



República Bolivariana de Venezuela
 Universidad Nacional Experimental Politécnica
 "Antonio José de Sucre"
 Vicerrectorado Puerto Ordaz
 Dirección de Investigación y Postgrado
 Unidad Regional de Investigación

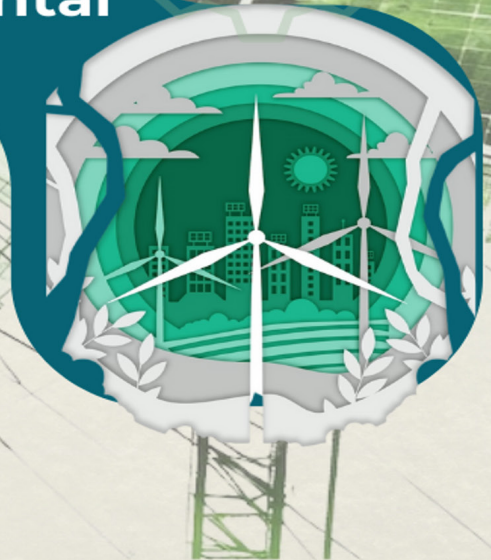


XXII JORNADAS DE INVESTIGACIÓN 2025

VI CONGRESO DE INVESTIGACIÓN, CIENCIA Y TECNOLOGÍA



Ingeniería verde: Ética y Responsabilidad Ambiental



MEMORIAS 2025

**21 y 22
de mayo**

UNIVERSIDAD, CIENCIA y TECNOLOGÍA

Edición Especial de la Jornadas de Investigación 2025
de la Universidad Nacional Experimental Politécnica
"Antonio José de Sucre", UNEXPO, Vicerrectorado Puerto
Ordaz.

INDIZADA EN:

- Actualidad Iberoamericana 
- Aluminium Industry Abstracts
- Corrosion Abstracts
- CSA Engineering Research Database
- CSA Materials Research Database with METADEX
- CSA Recent References Related to Technology
- CSA Technology Research Database
- Environment Abstracts
- LATINDEX 
- Mechanical & Transportation Engineering Abstracts
- METADEX
- REVENCYT 
- Colección Scielo (www.scielo.org.ve) 
- CiteFactor 
- MIAR 
- ERIHPLUS 

REGISTRADA EN:

- Ulrich's Internacional Periodicals Directory

"Para garantizar la originalidad de los documentos presentados debe llenar el formulario de compromiso de originalidad que se encuentra en este enlace: <https://www.uctunexpo.autanabooks.com/index.php/uct/formatos> Todos los artículos presentados deben ser inéditos y originales."

Diagramación y Diseño de Portada:

Br. Manuelis Salazar

Impresión:

Dirección de Investigación y Postgrado, UNEXPO Puerto Ordaz

Visualización de la Revista:

<http://uctunexpo.autanabooks.com/index.php/uct>
www.uct.unexpo.edu.ve

DIRECTORIO DE LA REVISTA UNIVERSIDAD, CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Director: MSc. Miriam Romero

Editor: MSc. Emilio Bravo

Comité Editorial:

- Dr. Oscar Dam
- Dr. Luis Rosales
- Dr. Sergio Velásquez
- Dr. Luis Lyón
- Dr. Alberto Echegaray
- Dr. Jesús López
- Dr. Eladio Lobo
- Dr. Orlando Gil
- Dr. Ángel Duarte
- Dr. Herman Fernández
- Dra. Sugehis Liscano
- Dra. Mara Girón
- Dra. Katherine Silva
- Dra. Franyelit Suarez
- Dra. Zulay Franco
- Dra. Linda Gil
- MSc. Adrián Olivo
- MSc. Miriam Romero
- MSc. Emilio Bravo
- MSc. Luisa Boet
- MSc. Yosbell Ramírez
- MSc. Mairim Velásquez
- MSc. Krishna Montero
- MSc. Gladys González
- MSc. Thamara Girón
- MSc. Ygnacia Cedeño

Autoridades Nacionales de la UNEXPO

Rectora: Dra. Rita Añez

Vicerrectora Académica: Dra. Fraisa Codecido

Vicerrectora Administrativa: MSc. Mazra Morales

Secretaria: Ing. Magly de Peraza

Autoridades Regionales, Vicerrectorado Puerto Ordaz

Vicerrector: Msc. Richard Resplendor

Director Académico: Ing. Lucymary Acuña

Director Administrativo: MSc. Yosbell Ramírez

Director de Investigación y Postgrado: MSc. Miriam Romero

Los artículos, opiniones y colaboraciones que se publican en esta revista no representan necesariamente la filosofía informativa ni institucional de la UNEXPO y podrán ser reproducidos previa autorización del Editor. En caso de reproducción se agradece citar la fuente y enviar ejemplares del medio utilizado a la UNEXPO, a la siguiente dirección: Dirección de Investigación y Postgrado, UNEXPO, Vicerrectorado Puerto Ordaz, Alta Vista Sur, Urb. Villa Asia, Final Calle China, Apdo. Postal 8050. Puerto Ordaz, Estado Bolívar, Venezuela. Telf./fax (0286) 9625245-9611382. Email: uct-poz@unexpo.edu.ve

Contenido

- 4** *Gustavo José Marturet Pérez y Gustavo Elías Marturet García*, CFD, Buckingham, and Statistics: Optimization of Gorlov Turbines in the Orinoco River.
- 9** *Gómez Adérsido y Núñez Ernesto*, Contribución de los Procesos de Reducción Directa a la Mitigación de las Emisiones de CO₂ en la Industria Siderúrgica.
- 16** *Montero Krishna, Ramírez Luis y Morillo Lismar*, Degradación por desgaste en lecho fluidizado de menas de mineral de hierro calcinadas a 1000°C a escala laboratorio en Orinoco Iron S.C.S.
- 22** *Acevedo López Daniel y Duarte Parra Ángel*, Análisis de las aplicaciones de los sistemas IA en la fabricación tradicional: Impacto y desafíos.
- 30** *Aguilar Germán y Gil Orlando*, Estimación de daño estructural a través del método de elementos finitos extendidos y elastoplásticidad de una estructura metálica.
- 37** *Alzolar Meilyn, Velásquez Mairim y Andarcia Henry*, Factibilidad del uso del ácido bórico como inhibidor de la reactividad al aire de los ánodos de carbón en celdas de reducción electrolítica en c.v.g. venalum .
- 43** *Campos García Jesús Alonso*, Heterogeneidad generacional y economía circular: un abordaje desde la dinámica de las empresas venezolanas de consultoría gerencial.
- 49** *Malavé Pablo*, Implementación de la Norma ISO 50001:2018 en Sistemas Auxiliares del Laminador Clecim Cosim de CVG Alcasa.
- 56** *Volpe Walter*, Introducción a la fabricación aditiva con polvos metálicos.
- 63** *Echegaray Alberto, Dam Oscar y Salas Luis*, Mecanismo de formación de fayalita en separadores de partículas.
- 71** *José Salazar, Luis Rosales Romero , Jordán González y Franyelit Suárez Carreño* , Modelación matemática de los esfuerzos dinámicos generados en las sartas petroleras en estado transitorio.
- 78** *Maita Aymara, Rojas Francisco, Tablero Ángel y Barreto Pedro*, Propuesta de un Sistema de Apernado de las Barras Colectoras en las Celdas P-19 de C.V.G. VENALUM.
- 85** *Rojas Francisco y Gil Orlando*, Simulación de las variables electro termomecánicas en el sistema anódico 1400 en función del consumo del ánodo y del amperaje de la celda.
- 92** *José Salazar, Luis Rosales Romero , Jordán González y Franyelit Suárez Carreño* , Simulación estructural de la sarta petrolera bajo condiciones dinámicas en estado estacionario.

CFD, BUCKINGHAM, AND STATISTICS: OPTIMIZATION OF GORLOV TURBINES IN THE ORINOCO RIVER

Gustavo José, Marturet Pérez¹, Gustavo Elías, Marturet García².

¹Universidad Politécnica Territorial del Estado Bolívar-Venezuela (UPTEB).

e-mail: marturet@gmail.com y gjmarturetp.doctorando@unexpo.edu.ve

<https://orcid.org/0000-0002-4578-8810>

²Universidad de Los Andes (ULA), Venezuela. Facultad de Ciencias Económicas y Sociales. Economía. Mérida, 5101, Venezuela.

Abstract: This study evaluates the potential of Gorlov turbines to generate hydrokinetic energy in the Orinoco River, a vital resource for Venezuela. A multidisciplinary approach is applied, combining dimensional analysis, numerical modeling with CFD, the Buckingham theorem, and statistical analysis, to optimize the design of large-scale turbines through scaling. The limitations of the analysis, such as scale effects and turbine-river interaction, are discussed, and future research is proposed to improve the accuracy of the models and the efficiency of the turbines. The implementation of these turbines could provide sustainable energy to isolated communities, driving local development.

Keywords: Gorlov turbines, dimensional analysis, Buckingham theorem, computational fluid dynamics.

DYNAMIC SPECKLE ANALYSIS USING SEGMENTATION FILTERING

Resumen: Este estudio evalúa el potencial de las turbinas Gorlov para generar energía hidrocínética en el río Orinoco, un recurso vital para Venezuela. Se aplica un enfoque multidisciplinario, combinando análisis dimensional, modelado numérico con CFD, el teorema de Buckingham y análisis estadístico, para optimizar el diseño de turbinas a gran escala mediante su escalamiento. Se discuten las limitaciones del análisis, como los efectos de escala y la interacción turbina-río, y se proponen futuras investigaciones para mejorar la precisión de los modelos y la eficiencia de las turbinas. La implementación de estas turbinas podría proporcionar energía sostenible a comunidades aisladas, impulsando el desarrollo local

Palabras clave: Turbinas Gorlov, análisis dimensional, Teorema de Buckingham, dinámica de fluidos computacionales.



I. INTRODUCTION

The Orinoco river has an enormous energy potential due to its massive flow and its constant speed. With an average flow of about $36.000 \text{ m}^3/\text{s}$, the Orinoco river offers a constant flow of water that can be used for hydrokinetic power generation. The river speed varies depending on location, but on many zones, but in many zones it is within the optimal range for the operation of Gorlov turbines (1-3 m/s). In this regard see [1], [2] and [3].

The energetic potential of the Orinoco river is not limited to the generation of enormous amounts of electricity. The installation of Gorlov turbines in the river also can contribute to the development of peripheric communities and isolated zones that do not have access to the national electric grid. The generation of energy distributed through the Gorlov turbines can provide a reliable and sustainable source of power for this communities, improving their life quality and promoting the local economic development

Besides, the dimensional analysis and the Buckingham theorem [4] are fundamental tools to adapt the design of the Gorlov turbines to the specific conditions

of the Orinoco River. The application of this methods allow to identify the relevant dimensionless groups that govern the turbine behavior in the context of the river, like: power coefficient (C_p), the torque coefficient (C_t), the Reynolds number (Re), and the turbine speed ratio (λ).

At the same time, these dimensionless number allow to stablish relations between the dimensional variables, like: turbine diameter (D), flow velocity (V), and the rotational or angular speed (ω), and the turbine performance (C_p) in the Orinoco river context.

Likewise, the validation and prediction of the performance of Gorlov turbines require a statistic analysis of the obtained data through the modeling with support on numeric techniques of computational fluids dynamics (CFD) and the dimensional analysis. About this, can be use analysis of variance, determination coefficients, fitting regression models. A contribution of this techniques as a complement to CFD and turbine research can be seen on [5].

The Fig. 1 shows two location on the banks of Orinoco river, Ciudad Bolívar and Ciudad Guayana, with significant habitability in the vicinity of the river



Figure 1. Banks of the Orinoco river a) Ciudad Bolívar. b) Ciudad Guayana.

This research analyzes the design and performance of Gorlov turbines for hydrokinetic energy generation in the Orinoco River by integrating Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations, dimensional analysis with Buckingham's Theorem, and statistical analysis, with the aim of optimizing the efficiency and feasibility of their implementation.

II. MATERIALS AND METHODS

For this research realization it will be taken as theory model the research developed by Marturet [6].

Marturet developed numeric simulation with CFD support and solved a mathematic tridimensional model

that represents the behavior of a Gorlov. The numeric model included the continuity equations, momentum Standard turbulence $k-\epsilon$ [7], along with their respective boundary conditions.

At the same time [6] got characteristic curves and determined flow behavior around the Gorlov turbines. As well as determining the point of maximum efficiency when the turbine is 300 mm and generates 129 W of power. Details of the CFD techniques and turbine dimensions can be seen in his research [6].

A model of Gorlov turbine is shown in the Fig. 2.

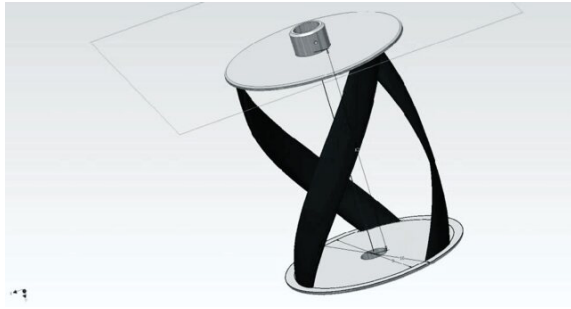


Figure 2. Gorlov turbine model.

It is common, in the CFD analysis to obtain considerable data volumes. Hence [6] used statistical techniques to analyze the influence of different dimensional and operative variables in the performance of the turbines. With his variance analysis (ANOVA), calculations of determination coefficients (R^2), and multiple regression methods, he obtained the relationship between the dimensionless groups in order to identify an approximation between the experimental and simulated data

The aforementioned autor obtained up to 3584 characteristic curve data, which is why he required statistical techniques for processing them, giving way to mathematical and semi-empirical models for predicting the torque and the power coefficient or performance of the turbines, as shown below:

$$T = 8,97\lambda^2 - 45,92\lambda + 58,14 \quad (1)$$

Where: T is the torque of the Gorlov turbine and λ is its velocity ratio ($\lambda = \frac{\omega r}{u_0}$), which is a function of the turbine angular velocity ω and the flow velocity of upstream the turbine u_0 .

Additionally [6] determined the following expressions for the Gorlov turbine performance:

$$C_p = 0,00339\lambda^2 + 0,01288\lambda + 0,01787 \quad (2)$$

$$C_p = 1,65\sigma^2 - 0,6384\sigma + 0,08094 \quad (3)$$

Where: C_p the turbine power coefficient and σ the turbine solidity ratio.

III.RESULTS

In this section it will be analyzed a methodology to obtain the dimensions of a Gorlov turbine with fundament on the Buckingham theorem and the equations (1), (2) y (3). It is understood that these are preliminary

calculations that must be experimentally validated in subsequent studies.

From the studied variables in the work of [6] can be obtained the following dimensionless numbers:

Group π_1 : π_1

The repetitive variables that include all the fundamental dimensions (M, L, T) were chosen. From which we took ρ , A y V.

Where: ρ is the fluid density, A is the flow area of the turbine and V fluid speed.

The group π combining these variables with the power (P) is:

$$\pi = P * \rho^a * A^b * V^c$$

We substitute the dimensions:

$$[M^0 L^0 T^0] = [M L^2 T^{-3}] * [M L^{-3}]^a * [L^2]^b * [L T^{-1}]^c$$

We equate the exponents for each dimension:

$$M: 0 = 1 + a$$

$$L: 0 = 2 - 3a + 2b + c$$

$$T: 0 = -3 - c$$

We solve the equation system:

$$a = -1$$

$$c = -3$$

$$b = -1$$

We substitute the exponents in the group π :

$$\pi = P * \rho^{-1} * A^{-1} * V^{-3} \quad \pi = P / (\rho * A * V^3)$$

To make it equal to the definition of power coefficient, a factor of 0.5 is added. Therefore:

$$C_p = P / (0,5 * \rho * A * V^3) \quad (4)$$

Group π_2 : $\pi_2 = \omega D / V$ (This group is the speed ratio o "tip speed ratio") (5)

On the other hand, the revision of estimates of electric energy for residential ends are signaled on the references [8], [9] y [10] according to the housing area and for the purposes of preliminary analysis in this investigation it was estimated at 6KW.

Similarly, the turbine height-to-diameter ratio was set at 1.5 and the Gorlov turbine blade diameter-to-chord ratio at 6. The river velocity was also set at 1,5 m/s and the water density (ρ) at 1000 kg/m³.

Starting from the equations (1), (2), (3), (4) y (5) a new Gorlov turbine can be determined by its scaling.

Nonetheless, the resulting performance for a power of 6KW under these considerations results inadequate by less than 10%.

On the other side, if it is assumed a turbine performance on C_p of 0.3 and with the help of equations (4) and (5) we obtain that the diameter of the turbine for an electrical power of 6KW is $D \approx 2.81$ m and the three blades have a chord of $C = D / 4 \approx 0,7$ m each one, when the turbine has a height $H \approx 4.21$ m. For which in use of equation (5) the turbine rotation speed is approximately 26.09 RPM. Scaling dimensions of the Gorlov turbine with acceptable performance.

Based on these preliminary calculations it is understood that fluid friction phenomena, type of blade material, viscous and turbulent phenomena and rotation speed among others were not taken into account. Furthermore, equations (1), (2) and (3) were obtained for an operational and dimensional range of the Gorlov turbine from the study of [6], so it is required that the dimensions for the turbine established here be experimentally validated. CFD simulation methods can be involved in these experiments. However, the potential for electricity generation that Gorlov can supply to communities around the Orinoco river is evident.

IV.CONCLUSIONS

The combination of dimensional analysis, the numeric modeling with CFD, the application of Buckingham theorem and statistical analysis, along with the consideration of Orinoco river energetic potential, provides a base for the analysis of design and implementation of Gorlov turbines in Venezuela. The application of this methodology allows to progress in the generation of renewable and sustainable energy, contributing to the development of peripheric communities and isolated zones

The implementation of Gorlov turbines in the Orinoco River represents an opportunity to take advantage a renewable and abundant energetic resource.

The generation of energy distributed through the Gorlov turbines can provide a source of electricity distributed power generation through Gorlov turbines can provide a reliable and sustainable source of electricity to communities lacking access to the national grid, improving their quality of life and fostering local economic development.

The following research could be considered in the future:

Direct extrapolation of small-scale model results to large-scale turbines may not fully capture scale effects such as turbulence and surface roughness. Future re-

search could focus on developing CFD models that more accurately simulate flow in large-scale turbines, taking these effects into account.

Explore the interaction between the turbine and the river, considering factors such as: flow stratification, the sedimentation, and the presence of obstacles.

Explore different geometries of blades, valuing opportunities to optimize turbine designs through multi-objective techniques. Also, considerate new materials to enhance efficiency and to study the durability of the turbine.

Valuing the environmental impact of this turbines and the economic feasibility of their installation considering the installation, operation and maintenance costs, as well as economic and social benefits of hydrokinetic energy generation.

Ile effects such as turbulence and surface roughness. Future research could focus on developing CFD models that more accurately simulate flow in large-scale turbines, taking these effects into account.

Explore the interaction between the turbine and the river, considering factors such as: flow stratification, the sedimentation, and the presence of obstacles.

Explore different geometries of blades, valuing opportunities to optimize turbine designs through multi-objective techniques. Also, considerate new materials to enhance efficiency and to study the durability of the turbine.

Valuing the environmental impact of this turbines and the economic feasibility of their installation considering the installation, operation and maintenance costs, as well as economic and social benefits of hydrokinetic energy generation.

REFERENCES

- [1] Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMEH). (s.f.). Situación Hidrológica: Crecida río Orinoco. http://www.inameh.gob.ve/web/PDF/_gsdata/_saved_/Situacion%20Hidrolologica_%20Crecida%20rio%20Orinoco.pdf
- [2] Fundación Aquae. (s.f.). Río Orinoco. <https://www.fundacionaquae.org/wiki/rio-orinoco/>
- [3] A. Mora, A. Laraque, & J. L. López, “El Bajo Orinoco: aspectos hidrosedimentológicos, geoquímicos e influencia antrópica”, Rodríguez-Olarte D, 109-126, 2017.
- [4] S. A. Surulere, M. Y. Shatalov & F. E. Olayiwola, “Extensive Study of Modern Approaches Used in Identifying the Buckingham Potential”. *International Journal of Applied and Computational Mathematics*, 10(1), 22, 2024.
- [5] J. Guerra, L. Velásquez, A. Rubio-Clemente, A., L.

Jaramillo, & E. Chica, “Design and optimization of a siphon turbine using the response surface methodology”, *Results in Engineering*, 22, 102241, 2024

[6]G. Marturet, Modelación fluidodinámica de turbinas Gorlov para la mejora de su rendimiento. (Tesis doctoral), Ciudad Guayana: Universidad Nacional Experimental Politécnica Antonio José de Sucre (UXEXPO), 2019.

[7]ANSYS, I, ANSYS FLUENT 14.0. User's guide. ANSYS, 2011.

[8]Plenitude. (s.f.). Potencia eléctrica contratada: qué es y cómo se calcula. Eni Plenitude. <https://eniplenitude.es/blog/energia/potencia-electrica-contratada/>

[9]Selectra. (s.f.). Potencia eléctrica contratada: qué es y cómo se calcula. Selectra. <https://selectra.es/energia/tramites/potencia-electrica-contratada>

[10]TarifasGasLuz. (s.f.). Potencia contratada. Tarifas-GasLuz. <https://tarifasgasluz.com/faq/potencia-contratada>

CONTRIBUCIÓN DE LOS PROCESOS DE REDUCCIÓN DIRECTA A LA MITIGACIÓN DE LAS EMISIONES DE CO₂ EN LA INDUSTRIA SIDERÚRGICA

¹Gómez Adérsido, Núñez Ernesto²
{agomez¹, enunez²}@orinoco-iron.com
Orinoco Iron S.C.S.

Resumen: Este estudio evalúa y compara las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) generadas por diferentes procesos de reducción directa de menas de hierro en Puerto Ordaz, Venezuela. Se analizaron los procesos de Alto Horno, Midrex® y Finmet®, incluyendo las emisiones directas e indirectas asociadas a la preparación de las materias primas (sinter, coque y pellas). Mediante balances de masa de los procesos de combustión, considerando la generación de gas reductor y el de reducción de las menas, se estimaron las emisiones de CO₂ a partir del consumo de combustibles gaseosos. Los resultados indican que las plantas Midrex® y Finmet® presentan una reducción del 58% al 60% en las emisiones de CO₂ en comparación con el Alto Horno, demostrando un menor impacto ambiental. Este análisis subraya la importancia de la adopción de tecnologías de reducción directa para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero en la industria siderúrgica.

Palabras clave: Gases de efecto invernadero, dióxido de carbono, reducción directa, alto horno.

DYNAMIC SPECKLE ANALYSIS USING SEGMENTATION FILTERING

Abstract: This study evaluates and compares the carbon dioxide (CO₂) emissions generated by different direct reduction processes of iron ores in Puerto Ordaz, Venezuela. The processes analyzed were the Blast Furnace, Midrex®, and Finmet®, including direct and indirect emissions associated with raw material preparation (sinter, coke, and pellet). Through mass balances of combustion processes, considering reducing gas generation, and ore reduction, CO₂ emissions were estimated from gaseous fuel consumption. The results indicate that Midrex® and Finmet® plants exhibit a 58% to 60% reduction in CO₂ emissions compared to the Blast Furnace, demonstrating a lower environmental impact. This analysis underscores the importance of adopting direct reduction technologies to mitigate greenhouse gas emissions in the steel industry.

Keywords: Greenhouse gases, carbon dioxide, direct reduction, Blast Furnace.



I. INTRODUCCIÓN

El cambio climático, impulsado principalmente por el aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, representa una amenaza global crítica. El dióxido de carbono (CO₂) es el principal contribuyente a este fenómeno, lo que acentúa la necesidad urgente de cuantificar y mitigar sus emisiones para asegurar la sostenibilidad planetaria. Acuerdos internacionales, como el Protocolo de Kioto y el Acuerdo de París, han establecido marcos para reducir las emisiones de GEI, incluyendo CO₂, CH₄, N₂O, HFC, PFC, SF₆ y NF₃.

La industria siderúrgica, con procesos como la producción de pellas, altos hornos y reducción directa, es un contribuyente significativo a las emisiones de CO₂ debido al uso de combustibles fósiles. Las emisiones directas provienen principalmente de la combustión de gas natural y carbón, así como de la generación de gas reductor y el mismo proceso de reducción de menas de hierro.

Este estudio se enfoca en la estimación de las emisiones directas de CO₂ de plantas Midrex® y Finmet®, y para proporcionar un contexto comparativo, se incluyeron valores de emisiones directas e indirectas del proceso de alto horno, considerando la preparación de materias primas, tomadas de referencias bibliográficas. La metodología se basa en balances de masa aplicados a equipos con procesos de combustión, considerando la generación de gas reductor y la reducción de las menas, utilizando datos de flujo de gases y aire. El trabajo se estructura en cuatro secciones: marco teórico, metodología, resultados y conclusiones.

II. DESARROLLO

A. Dióxido de Carbono (CO₂)

El dióxido de carbono o anhídrido carbónico es un gas incoloro, inodoro y soluble en agua. Está compuesto por dos átomos de oxígeno y un átomo de carbono. Es considerado como un gas de efecto invernadero y el que más contribuye a este fenómeno climático. En otras palabras, atrapa el calor, absorbiendo gran parte de la radiación solar incidente, reteniéndola cerca de la superficie terrestre causándole un calentamiento progresivo y continuo. El gas resulta de la extracción y quema o combustión de combustibles fósiles como carbón, petróleo y gas natural, de incendios forestales y de procesos naturales como erupciones volcánicas [1].

La figura 1, muestra las mediciones de concentraciones de CO₂ atmosférico realizadas en los últimos años (1958 – 2025) [1]. En este periodo y de acuerdo a la

figura, hay un incremento potencial de la concentración del gas de aproximadamente del 35,28%.

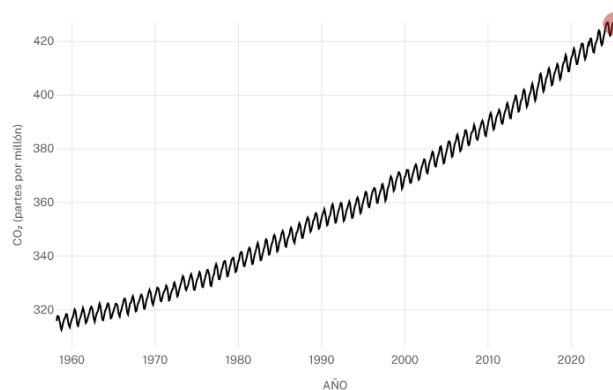


Figura 1: Mediciones directas de concentraciones de CO₂ atmosférico desde 1958 a la actualidad.

A. Plantas o procesos del sector siderúrgico de Puerto Ordaz-Venezuela.

En el entorno del sector siderúrgico de Puerto Ordaz se encuentra las plantas de fabricación de pellas a base de finos de mineral de hierro, siendo este producto la materia prima para las plantas de reducción Midrex, HyL y Alto Horno. Las emisiones ambientales de CO₂ de estas plantas vienen básicamente del horno de secado del mineral de hierro y del horno de piroconsolidación de las pellas verdes [2], [3]. Equipos que combustionan gas natural para suministrar los requerimientos de calor a los procesos de secado y piroconsolidación.

En el entorno siderúrgico, también se encuentran las plantas de reducción directa productoras de briquetas o hierro briqueteado en caliente (HBI, Hot Briquetted Iron) Midrex, HyL y Finmet. Las dos primeras usan como materia prima las pellas de mineral de hierro, mientras que Finmet utiliza finos de mineral de hierro sin pasar por algún proceso de peletización o aglomeración. Las emisiones ambientales de CO₂ de estas plantas resultan fundamentalmente de la reducción directa del mineral de hierro (pellas o finos) y de sus equipos (hornos reformadores, hornos recalentadores, sistemas de remoción de CO₂) y procesos de combustión.

Es importante resaltar, que las emisiones de CO₂ de la planta de pellas se consideran emisiones indirectas para las plantas Midrex y HyL por ser parte del acondicionamiento de su materia prima y estar fuera de su proceso productivo.

B. Plantas o procesos del Alto Horno (BF, Blast Furnace).

Otra fuente de emisiones de CO₂ que vienen del

sector siderúrgico, son las generadas durante la fabricación del acero por la ruta del BF – Convertidores (BOF, Basic Oxygen Furnace). En las plantas integradas, en el área de reducción y dentro de ella, el BF, para la producción de arrabio, es el mayor generador de emisiones de CO₂. El BF, además del arrabio y la escoria producida, genera el gas de alto horno, que es una mezcla de gases (dióxido de carbono, monóxido de carbono, vapor de agua y óxidos de azufre entre otros) que escapan por la parte superior del horno. Este gas, es reutilizado para aprovechar su energía, sin embargo, por ser bajo su poder calorífico se utilizan con otros gases como el gas natural. Las fuentes de emisiones en forma directa de CO₂ del BF están constituidas por: chimeneas de las estufas (gases de combustión para calentar el aire soplado), antorchas, perdidas en las líneas de transporte del gas, venteos de emergencia y combustión de gas natural para suprimir emisiones durante la colada [4].

Otras fuentes de emisión de CO₂, y que son consideradas generadoras en forma indirectas, cuando no están fuera del sitio de producción del alto horno, son las emanadas por las plantas que producen materias primas alimentadas al BF. Estas, están constituidas básicamente por las plantas de coque, sinter y pellas; materiales que alimentan el BF para la producción de arrabio.

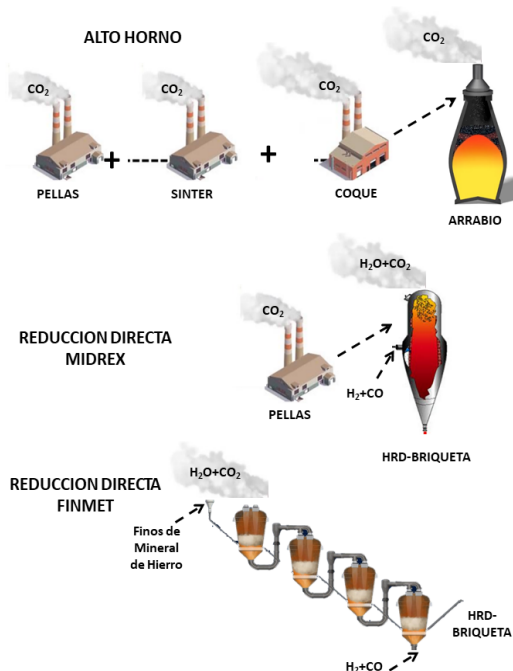


Figura 2: Emisiones directas e indirectas de CO₂ en Altos Hornos y Plantas de Reducción Directa.

La WorldSteel Association hace referencia en su página web, que para el año 2023, los factores de emisiones de CO₂, por ruta de fabricación de acero, fueron

los indicados en la Tabla I [5].

Tabla I. FACTORES DE EMISIÓN DE CO₂ PARA DISTINTAS RUTAS DE FABRICACIÓN DE ACERO

Ruta de Fabricación de Acero	Factor de Emisión de CO ₂ [kg/tm Acero]
Alto Homo - Convertidor	2.320,00
Chatarra – Horno de Arco Eléctrico	700,00
HRD - Horno de Arco Eléctrico	1.430,00

De los datos reportados en la tabla anterior se puede deducir que el valor de emisión para el HRD sería la diferencia entre la ruta HRD – HAE (1.430,00) y la ruta Chatarra – HAE (700,00) equivalente a 730,00 kgCO₂/tm HRD, este valor se podría tomar como referencia.

III. METODOLOGÍA

La estimación de las emisiones ambientales de CO₂ de cada planta, se realizaron a través de los balances de masa de los procesos de combustión en los equipos o sistema de las plantas y donde el gas combustible utilizado es gas natural, se usó una composición promedio del gas; calculada con base a la información suministrada de PDVSA-Gas. La figura 3, muestra el esquema general del balance de masa en el proceso de combustión, considerando la composición del gas natural y las siguientes reacciones de combustión:

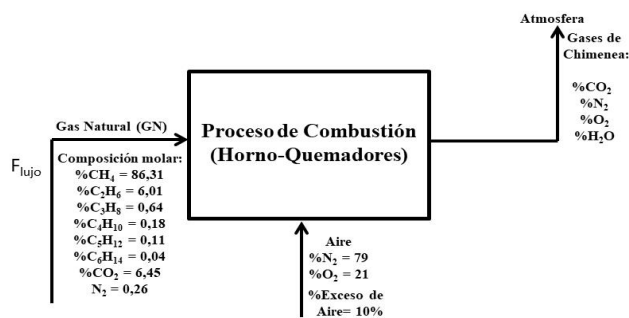
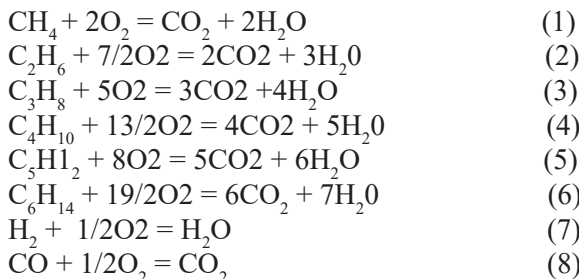


Figura 3: Esquema del balance de masa en los procesos de combustión.

A continuación la metodología y consideraciones, en detalle, desarrollada para cada planta del sector:

A. Planta de Pellas

Para la planta de pella, la estimación de las emisiones ambientales de CO₂ se determinó considerando que estas se producen básicamente en las etapas del horno de secado del mineral de hierro y el horno de piroconsolidación de la pella verde. Por tanto, se calcularon a través del balance de masa de la combustión de gas natural en los hornos de estas dos etapas y considerando los siguientes parámetros [2]:

- Producción promedio de pellas de 6.268.448,50 tm/año.
- Consumo de gas natural como combustible de 31,30 Nm³/t pella.
- Operación continua de 330 días/año.
- Exceso de Aire para combustión del 10% (valor normal utilizado en operaciones de hornos industriales).

B. Planta Midrex

Las emisiones ambientales directas de CO₂ de las plantas Midrex vienen esencialmente de su horno reformador estequiométrico, y son generadas de la combustión de una mezcla de gas natural y gas reductor (gas de tope del reactor) en los quemadores del horno. Las emisiones se estimaron por balance de masa para la combustión de la mezcla combustible del horno y considerando los siguientes parámetros:

- Producción de briqueta o HBI: 96 t/h [6].
- Flujo de gas natural y gas de tope combustible según diseño [7].
- Flujo de aire a quemadores según diseño [7].
- Exceso de Aire para combustión del 10% (valor normal utilizado en operaciones de hornos industriales).

C. Planta Finmet

Las fuentes directas de generación de CO₂ de la planta provienen básicamente de gases de combustión del horno reformador y horno precalentador, mechurrio o antorcha (Hot Flare) y del sistema de remoción de CO₂ - desulfuración de azufre. El horno reformador utiliza gas natural como combustible y el horno precalentador usa una mezcla de gas natural y gas reductor (gas de reciclaje) mientras que el Hot Flare quema gas reductor que viene de los venteos para control de presión de reactores y planta de gas.

Los flujos de gases de combustión de estos equipos, fueron tomados del balance de masa del diseño de la planta para las condiciones nominales de flujos, producción de briqueta por tren y por módulo de la planta. Posteriormente, con estos parámetros se estimaron las emisiones ambientales de CO₂ de la planta.

D. Alto Horno (BF)

La metodología usada para estimar las emisiones ambientales de CO₂ del Alto Horno fue a través de los factores de emisión de CO₂ de fuentes directas e indirectas del horno, tomados de las referencias bibliográficas. La Tabla II, muestra los factores de emisión de CO₂ utilizados [8].

Tabla II
FACTORES DE EMISIÓN DE CO₂ PARA LA PRODUCCIÓN DE SINTER, COQUE, ARRABIO Y PELLAS

Proceso	Factor de Emisión [kg/TM]
Producción de Sinter	0,20
Hornos de Coquización	0,56
Producción de Arrabio	1,35
Producción de Pellas	0,03

Las plantas de fabricación de coque, sinter y pellas fueron consideradas como fuentes indirectas de emisión de CO₂ del BF. Como patrón de carga referencial al alto horno se tomó lo indicado en la Tabla III [9].

Tabla II
PATRÓN DE CARGA REFERENCIAL AL ALTO HORNO PARA UNA TONELADA METRICA DE ARRABIO

Materiales	TM
Producción de Arrabio	1,00
Mineral Requerido	1,40
Coque Requerido	0,50 a 0,65
Caliza o Dolomita Requerida	0,25
Aire	1,8 a 2

Sobre esta base y debido al agotamiento a nivel mundial del mineral de hierro en trozos de alto tenor, se estableció el patrón de carga para calcular las emisiones de CO₂ del Alto Horno. El patrón de carga de materiales alimentado al BF considerado para la producción de 1,0 tm de arrabio fue el indicado en la Tabla III.

Tabla III
PATRÓN DE CARGA CONSIDERADO PARA EL ALTO HORNO

Materiales	TM
Producción de Arrabio	1,00
Mineral Requerido (Sinter+Pellas)	1,40 (0,91+0,49)
Coque Requerido	0,65
Fundentes	0,25
Total Alimentado	2,30

IV.RESULTADOS

A continuación se presentan los análisis de los resultados obtenidos.

A.Planta de Pellas

Los resultados calculados por balance de masa de los procesos de combustión de la planta, mostrados en la Tabla IV, estimaron una emisión ambiental de CO₂ de 66,53 Kg CO₂/t pella producida.

**TABLA IV
FUENTES DE EMISIONES AMBIENTALES
DE GASES DE COMBUSTIÓN DE PLANTA DE
PELLAS**

VARIABLE	Hornos (Secado + Piroconsolidación)				
	%MOL AR	%PESO	TOTAL GAS DE COMBUSTIÓN VENTEADO [KG/H]	GAS VENTEADO [KG/H]	RELACIÓN KG/TM PELLAS
CO ₂	9,43	14,88		52.656,41	66,53
O ₂	1,73	1,98	353.851,60	7.021,67	8,87
N ₂	71,85	72,16		255.345,10	322,62
H ₂ O	16,99	10,97		38.828,41	49,06
TOTAL	100	100		353.851,60	447,08
PESO MOLECULAR GAS DE VENTEO: 27,88 KG/KMOL					
PRODUCCIÓN DE PELLAS: 791,47 TM/H					

Factores referenciales mostrados en la Tabla V, de estudios sobre emisiones indirectas de una planta integrada de fabricación de acero a base de mineral de hierro indican que dependiendo de la mineralogía del mineral de hierro con el cual se produce la pella, el factor de emisión estaría entre 51 – 154 Kg CO₂/t pella [10]. Por lo tanto, la emisión estimada de la planta de pella está dentro del rango referencial.

**TABLA V
FACTOR DE EMISIÓN DE CO₂ UTILIZADO
PARA EMISIONES INDIRECTAS DE PROCESOS
FUERA DEL LÍMITE DEL SISTEMA**

MATERIAL/ENERGÍA	EMISIÓN ESPECÍFICA	UNIDADES
PELLA HEMATÍTICA	154,00	KG CO ₂ /TM
PELLA MAGNÉTICA	51,00	KG CO ₂ /TM
MINERAL	26,00	KG CO ₂ /TM
HRD BASADO EN CARBÓN	1.790,00	KG CO ₂ /TM
HRD BASADO EN GAS NATURAL	586,00	KG CO ₂ /TM
CHATARRA	18,70	KG CO ₂ /TM
CAL CALCINADA	1.346,00	KG CO ₂ /TM
ESCORIA DE CONVERTIDOR	149,00	KG CO ₂ /TM
CALIZA	428,00	KG CO ₂ /TM
OXIGENO	1.283,00	KG CO ₂ /TM
VAPOR	224,00	KG CO ₂ /TM
POTENCIA	0,60	KG CO ₂ /KWH
TRANSPORTE		
BUQUE (CARBÓN/COQUE)	51,40	KG CO ₂ /TM
CAMIÓN	0,072	KG CO ₂ /TM KM
TREN	0,020	KG CO ₂ /TM KM

B.Planta de Midrex®

Los resultados de generación directa, calculados por balance de masa de las emisiones ambientales de gases de combustión de la planta Midrex se muestran en la Tabla VI.

El balance muestra una estimación de la emisión ambiental de CO₂ de 696,73 Kg CO₂/t HBI, el cual comparativamente con las referencias indicadas en la Tabla V (Procesos Basado en Gas Natural (ej. Midrex)) y en la Tabla I (diferencia entre la ruta Chatarra-HAE y HRD-HAE) de 586 y 730 Kg CO₂/tm HRD, respectivamente, indica que el valor está en el rango dado por estos valores.

**TABLA IV
FUENTES DE EMISIONES AMBIENTALES DE
GASES DE COMBUSTIÓN DE PLANTA MI-
DREX**

VARIABLE	Reformador Planta Midrex				
	%MOL AR	%PESO	TOTAL GAS DE COMBUSTIÓN VENTEADO [KG/H]	GAS VENTEADO [KG/H]	RELACIÓN KG/TM HBI
CO ₂	14,11	21,94		66.885,70	696,73
O ₂	1,54	1,74	304.823,02	5.312,26	55,34
N ₂	64,10	63,43		193.360,15	2.014,17
H ₂ O	20,25	12,88		39.264,91	409,01
TOTAL	100	100		304.823,02	3.175,24
PESO MOLECULAR GAS DE VENTEO: 28,89 KG/KMOL					
PRODUCCIÓN DE HBI: 96,00 TM/H					

C.Planta Finmet®

Los resultados según el balance de masa de las emisiones ambientales de CO₂ por cada fuente de la planta Finmet se muestra en la Tabla V. El estimado de CO₂ liberado a la atmosfera por la planta es de 829,76 Kg CO₂/t HBI (Briqueta). Comparativamente con la planta Midrex y el rango mencionado en las referencias, Finmet tiene un mayor impacto ambiental en cuanto a emisiones de CO₂ a la atmosfera; esto debido a una mayor cantidad de fuentes generadoras de gases de combustión.

**TABLA V
RESUMEN DE FUENTES Y EMISIONES AM-
BIENTALES DE CO₂ DE LA PLANTA FINMET**

FUENTE DE EMISIÓN DE CO ₂	KG CO ₂ /TM HBI
CHIMENEA HORNO REFORMADOR	212,25
CHIMENEA HORNO PRECALENTADOR GAS REDUCTOR	234,28
CHIMENEA UNIDAD DESULFURIZADORA LO-CAT	284,91
CHIMENEA HORNO SECADOR DE MINERAL	40,00
CHIMENEA DE INCINERACIÓN DE GASES INFLAMABLES	58,32
TOTAL DE EMISIONES POR COMBUSTIÓN	829,76

D. Planta Alto Horno (BF)

Las fuentes y emisiones mostradas en la Tabla VI, son con base en el patrón de carga considerado y los factores de emisión indicados en la Tabla II. El total de emisiones (directas + indirectas) de CO₂ estimadas para el Alto Horno fue de 1.910,70 kg CO₂/tm Arrabio.

TABLA VI
RESUMEN DE FUENTES Y EMISIONES DE CO₂ DE LA PLANTA ALTO HORNO (BF)

FUENTE DE EMISIÓN DE CO ₂	KG CO ₂ /TM ARRABIO
PLANTA DE COQUE	364,00
PLANTA DE SINTER	182,00
PLANTA DE PELLA	14,70
ALTO HORNO	1.350,00
TOTAL EMISIONES CO ₂	1.910,70

E. Comparación de Emisiones Directas de Plantas del Sector Siderúrgico

Las emisiones directas de CO₂ de cada una de las plantas del sector siderúrgico, incluyendo al Alto Horno, se muestran en la Tabla VII. Comparativamente la planta con menor emisión de CO₂ es la planta de pella, seguidas de Midrex, Finmet y por último el Alto Horno la de mayor generación con 1.350,00 kg CO₂/t Arrabio.

TABLA VII
PLANTAS Y EMISIONES DIRECTAS DE CO₂ DEL SECTOR SIDERÚRGICO

PLANTA/PROCESO	KG CO ₂ /TM PELLA, ARRABIO O HBI
PLANTA DE PELLA	66,50
ALTO HORNO	1.350,00
PLANTA MIDREX	696,70
PLANTA FINMET	829,76

F. Comparación de Emisiones Totales de Plantas del Sector Siderúrgico

Las emisiones totales de CO₂ (directas + indirectas) de las tres plantas o procesos de reducción del mineral de hierro se muestran en la Tabla VIII.

Tabla VIII
PLANTAS Y EMISIONES TOTALES DE CO₂ DEL SECTOR REDUCCIÓN DEL MINERAL DE HIERRO

PLANTA/PROCESO	KG CO ₂ /TM ARRABIO O HBI
ALTO HORNO (DIRECTAS + INDIRECTAS)	1.910,70
PLANTA MIDREX (DIRECTAS + INDIRECTAS)	763,26
PLANTA FINMET (SOLO DIRECTAS)	829,76

Al igual que en la comparación de las emisiones directa de CO₂ de las plantas del sector siderúrgico, se sigue manteniendo el orden comparativo entre las plantas del sector reducción del mineral de hierro; siendo la planta de menor emisión Midrex, seguida por Finmet y el de mayor generación continua siendo el Alto Horno. En consecuencia, el mayor impacto ambiental por emisiones totales de CO₂ lo presenta el Alto Horno. En cuanto a emisiones totales de CO₂, las plantas Finmet y Midrex tienen un factor de emisión de 56,58% y 60,05% respectivamente por debajo del Alto Horno.

V. CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos por los balances de masa y sus análisis se puede concluir lo siguiente:

1. La estimación y comparación de las emisiones ambientales de CO₂ fue posible aplicando como herramienta el balance de masa de los procesos de combustión y los factores de emisión de CO₂ para la producción del sector hierro y acero.

2. En cuanto a emisiones ambientales de CO₂, el estudio realizado a través del balance de masa de los procesos de combustión, muestran que entre las plantas o procesos de reducción directa Finmet® y Midrex® hay muy poca diferencia, siendo la tecnología Finmet® levemente más emisor que Midrex®.

3. Las emisiones ambientales de Dióxido de Carbono (CO₂) de las Plantas Midrex® y Finmet® resultaron significativamente inferiores que las del Alto Horno, en el orden de un 56,58% y 60,05% respectivamente.

4. En el contexto de la urgencia global por reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, este estudio reveló que las plantas de reducción directa generan significativamente menos dióxido de carbono que el proceso tradicional de Alto Horno. Estos hallazgos confirman el menor impacto ambiental de las rutas de reducción directa para la producción de acero y sugieren un camino prometedor hacia una siderurgia más limpia, especialmente si se considera el potencial de la reducción de menas utilizando hidrógeno como agente alternativo.

RECONOCIMIENTO

Agradecimiento de los autores a la empresa Orinoco Iron S.C.S por permitir el desarrollo de esta investigación en sus instalaciones.

REFERENCIAS

[1] NASA. (2025). "Dióxido de carbono". National Aeronautics and Space Administration. (NASA). USA. Disponible: <https://climate.nasa.gov/en-espanol/signos-vitales/dioxido-de-carbono/?intent=111>

- [2]SIDOR. (2009). “Presentación Planta de Pellas SIDOR”. Siderurgica del Orinoco C.A. Puerto Ordaz.
- [3]K. Montero. (2024). “Peletización del Mineral de Hierro”. UNEXPO. Especialización en Reducción Directa. Puerto Ordaz.
- [4]J. Madias. (2017). “Disminuciones de CO₂ de los Altos Hornos”. Disponible: <https://www.researchgate.net/publication/314760799>
- [5]WorldSteel Association. (2024). “Sustainability Indicators 2024 Report”. Disponible: <https://worldsteel.org/wider-sustainability/sustainability-indicators-2024-report/>
- [6]Venprecar. (2009). “I Jornadas para el Análisis del Sector Ferrosiderúrgico”. Venezolana de Prerreducidos Caroni C.A. Puerto Ordaz.
- [7]Venprecar. (2010). “Fundamentos Técnicos del Proceso Midrex”. Venezolana de Prerreducidos Caroni C.A. Puerto Ordaz.
- [8]IPCC. (2006). “Metal Industry Emissions”. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Chapter 4. The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). United Nations. Ginebra. Suiza.
- [9]EPA. (2024). “Iron And Steel Production”. Metallurgical Industry. Chapter 12.5. Environmental Protection Agency. USA.
- [10]M. Larssona, C. Gripb, H. Ohlssonb, S. Rutqvistb, J. Wikströmc, S. Ångströmc. (2006). “Comprehensive Study Regarding Greenhouse Gas Emission from Iron Ore Based Production at the Integrated Steel Plant SSAB Tunnlåt AB”. International Journal of Green Energy. Taylor & Francis. UK.
- [11]VAI. (1998). “2 MIO T/A FINMET Plant Orinoco Iron C.A. Mass Balance and Flowsheets (CIP)”. VOEST-ALPINE Industrieanlagenbaun GmbH. Austria.

DEGRADACIÓN POR DESGASTE EN LECHO FLUIDIZADO DE MENAS DE MINERAL DE HIERRO CALCINADAS A 1000°C A ESCALA LABORATORIO EN ORINOCO IRON S.C.S

MSc. Montero Krishna¹, Ing. Ramírez Luis², Ing. Morillo Lismar³
montero.krishna@gmail.com, ramirezl@orinoco-iron.com, morillolis28@gmail.com
Unexpo Vice-Rectorado Puerto Ordaz

Magister Scientiarum en Ingeniería Metalúrgica. Docente de Ingeniería Metalúrgica, Unexpo Puerto Ordaz¹
Ingeniero Metalúrgico, Ing. de Investigación Geometalúrgica Orinoco Iron S.C. S²
Ingeniero Metalúrgico, Investigador de Ciencias Naturales, Lab. Microscopía y Estudio de Materiales. Unexpo
Puerto Ordaz³

Resumen: El presente estudio evalúa la Degradación por Desgaste de menas de mineral de hierro previamente calcinadas a 1000°C a escala de laboratorio en Orinoco Iron S.C.S. Para ello, se realizaron ensayos de decrepitación y fluidización, además se implementó un analizador de imagen para estudiar el cambio morfológico sometidas a calcinación. La mena de mayor PPC fue la Costra Goethítica con 11,14%; mientras que los Finos Negros obtuvo un 0,36% siendo el valor más bajo. Los tipos de Finos Marrones obtuvieron un ID por Decrepitación entre 1,79-1,70; por su parte la Costra Goethítica registró el menor valor con 1,31. La Costra Laminada Limonítica registró el mayor ID por Desgaste con 2,02 mientras que la Costra Goethítica se degradó menos con 1,40. Esta última presentó un incremento de área de poros-grietas de 7,07%; al contrario de los Finos Negros que registraron 0,32%. La variación de los resultados se debe a la textura, cantidad de goethita, PPC, dureza, friabilidad y forma de cada mena.

Palabras clave: Decrepitación, fluidización, PPC, desgaste.

FLUIDIZED BED ATTRITION DEGRADATION OF IRON ORE CALCINED AT 1000°C ON A LABORATORY SCALE AT ORINOCO IRON S.C.S

Abstract: This study evaluates the attrition degradation of iron ore ores previously calcined at 1000°C at laboratory scale at Orinoco Iron S.C.S. For this purpose, decrepitation and fluidization tests were performed, and an image analyzer was implemented to study the morphological change subjected to calcination. The ore with the highest PPC was the Goethite Crust with 11.14%; while the Black Fines obtained 0.36%, being the lowest value. The Brown Fines types obtained a Decrepitation ID between 1.79-1.70; meanwhile, the Goethite Crust registered the lowest value with 1.31. The Limonite Laminated Crust registered the highest attrition ID with 2.02, while the Goethite Crust degraded the least with 1.40. The latter showed a 7.07% increase in pore-crack area; unlike the Black Fines, which registered 0.32%. The variation in the results is due to the texture, amount of goethite, PPC, hardness, friability, and shape of each ore.

Keywords: Attrition, decrepitation, fluidization, PPC.



I. INTRODUCCIÓN

Las menas de mineral de hierro son la materia prima para la producción de Hierro Briqueteado en Caliente (HBC), a su vez, este último constituye la alimentación para las industrias productoras de acero a nivel mundial. Uno de los métodos para obtener productos de hierro metálico es mediante la reducción directa en lecho fluidizado.

Durante el proceso de reducción directa en lecho fluidizado FINMET®, los finos de mineral de hierro adquieren un movimiento similar a un líquido en ebullición debido al contado sólido-gas a las condiciones de temperatura y presión determinadas generando así choques entre ellas y las partes internas del reactor trayendo consigo efectos de decrepitación, desgaste y adherencia.

Es así como la alta variabilidad de las menas de mineral de hierro en cuanto a sus propiedades físicas, químicas y mecánicas influyen en el desempeño de la fluidización y en algunos casos genera un cambio granulométrico que puede ser perjudicial para el proceso FINMET®, por ello, se desea evaluar la degradación por Desgaste en lecho fluidizado de menas de mineral de hierro previamente calcinadas. Siendo este el principal objetivo del presente artículo.

II. DESARROLLO

• Metodología

Determinación de la Pérdida Por Calcinación (PPC) e Índice de Degradación por Decrepitación (ID) en muestras de menas de mineral de hierro por medio del ensayo de decrepitación a 1000°C.

Recolección de muestras. Se tomaron muestras de menas puras de mineral de hierro (costras: Goethítica, Limonítica, Masiva y Laminada Limonítica; finos marrones: Silíceos, Laminados y tradicional; por último, Finos Negros) tomadas por la Superintendencia de investigación Geometalúrgica.

Para realizar la respectiva distribución granulométrica de la muestra se tomaron tamices de ¼ pulg, 10 mesh, 16 mesh, 60 mesh, 100 mesh, 200 mesh, 400 mesh y -400 mesh. Donde para cada tamiz se pesaron 6, 50, 24, 80, 26, 14, 8 y 4 gramos respectivamente de muestra, dando un valor total de 212 gramos en total.

Calcinación de muestras (choque térmico a 1000°C). El ensayo se llevó a cabo en el Laboratorio Químico de Calidad, introduciendo cada muestra de mena de hierro de 212 gramos en un crisol metálico. Se colocó la muestra en un horno a 1000°C durante 1 hora.

Se repitió el procedimiento con cada mena de mineral de hierro.

Distribución granulométrica. Una vez calcinada la muestra se colocó en un perfil de tamices de ¼ pulg, 10 mesh, 16 mesh, 60 mesh, 100 mesh, 200 mesh, 400 mesh y -400 mesh. Posteriormente se colocó en un RO-TAP por 7 minutos.

Pesaje de muestras calcinadas. Las muestras calcinadas luego de colocarlas en el RO-TAP fueron separadas por tamiz de ¼ in, 10 mesh, 16 mesh, 60 mesh, 100 mesh, 200 mesh, 400 mesh y -400 mesh, se pesó en una balanza analítica la cantidad de muestra retenida en cada tamiz, con el fin de observar la diferencia de peso de una muestra calcinada y sin calcinar.

Cálculo de las Pérdidas por Calcinación. El porcentaje de Pérdidas por Calcinación se determinó a partir de los datos de pesaje de las muestras antes y después del calcinado utilizando la fórmula establecida por la norma COVENIN 1724. La fórmula se expresa de la siguiente manera:

$$PPC = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \times 100 \quad (1)$$

Cálculo del diámetro promedio de Sauter (DPS). El diámetro promedio de Sauter se calculó a partir de los porcentajes de retenido inicial y final de cada distribución granulométrica. Se calculó el promedio de la abertura de cada malla. Para ello, se debe tomar un valor por encima del que se está trabajando, es decir, 3/8 pulg, se realiza el promedio a partir de esa abertura junto con la siguiente de 1/4 in, luego 1/4 pulg. con 10 mesh y así sucesivamente.

Cálculo del Índice de Degradación por Decrepitación. Se estima en base al cociente del Diámetro promedio Sauter inicial y final, es decir, antes y después del calcinado de partículas mediante la siguiente fórmula:

$$ID = \frac{DPS_i}{DPS_f} \quad (2)$$

Determinación del Índice de Degradación por Desgaste en Lecho Fluidizado a las muestras ensayadas con aire a temperatura ambiente por medio del ensayo de fluidización

Ensayo de Fluidización. Se colocó la muestra en un reactor con un tiempo de permanencia de 30 minutos.

Distribución granulométrica. Una vez terminado el ensayo de fluidización se colocó la muestra en un perfil de tamices de 1/4 pulg., 10 mesh, 16 mesh, 60 mesh, 100 mesh, 200 mesh, 400 mesh y -400 mesh. Posteriormente, se colocó en un RO-TAP por 7 minutos con la finalidad de realizar correctamente la distribución granulométrica, así sucesivamente se repitió el procedimiento para cada muestra de mena de mineral hierro.

Pesaje de muestras calcinadas. Las muestras de mineral de hierro luego de colocarlas en el RO-TAP fueron separadas por tamiz de 1/4 in, 10 mesh, 16 mesh, 60 mesh, 100 mesh, 200 mesh, 400 mesh y -400 mesh, se pesó en una balanza analítica la cantidad de muestra retenida en cada tamiz, con el fin de observar la diferencia de peso de una muestra antes y después de fluidizar.

Cálculo del diámetro promedio de Sauter. El diámetro promedio de Sauter se calculó a partir de los porcentajes de retenido inicial y final de cada distribución granulométrica del ensayo de fluidización.

Cálculo del Índice de Degradación por Desgaste. Se realizó la relación del diámetro promedio Sauter inicial entre el final, es decir antes y después del ensayo de fluidización mediante la ecuación 2.

Estudio a través del análisis de imágenes el cambio morfológico de las menas de mineral de hierro sometidas a calcinación

Fotografías de menas de mineral de hierro. Se tomaron fotografías de las muestras antes y después del calcinado por medio de un microscopio digital USB, con la finalidad de observar el cambio morfológico de las menas de hierro antes y después de ser sometidas al choque térmico de 1000°C durante 1 hora de permanencia en el horno. El tamaño seleccionado para tomar las fotografías fue de 10 mesh.

Medición de poros y grietas. El analizador de imágenes (Image J) se utilizó para observar y estimar el cambio morfológico de las menas de mineral de hierro antes y después de la calcinación a 1000°C sin fluidizar.

•Análisis de resultados

Determinación de la Pérdida Por Calcinación (PPC) e **Índice de Degradación por Decrepitación (ID) en muestras de menas de mineral de hierro por medio del**

ensayo de decrepitación a 1000°C.

En la tabla 1 se muestra la cantidad inicial de cada mena de mineral de hierro expresada en gramos y en porcentaje de masa para la calcinación a 1000°C.

TABLA 1
Cantidad de muestra inicial de mena de mineral de hierro

Mallas	1/4 pulg.	10 mesh	16 mesh	60 mesh	100 mesh	200 mesh	400 mesh	-400 mesh	total
gramos	6	50	24	80	26	14	8	4	212
% masa	2,83	23,58	11,32	37,74	12,26	6,60	3,77	1,89	100

Como se puede observar en la tabla 1, se obtuvo como resultado un total de 212 gramos de muestra distribuidos granulométricamente en mallas de 1/4 pulg., 10 mesh, 16 mesh, 60 mesh, 100 mesh, 200 mesh, 400 mesh y -400 mesh, en donde corresponden 6, 50, 24, 80, 26, 14, 8 y 4 gramos respectivamente. En la figura 1 se muestran los resultados de las Pérdidas por Calcinación.

En los resultados obtenidos en la figura 1 se puede observar que las Costras obtuvieron los valores más altos de PPC. En la naturaleza estas menas se sitúan en la zona superficial del suelo teniendo un contacto directo con los agentes climáticos, por ende, son más hidratadas que los finos.

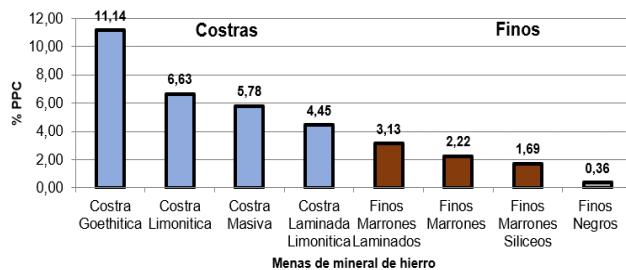


Figura 1: Pérdidas por Calcinación de menas de mineral de hierro

La costra con el valor de PPC más alto fue la Costra Goethítica con un valor de 11,14%, seguido de la Costra Limonítica con 6,63%, siendo la Costra Masiva y Costra Laminada Limonítica las de valores menores entre las menas duras con 5,78% y 4,45% respectivamente.

Entre las menas friables, los Finos Marrones Laminados obtuvieron el valor más alto de PPC con 3,13%; seguido de los Finos Marrones y los Finos Marrones Silíceos con 2,22% y 1,69% respectivamente. Estas menas tienen valores de PPC más bajas que las costras.

Por último, en cuanto al resultado del ensayo de PPC, los Finos Negros obtuvieron un valor de 0,36% de PPC siendo la mena con el valor más bajo, lo que es de esperarse por su textura compuesta por microplacas de hematita lo que implica cantidades bajas de agua de cristalización.

Como se observa en la figura 2, los distintos tipos de Finos Marrones obtuvieron los índices más altos de degradación por Decrepitación con un valor de 1,79 para los Finos Marrones Laminados; 1,76 para los Finos Marrones Silíceos; por último, 1,70 para los Finos Marrones. Su degradación se debe a su textura conformada por microplacas de hematita e incrustaciones de goethita que al ser sometidas a un choque térmico rápidamente liberan el agua de cristalización en forma de vapor haciendo que la estructura hematítica se degrade.

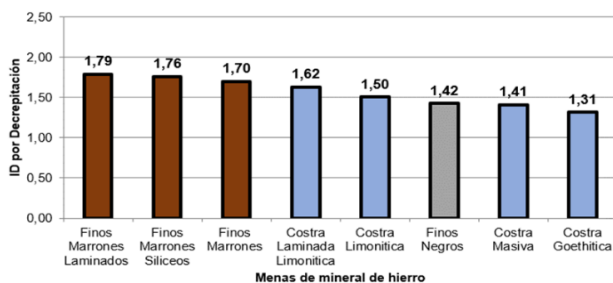


Figura 2: Índice de Degradación por Decrepitación de menas de mineral de hierro.

Por otra parte, en las costras el mineral goethítico actúa como un cemento que cohesionan los granos hematíticos de su estructura, por ende, partiendo de que el contenido de goethita es directamente proporcional a las PPC, se puede decir que a mayor proporción de goethita mayor es el grado de cementación de las costas y contribuye directamente en su resistencia mecánica.

La mena de Finos Negros obtuvo un Índice de Degradación por Decrepitación de 1,42 siendo una de las menas que menos se degradó en comparación con las demás. Esto se debe a que no contiene elevadas cantidades de goethita en su estructura y como se puede corroborar en la figura 60 su valor de PPC fue el más bajo de 0,36%.

El Índice de Degradación (ID) por Decrepitación se ve influenciado por el Diámetro Promedio Sauter (DPS) el cual mide el tamaño del conjunto de partículas que se está analizando. En el caso de la Costra Goethítica al haber menos degradación, es decir, menor cantidad de finos generados tras la liberación del agua de cristalización se obtiene un ID menor siendo la razón principal la elevada cantidad de goethita en su estructura por lo que

posee un alto grado de cementación el cual la endurece y contribuye a que se degrade en baja proporción.

Determinación del Índice de Degradación por Desgaste en Lecho Fluidizado a las muestras ensayadas con aire a temperatura ambiente por medio del ensayo de fluidización

A continuación, en la figura 3 se muestran los resultados del Índice de Degradación por Desgaste.

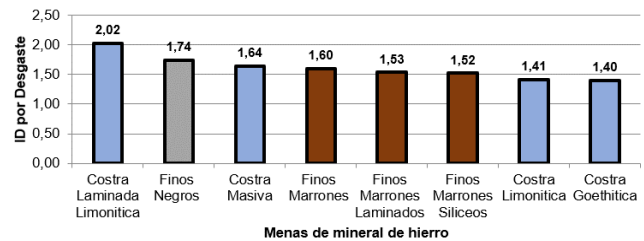


Figura 3: Índice de Degradación por Desgaste

La degradación por desgaste depende de la textura, forma y resistencia mecánica de las menas, así como también de las condiciones de operación (Ching Yang, 2003, p. 213). Las costras se caracterizan por tener elevada dureza, en cambio los finos son friables, es decir, se degradan con facilidad.

Según los resultados obtenidos la Costra Laminada Limonítica obtuvo un ID de Desgaste de 2,02; seguido de Finos Negros con un valor de 1,74 (ambas menas de morfología laminar) y por último la Costra Masiva con 1,64, siendo las menas que obtuvieron una mayor degradación. Esto se debe a la estructura previamente calcinada de cada mena, que, al tensionarse por el choque térmico y la salida del vapor del agua de cristalización, reduce su resistencia mecánica.

Estudio a través del análisis de imágenes el cambio morfológico de las menas de mineral de hierro sometidas a calcinación.

A continuación, se muestra el cambio morfológico de las menas de mineral de hierro antes y después del calcinado, así como también los resultados obtenidos por el analizador de imagen Image J.

Al analizar la Costra Goethítica antes de la calcinación (figura 4(a)(c)) se puede observar que el color característico de estas rocas es el amarillo además de contar con una superficie porosa. Luego de la calcinación se forman únicamente grietas con una coloración rojiza (figura 4(b)(d)).

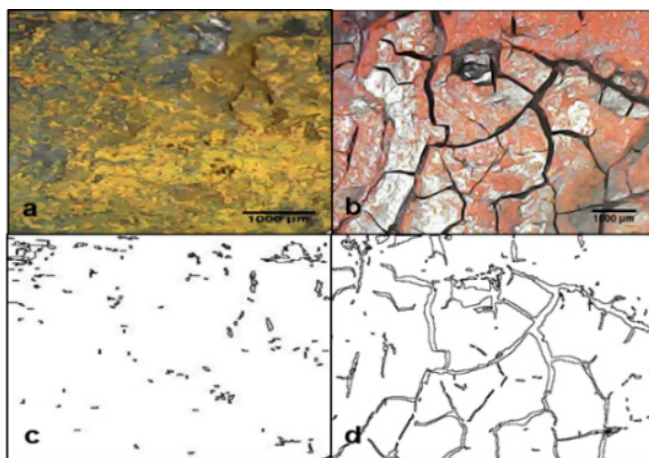


Figura 4: Morfología de la Costra Goethítica antes y después del calcinado

Nota: 4(a) Morfología sin calcinar (739X). 4(b) Morfología calcinada (726X). 4(c) Segmentación de poros y grietas sin calcinar. 4(d) Segmentación de poros y grietas calcinada.

Los Finos Negros se caracterizan por tener bajas proporciones de goethita en su estructura. Por lo tanto, su estructura no sufre alteraciones apreciables después del calcinado (figura 5(a)(c)(b)(d)).

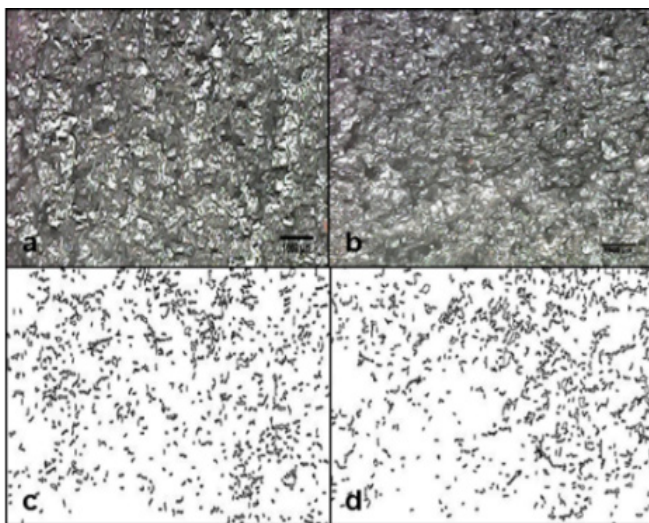


Figura 5: Morfología de Finos Negros antes y después del calcinado

Nota: 5(a) Morfología sin calcinar (726X). 5(b) Morfología calcinada (698X). 5(c) Segmentación de poros y grietas sin calcinar. 5(d) Segmentación de poros y grietas calcinada.

En la figura 6 se puede observar que la Costra Goethítica y Limonítica obtuvieron los valores más elevados de incremento de área de poros-grietas con 7,07% y

6,62% respectivamente. Esto se debe a que estas menas se componen de altas proporciones de goethita por ende la liberación del agua de cristalización es elevada; así mismo, debido a la degradación por Decrepitación se generaron grietas en ambas menas.

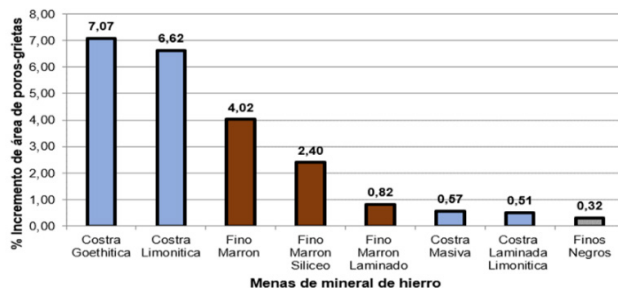


Figura 6: Incremento de área de poros-grietas en menas de mineral de hierro luego de calcinación a 1000 °C

Los distintos tipos de Finos Marrones obtuvieron valores intermedios de incremento de área de poros-grietas, con valores para Finos Marrones 4,02%, Finos Marrones Silíceos 2,40 % y por último Finos Marrones Laminados con un valor de 0,82%.

Por último, las Costras Masiva, Laminada Limonítica y los Finos Negros fueron las menas de menor incremento de área de poros-grietas al obtener 0,57%; 0,51% y 0,32%, respectivamente. Estos valores bajos se deben a que estas menas antes de la calcinación poseen una elevada porosidad.

III.CONCLUSIONES

Referente a la determinación de la Pérdida por Calcinación (PPC) e Índice de Degradación por Decrepitación de las menas de mineral de hierro ensayadas se concluye lo siguiente:

- La Costra Goethítica registró el valor más alto de PPC con 11,14%; seguido de la Costra Limonítica con 6,63%, Costra Masiva con 5,78% y Costra Laminada Limonítica con 4,45%, siendo estas las menas más hidratadas. En lo que respecta a las menas friables, los distintos tipos de Finos Marrones registraron valores de PPC entre 3,13% y 1,69%. Por último, con un valor de 0,36% Los Finos Negros se describen como la mena con el menor valor de PPC. La variación obtenida puede responder al contenido de goethita de estas menas.

- En cuanto al Índice de Degradación por Decrepitación, los tipos de Finos Marrones registraron valores entre 1,79 y 1,70 seguido de la Costra Laminada Limonítica, Costra Limonítica y Finos Negros con valores de

1,62; 1,50 y 1,42 respectivamente. La Costra Masiva con 1,41 y Costra Goethítica con 1,31 obtuvieron los valores más bajos de Índice de Degradación por Decrepitación. Los valores obtenidos reflejan la variabilidad en la textura, dureza, friabilidad y cantidad del grado de cementación goethítico asociado a cada mena.

La determinación del Índice de Degradación por Desgaste de las menas de mineral de hierro estudiadas se concluyó lo siguiente:

- La Costra Laminada Limonítica registró el valor más alto de Índice de Degradación por Desgaste con 2,02, luego los Finos Negros con 1,74 y Costra Masiva con 1,64 siendo el modo de desgaste predominante la abrasión. Los distintos tipos de Finos Marrones obtuvieron valores medios entre 1,60 y 1,52 siendo su modo de Desgaste abrasión y fragmentación. Por último, la Costra Limonítica y Goethítica con valores de 1,41 y 1,40 respectivamente, el modo de Desgaste por fragmentación es predominante para estas Costras.

El análisis de imagen aplicado a las distintas muestras de menas de mineral de hierro antes y después del efecto de calcinación se puede concluir que:

- La Costra Goethítica y Limonítica obtuvieron el cambio morfológico más pronunciado siendo sus incrementos de área de poros-grietas de 7,07% y 6,62% respectivamente. Los tipos de Finos Marrones obtuvieron valores medios entre 4,02% y 0,82%. Por último, la

Costra masiva con un incremento de área de poros-grietas de 0,57%, seguido de Costra Laminada Limonítica con 0,51% y Finos Negros 0,32% siendo el valor más bajo.

REFERENCIAS

- [1]Guerrero, A., & Camilo, G. (2019). Efecto de la temperatura en el enriquecimiento en hierro de minerales hidrotermales por tratamiento pirometalúrgico. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
- [2]Núñez, E. (2008). Metodología de selección de Minerales de Hierro para el Proceso FINMET a través de Ensayos de Caracterización Mineralógica y Potencial de Metalización. Trabajo de Grado (Maestría en Ingeniería metalúrgica). Puerto Ordaz: Universidad Nacional Experimental Politécnica Antonio José de Sucre.
- [3]Palacios, P. (2012). Estudio de la deshidroxilación en el óxido férrico hidratado denominado limonita. Revista de La Sociedad Química Del Perú, 78(3), 198–207. <https://n9.cl/0qazf>.
- [4]Ramírez, L. (2020). Aplicación de la geometalurgia para el diseño de mezclas de especies litológicas en un proceso de reducción directa de lecho fluidizado. [Tesis de pregrado, Unexpo]
- [5]Strezov, V., Evans, T. J., Zymła, V., & Strezov, L. (2011). Structural deterioration of iron ore particles during thermal processing. *International Journal of Mineral Processing*, 100(1–2), 27–32. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2011.04.005>

ANÁLISIS DE LAS APLICACIONES DE LOS SISTEMAS IA EN LA FABRICACIÓN TRADICIONAL: IMPACTO Y DESAFÍOS

Acevedo López Daniel y Duarte Parra Ángel.
dacevedo@unexpo.edu.ve, aduarte@unexpo.edu.ve
Centro de Ingeniería de Fabricación
UNEXPO Vicerrectorado Puerto Ordaz

Resumen: La integración de la inteligencia artificial (IA) en los procesos de fabricación tradicionales, como el torneado, el fresado, la laminación y la forja, está revolucionando la industria al mejorar la eficiencia, la productividad y el control de calidad [1]. Esta transformación tecnológica permite aprovechar los enfoques basados en datos y la automatización en las operaciones de fabricación. La IA facilita el mantenimiento predictivo, la inspección de calidad en tiempo real y la optimización de recursos. Sin embargo, también plantea desafíos significativos, como la necesidad de una fuerza laboral equipada con nuevas habilidades y consideraciones éticas en torno a la privacidad de los datos y los derechos laborales [2]. Precisamente este trabajo se focaliza en el análisis de las aplicaciones de los sistemas IA en la fabricación tradicional, su impacto y desafíos. Se ha basado en una revisión documental orientada por una búsqueda sistemática en bases de datos científicas especializadas, seleccionando estudios que examinan la implementación de algoritmos de IA en entornos de fabricación tradicional. Finalmente se concluye que la integración de sistemas de IA en procesos de fabricación tradicionales ofrece beneficios significativos en términos de productividad, calidad y reducción de costos, pero requiere abordar desafíos cruciales como la capacitación de la fuerza laboral, la gestión efectiva de datos y consideraciones éticas para maximizar su potencial transformador

Palabras clave: Inteligencia Artificial, Fabricación Tradicional, Automatización de Procesos, Mantenimiento Predictivo, Control de Calidad.

FLUIDIZED BED ATTRITION DEGRADATION OF IRON ORE CALCINED AT 1000°C ON A LABORATORY SCALE AT ORINOCO IRON S.C.S

Abstract: The integration of artificial intelligence (AI) into traditional manufacturing processes, such as turning, milling, rolling, and forging, is revolutionizing the industry by improving efficiency, productivity, and quality control [1]. This technological transformation makes it possible to take advantage of data-driven approaches and automation in manufacturing operations. AI facilitates predictive maintenance, real-time quality inspection, and resource optimization. However, it also poses significant challenges, such as the need for a workforce equipped with new skills and ethical considerations around data privacy and employment rights [2]. Precisely this work focuses on the analysis of the applications of AI systems in traditional manufacturing, their impact, and challenges. It has been based on a documentary review guided by a systematic search in specialized scientific databases, selecting studies that examine the implementation of AI algorithms in traditional manufacturing environments. Finally, it is concluded that the integration of AI systems into traditional manufacturing processes offers significant benefits in terms of productivity, quality, and cost reduction, but requires addressing crucial challenges such as workforce training, effective data management, and ethical considerations to maximize their transformative potential.

Keywords: Artificial Intelligence, Traditional Manufacturing, Process Automation, Predictive Maintenance, Quality Control.



I. INTRODUCCIÓN

La evolución de los procesos de fabricación ha sido profundamente moldeada por los avances tecnológicos a lo largo de los siglos. A medida que avanzaron las décadas, la innovación tecnológica continuó redefiniendo los procesos de fabricación. La integración de la automatización y los sistemas de diseño y fabricación asistidos por computadora (CAD/CAM) transformaron profundamente los procesos de mecanizado tradicionales, como las operaciones de torneado y fresado. La automatización introdujo eficiencias, pero también planteó preocupaciones sobre la eliminación de puestos de trabajo, ya que las máquinas se hicieron cargo de tareas repetitivas que antes realizaban los trabajadores [10].

Actualmente los avances en inteligencia artificial (IA) y la robótica han abierto nuevas posibilidades para los procesos de fabricación. Mientras que los robots tradicionales se programaban principalmente para tareas específicas, las tecnologías impulsadas por la IA permiten que las máquinas aprendan y se adapten, mejorando su papel en las líneas de producción. Este cambio indica un movimiento que se aleja de la mera sustitución de la mano de obra y se centra en el aumento de las capacidades humanas con máquinas inteligentes capaces de realizar tareas complejas, como la inspección de calidad y el mantenimiento predictivo [4][6][7].

Además, el panorama contemporáneo de la fabricación está marcado por una importante brecha de habilidades, a medida que la IA y la automatización se vuelven más frecuentes, existe una necesidad urgente de una fuerza laboral equipada con nuevas habilidades para administrar estos sistemas sofisticados de manera efectiva [1][2].

Precisamente, este trabajo se ha centrado en el análisis de las aplicaciones de los sistemas IA en la fabricación tradicional, su impacto y desafíos. Se ha rea-

lizado la revisión documental de estudios basados en la integración de visión artificial en control de calidad de la fabricación, el desarrollo de sistemas predictivos para mantenimiento industrial, y de la optimización de procesos mediante aprendizaje automático. También estudios sobre los efectos socioeconómicos de la automatización inteligente en entornos industriales tradicionales.

De tal manera que se ha desglosado el desarrollo del trabajo en tres secciones principales: primero, un análisis de las aplicaciones específicas de IA en procesos tradicionales como torneado, fresado, laminación y forja; segundo, una evaluación de los impactos en la eficiencia, productividad, control de calidad y la optimización de recursos potenciados por IA; tercero, un análisis de los desafíos técnicos, organizacionales y éticos que presenta esta transformación tecnológica, con especial atención a la brecha de habilidades y la necesidad de adaptación de la fuerza laboral.

De cara al futuro, la transformación digital en curso significa otro momento crucial en la historia de la fabricación [5].

II. Aplicaciones de la IA en procesos de fabricación tradicionales

A. La IA en las operaciones de torneado

Las tecnologías de IA están transformando las operaciones de torneado tradicionales al mejorar la precisión y la eficiencia. Los tornos CNC, que utilizan control numérico, han sido revolucionados por los algoritmos de IA que optimizan los parámetros de corte y las trayectorias de las herramientas basándose en el análisis de datos en tiempo real. Esto da como resultado una mejor calidad de las piezas fabricadas y una reducción de los tiempos de ciclo, ya que la IA puede predecir los

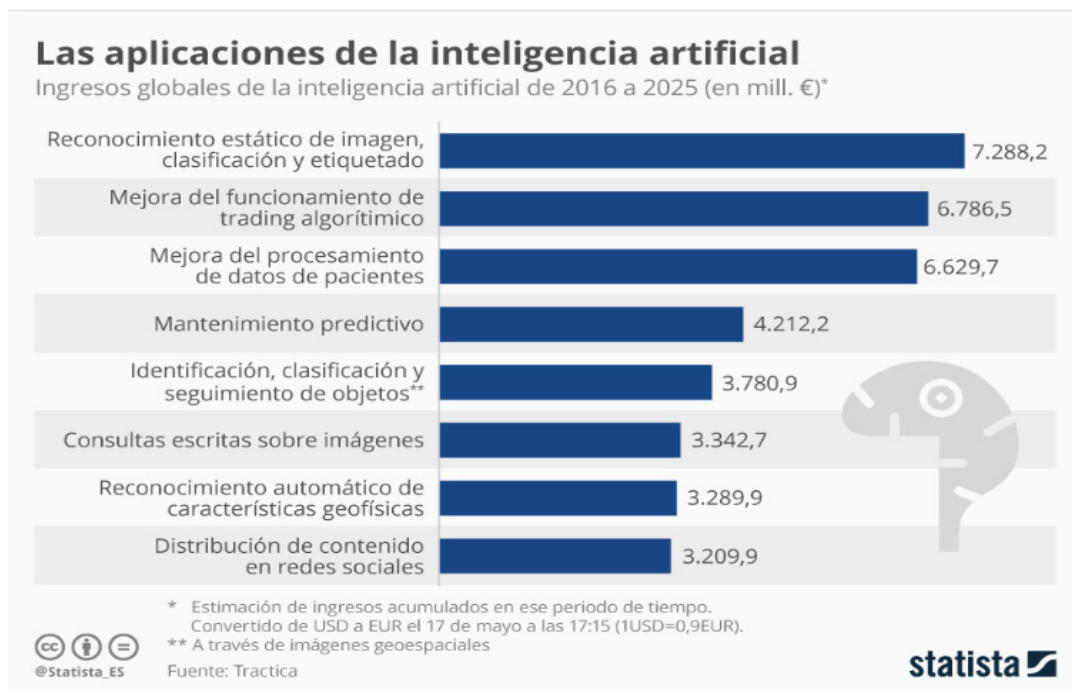


Figura 1. Ingresos Globales de la Inteligencia Artificial por Aplicación de 2016 a 2025 (en millones €). Fuente: Tractica (2019).

B. La IA en los procesos de fresado

En las operaciones de fresado, la IA facilita a las máquinas fresadoras de alta velocidad lograr una mejor calidad superficial y una eficiencia de producción superior. Los modelos de aprendizaje automático pueden analizar datos históricos para refinar las estrategias de fresado, ajustar las velocidades de avance y optimizar el uso de la herramienta de forma dinámica. Este enfoque adaptativo permite a los fabricantes producir geometrías complejas con mayor precisión y tiempos de configuración reducidos [13][14]. La IA también desempeña un papel fundamental en el control de calidad al utilizar la visión por computadora para inspeccionar las piezas fresadas en tiempo real, identificando defectos o desviaciones de las especificaciones en las primeras etapas del proceso [15].

C. La IA en los procesos de laminación y forja

El impacto de la IA en los procesos de laminación y

forja es igualmente significativo. En los trenes de laminación, los sistemas de IA pueden optimizar los parámetros de temperatura y presión en tiempo real, lo que garantiza que las propiedades del material cumplan con los estrictos requisitos de calidad. Mediante el monitoreo del proceso de laminación con sensores y el uso de análisis predictivos, los fabricantes pueden ajustar los procesos instantáneamente para mejorar los rendimientos y reducir las tasas de desecho [15]. De manera similar, en las operaciones de forja, la IA puede mejorar el diseño de troqueles y herramientas mediante la simulación de diferentes escenarios de carga, lo que permite diseños optimizados que reducen el uso de material al tiempo que mantienen la integridad estructural [14][15].

Al analizar aplicaciones específicas en procesos como el torneado o fresado, es relevante comprender los principales casos de uso de la IA en la industria de fabricación a nivel mundial, como se muestra en la Fig. 2.

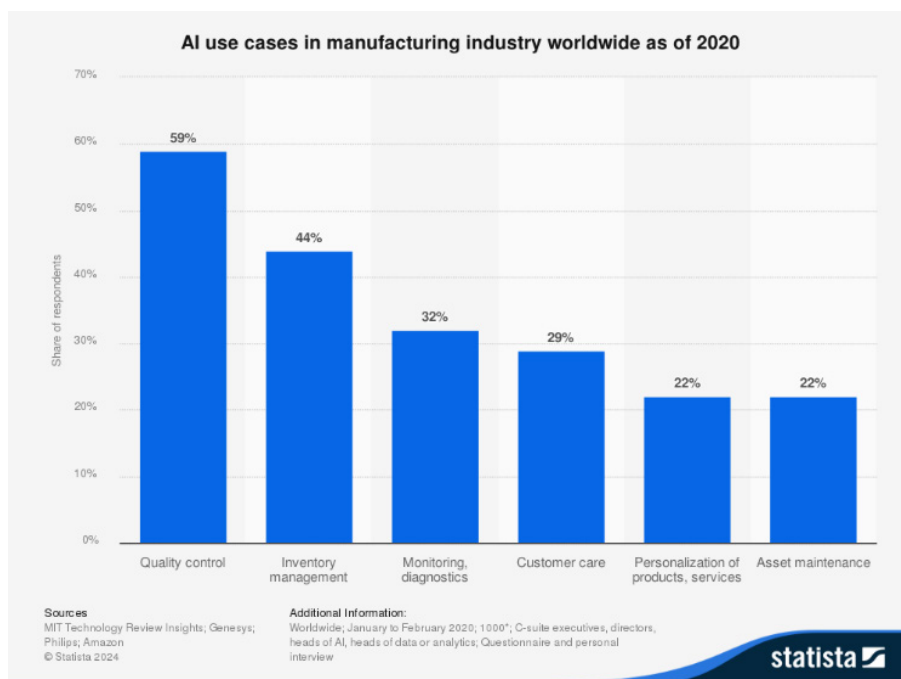


Figura 2. Casos de Uso de IA en la Industria Manufacturera Mundial en 2020. Fuente: MIT Technology Review Insights, Genesys, Philips, Amazon (2020).

D. Integración de la IA con la robótica

La integración de la IA con la robótica en los procesos de fabricación tradicionales, como el torneado, el fresado y la forja, está revolucionando los flujos de trabajo operativos. Los brazos robóticos impulsados por IA pueden ejecutar tareas complejas junto con los trabajadores, lo que mejora la eficiencia en el montaje, la manipulación de materiales y las inspecciones de calidad. Estos sistemas aprovechan la IA para aprender de su entorno, mejorando su capacidad para adaptarse a nuevas tareas y mejorar con el tiempo, fomentando así un entorno de fabricación más flexible [2][15].

III. Impacto de la IA en la fabricación tradicional

A. Mejoras en la eficiencia y productividad.

La IA mejora significativamente la eficiencia de la fabricación al automatizar tareas repetitivas, lo que permite a los trabajadores centrarse en actividades más complejas y de valor añadido. Por ejemplo, las tareas involucradas en los procesos de torneado y fresado se pueden optimizar a través de algoritmos de IA que administran los flujos de trabajo de producción y minimizan los errores, lo que conduce a una producción más rápida y reduce el desperdicio. Los informes sugieren que la IA puede aumentar la productividad en la fabricación entre un 20% y un 40%, un claro indicador de su potencial para transformar la eficacia operativa [2].

B. Facilidad del mantenimiento predictivo.

Una de las ventajas fundamentales de la IA en la fabricación tradicional es su capacidad para facilitar el mantenimiento predictivo. Los sistemas de IA analizan los datos de los sensores de la maquinaria para pronosticar posibles fallas antes de que se produzcan, minimizando así los tiempos de inactividad no planificados y reduciendo los costos de mantenimiento. Por ejemplo, los fabricantes de automóviles están empleando el mantenimiento predictivo en los robots de la línea de montaje, optimizando significativamente sus programas de producción.

C. Mejora en los procesos de control de calidad

La IA mejora los procesos de control de calidad mediante el uso de tecnologías avanzadas de reconocimiento de imágenes para detectar defectos en tiempo real, lo que garantiza que solo los productos que cumplen con las especificaciones estrictas avancen a través de las etapas de fabricación [3].

D. Reducción de costos y optimización de recursos

La integración de la IA en los procesos de fabricación tradicionales no solo mejora la eficiencia, sino que también supone un importante ahorro. La automatización, el análisis predictivo y el control de calidad mejorado contribuyen a reducir los gastos de mano de obra

y mantenimiento, reducir el desperdicio y optimizar el consumo de energía. Los sistemas de IA pueden identificar áreas de ineficiencia energética en procesos como laminación y forja, lo que permite a los fabricantes ajustar las operaciones en tiempo real, reduciendo así los

costos y minimizando el impacto medioambiental [3].

La expansión significativa del mercado global de la IA se evidencia en la Fig. 3, que proyecta un crecimiento exponencial para la década 2020 a 2030.

Tamaño del mercado de la inteligencia artificial a nivel mundial de 2020 a 2030

(en miles de millones de dólares)

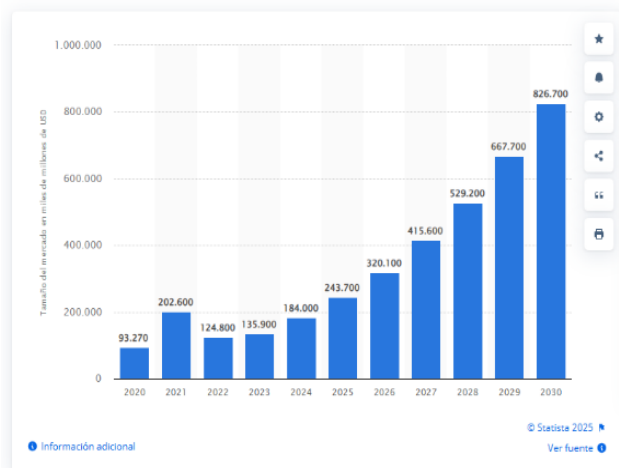


Figura 3. Tamaño del Mercado de la Inteligencia Artificial a Nivel Mundial de 2020 a 2030 (en Miles de Millones de Dólares). Fuente: Statista (2025).

E. Sustitución de empleo y desarrollo de habilidades

Uno de los impactos más significativos de la IA en la fabricación es el desplazamiento de puestos de trabajo, ya que la automatización puede conducir a la reducción de puestos tradicionalmente ocupados por humanos. Las funciones que implican tareas rutinarias, como la inspección de calidad o el manejo de máquinas, son cada vez más manejadas por sistemas de IA, lo que puede resultar en reducciones de personal en estas áreas [5][9]. Sin embargo, si bien es posible que se eliminen cierta cantidad de puestos de trabajo, el auge de la IA también crea nuevas oportunidades de trabajo en áreas como la gestión de sistemas, el mantenimiento y la supervisión de procesos automatizados [7].

A medida que la IA transforma las funciones tradicionales de fabricación, también requiere un cambio en las habilidades de la fuerza laboral. Los trabajadores deben adaptarse a las nuevas tecnologías, lo que requiere una mejora continua de las habilidades en IA, robótica y análisis de datos. La transformación promueve la colaboración entre los humanos y los sistemas de IA, donde los empleados pueden concentrarse en tareas más estratégicas y creativas, mientras que las máquinas se encargan de las tareas repetitivas. Esta evolución podría conducir a la creación de nuevas oportunidades de em-

pleo, contrarrestando las pérdidas de empleo causadas por la automatización, impactando así en la demanda general de mano de obra en el sector de los procesos de fabricación [11].

IV. Desafíos de la IA en la fabricación tradicional

La integración de la IA en los procesos de fabricación tradicionales, como el torneado, el fresado, la laminación y la forja, presenta una serie de retos y consideraciones que deben abordarse para aprovechar todo su potencial de forma eficaz [16][17].

A. Calidad y disponibilidad de los datos

Un desafío crítico en la adopción de la IA en la fabricación es la calidad y la disponibilidad de los datos. Los entornos de fabricación a menudo generan datos que pueden estar sesgados, desactualizados o llenos de errores debido a diversos factores, incluidas las duras condiciones operativas como temperaturas extremas y vibraciones, que pueden afectar la precisión de los sensores [4]. Además, muchas plantas de fabricación utilizan sistemas propietarios que no se comunican entre sí, lo que hace que los datos operativos se distribuyan en múltiples bases de datos en formatos inadecuados para el análisis [4]. Esto requiere un preprocesamiento exhaustivo para que los datos sean utilizables para las

aplicaciones de IA, lo que pone de manifiesto la importancia de establecer procesos sólidos de recopilación de datos y mejorar la calidad de los datos [15].

B. Desafíos de integración y compatibilidad

La integración de los sistemas de IA con la infraestructura de fabricación existente puede plantear serios problemas de compatibilidad. Es crucial garantizar la interoperabilidad entre las nuevas plataformas de IA y los sistemas heredados para evitar interrupciones en los procesos de producción. La adopción de estándares industriales y el establecimiento de canales de comunicación claros entre hardware y software pueden facilitar una integración más fluida [15].

C. Gestión del cambio y adaptación cultural

La implementación exitosa de tecnologías de IA requiere estrategias efectivas de gestión del cambio que promuevan una actitud positiva hacia la IA entre los empleados. Es esencial una comunicación clara sobre los límites y los beneficios de la IA, junto con la participación de las partes interesadas en el proceso de transición. Cultivar una cultura colaborativa en la que la IA se considere una herramienta de aumento que mejora las capacidades humanas puede ayudar a facilitar la transición y fomentar la innovación dentro de los entornos de fabricación [19][20].

D. Brecha de habilidades y transición de la fuerza laboral

La rápida evolución de la tecnología en el sector de la fabricación ha creado una importante brecha de habilidades entre la fuerza laboral actual. A medida que evolucionan los roles tradicionales, los trabajadores deben adquirir nuevas competencias para seguir siendo relevantes [18]. Los programas de formación y mejora productiva son esenciales para preparar a los empleados para los nuevos requisitos laborales resultantes de los avances de la IA [22]. Los empleadores tendrán la necesidad de invertir en programas de capacitación integrales que aborden necesidades operativas específicas, fomentando una cultura de aprendizaje continuo para mejorar la adaptabilidad de la fuerza laboral [19]. Para el año 2033, se estima que habrá que cubrir 3,8 millones de puestos de trabajo en el sector de fabricación de Estados Unidos; Sin embargo, aproximadamente 1,9 millones de estos puestos pueden quedar sin cubrir si no se abordan adecuadamente los desafíos de la fuerza laboral, como las brechas de habilidades y los cambios en los requisitos laborales [21].

La transformación del mercado laboral debido a la IA varía considerablemente entre países, como se aprecia en la Fig. 4, donde Estados Unidos lidera significativamente la oferta laboral en este sector tecnológico, seguido por Canadá y España.

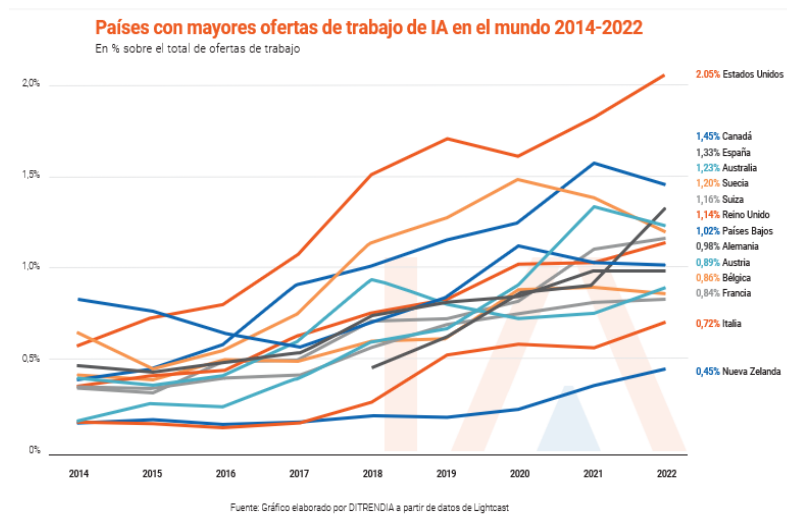


Figura 4. Países con mayores ofertas de trabajo de IA en el mundo 2014-2022 (en % sobre el total de ofertas de trabajo). Fuente: Gráfico elaborado por ONTSI/REDIA a partir de datos de Lightcast.

E. Consideraciones éticas y legales

La implementación de la IA en la fabricación también plantea cuestiones éticas y legales que deben con-

siderarse cuidadosamente. Garantizar la equidad, la rendición de cuentas y la transparencia en las aplicaciones de IA es vital para mantener la confianza y la integridad

dentro de las operaciones de fabricación [20][21].

También hay que tener en cuenta las implicaciones éticas de los cambios en la plantilla impulsados por la IA. El desplazamiento laboral puede provocar dificultades financieras y una disminución de la autoestima de los trabajadores afectados, lo que exacerba las desigualdades socioeconómicas existentes [22][23]. A medida que las empresas navegan por estas transiciones, deben considerar los impactos a largo plazo en los empleados, las economías locales y las comunidades, adoptando enfoques holísticos que prioricen la preservación del empleo y el apoyo de los trabajadores [23].

V. CONCLUSIONES

1. El futuro de los procesos de fabricación tradicionales, como el torneado, el fresado, la laminación y la forja, debe prepararse para una transformación significativa debido a la integración de la inteligencia artificial (IA) y la automatización. A medida que estas tecnologías evolucionan, prometen mejorar la eficiencia e impulsar la innovación, al tiempo que presentan desafíos que deben ser abordados de manera proactiva por las partes interesadas de la industria, incluidos los responsables políticos y los educadores.

2. Se espera que el aumento de la automatización en la fabricación continúe, creando un panorama dinámico en el que algunos roles pueden disminuir mientras surgen nuevas oportunidades. Este cambio requiere un enfoque en volver a capacitar a la fuerza laboral para que se adapte a los entornos impulsados por la IA. Las competencias en IA y análisis de datos serán cada vez más valiosas, especialmente en los sectores tradicionales que integran la IA para mejorar la eficiencia operativa y la calidad de los productos.

3. La IA puede agilizar los procesos de fabricación tradicionales optimizando los programas de producción, reduciendo el desperdicio y mejorando las prácticas de mantenimiento predictivo. Los algoritmos de aprendizaje automático pueden analizar los datos de rendimiento de tornos y fresadoras para predecir fallas antes de que ocurran, minimizando el tiempo de inactividad y aumentando la productividad. A medida que se adopten estas tecnologías, la interacción entre el trabajo humano y la inteligencia de las máquinas será crucial, haciendo hincapié en los roles que requieren creatividad, inteligencia emocional y atributos complejos de toma de decisiones que la IA no puede replicar.

4. Si bien los avances en IA ofrecen beneficios sustanciales, también plantean preguntas éticas y preocupaciones con respecto al desplazamiento laboral. Estos cambios ponen de manifiesto la necesidad de un enfoque equilibrado que proteja a los trabajadores y al mis-

mo tiempo adopte el progreso tecnológico. Es probable que el futuro requiera estrategias que prioricen no solo la eficiencia, sino también el bienestar de la fuerza laboral.

REFERENCIAS

- [1] Dubov, A. (2024, Agosto 7). AI and workforce transformation: New skills for manufacturing jobs. LinkedIn. <https://www.linkedin.com/pulse/ai-workforce-transformation-new-skills-manufacturing-jobs-anton-dubov-ap2ic>
- [2] Hakia. (2022, Junio 21). AI & job displacement: Exploring ethical challenges of automation. Hackia. <https://hakia.com/ai-and-job-displacement-navigating-the-ethical-implications-of-automation/>
- [3] Schmelzer, R. (2024, Noviembre 14). From production to precision: How AI is reshaping manufacturing. Forbes. <https://www.forbes.com/sites/ronschmelzer/2024/11/14/from-production-to-precision-how-ai-is-reshaping-manufacturing/>
- [4] Elsabbagh, R. (2024, Mayo 12). AI in manufacturing: Streamlining production processes. Profiletree. <https://profiletree.com/ai-in-manufacturing/>
- [5] O'Donnell, J. (2024, December 19). Challenges for manufacturing's digital shift in 2025. TechTarget. <https://www.techtarget.com/searchERP/feature/Challenges-for-manufacturings-digital-shift-in-2025>
- [6] Finio, M & Downie, A. (2024, Noviembre 15). How is AI being used in manufacturing? IBM. <https://www.ibm.com/think/topics/ai-in-manufacturing>
- [7] Jain, A (2025, Enero 25). AI in manufacturing: Benefits, use cases, & trends. Oyelabs. <https://oyelabs.com/ai-in-manufacturing-benefits-use-cases-examples/>
- [8] Team Digital Defynd. (2024). How can AI be used in manufacturing? Digital Defynd. <https://digitaldefynd.com/IQ/ai-use-in-manufacturing-case-studies/>
- [9] Protoandgo. (n.d.). How artificial intelligence is changing CNC machining. <https://protoandgo.com/en/how-ai-is-changing-the-machining-industry/>
- [10] Consilien. (2024, Agosto 22). AI revolution in manufacturing: Critical challenges & Opportunities in 2024. <https://www.consilien.com/news/ai-revolution-in-manufacturing-critical-challenges-opportunities-in-2024>
- [11] Pietro from Profitable Processes. (n.d.). AI in manufacturing processes: A comprehensive guide for integration of AI. Profitable Processes. <https://profitable-processes.com/ai-in-manufacturing/>
- [12] Sinkora, E. (2023, Septiembre 5). How AI can be applied to manufacturing. Advanced Manufacturing. https://www.advancedmanufacturing.org/manufacturing-engineering/machine-learning-for-machine-tools/article_2dc57660-6a0d-11ef-abc3-7f78f2ad3f89.html

- [13]Refer.me. (2024, Mayo 1). The changing face of manufacturing: AI's influence on job roles and skills. <https://www.refer.me/blog/the-changing-face-of-manufacturing-ais-influence-on-job-roles-and-skills>
- [14]De Bernardini, L. (2024, Julio 8). Challenges and ethical considerations of implementing generative AI in manufacturing. <https://www.automationworld.com/factory/digital-transformation/article/55092052/challenges-and-ethical-considerations-of-implementing-generative-ai-in-manufacturing>
- [15]Pederson, D. (n.d.). CNC Milling Evolution: From Traditional Techniques to AI-Driven Innovations. Hexagon Machine. <https://hexagonmachine.com/cnc-milling-modern-tech-shape-precision/>
- [16]Krimmelbein, F. (2024, Octubre 3). The ethical implications of AI and job displacement. Sogeti Labs. <https://labs.sogeti.com/the-ethical-implications-of-ai-and-job-displacement/>
- [17]Henry, P. (2024, Mayo 31). AI and automation: The looming threat of job displacement. Work on Peak. <https://workonpeak.org/ai-and-automation-the-threat-of-job-displacement/>
- [18]Forbes Business Council. (2024, Diciembre 2). Why workers must lead AI transformation in manufacturing. Forbes. <https://www.forbes.com/councils/forbesbusinesscouncil/2024/12/02/why-workers-must-lead-ai-transformation-in-manufacturing/>
- [19]U.S. Department of Labor. (2024). Artificial intelligence and worker well-being: Principles and best practices. <https://www.dol.gov/general/AI-Principles>
- [20]Tsai, SJ. (2024, Noviembre 12). AI's influence on employment trends: Analyzing current labor market shifts and future impacts. SciJournal. <https://www.scijournal.org/articles/ais-influence-on-employment-trends-analyzing-current-labor-market-shifts-and-future-impacts>
- [21]Andre, D. (2025, Enero 21). AI replacing jobs statistics: Key insights and trends for 2024. <https://www.allaboutai.com/resources/ai-replacing-jobs-statistics/>
- [22]Hellman, Bryan. (2025, Enero 9). Mastering Industry 5.0: Essential upskilling strategies for future-ready manufacturers. Industrial Automation Co. <https://industrialautomationco.com/blogs/news/mastering-industry-5-0-essential-upskilling-strategies-for-future-ready-manufacturers>
- [23]SoluLab. (2024). The future of work: How AI is reshaping careers and industries. <https://www.solulab.com/future-of-work-ai-reshaping-careers-industries/>

ESTIMACIÓN DE DAÑO ESTRUCTURAL A TRAVÉS DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS EXTENDIDOS Y ELASTOPLÁSTICIDAD DE UNA ESTRUCTURA METÁLICA

Aguilar Germán, Gil Orlando
ing.gsaguilar@gmail.com, orgil07@gmail.com

Resumen: El presente trabajo plantea como objetivo analizar los resultados obtenidos de la metodología de simulación estructural mediante el método de elementos finitos y algunos modelos de elastoplasticidad para la cuantificación de daño en una estructura metálica colapsada por fluencia usando como caso de estudio la estructura del brazo externo del sistema de cargas de astillas "SHIPLOADER-B" de la empresa MDO/MAVETUR, tal análisis sirve como sustento para validar las fases de reparación de dicho equipo y además generar una estrategia aplicable a otras estructuras que exhiban comportamiento dúctil similar. Desde el punto de vista metodológico se realizó el diagnóstico de las condiciones estructurales de la estructura colapsada, siguiendo con el cálculo analítico de la rótula plástica del equipo usando el enfoque de la AISC 360-10 y la literatura sobre la interacción de los esfuerzos plásticos, con estos datos se alimentaron y validaron las simulaciones de la distribución de esfuerzos y deformaciones resultantes de la estructura colapsada de ejemplo con dos modelos de elastoplasticidad utilizando el programa de simulación por elementos finitos extendidos.

Palabras clave: Análisis estructural, Elastoplasticidad, Elementos finitos, Simulación.

FLUIDIZED BED ATTRITION DEGRADATION OF IRON ORE CALCINED AT 1000°C ON A LABORATORY SCALE AT ORINOCO IRON S.C.S

Abstract: The present work aims to analyze the results obtained from the structural simulation methodology using the finite element method and some elastoplasticity models for the quantification of damage in a metallic structure collapsed by creep using as a case study the structure of the external arm of the chip loading system "SHIPLOADER-B" of the company MDO / MAVETUR, such analysis serves as support to validate the repair phases of said equipment and also generate a strategy applicable to other structures that exhibit similar ductile behavior. From the methodological point of view, the diagnosis of the structural conditions of the collapsed structure was carried out, continuing with the analytical calculation of the plastic hinge of the equipment using the AISC 360-10 approach and the literature on the interaction of plastic stresses, with these data the simulations of the distribution of stresses and deformations resulting from the collapsed structure of example were fed and validated with two elastoplasticity models using the extended finite element simulation program.

Keywords: Structural analysis, Elastoplastic, Finite elements, Simulation.



I.INTRODUCCIÓN

En este trabajo de investigación se analizó y estimó la cantidad de daño estructural en la estructura del brazo externo del Shiploader-B de la empresa MDO MAVETUR, empleando como herramienta la simulación estructural mediante el método de elementos finitos extendidos y tomando en cuenta el comportamiento plástico del material. El comportamiento plástico se tomó en cuenta con la metodología dada por [15], [16] al definir matemáticamente los modelos elastoplásticos usando las relaciones de esfuerzo vs deformación del material en función del modelo seleccionado. Se hizo uso de parte de la metodología dada en [8]-[12] para simular la estructura ya colapsada hasta obtener un resultado en las deformaciones globales similar al registrado en el campo para analizar sus partes con deformaciones plásticas y poder sustentar la validez de los resultados. El criterio de selección del programa de simulación numérica se basó en los resultados obtenidos por [14] por su capacidad de manejar grandes ensambles de piezas y poder modificar los modelos de material. La estrategia a seguir fue iniciar con el diagnóstico estructural del brazo externo del Shiploader-B de la empresa MDO MAVETUR, siendo una estructura colapsada por criterio de fluencia debido al desarrollo de una rótula plástica que modificó el comportamiento estructural del equipo, esto debido a una modificación auxiliar en su sistema de apoyos y cargas solicitantes por parte de la empresa, posteriormente se procedió a calcular analíticamente la carga que generó la articulación plástica, se realizó la simulación de esfuerzos y deformaciones a través del método de elementos finitos extendido (MEFE) tomando en cuenta el comportamiento elastoplástico del material mientras se varió paramétricamente la carga iniciando con la rótula plástica desarrollada hasta el colapso, por último se evaluaron los resultados para cuantificar la falla al delimitar los elementos estructurales en régimen plástico. Tal análisis sirve como sustento en la evaluación de la integridad en estructuras metálicas y desde el punto de vista académico, se puede aplicar esta metodología al análisis de otras estructuras que exhiban un comportamiento dúctil similar. Del punto de vista ambiental, se prioriza la reducción de recursos de construcción al optimizar el proceso de análisis de una estructura colapsada al delimitar de forma precisa el alcance del daño estructural para su posterior reparación.

II.OBJETIVO GENERAL

Estimar el nivel de daño a través del método de elementos finitos extendidos y elastoplásticidad para la estructura metálica del Shiploader-B de la empresa MDO/ MAVETUR

III.METODOLOGÍA

El diseño de investigación fue del tipo mixta por la combinación del tipo de campo y documental. El tipo de investigación fue del tipo descriptiva y predictiva. La unidad de análisis fue la estructura del brazo externo del Shiploader-B de la empresa MDO/MAVETUR, los análisis se realizaron en este cuerpo utilizando varios enfoques en cuanto a la disposición de sus apoyos, magnitud de la carga que desarrollo el colapso, uso de dos modelos de material para experimentar varios puntos de vistas y obtener conclusiones en cuanto a la metodología de cálculo (cuantificable) para la determinación de la propagación de daño estructural.

IV.RESULTADOS

A.Diagnóstico de condiciones estructurales de la estructura metálica de ejemplo colapsada

En la Fig. 1 se muestra la deformación global evidenciada en campo del Shiploader-B, registrándose un desplazamiento relativo del extremo izquierdo de 828 mm aproximadamente. El equipo fue objeto de una operación no acorde a su naturaleza en el año 2018, y no quedó registro alguno de las condiciones que propiciaron esta deformación (magnitud de la carga, torques aplicados, velocidades de operación, entre otras). Se desea estimar los daños estructurales “ocultos”, y con ello la integridad del equipo, para posteriormente evaluar la viabilidad de su eventual reconstrucción.

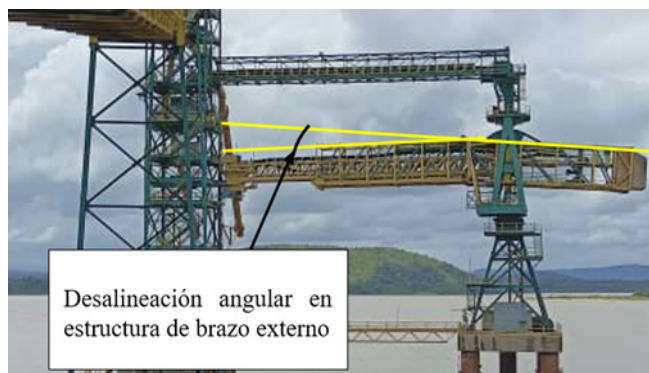


Figura 1: Fotografía de forma deformada de Shiploader-B.

En la Fig. 2 se muestran los elementos con deformaciones evidenciados en campo.

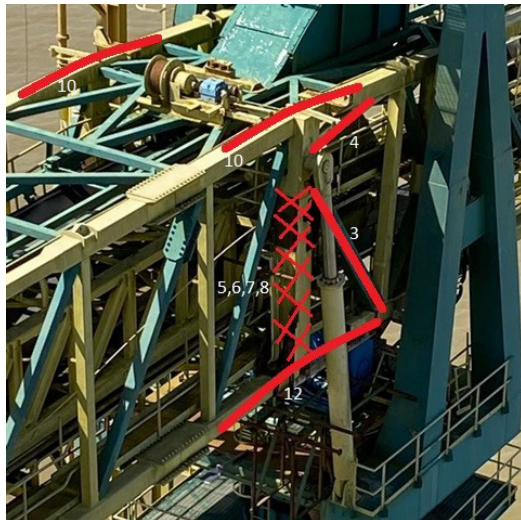


Figura 2: Elementos plastificados registrados

B.Cálculo analítico de la magnitud de carga para iniciar la falla estructural del equipo

En la Fig. 3 se muestra el modelo 3D para representar las condiciones de trabajo del equipo en el momento en el que se produjo la falla, considerando la adición de columnas auxiliares para conectar el brazo externo con la tornamesa para desactivar el uso de los cilindros hidráulicos, tal como se decidió y realizó el día de la falla



Figura 3: Sistema estructural al momento de la falla

En la Fig. 4 se muestra la zona de falla para el cálculo de solicitaciones en el brazo externo. En la tabla 1 se muestran los resultados obtenidos de los cálculos analíticos de la carga que comenzó el desarrollo de una rótula plástica en la zona de falla usando los criterios dados por las referencias [1] y [10], respectivamente.

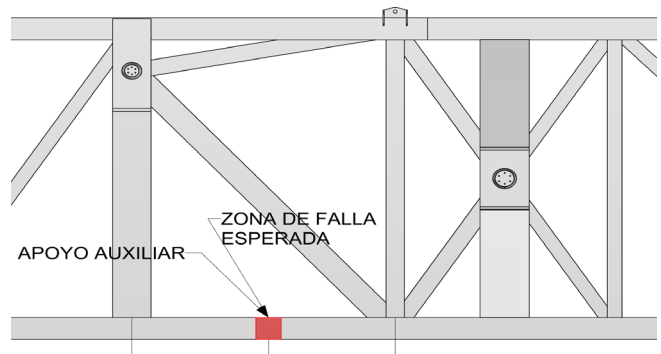


Figura 4: Zona de falla para cálculo de esfuerzos.

Tabla I
Resultado de carga crítica de agotamiento

Carga de agotamiento		
Criterio de falla	Cantidad	Unid
AISC 360-10	7,8	ton
Fratelli	10,0	ton

C.Simulación de distribución de esfuerzos y deformaciones resultantes de la estructura colapsada con varios modelos de elastoplasticidad y magnitud de carga

En las Fig. 5 y 6 se muestran los modelos elastoplásticos utilizados, siendo el modelo A de elasticidad lineal con plasticidad perfecta y el modelo B de elasticidad lineal con un tramo de plasticidad perfecta seguido de un endurecimiento lineal.

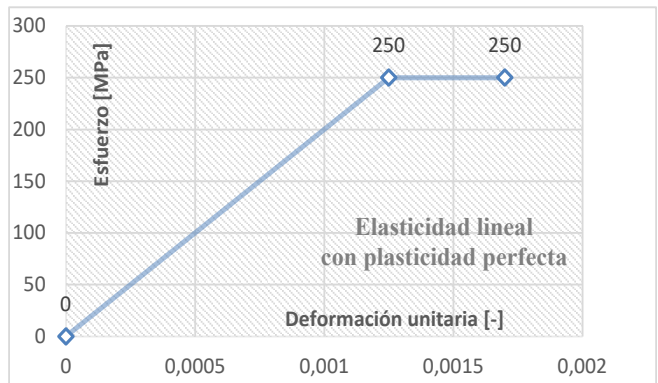


Figura 5: Modelo elastoplástico A: elasticidad lineal con plasticidad perfecta.

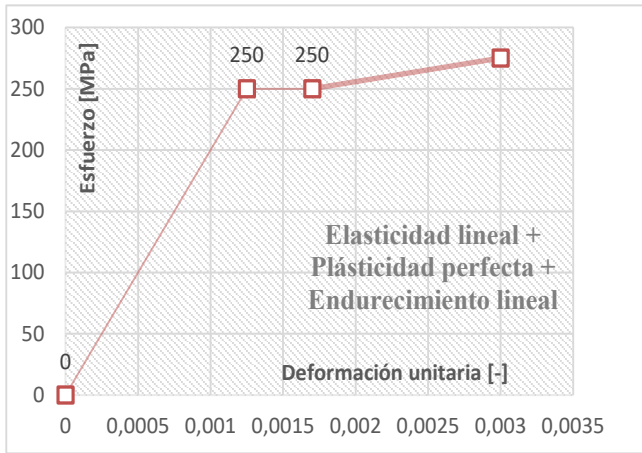


Figura 6: Modelo elastoplástico B: Elasticidad lineal con plasticidad perfecta y endurecimiento lineal

En la Fig. 7 se muestra el modelo 3D usado en las simulaciones.

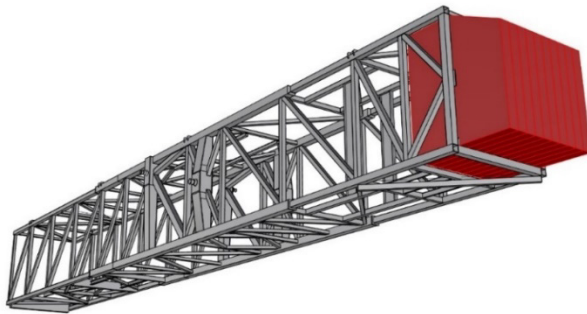


Figura 7: Modelo 3D usado en simulaciones.

En las Fig. 8 y 9 se muestran los resultados del campo de esfuerzos de Von Mises (acotado desde el esfuerzo de fluencia para observar el material plastificado) en la región de desarrollo de rótula plástica para el nivel de carga de 7,8 y 10,0 ton, respectivamente, usando el modelo elastoplástico A. Se observa que con la carga obtenida analíticamente con el criterio de falla de AISC 360-10 se obtiene una sección plastificada casi en su totalidad (Fig. 8), mientras que con la carga obtenida por el criterio de Fratelli se desarrolla una plastificación totalmente avanzada en la región de falla.

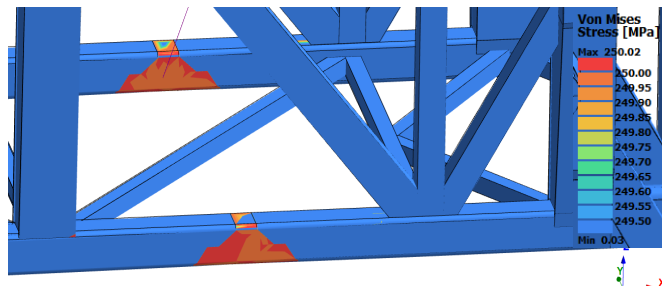


Figura 8: Campo de esfuerzos en región de desarrollo de rótula plástica con modelo elastoplástico A y P=7,8 ton.

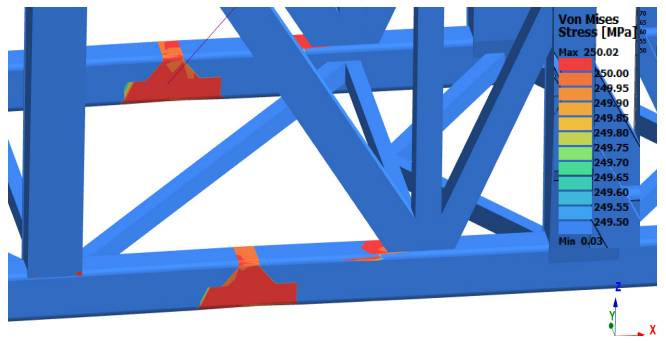


Figura 9: Campo de esfuerzos en región de desarrollo de rótula plástica con modelo elastoplástico A y P=10,0 ton.

En las Fig. 10 y 11 se muestran los resultados del campo de esfuerzos de Von Mises (acotado desde el esfuerzo de fluencia para observar el material plastificado) en la región de desarrollo de rótula plástica para el nivel de carga de 7,8 y 10,0 ton, respectivamente, usando el modelo elastoplástico B. Se observa que con la carga obtenida analíticamente con el criterio de falla de AISC 360-10 se obtiene una sección plastificada casi en su totalidad (Fig. 8), mientras que con la carga obtenida por el criterio de Fratelli se desarrolla una plastificación totalmente avanzada en la región de falla.

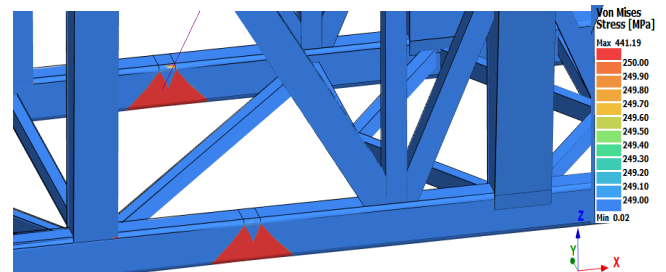


Figura 10: Campo de esfuerzos en región de desarrollo de rótula plástica con modelo elastoplástico B y P=7,8 ton.

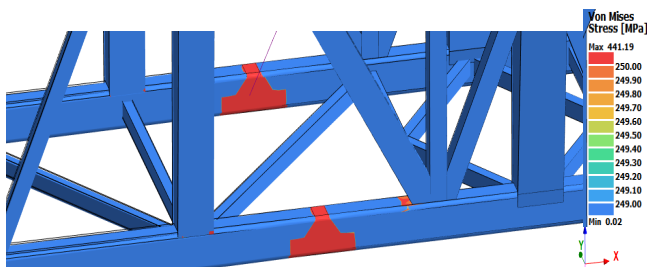


Figura 11: Campo de esfuerzos en región de desarrollo de rótula plástica con modelo elastoplástico B y $P=10,0$ ton.

Con el desarrollo de la rótula plástica ya demostrado con ambos modelos elastoplásticos, se aumentó paramétricamente el nivel de carga “P” hasta obtener una inestabilidad en los resultados de la simulación, siendo aproximadamente $P=18$ ton, esto representa la transformación de la estructura estáticamente determinada externamente a un mecanismo que tiende a acelerarse producto de las cargas externas, lo cual no tiene sentido matemático en los análisis estáticos.

En las Fig. 12 y 13 se muestra el resultado del campo de desplazamientos para el nivel de carga $P=18$ ton obtenidos de la simulación en los modelos elastoplásticos A y B, respectivamente, con los cuales se buscó reproducir la deformación de 828 mm medida en campo para la estructura colapsada.

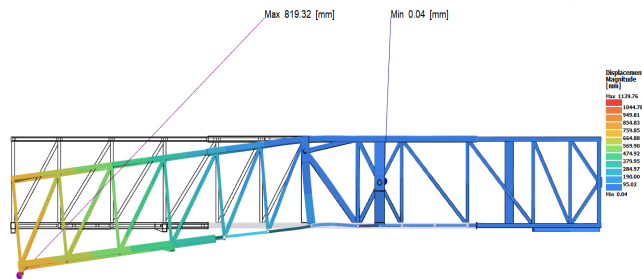


Figura 12: Desplazamientos en modelo elastoplástico A, $P=18$ ton.

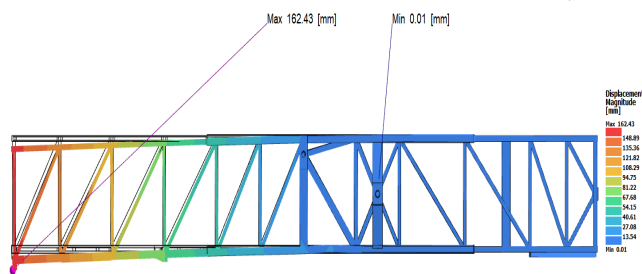


Figura 13: Desplazamientos en modelo elastoplástico B, $P=18$ ton.

D. Evaluación de los resultados para cada modelo de elastoplasticidad planteado en los tramos de la estructura colapsada

Los resultados obtenidos de la aplicación de los modelos de elastoplasticidad A y B se observó que el modelo A en este caso es el más representativo de la realidad observada y medida en campo debido a que asimiló la distribución de elementos plastificados en sintonía a las deformaciones globales (deformación global teórica de 819 mm contra los 828 mm medidos en campo, siendo una desviación de 1,1%). En la Fig. 14 se muestra en detalle la geometría deformada en la zona de rótula plástica obtenida del modelo A para $P=17,5$ ton.

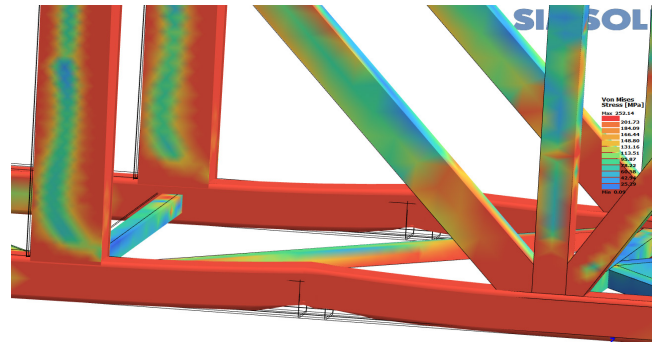


Figura 14: Geometría deformada en zona de rótula plástica obtenida con modelo A, $P=17,5$ ton.

En la Fig. 15 se muestra la comparación en las deformaciones resultantes de la simulación del modelo A con la evidenciada en campo.



Figura 15: Comparación de forma deformada obtenida de simulación con modelo A y evidenciada en campo.

Habiendo validado los cálculos se enumeran los elementos estructurales que presenten comportamiento plástico (campo de esfuerzos más allá del esfuerzo de fluencia). En la tabla 2 se muestra la lista de elementos plastificados como resultado del análisis estructural con el modelo elastoplástico A.

Tabla II. Lista de elementos a reponer como resultado del análisis estructural

CANT	DESCRIPCIÓN	UNIT [kg]	TOTAL [kg]
2	TUBO TS10"x10"x0,375", L=2.224mm	162,20	324,39
2	TUBO TS10"x10"x0,375", L=4.524mm	329,94	659,87
2	TUBO TS14"x10"x0,50", L=5.120mm	609,84	1219,69
2	TUBO TS10"x10"x0,375", L=3.196mm	233,08	466,17
2	PL 3.359X533X19mm	272,13	544,27
4	PL 3.356X482X13mm	168,23	672,92
4	PL 1.499X483X25mm	144,80	579,21
2	PL 3.356X533X19mm	271,89	543,78
2	TUBO TS6"x6"x0,25", L=1.828mm	50,42	100,83
2	TUBO TS14"x14"x0,625", L=6.210mm	1017,94	2035,89
1	TUBO TS6"x6"x0,25", L=5.368mm	148,05	148,05
2	TUBO TS14"x14"x0,625", L=7.387mm	1210,88	2421,75
TOTAL [kg]		9.716,82	

El peso total de los elementos sujetos a estados de plasticidad completa y parcial es de 9,72 ton aproximadamente, sabiendo que el peso total de la estructura del brazo externo es de 61,8 ton, entonces el porcentaje de peso de material dañado se cuantifica como:

$$R = \frac{9,72 \text{ ton}}{61,8 \text{ ton}} * 100\% = 15,7\% \quad (1)$$

Esta cantidad representa el porcentaje de material afectado debido al colapso de la estructura que imposibilita su funcionamiento.

IV. CONCLUSIONES

-El diagnóstico de las condiciones estructurales del brazo externo del Shiploader-B permitió evidenciar deformaciones plásticas en la región donde se ubicó la columna de apoyo auxiliar en 2018, con un desplazamiento vertical relativo del extremo más alejado de 828 mm hacia abajo y por tanto una desviación angular relativa de 2,1°, aproximadamente.

-El cálculo analítico de la carga de inicio de falla, permite estimar que la magnitud de la carga que inició la falla estructural, debido a la generación de una rótula plástica, resultó entre 7,8 y 10 ton, aproximadamente.

-La simulación de la distribución de esfuerzos y deformaciones resultantes de la estructura colapsada con el modelo elastoplástico de elasticidad lineal y plasticidad perfecta (modelo A), empleando el software Simsolid 2023, replica eficazmente el comportamiento elastoplástico al agregar condiciones de frontera del tipo Dirichlet y soportes elásticos que generan reacciones en una dirección conocida para estabilizar el modelo. Por otro lado, el programa presentó problemas con el modelo elastoplástico de elasticidad línea, plasticidad perfecta seguido de endurecimiento lineal (modelo B) al no acotar el nivel del esfuerzo máximo capaz de desarrollar la sección solicitada y por tanto acortando el fenómeno de redistribución de esfuerzos.

-La evaluación de resultados para cada modelo de elastoplasticidad indica que el modelo elastoplástico A permite estimar de forma confiable la cantidad de acero dañado debido al evento de colapso, pudiéndose esperar resultados favorables para su aplicación en el análisis en otras estructurales reticulares deformadas tras una falla por fluencia.

-Con base a los resultados obtenidos se estima que el 15,7% de la estructura de acero del brazo externo del Shiploader B presenta deformaciones plásticas que conllevan a su reparación. Entre los resultados de las simulaciones se observó que hay presencia de elementos

con plastificación que no fueron evidenciados durante la inspección debido a sus deformaciones relativamente pequeñas, por tanto, se concluye que los resultados de las simulaciones correlacionan con los datos obtenidos de la inspección en campo. Esta información permite predecir la integridad física de la estructura metálica y estimar los costos para su eventual restauración.

REFERENCIAS

- [1] Aguirre, C. 2010. Especificación ANSI/AISC 360-10 para Construcciones de Acero. Santiago de Chile: Asociación Latinoamericana del Acero.
- [2] Altair SimSolid, 2023. Recuperado de Julio de 2024 de https://2023.help.altair.com/2023/ss/en_us/index.htm
- [3] ANCA Astillas Nacionales C.A. (junio de 2024), obtenido de <https://astillasnacionales.com/productos/>
- [4] Arias, F. 2012. El proyecto de investigación. Caracas: EPISTEMA C.A.
- [5] Beer, F., Johnston, R., DeWolf, J., & Mazurek, D. 2017. Mecánica de materiales. México: McGraw-Hill.
- [6] Budynas, R., & Nisbett, J. 2012. Diseño en ingeniería mecánica de Shigley, 9ª edición. México, D.F.: McGraw-Hill
- [7] Chicaiza, A. 2020. FSplines: una aplicación informática para análisis lineal de estabilidad de perfiles abiertos de pared fina. Escuela Superior de Tecnología e Gestao.
- [8] Dávila, R., Fazio, A., & otros. 2018. Estudio experimental de la reparación de estructuras de autobuses tras accidente. Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica, 53-62.
- [9] Fenster, S. K., & Ugural, A. C. 2011. Advanced Mechanics of Materials and Applied Elasticity. Pearson College DIV.
- [10] Fratelli de Campora, G. 1967. Cálculo plástico: Análisis y diseño límite de sistemas estructurales planos. Buenos Aires.
- [11] Hernández, R., Fernández, C., & otros. 2010. Metodología de la investigación. México: McGraw-Hill.
- [12] Martínez, F. 2018. Análisis mediante elementos finitos del comportamiento de perfiles combinados de estructuras de autobuses. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Madrid.
- [13] Medina, R., Salas, M., & otros. 2005. Análisis de estructuras navales mediante el método de elementos finitos. Síntesis Tecnológica. V.2 N°1, 27-36.
- [14] Quinchuela, J. 2020. Diseño mediante simulación estructural en el estado estable de un elevador tipo basculante para vehículos livianos de hasta 1,4 toneladas. Universidad Internacional SEK.
- [15] Sanz Gomez, M. 2019. Métodos computacionales de elastoplasticidad anisótropa en grandes deformaciones. Universidad Politécnica de Madrid.
- [16] Torrez, de Lange, & otros. 2013. Análisis elastoplástico de una viga en cantiléver con cargas combinadas de compresión axial y flexión. Memorias del XIX congreso internacional anual de la SOMIN.

FACTIBILIDAD DEL USO DEL ÁCIDO BÓRICO COMO INHIBIDOR DE LA REACTIVIDAD AL AIRE DE LOS ÁNODOS DE CARBÓN EN CELDAS DE REDUCCIÓN ELECTROLÍTICA EN C.V.G. VENALUM

Alzolar Meilyn, Velásquez Mairim y Andarcia Henry.

meilynjd@gmail.com, mvelasquez@unexpo.edu.ve, henry.andarcia@venalum.com.ve
UNEXPO VR Puerto Ordaz, UNEXPO VR Puerto Ordaz, CVG Venalum Puerto Ordaz.

Resumen: La calidad final de ánodos de carbón para producción de aluminio está determinada principalmente por la calidad de las materias primas, siendo así, muy importante mantener la calidad de estas; si existiera un aumento de impurezas en los carbones, se deben buscar alternativas para contrarrestar los efectos negativos que pudieran causar. De esto, surgen distintas investigaciones, de las cuales resalta el uso del ácido bórico como inhibidor de las reacciones de oxidación que ocurren en los ánodos. Según estudios consultados, la protección con compuestos de boro en componentes carbonosos es efectiva, se considera que se reducen los sitios activos de carbono, quedando aproximadamente la mitad de los sitios activos de carbono disponibles para reaccionar con oxígeno, mientras que el resto, es ocupado por boro. Con el fin de evaluar este efecto del uso del ácido bórico, se planteó utilizarlo en dos métodos; en solución para impregnar los ánodos de carbón y dentro de la receta de fabricación de probetas anódicas. En ambos métodos se evaluó el comportamiento de los componentes carbonosos ante esta alteración para establecer si el uso del ácido bórico permite una mejoría en cuanto al control de la reactividad al aire y al CO_2 .

Palabras clave: Ácido bórico, Ánodos, Inhibición, Probetas anódicas, Reacciones de oxidación.

FACTIBILITY OF USING BORIC ACID AS AN INHIBITOR OF AIR REACTIVITY OF CARBON ANODES IN ELECTROLYTIC REDUCTION CELLS AT C.V.G. VENALUM

Abstract: The final quality of carbon anodes for aluminum production is mainly determined by the quality of the raw materials. Thus, it is very important to maintain their quality. If there is an increase in impurities in the carbons, alternatives should be sought to counteract the negative effects that they could cause. From this, different investigations emerge, of which the use of boric acid as an inhibitor of the oxidation reactions that occur in the anodes stands out. According to consulted studies, protection with boron compounds in carbon components is effective. It is considered that the carbon active sites are reduced, leaving approximately half of the carbon active sites available to react with oxygen, while the rest is occupied by boron. In order to evaluate this effect of the use of boric acid, it was proposed to use it in two methods; in solution to impregnate the carbon anodes and within the manufacturing recipe for anodic test pieces. In both methods, the behavior of the carbon components in the face of this alteration was evaluated to establish whether the use of boric acid allows an improvement in the control of reactivity to air and CO_2 .

Keywords: Anodes, Anodic test pieces, Boric acid, Inhibition, Oxidations reactions.



I. INTRODUCCIÓN

En la producción de aluminio se utilizan los ánodos de carbón, los cuales requieren coque, cabo, desecho verde y brea de alquitrán como materia prima para su fabricación, estos materiales pueden contener impurezas que interfieren en la calidad del producto final, siendo perjudiciales para el ánodo y por ende para el aluminio líquido. Por esto, se buscan alternativas, a fin de contrarrestar los efectos de estas impurezas, y que se logre un mejor comportamiento de los ánodos en celda, acrecentando su vida útil. Es así como tras algunas investigaciones se determina que el uso del ácido bórico es una opción que podría ser viable para inhibir las reacciones con el oxígeno en los ánodos, durante el proceso electrolítico.

La reactividad al aire del ánodo se refiere al nivel de oxidación por efecto del aire que este componente puede alcanzar durante su vida útil en las celdas de reducción. La reactividad al CO₂ es la reacción química de oxidación del material carbonoso por CO₂, lo cual ocurre en los poros del ánodo. Son indicadores de estas reacciones el residuo (cabos), la pérdida (carboncillo) y el polvo. El consumo anódico se incrementa debido a un aumento de estas reacciones de oxidación generando mayor cantidad de carboncillo (polvo de carbón), creándose un círculo vicioso el cual se suele incrementar con problemas operacionales.

Con la expectativa de evaluar el uso del ácido bórico para mejorar el comportamiento de los ánodos en las celdas de reducción entonces se planteó utilizarlo en dos métodos, tomando en cuenta que según la disponibilidad y calidad de materia prima, se hacen ajustes continuos de la receta anódica o métodos de procesamiento de ánodos, intentando que se mantenga o mejore la calidad final de los ánodos. El primer método consistió en crear una solución con ácido bórico para impregnar los ánodos de carbón que serían enviados a celdas seleccionadas para su estudio. Y, el segundo método fue añadir ácido bórico dentro de la receta de fabricación de probetas anódicas para analizar a través de ensayos fisicoquímicos.

Para este estudio se plantearon como objetivos evaluar las condiciones operativas en las celdas de estudio, en función del consumo de los ánodos impregnados con ácido bórico, considerando el nivel de carboncillo producido y la inspección de los cabos salientes, analizar el efecto de la adición de ácido bórico a la receta de

fabricación de probetas anódicas, a través de ensayos fisicoquímicos haciendo énfasis en los ensayos de reactividades al aire y al CO₂ y explicar el efecto del uso del ácido bórico en los dos métodos implementados. Para cumplir con estos objetivos, se realizaron distintas actividades para cada método, incluyendo preparación de materiales, seguimiento de operaciones, inspección, caracterización y ensayos de laboratorio.

II. DESARROLLO

Para evaluar la factibilidad del uso del ácido bórico como inhibidor de las reacciones de oxidación de los ánodos de carbón en las celdas de reducción electrolítica y a nivel de laboratorio, en CVG Venalum, se establecieron dos métodos y se llevaron a cabo con el apoyo de las áreas de Envarillado, Línea 1 y Laboratorio central, supervisado y guiado por el departamento de Control Calidad Carbón. Desarrollándose la experiencia según se describe a continuación.

A. Método 1: Impregnación en solución de ácido bórico

Dando inicio a este método se preparó una solución de agua con ácido bórico, con el 10% de la cantidad en peso del agua de ácido bórico. Esta solución se calentó hasta llegar a los 80±5°C, con el objetivo de disolver el polvo, una vez lista la solución, el proceso de impregnación se llevó a cabo sumergiendo los ánodos, formando cuatro grupos de ánodos impregnados, el primero sumergido durante 10 segundos, el segundo durante 20 segundos y los tercer y cuarto grupo durante 60 segundos. Una vez listo este proceso los ánodos se dejaron secar y fueron llevados a las celdas de estudio (144 y 145 de la línea 1) para su uso normal, a lo cual se le hizo seguimiento, con especial atención en la producción de carboncillo y a la posterior inspección de cabos una vez cumplida la vida útil de los ánodos. A continuación, esto se analiza y se establecen los resultados.

Los ánodos impregnados con la solución de ácido bórico, cumplieron con su proceso normal en planta, siendo consumidos en celda, proceso durante el cual se observó un comportamiento regular con tendencia a desmejorar en comparación a las demás celdas en operación (con ánodos sin ácido bórico), ver la Fig. 1, según las condiciones en la planta, resaltando además que el nivel de carboncillo producido se mantuvo en una cantidad que se considera que no afecta las operaciones.

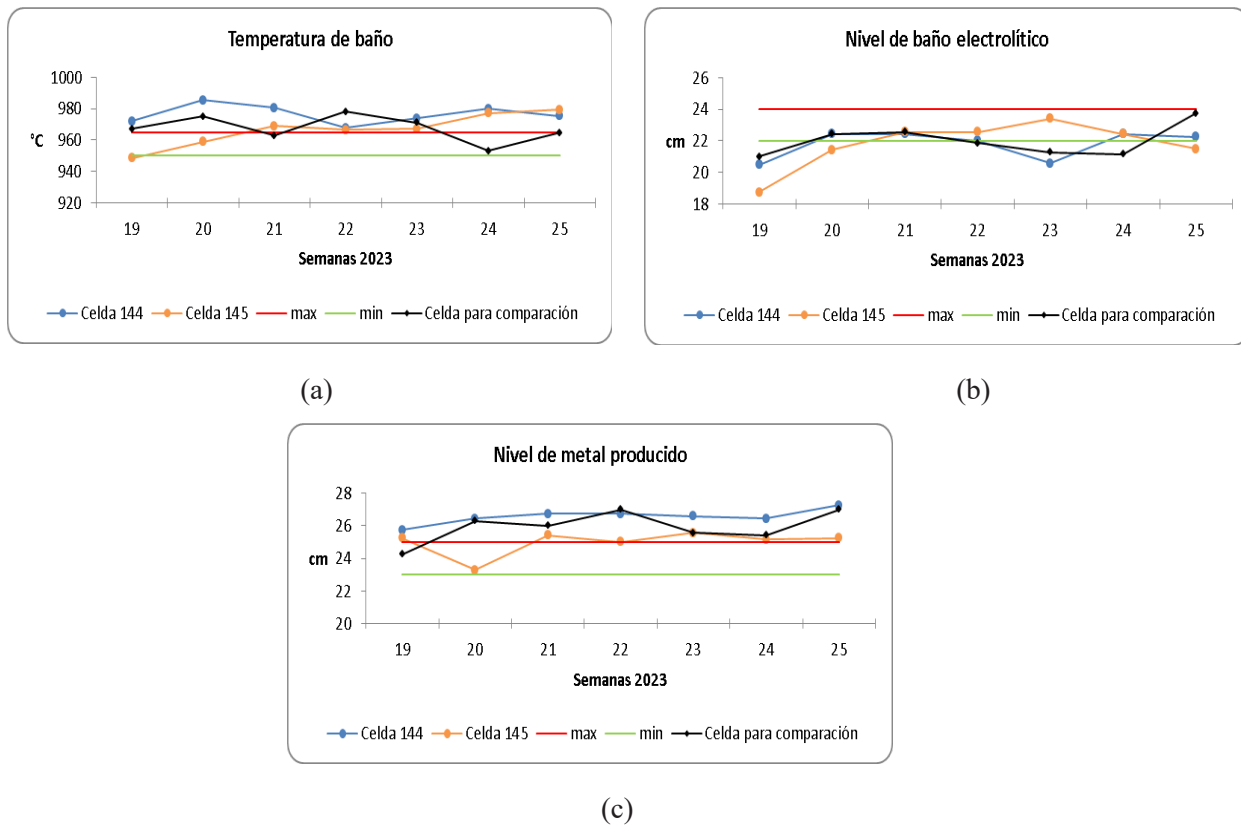


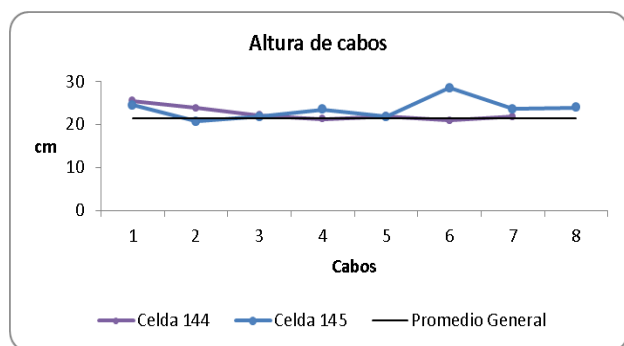
Figura 1: Condiciones operativas en las celdas 144 y 145. (a) Temperatura, (b) Nivel de baño electrolítico y (c) Nivel de metal.

La celda 144 tuvo como promedios una temperatura de 977°C , 22 cm de nivel de baño y 27 cm de nivel de metal y en la celda 145 se promedió una temperatura de 966°C , un nivel de baño de 22 cm y un nivel de metal de 25 cm, todo esto comparado a una celda en condiciones normales arrojó un comportamiento regular para la situación de la planta. El nivel de carboncillo registrado en las dos celdas de estudio fue de 58,75 kg.

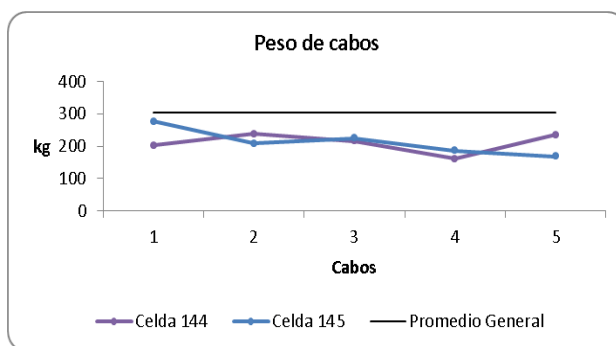
Una vez terminada la vida útil en celda de los ánodos impregnados se inspeccionaron sus cabos resultando que: La altura de los cabos no tuvo un gran cambio significativo en comparación con los cabos provenientes de ánodos sin impregnación de ácido bórico. El peso de cabos en comparación a los cabos provenientes de

ánodos sin impregnación de ácido bórico, se vio disminuido, lo cual se atribuyó a la forma de cabo que resultó estar lejos de lo esperado, que a su vez se atribuyó a distintas fallas como grietas, agujeros y demás aspectos que resultaba en un cabo con forma irregular, a pesar de mantener buena altura, ver la Fig. 2 y la Tabla I.

El promedio de altura de cabo, se ubicó en 22,97 cm y un peso promedio de 211,7 kg, mientras que la forma de cabo fue de un 35% forma 3+4. La altura se mantuvo similar al promedio de la línea en general durante la prueba, mientras que el peso sí estuvo por debajo del valor general de la línea y la forma de cabo se calificó como inadecuada por ser forma 3+4 menor a 60%.



(a)



(b)

Figura 2: Resultados de inspección de cabos. (a) Altura y (b) Peso.

TABLA I
FORMA DE CABOS

FALLA	Cantidad
1	13
2	0
3	4
4	3

Ánodo, todo esto revela que el ácido bórico no cumplió a cabalidad su función protectora, lo que pudo deberse a que la capa de la solución no fue lo suficientemente gruesa en la superficie del ánodo o que la inestabilidad previa de las celdas no se controló efectivamente y se mantuvo durante la prueba.

B.Método 2: Adición de ácido bórico en la receta de fabricación

Para realizar este método se estableció el uso de 1%

y 3% de ácido bórico para añadir a la receta de fabricación de ánodos, además de realizar probetas sin ácido bórico para ser utilizadas como patrón. Una vez establecidas las recetas se preparó el material, clasificando y caracterizando la materia prima, para posteriormente pesar y preparar cada grupo de probetas según el porcentaje de ácido bórico. Estas probetas se embalaron y fueron llevadas a cocción, posteriormente se hicieron los ensayos necesarios y se realizó el análisis a los resultados de estos. Todo se explica detalladamente a continuación en conjunto a sus resultados.

Las recetas a utilizar para la fabricación de las probetas se muestran en la Tabla II.

Estas recetas se utilizaron para fabricar los tres grupos de probetas necesarias para el estudio, que luego de su cocción fueron analizadas físicamente, resultando para las reacciones de oxidación lo observado en la tabla III.

TABLA II
RECETAS Y GRANULOMETRÍA PARA EL ESTUDIO

CORRIDAS	Porcentaje Ácido Bórico (%)	Unidad de medida	Coque de petróleo					3000 Blaine	Total Agregado seco	Brea de alquitrán	Ácido bórico	Total Mezcla
			Fracción									
			Grueso		Medio		Fino					
		mm	8 - 4	4 - 2	2 - 1	1 - 0,5	0,5 - 0,25					
		%	27	8	16	10	5	34				
1	0	Kg	1,16	0,34	0,69	0,43	0,22	1,46	4,3	0,7	0	5
2	1		1,15	0,34	0,68	0,43	0,21	1,45	4,25	0,7	0,05	5
3	3		1,12	0,33	0,66	0,42	0,21	1,41	4,15	0,7	0,15	5

TABLA III
RESULTADOS DE ANÁLISIS FÍSICOS DE LAS PROBETAS

Propiedad	Indicador	Unidad de medida	Porcentaje de Ácido bórico (%)					
			0		1		3	
			Promedio	Desviación estándar	Promedio	Desviación estándar	Promedio	Desviación estándar
REACTIVIDAD AL CO ₂	Residuo	%	93,60	1,23	92,92	2,25	97,35	0,59
	Polvo		1,40	0,74	2,58	1,67	0,51	0,28
	Pérdida		5,00	0,91	4,50	0,62	2,14	0,60
REACTIVIDAD AL AIRE	Residuo		64,25	4,41	91,71	2,37	98,23	0,65
	Polvo		8,20	1,74	1,69	1,52	0,58	0,20
	Pérdida		27,54	2,67	6,60	1,08	1,19	0,63

Además, se hizo un análisis visual de las probetas luego de los ensayos, ver la Fig. 3.

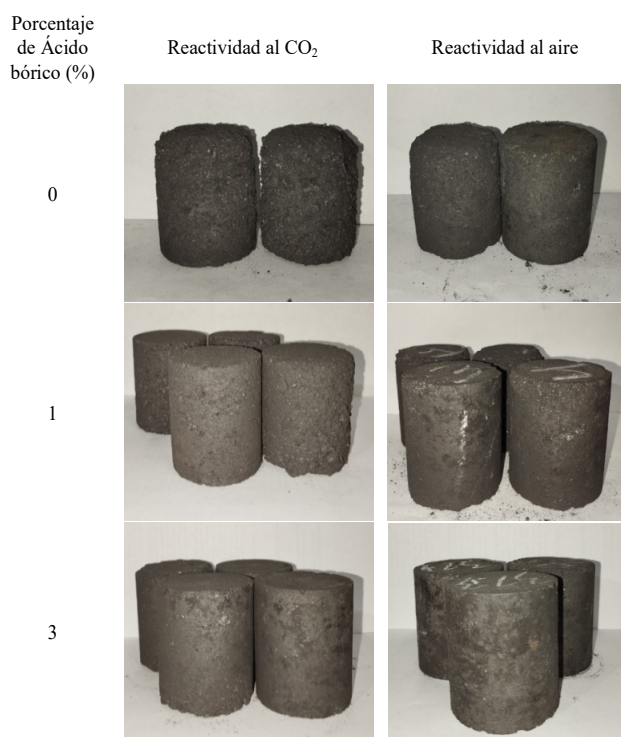


Figura 3: Probetas luego de los ensayos de reactividad al CO₂ y al aire.

Para determinar la factibilidad o no del segundo método es necesario mencionar que las reacciones de oxidación que ocurren en el ánodo de carbón durante la electrolisis de la alúmina, se producen por factores que no pueden ser eliminados, por su inherencia al proceso,

sin embargo, con la realización de este tipo de modificaciones o adecuaciones se busca contrarrestar este efecto. Se observa en el caso de las probetas sin ácido bórico gran cantidad de ataque químico en la superficie por efecto del oxígeno que se presenta como consumo de esta, dejando una superficie evidentemente irregular, que se debe a que la reacción electroquímica del ánodo consume los diferentes elementos estructurales a diferentes velocidades, lo que lleva al desprendimiento de los granos de coque de la superficie del ánodo. Mientras que, en las probetas con adición de ácido bórico, se mantiene una superficie con menor desprendimiento, conservándose así con una superficie más regular luego de las reacciones con el oxígeno.

Entonces, contrastando el análisis físico con el análisis visual se observó que se logró disminuir el daño generado por las reacciones con oxígeno de este componente carbonoso, con la adición del ácido bórico, en ambos porcentajes. Se aprecia una mejor superficie en las probetas, luego de los ensayos, con menor ataque por el CO₂ y el aire, que en el caso de 0 % de boro. De esto, se puede indicar que el uso de ácido bórico dentro de la receta de fabricación de probetas anódicas resulta en un mejor comportamiento de las probetas ante los efectos del oxígeno.

III. CONCLUSIONES

1. En el estudio en celdas, las celdas 144 y 145 mantuvieron un comportamiento regular para la situación de la planta, comparando con celdas en condiciones normales, destacando que el nivel de carboncillo registrado en las dos celdas de estudio no representa una gran cantidad de carboncillo que pudiera afectar las operaciones de celdas. La inspección de cabos arrojó que la altura

se mantuvo similar al promedio de la línea en general durante la prueba, mientras que el peso sí estuvo por debajo del valor general de la línea y la forma de cabo se calificó como inadecuada.

2. En el estudio a nivel de laboratorio, las probetas se fabricaron con normalidad, el ácido bórico no significó obstáculo para la correcta compactación. Los resultados de los análisis físicos muestran un excelente comportamiento de las probetas ante esta variación en la receta, siendo el mejor porcentaje el de 3 % de ácido bórico.

3. El efecto del ácido bórico como inhibidor de las reacciones de oxidación se pudo comprobar en el segundo método, donde el uso de ácido bórico dentro de la receta de fabricación de probetas anódicas resultó en un mejor comportamiento de las probetas ante los efectos del oxígeno, sin embargo, en el primer método no se demostró factibilidad del uso del ácido bórico, lo que pudo deberse a que la capa de la solución no fue lo suficientemente gruesa en la superficie del ánodo o que la inestabilidad previa de las celdas no se controló efectivamente y se mantuvo durante la prueba.

REFERENCIAS

[1] Cedeño, D., Andarcia, H., Villarroel, M., Rodríguez,

C., Tali, C., Ortiz, W., e Inzunza, E. (2022). Evaluación del Coque de Petróleo Venezolano en la fabricación de probetas anódicas a escala banco. Puerto Ordaz, Venezuela.

[2] Eidet, T. (1997). Reactions On Carbon Anodes In Aluminium Electrolysis. The Norwegian University of Technology and Science Department of Electrochemistry.

[3] Ishak, R. (2018) Protection of carbon anode against air burning: A new approach to apply and understand the inhibiting effect of boron impregnation, Tesis de grado. Université LAVAL Québec, Canada.

[4] Jiménez, E. (2005). Influencia del proceso de rociado de aluminio en el nivel de oxidación de probetas anódicas en CVG Venalum. Trabajo de grado no publicado. Universidad Nacional Experimental Politécnica Antonio José de Sucre (UNEXPO), Puerto Ordaz.

[5] Sekhar, J.A.; Liu, J.J.; Duruz, J.-J. (1998). Carbon Bodies Resistant to Deterioration by Oxidizing Gases. U.S. Patent 5.753.382. MoltechInvent S.A.

[6] Tosta, R., Inzunza, E. y Bautista, K. (2007). Boro como inhibidor de la oxidación por aire de ánodos de carbón en celdas de reducción electrolíticas. Puerto Ordaz, Venezuela.

HETEROGENEIDAD GENERACIONAL Y ECONOMÍA CIRCULAR: UN ABORDAJE DESDE LA DINÁMICA DE LAS EMPRESAS VENEZOLANAS DE CONSULTORÍA GERENCIAL

Campos García Jesús Alonso

<https://orcid.org/0000-0002-6004-6129>

profjcampos.udo@gmail.com

Universidad de Oriente, Extensión Región Centro-Sur Anaco

Resumen: El presente estudio explora las percepciones sobre la Economía Circular (EC) en empresas venezolanas de consultoría gerencial, analizando la influencia de la heterogeneidad generacional en la adopción y entendimiento de este modelo. Mediante una investigación cuantitativa de corte no experimental, de naturaleza descriptiva y diseño de campo, se encuestó a 65 individuos de cuatro (4) firmas consultoras, examinando el significado, aspectos relevantes y expectativas en torno a la EC. Los resultados revelan diferencias significativas: las generaciones mayores ubican el concepto en torno a las actividades tradicionales de reducción, reciclaje y reutilización, mientras que los más jóvenes consideran que la circularidad prioriza la autoregeneración, la eliminación de desperdicios y la sostenibilidad. Por ende, estas divergencias generacionales subrayan la necesidad de estrategias de comunicación y educación segmentadas, que permitan el diseño de modelos de transición integrales y fomenten la colaboración intergeneracional para una efectiva implementación de la EC. Se concluye que la capitalización de las diferencias generacionales se configura como una ventaja estratégica para orientar procesos de transformación en la clientela de las organizaciones consultoras, en donde se potencie la transición hacia un modelo circular robusto y resiliente, frente a los desafíos ambientales y económicos actuales.

Palabras clave: Economía circular, empresas consultoras, heterogeneidad generacional, sostenibilidad.

FACTIBILITY OF USING BORIC ACID AS AN INHIBITOR OF AIR REACTIVITY OF CARBON ANODES IN ELECTROLYTIC REDUCTION CELLS AT C.V.G. VENALUM

Abstract: This study explores the perceptions of Circular Economy (CE) within Venezuelan management consulting firms, analyzing the influence of generational heterogeneity on the adoption and understanding of this model. Through a non-experimental, descriptive, and field-design quantitative investigation, 65 individuals from four consulting firms were surveyed, examining the meaning, relevant aspects, and expectations regarding CE. The results reveal significant differences: older generations associate the concept with traditional activities such as reduction, recycling, and reuse, while younger individuals consider circularity to prioritize self-regeneration, waste elimination, and sustainability. Consequently, these generational divergences underscore the need for segmented communication and education strategies that facilitate the design of comprehensive transition models and promote intergenerational collaboration for the effective implementation of CE. It is concluded that leveraging generational differences constitutes a strategic advantage to guide transformation processes among the clientele of consulting organizations, thereby fostering the transition towards a robust and resilient circular model in the face of current environmental and economic challenges.

Keywords: Circular economy, consulting firms, generational heterogeneity, sustainability.



I. INTRODUCCIÓN

La Economía Circular (EC) no constituye un concepto novedoso, pues en los últimos años ha adquirido una relevancia creciente ante la imperiosa necesidad de transitar hacia modelos de producción y consumo sostenibles [4]. Este paradigma integra una amplia variedad de ámbitos, que abarcan desde la producción y la cadena de suministro, hasta los procesos de consumo, involucrando además un amplio espectro de actores sociales, comunidades y gobiernos. La EC propugna la adopción de un sistema económico que desacople la presión ambiental del crecimiento, promoviendo la transición de un modelo lineal de producción a uno circular, en el que los residuos se transformen en recursos. Asimismo, su objetivo radica en prolongar la vida útil de los recursos, contribuyendo a alejar la praxis productiva y consumista intensiva en el uso de bienes no renovables [1]-[7].

Además, este enfoque facilita la innovación en procesos, tecnologías y estrategias de gestión que pueden favorecer el desarrollo de comunidades más resilientes [11] y una gobernanza ambiental eficiente, aspectos que, sin duda, seguirán ganando fuerza en el debate académico y práctico a medida que se profundice el conocimiento en esta materia.

Los gobiernos reconocen que la EC es una de las vías más promisorias para dirigir las transiciones necesarias que permitan alcanzar los propósitos plasmados por la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) [14] y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) asociados. Sin embargo, la transición de modelos de negocio y productos lineales a circulares no solo depende de políticas gubernamentales y de la innovación tecnológica [13], sino también de la predisposición de ciudadanos y empresas a adoptar prácticas sostenibles. En este sentido, las diferencias en valores, hábitos de consumo y actitudes hacia la sostenibilidad que se manifiestan entre las distintas generaciones constituyen un factor determinante en el manejo y la difusión de esta nueva economía.

Es bien sabido que la diversidad generacional constituye un eje estratégico para implementar transformaciones sistémicas en cualquier proceso [10], y en el caso de la EC, esto no es la excepción. Las divergencias en la adopción de prácticas sostenibles se manifiestan en la intersección de valores, hábitos y actitudes que varían significativamente entre cohortes. Las generaciones emergentes, imbuidas en un entorno digital y globalizado, se caracterizan por una inherente orientación hacia la eficiencia y el respeto ecológico [2], mientras que las percepciones tradicionales aún prevalecen en sectores de mayor estructura etaria [5]. Este contraste dinamiza

el proceso de transición hacia paradigmas regenerativos, desafiando a la sociedad a construir un discurso integrador que articule la innovación disruptiva con la solidez de prácticas que ya se encuentran bastante enraizadas.

En el caso de las organizaciones, fundamentalmente las que se encuentran en Venezuela, la capitalización efectiva de estas diferencias generacionales significa la posibilidad de convertirlas en una ventaja estratégica, fundamentada en la articulación de saberes, experiencias y perspectivas que, integradas de manera eficaz, pueden acelerar la transición hacia un modelo de EC en el ámbito empresarial nacional. De esta manera, las organizaciones de consultoría gerencial, al posicionarse como intermediarias clave entre la innovación global y las realidades locales [3], enfrentan el desafío de incorporar estas diferencias generacionales como una herramienta para la transformación estratégica de sus procesos y servicios en el marco de la EC.

Vista la situación anterior, es que surge el siguiente estudio, el cual tuvo como propósito conocer las percepciones individuales acerca de la EC por parte de individuos de distintas generaciones que forman parte de las empresas de consultoría agrupadas en la Cámara Venezolana de Empresas Consultoras (CAVECON), con miras a captar su nivel de entendimiento y expectativas acerca del modelo circular, lo cual redundará en el fomento de un ecosistema colaborativo en el que convergen la experiencia institucional, el avance tecnológico y la creatividad intergeneracional, que son elementos imprescindibles para la innovación disruptiva en la transformación y en el rediseño de procesos que se proponen a la clientela que forma parte de las organizaciones de esta naturaleza.

II. METODOLOGÍA

La investigación fue de naturaleza cuantitativa, de corte no experimental, de nivel descriptivo y diseño de campo. Se constituyó una población y muestra de 65 individuos pertenecientes a cuatro (4) de las ocho (8) empresas afiliadas a CAVECON, que fueron las que accedieron a realizar el cuestionario que se suministró a sus colaboradores a través de la plataforma Google Forms para explorar las percepciones acerca de la EC, en términos de su significado, aspectos más relevantes y expectativas.

Asimismo, se destaca que el muestreo aplicado fue de tipo intencional, en virtud de que se seleccionaron únicamente las personas que trabajan en las distintas áreas prestadoras de servicios profesionales de las firmas en cuestión, con miras a asegurar la pertinencia de las respuestas en relación con los objetivos del estudio,

evitando sesgos derivados de incluir a individuos cuya función no esté alineada con el núcleo de interés investigativo.

Vale resaltar que el cuestionario utilizado para recopilar los datos se encuentra dividido en dos (2) secciones. En la primera sección (A), hay preguntas sobre detalles personales, como género, nivel de educación y cohorte generacional a la cual pertenecen. La segunda sección (B) es la parte central del cuestionario, por cuanto es la que indaga sobre la percepción o conciencia sobre la EC, al igual que se explora sobre los aspectos más resaltantes y las expectativas más importantes que los encuestados tienen en relación al modelo circular.

III.RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El perfil demográfico de la muestra consultada puede visualizarse con mayor detalle en la figura 1, donde se observa que existe un relativo equilibrio en cuanto a la composición del género de los consultados, puesto que el 52 % indicaron ser del género masculino, mientras que el restante 48 % son del género femenino. En cuanto al nivel educativo, el 74 % de la muestra cuenta con educación universitaria completa, mientras que 22 % del total de colaboradores de las firmas consultadas manifiesta contar con estudios de cuarto nivel (postgrado) y solo el 5 % refiere que cuenta con título de educación media general (bachillerato).

Debido a la naturaleza de la presente investigación, uno de los elementos clave que se ameritaba conocer sobre las características de la muestra es, precisamente, la generación o cohorte demográfica a la cual pertenecen. Para ello, se solicitó en el cuestionario que indicaran su generación de acuerdo con el año de nacimiento, resaltando que, los criterios de ubicación dentro de alguna cohorte generacional corresponden a los expresados por la referencia [8], hecho que permite observar que la muestra está constituida mayormente por individuos de la generación milenial (34 %), seguida por personas de la generación X (26 %). Entretanto, la generación centennial está representada por el 23 % de los sujetos consultados y el restante 17 % corresponde a individuos que pertenecen a la generación baby boomer.

Sin duda alguna, estos resultados denotan una diversidad intergeneracional significativa que enriquecen el análisis de las percepciones sobre la EC. La predominancia de los millennials como grupo mayoritario señala una inclinación hacia una generación que, según diversos estudios [6]-[12], tienden a priorizar la sostenibilidad y prácticas empresariales responsables. Por otro lado, la presencia considerable de la generación X y los centennials sugiere que existe un equilibrio generacional que podría influir en cómo las firmas consultoras

abordan la implementación de principios de EC.

Asimismo, la representación de la generación baby boomer ofrece una oportunidad para evaluar cómo sus experiencias y valores, probablemente más tradicionales, dialogan con los enfoques modernos de sostenibilidad. Este equilibrio intergeneracional no solo facilita una comprensión más holística de la transición hacia modelos de EC, sino que también podría revelar tensiones o sinergias inherentes entre las distintas cohortes, en términos de adopción y percepción de estas prácticas.

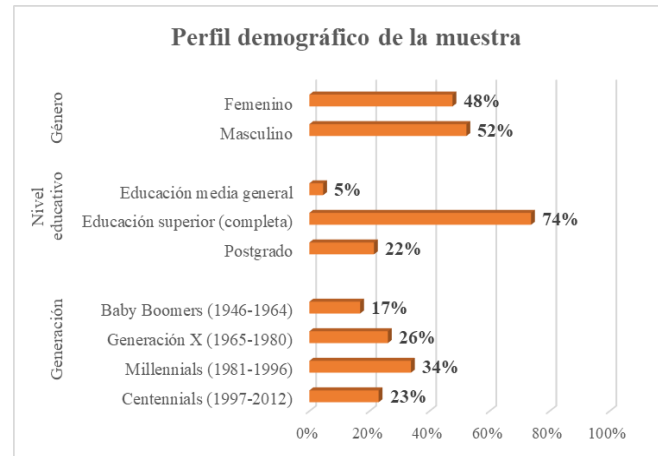


Figura 1: Perfil demográfico de la muestra

Por su parte, la sección “B” del cuestionario sirvió para explorar el conocimiento de los encuestados sobre la EC. Una de las primeras interrogantes estuvo encaminada a indagar sobre el significado de la EC para la muestra objeto de estudio. Los resultados de esta interrogante, cuyos resultados son visibles en la figura 2, expresan que los baby boomers tienden a asociar la EC principalmente con las prácticas tradicionales de reducción, reciclaje y reutilización (47 %), lo que sugiere una visión anclada en los modelos convencionales de gestión de residuos, como es confirmado por estudios como el de la referencia [9]. En contraste, las generaciones más jóvenes que se encuentran en las empresas consultoras, especialmente los millennials, demuestran una comprensión más holística y avanzada, identificando el modelo circular con la autoregeneración (55 %), la eliminación de desperdicios (43 %) y una producción y consumo más sostenibles (28 %). La generación X y los centennials muestran una distribución más dispersa entre las diferentes definiciones, aunque con una inclinación mucho más marcada hacia la sostenibilidad y la autoregeneración, respectivamente.

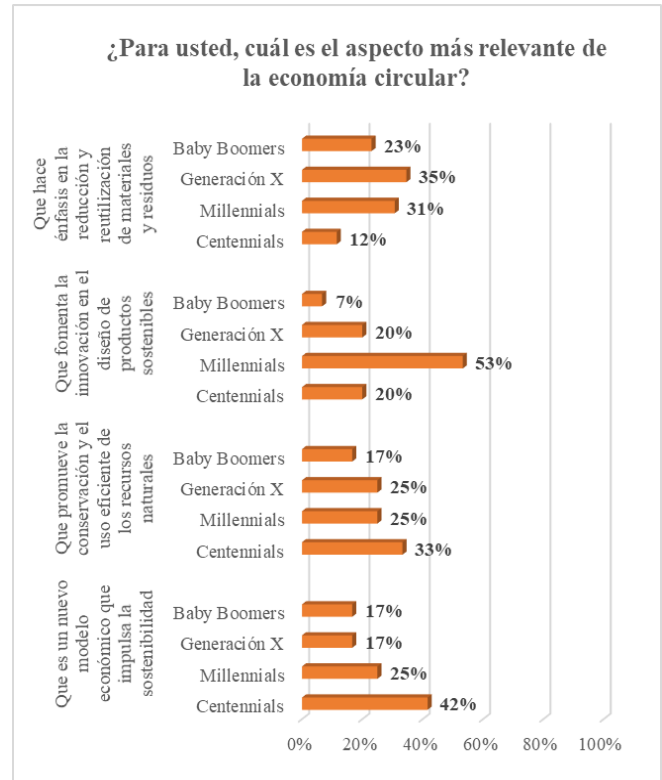
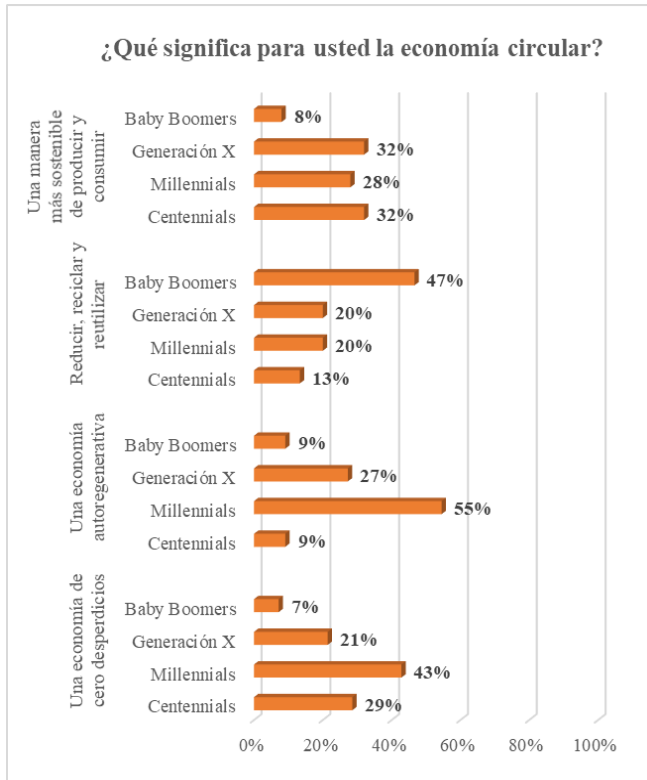


Figura 2: Significado de la EC por cohortes generacionales

Figura 3: Aspectos más relevantes de la EC percibidos por los encuestados

De igual manera, al examinar la relevancia de distintos aspectos asociados al modelo circular según la generación (ver figura 3), se revela una diferenciación significativa en las prioridades percibidas. Los baby boomers y la generación X tienden a enfatizar la reducción y reutilización de materiales y residuos, lo que confirma la existencia de una perspectiva más tradicional, enfocada fundamentalmente en la gestión del final del ciclo de vida. En contraste a estas posturas, los millennials otorgan una importancia sustancialmente mayor a la innovación en el diseño de productos sostenibles (53%), al tiempo que exhiben una visión proactiva centrada en la prevención de la generación de residuos (31%). Los centennials destacan por su percepción de la EC como un nuevo modelo económico que impulsa la sostenibilidad (42%) y el uso eficiente de los recursos no renovables (33%), lo que denota una comprensión sistémica de su potencial transformador a nivel macroeconómico.

Igualmente, la encuesta revela una heterogeneidad generacional marcada en las expectativas sobre la EC, tal como se aprecia en la figura 4. Mientras que los millennials priorizan la creación de nuevos esquemas de negocio (53%), evidenciando una visión del modelo circular como una oportunidad para la innovación y el desarrollo económico, los centennials demuestran una mayor inclinación hacia su rol como un nuevo modelo económico que impulsa la sostenibilidad (42%). La generación X y los baby boomers, por su parte, muestran una expectativa orientada hacia el fomento del crecimiento económico (con 35% y 23%, respectivamente), así como hacia la explotación racional de los recursos naturales (con 25% y 17%, respectivamente).

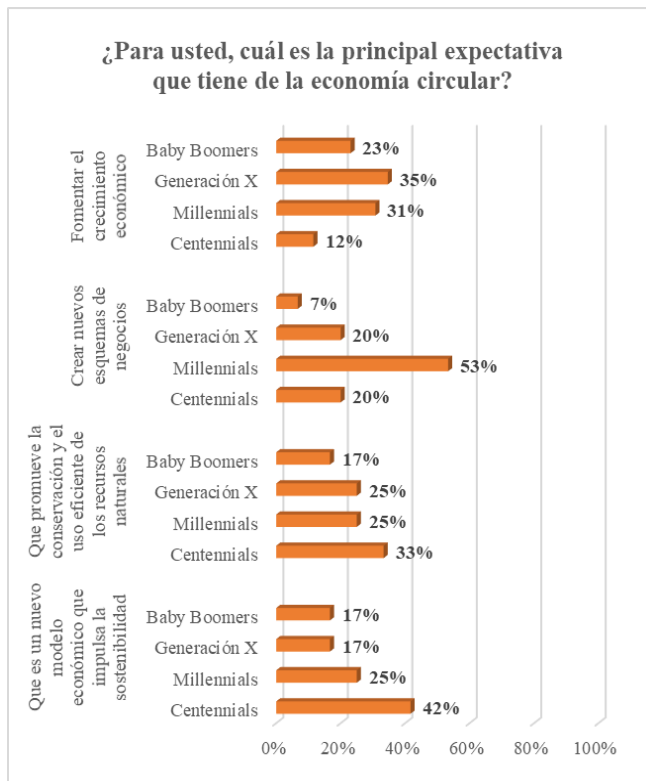


Figura 4: Principales expectativas sobre la EC manifestadas por las cohortes generacionales

IV. CONCLUSIONES

A la luz de los resultados derivados de la presente investigación, se puede concluir que, para las firmas de consultoría gerencial en Venezuela, comprender las diferencias generacionales resulta vital para abordar de manera efectiva la implementación de modelos de EC, tanto en su seno, como en su clientela. La necesidad de internalizar los diversos enfoques y prioridades de cada generación ha de permitir a las consultoras el diseño de estrategias más holísticas e inclusivas para quienes presta sus servicios. Al reconocer que las generaciones más jóvenes pueden impulsar la adopción de modelos de cero residuos y totalmente regenerativos, a la par de que las generaciones mayores pueden enfocarse en la optimización de los procesos existentes a través de la reducción y el reciclaje, las consultoras pueden facilitar la creación de hojas de ruta tropicalizadas que resuenen en la fuerza laboral diversa de las empresas venezolanas, maximizando así el impacto y la sostenibilidad de las iniciativas destinadas a promover la transición hacia el modelo circular.

Asimismo, la disparidad generacional que se ha observado en torno a la conceptualización de la circularidad, subraya la necesidad de plantear estrategias de comunicación y educación segmentadas para fomentar

una adopción generalizada y efectiva. Mientras que las generaciones mayores podrían beneficiarse de enfoques que conecten los principios de la EC con las prácticas de gestión de residuos ya conocidas, las generaciones más jóvenes, con su mayor conciencia ambiental, podrían responder mejor a mensajes que enfatizen la innovación, la sostenibilidad sistémica y la creación de modelos económicos regenerativos. No obstante, una transición exitosa hacia una EC requiere un esfuerzo coordinado que reconozca y aborde las diferentes perspectivas generacionales, aprovechando el conocimiento y los valores únicos de cada grupo para construir un futuro económico mucho más sostenible.

Finalmente, este estudio ha desvelado un horizonte de investigación prospectiva que no solo busca comprender las percepciones individuales sobre la EC, sino que también, a partir de esto, se puedan fundamentar las bases para la formulación de un modelo de transición integral en el país, tomando a las organizaciones consultoras como eje central para su fomento por parte del empresariado nacional, procurando estructurar un modelo que articule, de manera estratégica, los saberes técnicos y experienciales de distintas generaciones, donde se optimice la asignación de recursos, además de fomentar una economía resiliente e inclusiva, que vaya en concordancia con las tendencias globales actuales, que marchan de manera progresiva hacia la sostenibilidad.

REFERENCIAS

- [1]Belmonte, L., Plaza, J., Vásquez, D., y Yakovleva, N. (2021). Circular economy, degrowth and green growth as pathways for research on sustainable development goals: A global analysis and future agenda. *Ecological Economics*, 185, 107050. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2021.107050>
- [2]Carrillo, G., y Pomar, S. (2021). La economía circular en los nuevos modelos de negocio. *Entreciencias: diálogos en la sociedad del conocimiento*, 9(23), e2379933. <https://doi.org/10.22201/enesl.20078064e.2021.23.79933>
- [3]Flikkema, M., Jansen, P., y Van Der Sluis, L. (2007). Identifying Neo-Schumpeterian innovation in service firms: a conceptual essay with a novel classification. *Economics of Innovation and New Technology*, 16(7), 541-558. <https://doi.org/10.1080/10438590600918602>
- [4]Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N., y Hultink, E. (2017). The circular economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143(1), 757-768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
- [5]Henriques, R., Figueiredo, F., y Nunes, J. (2023). Consumers' perspectives on circular economy: main tendencies for market valorization. *Sustainability*,

- 15(9), 14292. <https://doi.org/10.3390/su151914292>
- [6] Jiménez, D., Miraval, G., y Montes, J. (2023). Paradigma de consumo de las generaciones baby boomers, X y millennials: análisis desde la sostenibilidad ambiental. *Equidad y Desarrollo*, 1(42), 158-186. <https://doi.org/10.19052/eq.vol1.iss42.8>
- [7] Korhonen, J., Honkasalo, A., y Seppälä, J. (2018). Circular economy: The concept and its limitations. *Ecological Economics*, 143, 37-46. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.041>
- [8] Kotler, P., y Keller, K. (2012). *Dirección de marketing* (14a ed.). México: Pearson Educación.
- [9] Krasulja, N., Ilić, D., y Marković, B. (2020). Basic principles of circular economy with special focus on sustainable consumption “y” and “z” generation. *Ecoforum Journal*, 9(22). Obtenido de <https://ecoforum-journal.ro/index.php/eco/article/view/1917>
- [10] Krauskopf, D. (2019). Relaciones intergeneracionales, emancipación e independencia de jóvenes estudiantes chilenos. *Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales, Niñez y Juventud*, 17(1), 75-87. <https://doi.org/10.11600/1692715x.17104>
- [11] Maldonado, L., y Cervera, A. (2024). La economía circular en los procesos productivos: una fuente de sostenibilidad para crear valor en el sector pesquero. *European Public y Social Innovation Review*, 9, 1-22. <https://doi.org/10.31637/epsir-2024-334>
- [12] Peñalosa, M., y López, D. (2016). La generación de los millennials frente al consumo socialmente responsable. *Cuadernos Latinoamericanos de Administración*, 12(23), 73-82. <https://doi.org/10.18270/cuaderlam.v12i23.2127>
- [13] Sánchez, F., y Recalde, A. (2024). Gestión de residuos sólidos municipales 2021-2023: Revisión sistemática. *Gestio et Productio*, 6(11), 246-255. <https://doi.org/10.35381/gep.v6i11.187>
- [14] Schröder, P., Anggraeni, K., y Weber, U. (2019). The relevance of circular economy practices to the sustainable development goals. *Journal of Industrial Ecology*, 23(9), 77-95. <https://doi.org/10.1111/jiec.12732>

IMPLEMENTACIÓN DE LA NORMA ISO 50001:2018 EN SISTEMAS AUXILIARES DEL LAMINADOR CLECIM COSIM DE CVG ALCASA

Malavé Pablo
pablomalave@gmail.com
CVG Aluminios del Caroní, S.A.

Resumen: La Ley de Uso Racional y Eficiente de la Energía, promulgada en 2009, establece la creación de las Unidades de Gestión Energética en las empresas del sector público con el fin de promover medidas para el uso racional y eficiente de la energía en sus instalaciones aplicando normas nacionales o internacionales. El presente estudio tiene como objetivo comprobar la aplicabilidad de la Norma ISO 50001:2018 e implementarla en sistemas de servicios auxiliares del Laminador CLECIM COSIM de CVG ALCASA, obteniendo una metodología para la elaboración de programas de ahorro energético en la planta. El estudio contempla la definición de las Unidades de Gestión Energética, La revisión de los requisitos medulares de la Norma ISO 50001, y su aplicación a la red de Luminarias del Laminador, a las Luminarias de los Paneles de Operaciones y al Sistema de Aire acondicionado de la Sala de PLC. Con los planes propuestos se obtuvo un ahorro de 9.809,00 KWh/mes que equivale a una reducción del 29,53% del consumo inicial de dichos sistemas. A su vez, se mostraron los pasos a seguir para realizar planes que permitan hacer un uso óptimo de la energía.

Palabras clave: Gestión energética, ahorro energético, ISO 50001, requerimientos medulares.

IMPLEMENTATION OF THE ISO 50001:2018 STANDARD IN AUXILIARY SYSTEMS OF THE CLECIM COSIM ROLLING MILL OF CVG ALCASA

Abstract: The Law on the Rational and Efficient Use of Energy, enacted in 2009, establishes the creation of Energy Management Units in public sector companies to promote measures for the rational and efficient use of energy in their facilities by applying national or international standards. The purpose of this study is to verify the applicability of the ISO 50001:2018 Standard and implement it in the auxiliary service systems of CVG ALCASA's CLECIM COSIM Rolling Mill, obtaining a methodology for developing energy-saving programs at the plant. The study includes the definition of the Energy Management Units, the review of the core requirements of the ISO 50001 Standard, and their application to the Rolling Mill's luminaire network, the Operations Panel luminaires, and the PLC Room's air conditioning system. The proposed plans resulted in savings of 9,809.00 KWh/month, equivalent to a 29.53% reduction in the initial consumption of these systems. The steps to follow for developing plans that allow for optimal energy use were also outlined.

Keywords: Energy management, energy savings, ISO 50001, core requirements.



I. INTRODUCCIÓN

A partir del año 2009, con los problemas de Energía Eléctrica que sufrió Venezuela a raíz del fenómeno climático “El Niño” se promulgó la Ley de Uso Racional y Eficiente de la Energía. En esta ley se establece la creación de Unidades de Gestión Energética (UGE) en cada empresa del sector público.

Las UGE son las encargadas tanto de auditar el uso de los portadores energéticos en las empresas así como de hacer estudios a los procesos productivos de las mismas con el fin de optimizarlos en pro del uso racional y eficiente de la energía. Además, la Ley promueve el seguimiento y aplicación de normas nacionales e internacionales que permitan lograr sus funciones.

Con este estudio se desea comprobar la aplicabilidad de la Norma ISO 50001 e implementarla en sistemas auxiliares del Laminador CLECIM COSIM de CVG ALCASA como caso de estudio.

Se busca elaborar medidas de ahorro energético siguiendo los requerimientos medulares de la Norma ISO 50001, que permitirán la creación e implementación de Planes de Acción y el establecimiento de una Línea Base de Energía en donde se podrá medir el impacto de las medidas que se aplicarán.

En este artículo se definen las Unidades de Gestión Energética y se presenta la Ley de Uso Racional y Eficiente de la Energía que las sustenta. Además se presenta la Norma ISO 50001 y se muestran sus requerimientos modulares a través de su aplicación al Laminador CLECIM COSIM de CVG ALCASA. Finalmente se presentan los resultados de la implementación y las conclusiones obtenidas.

II. UNIDADES DE GESTIÓN ENERGÉTICA

El 19 de diciembre de 2011, bajo Gaceta Oficial No. 39.823, se establece en Venezuela la Ley de Uso Racional y Eficiente de la Energía [1].

En su artículo 16, la Ley establece la constitución de las Unidades de Gestión Energética (UGE) en cada empresa del sector público del país. La función principal de las UGE es la formulación de planes, acciones y procedimientos que deben ser efectuados por la institución para hacer uso racional y eficiente de la energía así como el seguimiento y control de dichos planes.

El artículo 6 de la Ley presenta las definiciones de Uso Racional y Uso Eficiente de la Energía, con lo que se pueden establecer sus diferencias.

•Uso eficiente de la energía: Se trata del aprovechamiento óptimo de la energía eléctrica recibida a través del uso de equipos, sistemas y procesos tecnológicos adecuados que puedan satisfacer las necesidades de los

usuarios.

•Uso racional de la energía: Se refiere a mantener una conducta que permita a los usuarios satisfacer sus necesidades con el menor consumo de energía posible.

La Ley establece que las UGE pueden recurrir a normas nacionales e internacionales que permitan desarrollar la metodología a seguir para lograr los objetivos propuestos.

III. LA NORMA ISO 50001

Es una norma elaborada por la Organización Internacional de Normalización (conocida como ISO) y publicada en el año 2011, y actualizada en los años 2018 y 2024 [2], cuyo objetivo global es guiar a las empresas a establecer los mecanismos necesarios para mejorar su eficiencia energética con el fin de reducir tanto el consumo y costes energéticos como el impacto ambiental [3].

La Norma proporciona un reconocido marco de trabajo para que las organizaciones integren la eficiencia energética en sus prácticas de gestión [4].

Según la ISO, entre los objetivos de la Norma se encuentran los siguientes [4]:

- Estimular el aprovechamiento óptimo de los activos de consumo de energía.
- Ayudar a crear conciencia en torno al uso racional y eficiente de la energía.
- Promover las mejores prácticas y reforzar las buenas conductas de gestión de la energía.
- Promover el uso de nuevas tecnologías de eficiencia energética en las empresas.
- Facilitar la gestión de los proyectos que involucren la reducción de emisión de gases de efecto invernadero.

La Norma se basa en el modelo ISO de sistemas de gestión conocidos en todo el mundo y que se aplican en las normas tales como la Gestión de Calidad (ISO 9001) y la Gestión Ambiental (ISO 14001). Por tanto, sigue el ciclo de mejora continua denominado: Planificar – Hacer – Verificar - Actuar (PHVA) como se muestra en la Figura 1 [4].



Figura 1: Ciclo Planificar – Hacer – Verificar – Actuar. Fuente: ISO 50001:2018

El ciclo PHVA consiste en los siguientes pasos [5]:

- Planificar: se establecen las políticas energéticas considerando los usos significativos de la energía, los indicadores de desempeño, las líneas de base energética, los objetivos y las metas energéticas.
- Hacer: se implementan los planes de acción para la aplicación de la política energética establecida previamente.
- Verificar: se realiza el seguimiento y la medición de los procesos.
- Actuar: se emprenden acciones para tratar las no conformidades estableciendo una mejora continua del desempeño energético.

A.Requisitos de la ISO 50001

Según Fernández [3]:

“La Norma especifica los requisitos de un sistema de gestión de la energía, a partir del cual, la empresa a través de un compromiso claro de la alta dirección implanta los requerimientos de la Norma, desarrollando e implementando una política energética, estableciendo objetivos, metas y planes de acción, teniendo en cuenta requisitos legales y toda la información relacionada con el uso significativo de la energía.” (p. 21)

Los requisitos de la Norma no son absolutos. Son referenciados a la política energética de cada empresa. Por tanto, dos empresas con actividades similares, pueden tener y cumplir con los requisitos de la Norma incluso si su desempeño energético es distinto.

B.Requisitos Medulares

Son los requisitos que se enfocan en las acciones y medidas que impactan directamente sobre los consumos de energía. En ellos se concentran desde el análisis del consumo energético hasta los requerimientos de control operacional. [6]

IV.CASO DE ESTUDIO – LAMINADOR CLECIM COSIM DE CVG ALCASA

El Laminador CLECIM COSIM de CVG ALCASA es un Laminador de tipo “Cuarto Reversible en Caliente” que produce bobinas de aluminio o aleaciones de aluminio laminado, con una capacidad de 45000 Toneladas anuales y 3750 Toneladas al mes. Alcanza una Velocidad de Laminación de hasta 200 m/min y produce laminados de hasta 2,5mm de espesor. Fue instalado entre los años 1987 y 1990. [7].

El Laminador esta conformado con muchos subsistemas donde se podrían encontrar oportunidades de optimización de los procesos y de ahorro de energía.

Para este estudio se decidió intervenir en los siguientes elementos:

- Sistema de Aire Acondicionado de la Sala de PLC.
- Luminarias de los Paneles de Operaciones.
- Luminarias de la Nave del Laminador.

La idea de esta selección, es centrarse en la aplicación de los requerimientos de la Norma ISO 50001.

Se seguirán los pasos de un estudio realizado por Carvajal y Tiapa [8] sobre la Implementación de la ISO 50001 en Zonas Residenciales, utilizando los requisitos medulares que permitió poner en marcha planes de manera rápida.

A.Revisión energética.

Se trata de un análisis cuantitativo y metodológico para conocer con detalle las Fuentes de Energía y la evaluación de los usos de dicha energía. Además de identificar los aspectos de uso y consumo energético de los procesos. [9]

Para el caso de estudio actual, se puede resumir la revisión energética con los siguientes datos:

- Fuente energética: Electricidad (KWh)
- Evaluación de los usos de la energía: tras el cierre de las Líneas de Reducción de Aluminio en la CVG Alcasa, el Laminador Clecim Cosim se convirtió en la principal fuente de consumo de energía eléctrica en la planta.
- Identificación de aspectos que afectan el uso y consumo: Existen equipos de control del laminador, aires acondicionados y luminarias que utilizan tecnologías

obsoletas que son energéticamente ineficiente.

•Otras Variables que afectan el uso y consumo: Uso inadecuado de las áreas objeto de estudio por parte del personal. Al no tener un área de descanso dedicada para tal fin, la Sala de Control es utilizada para reuniones y descanso ya que se encuentran climatizadas.

B.Línea Base:

Son referencias cuantitativas que se utilizan de referencia para medir el impacto de la implementación de las acciones de mejora de desempeño energético [10].

En la Tabla 1 se muestran los datos de la Línea Base obtenidos tomando en cuenta el consumo actual de los equipos o elementos que serán intervenidos.

TABLA I
CONSUMO DE ENERGÍA (KWH) DE LOS EQUIPOS Y ELEMENTOS AUDITADOS

Equipo o Elemento	ENERGÍA MENSUAL (KWH/MES)
Sistema de Aire Acondicionado de la Sala de PLC	6.576,33
Luminarias de Paneles de Operaciones	38,88
Luminaria de la Nave del Laminador	26.600,00
Total:	33.215,21

C. Planes de Acción.

Presenta la información para lograr y dar seguimiento a los objetivos y las metas energéticas. [9]

A continuación, se presentan las tablas 2, 3, 4 y 5 con los planes de acción que se plantean aplicar para el presente estudio.

TABLA 2
PLAN DE ACCIÓN 1 – SISTEMA DE AIRE ACONDICIONADO DE LA SALA DE PLC

Objetivo	Reducir el consumo de electricidad por aire acondicionado.
Meta	Reducir el consumo al menos un 10%
Actividades	Sustitución de equipos obsoletos por equipos de alta eficiencia energética.
Indicador	KWh
Responsable	<ul style="list-style-type: none"> Gerencia de Laminación. Superintendencia Mantenimiento Laminación.
Plazo	3 meses

TABLA 3
PLAN DE ACCIÓN 2 – LUMINARIA DE LOS PANELES DE OPERACIONES

Objetivo	Reducir el consumo de electricidad por luminaria de los paneles de operaciones.
Meta	Sustituir las luminarias de tipo incandescente por luminaria de tecnología led.
Actividades	Sustitución luminarias de 60V 1,2W de botoneras de los paneles de operaciones por luminaria de 24V
Indicador	KWh
Responsable	<ul style="list-style-type: none"> Gerencia de Laminación. Superintendencia Mantenimiento Laminación.
Plazo	3 meses

TABLA 4
PLAN DE ACCIÓN 3 – LUMINARIA DE LA
NAVE DEL LAMINADOR CLECIM COSIM

Objetivo	Reducir el consumo de electricidad por luminaria en nave del Laminador.
Meta	Sustituir las luminarias de tipo vapor de mercurio por luminaria de tecnología led. <ul style="list-style-type: none"> • Revisión de la alimentación eléctrica de las luminarias.
Actividades	<ul style="list-style-type: none"> • Selección de las luminarias acordes a su uso en galpones industriales. • Instalación.
Indicador	KWh
Responsable	<ul style="list-style-type: none"> • Gerencia de Laminación. • Superintendencia Mantenimiento Laminación.
Plazo	6 meses

TABLA 5
PLAN DE ACCIÓN 4 – CAMPAÑA DE CON-
CIENTIZACIÓN SOBRE EFICIENCIA ENER-
GÉTICA

Objetivo	Impartir información de eficiencia y concientización energética.
Meta	Facilitar información a todos los trabajadores de la planta.
Actividades	Preparación de las charlas. Preparación de trípticos y material de apoyo. Preparación de Flyers para redes sociales.
Indicador	Charlas dictadas <ul style="list-style-type: none"> • Unidad de Gestión Energética.
Responsable	<ul style="list-style-type: none"> • Coordinación de Comunicación Estratégica
Plazo	1 año.

D.Implementación y operaciones

Plan de Acción 1

La Sala de PLC cuenta con una unidad de Aire Acondicionado Industrial Trifásico de 10 Toneladas, con compresor de tipo Reciprocante, y una Alimentación de 440 V.

Este equipo tiene una potencia de 9.133,79W y un consumo mensual de 6.576,33 KWh/mes.

Se propone, el reemplazo de este equipo por uno de 7 Toneladas pero con compresor de tipo Scroll, con lo

que tendría una potencia de 8.291,67W y un consumo mensual de 5.970,01KWh/mes.

Esto constituye un ahorro de 606,32KWh/mes que se traduce en un 9,21%

Plan de Acción 2

El Laminador cuenta con 3 paneles de operaciones principales y 6 auxiliares, con un total de 182 luminarias entre indicadores y botones luminosos. La luminaria actual es de tipo incandescente de 60V 1,2W. Con el laminador en estado de reposo mantiene 45 indicadores encendidas, constituyendo el mínimo de luminarias encendidas por 24h al día por todo el mes para un consumo de 38,88MWh.

Se plantean sustitución por luminaria de tecnología Led de 24V 0,5W.

Se obtiene una reducción de energía consumida de 22,68KWh, lo que representa un ahorro del 58,33%

Plan de Acción 3

La nave que alberga el laminador Clecim Cosim, cuenta con puntos para 111 luminarias.

Originalmente, las luminarias instaladas utilizan tecnología de Vapor de Mercurio, con una potencia de 400W. Es decir, la potencia total de todas las luminarias en funcionamiento asciende a los 44,4KW. Como las luminarias permanecen encendidas las 24 horas del día, se estima que la energía consumida en un mes con esta carga es de 31,97 MWh.

En un estudio realizado por Aguilar [11] en 2017 al Sistema de iluminación de los galpones de Laminación, sugiere el uso de luminarias LED con una luminancia equivalente a las luminarias de Vapor de Mercurio, pero con una potencia de 218 W. La potencia total de todas las luminarias sería de 24,2KW y la energía consumida en un mes igual a 17,42 MWh.

La Tabla 6 muestra el estatus de los trabajos de la sustitución de las luminarias de Vapor de Mercurio por luminarias de tecnología LED, hasta el mes de marzo de 2025.

TABLA 6
CONSUMO DE ENERGÍA (MWH)- LUMINA-
RIAS NAVE LAMINADOR

Luminaria	CANTIDAD	ENERGÍA MENSUAL (MWH/MES)
LED (218W)	41	6,44
Vapor de Mercurio (400W)	70	20,16
Total:	111	26,60

La culminación de la sustitución implica una reducción de consumo de energía mensual de 9,18MWh, que se traduce en una reducción del 34,5%.

Plan de Acción 4

La toma de conciencia en materia de Uso Racional y Eficiente de la Energía por parte de los trabajadores es vital para que cualquier medida en el tema energético pueda ser mantenida en el tiempo.

Por tanto, se deben preparar charlas especializadas según el contexto en que serán impartidas, bien sea en áreas administrativas como en áreas operativas.

Dado que a los trabajadores les puede resultar molesto que se interrumpan en sus labores, las charlas deben ser cortas y precisas, no más de 10 minutos.

Se pueden preparar charlas abordando diferentes temáticas de ahorro de energía tanto en la empresa como en el hogar como, por ejemplo:

- Uso racional de las luminarias.
- Uso del Aire Acondicionado.
- Dar a conocer la Ley de Uso Racional y Eficiente de la Energía vigente en Venezuela.
- Dar a conocer la Norma ISO 50001.

E.Resultados

La Tabla 7 presenta los resultados de ahorro energético obtenido por el presente estudio.

TABLA 7
RESULTADOS DE AHORRO DE ENERGÍA OBTENIDOS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LOS PLANES DE ACCIÓN

Equipo o Elemento	ENERGÍA MENSUAL AHORRADO (KWMES)	PORCENTAJE DE AHORRO (%)
<i>Sistema de Aire Acondicionado de la Sala de PLC</i>	606,32	9,21
<i>Luminarias de Paneles de Operaciones</i>	22,68	58,33
<i>Luminaria de la Nave del Laminador</i>	9.180,00	34,50
Total:	9.809,00	29,53

V.CONCLUSIONES

Mas allá de los resultados presentados en KWh de los planes de acción, este estudio presentó una forma de aplicar la Norma ISO 50001 de manera concisa que permite ir obteniendo resultados de ahorro de energía mientras se va estructurando la aplicación completa de la misma.

Las UGE pueden involucrar al personal de Ingeniería, de Operaciones y de Mantenimiento para elaborar proyectos de optimización de los procesos productivos de la planta dando como resultado mejoras en la calidad de los productos y en la eficiencia energética.

Cabe destacar que la aplicación completa de la Norma es importante ya que involucra la toma de conciencia de la directiva de las empresas en materia de Uso Racional y Eficiente de la energía. Esto se traduce en una celeridad en la aprobación de los proyectos y medidas de los planes de acción así como de destinar una partida presupuestaria para el funcionamiento de las UGE.

REFERENCIAS

- [1]Ley de uso racional y eficiente de la energía. (2011). Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela, 39.823, Diciembre 19, 2011.
- [2]Bigelow, S. (2025), What is ISO 50001 (International Organization for Standardization 50001)? [Documento en línea]. Disponible: https://www-techtar-get-com.translate.google/searchdatacenter/definition/ISO-50001-International-Organization-for-Standardization-50001?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=wa [Consulta 2025, abril 20]
- [3]Fernández Herrero, P. (2013) Cómo implantar un sistema de gestión de la energía según la ISO 50001:2011. Editorial Fundación Confemetal. Madrid, España.
- [4]Organización Internacional de Normalización. (2011) Gana el desafío de la energía con ISO 50001. Ginebra: Autor.
- [5]Asociación Española de Normalización. (2018). Sistema de gestión de la energía. Requisitos con orientación para su uso (ISO 50001:2018) [Documento en línea]. Disponible: https://tepexirguez.tecnm.mx/modulos/pdf/sgi/_ISO-50001-2018.pdf_.pdf [Consulta: 2025, Abril 20]
- [6]Asociación Chilena de Eficiencia Energética. (2012) Guía de Implementación de Sistema de la Gestión de la Energía basado en la ISO 50001. Santiago: Autor.
- [7]CVG Aluminio del Caroní, S.A. (2015). Informe Justificativo. Adecuación tecnológica del Sistema de Medición de Espesor y Perfil del Laminador en Caliente Clecim Cosim. Puerto Ordaz: Autor.
- [8]Carvajal, J. y Tiapa, A. (2018). Implementación de

la Norma ISO 50001 a Zona Residencial. Trabajo no publicado, Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre” - Vicerrectorado Puerto Ordaz, Puerto Ordaz.

[9] Flores Diaz, L. y Jáuregui Nares, I. (2020) Guía de implementación de requisitos del estándar ISO 50001:2018. [Documento en línea] México: Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía. Disponible: https://www.conuee.gob.mx/transparencia/boletines/SGen/manuales/Guia_ISO_50001_2018_paginas_web1.pdf [Consulta: 2025, Marzo 20]

[10] González Guerra, H. (2018) Modelo de un Sistema de Gestión de la Energía, basado en la Norma ISO 50001:2011 para las Plantas de Distribución de Comes-

tibles ubicadas en el Distrito Metropolitano. [Documento en línea] Trabajo de Grado de Maestría, Universidad Católica Andrés Bello, Caracas. Disponible: <http://biblioteca2.ucab.edu.ve/anexos/biblioteca/marc/texto/AAT7309.pdf> [Consulta: 2025, Abril 15]

[11] Aguilar, E. (2017). Análisis del Sistema de Iluminación a los Galpones del Area Industrial “Laminación Vieja”, en función de la Resolución 77 para su Adecuación Tecnológica, de la Gerencia de Laminación de Corpoalum ALCASA, Puerto Ordaz, Estado Bolívar. Informe de Pasantía no publicado: Instituto Universitario Politécnico “Santiago Mariño”- Extensión Puerto Ordaz, Puerto Ordaz.

INTRODUCCIÓN A LA FABRICACIÓN ADITIVA CON POLVOS METÁLICOS

Volpe Walter

waltermvolpericci@gmail.com
UNEXPO

Resumen: El diseño y fabricación de elementos con solicitaciones específicas de alto rendimiento impulsa una nueva generación en la filosofía de producción y desarrollo de herramientas avanzadas, basado en el rendimiento energético, uso racional de materia prima y precisión culminan en elementos cuyas geometrías y características son complicadas de lograr con métodos de fabricación tradicionales, esto recae en un concepto en constante cambio que involucra la relación sistemática de disciplinas de diseño, análisis y fabricación, acciones anteriormente separadas se encuentran integradas de forma automatizada, una estas vertientes en crecimiento es la fabricación aditiva Additive Manufacturing (AM) en lecho de polvos Powder Bed Fusion (PBF) que aprovecha la tecnología emergente de equipos de impresión de modelos sólidos junto a la sinterización de metales selectiva con laser, (SLS) aplicaciones que involucran un conglomerado de tecnologías, materia prima selecta y tratamientos especializados que operando en sinergia sus productos prometen rendimientos considerables respecto a los obtenidos por medios convencionales.

Palabras clave: Fabricación aditiva, sinterización, equipo, polvos metálicos.

INTRODUCTION TO ADDITIVE MANUFACTURING WITH METAL POWDERS

Abstract: The Law on the Rational and Efficient Use of Energy, enacted in 2009, establishes the creation of Energy Management Units in public sector companies to promote measures for the rational and efficient use of energy in their facilities by applying national or international standards. The purpose of this study is to verify the applicability of the ISO 50001:2018 Standard and implement it in the auxiliary service systems of CVG ALCASA's CLECIM COSIM Rolling Mill, obtaining a methodology for developing energy-saving programs at the plant. The study includes the definition of the Energy Management Units, the review of the core requirements of the ISO 50001 Standard, and their application to the Rolling Mill's luminaire network, the Operations Panel luminaires, and the PLC Room's air conditioning system. The proposed plans resulted in savings of 9,809.00 KWh/month, equivalent to a 29.53% reduction in the initial consumption of these systems. The steps to follow for developing plans that allow for optimal energy use were also outlined.

Keywords: Fabricación aditiva, sinterización, equipo, polvos metálicos.



I. INTRODUCCIÓN

La materialización de piezas con geometrías complejas, junto a herramientas específicas y modelos de prototipos logrado en menor tiempo respecto a métodos tradicionales supone un avance con el dominio de la fabricación aditiva, entrando en la categoría de mecanizado rápido [1]

El avance de las técnicas, sus prestaciones y ventajas en el apalancamiento de la ingeniería inversa y desarrollo de nuevos productos, viene de la combinación de distintas disciplinas como ingeniería mecánica, dibujo asistido, metalurgia, control numérico, electrónica y ciencia de los materiales, cuyo propósito busca incrementar la resistencia y desempeño de los nuevos productos optimizando inversión de tiempo y recursos materiales.

El alcance de prestaciones como estabilidad mecánica, química y térmica, no solo recae en el proceso de impresión, los recursos materiales deben cumplir con requisitos estipulados en la norma UNE- ISO 3252 [2], el análisis del modelo, y su posterior tratamiento bien sea térmico o químico, son etapas a considerar, como se expone se deben de cumplir con un procedimiento de manejo de materiales, diseño y fabricación así como de seguridad que en conjunto garanticen la solidaridad del proceso siendo establecido por el personal investigador o fabricante, seguido de una capacidad instalada de equipos dedicados para la labor.

La intención de este documento intenta revelar las prestaciones y oportunidades, así como limitaciones y metas por alcanzar por la tecnología de fabricación aditiva.

II. FABRICACIÓN ADITIVA CON POLVOS METÁLICOS

La aplicación de la técnica de sinterizado en la fabricación aditiva proveniente de la elaboración de modelos bajo matrices de compresión, estas técnicas empleadas ampliamente en el sector de materiales cerámicos y químicos son parte primordial del proceso actual, se contempla en el desarrollo de la fabricación aditiva en distintos modos de operación, basados en la sinterización selectiva (SLS) o con material aglutinante entre otras técnicas.

La fabricación aditiva de polvos metálicos es un proceso que consiste en la creación de objetos tridimensionales mediante la fusión o solidificación selectiva de polvos metálicos. A diferencia de los métodos tradicionales de fabricación sustractiva, que implican cortar o dar forma a los materiales, la fabricación aditiva construye objetos añadiendo material capa a capa.

Este método permite crear piezas metálicas complejas y muy precisas que serían difíciles o imposibles de fabricar con técnicas convencionales [3].

Tabla I. Morfología del proceso de fabricación aditiva con polvos metálicos

Morfología			
Tipo de flujo de materia	Tecnologías	Suministro de energía	Materiales
Granular	Sinterizado Laser selectivo SLS	Energía eléctrica Combinación de Radiación térmica/ conducción	Aleaciones de metal, polímeros, resinas
	Fusión por haz de electrones EBM		
	Impresión 3D con cabezal de inyección de tinta sobre lecho de polvo		Aleaciones de metal, Titanio mayormente
			Yeso, metales

De acuerdo a la norma UNE-EN ISO/ASTM 52900:2017, las tecnologías aditivas pueden clasificarse en siete tipos de procesos: fotopolimerización, extrusión, fusión de lecho de polvo, deposición de energía focalizada, proyección de aglutinante, proyección de material y laminado de hojas.

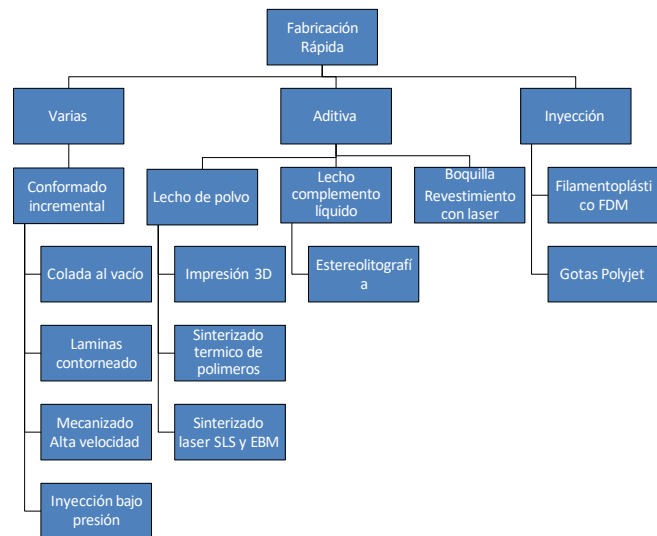


Figura 1: Esquema de tecnologías rápidas de fabricación, clasificadas como aditivas y no aditivas. Fuente COTEC (2011).

A. Sinterización selectiva por laser (SLS)

En la misma filosofía de añadidura de capa tras capa de, se utiliza un láser para sinterizar el polvo. El láser calienta el polvo hasta fusionarlo parcialmente, uniendo las partículas para formar las capas sucesivas. Dependiendo del material o aleación a fusionar, al terminar la transferencia de datos y sinterizado se somete la pieza

impresa a un tratamiento térmico y limpieza, debido a las frecuencias de calentamiento por la aplicación de laser y polvos adheridos.

B. Impresión con agentes aglutinantes “Multi-Jet-Fusion” (MJF)

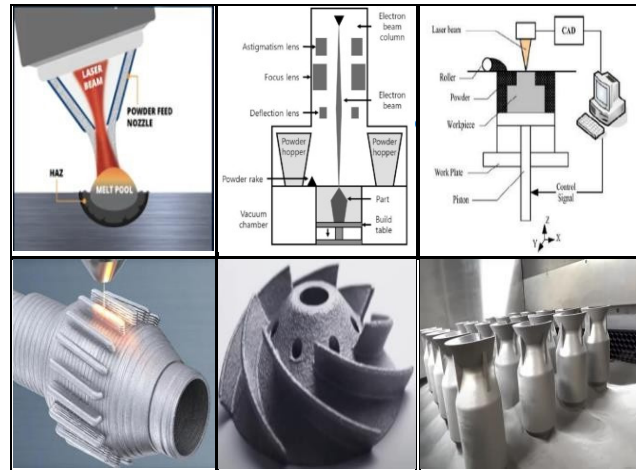
En este apartado se utiliza un enfoque diferente. En este proceso, una cabeza de impresión rocía agentes en las áreas del polvo que deben fusionarse, mientras una fuente de calor pasa sobre la superficie y activa la fusión. Esto permite una mayor precisión y velocidad de producción en comparación con el SLS.

C. Rayo de electrones en lecho de polvo “Electro Beam Melting” (EBM)

La tecnología EBM (Electron Beam Melting) funde polvo metálico en vacío por la acción de un haz de electrones. El proceso EBM fabrica añadiendo el material por capas, es decir, el polvo metálico (con tamaño de partícula entre 45 y 100 micras) es repartido en una fina capa sobre el área de trabajo. El haz de electrones funde el polvo metálico selectivamente siguiendo exactamente el patrón de la sección geométrica de la pieza para cada capa. Estos dos pasos se repiten hasta que la pieza se ha fabricado. El espesor de capa puede variar entre 70 (alta calidad), 100 y 200 μm (alta productividad), cabe destacar se lleva a cabo con un precalentamiento por debajo del punto de fusión del material, donde el haz de electrones luego apunta y funde y sinteriza el modelo, este proceso evita la súbita expansión del material y reduce las posibles tensiones y tratamientos posteriores

D. Consolidación de laser “Laser Cladding”

Estas tecnologías nacen como evolución de las de soldadura y recargue láser. Este grupo de tecnologías se caracteriza por utilizar una boquilla que alimenta material (según el caso, polvo o varilla) justo en el punto en el que se aplica una fuente intensa y concentrada de energía, como un láser o plasma. El material de aporte se funde sobre el sustrato y solidifica inmediatamente. Normalmente se proyecta gas inerte alrededor del punto de fusión para proteger el caldo. La aplicación inicial fue la de reparar o recargar piezas caras y normalmente de gran tamaño, como turbinas, hélices, etc. En estos casos el cabezal es móvil y se desplaza siguiendo las trayectorias programadas.



2. De izquierda a derecha Eje con Revestimiento laser "Laser cladding", impulsor con EBM, y toberas SLS

E. Obtención de polvos metálicos

Para la producción de los polvos metálicos se generan a partir de diferentes métodos, dependiendo del requisito final del producto, con tamaños de partículas de 0,1 μm a 1000 μm , cuyos materiales van desde metales, aleaciones, menas, sales y otros compuestos. La forma, el tamaño, porosidad, pureza química dependen del método que se use, mecánico, pulverización, atomización, químico, electrolítico, estas características son importantes porque afectan los procesos de compactación, sinterizado y tratamiento térmico.

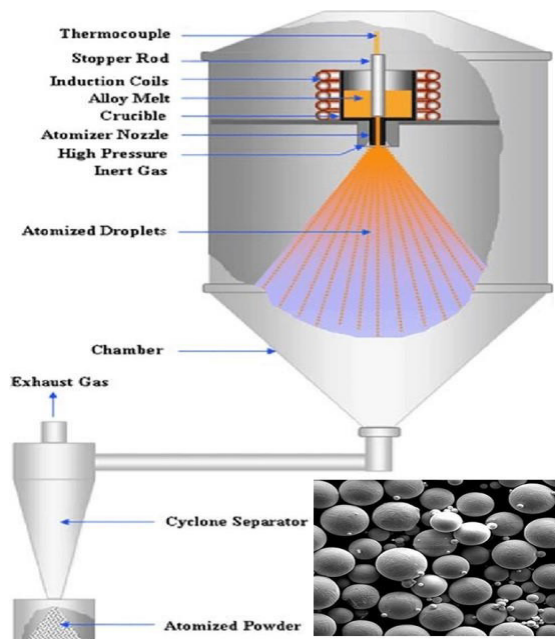
F. Atomización

Consiste en pasar una corriente de metal líquido al inyectar metal fundido en una boquilla de orificio pequeño impulsado por un gas inerte como helio, CO₂ o agua, en ese instante el metal se pulveriza, El tamaño es regulado por diversos factores como temperatura del metal, caudales de metal y gas, tamaño de la boquilla y característica del chorro. Existe una variante de este método llamado “electrodo giratorio” en el cual un electrodo constituido por el material a pulverizar se hace girar a altas velocidades en una atmosfera de helio, la acción de la fuerza centrífuga desintegra el electrodo en partículas esféricas.

G. Reducción

Consiste en eliminar el oxígeno presente en los óxidos metálicos en una atmosfera de hidrogeno o monóxido de carbono, como agentes reductores, al ser reducidos los óxidos metálicos cambian al estado metálico, las características del particulado son esponjosos y

porosos, con formas esféricas y angulares, de tamaño uniforme.



3. Esquema de obtención de polvo metálico por atomización. Fuente: Met3dp.com

H. Deposición electrolítica.

En este método se emplean sales fundidas o soluciones acuosas, el producto es un polvo puro de alta pureza.

I. Carbonilos

Los carbonilos metálicos como el de hierro y níquel $Fe(CO)_5$ y $Ni(CO)_4$ respectivamente, se generan al hacer reaccionar los minerales con monóxido de carbono, los productos de la reacción se descomponen a continuación para obtener hierro y níquel en forma de partículas esféricas densas y de pureza.

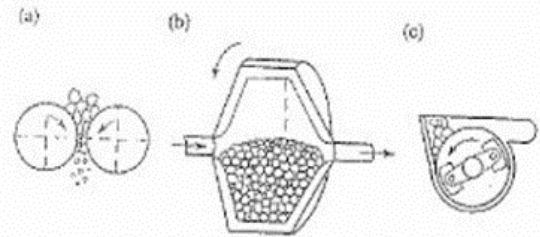
J. Pulverización

La pulverización mecánica implica la fragmentación mediante la aplicación de un molino de bolas, esmerilado de metales hasta reducirlos a partículas pequeñas, dependiendo de la dureza, fragilidad o suavidad del metal, el particulado de polvo tienen forma angular o de hojuelas respectivamente, estas geometrías en el proceso de presado y sinterizado tradicional no tienen buen desempeño en su conformación.

K. Aleación mecánica

Es un proceso de mezclado por la acción de un molino de bolas, se agregan dos o más tipos de metales

puros, mediante la acción del impacto del molino, se pulverizan y se rompen y se unen por difusión, formando polvos de aleación.



4. Desintegración mecánica para pulverización mecánica. a) Trituración b) Molino de bolas c) Molino de martillos Fuente: S. Kalpakjian (2014)

Tabla II. Aleaciones de polvos metálicos aplicables a la fabricación aditiva

Aleación Polvo	Aplicación
Acero inoxidable 316L	Buena resistencia a la corrosión y soldabilidad
Titanio Ti-6Al-4V	Aleación de alta resistencia y bajo peso; aplicaciones aeroespaciales y médicas
Inconel 625	Alta resistencia a temperatura y estabilidad química a la oxidación; aplicaciones de motores de reacción y entornos exigentes de temperatura
Aluminio Al-Si-10Mg	Aleación de aluminio, con prestaciones equilibradas entre ductilidad, resistencia y maleabilidad; aplicaciones aeroespaciales y automoción
Níquel Ni	Polvo de níquel valorado por conductividad eléctrica y resistencia a la corrosión; baterías y componentes electrónicos.
Cromo Cobalto Cr-Co	Tenacidad y resistencia al desgaste; compatible con aplicaciones médicas como implantes óseos.
Acero para herramientas	Alta resistencia al desgaste y dureza; Aleaciones selectas para aplicaciones específicas de herramientas de corte
Carburo de Wolframio WC	Resistencia al desgaste, abrasión y alta dureza; aplicación en brocas y herramientas de corte.

III. EQUIPAMIENTO

El desarrollo de toda herramienta a lo largo de la historia pretende mejorar el tiempo y esfuerzo de inversión de una técnica con la finalidad de obtener un resultado de calidad, al finalizar las nuevas herramientas y tecnologías de vanguardia conviven a la par con las antiguas

y rudimentarias trabajando en sinergia sin intención de reemplazo.

Los métodos descritos para el desarrollo rápido de prototipos, prótesis, ortesis, piezas de recambio y personalizadas, tienen aplicaciones en sectores de salud, industria química, automoción, aeronáutica y espacial, requieren de un infraestructura y capacidad instalada, la cual garantice el flujo de materia prima hasta la transformación en si del producto.

Este flujo se representa como una cadena de procesos empezando por la producción de materia prima, la industria de polvos metálicos ya posee de por si experiencia en el sector de sinterizado lo que representa una ventaja tecnológica, al contar con una gama de aleaciones comerciales aplicables a los métodos de fabricación aditiva. Seguido por los equipos de fabricación aditiva, los desarrollos muestran equipos solidarios y compactos, compuestos de módulos, que cuentan con unidades especializadas desde tamices, filtros de gases, calentadores, unidades de extracción y vacío, lo que permite establecer el espacio adecuado para su instalación, sin embargo el costo elevado de los equipos, la baja velocidad de producción y el volumen de los elementos impresos limita en algunos escenarios su viabilidad, siendo empleados en centros de desarrollo tecnológico automotriz, energético, aeroespacial y médico, terminando pero no menos importante el tratamiento térmico y limpieza por hornos especializados ya disponibles en el mercado de sinterización, estos hornos serán de volúmenes conservadores definidos por la demanda del volumen de producción de los equipos de fabricación.

El criterio de selección para los equipos bajo los modos de sinterización SLS o EBM se hacen según los requerimientos de mercado, ambas tecnologías poseen buenas puntuaciones en cuanto a calidad de unión, acabado y resistencia, en sentido contrario la cantidad de energía y temperatura alcanzado por cada una difieren, en el caso de sinterizado del polvo de titanio para aplicaciones de alta temperatura el método aplicable es el de EBM gracias a la atmósfera de vacío y temperatura lograda por del haz de electrones generando la sinterización solo en metales con altos puntos de fusión, en este espacio interviene el método de SLS aplicable a aleaciones con puntos de fusión inferiores y polímeros, destacando su valencia en la fusión de varios materiales con menos inversión energética.

Esto se puede evidenciar en el siguiente cuadro donde se observa la energía requerida para el proceso de fusión y las diferencias en los procesos de SLS y EBM.

Tabla III. Energía específica de incorporación de metales

Material en Polvo	Energía específica (MJ/Kg)
Acero al carbono	56.1
Acero Inoxidable	78-97
Aluminio	160-230
Titanio Ti-6Al-4V	500.6
Níquel	134- 259

Tabla 4. Diferencias entre procesos de fabricación aditiva SLS y EBM

Propiedades	Laser SLS	Haz de electrones EBM
Número de rayos	Entre 1 y 4 emisores	1 de alta potencia
Potencia del rayo	400W- 700W	4500W-6000W
Cámara de vacío	No	Si
Atmósfera de gas	Si, Nitrógeno, Argón, CO2	No
Espesor de capa	30-40 micrones	70 micrones
Propiedades isotrópicas	Si	Si
Tratamiento posterior	Térmico, alivio de tensiones, limpieza	Térmico de baja severidad, limpieza, largo tiempo de enfriado
Velocidad	Lenta	Rápida
Materiales	Polímeros, resinas, metales de bajo punto de fusión	Metales con alto punto de fusión
Densidad	Media a baja debido a los espacios del sinterizado	Alta, fusión completa del polvo
Costo	costoso	Más costoso que SLS

IV. DEFECTOS

En la elaboración de los piezas con los métodos descritos en lecho de polvo, se producen piezas con cierto nivel de porosidad, debido al método de fusión de capa por capa con polvos metálicos. Se forman defectos como microfisuras y microporos de hasta 100 μm entre las partículas de polvo y las capas solidificadas adya-

centes. Las piezas pueden tener una porosidad de hasta 5% en función del material y los parámetros de impresión utilizados.

- Las propiedades mecánicas, como la resistencia a la fatiga y la tenacidad a la fractura, se reducen drásticamente.

- Se crean vías de fuga que hacen que las piezas no superen las pruebas de estanqueidad.

- El rendimiento funcional se ve mermado, especialmente en sistemas de flujo de fluidos y presurizados.

- La resistencia a la corrosión y la compatibilidad química se resienten debido a la penetración en los poros.

- La precisión dimensional se ve comprometida, ya que los poros pueden seguir creciendo durante el tratamiento térmico posterior.

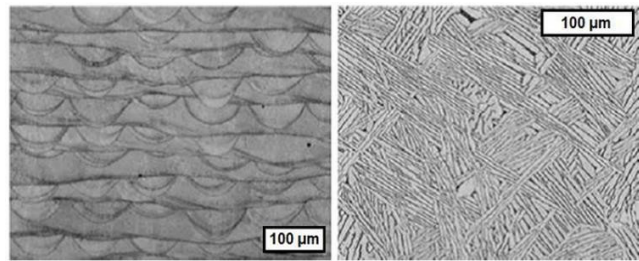
- La calidad del acabado superficial se degrada porque los poros cercanos a la superficie actúan como concentradores de tensiones

V. TRATAMIENTO

En el mercado de la metalurgia de polvos se dispone de una amplia gama de equipos térmicos potenciadores del proceso de sinterizado, al ser este el responsable de la unión de las partículas se debe tener certeza de los rangos de temperatura para cada material.

En el caso del sinterizado tradicional donde la unión proviene de la conformación por prensado y la aplicación de calor mediante hornos que operan por debajo de la temperatura de fusión con la finalidad de promover la fusión del polvo, en la sinterización selectiva se deja a un lado la compactación por la aplicación focalizada de energía en un punto preciso que une a las partículas.

Dada la diferencia a nivel estructural por la aplicación de las distintas tecnologías se puede prever el tipo de tratamiento aplicable, en el caso de SLS el rápido enfriamiento da lugar a tamaños de granos pequeños, sin embargo las capas posteriores de polvo son fundidas parcialmente generando pequeños poros, en el caso de EBM debido a las altas temperaturas en el lecho de polvo da una mejor distribución de calor generando un patrón de grano contiguo, semejante a una microestructura fundida con menos porosidad que una estructura de SLS, lo que pudiera requerir tratamientos o alivios de tensiones menores.



5. Microestructura representativa de CoCrMo por MLS (izquierda) y de Ti-6Al-4V por EBM (derecha).

Las piezas obtenidas por el método de fabricación aditiva por capas, han sido sometidas a ciclos de calentamiento y enfriamiento debido a la aplicación de calor en cada capa en un rango de temperaturas, dejando la pieza con algunas tensiones residuales que se deben mitigar, microporosidad, junto con el polvo de las zonas de calor cercanas a los haces y laser, termina adherido a las superficies de las piezas sin fusionarse (similar al defecto en soldadura “falta de fusión”) por lo que es requerido su retiro con herramientas de cepillado y esmerilado para dar un mejor acabado a la apariencia.

Una de las tecnologías que permite garantizar la reducción de porosidad y uniformidad estructural posterior a la fabricación aditiva es la del prensado isostático HIP, la cual aplica la combinación de presión y temperaturas en ciclos alternados de alta presión/ baja temperatura, baja presión alta temperatura y alta presión con incremento de temperatura.

Esta combinación de acciones, permite otorgar bonificaciones a las piezas elaboradas por MA, al mejorar la densidad reparando la porosidad interna y la microcontracción, esto impacta de forma positiva en la resistencia a la tracción y fatiga.

Entre sus ventajas se pueden mencionar:

- Mayor densidad - el cierre de huecos y vacíos internos une metalúrgicamente el material para alcanzar una densidad de 100%

- Propiedades mecánicas mejoradas - elimina los concentradores de tensiones causados por defectos para mejorar la resistencia, la ductilidad y la resistencia a la fractura

- Estructuras estancas - cierra vías microscópicas para que los fluidos se filtren a través del material

- Mejor acabado superficial - aplasta los poros cerca de la superficie mejorando así la suavidad de la superficie

- Estabilidad dimensional - evita el crecimiento continuo de poros durante futuros procesos térmicos

- Mayor fiabilidad - elimina defectos para mejorar la calidad y la uniformidad de las piezas impresas

De este modo, la HIP supera las principales limitaciones de la impresión 3D de metales para permitir la producción de piezas de uso final de alto rendimiento [5].

VI. CONCLUSIONES

El desarrollo de las técnicas de fabricación aditiva supone una nueva visión en la industria de la manufactura con tecnología de vanguardia, al proponer superar las barreras de fabricación de modelos complejos monolíticos, reduciendo la cantidad de material empleado sin evidencia de residuos, menores tiempos de maquinado y tratamientos posteriores. Sin embargo, la tecnología aun en desarrollo ha señalado las limitaciones de las técnicas y los métodos para revertirlas, tal es el caso de la presencia de porosidades y su implicación en la disipación y reducción de las propiedades mecánicas, pudiéndose revertir con la aplicación de prensado isostático. En este apartado se requiere especial cuidado en identificar las potenciales fallas por tensiones y porosidad, al igual que el seguimiento en cuanto al desempeño de las piezas luego del tratamiento térmico o isostático según sea el caso.

Se debe tratar objetivamente el caso de las imperfecciones, al identificar las posibles causas, por ejemplo el polvo empleado y la forma en la que fue obtenido, la economía del proceso depende de sobremanera por la forma de la partícula, pureza y su integración a otra durante el proceso de sinterizado, establecer una relación entre la calidad del polvo, su método de obtención y calidad del elemento impreso supone un balance en un proceso sustentable.

Dentro de la amplia gama de técnicas ya cuenta con aplicaciones comerciales con casos de estudio en industria de medicina, automotriz y aeroespacial.

Para su uso en la ingeniería inversa se convierte en una herramienta versátil al establecer un vínculo con las herramientas CAD-CAE-CAM, que permite las tareas de rediseño.

La búsqueda de información estuvo enfocada en identificar estas dos tecnologías punteras en el mer-

cado de fabricación aditiva como lo son SLS y EBM, ambas se encuentran bien diferenciadas en sectores de temperatura, materiales aplicables y velocidad de procesamiento, la afinidad del método de SLS a varios materiales con bajos puntos de fusión la hacen idónea para la labor, para aleaciones de con puntos de fusión alto como las de titanio el haz de electrones de EBM de manera favorable garantizando las condiciones de vacío y calor.

RECONOCIMIENTO

Al profesor de fabricación de elementos de máquinas Msc. Frank Díaz, por su tiempo y dedicación impartiendo esta importante asignatura.

REFERENCIAS

- [1] Cobá Salcedo, Milton y Serres Moliner, Esther. (2006). Estudio comparativo de dos tecnologías de mecanizado rápido; Coproinmold y sinterizado selectivo por láser. Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, (38), 64-72. Recuperado el 27 de febrero de 2025 de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pi d=S0120-62302006000400006&lng=en&tlng=es.
- [2] Pulvimentalurgia Vocabulario UNE-ISO-3252:2019
- [3] Fabricación aditiva. 8 puntos clave de la fabricación aditiva de polvo metálico | Material de fabricación aditiva
- [4] F. Arango López. Efecto del prensado isostático en caliente (hip) en el procesamiento de mezclas mg-10%wti por vía pulvimetalúrgica
- [5] Prensado isostático en la impresión 3D. <https://am-material.com/es/news/hot-isostatic-pressinghip-3d-printing>.
- [6] ASTM-F42.91 Subcommittee, "Standard terminology for additive manufacturing technologies, ASTM Des. F2792- 12a, Vol.10.04, (2015).," doi: 10.1520/F2792-12A.
- [7] Ruiz Monsalve, R. (2020). Estudio de la viabilidad de la fabricación aditiva para la elaboración de componentes industriales en aleaciones de titanio. Universitat Politècnica de València. <http://hdl.handle.net/10251/149030>

MECANISMO DE FORMACIÓN DE FAYALITA EN SEPARADORES DE PARTÍCULAS

Echegaray Alberto¹, Dam Oscar² y Salas luis³.

echegaray.alberto¹@Gmail.com, oscarcurmetals.²@gmail.com2, salas19419@gmail.com .³

<https://orcid.org/0000-0003-4234-0452>; <https://orcid.org/0002-0594-67572>; <https://orcid.org/0009-6138-8530>

UNEXPO PUERTO ORDAZ

Resumen: Este artículo describe las bases fundamentales para generar conocimientos en la formación de las adherencias de tipo fayalita en separadores de partículas. Así mismo, para determinar las condiciones que favorecen el cambio de viscosidad y condiciones consecuentes de la plasticidad del sistema estudiado. El análisis se enfoca en los rangos de temperaturas entre 600°C y 800°C y presiones superiores a 5 bar. Como resultado, se estiman las formaciones de las adherencias observadas en proceso industriales que, contienen los materiales involucrados, y asociadas comúnmente al choque entre las partículas, así como el efecto de las diferentes energías asociadas que se desprenden de este fenómeno. Este mecanismo puede ser aplicable al estudio de las adherencias de otros materiales cerámicos en condiciones termoplásticas con comportamiento en similares en condiciones al sistema cerámico estudiado, utilizando la ecuación modificada a la propuesta por Mc Clean para termo-fluencia de metales.

Palabras clave: Termo plasticidad viscosidad relativa, wustita, choque de partículas, adherencia, fluencia, Fayalita.

FAYALITE FORMATION MECHANISM IN PARTICLE SEPARATORS

Abstract: This article presents the fundamental bases to generate knowledge in the formation of fayalite-type adhesions in particle separators. Likewise, to determine the conditions that favor the change of viscosity and consequent conditions of the plasticity of the studied system. The analysis focuses on the temperature range between 600°C y 800°C and pressures above 5 bars. As a result, the formation of adhesions observed in the industrial process that contain the materials involved, and commonly associated with the collision between the particles, are estimated, as well as the effect of the different associated energies that arise from this phenomenon. This mechanism may be applicable to the study of the adhesions of other ceramic materials under thermoplastic conditions with behavior in similar conditions to the studied ceramic system, using the equation modified to that proposed by Mc Clean for thermoelasticity of metals.

Keywords: Thermo-plasticity, relative viscosity, wustita, particle collision, fayalita.



I. INTRODUCCIÓN

Durante los diferentes procesos de fabricación del mineral de hierro, en el cual se utilizan la tecnología del lecho fluidizado [1] para su procesamiento, estos procesos tienden a operar bajo un tipo de operación tipo intermitente; en estos procesos se genera des-fluidización que es causada por la adherencia del hierro parcialmente reducido en el lecho fluidizado [1] y [2]. Esta des-fluidización, también se asocia a la formación de acumulaciones graduales de capas sucesivas por efecto de adherencias de materiales (acreción) en las superficies internas metálicas de los separadores de partículas, causadas por la colisión entre las partículas a temperaturas por debajo de punto de fusión del hierro, generando un tipo de operación intermitente.

En este trabajo, se asocia el fenómeno de interacción entre partículas con la viscosidad aparente, concepto que, según [3], permite cuantificar la resistencia de las partículas de hierro al movimiento de fluencia o reptación en estado plástico.

Esta viscosidad aparente es el resultado de la combinación de interacciones por fricción externa, fuerzas cohesivas como las de Van der Waals, atracción interfacial y la formación de puentes líquido-sólido. La influencia de estos factores en la aglomeración de partículas dentro de lechos fluidizados ha sido poco explorada, lo que motiva la presente investigación

Dicho esto, el enfoque de termo-viscosidad al mecanismo de formación de adherencias de silicatos en separadores de partículas, ofrece la posibilidad de explicar el modelo propuesto en términos de la condición que favorece un cambio en la viscosidad, la consiguiente condición de plasticidad y flujo de los materiales resultantes para formar las adherencias observadas que contienen los materiales involucrados y que se generan.

Esto se basa en la liberación de energía por la colisión de partículas y el impacto en la superficie interior del separador de partículas, así como en la temperatura resultante que favorece las condiciones descritas anteriormente. En este punto, vale la pena realizar un acercamiento a la reología, como la rama de la física que se ocupa de la deformación y el flujo de materiales, tanto sólidos como líquidos, pero también se aplica a microestructuras complejas, como los silicatos.

Para el estudio de dichos materiales anteriormente señalados, se consideran aquellos cuya viscosidad cambia con la velocidad de deformación, en cierto rango de temperatura, y se denominan fluidos no newtonianos.

Por lo tanto, para hacer frente a esta aparente discrepancia, se ha aceptado que la reología en general puede ser la respuesta porque da cuenta del estudio de líquidos con viscosidad dependiente de la velocidad de

deformación. Sus aspectos teóricos son la relación del comportamiento de flujo para la deformación del material y su estructura interna, como por ejemplo silicatos, y el comportamiento de este tipo de materiales que no pueden ser descritos por la mecánica de fluidos clásica o la elasticidad.

II. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

A. Mecanismo propuesto de formación de fayalita

El fenómeno estudiado se localiza en el interior de un separador de partículas localizados en la parte interna de los reactores de lecho fluidizado durante la reacción de óxido ferroso a hierro metálico, en el rango de 500°C a 800°C y presiones superiores a 5 bar.

En las adherencias que contienen los materiales que reaccionan, intervienen, principalmente, FeO y SiO₂, que se generan como producto del impacto de las partículas y las energías asociadas que se liberan a temperaturas en las condiciones operativas descritas anteriormente.

El mecanismo propuesto tiene como objetivo considerar la condición de las partículas que giran dentro del separador de partículas. Por tanto, el mecanismo se basa en formulaciones matemáticas para expresar los fenómenos considerados en términos de viscosidad aparente y consiguiente plasticidad observada en muestras de las adherencias de materiales con alta presencia de óxido ferroso, recolectadas de procesos industriales.

Estas adherencias se analizaron utilizando técnicas de macroataque tipo impresión de Bauman para observar líneas de distribución de materiales no metálicos y líneas de flujo de partículas, lo que proporcionó información importante para comprender el mecanismo propuesto que explica la formación de adherencias dentro del separador partículas.

La formación de adherencias se basa en términos de la condición que favorece un cambio de la viscosidad aparente y en consecuencia la aparición de la condición de plasticidad y fluidez de los materiales resultantes para formar las muestras observadas. El mecanismo propuesto se describe esquemáticamente en la figura 1.

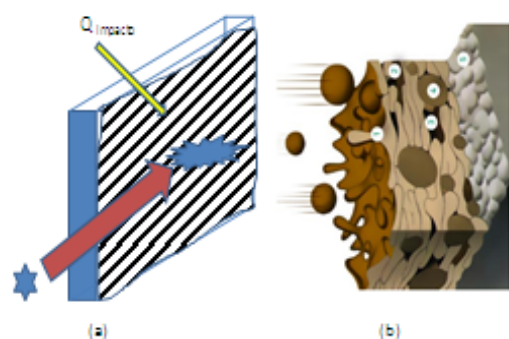


Figura 1: (a) Representa el esquema de impacto de una partícula contra una pared metálica (b) Indica cómo se van formando las capas de las costras por termo-adherencia.

En este mecanismo, las partículas sólidas se calientan durante la reacción de conversión de hierro ferroso a hierro metálico, al impactar la superficie del acero y su rugosidad, se vuelven viscosas como consecuencia del impacto libera suficiente energía (Fig.1 (a)), y se torna en un material viscoso (1), el cual es impulsada con el flujo de gas superponiendo las imperfecciones anteriores (2) y creando poros (3), generando los silicatos de Fayalita (Fig. 1 (b)). Por analogía es un proceso similar al del termorrociado de las superficies.

B. Balance de energía

El balance energético calculado y presentado en un documento anterior por [4] se resume en la Tabla 1.

TABLA I. BALANCE DE ENERGÍAS DENTRO DEL SEPARADOR DE PARTÍCULAS. [4].

Símbolo	Energía	(KJ/mol)	(Kcal/ mol)
Ec	Impacto contra el separador de partícula	103	30
Ev	Energía vacancia FeO	474	113
Ep	Impacto Partícula	13	3
Ei	Colisión inelástica	70	17
Total			
Energía		660	163

El cálculo de la energía total está de acuerdo con las energías reportadas por [5] para la reacción de formación de Fayalita, así como con el punto de ablandamiento de la sílice en el rango de 2000°C de aproximadamente 599 KJ reportada por [6]. Con la energía total calculada de 660 KJ / mol, que supera el reblandecimiento de la sílice, es posible concluir que la formación de Fayalita en el rango de temperatura estudiado

es termodinámicamente posible durante una condición intermedia viscosa.

C. Efecto de la temperatura en la viscosidad aparente.

Según los cálculos anteriores, el balance energético total es de 61 KJ / mol en exceso sobre los 599 KJ/mol para el ablandamiento de la formación de partículas de SiO₂ del silicato de Fayalita, coincidiendo notablemente con el rango de 61 a 65 KJ /mol considerado como la activación compensada, que es la energía para que se produzca la deformación-fluencia de las partículas de silicatos.

Para obtener el efecto de la temperatura sobre la viscosidad aparente, es necesario aceptar la condición pasada de energía de las partículas sólidas en la mezcla gas-sólidos.

Estas partículas que viajan en la corriente de gas caliente, no solo tienen una condición térmica adecuada, sino que, por un lado, las partículas que contienen hierro están en una estructura transitoria de óxido ferroso (FeO) a hierro, lo que a su vez significa un gradiente de energía adicional asociada a las vacancias, que liberan dicha energía. Por otro lado, entre las partículas de sílice en una ruta de colisión con la wustita, estas partículas se encuentran en condiciones de niveles de energía similares a las partículas de revestimiento térmico proyectadas sobre una superficie metálica a altas velocidades. Con estas condiciones, la ocurrencia de la reacción de fusión entre partículas, está asegurada.

D. Adherencia del silicato por acción de la fluencia

Habiendo asumido la formación de una fase viscosa formada por el FeO-SiO₂ como componentes básicos para la formación de silicatos, junto con la presencia adicional de MgO y hierro metálico, entonces es posible suponer que la fase viscosa se formó bajo una velocidad de gas de 75 m/s entrando a cada ciclón en ese momento, la aparición de una fuerza de deformación creará una situación de termo-viscosidad. La presencia de la fuerza de deformación sobre el silicato viscoso, llevó a considerar la combinación de esta con un régimen de fluencia. [7].

Para la consideración del régimen de fluencia, que es un efecto de temperatura dependiente, es un requisito considerar la temperatura de fusión (T_m) de las especies involucradas, en este caso la especie en cuestión es el hierro metálico. Esta relación fue impulsada para metales en polvo.

Los diferentes regímenes de fluencia para polvos metálicos, cubren aproximadamente los rangos de tem-

peratura del metal desde 0 hasta 1 veces la T_m . Este rango, tiene un rango inferior de 0.3-0.5, de la temperatura de fusión del metal considerado, para el cual se definió para una fluencia dependiente logarítmicamente de la temperatura, lo cual se rige por un factor de Arrhenius, que es similar a los flujos de metales líquidos.

La temperatura y la dependencia de la tensión de la fluencia por tracción se han estudiado en el hierro α ferromagnético en el rango de temperatura 620°C-800°C [8].

Utilizando el método de cambio de pendiente, se pueden obtener las energías de activación para la fluencia.

De esta manera, se demuestra que la energía de activación compensada por el modelo de simulación matemática, es esencialmente independiente de la tensión inicial y de la deformación hasta el punto de solidificación.

Con este método de cambio de pendiente se obtiene una energía de activación compensada por el modelo de 65 kcal/mol. Por otra parte, al graficar el logaritmo de la variación de la deformación compensada por el modelo versus el inverso de la temperatura absoluta, permite obtener una línea recta que representa una energía de activación compensada por el modelo de 62 kcal/mol. [9]. Estos valores, están esencialmente de acuerdo con el valor de auto difusión en este rango de temperatura.

E. Relación termoplástica y fluencia

El hecho de que las energías de activación, tanto la de fluencia y la de auto difusión, indica que el mecanismo del proceso de fluencia es controlado por difusión y, por tanto, por un movimiento de dislocación no conservador.

Esto significa que, a las velocidades de deformación y temperaturas empleadas, la concentración de vacancias promedio es sólo una pequeña perturbación de la concentración de vacante de equilibrio en las muestras no deformadas probadas. A partir de los datos de fluencia disponibles sobre algunos metales fcc, se muestra que es posible obtener una buena estimación de la energía para el movimiento de las vacantes. [10].

Desde un enfoque termo mecánico, se puede establecer el significado físico de la energía liberada por un tamaño de partícula definido dentro de la partícula separada. Como lo explica [10] que partiendo de la primera ley de Cauchy y multiplicando ambos lados por la viscosidad (v). Reorganizando los términos, finalmente se obtiene que:

$$\frac{D}{Dt} \left(\frac{v^2}{2} + \varphi \right) = (\nabla \cdot T) \cdot v + T : \nabla v \quad (1)$$

donde:

v = Viscosidad

φ = Gradiente potencial de borde

∇v = Disipación de energía

T = Temperature

El producto $T:\nabla v$ representa la disipación viscosa E_v .

La formación de acreciones en forma de conchas en la zona cilíndrica en el rango de temperatura superior a 600°C y presiones superiores a 10 bar, es posible en procesos de lecho fluidizado al trabajar con pesos moleculares en el gas de 10 g/mol.

Por tanto, la apariencia de termo-adherencia en el rango de temperatura estudiado de 600°C para alcanzar el punto de fusión del hierro requiere una validación ya que desde el punto de vista del choque entre partículas es posible que se libere energía suficiente para alcanzar el punto de termo plasticidad, es decir inicia el proceso de ablandamiento de las partículas.

La formación de acreciones en forma de conchas en la zona cilíndrica en el rango de temperatura superior a 600°C y presiones superiores a 10 bar, es posible en procesos de lecho fluidizado al trabajar con pesos moleculares en el gas de 10 g/mol.

Por tanto, la apariencia de termo-adherencia en el rango de temperatura estudiado de 600°C para alcanzar el punto de fusión del hierro requiere una validación ya que desde el punto de vista del choque entre partículas es posible que se libere energía suficiente para alcanzar el punto de termo plasticidad, es decir inicia el proceso de ablandamiento de las partículas.

F. Efecto de temperatura sobre la viscosidad aparente.

Una vez que se ha identificado y cuantificado la viscosidad aparente de los componentes estudiados, así como la participación de la fluencia en el mecanismo propuesto, el siguiente paso es determinar el efecto de la temperatura crítica para la ocurrencia en la termo-adherencia.

Como se mencionó anteriormente, en el mecanismo estudiado, existe un acondicionamiento inicial del óxido de hierro parcialmente reducido que se debe al calentamiento del mismo por el flujo de gas. Esta condición previa se ha relacionado con la tendencia a la adherencia de los minerales utilizados en los procesos de reducción en lecho fluidizado, esta es una tendencia particular de los diferentes minerales y sus mezclas utilizadas en el proceso [10].

En la Figura 2 se muestra la transición de la formación del paso del óxido ferroso a hierro metálico.

En esta figura, se muestra el efecto de la tasa de for-

mación de hierro metálico, opuesta a la reducción de hierro ferroso, sobre la temperatura crítica de adherencia durante el paso de wustita a hierro. Esto significa que, dependiendo de la etapa de reducción, existe una tendencia natural de las partículas calientes a desarrollar una tendencia activa de adherencia o potencial de adherencia [11].

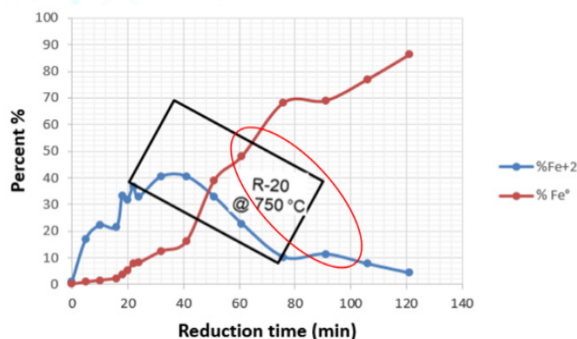


Figura 2: Transformación del hierro ferroso en hierro metálico en la zona estudiada [11] .

Los datos para la elaboración de la figura 3 se obtuvieron de ensayos industriales usados en una planta usando mezclas de minerales mixtos venezolanos y australianos y mineral 100 por ciento australiano.

De esta figura, se puede estimar los rangos de los valores de temperatura para la ocurrencia de adherencia (sticking) de partículas de hierro, parcialmente metalizadas en función de la formación de hierro metálico de las partículas durante su transferencia hacia dentro de los separadores de partículas.

Las temperaturas obtenidas, se pueden asumir como las temperaturas de trabajo u operación.

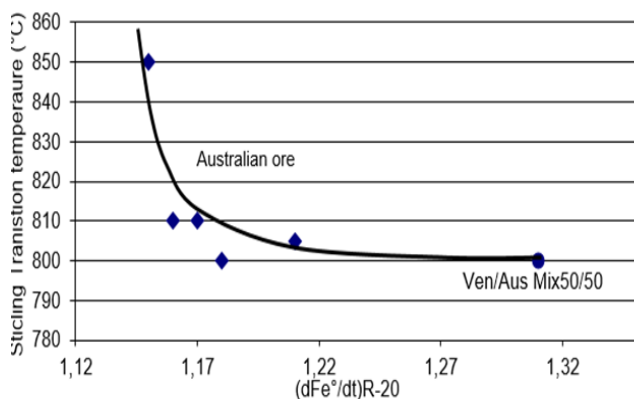


Figura 3: Efecto de la tasa de metalización sobre la temperatura crítica de adherencia. [11].

Este potencial de adherencia activado, así desarro-

llado por la partícula de óxido de hierro parcialmente reducida, ingresa al separador de partículas en vías de la eventual colisión contra la superficie de acero limpia durante la formación de acreción inicial o durante el desarrollo de acreción adicional. Este comportamiento cinético, se puede expresar matemáticamente según la siguiente ecuación:

$$Trop = 3,987(dFe^{\circ}/dt)^2 - 9974,9(dFe^{\circ}/dt) + 7027,8 \tag{2}$$

donde:

Trop=Temperatura real de operación

Fe°=Contenido de hierro metálico

t = Tiempo

Con una correlación R² de 0,7684, representando una confiabilidad de datos industriales mayor al 85%, considerado como muy aceptable por tratarse de datos industriales. [7].

III.METODOLOGÍA

En este punto se ha establecido claramente la base teórica y termodinámica adecuada para el mecanismo propuesto, y las relaciones empíricas entre las variables de temperatura crítica de adherencia, viscosidad y fluencia de los silicatos formados durante la colisión de partículas sólidas, así como con el impacto que existe entre las partículas y las superficies del separador de partícula. En las siguientes secciones se describen los pasos para obtener los resultados presentados.

A. Preparación de la muestra

Para corroborar el sistema observado, se tomaron muestras industriales sólidas de las acreciones formadas en el interno del separador de partículas, estas muestras fueron cortadas, desbastadas y atacadas con una solución de ácido sulfúrico al 12% para permitir revelar las líneas de flujo de la formación de las diferentes capas en dirección contraria del flujo de gas entrado por la boca del separador ciclónico.

B. Estimación de la constante de Termofluencia

Para la estimación se consideraron los valores reportados por [8] en función del rango de temperatura.

C. Estimación de la constante de Termofluencia para la temperatura de operación

Para esta estimación se graficaron los valores estimados de constantes de Termofluencia para diferentes temperaturas y se procedió a ubicar el valor del coe-

ficiente de adherencia en el rango de temperatura de operación.

D. Cálculo de la energía de activación en el sistema estudiado

Para este cálculo se consideró un peso molecular en el gas de 10 g/mol, se asumió cierto gradiente de temperatura entre los gases calientes y la partícula sólida del orden de los 30°C, y se graficó la temperatura de termofluencia en función de la constante utilizada, con el fin de visualizar el cambio de la temperatura en función de la energía de activación de Arrhenius.

IV. RESULTADOS

A. Fotografía de la muestra preparada

A continuación, se muestran el corte realizado a la muestra del separador mecánico de un proceso productivo de lecho fluidizado, para luego ser aplicada la técnica de macro ataques, después de haber pasado por un proceso de pulido sobre su superficie.

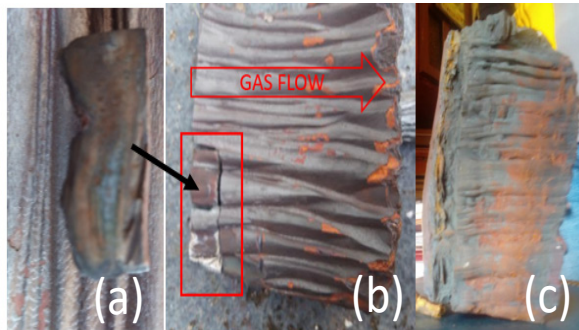


Figura 4: Muestra de acreción del flujo de gas y las líneas de fluencia (centro), las muestras tomadas de la cola entrante más delgada, Imagen (a) muestra la líneas de flujo y las capas de material depositado cuando son atacadas con ácido sulfúrico al 12% (lado del separador en el borde derecho) y el lado del gas a la izquierda de la imagen (b), que muestra las adherencias formada por el choque entre partículas, la imagen (c) muestra la forma de la líneas de flujo de las adherencias en la costras metálicas, en el punto donde disminuye la velocidad de impacto.

Este mecanismo propuesto cumple tanto con la termodinámica como con las condiciones del proceso para que se produzcan las acumulaciones.

B. Constantes de Termofluencia

TABLA II. Temperaturas y valores de las constantes de termoadherencia

Temperatura (°C)	Constante de Termoadherencia	Temperatura de Termoadherencia (°C)
461	0.3	460
700	0.5	767
1400	0.9	1381

C. Influencia de la temperatura en la constante de termo-adherencia.

El valor del coeficiente de adherencia en el rango de temperatura entre 600°C y 700°C oscila entre 0.478 y 0.514 con una correlación de 0.977, para materiales cerámicos. Estos valores, están en concordancia con el rango de coeficientes propuesto por McLean para metales en un proceso de fluencia controlado por difusión, para considerar un flujo similar en metales líquidos.

En la figura 5 se muestra como resultado la constante de termofluencia cuando se trabaja en un rango de temperatura de 600 a 700°C de 0.4784.

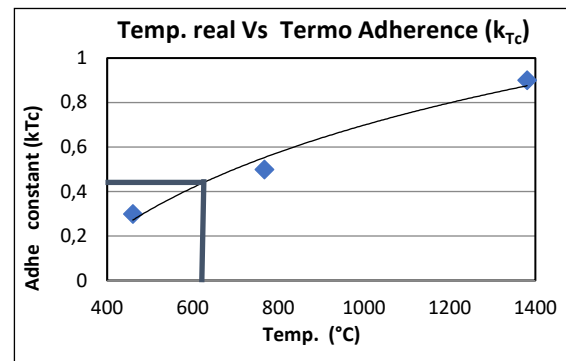


Figura 5: Constante de termofluencia en función de la temperatura.

Obtenida la temperatura de operación, permitiendo obtener un estimado de la constante de termofluencia, este valor será crucial para conocer la temperatura a ser utilizada en el simulador matemático, como se muestra en la ecuación 3. En esta ecuación, es representada $K_T c$ como la constante de termofluencia y T_r es la temperatura real de operación en grados centígrados, esto da un valor adimensional.

$$KTc = 0,5491 * \ln(Tr) - 3,095 \quad (3)$$

donde:

KTc=Constante de termoadherencia

Tr=Temperatura real de operación

Utilizando la diferencia de temperaturas, antes mencionada, para la ocurrencia de la termoadherencia, en el sistema considerado, en el rango de temperatura 600°C, para alcanzar el punto de fusión del hierro que se requiere recién formado, se obtuvo el valor de 0.478 de la constante de termoadherencia del sistema.

Este valor representa un cálculo con una modificación de la ecuación descrita por McLean, aplicada a sistemas cerámicos, pudiéndose asumir que, la ecuación modificada para definir la aparición de tensiones de fluencia en el sistema de estudio, se puede representar mediante la ecuación 4, y representada en la Figura 6.

$$Tc = 2.09121 * Tr - 10^{-12} \quad (4)$$

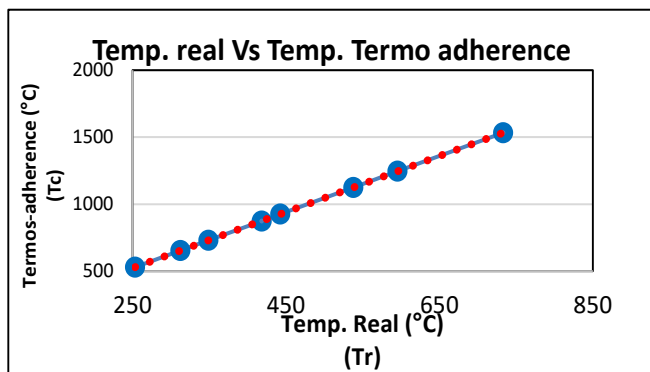


Figura 6: Correlación de temperaturas de termo-adherencia con las temperaturas reales de operación.

D.Energía de activación en el sistema estudiado

La formación de adherencias en forma de conchas en la zona cilíndrica en el rango de temperatura y presión estudiados, es posible en procesos de lecho fluidizado al trabajar con pesos moleculares en el gas de 10 gr / mol.

Para el desarrollo de la temperatura crítica para la termoadherencia de la partícula parcialmente reducida, es necesario asumir un cierto gradiente de temperatura entre los gases calientes y la partícula sólida.

Por lo tanto, en esta investigación se supuso una diferencia de 30 grados centígrados para que ocurriera la transferencia de calor. En la figura 7 se representa la temperatura de termofluencia, en el eje vertical en

función de la constante de termofluencia utilizada para visualizar el cambio de la temperatura en función de la energía de activación de Arrhenius.

$$\log K = \log A - \frac{E_A}{R} * \frac{1}{T} \quad (5)$$

donde:

K= Constante velocidad de reacción

A= Frecuencia de colisión de las moléculas

E_A= Energía de activación

R=Constante gases ideales

T= Temperatura

En la Figura 7 se representa la energía de activación mínima necesaria para identificar en mecanismo preponderante.

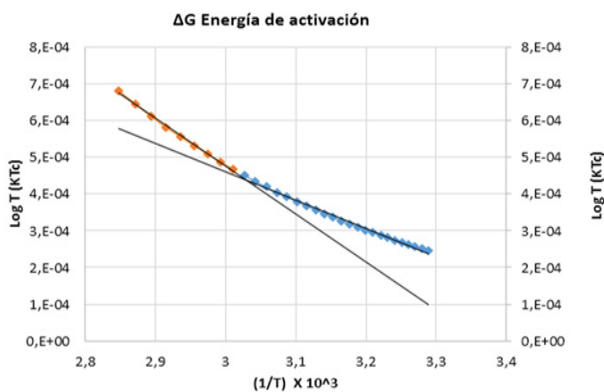


Figura 7: Energía de activación a través de la relación de Arrhenius. CD Control difusional; CQ Control químico; CM Control Mixto. (autor)

Los valores de energía de activación, para el rango de temperatura estudiado, para el caso de partículas colisionando, son útiles para identificar el mecanismo preponderante como son; un control difusional, control mixto y por último un control químico, los valores obtenidos para los distintos mecanismos son, los siguientes:

$$\log K = -0.013 * 1 / T + 0.0045 \quad (6)$$

$$\log K = 0.052 * 1 / T + 0.0038 \quad (7)$$

$$\log K = -0.0008 * 1 / T + 0.0028 \quad (8)$$

La influencia de la temperatura puede ser evaluada siguiendo la teoría de colisión de partículas descrita por

Arrhenius, en esta gráfica se genera un control químico donde puede ocurrir la formación de acumulaciones en el lecho por efecto del bogging, esto rectifica la primera hipótesis, un control difusional donde se presenta la sinterización y por último un control mixto, este se ve afectado por el cambio de la temperatura y la constante de termoadherencia.

La energía de activación es para el control difusional del orden de las 5.949 Kcal/mol; para el control químico 3.661 Kcal/mol y el control mixto 4.805 kcal/mol.

V. CONCLUSIONES

La aplicación de la teoría de colisión de partículas, ha resultado útil para determinar las energías generadas para que se produzca la formación de adherencias en los separadores de partículas en el rango de los 600°C a 800°C, para determinar la formación de la fayalita, en los sistemas que combinen la presencia de óxido ferroso, sílice y presencia de óxido de magnesio.

Los valores obtenidos para el coeficiente de adherencia para sistemas cerámicos oscilan entre 0.478 Y 0.514 con una correlación de 0.977, dentro del rango de temperatura estudiados, estos representan una ampliación de lo propuesto por Mc Clean para metales, y están en concordancia con el rango de coeficientes propuesto ya indicados, y pueden ser aplicados en estudios de procesos de fluencia controlado por difusión y para considerar un flujo similar en metales líquidos como sería el caso de termo rociado.

Este principio teórico ha permitido determinar una constante de termoadherencia que modifica la ecuación de McClen para metales tipos cerámicos, cuando la energía liberada en el interior del separador de partículas supere la temperatura del eutectoide del valor de transformación de óxidos sólidos a líquido, y sea suficiente para que los óxidos estudiados sean susceptibles a la termo-adherencia y consecuente plasticidad.

Los resultados presentados, es el resumen de la sumatoria de las energías liberada en el interior del separador mecánico resultando 660 KJ/mol superior a los 599 KJ/mol que se requiere para fundir el óxido de silicio a 2000 °C.

Aplicando la ecuación de Arrhenius fue posible determinar la energía de activación, para el control difusional (CD), químico (CQ), y mixto (CM). Obteniendo como resultado una energía de activación de 5.94 kcal/

mol CD; 3.66 kcal/mol CQ y 4,81 kcal/mol CM con un total de energía de activación de 14.41 kcal/mol para la formación de la fayalita, valor muy cercano al valor teórico, de un mecanismo de control mixto.

RECONOCIMIENTO

Los autores están especialmente agradecidos a la Dirección de Investigación de Posgrado en la UNEX-PO Puerto Ordaz, por la oportunidad de realizar esta investigación.

REFERENCIAS

- [1]Á. Prada, "Estudio alomeración en lecho fluidizado," pp. 3-52, 2014.
- [2]D. Fuller, "Fenómeno de snterización de finos en proceso de reducción directa," 1965.
- [3]Y. Zahang, Z. An y Z. Guo, "Apparent viscosity measurement of iron particles," Iternational symposium on higt-temperature metallurgical processing, pp. 559-564, 2015.
- [4]A. Echegaray, "Balance de energía en la formación de fayalita," Athena , vol. 02, n° 06, pp. 28-42, 2021.
- [5]D. Gaskell, "Introducción to themodinamica of materials", New York: Taylor & Francis, 2003, pp. 695-696.
- [6]E. Ringdalen, "Softening and meting of SiO2 an important parameter for reactions with quatz in Si production," pp. 43-44, 2016.
- [7]A. Echegaray, "Energy balance formation of sub-eutectoide fayalita at high pressures in particle separators," Athenea , vol. 02, n° 06, 2022.
- [8]D. McLean, "The physics of hightemperature creep in metals," Science, pp. 1-33, 1966.
- [9]L. Murty, M. Gold y A. Ruoff, "Higth-Temperature creep mechanisms in a iron alfa and other metals," vol. 41, n° 12, pp. 4917-4937, 1970.
- [10]J. Parker , "Creep and fracture of Engineering materials and structures," Londre: Maney Materials Science, 2001.
- [11]L. China, O. Bustamante y A. Barrientos, "Disipación de energía mecánica en la descarga de un hidrociclón," Dyna, vol. 80, n° 181, pp. 136-145, Octubre 2023.
- [12]O. Dam, "Effect of the metalization rate on the critical adhesion temperature," Orinoco Iron, Puerto Ordaz, 2002.

MODELACIÓN MATEMÁTICA DE LOS ESFUERZOS DINÁMICOS GENERADOS EN LAS SARTAS PETROLERAS EN ESTADO TRANSITORIO

José Salazar¹, Luis Rosales Romero¹, Jordán González¹, Franyelit Suárez Carreño²

¹Universidad Nacional Experimental Politécnica Antonio José de Sucre, UNEXPO, Vice Rectorado Puerto Ordaz, jrsalazar123@unexpo.edu.ve, lrosales@unexpo.edu.ve, xaxon.par@gmail.com

²Universidad de las Américas, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Carrera de Ingeniería Industrial, Quito-Ecuador; franyelit.suarez@udla.edu.ec

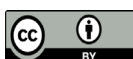
Resumen: El desarrollo de un modelo matemático para evaluar el desempeño de las sartas petroleras durante el proceso de perforación de un yacimiento, considerando las condiciones dinámicas y operaciones del equipo durante el desarrollo de sus funciones, tomando en consideración las propiedades mecánicas del acero API K55. A través de la investigación se logró obtener un conjunto de ecuaciones que permiten modelar el comportamiento de los esfuerzos y la deformación que se presenta en las herramientas petroleras, cuando son utilizadas para transmitir un par motriz que facilita la apertura del yacimiento. Se realizó un análisis de elemento finito que permitió conocer el comportamiento estructural de las sartas y la estimación del tiempo requerido para alcanzar las deformaciones de tipo permanente, así como el tiempo que tardarían las sartas antes de generar una falla.

Palabras clave: Deformación, Esfuerzos; Sarta Petrolera, Vida útil.

FAYALITE FORMATION MECHANISM IN PARTICLE SEPARATORS

Abstract: Oil drilling has required tubular extensions called strings, experience a significant increase in torsional moment and axial loads, coming from the mechanical transmissions of the drilling tower, these operating parameters compromise the operational durability of the extensions leaving the possibility of a structural failure during the work performed by the towers, putting at risk the integrity of the equipment and its operators, the research allowed to evaluate the behavior of both normal and shear stresses considering the equipment working at its maximum load capacity where computational results were obtained with the application of finite elements of type concludes in the performance of the string, which obtained a safety factor of 7.7351 being a good indicator that guarantees optimal operational performance in the same way the presence of Von Mises efforts was evaluated reached a maximum value of 11.144 Mpa, located in the central zone of the element and the total deformation that is of the vector type obtained a module of 0.56608 mm in conclusion the computational analysis allowed to evaluate the behavior of the string in the scenario where the transmission reaches its Maximum capacity without causing structural failure.

Keywords: Deformation, Stress, String, Simulation.



INTRODUCCIÓN

El desarrollo tecnológico de ingeniería en la estimación de la vida útil de los elementos de máquinas ha evolucionado significativamente con la aplicación de los elementos finitos, al permitir predecir las fallas que afectan el sistema productivo de manera prematura, mediante un análisis computacional se puede tomar decisiones oportunas que conlleven a de manera eficiente al óptimo desempeño de la máquina.

La perforación de pozos petroleros somete a las sartas a complejas cargas dinámicas. Comprender y predecir estos esfuerzos transitorios es crucial para asegurar la integridad estructural y la eficiencia operativa. La modelación matemática se presenta como una herramienta fundamental para analizar el comportamiento mecánico de las sartas bajo estas condiciones variables. Este estudio se enfoca en la modelación de los esfuerzos dinámicos en sartas petroleras en estado transitorio, buscando proporcionar una base para optimizar el diseño y las operaciones de perforación.

I.FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El desarrollo de las aperturas petroleras a nivel global, requieren el uso de herramientas de perforación, que permiten llegar a las reservas de petróleo en los más profundos del lecho terrestre, con el uso de equipos de alta tecnología que ofrecen un desempeño acorde a los requerimientos operacionales en el área de trabajo, donde se exponen a diversas condiciones climáticas [1].

Las herramientas de perforación modernas operan en condiciones adversas y diversas formaciones. La perforación en aguas profundas, a más de 300 metros, ha avanzado significativamente con tecnologías como toberas de presión y sistemas de perforación direccional (RSS). Estas innovaciones mejoran la eficiencia y seguridad de las operaciones, reduciendo el tiempo y los costos asociados [2], [3].

La comprensión de las fallas por deformación en sartas petroleras es crucial debido a las cargas extremas al abrir yacimientos, resultado de la interacción con rocas y fluidos. Investigaciones recientes se centran en optimizar el diseño de las sartas para aumentar su resistencia y reducir fallas prematuras, lo cual es esencial para la eficiencia y seguridad de la perforación [4].

Investigaciones en ingeniería de perforación resaltan la importancia del comportamiento dinámico de las sartas para su durabilidad [4], donde modelos y simulaciones muestran que las vibraciones torsionales y axiales aceleran el desgaste y la fatiga. El monitoreo avanzado en tiempo real permite detectar anomalías, facilitando intervenciones preventivas para prolongar la vida útil y mejorar la eficiencia de las operaciones de perforación.

El desgaste y las deformaciones en sartas petroleras al final de su vida útil [5] pueden causar fallas que detienen la apertura del yacimiento. Para abordar esto, se desarrolla un modelo matemático transitorio que analiza los esfuerzos y deformaciones generados por el sistema motriz que impulsa axialmente la sarta. El objetivo de este modelo es comprender y predecir el comportamiento de la sarta bajo cargas axiales para prevenir posibles fallas operacionales [6].

II.PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO

A. Revisión de Literatura: Algunos autores [5] analizan los gradientes de presión durante el avance de sartas y presentan modelos predictivos. Las mayores incertidumbres radican en las pérdidas por fricción viscosa, afectando el cálculo de fuerzas de fricción. Dada la limitación en la medición de presión en tiempo real, el modelo utiliza presiones en el fondo del pozo. Este enfoque permite la calibración del modelo para operaciones consecutivas con las bombas encendidas.

Modelos matemáticos predicen la secuencia y magnitud de esfuerzos inducidos por el movimiento de hidrocarburos en las sartas, lo cual es esencial para su comprensión y mitigación. Estos estudios, que también consideran la respuesta sísmica de reservorios fracturados [7], optimizan la extracción y minimizan riesgos operacionales al mejorar la comprensión del yacimiento y las tensiones en las sartas [8].

B. El modelo físico de las sartas petroleras Las sartas son herramientas de perforación con una geometría cilíndrica hueca como se muestra en la figura 1, cuyo rol principal es permitir el avance axial de la broca, durante la apertura de un yacimiento [9], estos elementos durante el desarrollo de sus funciones experimentan la aplicación de un gran torque motriz proveniente de la mesa rotaria, ubicada en la torre de perforación.



Figura 1. Tipo de sarta petrolera seleccionada para el estudio

Para el desarrollo del modelo matemático se aplicó

el análisis de diferencial de un elemento finito, basada en las siguientes consideraciones a tomar en consideración en el campo de aplicaciones de las ecuaciones a deducir:

- La sarta petrolera está constituida de un material dúctil.
- El acero de la sarta petrolera posee una composición homogénea.
- Los esfuerzos normales generales están dentro de la elástica.
- Una sección transversal uniforme en toda su longitud.
- Los esfuerzos generados durante la aplicación de torque no superan el esfuerzo de fluencia del material.
- Se asume una distribución lineal de los esfuerzos cortante, debido a la simetría transversal de la sarta.
- Se considera que el extremo que permanece fijo no experimenta ningún tipo de deformación angular o cortante.
- Se asume una distribución uniforme del torque a la largo de la sarta.

C.El modelo matemático: Se dispone de un eje circular hueco unido a un soporte fijo representado por la circunferencia de color marrón en uno de sus extremos como se observa en la figura 2, y se aplica un momento torsor T al otro extremo, el eje se deformará al girar su extremo libre generando un ángulo de giro llamado θ , debido al desplazamiento angular que experimenta el punto o ubicado en el extremo libre por la acción torque, de igual manera la barra experimenta deformaciones cortantes de tipo longitudinal denotada como γ , presentado en la figura 2.

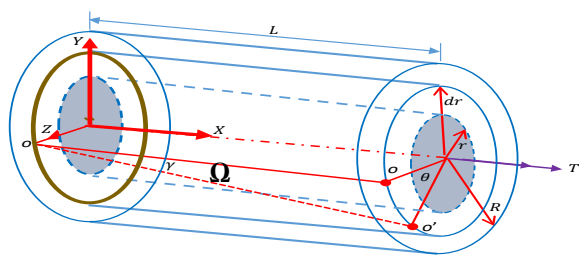


Figura 2 Elemento diferencial de la sarta petrolera.

Por lo tanto, el momento torsor (T) queda definido por:

$$T = \int_0^R r \cdot dF \quad (1)$$

Donde T : Momento torsor, dF : Diferencial de fuerza, r : Radio de interno del cilindro, R : Radio externo del cilindro.

Teniendo presente que el esfuerzo cortante (1) viene definido por según (14):

$$\tau = \frac{dF}{dA} \quad (2)$$

Donde: τ : Esfuerzo cortante, dA : Diferencial de área, dF : Diferencial de fuerza.

Remplazando (1) en (2) se obtiene:

$$T = \int_0^R r \cdot \tau \cdot dA \quad (3)$$

Sustituyendo (1) en (3) resulta:

$$T = \int_0^R r \cdot \tau_{max} \cdot \frac{r}{R} \cdot dA \quad (4)$$

Teniendo presente que el radio externo es constante y el esfuerzo cortante máximo permanece constante en el borde externo de la sarta, se tiene obtiene:

$$T = \frac{\tau_{max}}{R} \int_0^R r^2 \cdot dA \quad (5)$$

Considerando que el área de un cilindro está definida por $A = \pi \cdot r^2$, por lo tanto, $dA = 2\pi \cdot r \cdot dr$ sustituyendo en (17)

$$T = \frac{\tau_{max}}{R} \int_0^R 2\pi \cdot r^3 \cdot dr \quad (6)$$

Resolviendo la integral se obtiene $J = \frac{\pi}{2} R^4$, siendo este el momento polar de inercia, en este sentido el esfuerzo cortante máximo queda definido por:

$$\tau_{max} = \frac{T \cdot R}{J} \quad (7)$$

Donde τ_{max} : Esfuerzo cortante máximo, R : Radio externo del cilindro, J : Momento polar de inercia.

IV. RESULTADOS

El accionamiento de la sarta petrolera al abrir un ya-

cimiento se efectúa mediante la mesa rotaria, que aplica potencia a la sarta para transmitirla a la broca como un eje tubular (Figura 3). Durante este proceso, la sarta experimenta un momento torsor directamente proporcional a la potencia y la velocidad angular del eje.



Figura 3 Conjunto sarta petrolera con broca de perforación

La potencia (Pot): se define como el trabajo realizado por unidad de tiempo. Por su parte, el trabajo transmitido por un eje giratorio es igual al par aplicado por el ángulo de rotación, Por lo tanto, si durante un instante de tiempo dt se aplica un par torsor T a hace que la sarta gire un ángulo $d\theta_x$, entonces la potencia instantánea es:

$$Pot = T \cdot \frac{d\theta_x}{dt} \quad (8)$$

Como la velocidad angular del eje $w = \frac{d\theta_x}{dt}$, la potencia puede expresarse de la siguiente manera

$$Pot = T \cdot w \quad (9)$$

Donde: T : Momento torsor: w : Velocidad angular de la barra;

Al sustituir el torque de la ec.8 en la ec.9 se obtiene:

$$\theta_x = \frac{Pot \cdot L \cdot dt}{J \cdot G \cdot d \theta_x} \quad (10)$$

Integrando con respecto a θ_x se obtiene:

$$\theta_x = \left(\frac{2 \cdot Pot \cdot L}{J \cdot G} \cdot t \right)^{1/2} \quad (11)$$

Que representa deformación angular de la sarta petrolera en estado transitorio.

De manera similar se determina la deformación cortante en estado transitorio al sustituir la ec.12 en la ec.9 y reordenando se obtiene:

$$\gamma_{max} = \left(\frac{2 \cdot Pot \cdot R^2}{J \cdot G \cdot l} \cdot t \right)^{1/2} \quad (12)$$

Para determinar la ecuación de los esfuerzos cortantes en estado transitorio, se aplica la ley de Hooke, al multiplicar en ambos lados de la ec.13 por el módulo de rigidez y simplificando la ecuación queda de la siguiente forma:

$$\tau_{max} = \left(\frac{2 \cdot Pot \cdot G \cdot R^2}{J \cdot L} \cdot t \right)^{1/2} \quad (13)$$

Considerado que momento polar de inercia para cilindros huecos viene definida por:

$$J = \frac{\pi}{2} (R^4 - r^4) \quad (14)$$

Sustituyendo la ecuación del momento polar de inercia definida por la ec. 27 en la ec. 14 y simplificando queda:

$$\tau_{max} = \left(\frac{4 \cdot Pot \cdot G \cdot R^2}{\pi \cdot (R^4 - r^4) \cdot L} \cdot t \right)^{1/2} \quad (15)$$

A. Análisis de una sarta petrolera con un acero API K55: La tabla 1 muestra las propiedades mecánicas del acero API K55, que incluyen la rigidez, el esfuerzo de fluencia y el esfuerzo último.

TablaI: Propiedades mecánica del acero API K55.

Tipo de acero	API K55	Unidades
Módulo de rigidez	205	Gpa
Esfuerzo de fluencia	552	Mpa
Esfuerzo último	655	Mpa

Para efecto de este trabajo se dispone de una sarta petrolera con la siguiente información técnica de opera-

ción como se muestra en la tabla II.

TablaII: Dimensiones de la sarta petrolera

Parámetro	Dimensión	Unidad
Radio externo	0.12	m
Radio interno	0.10	m
Profundidad de perforación	2000	m
Potencia motriz	20000	watt

En la figura 4 se muestra la distribución del esfuerzo cortante con un aumento en el tiempo, mediante el análisis estima la vida útil de la sarta en condiciones dinámicas, al considera la variación de los esfuerzos normales con la broca atascada, la estructura de la sarta experimenta esfuerzos normales en lapsos cortos, esto puede causar la fractura de la herramienta bajo condiciones dinámicas, se estimar la vida útil es importante para la seguridad operativa y ayuda a prevenir fallas por exceder los límites del material.

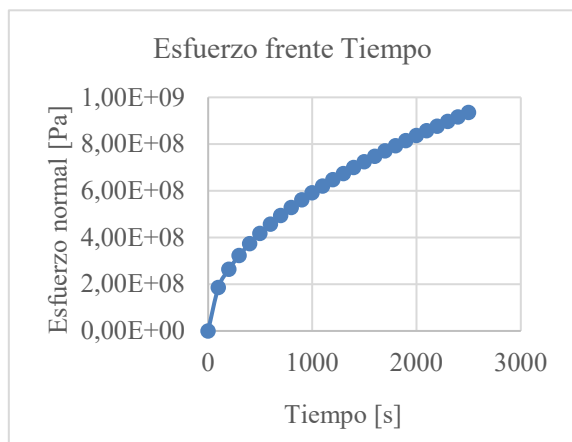


Figura 4 Esfuerzo frente Tiempo

B.Estimación de tiempo de deformación y falla de la sarta petrolera: El acero API K55, con un esfuerzo de fluencia de 552 MPa y uno último de 655 MPa (considerados constantes), permite estimar gráficamente el tiempo para superar la deformación elástica y para la falla por cortante. Esta relación gráfica, ilustrada en la Figura 5, es útil para predecir el comportamiento de la sarta y anticipar los límites de deformación y rotura.

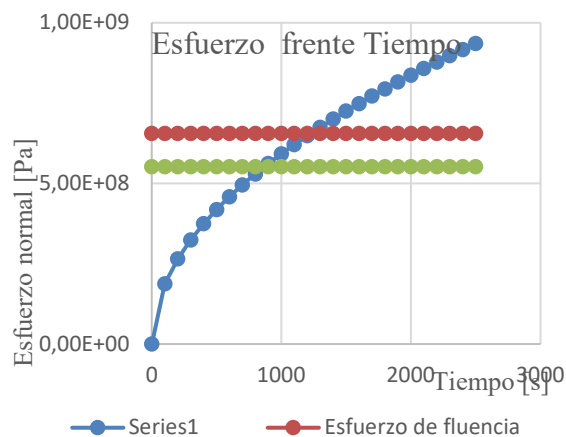


Figura 5. Esfuerzo frente Tiempo

Las deformaciones permanentes inician a los 900 segundos. La rotura por exceso de esfuerzos cortantes ocurre a los 1200 segundos. Si la broca se tranca, el operador tiene menos de 20 minutos para liberarla. Esto asumiendo que la transmisión de la torre permanece encendida, exceder este tiempo lleva a la rotura de la sarta petrolera. La falla se debe a la superación de la capacidad máxima de los esfuerzos normales, el acero API K55 no resiste esfuerzos prolongados más allá de este límite, una acción rápida es crucial para evitar la rotura en caso de atascamiento.

C.Análisis del factor de seguridad: En un equipo es primordial en la perforación petrolera, donde el factor de seguridad (relación entre esfuerzo último y los generado) debe ser mayor que uno para garantizar la operatividad. Un valor inferior indica una falla por sobrepasar la capacidad del acero, influenciado directamente por los parámetros de operación como se muestra en la figura 6.

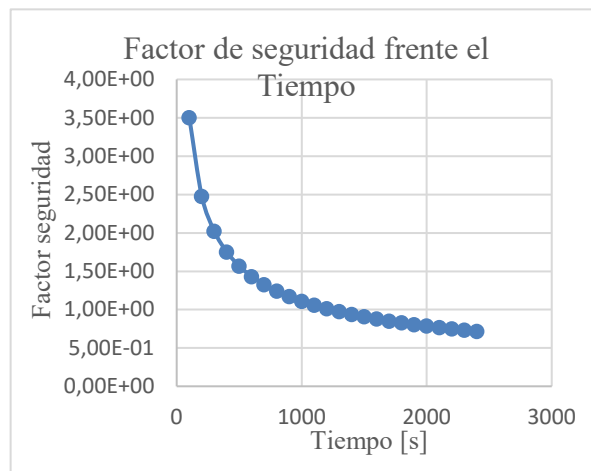


Figura 6. Factor de Seguridad frente el Tiempo

El material de la sarta alcanza su resistencia máxima a los 1200 segundos, después de este tiempo, los esfuerzos superan la capacidad del acero API K55, causando rotura, la figura 9 informa al operador sobre el tiempo seguro de maniobra ante un atascamiento, permitiendo ahorrar tiempo al prevenir fallas que retrasarían la apertura del yacimiento, al conocer este límite de ayuda a una operación más segura y eficiente.

IV. CONCLUSIONES

Se desarrolló un modelo matemático para predecir las deformaciones y esfuerzos transitorios en sargas petroleras durante la aplicación de torque al abrir un yacimiento. Este modelo utiliza ecuaciones diferenciales para describir la dinámica de la sarta bajo fuerzas externas y condiciones de frontera.

La deformación permanente compromete la sarta, siendo 900 segundos un tiempo de referencia para el diseño de procedimientos y selección de materiales que minimicen este riesgo en perforación y producción. Esto busca preservar la integridad y eficiencia de la sarta.

La vida útil estimada de una sarta petrolera de acero API K55 bajo condiciones dinámicas y atascamiento de broca con transmisión encendida es de 1200 segundos. Este valor, obtenido mediante experimentación y modelado numérico bajo cargas cíclicas y torsionales extremas, es crucial para predecir la durabilidad de la sarta.

El estudio también sugiere que la optimización del diseño de la sarta, como la selección de materiales con mayor resistencia a la fatiga y la implementación de revestimientos protectores contra la corrosión, puede extender la vida útil más allá de los 1200 segundos bajo condiciones operativas adversas.

REFERENCIAS

[1]F. G. Clapp, «Review of Present Knowledge Regarding the Petroleum Resources of South America», Transactions of the AIME, vol. 57, n.o 01, pp. 914-967, dic. 1917, doi: 10.2118/917914-G

[2]G. Herrera-Franco, F. J. Montalván, A. Velastegui-Montoya, y J. Caicedo-Potosí, «Vulnerability in a Populated Coastal Zone and Its Influence by Oil Wells in Santa Elena, Ecuador», Resources, vol. 11, n.o 8, p. 70, jul. 2022, doi: 10.3390/resources11080070.N. R. Madela, L. Scalvenzi, y K. Venkateswarlu, «Microbial degradation of total petroleum hydrocarbons in crude oil: a field-scale study at the low-land rainforest of Ecuador», Environmental Technology, vol. 38, n.o 20, pp. 2543-2550, oct. 2017, doi: 10.1080/09593330.2016.1270356.

[3]M. Z. Lukawski et al., «Cost analysis of oil, gas, and geothermal well drilling», Journal of Petroleum Science and Engineering, vol. 118, pp. 1-14, jun. 2014, doi:

10.1016/j.petrol.2014.03.012.

F. A. Assaad, «Surface Geophysical Petroleum Exploration Methods», en Field Methods for Petroleum Geologists, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009, pp. 21-23. doi: 10.1007/978-3-540-78837-9_3.

[4]N. Dai, A. Vafidis, y E. R. Kanasewich, «Wave propagation in heterogeneous, porous media: A velocity-stress, finite-difference method», GEOPHYSICS, vol. 60, n.o 2, pp. 327-340, mar. 1995, doi: 10.1190/1.1443769.

[5]J. L. Ramirez y G. Larrazabal, «Imagenología sísmica 3D post-apilamiento en exploración petrolera». Conference CIMENICS 2010.

[6]M. Borregales, O. Jiménez, y S. Buitrago, «Generación de mallas de cuadriláteros para yacimientos bidimensionales con fronteras internas complejas», 2009, doi: 10.13140/RG.2.1.4791.9520.

[7]N. Quintero y F. Calvete, «Desarrollo de un modelo computacional para flujo bifásico en tres dimensiones usando el método de volúmenes finitos,» 2017. [En línea]. Available: earthdoc.org. [Último acceso: 2023].

[8]J. Perira, «Simulación computacional en la industria del gas y petróleo. Casos de aplicación,» Atenea, vol. 9, p. 8-10, 2022.

[9]V. Dávila, «Análisis y simulación numérica por MEF de los esfuerzos y deformaciones sometidas a cargas y temperaturas en ductos terrestres para transporte de petróleo,» Instituto Politécnico Nacional, Colombia, 2015.

[10]M. Martínez, Daniel Insausti y A. Corales, «Análisis y Modelado de los Esfuerzos en una Sección de Cemento de un Pozo Petrolero Utilizando el Método de Elementos de Contorno (MEC),» Mecánica Computacional, vol. XXXI, pp. 1065-1083, 2012.

[11]F. García y E. Alarcón, «Simulación numérica por el Método de los Elementos de Contorno. Utilización de elementos isoparamétricos parabólicos,» de 1er. Simposium Nacional sobre Modelado y Simulación en la Industria y Servicios Públicos, Sevilla, 1980.

[12]Y. Del Toro, J. Ortiz y Y. Pimienta, «Biblioteca Digital Personalizada sobre Simulación Numérica en la Industria petrolera,» Universidad de las Ciencias Informáticas, Cuba, 2010.

[13]K. Gao, S. Fu, R. L. Gibson, E. T. Chung, y Y. Efendiev, «Generalized Multiscale Finite-Element Method (GMsFEM) for elastic wave propagation in heterogeneous, anisotropic media», Journal of Computational Physics, vol. 295, pp. 161-188, ago. 2015, doi: 10.1016/j.jcp.2015.03.068.

[14]F. Marcondes y K. Sepehrnoori, «An element-based finite-volume method approach for heterogeneous and anisotropic compositional reservoir simulation»,

Journal of Petroleum Science and Engineering, vol. 73, n.o 1-2, pp. 99-106, ago. 2010, doi: 10.1016/j.petrol.2010.05.011
[15]P. Blondel, «Computer-assisted interpretation», en

The Handbook of Sidescan Sonar, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009, pp. 249-276. doi: 10.1007/978-3-540-49886-5_11.

PROPUESTA DE UN SISTEMA DE APERNADO DE LAS BARRAS COLECTORAS EN LAS CELDAS P-19 DE C.V.G. VENALUM

Maita Aymara, Rojas Francisco, Tablero Ángel, Barreto Pedro.

{aymara.maita, frojashdez37, angeltablero30, pedrobarretoj98}@gmail.com

Afiliación institución o empresa

Resumen: En esta investigación se presenta la evaluación del comportamiento de las uniones apernadas de las barras colectoras a los flexibles catódicos en una celda P-19 con la propuesta de sustituir su sistema de conexión por soldadura por uniones apernadas similar a la empleada en celdas de V Línea. Haciendo uso de software de análisis de elementos finitos, se analizaron los resultados de las distribuciones de temperatura, distribución de potencial eléctrico y densidades de corriente en el conjunto del sistema apernado y comparó con las mediciones realizadas en la celda de prueba. Se realizó además el diseño de un nuevo modelo bimetalico con mayor área de contacto para así mejorar la conducción eléctrica y se realizó también la evaluación termoeléctrica con el nuevo modelo bimetalico cobre-aluminio.

Palabras clave: Barras colectoras, bimetalico cobre-aluminio, flexibles catódicos, potencial eléctrico.

PREPARATION OF PAPER FOR RESEARCH CONFERENCES

Abstract: In this research, the evaluation of the behavior of the bolted joints of the busbars to the cathode flexes in a P-19 cell is presented, with the proposal to replace its welding connection system with bolted joints, similar to the one used in V Line cells. Using finite element analysis software, the results of the temperature distributions, electric potential distribution and current densities in the bolted system as a whole were analyzed and compared with the measurements made in the test cell. In addition, the design of a new bimetallic model with a larger contact area was carried out in order to improve electrical conduction and the thermoelectric evaluation was also carried out with the new model copper-aluminum bimetallic

Keywords: Busbars, cathode flexible, copper-aluminum bimetallic, electrical potential.



I. INTRODUCCIÓN

La empresa productora de aluminio primario de Venezuela CVG VENALUM posee tres tipos de celdas electrolíticas para producir aluminio: celdas P-19, Hal-230 y V-350. Las celdas P-19 son las más numerosas, pero su tecnología es la más antigua, estas celdas operan con un amperaje de 156 KA y una caída de potencial eléctrico por celda de $(4,65 \pm 0,10)$ voltios. Actualmente sólo está operativa una de las cuatro (4) líneas de celdas P-19. En consecuencia, C.V.G VENALUM se plantea alternativas de cómo recuperar y simultáneamente optimizar el funcionamiento de sus celdas P-19. Uno de los proyectos planteados es sustituir su sistema de conexión por soldadura entre las barras colectoras de acero y los flexibles del cátodo de aluminio por un sistema de apernado [1]. El sistema de apernado no es nuevo en la empresa porque es el sistema que siempre se ha usado en las celdas Hal-230. Así, un apernado para las P-19 está fundamentado en el sistema usado en las Hal-230, se ameritan estudios experimentales, o pruebas operativas, junto con los teóricos, como simulaciones termoeléctricas, para optimizar su diseño [4]. Por ello se plantea la sustitución del sistema actual de conexión eléctrica por soldadura entre las barras conductoras de acero y los flexibles catódicos de aluminio por un nuevo sistema de conexión apernado con la finalidad de bajar los costos operativos y la ejecución de horas hombre. Las celdas P-19 tienen un total de 28 conexiones por soldadura. Con el sistema de apernado eliminar la soldadura de unión ya no será necesario y se dispondrá de un sistema de conexión versátil y estable que solo amerita aflojar los tornillos del apernado para separar los flexibles de las barras colectoras; para luego usar el sistema en la siguiente celda a conectar por medio del apriete de los tornillos mediante pistola neumática. Se hace necesario hacer pruebas experimentales de las conexiones apernadas para medir la temperatura y las caídas de voltaje, los cuales deben ser inferiores o muy parecidas a la situación actual. El proyecto de prueba incluye un nuevo diseño de apernado en todas las 28 conexiones, este modelo con respecto al ya probado en las dos barras incrementa el área de contacto entre la placa de cobre y la barra colectoras de acero, para aumentar la conductividad eléctrica.

El proyecto contempla realizar simulaciones termoeléctricas al modelo ya existente de la celda con los distintos modelos de apernado y el soldado para pre-

decir el fenómeno y obtener por predicción su mejor diseño [9]. Se propone evaluar las uniones apernadas en la barra catódica-flexible catódicos con bimetálico cobre-aluminio en el ensamblaje del conjunto de bloques catódicos para su uso en el proceso de producción de las celdas P-19. Las uniones apernadas al ofrecer una instalación más eficiente y simplificada, tienen el potencial de reducir significativamente los costos asociados con la mano de obra, los consumibles y el mantenimiento de equipos utilizados en los procesos de soldadura [7]. La facilidad de desmontaje y montaje que proporcionan las uniones apernadas puede mejorar la eficiencia en el mantenimiento, lo que a su vez tiene el potencial de reducir el tiempo de inactividad de una celda, optimizando la productividad general de la instalación. La soldadura conlleva riesgos relacionados con la exposición al calor, humos, radiación y peligros asociados con la manipulación de equipos y materiales. Esto significa una menor exposición a riesgos laborales, lo que resulta en un ambiente de trabajo más seguro.

La implementación de uniones apernadas presenta ventajas al reducir costos de preparación, consumibles e inspecciones; disminuir tiempo de ensamblaje; facilitar el aflojado/reajuste con herramientas convencionales; mejorar la accesibilidad al unirse por un lado de las piezas. En planta se utilizan los dos métodos de unión para las barras y flexibles catódicos el sistema de conexión apernada y el de conexión por soldadura. El método de unión por soldadura es conocido como el de mayor confiabilidad para las conexiones eléctricas, sin embargo, las uniones apernadas también garantizan conexiones eléctricas que funcionan satisfactoriamente durante el tiempo de servicio que se requiera como es el caso de las uniones apernadas en las celdas de V Línea. Adicional a esto las uniones apernadas son simples y de fácil instalación en comparación con las uniones soldadas que requieren movilizar equipo especial al lugar de la instalación y habilidad del personal, especialmente en los casos de los espacios que operan con alto amperaje y por consiguiente con el efecto del campo magnético, como es el caso de una línea de reducción electrolítica, lo que puede afectar la calidad y eficiencia del proceso de soldadura. Otro aspecto importante es la cantidad de materiales, equipos, mano de obra y tiempo de ejecución que requiere la unión por soldadura con respecto a la unión apernada (ver Tabla I).

TABLA I: CONSUMIBLES, EQUIPOS, MANO DE OBRA, TIEMPO DE EJECUCIÓN Y COSTO POR CELDA

Método de unión	Corte y Soldadura Celda P-19	Sistema Apernado Celda V L
Materiales y Equipos por Celda	Consumibles: Acetileno, Oxígeno, Alambre para soldar AWS Máquina de soldar Micro-Wire Esmeril neumático	Tornillos, tuercas arandelas Lija, Llave T, Cepillo de alambre Pistola neumática Dado
Mano de obra (personas)	11	7
Tiempo (h)	16	5
Costo por celda (\$)	4.486,34	498,79

Para este estudio se modificó en una celda P-19 el sistema de conexión de las barras-flexibles catódicos en dos (2) de las 28 conexiones de la celda y luego de incorporarla al circuito de operación de la línea se realizó la evaluación del comportamiento de las conexiones apernadas con mediciones de caída de voltaje para su evaluación [6]. Se realizó simulaciones termoeléctricas al modelo ya existente de la celda con los distintos modelos de apernado y soldado. En el capítulo II se expone el proceso de acondicionar la celda para la prueba y la propuesta de un nuevo diseño de bimetalico. En el capítulo III se exponen los resultados de la prueba experimental y de las simulaciones termoeléctricas a los distintos modelos. En el capítulo IV están las conclusiones de la investigación.

II. DESARROLLO

La propuesta consiste en modificar el sistema de conexión de las barras-flexibles catódicos de las celdas P-19 de la modalidad de unión soldada a la de unión apernada. Se evaluó la opción de fabricar bimetalicos a la medida de las barras catódicas P-19. Así como las ventajas y desventajas a nivel logístico-operativo en cuanto a montaje y desmontaje del cátodo y también la conexión y desconexión de barras por condiciones operativas (altas caídas de voltaje, celdas con hierro catódico).

2.1 Acondicionamiento de la celda de prueba

Para la prueba se realizaron las siguientes actividades:

Revisión del comportamiento histórico de las unio-

nes soldadas y apernadas en celdas P-19 y V Línea, respectivamente, en cuanto a caída de voltaje en las conexiones barras-flexibles catódicos. Mostrando para las celdas P-19 valores entre 20 mV y 35 mV; para el caso de las celdas V Línea los valores oscilan entre 10mV y 20 mV (Tabla II).

Se maquinó 200 mm en el extremo de la barra fuera de la cuba y perforó dos agujeros a la barra catódica para la ubicación de los pernos. Se ensambló las barras maquinadas a un bloque catódico de P-19 y reacondicionó una cuba con este bloque catódico en la ubicación seleccionada (posición: bloque 11).

TABLA II: COMPORTAMIENTO DE LA CAÍDA DE VOLTAJE EN CONEXIONES DE CELDAS P-19 Y V LÍNEA

CELDA CONEXIÓN SOLDADA			CELDA CONEXIÓN APERNADA		
FECHA	CELDA (P-19)	CAÍDA VOLTAJE (mV)	FECHA	CELDA (V L)	CAÍDA VOLTAJE (mV)
9/9/22	139	25	11/11/22	1060	15
16/2/23	206	20	24/11/22	914	10
14/4/23	130	20	25/11/22	1066	15
28/4/23	116	23	28/11/22	901	12
12/2/24	282	24	1/12/22	929	11
16/2/24	138	24	2/12/22	902	14
20/2/24	140	22	9/12/22	1009	13
29/2/24	136	23	13/12/22	1054	14
1/10/24	125	33	20/12/22	1039	13
17/10/24	286	32	28/12/22	940	14
18/10/24	279	33	18/5/23	1040	22

Se instaló el casco y la superestructura en el espacio de la celda 129. Se apernó las dos (2) barras a los flexibles de cobre-aluminio y en el resto de las 26 barras catódicas la unión a los flexibles catódicos se realizó con soldadura. Una vez acondicionada la celda y realizados los cambios requeridos para la prueba de la conexión apernada en dos barras de un mismo bloque catódico se programó su incorporación a la línea.

En el modelo que se tiene de la celda P-19 para la simulación termoeléctrica se realizó modificación en la conexión de dos (2) de las barras reemplazando la soldadura por el bimetalico de V Línea y se mantuvo la conexión original en las 26 barras restantes (ver figura 1).

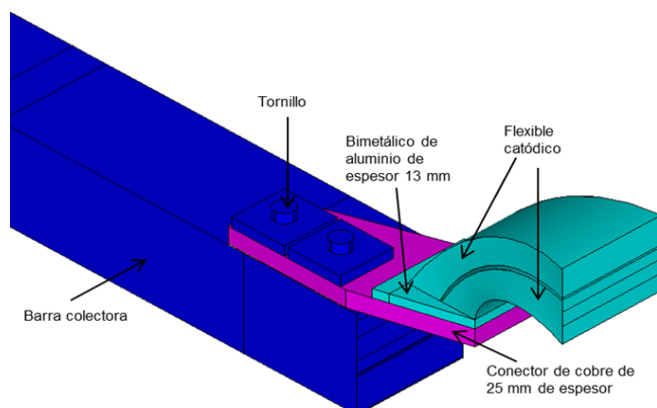


Figura 1: Modelo de conexión barra-flexible catódico con bimetálico de V Línea

2.2 Diseño de conexión propuesto de celdas P-19

La propuesta contempla realizar las pruebas experimentales en las conexiones apernadas con el bimetálico de V Línea (ver figura 1); y también un nuevo diseño de apernado con un incremento del área de contacto entre el bimetálico cobre-aluminio y la barra colectora de acero para aumentar la conductividad eléctrica (ver figura 2). Se diseñó un bimetálico cobre-aluminio que se adaptara a las dimensiones de las barras de celdas P-19 (ver figura 2). Se consideró además de la superficie de contacto barra-bimetálico (P-19: 160mm; V L: 80mm), la longitud de la barra catódica fuera de la cuba (P-19: 170mm; V L: 230mm).

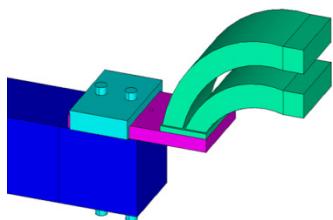


Figura 2: Modelo de conexión barra-flexible catódico con nuevo diseño de bimetálico para celdas P-19

En el modelo que se tiene de la celda P-19 para la simulación termoeléctrica se sustituyó la soldadura de la conexión en las 28 barras por el nuevo diseño de bimetálico para celdas P-19, como se muestra en la figura 2.

2.2 Resultados

En esta investigación se estudiaron las caídas de voltaje y temperatura en las conexiones apernadas y soldadas de la celda de prueba. En la tabla 3 se presenta los

resultados de las mediciones de caída de voltaje y temperatura en la celda 129 tanto en las 26 barras soldadas como en las 2 barras apernadas.

Los valores de caída de voltaje y temperatura medidos en las barras apernadas de la celda de prueba se corresponden con valores medidos experimentalmente en las conexiones de las barras de celdas P-19, como se observa en las restantes 26 barras soldadas de la celda 129 (Tabla III).

TABLA III. COMPORTAMIENTO DE LA CAÍDA DE VOLTAJE Y TEMPERATURA EN CONEXIONES DE CELDA DE PRUEBA 129

BLOQUE CATÓDIC	CAIDA DE VOLTAJE (mV)		BLOQUE CATÓDIC	TEMPERATURA DE BARRAS °C	
	A/ARRIBA	A/ABAJO		A/ARRIBA	A/ABAJO
0			0		
1	33	37	1	240	230
2	56	34	2	281	266
3	39	43	3	293	257
4	52	40	4	287	253
5	51	31	5	253	252
6	29	30	6	254	239
7	31	33	7	249	252
8	52	29	8	264	246
9	29	34	9	259	249
10	39	35	10	243	243
*11	45	44	*11	252	251
12	32	29	12	242	249
13	34	36	13	245	268
14	35	29	14	190	200

* Bloque Catódico (11) y barras apernadas en celda de prueba 129

El comportamiento observado durante las mediciones de seguimiento en las barras de prueba indica que se mantiene el torque aplicado a los pernos de la conexión (Tabla IV).

En esta investigación se estudiaron también las distribuciones de temperatura, potencial eléctrico y densidad de corriente en función de los distintos tipos de conexión en todos los componentes del modelo.

TABLA IV: COMPORTAMIENTO DE LA CAÍDA DE VOLTAJE EN CONEXIONES APERNADAS DE CELDA DE PRUEBA 129

FECHA	CAÍDA DE VOLTAJE-UNIÓN BARRAS APERNADAS (mV)	
	BARRA 11	BARRA 18
9/1/2024	45	44
16/1/2024	49	45
26/1/2024	47	47
2/2/2024	47	48

En las figuras 3 y 4 se muestran los resultados para las caídas de voltaje, distribución de temperatura y densidad de corriente en la conexión soldada y con bimetálico V Línea los cuales se corresponden con los valores medidos experimentalmente en la celda 129 (prueba).

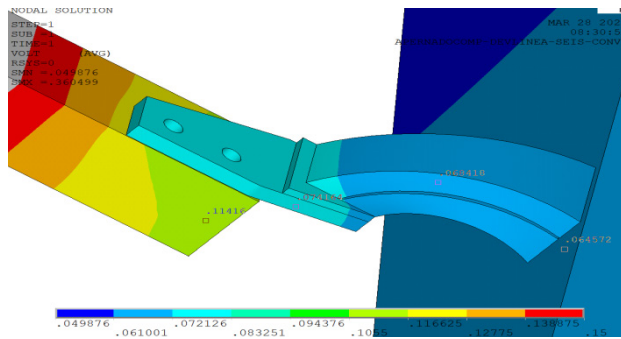


Figura 3: Distribución de voltaje en conexión barra-flexible catódico con bimetálico V Línea en celda P-19

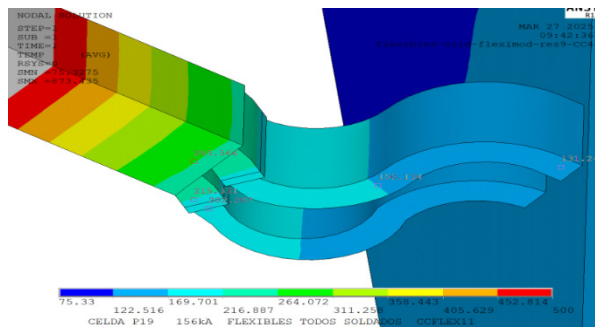


Figura 4: Distribución de temperatura en conexión barra-flexible catódico con bimetálico soldado en celdas P-19

Los resultados de las simulaciones termoeléctricas realizados a los distintos modelos de apernado y el soldado para predecir el mejor diseño se muestran de ma-

nera comparativa en la Tabla V.

TABLA V: RESULTADOS DE DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE CELDA P-19 PARA LOS DIFERENTES MODELOS DE CONEXIÓN

COMPARACIÓN ENTRE MÉTODO DE CONEXIÓN DE FLEXIBLES			
ZONA DEL MODELO	VOLTAJES (V)		
	APERNADO BM P-19	CONEXIÓN BM SOLDADO	APERNADO BM V LÍNEA
CELDA (OHMICO)	2,28341	2,33294	2,32486
CÁTODO OPER (MED)	0,386973	0,413969	0,429769
BAÑO	1,476244	1,48674	1,476854
SISTEMA ANÓDICO (SA)	0,28443	0,28552	0,28442
PUENTE ANÓDICO	0,14574	0,14574	0,14464

El potencial eléctrico de la celda por efecto óhmico con conexión apernada (nuevo diseño: P-19) tiene una proyección de operación de 49.5 mV por debajo del voltaje de una celda con conexión soldada y empleando el bimetálico de V Línea es 8.1 mV menor que el voltaje de celda con conexión soldada.

Según los resultados mostrados en la Tabla 5 la caída de voltaje en el cátodo es el que mayor incidencia tiene sobre el descenso de voltaje por efecto óhmico de la celda. Este resultado en el voltaje de celda significaría una disminución en el orden de 50 mv en el consumo de energía por celda.

El ahorro en el consumo de energía por año es de 12.299,04 MWH como se muestra en la Tabla VI.

TABLA VI: CONSUMO DE ENERGÍA SEGÚN RESULTADOS OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN TERMOELÉCTRICA POR TIPO DE CONEXIÓN

TIPO DE CONEXIÓN	VOLTAJE (V)	CONSUMO DE ENERGÍA (MWH)	COSTOS (\$)	AHORRO (\$)
SOLDADA	4,66	1.146.270,53	32.794.799,81	---
APERNADA V LÍNEA	4,652	1.144.302,68	32.738.499,72	56.300,09
APERNADA P-19	4,61	1.133.971,49	32.442.924,27	351.875,53

Las densidades de corrientes horizontales, Jz y Jx en el metal es una variable fundamental para determinar la magnitud y la dirección de la fuerza magnética en el metal, y por lo tanto de su movimiento y magnitud

de oscilación, especialmente en la interface metal baño.

En las figuras 6 se muestra la densidad de corriente Jz en la superficie superior del metal en el modelo de barras soldadas y en el modelo con conexión apernada P-19 (nuevo diseño), respectivamente.

Se observa que el modelo apernado para celda P-19 (nuevo diseño) disminuye las corrientes longitudinales en ambos sentidos respecto al modelo soldado, sin embargo, esta disminución es sólo de 7% en la corriente positiva. Para el apernado con bimetálico V Línea esta disminución es de 5%. En la corriente longitudinal en sentido negativo z la disminución para el apernado P-19 es de 1%.

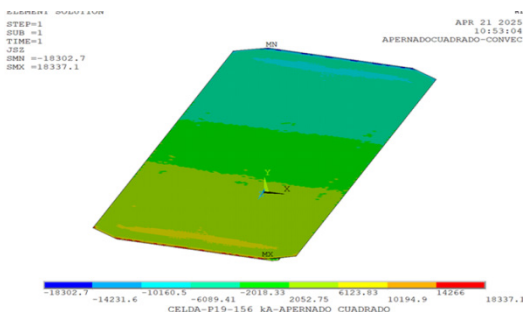


Figura 6: Distribución de densidad de corriente longitudinal en el metal para el modelo apernado P-19 (nuevo diseño)

Considerando la mejor simetría en los valores máximos en ambos sentidos el modelo apernado P-19 es más simétrico que el modelo soldado y que el apernado V Línea.

En la Tabla VII se muestra la densidad de corriente longitudinal o Jz y sus valores numéricos máximos en ambos sentidos para todos los modelos.

TABLA VII. RESULTADOS DE DENSIDAD DE CORRIENTE LONGITUDINAL EN EL METAL PARA LOS MODELOS DE CONEXIÓN

CONEXIÓN FLEXIBLES CATÓDICOS CELDA P-19 (Modelos)	DENSIDAD DE CORRIENTE (A/m ²)	
	Negativa Máxima	Positiva Máxima
SOLDADO	-18084,7	19634,4
APERNAO V LÍNEA	-18547	18631,3
APERNAO P-19	-18302,7	18337,1

Para la densidad de corriente transversal, Jx el resultado se muestra en la figura 7 y el resultado numérico para los tres (3) modelos en la Tabla VIII.

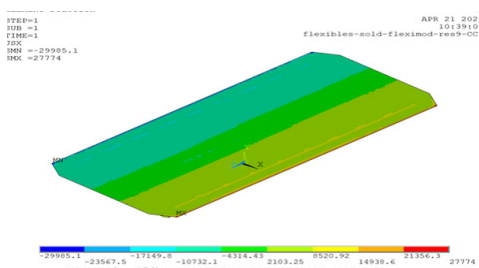


Figura 7: Distribución de densidad de corriente transversal, dirección x, en el metal para el modelo soldado en celda P-19

En este caso el modelo apernado P-19 presenta resultados más favorables por observar menor corriente horizontal transversal en ambos sentidos que los modelos soldado y el apernado V Línea. Sin embargo, el modelo soldado presenta mejor simetría que los dos (2) modelos apernados

TABLA VIII. RESULTADOS DE DENSIDAD DE CORRIENTE TRANSVERSAL EN EL METAL PARA LOS MODELOS DE CONEXIÓN

CONEXIÓN FLEXIBLES CATÓDICOS CELDA P-19 (Modelos)	DENSIDAD DE CORRIENTE (A/m ²)	
	Negativa Máxima	Positiva Máxima
SOLDADO	-29985,1	27774
APERNAO V LÍNEA	-29532,6	27068,4
APERNAO P-19	-29075,6	26642,8

III. CONCLUSIONES

Se realizó el reemplazo de dos conexiones soldadas por conexiones apernadas en una celda P-19 utilizando el modelo para conexión apernada de las celdas de V Línea obteniendo valores de caída de voltaje y temperatura similares a las medidas en las conexiones soldadas de la misma celda. Indicando que el cambio propuesto de sustituir las conexiones soldadas por apernadas no incrementa el voltaje de la celda. Los resultados de las simulaciones termoelectricas mostraron distribuciones de temperatura y caída de voltaje acorde a las medidas experimentales en la zona de las conexiones tanto de las soldadas como de las apernadas. La simulación de los tres (3) modelos de conexión pronostica una disminución en el voltaje de celda en el orden de los 50 mV, lo que se traduce en un ahorro en el consumo de energía en el orden de 12.299,04 MWH por año por línea de producción.

REFERENCIAS

- [1]G. D. Whitfield, A. A. Said, M. M. Al-Jallaf and A. H. Mohammed, “Development of D18 Cell Technology At Dubal”. (Light metals 2009). pp. 518—522.
- [2]W. T. Choate and J. A. Green, “U.S. Energy Requirements for Aluminium Production,” febrero 2003, pp. 29-31.
- [3]W. Houpin, “Interpreting the Components of Cell Voltage”, Light Metals, 1998, pp. 531-537.
- [4]F. Rojas, A. Birrot y I. Malavé, “Simulación de las Caídas de Potenciales en el Sistema Anódico Producidas por las Variaciones de la Profundidad del Yugo en el ánodo de una Celda de reducción de Aluminio Universidad, Ciencia y Tecnología”, 2007, vol. 11, num. 43, pp. 79-86.
- [5]F. Rojas, A. Birrot, D. Requena y I. Malavé, “Propuestas de mejoras en el Sistema Anódico en Celdas Hal-230 de V Línea de CVG VENALUM,” Universidad, Ciencia y Tecnología, 2010, vol. 14, num. 56, pp. 189-203.
- [6]A. Tablero, “Estudio del Diseño termoeléctrico de un Sistema de Apernado en las Barras Colectoras par alas Celdas P-19 de CVG VENALUM”, Tesis de Grado Departamento de Ingeniería Eléctrica, Tutor Académico Francisco Rojas, Tutor Industrial Aymara Maita, UNEXPO, Julio 2024 pp. 69-95
- [7]P. Barreto, “Evaluación del Comportamiento Termoeléctrico de las Uniones Apernadas de las Barras catódicas a los Flexibles Catódicos con Bimetálico Cobre Aluminio en la Celda 129 del Complejo I en CVG VENALUM”, Tesis de Grado Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Tutor Académico Erwin Blanco, Tutor Industrial Edris Lyon, UNEXPO, abril 2024 pp. 99-127
- [8]S. W. Jessen, “Mathematical Modeling of a Hall Héroult Aluminium Reduction Cell”, Requeriments for the Degree of Master of Science in Electrical Engineering at the Technical University of Denmark, septiembre 2008, pp. 32-44.
- [9]J. Arcila, “Influencia de los Insertos de Cobre en las Barras Colectoras Catódicas en la Producción y la Eficiencia Eléctrica de las Celdas de Reducción de Aluminio de CVG VENALUM”, Tesis de Grado Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Tutor Académico Francisco Rojas, Tutor Industrial Edris Lyon, UNEXPO, noviembre 2022 pp. 147-158

SIMULACIÓN DE LAS VARIABLES ELECTRO TERMOMECAÑICAS EN EL SISTEMA ANÓDICO 1400 EN FUNCIÓN DEL CONSUMO DEL ÁNODO Y DEL AMPERAJE DE LA CELDA

Rojas Francisco y Gil Orlando.
{frojashdez37, orgil}@gmail.com
Unexpo, CVG Venalum-Unexpo

Resumen: En esta investigación se hace un estudio de la influencia del consumo del ánodo y el aumento del amperaje de la celda de reducción de aluminio en las distribuciones de temperatura, potencial eléctrico, deformaciones y esfuerzo mecánico principal en el sistema anódico 1400 usado en C.V.G Venalum. Para esto se realizaron modelos computacionales con el método de elementos finitos con el programa Ansys. Los resultados de las simulaciones electro termomecánicas son consistentes con los publicados, con las mediciones experimentales y con las prácticas operativas de la empresa.

Palabras clave: Celda de reducción de aluminio, Esfuerzo mecánico, Simulaciones electro termomecánicas, Sistema anódico.

SIMULATION OF ELECTRO THERMO MECHANICAL VARIABLES IN THE 1400 ANODE SYSTEM AS A FUNTION OF ANODE CONSUMPTION AND CELL AMPERAGE

Abstract: This research investigates the influence of anode consumption and increased amperage in the aluminum reduction cell on the temperature distributions, electrical potential, deformations, and principal mechanical stress in the 1400 anode system used at C.V.G. Venalum. Computational models were developed using the finite element method with Ansys software. The results of the electrothermo mechanical simulations are consistent with those published, with experimental measurements and the company's operating practices.

Keywords: Anode system, Aluminum reduction cell, Electro thermo mechanical simulations, Mechanical stress.



I. INTRODUCCIÓN

Para producir aluminio primario a nivel industrial se usa el método electrolítico, lo que implica la reducción del aluminio. La técnica consiste en disolver polvo de alúmina, Al_2O_3 en criolita a aproximadamente $960^\circ C$. El proceso se realiza dentro de la cuba de celdas de reducción de aluminio, también llamadas celdas Hall-Heroult. Un corte transversal de la celda Hal-230 de CVG Venalum se muestra en la Fig.1. En la reacción química ocurre desgaste de la superficie del bloque anódico, compuesto mayormente por Carbono, C, sólido, ocurre como consecuencia de la liberación de energía en la presencia del oxígeno, O, de acuerdo a la reacción química [1]:

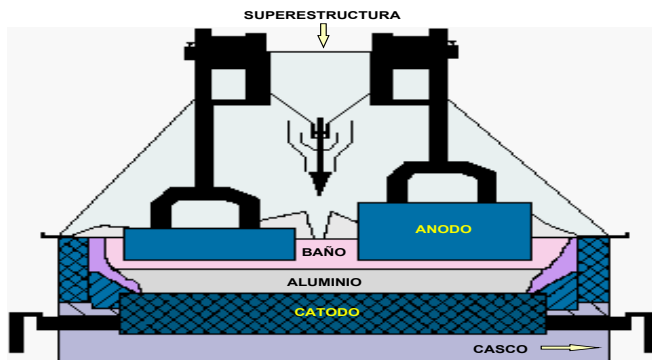
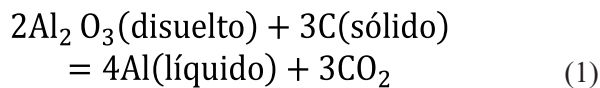


Figura 1: Diseño esquemático de una celda Hall-Heroult, para la producción de aluminio [2]

La energía calórica necesaria para producir y mantener la reacción es suministrada por una corriente directa, CD, la cual logra que la temperatura alcance los $960^\circ C$, en la zona donde se produce la reacción química, llamada baño. El baño es mayormente una mezcla de alúmina y criolita. Las corrientes usadas en este tipo de celda son de alto amperaje, por ejemplo, en CVG Venalum existen tres tipos de celdas usadas por la empresa: las P-19, que opera a 156 kA y tiene 18 Sistemas anódicos (SA); las Hal-230 con corriente de 220 kA y 26 SA y las V-350 con 312 kA y 36 SA. El SA es el responsable de introducir la corriente al interior de la celda a través de su varilla anódica de aluminio, ver Fig.2. En Venalum siempre se ha usado el mismo SA, SA 1400 mm. En estos tres tipos de celda la corriente nominal que pasa por cada SA es prácticamente la misma, como se muestra en la Tabla I.

TABLA I. CORRIENTE NOMINAL POR CELDA EN CVG VENALUM

CELDAS	CORRIENTE (kA)	Cantidad de SA	I nom (kA)
P-19	156	18	8,67
HAL-230	220	26	8,46
V-350	312	36	8,67
	350 (*)	36	9,72

En esta investigación se usó un modelo en tres dimensiones (3D) con elementos finitos del sistema anódico con cero consumo de su bloque anódico. En el modelo se varió el consumo del ánodo según sus días en servicio o operación: 1 (sin consumo), 12 y 21, que se conoce como cabo, el cual debe ser reemplazado por un nuevo SA. Dependiendo del día de consumo del ánodo, la corriente que entra al SA se calculó en forma similar a la obtenida en [3]. Se usó el SA 1400 mm suponiendo conectados en las celdas V-350, para amperajes de 312 kA, igual a P-19 ver Tabla I, y 350 kA, valor no usado en producción, con el objetivo de estudiar si el SA soporta ese nivel de corriente sin perder cada uno de sus materiales sus propiedades mecánicas, que garantizan su buen funcionamiento. Los detalles físicos de las dimensiones, entorno y consideraciones del SA; las condiciones de fronteras térmicas, eléctricas y mecánicas; las propiedades eléctricas, térmicas y mecánicas de los materiales; las ecuaciones termoeléctricas y mecánicas; los resultados de las simulaciones con elementos finitos y las discusiones son mostradas en la parte II; en III se exponen las conclusiones.

II. DESARROLLO

1. El modelo de Sistema Anódico 1400 mm

El modelo del SA 1400 mm se le llama así porque su largo es 1400 mm. Se realizaron tres modelos variando la altura del bloque del ánodo: 560 mm implica cero consumo o día 1, día 12 consumo corresponde a una altura del bloque de 370 mm y el cabo, día 21, tiene una altura de 190 mm.

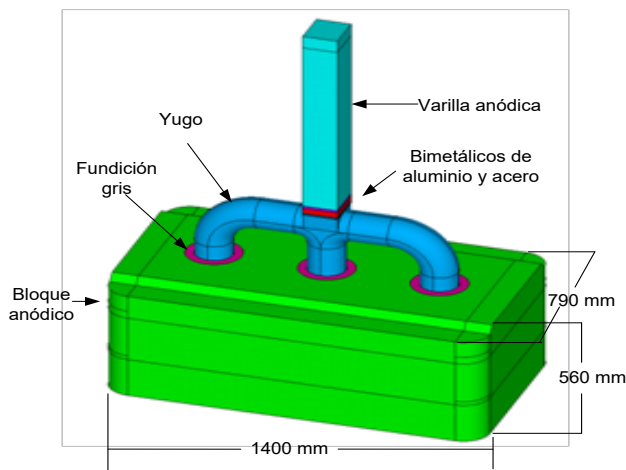


Figura 2: SA 1400 con cero consumos de su ánodo

1.1. Propiedades de los materiales y cargas

La corriente CD se introduce al modelo por el área superior de la varilla anódica, y ésta recorre todo el sistema, el cual se calienta por efecto Joules y por el contacto térmico en el área inferior del ánodo, que está sumergido 190 mm en el baño electrolítico. En el área inferior del bloque del ánodo se asume como potencial eléctrico, V , nulo o cero. En el área superior de la varilla se asumió desplazamiento cero en todas las dimensiones. Se utilizó una fuerza de flotación de 3,6 kPa, que se corresponde con el volumen del ánodo sumergido. Las condiciones de contorno térmicas son las usadas en [4]. Las propiedades termoeléctricas de los materiales y sus dimensiones son similares a las usadas por [5] y [6]. Las propiedades mecánicas de los materiales usadas están en la Tabla II.

TABLA II. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES DEL SA

Volúmenes	Y (MPa)	ν	$\alpha(1/K) \times 10^{-5}$	ρ (kg/m ³)
Varilla (Al 6063-T6)	62,0	0,34	2,35	2700
1er bimetálico (Al 1330)	72,0	0,34	2,35	2700
2do bimetálico (Acero 304L)	185,0	0,29	1,6	7800
Yugo (Acero ASTM 105)	160,0	0,29	1,10	7800
Fundición gris Clase 30	96,0	0,29	1,10	7850
Ánodo	4,0	0,12 5	0,46	1550

Donde Y es el módulo de Young, α es el coeficiente de dilatación térmica, ν es la relación de Poisson y ρ es la densidad. Para más detalles sobre las dimensiones del

modelo y las propiedades del bloque del ánodo se puede consultar [7] y [8].

2. Las ecuaciones del modelo

El programa de elementos finitos calcula la distribución del potencial eléctrico en cada nodo del modelo con la ecuación:

$$-\nabla \circ [\sigma_E] \nabla V = 0 \quad (2)$$

La cual se obtiene con la ecuación de continuidad de la carga eléctrica para el caso estático y la ley de campo de Ohm, en donde $[\sigma_E]$ es la matriz de la conductividad eléctrica. La distribución de temperatura, T , se obtiene por medio de la ecuación de transferencia de calor por conducción:

$$-\nabla \circ [K] \nabla T + \bar{q} = 0 \quad (3)$$

Donde $[K]$ es la matriz de conductividad térmica y (\bar{q}) es la velocidad de generación de calor por unidad de volumen producido por efecto Joule, dada por:

$$\bar{q} = \frac{\Delta V I}{Vol} = \sigma_E (\nabla V)^2 \quad (4)$$

También, hay transferencia de calor por convección natural, definida por:

$$-K \frac{\partial T}{\partial n} = h (T_S - T_\infty) \quad (5)$$

Donde T_S es la temperatura en la superficie del modelo, T_∞ es la temperatura del fluido (aire) que ejerce convección sobre la superficie con un coeficiente de transferencia de calor h y n es la componente normal a la superficie sometida a convección. Sustituyendo (4) en (3) se obtiene la ecuación diferencial termoeléctrica que resuelve el programa en forma numérica acoplada:

$$\nabla \circ ([K] \nabla T) + \sigma_E (\nabla V)^2 = 0 \quad (6)$$

El vector de esfuerzo mecánico en cada nodo del modelo, $\{\sigma\}$, está definido mediante la ecuación matricial [9]:

$$\{\sigma\} = [D] \{\varepsilon^{el}\} \quad (7)$$

$$\{\sigma\} = |\sigma_x \sigma_y \sigma_z \sigma_{xy} \sigma_{yz} \sigma_{xz}|^T \quad (8)$$

Donde [D] es la matriz de elasticidad y $\{\epsilon^{el}\}$ es el vector deformación elástica, definido por:

$$\{\epsilon^{el}\} = \{\epsilon\} + \{\epsilon^{th}\} \quad (9)$$

Siendo $\{\epsilon\} = |\epsilon_x \epsilon_x \epsilon_x \epsilon_x \epsilon_x \epsilon_x|^T$ y $\{\epsilon^{th}\}$ los vectores deformación total y deformación térmica, éste último definido por medio de la conocida ecuación de dilatación térmica:

$$\{\epsilon^{th}\} = \Delta T |\alpha_x \alpha_y \alpha_z 0 0 0|^T \quad (10)$$

Siendo α^x el coeficiente de dilatación térmica en la dirección x. En consecuencia, de 7 y 9, la deformación total puede escribirse como:

$$\{\epsilon\} = \{\epsilon^{th}\} + [D]^{-1}\{\sigma\} \quad (11)$$

3. Resultados y discusión

3.1 Amperaje de celda de 312 kA. Validación

En esta investigación se estudiaron las distribuciones de temperatura, potencial eléctrico, deformaciones y esfuerzos mecánicos en función de la corriente en todos los componentes del modelo. En las Fig. 3 y 4 se presentan los resultados de la distribución de temperatura y potencial eléctrico en el SA, respectivamente, para un día de consumo con un amperaje de 8,67 A. Las distribuciones de temperatura y de caída de voltaje en cada parte del modelo se corresponden con valores esperados medidos experimentalmente y simulados en las referencias anteriores, con lo que se puede concluir que el modelo termoeléctrico usado ha sido validado.

SUB =1
TIME=1
TEMP (AVG)
RSYS=0
DMX =.005768
SMN =59.9691
SMX =960

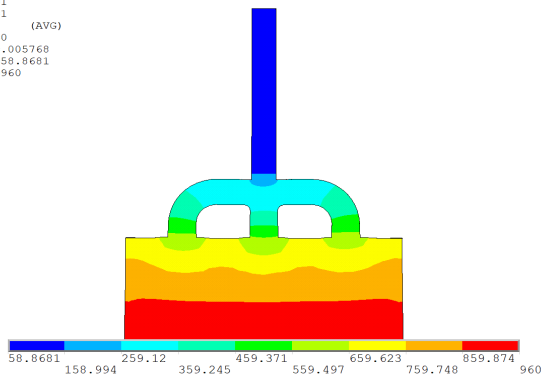


Figura 3: Distribución de temperatura en un corte

por su centro del SA.

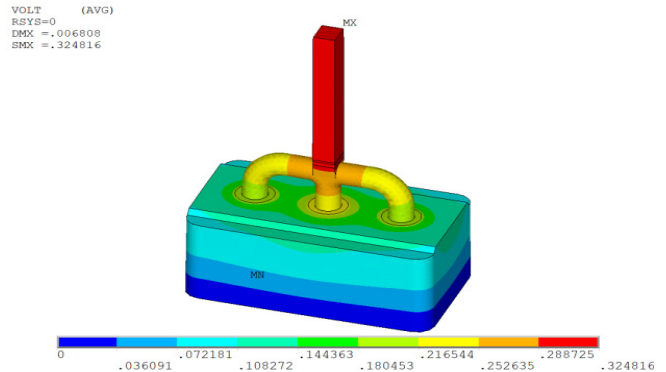


Figura 4: Distribución de voltaje en el SA

En la Fig. 5 se muestra la deformación total obtenida en el yugo y en la Fig. 6 se presenta el resultado para deformación térmica en el bimetálico de acero, definida con la ecuación 10.

USUM (AVG)
RSYS=0
DMX =.003958
SMN =.001476
SMX =.003958

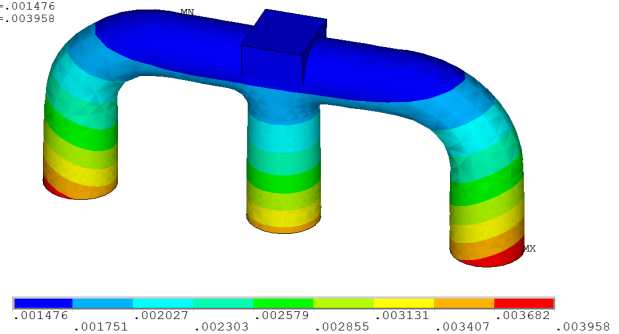


Figura 5: Deformación total en el yugo.

La validación mecánica es más complicada porque no hay mediciones experimentales de los esfuerzos mecánicos y deformaciones en cada uno de los materiales del SA en pleno proceso productivo. Sin embargo, las practicas operativas del proceso productivo de muchos años indican que todos los materiales soportan los esfuerzos mecánicos y deformaciones (límite elástico) máximos.

La forma de la distribución de la deformación total coincide con lo obtenido en [4], aunque los autores no presentan resultados numéricos.

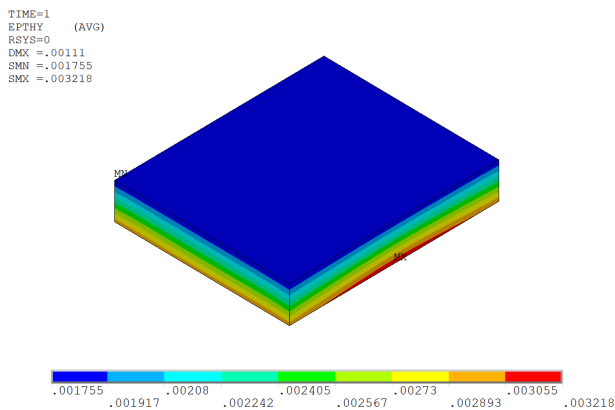


Figura 6: Deformación térmica en la dirección Y en bimetálico de acero.

En la Tabla III se presentan las comparaciones en las deformaciones por efecto térmico en la dirección Y, ΔL_{THY} , calculadas y las obtenidas en las simulaciones en los volúmenes del SA que presentan forma geométrica más regular para su validación.

TABLA III. DEFORMACIÓN TÉRMICA EN LA DIRECCIÓN Y

material	Tmax (°C)	ΔT (°C)	ΔL_{THY} Calculadas (m)	ΔL_{THY} Simuladas (m)	error %
varilla	145,0	105	0,002468	0,002476	0,3
Bimetálico 1	148,3	108	0,002546	0,002546	0,0
Bimetálico 2	229,0	189	0,003213	0,003218	0,2

En las Fig.8, 9 y 10 se observan los esfuerzos mecánicos principales en la fundición gris, el bimetálico de acero y el orificio central del bloque del ánodo.

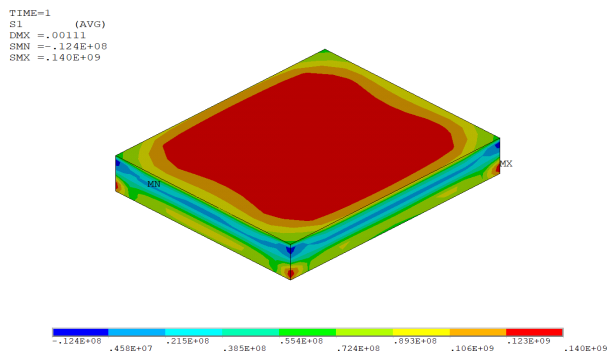


Figura 8: Esfuerzo principal S1 en bimetálico de acero.

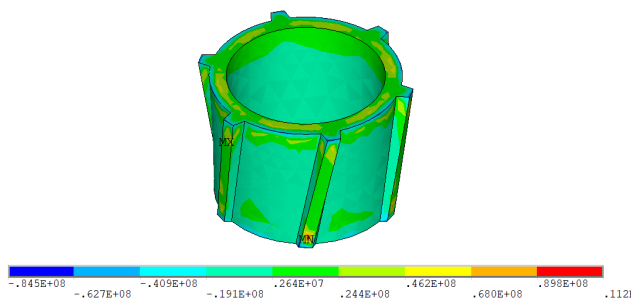


Figura 9: Esfuerzo principal S1 en la fundición gris

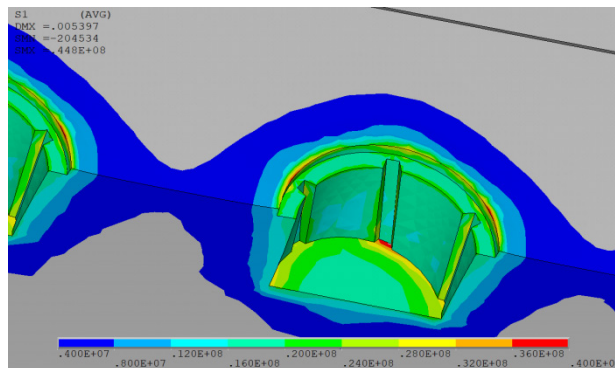


Figura 10: Esfuerzo principal S1 en el orificio central del ánodo acotado entre 4 MPa y 40 MPa.

De la Fig.10 se observa que en los huecos del ánodo su esfuerzo máximo es 44,1 MPa, el cual es un poco mayor a su resistencia de compresión, 40 MPa, pero sólo están en pequeñas áreas por lo que no representan peligro para el desprendimiento del ánodo de su yugo.

El resultado para los distintos días de consumo para el amperaje de 8,67 kA se muestra en la Tabla III. en donde RT es la resistencia de tracción, LE es el límite elástico y RC es la resistencia de compresión. Se observa que todos los materiales están por debajo de su límite elástico, lo cual se confirma con las practicas operativas de la empresa en su proceso de producción. En los huecos ahora su máximo valor en el esfuerzo es de 58,1 MPa, pero presentes sólo en pequeñas áreas que son un poco mayores al caso de un día, el cual no debe representar peligro tomando en cuenta las practicas operativas.

TABLA IV. VARIACIONES DEL ESFUERZO MECÁNICO PRINCIPAL EN FUNCIÓN DE LOS DÍAS CONSUMO CON I NOMINAL 8,67 KA POR SU SA

VOLUMEN	DÍAS	S1+ (MPa)	S1- (MPa)
VARILLAA RT=210 MPa LE=135 MPa	1	23,5	45,9
	12	87,0	164,0
	21	32,9	63,8
BIMETALICO 1 RT=186 MPa LE=166 MPa	1	25,2	8,9
	12	61,7	13,7
	21	32,2	8,39
BIMETÁLICO 2 RT=485 MPa LE=180 MPa	1	140,0	12,4
	12	146,0	28,9
	21	161,0	23,7
YUGO RT=485 MPa LE=250 MPa	1	184,0	61,6
	12	232,0	88,5
	21	170,0	74,8
FUNDICIÓN CLASE 30 RT=213 MPa LE C30=207 MPa	1	112	84,5
	12	137,0	107,0
	21	91,2	86,6
ÁNODO 1400 RC=40 MPa	1	44,8	0,2
	12	58,1	0,1
	21	52,5	0,2

TABLA V. VARIACIONES DEL ESFUERZO MECÁNICO PRINCIPAL EN FUNCIÓN DE LOS DÍAS CONSUMO CON I NOMINAL 9,72 KA POR SU SA

VOLUMEN	DÍAS	S1+ (MPa)	S1- (MPa)
VARILLAA RT=210 MPa LE=135 MPa	1	25,8	50,5
	12	94,8	179,0
	21	36,3	69,5
BIMETALICO 1 RT=186 MPa LE=166 MPa	1	28,3	7,9
	12	67,6	15,2
	21	36,2	7,68
BIMETÁLICO 2 RT=485 MPa LE=180 MPa	1	145,0	12,8
	12	153,0	29,9
	21	167,0	24,0
YUGO RT=485 MPa LE=250 MPa	1	192,0	63,7
	12	244,0	91,1
	21	179,0	75,6
FUNDICIÓN CLASE 30 RT=213 MPa LE C30=207 MPa	1	114,0	86,2
	12	142,0	119,0
	21	92,3	87,7
ÁNODO 1400 RC=40 MPa	1	45,7	0,2
	12	60,5	0,1
	21	53,0	0,2

3.1 Amperaje de celda de 350 kA

Los resultados numéricos de las simulaciones se muestran en la Tabla V. Se obtuvo que los esfuerzos mecánicos en todos los materiales están por debajo o igual a su límite elástico. Sólo el yugo en el día 12 de operación su esfuerzo máximo alcanza su límite elástico 244 MPa. Esto en la práctica puede representar mayor frecuencia de reparación del yugo y los bimetalicos. En el ánodo el efecto del incremento de la corriente en la celda en su esfuerzo mecánico es muy pequeño, esto se debe a que el ánodo presenta un entorno estable en cuanto a la distribución de temperatura. El aumento más grande en el esfuerzo mecánico en el ánodo se debe al consumo del ánodo, que ocurre en el día 12 cuando su esfuerzo máximo alcanza los 60,5 MPa, muy superior a su resistencia de compresión, calculada en 40 MPa por C.V.G Venalum.

III. CONCLUSIONES

Se ha logrado obtener un modelo electro termo mecánico del SA que predice como cambian los esfuerzos mecánicos conforme el ánodo se consume y cuando se le aumenta la corriente a la celda. Los resultados obtenidos son consistentes con las practicas operativas de la empresa para el amperaje usado. Cuando se aumenta la corriente en el modelo hasta 9,72 kA, sólo el yugo alcanza su límite elástico al aumentar la corriente planteada, lo cual implica mayor frecuencia en las labores de mantenimientos y reparaciones del SA.

REFERENCIAS

- [1]K. Grjoteim and H. Kvande, "Introduction to Aluminium Electrolysis", 2nd ed. vol.1, Ed. Dusseldorf: Aluminum-Verlag, 1993, pp. 9
- [2]E. Gutiérrez y N. Troyani, "Formulación Variacional del Problema Termoeléctrico de una Celda de Reducción de Aluminio Hall-Heroult en Tres Dimensiones", Universidad, Ciencia y Tecnología, 1999, vol.3, num.9, pp. 25-29
- [3]F. Rojas, A. Birrot y A. Caraballo, "Simulación de la evolución termoeléctrica del Sistema Anódico 1500

mm asimétrico en las Celdas Hal-230 de C.V.G”, Memorias de las IX Jornadas de Investigación 2011, Puerto Ordaz, Julio 2011

[4]H. Fortin; N. Kandev and M. Fafard, "FEM Analysis of Voltage Drop in the Anode Connector Induced by Steel Stub Diameter Reduction", *Finite Elements in Analysis and Design*, vol.54, no. 52, pp. 71–82, Jan. 2012

[5]F. Rojas, A. Birrot, D. Requena y I. Malavé, “Propuestas de mejoras en el Sistema Anódico en Celdas Hal-230 de V línea de C.V.G VENALUM”, *Universidad, Ciencia y Tecnología*, 2010, vol.14, num.56, pp. 189-203

[6]F. Rojas, A. Birrot y I. Malavé, "Simulación de las Caídas de Potenciales en el Sistema Anódico Produci-

das por las Variaciones de la Profundidad del Yugo en el Ánodo de una Celda de Reducción de Aluminio” *Universidad, Ciencia y Tecnología*, 2007, vol.11, num.43, pp. 79-86

[7]I. Malavé, “Estudio de la Eficiencia Termoelectrica del Sistema Anódico en Celdas Hal-230 de la V Línea de C.V.G. Venalum”, Trabajo de Grado de Ingeniería Eléctrica. UNEXPO, Puerto Ordaz, Venezuela. 2009. pp. 17-22 y 56-65

[8]Informe Técnico de la División de Certificación de Calidad Carbón Cátodos de C.V.G. Venalum, “Propiedades Ánodos de CVG Carbonorca”, 2023

[9]Ansys Inc, *Theory Reference for the Mechanical APDL and Mechanical Applications*, Version 12.0, 2012, pp.43-48

SIMULACIÓN ESTRUCTURAL DE LA SARTA PETROLERA BAJO CONDICIONES DINÁMICAS EN ESTADO ESTACIONARIO

José Salazar¹, Luis Rosales-Romero¹, Jordán González¹, Franyelit Suárez-Carreño²

¹Universidad Nacional Experimental Politécnica Antonio José de Sucre, UNEXPO, Vice Rectorado Puerto Ordaz,
jrsalazar123@unexpo.edu.ve., lrosales@unexpo.edu.ve, xaxon.par@gmail.com

²Universidad de las Américas, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Carrera de
Ingeniería Industrial, Quito-Ecuador; franyelit.suarez@udla.edu.ec

Resumen: Las perforaciones petroleras han requerido de extensiones tubulares denominadas sartas, experimentan un incremento significativo de un momento torsor y cargas axiales, proveniente de la transmisión mecánica de la torre de perforación, estos parámetros de operación comprometen la durabilidad operacional de las extensiones dejando la posibilidad de una falla estructural, durante el trabajo realizado por la torre, poniendo en riesgo la integridad del equipo y sus operadores, la investigación permitió evaluar el comportamiento de los esfuerzos tanto normales como cortantes, considerando al equipo trabajando a su máxima capacidad de carga donde se obtuvieron resultados computacionales con la aplicación de elementos finitos en el desempeño de la sarta, que obtuvo un factor de seguridad de 7,7351, siendo un buen indicador que garantiza el óptimo desempeño operacional de igual forma se evaluó la presencia de los esfuerzos de Von Mises alcanzó un valor máximo de 11,144 Mpa, ubicado en la zona central del elemento y la deformación total que es de tipo vectorial obtuvo un módulo de 0,56608 mm en conclusión el análisis computacional permitió evaluar el comportamiento de la sarta en el escenario donde la transmisión alcanza su máxima capacidad sin generar fallas estructurales.

Palabras clave: Esfuerzo dinámico, proceso de perforación, Sarta petrolera, Simulación estructural.

SIMULATION OF ELECTRO THERMO MECHANICAL VARIABLES IN THE 1400 ANODE SYSTEM AS A FUNTION OF ANODE CONSUMPTION AND CELL AMPERAGE

Abstract: Oil drilling has required tubular extensions called strings, experience a significant increase in torsional moment and axial loads, coming from the mechanical transmissions of the drilling tower, these operating parameters compromise the operational durability of the extensions leaving the possibility of a structural failure during the work performed by the towers, putting at risk the integrity of the equipment and its operators, the research allowed to evaluate the behavior of both normal and shear stresses considering the equipment working at its maximum load capacity where computational results were obtained with the application of finite elements of type concludes in the performance of the string, which obtained a safety factor of 7.7351 being a good indicator that guarantees optimal operational performance in the same way the presence of Von Mises efforts was evaluated reached a maximum value of 11.144 Mpa, located in the central zone of the element and the total deformation that is of the vector type obtained a module of 0.56608 mm in conclusion the computational analysis allowed to evaluate the behavior of the string in the scenario where the transmission reaches its Maximum capacity without causing structural failure.

Keywords: Dynamic stress, drilling process, oil string, structural simulation



I. INTRODUCCIÓN

La exploración y producción de petróleo ha sido desde la época primitiva una necesidad ineludible para enfrentar los cambios climáticos en las variantes zonas geológicas. La diferencia es que en un comienzo la extracción del "líquido oscuro" fue prácticamente recolectada desde donde emergiera en la superficie "asfalto". El cambio sustantivo de estas modestas explotaciones superficiales a los modernos y complejos proyectos de extracción se vio sustantivamente modificado con el uso de mecanismos perforadores en la búsqueda del petróleo de primeras profundidades, fue así como el primer intento de perforación con este método tuvo lugar en 1863. La simulación completa está formada por tres bloques. El primero extrae las fuerzas de los diferentes softwares sobre el modelo y las transforma para las fuerzas ideales de la teoría de la curva catenaria de la sarta [2]. El bloque siguiente resuelve el modelo estático de rigideces concentradas y, finalmente, el último bloque integra el modelo dinámico compuesto de las uniones, que pueden ser los aislantes, amortiguadores, top drives, etc.; con el valor máximo de fuerza que puede soportar cada uno.

II. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El proceso de extracción petrolera desde las profundidades del lecho terrestre ha sido una ardua labor, donde múltiples empresas a nivel mundial compiten por ofrecer un mejor servicio de perforación, mediante el uso de la tecnología, se ha buscado optimizar los tiempos de trabajo, manteniendo la integridad física de los trabajadores y funcionalidad de los equipos, en diferentes escenarios geológicos, donde hacen presencia los yacimientos petroleros [4].

Basado en las variantes geográficas y las condiciones climatológicas presente en nuestro globo terrestre, es necesario que el acero utilizado en la fabricación de las sargas, sea de alta resistencia a la fatiga y al desgaste, debido a las condiciones dinámicas que se presentan en las torres de perforación para diferentes latitudes [5].

III. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO

La investigación partió de los principios básicos de las perforaciones petroleras y de investigación previos citados durante el desarrollo, la metodología aplicada, está enfocada en una serie de pasos secuenciales que permiten obtener resultados significativos en el área científica de alto impacto.

A. Caracterización del acero API K55: utilizado en la fabricación de la sarta petrolera, basado en la norma del Instituto Americano de Petróleo (API), donde se

especifican las propiedades mecánicas del acero K55 y su composición química.

B. Definición del modelo físico de la sarta: que será analizada a través de una simulación computacional, en nuestro caso se extrajo la información técnica y dimensional de la herramienta del catálogo del proveedor de la sarta petrolera [6], donde se obtuvo toda la información dimensionar requerida para el desarrollo de un modelo virtual de la herramienta de perforación.

C. Definición de los parámetros operación: del taladro: la búsqueda de información técnica condujo al campo de operación, donde se conoció de los equipos utilizados y sus parámetros de funcionamiento empleado para tipos de formación geológica específica donde se estaba realizado la perforación [7].

D. Desarrollo del modelo matemático basado: en un análisis por elementos finitos que involucras los parámetros operacionales de la sarta petrolera, analizado en publicaciones previas [8].

E. Discretización del modelo matemático: está basada en el conjunto de ecuaciones por elementos finitos, utilizado en el reemplazo de las derivadas presentes en el modelo.

F. Las condiciones de frontera: presentes en la sarta petrolera bajo condiciones dinámicas, con la finalidad que el modelo computacional, se adapte a los patrones operativos de la herramienta petrolera a simular [9].

G. El mallado de modelo virtual: en esta etapa de analizar la geometría del elemento infinitesimal que mejor se adapte al modelo virtual, tomando en consideración la geometría de la sarta petrolera.

H. El criterio de estabilidad computacional: nos permitirá evaluar el comportamiento del simulador en función del tamaño de los elementos finitos utilizados en el mallado de la sarta.

I. El criterio de convergencia de los resultados: permitió evaluar la variación de los resultados a medida que el mallado se hacía más pequeño a través de un refinamiento a fin de obtener resultados más óptimos a nivel de la simulación [10].

J. Análisis de los resultados: estuvo basado en un análisis comparativo de los esfuerzos y deformaciones admisibles para el acero de la norma API K55 vs los

resultados obtenidos de manera computacional.

IV. RESULTADOS

A. Caracterización del acero API K55: La norma específica las condiciones técnicas de las tuberías de acero y el material de los accesorios, adicionalmente establece los requisitos para tres niveles de especificación de producto (PSL-1, PSL-2, PSL-3) [10]. La tubería de revestimiento de grado K55 es una tubería de revestimiento de aceite y se utiliza principalmente para pozos de petróleo, sus propiedades mecánicas se muestran en la tabla I.

Tabla I. Propiedades mecánicas del acero API K55.

Tipo de acero	API K55	Unidades
Módulo de rigidez	205	Gpa
Esfuerzo de fluencia	552	Mpa
Esfuerzo último	655	Mpa
Elongación total bajo carga	0.5	%

B. Descripción del modelo físico: Está formado por una sarta petrolera con un tipo de acero que se rige por la norma API K55 perteneciente al grupo I [10], este elemento posee una longitud de 392 pulgadas, un diámetro externo de 5 pulgadas y un espesor de pared de 0,362 pulgadas, con una geometría completamente simétrica, con un peso por unidad de longitud de 18 libras/pie, con un esfuerzo a la fluencia de 55 ksi, debido a la simetría geométrica de la sarta es suficiente realizar el análisis computacional solo la mitad de la misma, como se muestra en la figura 1.

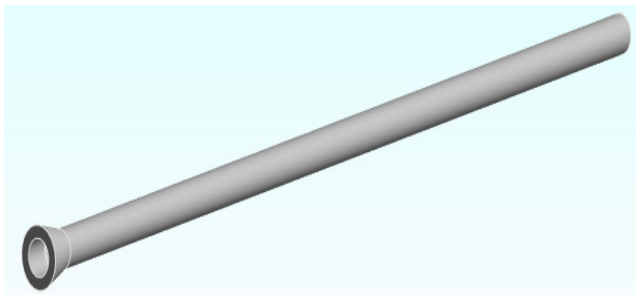


Figura 1. Modelo virtual de la sarta petrolera API K5.

C. Modelo matemático: Está basado en un análisis diferencial de un elemento finito extraído de la sarta petrolera, como se muestra en la figura 2 donde se aplicó las condiciones de equilibrio estático de Newton, que establece que la sumatoria de fuerza en una dirección específica es igual a cero [11].

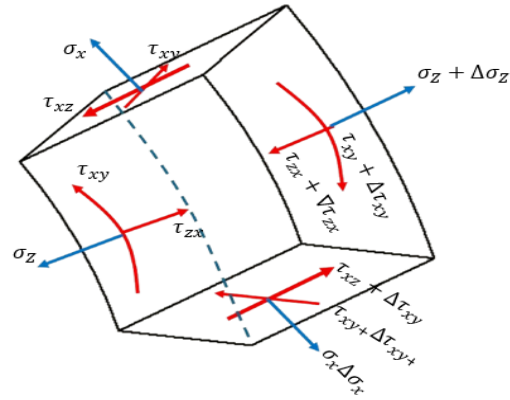


Figura 2. Elemento diferencial de la sarta petrolera API K5.

La ecuación de equilibrio estático queda planteada:

$$\sum F_z = 0 \quad \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + F_y = 0 \quad (1)$$

Si el análisis se limita a un desplazamiento unidimensional en dirección axial del eje de la sarta, la ecuación se reduce bajo las siguientes hipótesis:

*Considerando que no existe desplazamiento axial en la sarta debido al torque aplicado, se tiene que: $\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} = 0$

*Considerando que el plano xz no experimenta cambios significativos porque el torque aplicado actúa perpendicular al plano xy, la sección transversal de la sarta, por lo tanto

$$\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = 0. \quad \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial z} + F_x = 0 \quad (2)$$

Considerando que el esfuerzo genera no supera el esfuerzo de fluencia, se aplica la ley de Hooke que establece que: $\tau_{xy} = G * \frac{\partial v_x}{\partial z}$ y sustituyendo en la ec 2 se obtiene la ec 3.

$$\frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial z^2} + \frac{F_x}{G} = 0 \quad (3)$$

Siendo F_x : la resistencia interna que ofrece el elemento diferencia a ser deformado y se expresa de la siguiente manera como se muestra en la ec 4:

$$F_x = \frac{T * dx}{J * G * L} \quad (4)$$

Donde

T : Momento torsor que actúa en la sarta.

J : Momento polar de inercia = $\frac{\pi}{32} (D^4 - d^4)$

L : Longitud de la sarta petrolera.

G : Módulo de rigidez del acero de la sarta

D. Discretización del modelo matemático: se basa de un análisis diferencial centrado, aplicado al modelo matemático de segundo orden presentada en la ec.3, quedando definida la segunda derivada de la mediante la ecuación discretizada mostrada en la ec.5.

$$\frac{\gamma_{xy_{i-1}} - 2 * \gamma_{xy} + \gamma_{xy_{i-1}}}{2 * \Delta x^2} + \frac{T * \Delta x}{J * G * L} = 0 \quad (5)$$

E. Condiciones de frontera: En el análisis computacional se limitó a la mitad de la sarta, debido a la simetría del elemento bajo la condición de un atornillamiento mecánico [11], por lo tanto, se modela como un empotramiento perfecto en un extremo que restringe el desplazamiento de traslación y rotacional en cualquier dirección, representado por el fixed support, como se muestra en la figura 3.

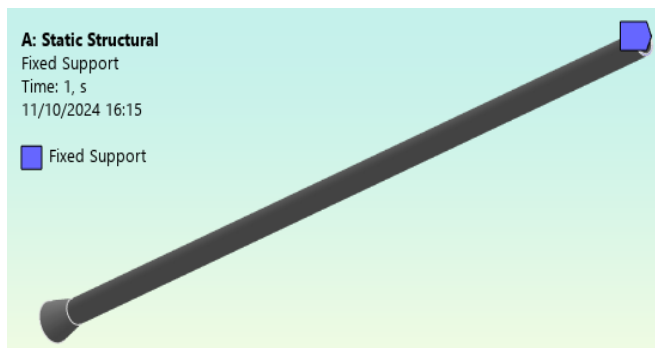


Figura 3. Condición de frontera para la sarta petrolera API K55.

F. Aplicación de la carga de trabajo del taladro: durante la apertura petrolera el taladro puede operar con una potencia máxima de 750 hp y velocidad angular de 100 rpm para generar un torque de 53400 N.m [12], el fabricante recomienda trabajar con un 80% de la capa-

cidad nominal, a fin de preservar el óptimo desempeño del taladro, para efecto de la simulación se trabajó con 42720 N.m como parámetro óptimo de operación, como se evidencia en la figura 4.

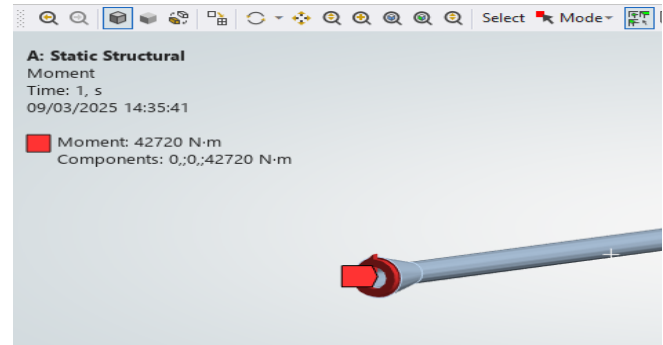


Figura 4. Parámetro operacional de la sarta petrolera

G. El mallado: el modelo tridimensional de la sarta petrolera se discretizo, utilizados elementos finitos con una geometría en forma de pirámide con cinco nodos por elementos, el sistema global de la sarta está formado por 5148 elementos y 10285 nodos, representado en la figura 5.

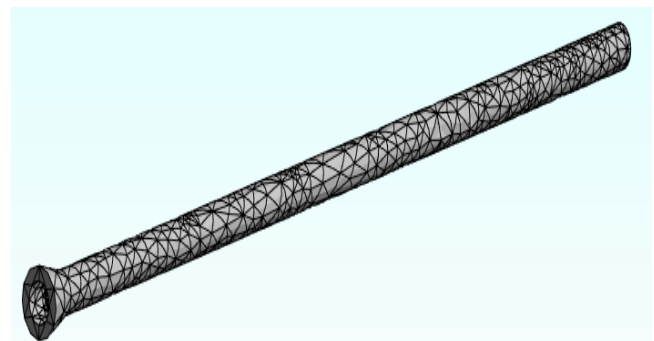


Figura 5. Mallado infinitesimal de la sarta petrolera API K55.

H. Criterio de estabilidad computacional: considera el tamaño del elemento diferencial, para el análisis computacional, teniendo en cuenta que el programa de simulación permite variar el tamaño del elemento finito y evaluar cómo este influye en el rendimiento del código computacional utilizado por ANSYS [13], con el fin de responder al desarrollo del análisis planteado por el usuario, como se indica en la figura 6.

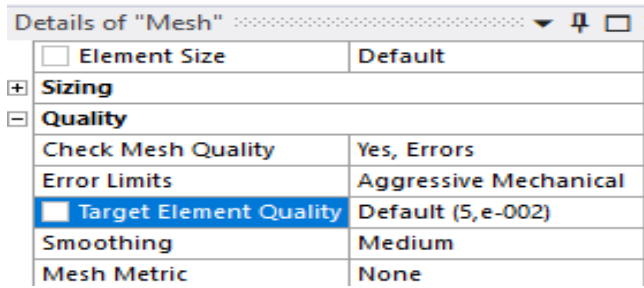


Figura 6. Control del tamaño del mallado del elemento infinitesimal de la sarta petrolera API K55.

I. Criterio de convergencia: Inicialmente, se realizó una primera fase con un mallado predeterminado, obteniendo resultados preliminares con 5148 elementos y 10285 nodos. Posteriormente, se aplicó un refinamiento del mallado para aumentar la cantidad de elementos finitos y ecuaciones a resolver iterativamente. Este refinamiento buscaba obtener resultados más detallados en la simulación de la sarta.[14] El proceso se aplicó de forma progresiva, basándose en los resultados de cada corrida.

J. Esfuerzo de Von Mises: este esfuerzo evalúa la intención de los esfuerzos normales y los esfuerzos cortantes que se generan en los diferentes planos de la estructura interna del modelo de la sarta petrolera, en la figura 8 se observa que el esfuerzo alcanzó un valor máximo de 11,144 Mpa, como se observa en la figura 7.

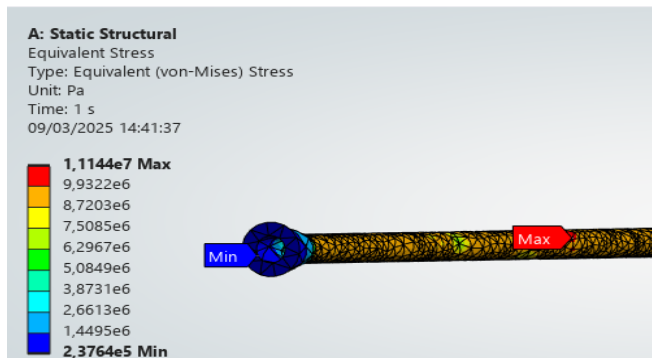


Figura 7. Distribución de esfuerzo de Von Mises.

K.Esfuerzo principal: el análisis permitió evaluar los esfuerzos de generado en el plano principal del sólido, cabe destacar que en este plano los esfuerzos generados son debidos la acción neta de los esfuerzos normales, que actúan en dirección axial al eje longitudinal de la sarta, la figura 8 muestra la magnitud del esfuerzo principal de 6,691 Mpa, de igual manera se presenta la ubicación del punto donde alcanzan su máximo valor.

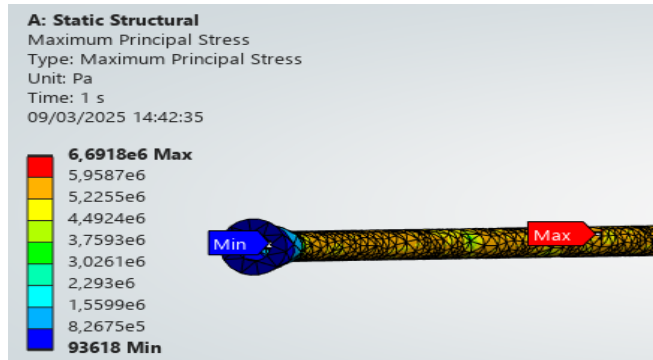


Figura 8. Distribución del esfuerzo principal

L. Factor de seguridad a la fatiga: Se evidencia que la sarta petrolera API K55 presenta un factor de seguridad a la fatiga de 7,7351 en la zona de riesgos señalada en la figura 9, con la indicación de mínimo de color rojo, siendo esta una zona de posible falla, durante la fase de operación de la sarta.

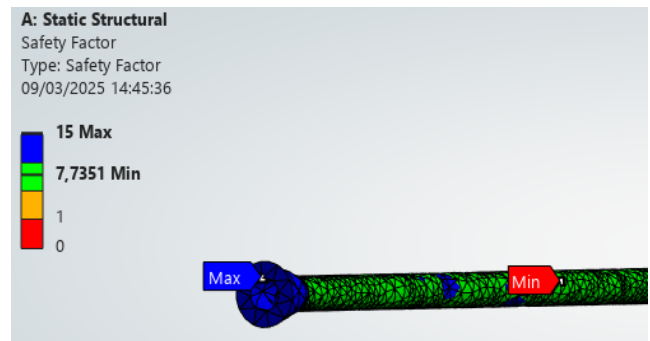


Figura 9. Factor de seguridad a la fatiga

V CONCLUSIÓN

El análisis computacional de la sarta petrolera determino que el esfuerzo de Von Mises alcanza un valor máximo de 11,144 Mpa, ubicado en la zona central del elemento estructural, permitiendo operar de manera satisfactoria sin poner en riesgo el equipo ni el personal operario.

Los esfuerzos generados en el plano principal de la sarta petrolera se cuantifican en 6,691 Mpa, siendo estos por la acción del momento torsor que genera el esfuerzo normal, que actúan en dirección axial del elemento.

La sarta petrolera experimentó una pequeña deformación vectorial en el cabezal donde se obtuvo una deformación axial máxima de 0,56608 mm, siendo esta imperceptible en comparación con el tamaño longitudinal del elemento.

El factor de seguridad de la sarta petrolera (acero API K55) se determinó en 7,7351 en la zona central,

donde los esfuerzos normales son máximos. A pesar de esto, el valor del factor de seguridad indica que la sarta puede operar satisfactoriamente.

REFERENCIAS

- [1] F. G. Clapp, «Review of Present Knowledge Regarding the Petroleum Resources of South America», Transactions of the AIME, vol. 57, n.o 01, pp. 914-967, dic. 1917, doi: 10.2118/917914-G
- [2] G. Herrera-Franco, F. J. Montalván, A. Velastegui-Montoya, y J. Caicedo-Potosí, «Vulnerability in a Populated Coastal Zone and Its Influence by Oil Wells in Santa Elena, Ecuador», Resources, vol. 11, n.o 8, p. 70, jul. 2022, doi: 10.3390/resources11080070.
- [3] N. R. Maddela, L. Scalvenzi, y K. Venkateswarlu, «Microbial degradation of total petroleum hydrocarbons in crude oil: a field-scale study at the low-land rainforest of Ecuador», Environmental Technology, vol. 38, n.o 20, pp. 2543-2550, oct. 2017, doi: 10.1080/09593330.2016.1270356..
- [4] M. Z. Lukawski et al., «Cost analysis of oil, gas, and geothermal well drilling», Journal of Petroleum Science and Engineering, vol. 118, pp. 1-14, jun. 2014, doi: 10.1016/j.petrol.2014.03.012..
- [5] F. A. Assaad, «Surface Geophysical Petroleum Exploration Methods», en Field Methods for Petroleum Geologists, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009, pp. 21-23. doi: 10.1007/978-3-540-78837-9_3.
- [6] N. Dai, A. Vafidis, y E. R. Kanasevich, «Wave propagation in heterogeneous, porous media: A velocity-stress, finite-difference method», GEOPHYSICS, vol. 60, n.o 2, pp. 327-340, mar. 1995, doi: 10.1190/1.1443769.
- [7] J. L. Ramírez y G. Larrazábal, «Imagenología sísmica 3D post-apilamiento en exploración petrolera». Conference CIMENICS 2010..
- [8] M. Borregales, O. Jiménez, y S. Buitrago, «Generación de mallas de cuadriláteros para yacimientos bidimensionales con fronteras internas complejas», 2009, doi: 10.13140/RG.2.1.4791.9520.
- [9] N. Quintero y F. Calvete, «Desarrollo de un modelo computacional para flujo bifásico en tres dimensiones usando el método de volúmenes finitos,» 2017. [En línea]. Available: earthdoc.org. [Último acceso: 2023].
- [10] J. Perira, «Simulación computacional en la industria del gas y petróleo. Casos de aplicación.,» Atenea, vol. 9, p. 8-10, 2022.
- [11] V. Dávila, «Análisis y simulación numérica por MEF de los esfuerzos y deformaciones sometidas a cargas y temperaturas en ductos terrestres para transporte de petróleo,» Instituto Politécnico Nacional, Colombia, 2015.
- [12] M. Martínez, Daniel Insausti y A. Corales, «Análisis y Modelado de los Esfuerzos en una Sección de Cemento de un Pozo Petrolero Utilizando el Método de Elementos de Contorno (MEC),» Mecánica Computacional, vol. XXXI, pp. 1065-1083, 2012.