

Diseño de un sistema alternativo de limpieza para las rejillas de succión de las bombas tornillo para las centrales termoeléctricas colombianas.

Design of an alternative cleaning system for screw pump suction grids for Colombian thermoelectric power plants.
MSc. David Fernando Marcucci-Pico¹, MSc. Andrés Mauricio Moreno-Uribe², MSc(c). Eduardo José Sánchez-Lobo³, MSc. Samuel Herrera-Castillo⁴

¹Universidad Federal de Uberlandia, Brasil, [Orcid: https://orcid.org/0000-0001-8925-9083](https://orcid.org/0000-0001-8925-9083), Email: dmarcucci@ufu.br

² Leibniz Universität Hannover, Alemania, <https://orcid.org/0000-0001-6717-0782>, Email: uribe@iw.uni-hannover.de

³Universidad Federal de Minas Gerais, Brasil, <https://orcid.org/0000-0002-5094-2499>, Email: ejsanchez@ufmg.br

⁴Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia, <https://orcid.org/0000-0003-0482-5993>, Email: samuel.herrera@upb.edu.co

Como citar: D. F. Marcucci-Pico, A. M. Moreno-Uribe, E. J. Sánchez-Lobo & S. Herrera-Castillo, "Diseño de un sistema alternativo de limpieza para las rejillas de succión de las bombas tornillo para las centrales termoeléctricas colombianas", *Rev. Ingenio*, vol. 20, n°1, pp. 24-31, 2023, doi: <https://doi.org/10.22463/2011642X.3494>

Fecha de recibido: 26 de julio 2022
Fecha de aprobación: 13 de diciembre 2022

RESUMEN

Palabras claves:

Bocatoma, Planta termoeléctrica, Pugsley, Rastrillo, Simulación.

La temporada de lluvias en Colombia es el principal motivo de aumento del caudal de los ríos, llevando consigo materiales como ramas, troncos y basuras en general. Este tipo de residuos al llegar a las rejillas de las bocatomas de las centrales termoeléctricas, obstruyen el paso del agua para la refrigeración. Como respuesta a esta problemática se diseñó y se simuló un sistema alternativo de limpieza, sirviendo como apoyo a los rastrillos ya existentes en las rejillas de las termoeléctricas. Mediante la caracterización de diferentes plantas termoeléctricas a nivel mundial, se diseñó el sistema de limpieza con el método de pugsley para lograr determinar un factor de seguridad de referencia, además de calcular las cargas máximas permisibles. Con la ayuda de herramientas de diseño asistido por computadora (CAD) e ingeniería asistida por computadora (CAE), como SolidWorks y ANSYS, se diseñó y simuló el sistema alternativo de limpieza en base a las restricciones geométricas encontradas en la caracterización, disminuyendo de esta manera el tiempo en el proceso de diseño.

ABSTRACT

Key words:

Intake, thermoelectric power plant, Pugsley, Rake, Simulation.

The rainy season in Colombia is the main reason for the increase in river flows, carrying with them materials such as branches, trunks, and garbage in general. When this type of waste reaches the grids of the intakes of the thermoelectric plants, it obstructs the passage of water for the cooling of the thermoelectric plants. In response to this problem, an alternate cleaning system was designed and simulated, serving as support for the rakes already attached to the thermoelectric grids. Through the characterization of different thermoelectric plants worldwide, the cleaning system was designed to determine a reference safety factor, in addition to calculating the maximum permissible loads. With the help of computer-aided design (CAD) and computer-aided engineering (CAE) tools, such as SolidWorks and ANSYS, the alternate cleaning system was designed and simulated based on the geometric constraints found in the characterization, which saves time in the design process.

1. Introducción

En las termoeléctricas colombianas la mayor parte del agua que se capta se utiliza para realizar el intercambio de calor dentro de los condensadores siendo este, uno de los principales equipos para el funcionamiento de la planta. Debido a esto, es de vital importancia mantener un flujo constante de agua para una correcta operación; el problema radica en que durante época de invierno se presentan aumento en los caudales de los ríos, que traen consigo una gran cantidad de desechos (Figura 1.) y terminan ubicándose en las rejillas de succión de las bombas tipo tornillo[1], obstruyendo el paso del agua, generando posibles desvíos de carga y en el peor de los casos un disparo de planta. Como consecuencia de esto, se presentan pérdidas económicas para la empresa.



Figura 1. Desechos comunes retirados de las rejillas.

Autor para correspondencia

Correo electrónico: dmarcucci@ufu.br (MSc. David Fernando Marcucci Pico)

La revisión por pares es responsabilidad de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña
Artículo bajo la licencia CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>)



Actualmente, las plantas cuentan con sistemas de limpieza para las rejas de succión, el cual opera como un rastrillo que extrae cierta cantidad de desechos ubicados en las rejas, y quién a su vez es gobernado por un sistema de cables y malacates ubicados al nivel de la casa de máquinas. Durante las situaciones de crecida de los ríos, estos rastrillos no suelen realizar su función correctamente ya que se descarrilan fácilmente, debido a la fuerza del agua, la presencia de desechos en la zona de rodadura, diferencias en la tensión de los cables, etc.

Con el fin de aumentar la confiabilidad en la operación de las termoeléctricas durante situaciones de aumento en el caudal del río, se propone el diseño de un sistema alternativo de limpieza para las rejas de succión, el cual sea capaz de dar apoyo al sistema de limpieza principal (rastrillos) operando desde la parte interna de los pozos de succión. Este realizará un barrido a lo largo de las rejas, con el fin de desplazar los desechos para despejar la zona de succión.

Se establecen ciertos parámetros de diseño, tales como los geométricos y estructurales que definirán el sistema propuesto. El modelo geométrico se generó haciendo uso de herramientas CAD (Diseño asistido por computadora) tal como SOLIDWORKS, en el cual se buscó que la geometría cumpliera con todos las restricciones de espacio, forma y cinemáticas planteadas; posterior se realiza un análisis por medio del método de los elementos finitos[2] haciendo uso del programa ANSYS, en base a las propiedades físicas del modelo se seleccionaron los elementos que accionaran los sistemas hidráulicos, los cuales estarán conectados al sistema oleo hidráulico con el que cuenta la empresa para el accionamiento de las compuertas de esclusas[3].

2. Materiales y métodos

Con el fin de garantizar la entrada de agua durante las crecidas del río, se plantea un sistema alternativo que evite el taponamiento de las rejas y que al mismo tiempo permita la libre operación de los rastrillos actuales; esto es muy importante ya que cuando la situación de emergencia es superada se dispone de más tiempo, de este modo se puede retirar el material acumulado en las rejas, sin riesgo a que se produzca un disparo de planta o un desvío de carga por pérdida de vacío.

Se aplicó una filosofía de diseño gobernada por la ubicación y las restricciones geométricas con el fin de tener que realizar los menores cambios posibles en los bienes actuales, además, un factor de seguridad con base en la metodología de Pugsley[4], métodos de cálculo analíticos y numéricos tales como el método de los elementos finitos aplicado con la herramienta computacional ANSYS. El sistema alternativo consiste de unos rastrillos internos que atraviese las rejas de succión de las bombas tornillo, así

mismo sobresalga una distancia prudente, mantenga un movimiento lineal y constante a lo largo de estas evitando así, el taponamiento de las rejas y garantizando un flujo de agua al sistema de enfriamiento de la planta.

2.1. Ubicación del sistema

El sistema alternativo se ubicará en la parte interior de la estructura de toma (Figura. 2) justo por posterior de las rejillas, donde se presentan las siguientes ventajas: no existen interferencias con el rastrillo actual, se presentan menos desechos permitiendo unas condiciones de trabajo menos críticas que en la zona exterior, se evitan posibles impactos por elementos extraños traídos por la corriente del río, también hay menos obstrucciones en las guías debido a la presencia de materiales extraños, evitando así el descarrilamiento o atascamiento durante su operación. Su ubicación se realizará justo después de las rejas, donde el flujo ya se encuentra canalizado eliminando las cargas laterales sobre el sistema.

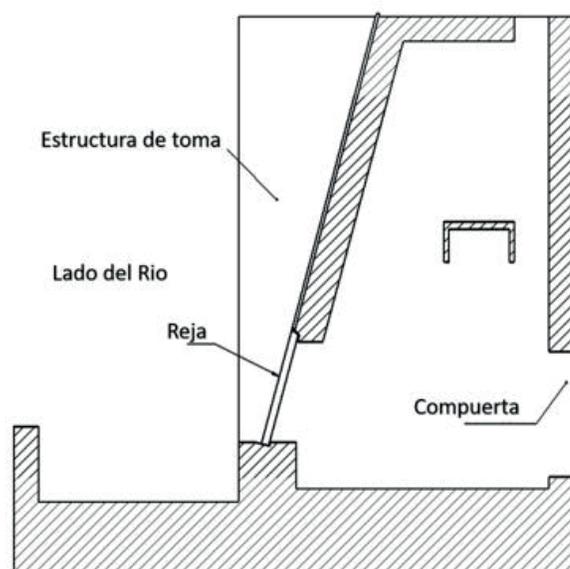


Figura 2. Zona de ubicación del sistema alternativo.

2.2. Parámetros de diseño

Los parámetros que influyen en el diseño y la simulación del sistema alternativo de limpieza son las limitaciones y restricciones geométricas de la bocatoma y las rejas, los movimientos que debe efectuar el sistema de limpieza y la carga de diseño estimada[5]. Además, debe tener propiedades resistentes a la corrosión y baja resistencia al flujo, debido a que el sistema está sumergido en el agua.

2.2.1. Restricciones geométricas. El rastrillo deberá tener un ancho poco menor que el ancho de los canales con el fin de que se puede llegar a despejar la mayor área de flujo posible, por lo tanto, el ancho máximo que podrá tener el rastrillo es de 4 m. Debido a la forma constructiva de las rejas la

distancia entre dientes del rastrillo debe ser de 100 mm, igual al paso de las rejas; las cuales se consideran rejas de cribado de paso ordinario [6]. El largo de los dientes del rastrillo es el necesario para que atraviese las rejas desde la parte interior del pozo de succión hasta sobresalir aproximadamente 10 cm de las rejas (lado río), debido a esto como distancia mínima se tendrá el espesor del muro más la distancia que sobre salen las barras de las rejas del muro. (Figura 3).

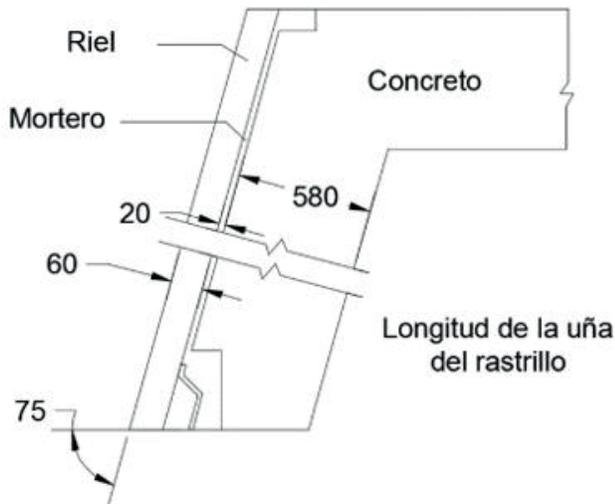


Figura 3. Longitud de la uña del rastrillo.

$$L_r = \frac{t_{conc} + t_{mort} + t_{riel}}{\sin(75^\circ)} + 100 \text{ mm} \quad (1)$$

$$L_r = \frac{580 \text{ mm} + 20 \text{ mm} + 60}{\sin(75^\circ)} + 100 \text{ mm}$$

$$L_r = 783 \text{ mm}$$

En la ecuación (1) se presenta la distancia mínima que deben tener las uñas del rastrillo para que puedan sobresalir 10 cm de las rejas y puedan cumplir con su función.

2.2.2. *Carga de diseño.* Para el diseño del rastrillo este debe ser capaz de mover el peso equivalente de un tronco de madera de cedro de 4 m de largo por 40 cm de diámetro, distribuido horizontalmente sobre los diez centímetros que sobresalen de las rejas y representado en la ecuación (2). Tomando el tronco como un cilindro de 40 cm de diámetro y 4 m de largo y tomando una densidad para el cedro de 1025 kg/m³ [7], la carga de diseño se presenta en la ecuación (3):

$$V = \pi * l * r^2 \quad (2)$$

$$\pi * 4 \text{ m} * (0.2 \text{ m})^2 = 0.5026 \text{ m}^3$$

$$W = V * \rho * g \quad (3)$$

$$= 0.5026 \text{ m}^3 * 1025 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$= 5054.32 \text{ N}$$

2.3. Planteamiento cinemático del mecanismo.

El mecanismo alternativo de limpieza está compuesto por un rastrillo que atraviesa las rejas con un movimiento lineal paralelo a estas, lo que restringe el movimiento a los 75° con respecto a la horizontal por medio de unas guías ubicadas en los lados extremos de los laterales de este, la longitud máxima de recorrido es de 1450mm como se muestra en la figura 4.

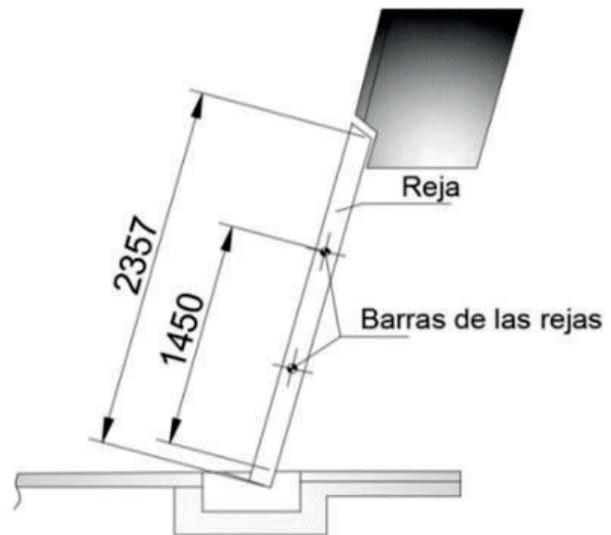


Figura 4. Recorrido máximo del rastrillo.

3. Resultados y análisis

3.1. Factor de seguridad: metodología de Pugsley.

Se determinó un factor de seguridad con el objetivo de garantizar un buen desempeño de los diferentes elementos del sistema de limpieza como lo son el rastrillo, estructura de soporte, etc. y compensar cualquier tipo de incertidumbre que se pueda presentar en las cargas. Se obtuvo una clasificación de ns=1.92 según la metodología de Pugsley, donde se tuvieron en cuenta características como calidad de los materiales, control sobre la carga aplicada, la exactitud de análisis de esfuerzo, peligro para el personal, e impacto económico. Esta clasificación se da a modo comparativo simulando factores de seguridad propios de cada elemento mecánico[8].

3.2. Diseño del rastrillo de limpieza

El diseño del rastrillo se realiza cumpliendo todas las consideraciones expuestas anteriormente y a continuación, se genera la geometría por medio del software CAD 3D ANSYS DesignModeler [9] para posteriormente realizar un análisis de elementos finitos del software ANSYS Mechanical aplicando las respectivas condiciones de frontera. La simulación que se realiza es un análisis lineal estructural. El modelo geométrico que se genera es el mostrado en la figura 5.

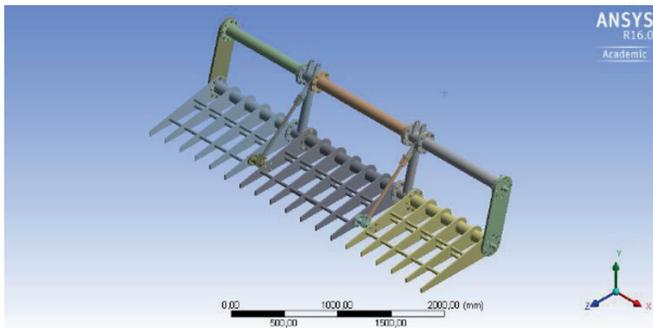


Figura 5. Modelo geométrico del rastrillo.

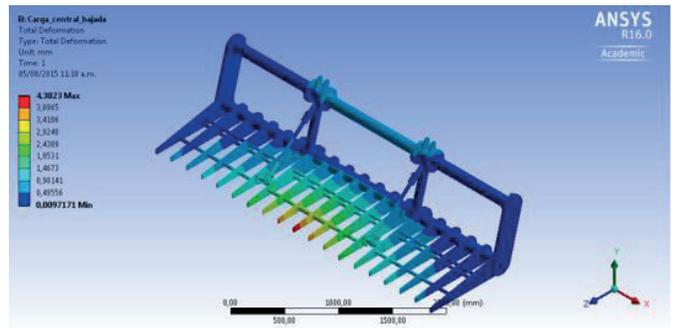


Figura 7. Trazado deformaciones totales del modelo, escala 1:1

La malla en la cual se discretiza el modelo del rastrillo fue creada por medio del software ANSYS Meshing [10], esta malla puede apreciarse en la figura 6 y las principales características de la malla son: la malla fue creada con base a los criterios de convergencia, la cual arroja un número de nodos de 465118 y un número de elementos de 238494; además, los tipos de contactos utilizados entre los componentes fueron pegados y de no separación. Por último, el material definido fue acero ASTM A36 para los perfiles y láminas y acero inoxidable para los pernos.

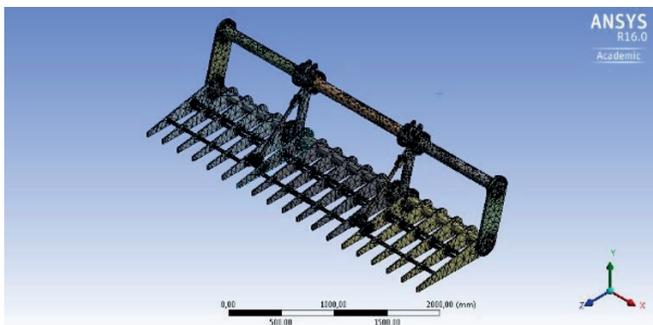


Figura 6. Malla generada en ANSYS Meshing.

Como se puede apreciar en la figura 7, la deformación máxima es de 4.38 mm y esta se encuentra en la punta del rastrillo, en zonas aledañas genera concentraciones de esfuerzos en las uniones de los tubos horizontales con las uñas del rastrillo (ver figura 8), pero aun así estos esfuerzos son inferiores al límite de fluencia como lo indica el trazado del factor de seguridad en la figura 9, es decir, todas las deformaciones que sufre el rastrillo bajo la aplicación de esta carga son elásticas. Además, este factor de seguridad se encuentra por encima del establecido por el método de Pugsley.

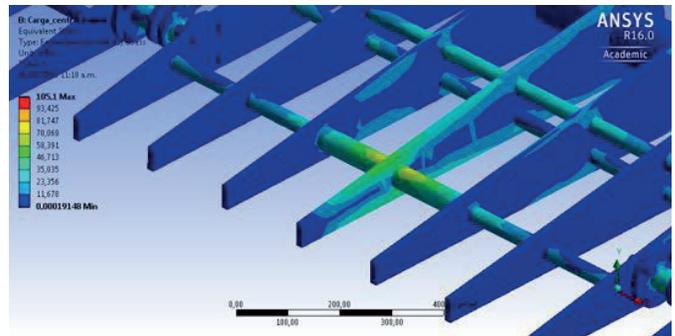


Figura 8. Trazado del esfuerzo de Von Mises (Zona más afectada)

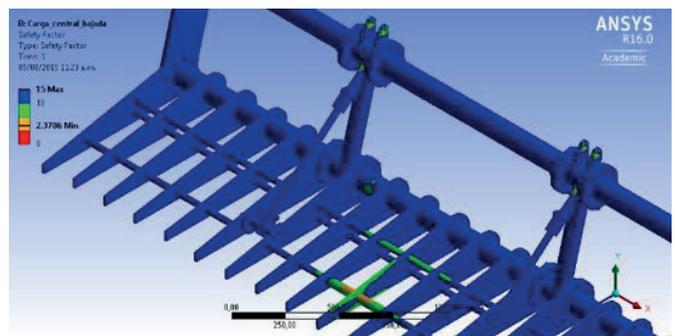


Figura 9. Trazado del factor de seguridad en el modelo.

3.3. Diseño de las juntas atornilladas del rastrillo a cortante y cálculo de la soldadura

Se seleccionaron 8 tornillos M20 en acero inoxidable AISI 304 debido a que el rastrillo va a quedar totalmente sumergido y se necesita que estos sean reutilizables con fines de mantenimiento. El torque generado en el centro de la circunferencia de los pernos debido a la carga de 500 kgf (Figura 10). Esto da como resultado un valor de esfuerzo cortante en los pernos, el cual, al iterar con el esfuerzo de fluencia del acero inoxidable que es aproximadamente 200 Mpa [11], arroja un factor de seguridad (en base a la teoría de la energía distorsión) de $n = 5.16$.

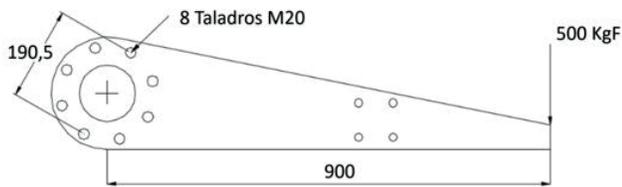


Figura 10. Diagrama de cuerpo libre. Cálculo de las juntas con bridas.

En cuanto a la soldadura a utilizar para unir los dientes al rastrillo por medio de la arista circular interior (Figura 10), se estima una altura de garganta de 6.35 mm y se usa soldadura 7018 en ambos costados del perfil debido a su alta resistencia y penetración donde se tendrán que ajustar parámetros eléctricos para optimizar el proceso[12]. Esto da como resultado que el factor de diseño a carga cortante (torsión por la excentricidad de la carga aplicada) es de $n = 3.02$.

3.4. Diseño de las barras de acople

Para el diseño de estas barras se asumió que cuando el rastrillo realiza su movimiento de bajada se presenta una carga de 500 kgf a compresión y durante el recorrido de subida se presenta una carga aproximada de 1,5 Toneladas a tensión en las dos barras. Teniendo en cuenta el efecto columna modelado por medio de la ecuación de Euler para elementos a compresión [13] y verificando que este elemento no vaya a fallar a tensión, se selecciona una tubería estándar de 3 in SCH 40.

3.5. Diseño de la viga acople actuador –columnas

Este elemento se modeló como una viga simplemente apoyada en extremos con la carga del actuador aplicada en el centro. Los extremos corresponden a los puntos donde se ensamblan las barras de acople que la conectan con el rastrillo, asumiendo que la carga del actuador no es mayor que 1.5 toneladas. Se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones: un factor de diseño igual a 2.0, el peso propio de la viga se modela como una carga completamente distribuida, un peso supuesto 50 lbf/ft y la longitud de la viga de 1460 mm (57.48 in o 4.79ft).

Realizando una comparación entre la fuerza cortante de mayor magnitud en la viga y la recomendación de McCormac [14] la cual presenta el esfuerzo cortante permisible por el método ASD, se seleccionó un perfil W6X15 el cual soporta eficientemente la carga de diseño. Se verifican los cálculos mediante una simulación con ANSYS, los resultados se encuentran a continuación en la figura 11 y 12:

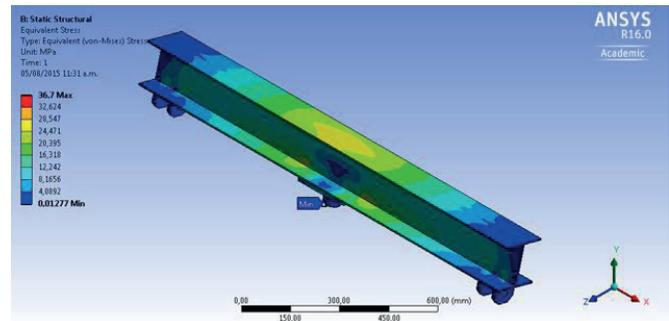


Figura 11. Trazado del esfuerzo de Von Mises en la viga de acople.

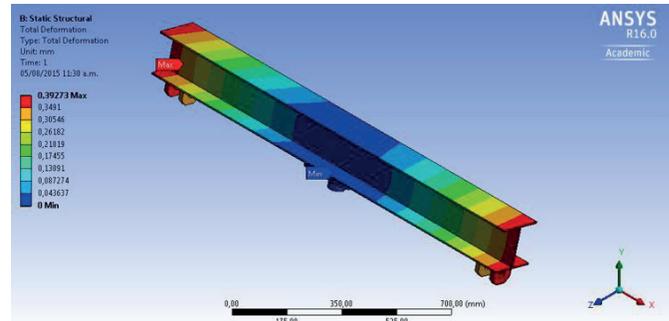


Figura 12. Trazado de deformaciones elásticas en la viga de acople.

3.6. Diseño plataforma de soporte

Se plantea que esta va estar compuesta por dos vigas, una de las dos va a soportar más carga que la otra, debido a esto se asume que una sola viga deberá soportar todas las cargas de diseño con empotramiento en ambos extremos, la distancia entre estos empotramientos es de 4 m que corresponde al ancho del canal de los pozos de succión y la distancia entre centros de las vigas de 1 m. Se estiman las cargas de diseño para la plataforma de soporte y se considera la carga debido al movimiento del rastrillo la cual según McCormac, es el 100% de la carga del actuador, ver tabla 1.

Tabla 1. Cargas de diseño para las plataformas de soporte

| | |
|--|---------------|
| Peso actuador | 0,5 kN |
| Fuerza actuadora | 13,75 kN |
| Dinámica | 13,75 kN |
| Total (puntuales) | 28 kN |
| Cara viva (bodega 250 lbf/ft²) | 3,648 kN/m |
| Peso viga (estimado 50 lbf/ft) | 0,72 kN/m |
| Total (distribuidas) | 4,378 kN/m |

En base al perfil W6X15 se diseña la plataforma de soporte y se realiza un análisis por elementos finitos mediante el programa ANSYS, el modelo geométrico junto con la malla y trazados de desplazamientos, esfuerzos se presentan a continuación en las figuras 13 a 14:

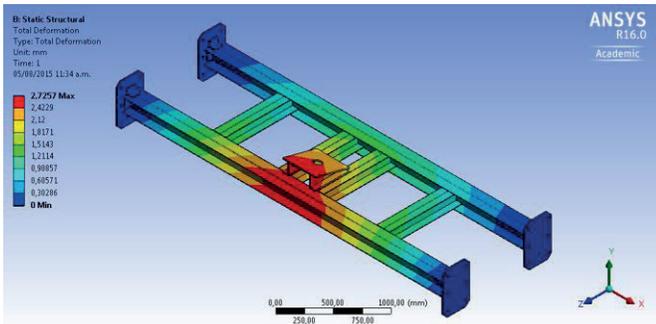


Figura 13. Trazado de las deformaciones elásticas

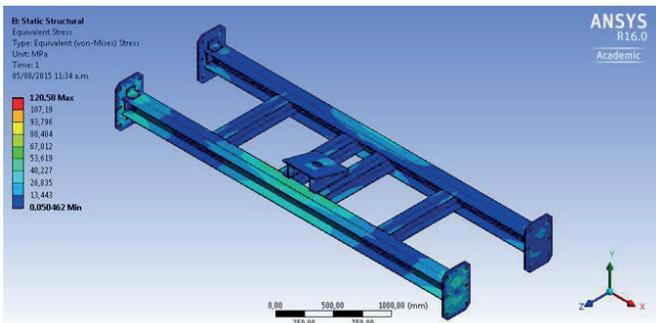


Figura 14. Trazado del esfuerzo de Von Mises.

3.7. Selección del sistema de accionamiento

3.7.1. Cálculo de la fuerza de accionamiento del sistema. Se realizó cálculo de las fuerzas que actúan en el sistema con el fin de determinar la carga necesaria que debe proporcionar el actuador. Se tuvieron en cuenta cargas como: carga de diseño, el peso de cada uno de los componentes ubicados es su respectivo centro de masa, la resistencia a la rodadura sobre las guías [15] y reacciones que actúan sobre el rastrillo. Para esto se usaron las ecuaciones de equilibrio de fuerzas en las direcciones tangencial y normal al plano inclinado a 75° y por último se realizó equilibrio de momentos con respecto al punto A situado en el centro de la rueda superior (figura 15). La fuerza calculada tiene un valor de 12365.3 N.

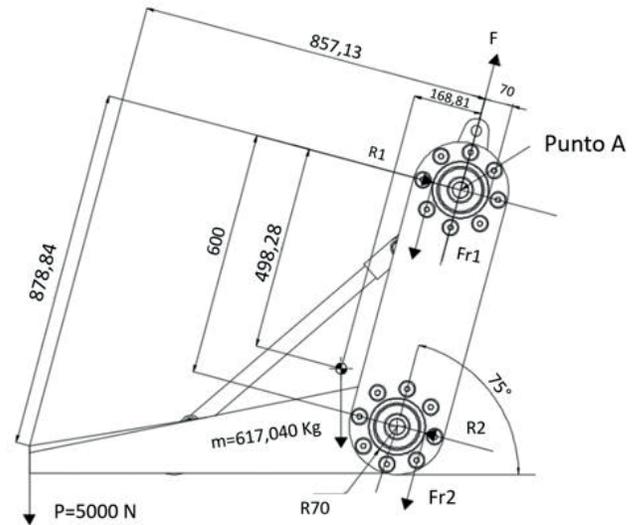


Figura 15. Diagrama de cuerpo libre de rastrillo interno.

3.7.2. Selección del sistema hidráulico. La selección del actuador se realiza por medio de la carga necesaria para mover el rastrillo y todos sus elementos; determinada en el literal anterior, más un factor de seguridad que permita garantizar el movimiento; ya que el rozamiento del pistón en su desplazamiento genera una pérdida apreciable entre el 3%-10% de la fuerza teórica [16]. Se tomó el valor más conservador para este diseño. De lo anterior se obtuvo una fuerza de 13608.1 N.

Se tiene que para una presión de operación de 7 MPa, la presión de operación del sistema hidráulico de esclusas, el diámetro mínimo del pistón necesario para producir la fuerza requerida durante la extensión es 49,7 mm. Realizando una revisión de catálogo de fabricante de cilindros hidráulicos Rexroth [17], el cual recomienda seleccionar el diámetro normalizado más grande, se escogió el diámetro de 50 mm. En la tabla 2., se presentan las características del cilindro seleccionado:

Tabla 2. Especificaciones técnicas del cilindro seleccionado.

| | |
|---------------------|----------|
| Presión | 70 bar |
| Diámetro pistón | 50 mm |
| Diámetro vástago | 36 mm |
| Carrera máxima | 1200 mm |
| Fuerza lado pistón | 13,75 kN |
| Fuerza lado vástago | 6,62 kN |

Ahora, se procede a seleccionar el tipo de montaje que permite hacer un uso total de la carrera del actuador hidráulico; El catálogo presenta la configuración con brida rectangular en cabeza de cilindro (figura 16), fue calculada apropiadamente con un factor de seguridad de 5 (teniendo en cuenta la recomendación de FESTO®) [18] elimina la existencia de riesgo de pandeo en el vástago del actuador. Con esta información se seleccionó un cilindro de la marca Rexroth con la siguiente referencia CD70H-50-36/1200

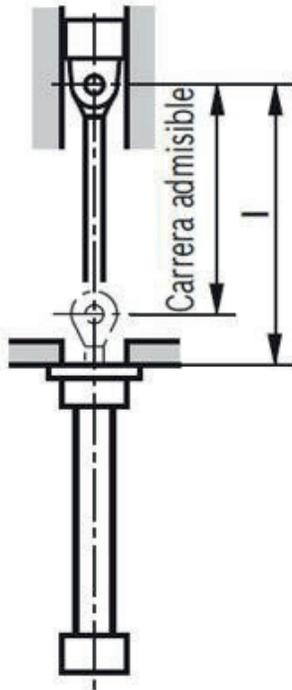


Figura 16. Montaje CD70H seleccionado para el cilindro.

3.8. Sistema alternativo de limpieza

A continuación, en la figura 17, se presenta el sistema alternativo de limpieza con todos sus componentes, incluyendo la rejilla la cual es la principal restricción geométrica del sistema.

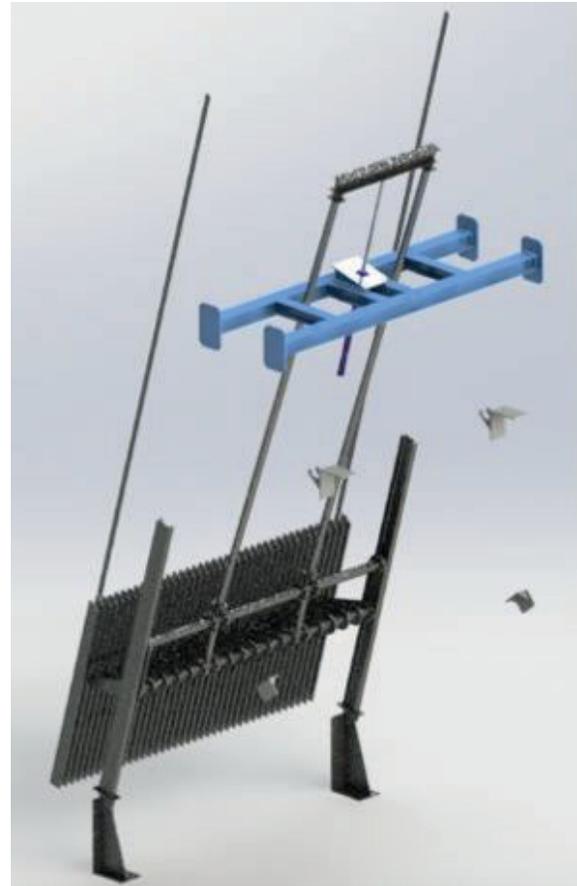


Figura 17. Sistema alternativo de limpieza.

4. Conclusiones

Por medio de ese proyecto se brinda una solución a la problemática presentada en las termoeléctricas colombianas, y al mismo tiempo realizar un diseño en el cual todos los elementos mecánicos que componen el sistema alternativo de limpieza están calculados, ya sean por métodos analíticos o métodos numéricos, como el de los elementos finitos y el software ANSYS que permitió la validación de ciertos cálculos estructuralmente complejos como el rastrillo, garantizando así un sistema funcional.

En cuanto a la viabilidad de este proyecto, se pudo apreciar por medio de un análisis de precios unitario, que la compra de los componentes, fabricación de los elementos necesarios y el montaje de este sistema alcanza un costo muy cercano al impacto que deja un disparo de planta por pérdida de vacío, provocado por falta de agua en el sistema de enfriamiento del condensador; es decir por la problemática planteada.

5. Referencias

- [1] Spaans Babcock, “Bombas de Tornillos”, [Online]. Available: <https://www.spaansbabcock.com/es/productos/bombas-de-tornillos/> (accessed:13-nov-2022)
- [2] S. Moaveni, *Finite element analysis: theory and application with ANSYS*. India: Pearson Education, 2003.
- [3] Imesadmin, *Imesa – Compuertas para centrales hidroeléctricas*, Imesa.[Online] . Available: <https://www.imesa.es/servicios/bienes-equipo-centrales-hidroelectricas/compuertas/> (accessed:13-nov-2022)
- [4] B. Hamrock, B. O. Jacobson, e S. R. Schmid, *Elementos de máquinas*. Ciudad de México, México: McGraw-Hill / Interamericana editores, S.A. de C.V, 2000.
- [5] L. M. N.- Castro, C. G. Peñarreta-Aguilar, e J. I. C.- Siguencia, “Análisis de componentes críticos de una plegadora hidráulica con elementos finitos”, *Rev. Ingenio*, vol. 19, no 1, jan. 2022. Doi: <https://doi.org/10.22463/2011642X.3094>.
- [6] E. Castillo, “Cuadro comparativo de O.S 020 (rejas) O.S 090 (cribas)”, SANTIAGO ANTUNEZ DE MAYOLO, Peru, 2017.
- [7] J. E. G. Lemus, “Propiedades Físico Mecánicas de la madera plástica elaborada con polímeros reciclados como aglutinantes”, *Revista Canalización del Conocimiento Científico*, vol. 1, no 0, mayo 2022.
- [8] L. C. Rios Q. e E. Roncancio H., “ANÁLISIS Y DESARROLLO DE UN PROGRAMA DE SELECCIÓN RÁPIDA DE FACTORES DE SEGURIDAD, PARA DISEÑO DE ELEMENTOS MECÁNICOS.”, 2007.
- [9] “Ansys SpaceClaim | 3D CAD Modeling Software”. [Online]. Available: <https://www.ansys.com/products/3d-design/ansys-spaceclaim> (accessed:2-oct-2022)
- [10] “Ansys Meshing | 2D/3D Mesh Generation and Analysis for FEA, CFD”. [Online]. Available: <https://www.ansys.com/products/meshing>
- [11] J. K. Nisbett e G. Budynas Richard, *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. McGraw Hill México, 2012.
- [12] E. N. Flórez-Solano, E. E. Espinel-Blanco, e J. E. Barbosa-Jaimes, “Desarrollo de un soldador por puntos para el laboratorio de proceso de manufactura de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña”, *Rev. Ingenio*, vol. 16, no 1, jan. 2019. Doi: <https://doi.org/10.22463/2011642X.2389>.
- [13] F. P. Beer, E. R. Johnston, e J. A. G. J. García, *Mecánica vectorial para ingenieros*. McGraw-Hill, 2017.
- [14] J. C. McCormac, *Diseño De Estructuras Metálicas*, 2007
- [15] O. E. Piro, “Notas sobre Física General: Resistencia a la rodadura”, studylib.es. [Online] Available: <https://studylib.es/doc/5313097/notas-sobre-fisica-general--resistencia-a-la-rodadura-o>.
- [16] A. Creus S, *Neumática e hidráulica*, 2011o ed. Barcelona, España: Alfaomega, 2011.
- [17] “Cilindro hidráulico de diseño con tirantes | Bosch Rexroth España”. [Online]. Available: <https://www.boschrexroth.com/product-link?cat=Industrial-Hydraulics-Catalog&p=p651803&c=ES&lang=es>
- [18] FESTO, “Festo Innovación Summit 2022”. Festo.com/Co/es. [Online]. Available: https://www.festo.com/co/es/e/sobre-festo/ferias-y-eventos/festo-innovation-summit-2022-id_1562889/ (Accedido: 3-oct-2022)