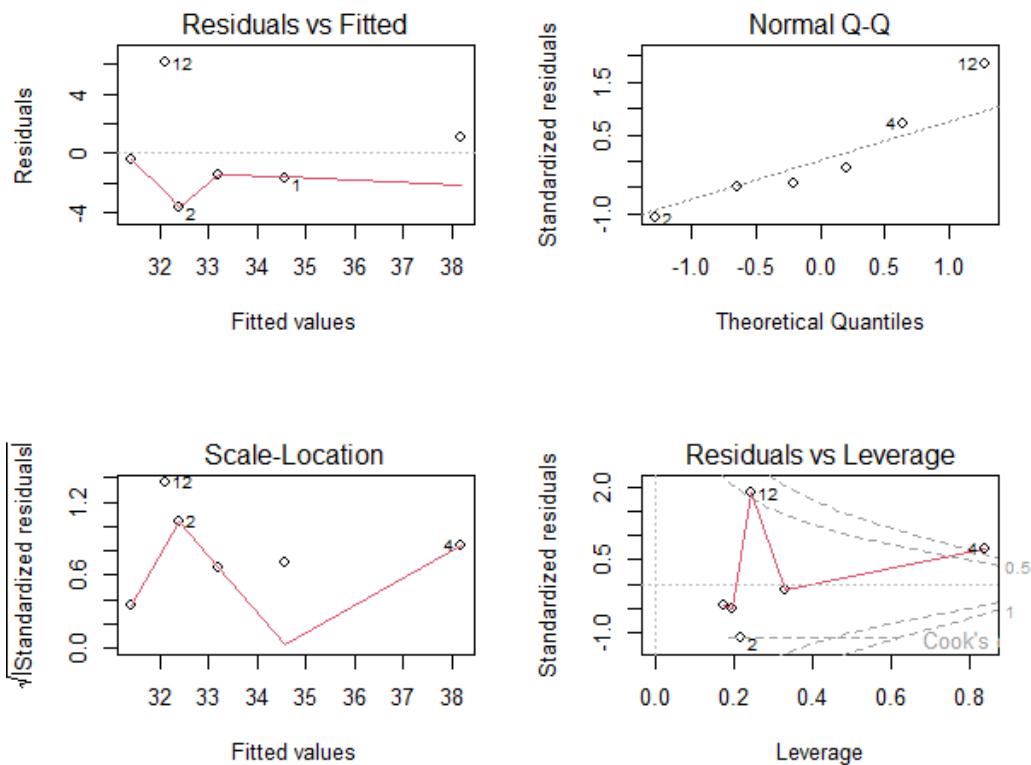
16 observations deleted due to missingness

```
plot(Concentracion_NOx~Porcentaje_de_exceso_de_aire,data='2023TesisCC')
```



```
> par(mfrow=c(2,2))
```

```
> plot(reg)
```



Temperatura de gases de salida

```
> reg<-lm(Concentracion_NOx~Temperatura_de_gas_de_salida,data='2023TesisCC')
> summary(reg)
```

Call:

```
lm(formula = Concentracion_NOx ~ Temperatura_de_gas_de_salida,
  data = '2023TesisCC')
```

Residuals:

1	2	3	4	8	12
2.376	-2.753	-4.161	4.662	-2.552	2.429

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	-13.2396	39.9340	-0.332	0.757
Temperatura_de_gas_de_salida	0.4512	0.3840	1.175	0.305

Residual standard error: 4.021 on 4 degrees of freedom

(16 observations deleted due to missingness)

Multiple R-squared: 0.2566, Adjusted R-squared: 0.07069

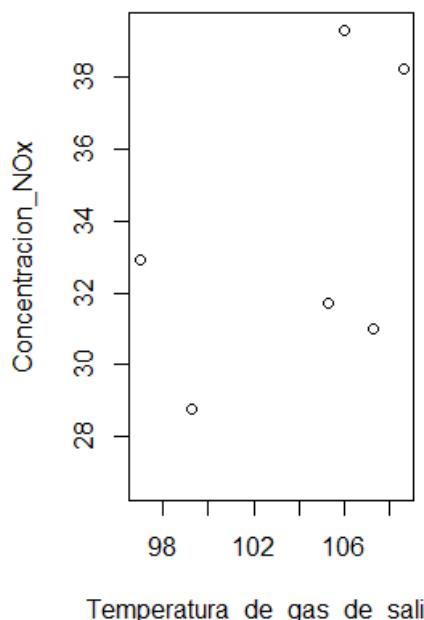
F-statistic: 1.38 on 1 and 4 DF, p-value: 0.3052

> summary(aov(reg))#F-Fisher tabla ANOVA

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Temperatura_de_gas_de_salida	1	22.32	22.32	1.38	0.305
Residuals	4	64.69	16.17		

16 observations deleted due to missingness

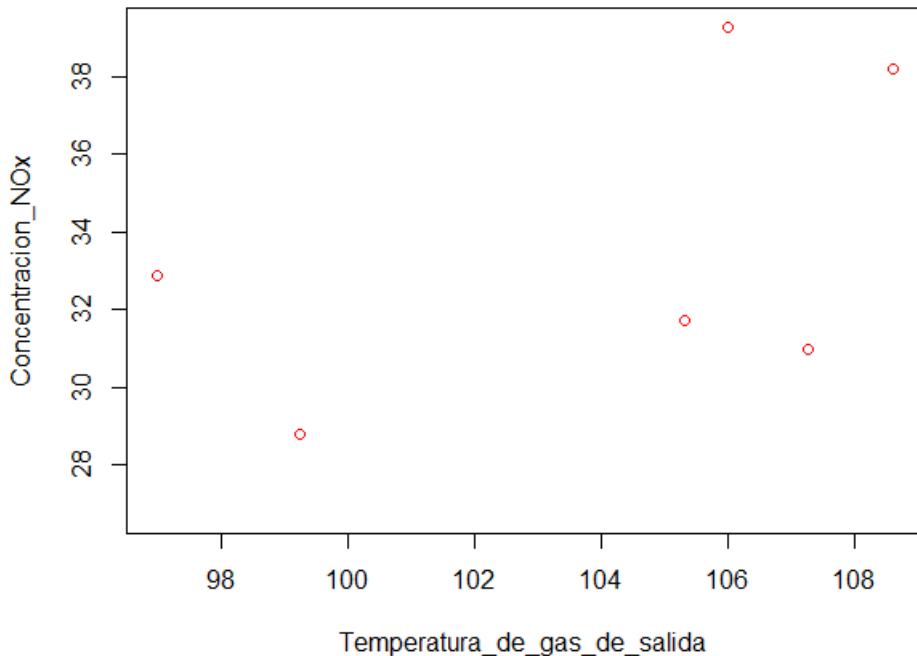
plot(Concentracion_NOx~Temperatura_de_gas_de_salida,data='2023TesisCC')



plot(Concentracion_NOx~Temperatura_de_gas_de_salida,'2023TesisCC',col="red")

> title("Concentración de NOx (mg/Nm3) vs. Temperatura de gases (°C)")

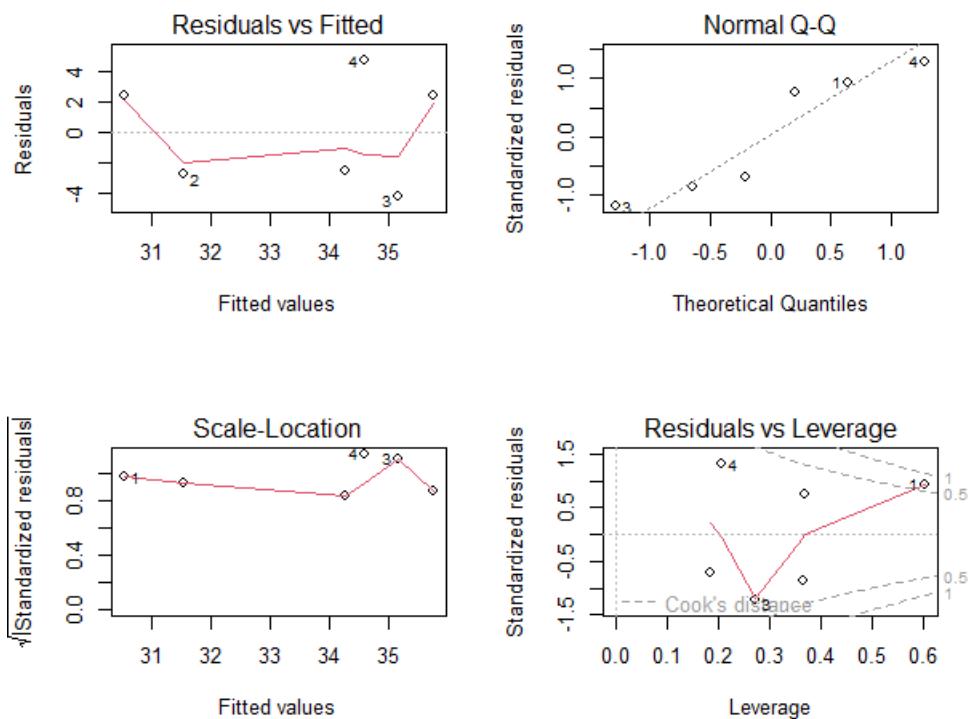
Concentración de NOx (mg/Nm3) vs. Temperatura de gases (°C)



```

> reg<-lm(Concentracion_NOx~Temperatura_de_gas_de_salida,data='2023TesisCC')
> par(mfrow=c(2,2))
> plot(reg)

```



El plot de residuales en la media 0, forma de embudo, no hay homogeneidad de varianzas.

Gráfico de normalidad, los puntos deben estar sobre la línea, no hay normalidad.

Análisis de correlación

```
reg<-lm(Concentracion_NOx~Porcentaje_de_exceso_de_aire,data='2023TesisCC')
> correlacion='2023TesisCC'[2:6]
> names(correlacion)
[1] "Concentracion_NOx"
[2] "Porcentaje_de_exceso_de_aire"
[3] "Temperatura_de_gas_de_salida"
[4] "Potencia"
[5] "Flujo_volumétrico_de_gases_de_salida"
> cor(correlacion)
```

Concentracion_NOx	
Concentracion_NOx	1
Porcentaje_de_exceso_de_aire	NA
Temperatura_de_gas_de_salida	NA
Potencia	NA
Flujo_volumétrico_de_gases_de_salida	NA
Porcentaje_de_exceso_de_aire	
Concentracion_NOx	NA
Porcentaje_de_exceso_de_aire	1
Temperatura_de_gas_de_salida	NA
Potencia	NA
Flujo_volumétrico_de_gases_de_salida	NA
Temperatura_de_gas_de_salida	
Concentracion_NOx	NA
Porcentaje_de_exceso_de_aire	NA
Temperatura_de_gas_de_salida	1
Potencia	NA
Flujo_volumétrico_de_gases_de_salida	NA
Potencia	
Concentracion_NOx	NA
Porcentaje_de_exceso_de_aire	NA
Temperatura_de_gas_de_salida	NA
Potencia	1
Flujo_volumétrico_de_gases_de_salida	NA

Flujo_volumétrico_de_gases_de_salida

Concentracion_NOx	NA
Porcentaje_de_exceso_de_aire	NA
Temperatura_de_gas_de_salida	NA
Potencia	NA
Flujo_volumétrico_de_gases_de_salida	1

Prueba de normalidad.

Se proponen las siguientes hipótesis:

Ho: el modelo presenta distribución normal

Ha: el modelo x no presenta distribución normal

```
> shapiro.test(`2023TesisCC`$Concentracion_NOx)
```

Shapiro-Wilk normality test

```
data: `2023TesisCC`$Concentracion_NOx
```

W = 0.94573, p-value = 0.6183

Como p-value > 0,05 zona de aceptación, se acepta la hipótesis nula.

Debe efectuar entonces un modelo no lineal, porque los residuales no tienen distribución normal.

Porcentaje de exceso de aire

```
reg<-lm(Concentracion_NOx~Porcentaje_de_exceso_de_aire,data='2023TesisCC')
```

```
> e<-residuals(reg)
```

```
> shapiro.test(e)
```

Shapiro-Wilk normality test

```
data: e
```

W = 0.89428, p-value = 0.3412

Temperatura de gas de salida

```
reg<-lm(Concentracion_NOx~Temperatura_de_gas_de_salida,data='2023TesisCC')
```

```
e<-residuals(reg)
```

```
> shapiro.test(e)
```

Shapiro-Wilk normality test

```
data: e
```

W = 0.88412, p-value = 0.2885

Ambos factores presentan normalidad Debe efectuar entonces un modelo no lineal, porque los residuales tienen distribución normal.

###Evalúa la normalidad en la variable dependiente###

```
hist(`2023TesisCC`$Concentracion_NOx)
```

Histogram of `2023TesisCC`\$Concentracion_N