

## Estrategia de inspección, evaluación por integridad y mantenimiento de chimeneas de hornos, calderas y precipitadores electrostáticos en la GRB

**Carlos Hernando Patiño / Carlos Humberto Loza Arenas / Julio A. Moncada**

Refinería de Barrancabermeja, ECP

mails: carlos.patino@ecopetrol.com.co / carlos.loza@ecopetrol.com.co / Julioan.moncada@ecopetrol.com.co  
Barrancabermeja. – Colombia

### Resumen

En la refinería de Barrancabermeja, se desarrolló una estrategia innovadora para la inspección y/o mantenimiento de 68 chimeneas asociadas a hornos, calderas y precipitadores electrostáticos. Esta estrategia incluyó la caracterización y monitoreo de condición de las chimeneas mediante inspecciones visuales con drones, evaluaciones de integridad mediante perfil termográfico y estudios topográficos, verificación de verticalidad ante posibles debilidades estructurales y/o asentamientos de la base, evaluación del diseño mecánico con énfasis en el análisis de resistencia, rigidez, durabilidad y estabilidad de la estructura mediante la aplicación de criterios de diseño según código ASME STS-1. Por último, se recopilaron y analizaron los datos con el fin de construir e implementar un plan de acción.

### 1. Introducción

Las chimeneas industriales son componentes esenciales en muchas instalaciones, como refinerías, plantas de energía y fábricas, ya que permiten la expulsión controlada de gases y partículas resultantes de procesos de combustión. La gestión adecuada de estos activos es crucial para garantizar la seguridad operativa, la eficiencia energética y el cumplimiento de normativas ambientales. Una estrategia de inspección y mantenimiento bien estructurada no solo prolonga la vida útil de las chimeneas, sino que también previene fallos catastróficos que podrían tener graves consecuencias económicas y ambientales. En este contexto, la implementación de tecnologías avanzadas, como drones para inspecciones visuales y termografía para evaluar el estado del material, junto con la aplicación de estándares de diseño reconocidos, asegura que las chimeneas operen de manera óptima y segura. La gestión efectiva de estos activos es, por tanto, fundamental para la sostenibilidad y el rendimiento continuo de las operaciones industriales.

### 2. Metodología

La refinería de Barrancabermeja implementó una estrategia integral para asegurar la confiabilidad de sus 68 chimeneas asociadas a hornos, calderas y precipitadores electrostáticos. La metodología desarrollada consta de las siguientes etapas:

- a. Definición, Inventario y caracterización de la población objetivo
- b. Definición, planeación e implementación de un programa de monitoreo de condición
- c. revisión del diseño mecánico según estándares aplicables
- d. Plan de acción

### 3. Desarrollo de metodología

#### 3.1 Definición, Inventario y categorización de la población objetivo.

En esta etapa se definieron criterios para identificar y cuantificar las chimeneas de la GRB. Aquellos ductos verticales, sujetos a cargas de viento y/o sismo que operan con gases de combustión caliente (>250°F) con o sin refractario

interno conformaron la población objetivo. Basado en ello, 68 chimeneas cumplieron los criterios preestablecidos.

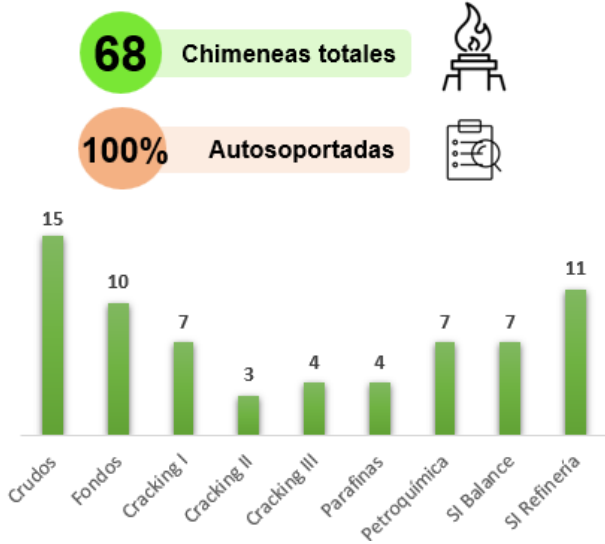


Fig. 1 Número de chimeneas por departamento operativo GRB

Se categorizaron las 68 chimeneas como columnas largas o cortas teniendo en cuenta la teoría de pandeo lineal y el concepto de relación de esbeltez. En este punto se calcularon las relaciones de esbeltez de cada una de las 68 chimeneas y se compararon con un valor de referencia (esbeltez crítica) propia de cada material.

- Ecuación para calcular la relación de esbeltez.

$$\lambda = \frac{L_e}{r_g} \quad (1)$$

- Ecuación para calcular el radio de giro

$$r_g = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (2)$$

$\lambda$ : Relación de esbeltez

$L_e$ : Altura efectiva

$r_g$ : Radio de giro

$I$ : Inercia o segundo momento de área  
 $A$ : área de la sección transversal

- Ecuación para calcular la relación de esbeltez crítica.

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{\delta_y}} \quad (3)$$

$\lambda_c$ : Relación esbeltez crítica

$E$ : módulo de elasticidad

$\delta_y$ : esfuerzo de fluencia

Ahora:

Si  $\frac{\lambda}{\lambda_c} \leq 1$  columna corta

Si  $\frac{\lambda}{\lambda_c} > 1$  columna larga

Basado en la relación  $\frac{\lambda}{\lambda_c}$  se categorizaron 5 chimeneas como columnas cortas y 63 chimeneas como columnas largas.

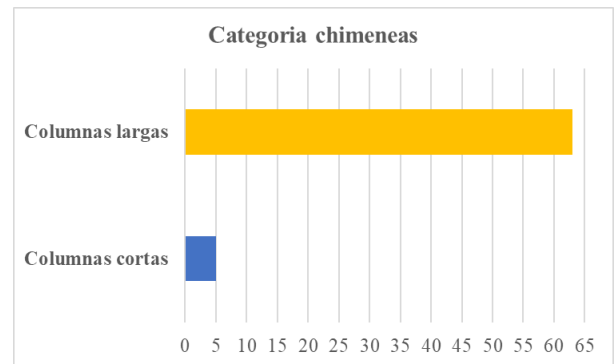


Fig. 2 Categorización de chimeneas por esbeltez

Esta categorización es importante debido a que permite visualizar cuales chimeneas presentan menor rigidez o mayor flexibilidad. Este parámetro está relacionado con el nivel de deflexión estática y/o dinámica ante cargas externas y la susceptibilidad a fenómenos de vibración inducida por viento. Además, las columnas largas tendrán mayor nivel de

importancia a la hora de priorizar acciones en relación con el nivel de riesgo producto de los hallazgos encontrados en la etapa de inspección y/o diseño, ya que su falla estará más relacionada con Inestabilidades y/o bifurcaciones que por resistencia.

### 3.2 Definición, planeación e implementación de un programa de monitoreo de condición

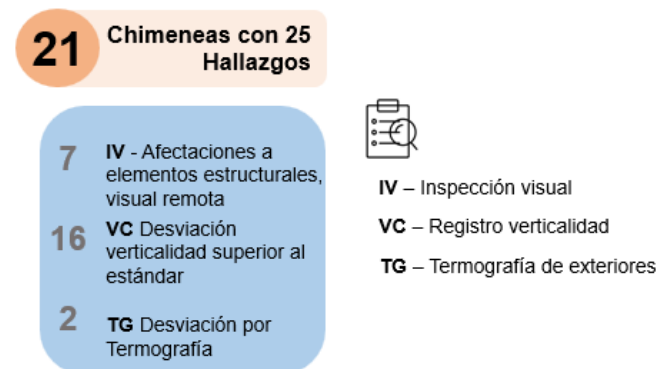
Se definió el plan de inspección de forma generalizada basado en 3 requerimientos

- a. Evaluación de la condición de los elementos estructurales con el equipo en servicio. Para ello, se eligió la inspección visual externa mediante el uso de Aero naves No tripuladas (Dron) y la elaboración de 68 reportes de condición
- b. Evaluación de condición del refractario interno y/o casing de chimeneas. Para evaluar el estado del refractario interno (para chimeneas “lined”) y/o el estado del casing (para chimeneas “Unlined”) se eligió el monitoreo por termografía de exteriores con el fin de identificar puntos y/o zonas calientes para las cuales su principio físico se relaciona con el espesor de material (refractario o material base, conductividad térmica, área de disipación de calor, gradiente térmico, etc.) el cual permite inferir zonas con refractario caído o pérdidas de material base local y/o generalizada, perforaciones en lámina, etc.
- c. Evaluación de verticalidad. Se planteo la medición de verticalidad mediante equipos de topografía con el fin de establecer puntos de control repetibles en cada una de las chimeneas y compararlos con la deflexión máxima permitida en la fase de montaje referenciada en ASME STS-1. Adicionalmente, se incluye en la hoja de

ruta de mantenimiento la medición periódica de verticalidad a intervalos de 5 años como máximo y 6 meses como mínimo teniendo en cuenta los hallazgos de inspección y el criterio de ingeniería del ing. de mantenimiento y/o confiabilidad del área.

Una vez definido el plan de monitoreo se construyó cronograma de actividades y tiempos detallados para ejecutar la inspección visual por dron, inspección termográfica y la toma de registro de verticalidad de cada una de las chimeneas. De igual manera se designó un líder de Ensayos, quien se encargó del seguimiento y control de cada una de las actividades, garantizando el cumplimiento oportuno de las acciones acordadas en el cronograma, la generación de los reportes de inspección asociada a cada ensayo, la construcción y disponibilidad del repositorio de inspección para cada chimenea y la comunicación de hallazgos relevantes a los ingenieros de soporte de área y al jefe de departamento de la disciplina de equipo estático.

Una vez finalizado el plan de inspección se encontraron los siguientes hallazgos.



**Fig. 3** Compilado total de hallazgos de inspección encontrados en 21 de las 68 chimeneas.

### 3.3 revisión del diseño mecánico según estándares aplicables

Antes de iniciar la fase de revisión de diseño mecánico se inicio el proceso de recopilación de información asociada a datasheet's, planos mecánicos, PFD's etc. Una vez obtenida la información, se elaboró cuadro de priorización integrando los hallazgos de inspección visual, termografía y registro de verticalidad para establecer el orden de revisión de diseño. Para la revisión del diseño mecánico se evaluaron los diseños de las chimeneas de la GRB basado en las normas CICIND y ASME STS-1. Para optimizar los tiempos y mejorar el análisis se usó el software MCASTACK el cual es un software especializado en el diseño y análisis de chimeneas y stacks de acero basado en normas de diseño reconocidas como CICIND, ASME STS- 1, etc.

Se definieron parámetros de diseño sísmico basados en resultados de la microzonificación sísmica de la GRB la cual clasifica el suelo y su respuesta sísmica por zonas. De igual manera, para cargas por viento se estandarizo el diseño por presión de viento a una velocidad de 100 km/h @ 10 m de elevación y a partir de ahí se construyo el perfil de carga por viento. Con el animo de evaluar los resultados de forma estandarizada, se construyo diagrama de flujo.

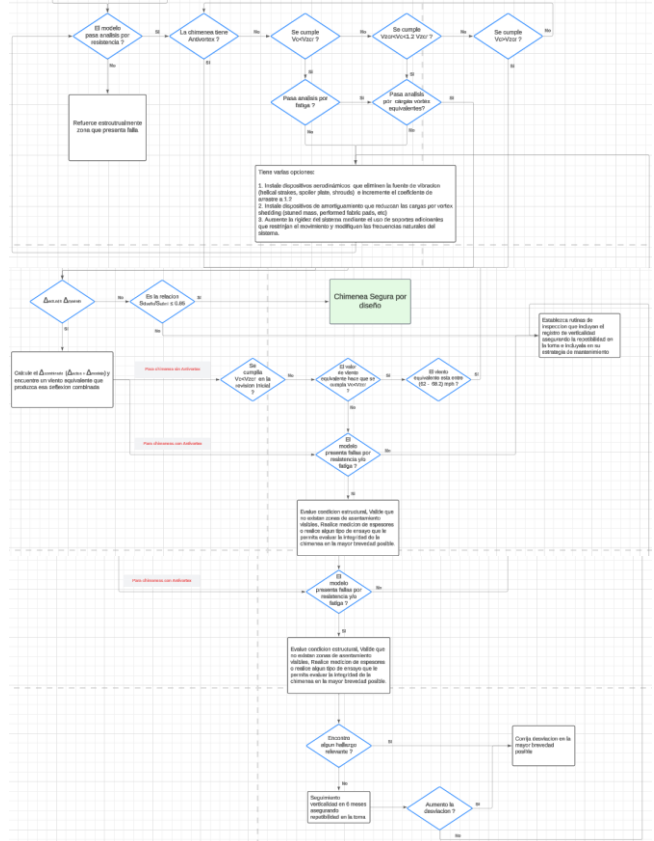


Figura. 4 diagrama de flujo para análisis de resultados diseño chimeneas.

Una vez culminada el proceso de recopilación de información y definición de criterios de diseño y análisis se procedió a modelar cada una de las chimeneas y estudiarla bajo las cargas preestablecidas.

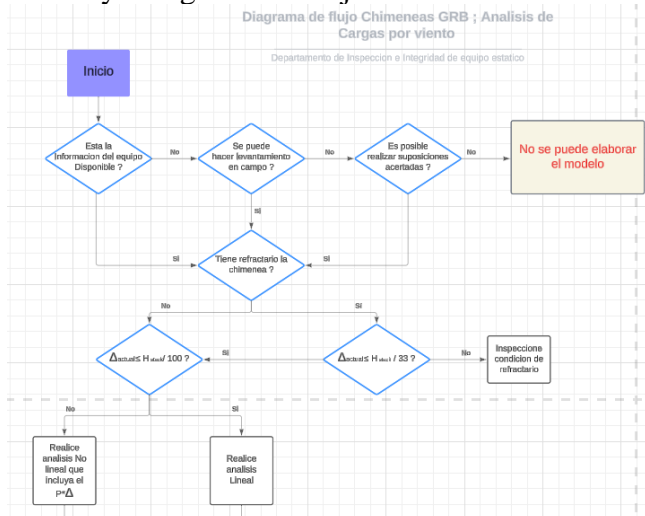


Figura. 5 modelamiento chimenea GRB

Del resultado del modelamiento se obtuvieron 3 chimeneas con oportunidades en el diseño, una de ellas relacionada con inestabilidad local que implicó rigidizar la zona con requerimiento de refuerzo y dos relacionadas con fatiga mecánica inducida por vortex shedding y falla por resistencia en los top plate y gusset's de la base de la chimenea, lo cual implicó la adaptación de un elemento antivortex (helical strake) y el reforzamiento de la base de las chimeneas.

### 3.4 Plan de acción

Una vez ejecutadas las etapas previas y consolidado los hallazgos de inspección y diseño, se procedió a realizar proceso de control de cambio en los casos en los cuales fue necesario ajustar el diseño (elaboración de recomendación técnica, análisis de riesgo de No ejecutar la acción y documento de factibilidad) y gestionar la implementación de acciones de mantenimiento en los casos donde se encontraron desviaciones por integridad que ameritan su restauración en el corto o mediano plazo.

### Bibliografía

1. ASME, "Steel Stacks," ASME STS-1-2021, American Society of Mechanical Engineers, 2022
2. CICIND, "Model Code for Steel Chimneys," CICIND Guideline, Revision 2, September 2010
3. ASME, "Boiler and Pressure Vessel Code, Section II: Materials, Part D: Properties," ASME BPVC-II-D-2021, American Society of Mechanical Engineers, 2021.
4. ASCE, "Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures," ASCE/SEI 7-16, American Society of Civil Engineers, 2016

5. J.E. Shigley, C.R. Mischke, R.G. Budynas, "Mechanical Engineering Design," 9th ed., McGraw-Hill, pp. 410-415, 2011.

**Carlos Hernando Patiño** Ing. Mecánico, Magister en ing. Industrial, con más de 20 años de experiencia en el sector Oil & gas liderando procesos de gestión y análisis de condición de activos, incorporación y desincorporación de equipos, Análisis de falla, procesos de eliminación de defectos, Investigaciones de falla, etc. Cuenta con las siguientes certificaciones internacionales API 570, API510, API 653, API 580 y API 936. Actualmente vinculado a la Gerencia Refinería Barrancabermeja como jefe de departamento de la especialidad de Inspección e integridad de equipo estático

**Carlos Humberto Loza** Ing. mecánico, magíster en Gestión de Proyectos, con 16.5 años de experiencia en confiabilidad de equipos estáticos, desarrollando y liderando equipos de ejecución de planes de inspección y mantenimiento de corto, mediano y largo plazo, realizando estrategias de control de la corrosión, evaluación y mitigación de riesgos, soportando procesos de operación y mantenimiento rutinario y T/A. Cuenta con las siguientes certificaciones internacionales API 570, API510, API 653, API 580 y API 936. Actualmente vinculado al departamento de inspección e integridad de equipo estacionario de la Gerencia Refinería Barrancabermeja como Ing. de Confiabilidad e Integridad.

**Julio Andres Moncada Garcia** ingeniero mecánico, especialista en mantenimiento industrial y magister en ingeniería de confiabilidad y gestión de activos. Se desempeña como analista de esfuerzos de sistemas de tubería y analista de diseño mecánico de equipo estacionario bajo código Asme Section VIII div 1 en la refinería de Barrancabermeja, Ecopetrol. Cuenta con las siguientes certificaciones Internacionales, Analista de vibraciones mecánicas ISO 18436-2 Cat 3, inspector API 570 e inspector API 510.

Actualmente vinculado al departamento de inspección e integridad de equipo estacionario de la GRB como ing. de mantenimiento y confiabilidad B en el área de incorporación de equipo estático.

❖ Carlos Hernando Patiño Villamizar

Cel: 3004942879

Dirección:

Mail: carlos.patino@ecopetrol.com.co

Ciudad: Barrancabermeja/ Santander

País: Colombia

❖ Carlos Humberto Loza Arenas

Cel: 3003264653

Dirección:

Mail: carlos.loza@ecopetrol.com.co

Ciudad: Barrancabermeja/ Santander

País: Colombia

❖ Julio Andres Moncada Garcia

Cel: 3004899796

Dirección: Cra 32 #73-86 Barrio floresta

Mail: Julioan.moncada@ecopetrol.com.co

Ciudad: Barrancabermeja/ Santander

País: Colombia