

MINERVA

Revista Multidisciplinaria de Investigación Científica



L E

Vol.1, N° 1 Abril de 2020

IOURNAL DES SCAVANS.

Du Lindy IV. Janvier M. DC. LXVI.

Par le S^t G. P.



A PARIS.

Chez JEAN CVSSON, rue S. Jacques, à l'ima-
ge de S. Jean Baptiste.

M .DC. LXVI.

AVEC PRIVILEGE DV ROY.

REVISTA MINERVA

Revista Electrónica Editada por AutanaBooks.

Periodicidad cuatrimestral.

Nuestra Portada:



La revista Journal des Sçavans es considerada como la primera revista científica publicada en Europa, el 5 de enero de 1665. Aunque al principio también contenía material que se podría considerar no científico, como obituarios e informes legales, Pervivió hasta el año 1792 cuando la revolución francesa hizo que cesara su circulación.

Visualización de la Revista:
www.autanabooks.com

Web Máster y Metadatos:
Ing. Ángel Lezama

Diagramadora:
Br.Eliannys Copeland

Asistente de Publicación:
Lcda. Cruzcelis López

DIRECTORIO DE LA REVISTA MINERVA

Editora: Franyelit Suárez

Comité Editorial:

Dra. Hilda Márquez (Universidad Metropolitana de Quito- Ecuador)

Dr. David Parra (Universidad Israel-Quito- Ecuador)

Mgt. Alberto Haro (Empresa Enyde.ec- Ecuador)

Mgt. Gustavo Chango (Pontificia Universidad Católica-Sede Esmeraldas- Ecuador)

Dra. Gloria Peña (Pontificia Universidad Católica-Sede Esmeraldas- Ecuador)

Dra. Beatriz Maldonado (Pontificia Universidad Católica-Sede Esmeraldas- Ecuador)

Mgt. Karina Mendoza (Universidad UTE-Quito- Ecuador)

Mgt. Juan Segura (Universidad Tecnológica Indoamérica-Quito- Ecuador)

Dra. Neris Ortega (Universidad Metropolitana de Quito- Ecuador)

Dra. Elsa Zamora (Universidad Metropolitana de Quito- Ecuador)

Mgt. Carlos Aguilera (Universidad de Carabobo)

MINERVA
Revista Multidisciplinaria de Investigación Científica

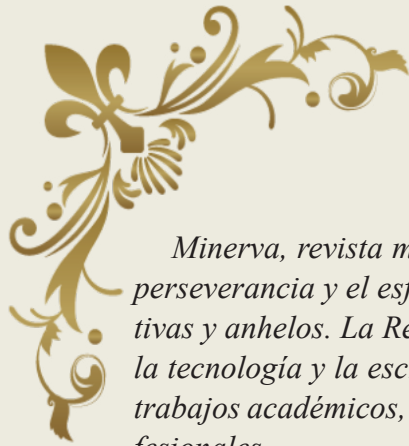


AutanaBooks
Engineering & Services

"Por la gracia de Dios"

CONTENIDO

- 5 Reina Sofía, Correa Melissa, Freire Daniel, Toxicidad producida por compuestos salinos en el proceso de germinación de *Lactuca sativa* .
- 13 Correa Melissa, Solórzano Santiago, Métricas de enriquecimiento para la identificación de estabilizadores del cuarteto G telomérico usando algoritmo genético.
- 24 Freire Daniel, Flor Omar, Alvarez Gabriela, Metodología Seis Sigma en el Incremento de Producción de Spirulina.
- 32 Ángel Núñez, Sistemas híbridos en diseño de distribución eléctrica con algoritmo genético.
- 43 Jaimes Saúl, Análisis térmico-mecánico de los segmentos de máquinas briqueteadoras en industrias siderúrgicas.



EDITORIAL

Minerva, revista multidisciplinaria de investigación científica es el resultado de la perseverancia y el esfuerzo continuo, que dan inicio a un camino de grandes expectativas y anhelos. La Revista Minerva, abre sus puertas a la integración de las ciencias, la tecnología y la escritura científica, para exponer los resultados de investigaciones, trabajos académicos, proyectos, nuevas teorías y nuevas propuestas académicas y profesionales.

Era el año de 1665 cuando nacen las primeras publicaciones científicas, y es entonces cuando empieza la escritura de las ciencias, aunque aún naciente y todavía con la intercesión literaria de los escritos. Pero estos pasos en las publicaciones fueron determinantes para lo que hoy conocemos como revistas de divulgación científica.

Una pequeña gama de productos científicos se refleja en el primer ejemplar de la Revista Minerva, con la participación de investigadores de las áreas de ingeniería eléctrica y biotecnología, que reúnen hallazgos científicos de diferentes países, con una alta calidad académica y profesional.

Este primer número es el reflejo de los primeros pasos de un sueño. La riqueza de su destacado diseño radica en la valoración de las letras que se desplazan por las ciencias para exponer ideas, resultados, proyectos, y un sinnúmero de opciones académicas para el mundo.

La Revista Minerva, tiene carácter multidisciplinario, y está abierta para la recepción de trabajos originales en todas las áreas del conocimiento. Lo más destacado es que incluye la publicación de ensayos académicos y capítulos de libros, que podrán enriquecer la lectura de una revista completa para educadores, profesores, investigadores, académicos y apasionados de las ciencias y de las tecnologías. La Revista Minerva reúne material científico para con ello ofrecer una rendija de conocimientos al universo de la educación y la investigación científica.

Franyelit Suárez

Editora



Toxicidad producida por compuestos salinos en el proceso de germinación de *Lactuca sativa*

Reina Sofía ¹, Correa Melissa ², Freire Daniel³

sofia.reina@udla.edu.ec ¹, melissa.correa.osorio@gmail.com², daniel.freire.balseca@udla.edu.ec ³
<https://orcid.org/0000-0001-7033-9771>¹, <https://orcid.org/0000-0002-1022-2833>², <https://orcid.org/0000-0001-9355-8895>³

¹⁻³Universidad de las Américas, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Ingeniería en Biotecnología, Quito-Ecuador
Quito - Ecuador

Recibido (03/02/20), Aceptado (17/02/20)

Resumen: En este trabajo se presentan los resultados de la evaluación de toxicidad en los procesos germinativo y de crecimiento radicular de *Lactuca sativa* (Lechuga) por efecto del uso de compuestos salinos (NaCl, KCl and K₂SO₄). Se han realizado ensayos en dos tipos de especies de semillas de *Lactuca sativa* negra y roja. Para el proceso se inoculó a una misma concentración los tres medios salinos y las semillas se incubaron por un periodo de 6 días. Tras este periodo se evaluó la longitud de las raíces, número de semillas germinadas en cada medio salino. Se evidenció que la salinidad influye sobre la germinación de distinta manera para las semillas rojas y negras con referencia al medio de cultivo de control.

Palabras Clave: Ecotoxicología, toxicidad, germinación, *Lactuca sativa*.

Toxicity produced by saline compounds in the process of germination of *Lactuca sativa*

Abstract: In this work the results of the evaluation of toxicity in the germination and root growth processes of *Lactuca sativa* (Lettuce) due to the use of saline compounds (NaCl, KCl and K₂SO₄) are presented. Tests have been carried out on two types of seed species of Black and Red *Lactuca sativa*. For the process, the three saline media were inoculated at the same concentration and the seeds were incubated for a period of 6 days. After this period the length of the roots, number of germinated seeds in each saline medium was evaluated. It was shown that salinity influences germination differently for red and black seeds with reference to the control culture medium.

Keywords: Ecotoxicology, toxicity, germination, salinity, *Lactuca sativa*.



I. INTRODUCCIÓN

Las pruebas de toxicidad son herramientas necesarias en la determinación del efecto nocivo de distintos compuestos químicos en relación a la concentración o tiempo de dosis y respuesta para evaluar el impacto sobre el medio ambiente y sus recursos naturales como: suelo, aire y agua [1]. Con respecto a las pruebas de ecotoxicidad son métodos generalmente rápidos que requieren de mínimos recursos instrumentales para cuantificar respuestas biológicas y la magnitud del efecto de un agente o condición específica en seres vivos y con mayor énfasis en poblaciones, comunidades y ecosistemas [2].

Por lo general, los compuestos tóxicos se complejizan mediante transformaciones biológicas, físicas y químicas a componentes más tóxicos en relación a los iniciales cuando entran en contacto con el medio ambiente, lo que representa peligros ambientales y de salud para una población [3]. La ecotoxicología es empleada para predecir a través de bioensayos o biomarcadores los efectos generados por los compuestos contaminantes y de esta forma realizar tratamientos de remediación que prevengan perturbaciones ambientales. Adicionalmente, la liberación de estas sustancias o desechos tóxicos tienden a bioacumularse a largo plazo en los sistemas biológicos desencadenando estrés en el medio ambiente (ecotoxicidad) y disminuyendo considerablemente la calidad del entorno [4].

La fauna terrestre está sometida a condiciones frecuentemente desfavorables para su crecimiento y funcionamiento óptimo. Por ello, este tipo de plantas, son empleadas como bioindicadores en suelos y aguas para determinar la presencia de compuestos tóxicos y obtener información de estos medios [5]. Se establece el empleo de diferentes especies de lechuga y cebolla como bioindicadores en el desarrollo de bioensayos mediante distintos protocolos de ecotoxicología [6]. A partir de ello, se han ejecutado diversos bioensayos de toxicidad con semillas de lechuga (*Lactuca sativa*) que estudian los efectos fitotóxicos en el proceso de germinación y crecimiento de los primeros brotes de plántulas durante las primeras horas de exposición a concentraciones salinas. [7].

La evaluación de la disminución en el porcentaje de germinación o inhibición radicular son consideradas como marcadores biológicos durante las pruebas de toxicidad con distintas concentraciones de compuestos contaminantes. El efecto de la salinización por presencia de sulfato de calcio, cloruros, sulfatos de sodio y magnesio induce un aumento en la presión osmótica del suelo interfiriendo en el desarrollo de los cultivos vegetativos. [8] Adicionalmente, los estudios de fitotoxicidad que evalúan la germinación y desarrollo de radículas son más económicos, viables y rápidos con respecto a otras metodologías, ya que *Lactuca sativa* presenta fácil y rápida germinación en pocos días, bajos costos asociados, menor tiempo de exposición, no necesita de equipos especializados ni de tratamientos de las muestras (detoxificación, saneamiento, etc.) [9].

Finalmente, el objetivo de este bioensayo es evaluar el proceso de germinación de dos especies de semillas de lechuga con diferentes tipos de sales (cloruro de sodio, potasio y sulfato de potasio) a una misma concentración, además de comparar el efecto de la salinidad en la longitud en centímetros de las raíces. A continuación se presenta una descripción clara y concisa sobre el tema y su relevancia en la sección II, posteriormente se muestra la metodología empleada para los distintos análisis, seguido de los resultados obtenidos en la sección IV y finalmente en el apartado V se encuentran las conclusiones respectivas.

II. DESARROLLO

La salinidad del suelo es una de las limitaciones más importantes en la producción de cultivos en regiones áridas y semiáridas. Las tierras de regadío están particularmente en riesgo, ya que aproximadamente un tercio se ve significativamente afectada por la salinidad. A pesar de su superficie relativamente pequeña, se estima que las tierras de regadío producen un tercio de los alimentos del mundo [15]. El crecimiento de las plantas se reduce en última instancia por el estrés salinidad, aunque las especies de plantas difieren en su tolerancia a la salinidad. Un enfoque para reducir los efectos nocivos de la salinidad del suelo en la producción de cultivos es el desarrollo de cultivares tolerantes a la sal. Aunque algunos cultivos son moderadamente tolerantes a las condiciones salinas, muchos cultivos se ven afectados negativamente por niveles incluso bajos de sal [4]. En la actualidad existe una literatura extensa sobre los mecanismos de tolerancia a la sal, mucho de ellos, denotan que una reducción en la tasa de germinación es debido al aumento de la concentración del NaCl ya que los iones de este compuesto generan un retraso en la absorción del agua propiciando el daño celular en la funcionalidad de la pared celular y membrana del embrión. En base a lo mencionado, el problema resultante es que se produce una afección en la permeabilidad de las membranas plasmáticas ocasionando un aumento del influjo de los iones del NaCl. Otro aspecto es que la tasa de germinación se ve restringida por una humedad baja, debido al potencial toxicológico que ejercen los compuestos salinos. El estudio realizado, se lo ejecuto con el fin de evaluar si existe una relación entre la salinidad y la tasa

de germinación de las semillas de *Lactuca sativa*.

III.METODOLOGÍA

Se realizó un ensayo de germinación con lechuga (*Lactuca sativa*), tanto cresa como la “normal” en forma de repollo. En ambas se procedió de la misma manera con respecto al tiempo de incubación en cámara que fue de 6 días.

Se utilizaron cajas Petri plásticas con tapa de 8cm de diámetro y 3 cm de altura. En el fondo de cada caja se colocó papel filtro embebido con 2ml del tratamiento correspondiente, luego se tapó y se introdujo en una cámara de crecimiento a 25-27°C. Cada tratamiento constó de 3 repeticiones, más su respectivo control con 10 semillas, variando 5 ensayos de lechuga con semilla roja y 5 con lechuga de semillas negra. A los 2 días se hizo una primera obtención de los resultados, tomando en cuenta solo la germinación. A los 6 días se volvió a contabilizar el número de semillas germinadas y se midió la longitud del sistema radicular. Se calculó el porcentaje de germinación de cada tratamiento.

Se colocó en cada tratamiento la misma concentración, pero lo que varió fueron los tipos de sales que se administraban, como NaCl, KCl y K₂SO₄.; con un testigo únicamente con agua destilada para cada tratamiento.

IV.RESULTADOS

A) Tasa de germinación

La tasa de germinación se determinó a través del número de semillas germinadas de *Lactuca sativa* en un periodo de 48 horas. De acuerdo a la Figura 1, se puede observar los tres tratamientos (A),(B) y (C) que corresponden a los tres compuestos químicos potencialmente toxicológicos para el proceso germinativo. Cada tratamiento tuvo 4 corridas experimentales de las cuales, la primera situada en la parte superior izquierda de la corresponde al control (tratamiento sin agente químico), mientras que las 3 corridas restantes corresponden a las réplicas de cada tratamiento. Todas las corridas experimentales se ejecutaron bajo una misma concentración 0.045M de NaCl para el tratamiento A, 0.045 de KCl para el tratamiento B y 0.045M de K₂SO₄ para el tratamiento C.

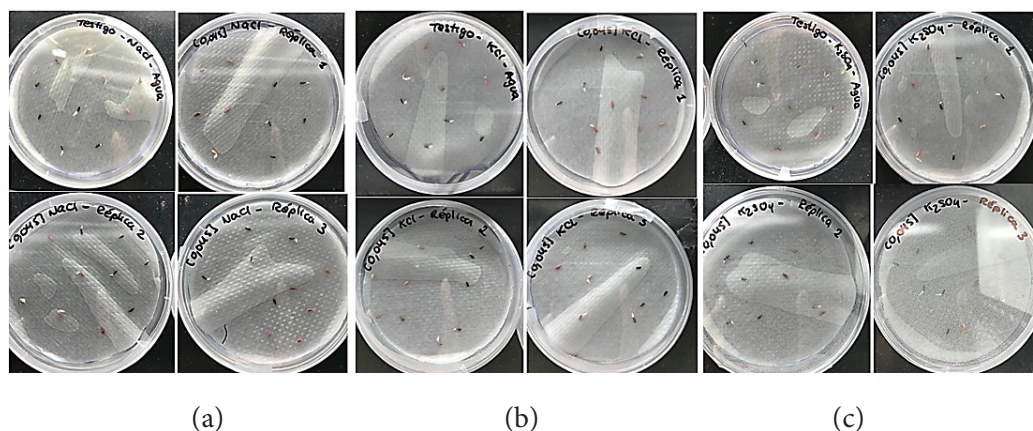


Figura 1. Resultados obtenidos al segundo día de siembra de las semillas de *Lactuca sativa* tras la aplicación de 0.045 M de NaCl (A), KCl (B), K₂SO₄ (C) respectivamente.

De acuerdo a la Tabla I, se puede denotar el número de semillas germinadas para cada tratamiento. Se obtuvo el conteo respectivo para el control y las réplicas de cada tratamiento. Se aplicó en este ensayo, cloruro de sodio, sulfato de potasio y cloruro de potasio al 0,045 M (número de semillas sembradas por placa: 5)

TABLA I. Número de semillas germinadas 6 días posteriores a la siembra

Sales	Control		Réplica N°1		Réplica N°2		Réplica N°3	
	semilla roja	semilla negra	semilla roja	semilla negra	semilla roja	semilla negra	semilla roja	semilla negra
A) NaCl	5	3	3	4	4	5	1	4
B) K ₂ SO ₄	4	4	4	3	1	4	4	4
C) KCl	5	4	5	4	4	3	3	3

Los resultados demuestran dos diferencias en cuanto al efecto de los tres tipos de sales a una misma concentración (0,45M) en el proceso de germinación de las dos especies de *Lactuca sativa*. Se observó un patrón decreciente de germinación en todos los tratamientos con sales de la especie de lechuga cuya semilla era de color rojo, en comparación con el control como se puede observar en la Figura 2. No obstante, los tratamientos con cloruro de sodio y sulfato de potasio produjeron de manera similar la misma cantidad de semillas germinadas, a diferencia del cloruro de potasio, en el cual la tasa de germinación con esta sal aumento en una unidad respecto a los otros tratamientos.

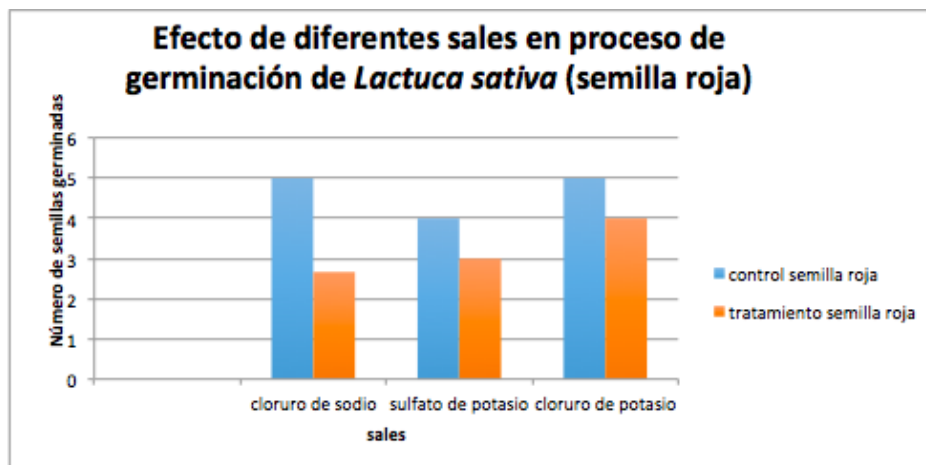


Figura 2. Efecto de diferentes sales a 0.045 M en el proceso de germinación de *Lactuca sativa* (semilla roja). Predominancia de germinación en semillas sin aplicación de sales.

Respecto a estos resultados, lo que se puede evidenciar es que el cloruro de sodio tuvo mayor tasa de incidencia en la inhibición del proceso de germinación de las semillas roja y un efecto contrario en las semillas negras, en el cual la tasa de germinación fue menor. De acuerdo a lo mencionado por [10] encontraron que la tasa de germinación de tres cultivares de *Lactuca sativa* únicamente fueron afectadas cuando la concentración de cloruro de sodio era de 0,030M. Por tanto, lo que se puede inferir es que, el ion sodio es uno de los más predominantes en el ciclo fenológico de las plantas debido a que actúa como un inhibidor de agua y nutrientes y por ende afecta los procesos germinativos y de crecimiento. [11] Al contrario del sodio, el cloruro de potasio potenció el proceso germinativo de la semilla roja, como se puede observar en la Figura 2. Esto sugiere que el ion de potasio participa de forma activa los procesos de turgencia y ósmosis regulatoria según lo constata [12], en el cual evaluaron el contenido del ion potasio en plantas que estaban sometidas a condiciones estrés salino. De esta forma, se puede decir que las semillas sometidas al tratamiento con KCl y K₂SO₄ tuvieron una mayor capacidad de tolerancia a la salinidad y por ende pudieron llevar a cabo su proceso germinativo.

Por otra parte, en los resultados obtenidos de la especie de lechuga cuya semilla era de color negro, se obtuvo que para el control del cloruro de sodio, 3 de las 5 semillas germinaron, mientras que, para el experimento la cantidad de semillas germinadas fue de 4. En cambio, para el sulfato y cloruro de potasio, los controles positivos en estos dos experimentos fueron los mismos, obteniendo una tasa de germinación de 4 de 5 semillas. Así mismo, se obtuvo que para el tratamiento con estas dos sales, el número de semillas germinadas fue de 3. De esta manera, se evidencia que de forma sinérgica germina la semilla en presencia como en ausencia de la sal. Por tanto, la tasa de

germinación promedio en el ensayo de salinidad con KCl, NaCl y K₂PO₄ fue similar al poder germinativo inicial de las semillas, lo cual indica que la germinación no se vio afectada por las concentraciones salinas ensayadas según se observa en la Figura 3.

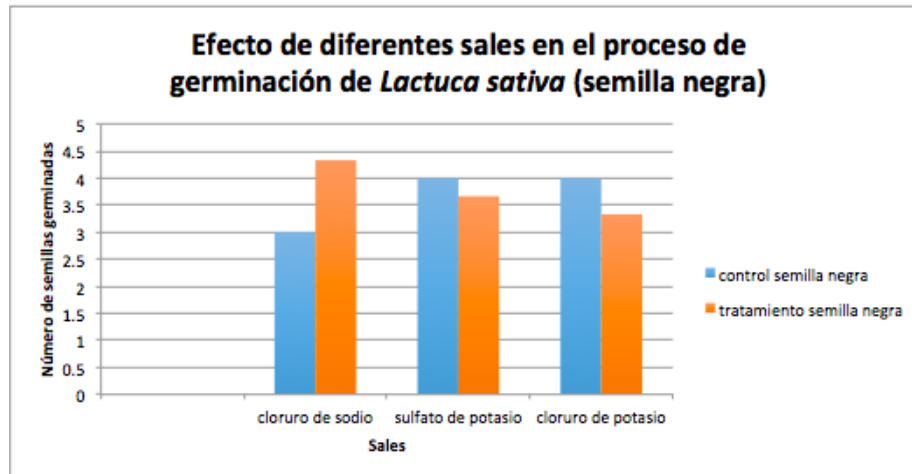


Figura 3. Efecto de diferentes sales a 0.045 M en el proceso de germinación de *Lactuca sativa* (semilla negra).

De este modo, la homeostasis intracelular de K^+ / Na^+ fue crucial para mantener equilibrado el metabolismo celular y adquirir una adecuada tolerancia a la salinidad. [13] En este caso, [14] sugiere que al mantenerse una relación intracelular óptima de K^+ y Na^+ en condiciones salinas, las semillas evitan la acumulación de cantidades excesivas de Na^+ en el citosol, junto con la retención de concentraciones fisiológicas de K^+ citosólico. De esta forma, se puede considerar que la relación K^+/Na^+ es un componente clave en la tolerancia a la salinidad en la mayoría de las plantas, ya que exhiben mecanismos fisiológicos que evitan una posible toxicidad generada por el ion de sodio. [15]

b) Longitud del sistema radicular

La longitud del sistema radicular se determinó a través de la medición de las raíces de las semillas rojas y negras de *Lactuca sativa* tras un dejarlas en un periodo de crecimiento de 6 días. De acuerdo a la Figura 4, se puede observar los tres tratamientos (A),(B) y (C) que corresponden a los tres compuestos químicos. Cada tratamiento tuvo 4 corridas experimentales de las cuales con su respectivo control. Se puede observar en la Figura 4 que para la mayoría de corridas experimentales, la proliferación del sistema radicular es evidente.

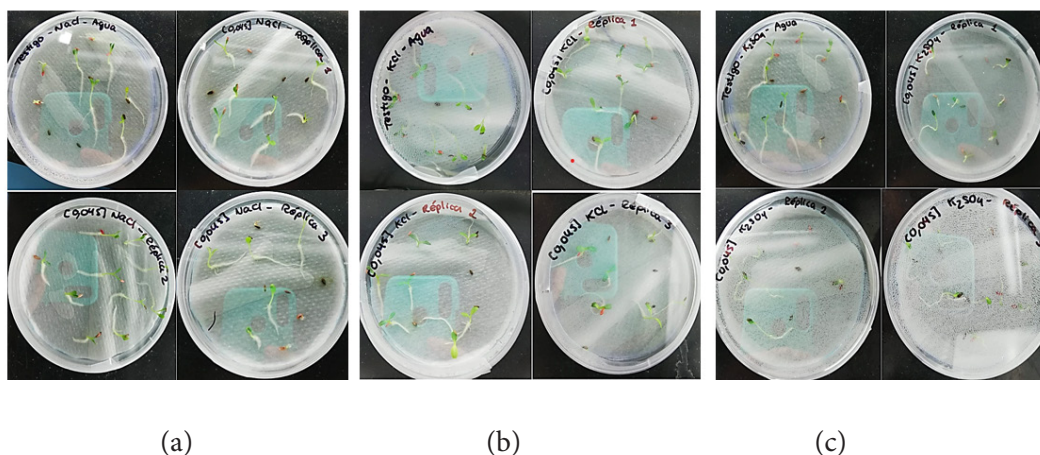


Figura 4. Resultados obtenidos 6 días posteriores a la siembra de semillas de *Lactuca sativa* bajo la aplicación de 0.045 M de NaCl.

En la Tabla II. se constata el promedio de la longitud del sistema radicular de las semillas rojas y negras de cada tratamiento.

TABLA II. . Longitud (en cm) de raíces de *Lactuca sativa* 6 días posteriores a la siembra

Sales	control		Réplica N°1		Réplica N°2		Réplica N°3	
	semilla roja	semilla negra	semilla roja	semilla negra	semilla roja	semilla negra	semilla roja	semilla negra
A) NaCl	1.060	2.000	1.168	1.450	2.375	2.450	0.700	2.250
C) K ₂ SO ₄	2.438	2.375	1.312	0.750	0.750	5.813	1.375	2.000
B) KCl	2.500	2.375	1.650	2.125	1.813	2.250	1.667	2.233

En la tabla II, se presentan las longitudes de las raíces para cada semilla en función de cada medio salino empleado y luego de 6 días posteriores a la siembra tras la aplicación de cloruro de sodio, sulfato de potasio y cloruro de potasio al 0,045 M (número de semillas sembradas por placa: 5)

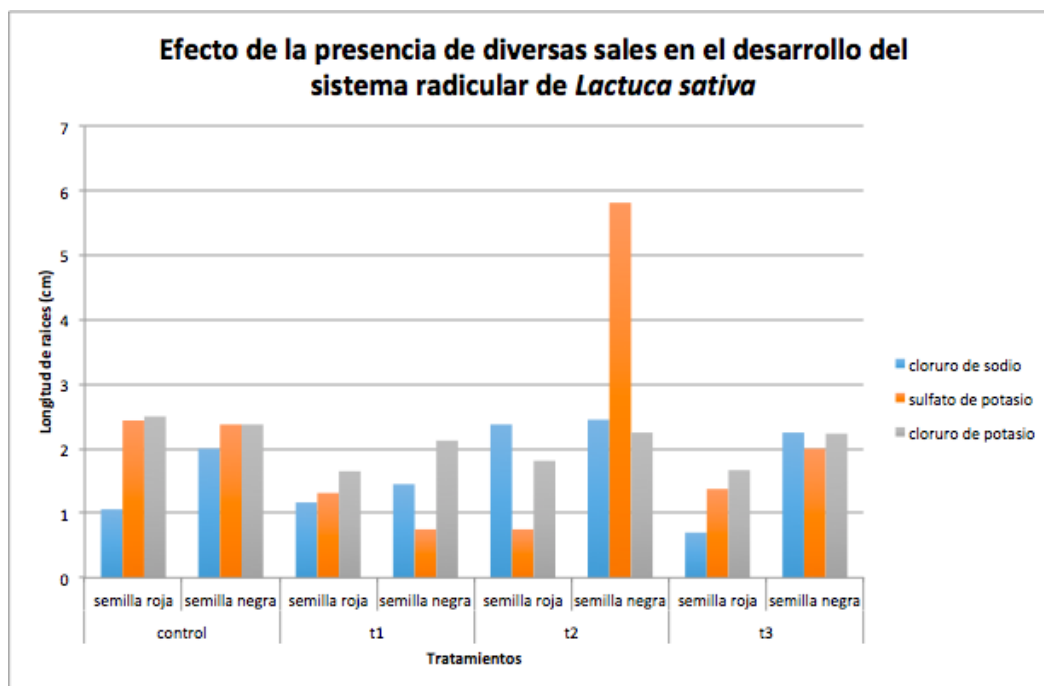


Figura 5. Efecto de diferentes sales a 0.045 M en el desarrollo de raíces en *Lactuca sativa* (semilla negra y roja).

Por otro lado, los resultados sobre el efecto de las diferentes sales en el desarrollo del sistema radicular demostraron ciertas variantes en dependencia del tipo de semilla. En el caso de la semilla roja, se obtuvo que para el tratamiento con NaCl, la longitud del sistema radicular osciló entre 1,5 cm y 2cm que se observaron en la longitud radical lo cual influyó directamente sobre los resultados del índice de germinación. En cambio, en el tratamiento con sulfato de potasio, esta medición difirió ya que la longitud aproximada fue entre 0,5cm y 2cm. Finalmente, la longitud radicular con el cloruro de potasio fue la que presentó mayor crecimiento, obteniendo entre 1,8cm y 2,5cm de raíz. En los tratamientos empleados en la semilla negra, se obtuvo que para el cloruro de sodio la longitud del sistema radicular aproximado fue de 1,5cm y 2cm respecto al control, mientras que, para el sulfato de potasio el sistema radicular desarrollado presentó variaciones longitudinales obteniendo mediciones desde 0,5cm hasta 5,5cm.

El tratamiento con el KCl es el que presento un constante crecimiento en las semillas de control y las réplicas, obteniendo como media de la longitud radicular un valor de 2,2cm. Se ha documentado que valores elevados de salinidad causan un estrés en la germinación, así como en el desarrollo del sistema radicular de *Lactuca sativa*. A pesar de que los compuestos salinos inhiben el crecimiento y desarrollo del sistema radicular en las plantas, investigadores como [16], [17] denotan que únicamente concentraciones elevadas de estos compuestos exhiben efectos fitotóxicos sobre la fisiología de la planta. Por esta razón, a pesar de que las semillas rojas y negras estuvieron expuestas a un estrés salino, la concentración evaluada no incidió en la prolongación su sistema radicular [18].

V.CONCLUSIONES

Los ensayos presentados a la misma concentración, pero diferente solución salina indicaron que con respecto a las semillas (rojas) de lechuga los tratamientos poseen menor tasa de germinación que el control. Por otro lado, las semillas negras de lechuga con cloruro de sodio fue la que obtuvo un mayor número de semillas germinadas en comparación con su respectivo tratamiento control. Con respecto al desarrollo radicular las sales que influenciaron con un mayor crecimiento fueron sulfato de potasio y cloruro de potasio respectivamente, independiente del tratamiento.

La ecotoxicidad ejercida por diferentes compuestos químicos en procesos germinativos y de crecimiento de una especie vegetal es directamente proporcional al grado de tolerancia que la planta exhiba. Con esto, se puede evidenciar que los efectos toxicológicos se presentan cuando las concentraciones de estos componentes son elevadas y que a una concentración mínima, estos no ejercen un estrés drástico en los procesos vegetativos.

REFERENCIAS

- [1]R. Restrepo y M. Ortiz. «Pruebas de ecotoxicidad para establecer el potencial genotóxico del hipoclorito de sodio, mediante bulbos de cebolla *Allium cepa* L y semillas de lechuga *Lactuca sativa* L como bioindicadores». 2011. [En línea]. Available: Revista Agropecuaria, 7-14.
- [2]M. Newman. «Fundamentals of Ecotoxicology». [En línea]. 2013.Available: CRC Press, 1-250.
- [3]M. Lastiri y D. Álvarez. «Efecto de la salinidad en la germinación y emergencia de siete especies forrajeras». 2017. [En línea]. Available: Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 1245-1257.
- [4]P. Chapman. Integrating toxicology and ecology: putting the "eco" into ecotoxicology». 2012. [En línea]. Available: Marine Pollution Bulletin, 7-15.
- [5]M. Sorbero y A. Ronco. « Ensayo de toxicidad aguda con semillas de lechuga *Lactuca sativa* L. 2016 [En línea]. Available Ensayos de toxicidad aguda con semillas de lechuga» (págs. 55-67). IDRC. 2016
- [6]OECD. Terrestrial Plant Test: 208: «Seedling Emergence and Seedling Growth Test».2003 [En línea]. Available DRAFT DOCUMENT.
- [7]N. Foti y C. Billard. «Bioensayos de germinación con semillas de rucula y lechuga para monitoreo de calidad de agua». 2005. [En línea]. Revista Científica Agropecuaria, 47-53.
- [8]J. Laynez y J. Méndez. «Efecto de la salinidad del suelo sobre la germinación de semillas de maíz de diferentes pesos». 2010. [En línea] Available. Revista Agronómica, 62-73.
- [9]Universidad Nacional de Avellaneda. (2014). «Ensayo de toxicidad aguda con semillas de lechuga *Lactuca sativa* L». 2014. [En línea] Available. http://ibio.ddns.net/Ensayo_de_Ecotoxicidad.pdf.
- [10]E. Catalán, M. Inzunza, V. April y M. Villa. «Absorción y traslocación de sodio y cloro en plantas de chile fertilizadas con nitrógeno y crecidas con estrés salino ». 2006. [En línea] Available. Food and agriculture Organization of the United Nations, 79-88.
- [11]M. Madueño, P. García, H. Martínez y T. Rubio. «Germinación y desarrollo de plántulas de frijolillo *Rhynchosia minima* (L.) DC en condiciones de salinidad ». [En línea] Available Terra Latinoamérica, 47-54. 2006
- [12]P. Africano y S. Pinzón. «Comportamiento fisiológico de plantas de rábano (*Raphanus sativus* L.) sometidas a estrés por salinidad». [En línea] Available Conexión Agropecuaria JDC, 11-22. 2015
- [13]M. Hasegawa, R. Bressan, J. Zhu y J. Bohnert. « Plant cellular and molecular responses to high salinity». [En línea] Available Annual review of plant biology, 463-499. 2000
- [14]T. Flowers. «Improving crop salt tolerance». [En línea] Available Journal of Experimental botany, 307-319. 2010
- [15]R. Munns. «Comparative physiology of salt and water stress» . [En línea] Available Plant, cell & environment, 239-250. 2002

[16] A. Al-Maskri, I. Al-Kharusi, H. Al-Miqbali y K. Mumtaz. «Effects of salinity stress on growth of lettuce (*Lactuca sativa*) under closed-recycle nutrient film technique». [En línea] Available .International Journal of Agriculture and Biology, 377-383. 2010

[17] W. Li, X. Liu, M. Khan y S. Yamaguchi. «The effect of plant growth regulators, nitric oxide, nitrate, nitrite and light on the germination of dimorphic seeds of *Suaeda salsa* under saline conditions». [En línea] Available J. Plant Res, 207-214. 2015

[18] X. Wang, C. Sun, S. Gao, L. Wang y H. Shokui. «Validation of germination rate and root elongation as indicator to assess phytotoxicity with *Cucumis sativus*». [En línea] Available ELSEIVER, 1711-1721. 2001

RESUMEN CURRICULAR



Sofía Reina, estudiante de último semestre de la carrera de biotecnología. Ha participado en congresos y foros de ciencia y tecnología en el Ecuador. Recibió una mención reconocida en el concurso Infomatrix Latinoamericana 2020 llevada a cabo en Guadalajara debido al proyecto encaminado a la biotecnología industrial.



Melissa Correa, Egresada de Ingeniería en Biotecnología en la Universidad de las Américas en Quito-Ecuador. Con participación destacada en el primer foro de CEBIO, congreso internacional de Biotecnología UDLA y final continental Solacyt 2020 en México. Desarrollo de proyectos en Biorreactores de inmersión temporal y fotobiorreactores presentados a nivel internacional.



Daniel Freire, Maester en Ingeniería Industrial y Productividad. Más de 8 años de experiencia en la industria biotecnológica y alimenticia, Ex-Gerente Técnico y Producción de AndesSpirulina C.A. Experiencia en planificación de la producción, control de bioprocesos, sistemas de calidad BPM, HACCP, ISO 22000, mejora continua, Six Sigma e investigación y desarrollo en el área de fotobiorreactores y procesos de hidrólisis enzimática.

Métricas de enriquecimiento para la identificación de estabilizadores del cuarteto G telomérico usando algoritmo genético

Correa Melissa¹., Solórzano Santiago²

melissa.correa.osorio@gmail.com; solorzano.lescanao@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-1022-2833>¹, <https://orcid.org/0000-0002-8154-5277>²

¹Universidad de las Américas, Facultad de Ingeniería y

Ciencias Aplicadas, Ingeniería en Biotecnología, Quito-Ecuador

²Consultor para el PNUD proyecto de las Naciones Unidas para el desarrollo
Quito - Ecuador

Recibido (06/03/20), Aceptado (26/03/20)

Resumen: En este estudio se encuentra detallada una combinación de herramientas computacionales de acoplamiento y cribado virtual, en 108 moléculas activas y 3620 señuelos para encontrar estabilizadores del cuarteto G (G4). Para tener resultados más precisos se aplicaron combinaciones de programas de acoplamiento con quince funciones de puntuación energética. La validación y evaluación de las métricas se realizó con el algoritmo genético CompScore. Los resultados evidenciaron un aumento en BEDROC y EF del 50% en comparación a otras estrategias, además de reflejar un reconocimiento temprano de moléculas activas. A partir de estos resultados es posible trabajar con las moléculas que presentaron un buen reconocimiento temprano y evaluar su efecto como estabilizadores de G4. De esta manera se garantiza resultados más eficientes y precisos en la etapa preclínica para el desarrollo de anticancerígenos.

Palabras Clave: Métricas de enriquecimiento; telomero; cuarteto G (G4); CompScore.

Enrichment metrics for the identification of stabilizers of the telomeric G quartet using genetic algorithm

Abstract: In this study a combination of computer tools for coupling and virtual screening is detailed, in 108 active molecules and 3620 decoys to find stabilizers for G quadruplex (G4). To have more precise results, combinations of coupling programs with fifteen energy scoring functions were applied. The validation and evaluation of the metrics was done with the CompScore genetic algorithm. The results showed an increase in BEDROC and EF of 50% compared to other strategies, as well as reflecting early recognition of active molecules. From these results it is possible to work with the molecules that showed a good early recognition and evaluate their effect as G4 stabilizers. This ensures more efficient and accurate results in the preclinical stage for the development of anticancer drugs.

Keywords: Enrichment metrics; telomere; G quadruplex (G4); CompScore.



I. INTRODUCCIÓN

Los telómeros forman una parte fundamental para el desarrollo de la vida y el envejecimiento [1-3]. Existe evidencia que indica que en ciertos casos los telómeros son disfuncionales, como resultado de su acortamiento crítico en las células somáticas normales, lo cual provoca una respuesta al daño a nivel de ácido desoxirribonucleico ADN [4]. En las células tumorales, la telomerasa confiere la inmortalidad celular y también regula la generación de ácido ribonucleico mensajero ARNm. Estas características reflejan que la telomerasa relacionada con la aparición de tumores malignos y su difusión en diferentes órganos [5]. Algunos estudios sugieren que la estabilización del cuarteto G telomérico (G4), puede inhibir directamente la acción de la telomerasa mediante el bloqueo de la unión de la telomerasa al telómero [6]. Una gran variedad de estructuras G4 se han dilucidado a nivel atómico, generando una nueva vía para el diseño de ligandos dirigidos hacia la estructura del G4 de forma computacional [7]. Los últimos estudios realizados sobre estabilizadores de G4 mencionan que la interacción entre G4 y el ligando ejerce efectos antiproliferativos a través de mecanismos dependientes e independientes de los telómeros. No obstante, hasta el momento encontrar compuestos que estabilicen G4 ha resultado en un gran desafío. A pesar de que existen muchos datos disponibles sobre G4 y sus ligandos, solo un número limitado, se ha explorado para la detección virtual o en la detección de nuevas moléculas bioactivas. Aunque en la actualidad se usen múltiples técnicas para el descubrimiento de fármacos asistido por herramientas virtuales, existe una clara falta de comprensión en el mecanismo molecular primario que se encuentra tras la actividad de los aciertos que se consigue empleando estas técnicas [9]. Por otra parte, para la validación de los resultados requiere la combinación de distintos métodos o herramientas para superar las falencias que presenta un único protocolo, lo cual puede hacer que el proceso se considere más complejo [10].

A partir de esto, se ha planteado desarrollar una metodología de cribado virtual basada en estructura y como estrategia para la validación de datos se usará un algoritmo genético. La estructura de este trabajo inicia con los aspectos teóricos del tema en el apartado III, seguido de la metodología y programas aplicados en la sección III, a continuación se detallan los resultados obtenidos y se tiene como punto final las conclusiones.

II. DESARROLLO

A) Características de los telómeros y la telomerasa

En los mamíferos los extremos de los cromosomas se encuentran cubiertos por estructuras protectoras de ADN y proteínas de unión. A este complejo se le denomina telómero [11]. Los telómeros son estructuras conformadas de nucleoproteínas situadas en el extremo de cada brazo cromosómico. Cumple como principal función el mantenimiento de la estabilidad del genoma, al garantizar que los extremos naturales de los cromosomas no se confundan con sitios de daño en el ADN [12]. Además de presentar un papel fundamental frente a la señalización del daño del ADN, también evitan su reparación errónea. Esta función de activar la respuesta al daño e inhibir su reparación, podría tener una consecuencia importante en el proceso de envejecimiento celular dependiente de la longitud telomérica y la supresión tumoral [13].

La telomerasa es un heterodímero de transcriptasa inversa, formada por una subunidad enzimática y una catalítica de molde de ARN no codificante, para la síntesis de novo de secuencias de ADN no telomérico. Los componentes principales de la telomerasa son la transcriptasa inversa de la telomerasa (TERT) y el componente de ARN de la telomerasa (TERC). El molde de ARN, permite que TERT agregue repeticiones al terminal cromosómico. TERC se caracteriza por expresarse de forma constante, a diferencia de TERT que permanece inactiva en las células somáticas, generando el acortamiento constante en los telómeros [13]. La represión de la telomerasa en las células somáticas y el mecanismo de barrera de proliferación de los telómeros, generan una vía supresora que limita el crecimiento de las células tumorales [14]. Según resultados estadísticos, el 85% de células cancerígenas usan la telomerasa para mantener la longitud del telómero. En tumores que presentan un estado avanzado o metastásico, la actividad de esta ribonucleoproteína se ve incrementada. La telomerasa confiere inmortalidad a las células cancerígenas, adicionando repeticiones en tándem al extremo 3' del telómero, dando como consecuencia un mantenimiento o prolongación sobre la longitud del telómero [15].

B) Definición y características del G4 telomérico

Las estructuras de ácido nucleico helicoidal de cuatro cadenas ricas en guanina reciben el nombre de G- cuádruplex o G4 [16]. Esta estructura es definida como una forma alternativa de ADN o ARN compuesta por varias capas

planas de guaninas denominadas tétradas, se forman por lo general por secuencias de tipo 5'-G3+N1-7G3+N1-7G3+N1-7G3+-3', donde N puede representar cualquier base nitrogenada (purinas y pirimidinas). El G4 se forma al ensamblarse las tétradas de guanina, de forma apilada hasta adaptar un bucle con interacciones que se consideren energéticamente favorables [16]. Estas se unen por enlaces de hidrogeno de tipo Hoogsteen, en donde cada tétrada rota aproximadamente 90° respecto a la adyacente. Para conseguir un buen ensamblaje es necesaria la presencia de cationes, con el fin de que se unan entre cada par de tétradas, coordinadas por los grupos carbonilo. La presencia de los cationes suele ser coordinada por las secuencias que conforman el bucle que brinda la estructura a G4 [17]. Los bucles que conectan cada tétrada en la topología paralela son de doble cadena conformados por pocos nucleótidos, mientras que en las formas antiparalela e híbrida su longitud se extiende con un mayor número de nucleótidos [18].

C) Detección virtual de ligandos para G4

Hasta el momento existen más de 1.000 ligandos caracterizados, que ejercen efecto estabilizador sobre G4. Su descubrimiento ha partido de herramientas computacionales como cribado virtual (VS) y cribado tradicional de alto rendimiento (HTS) [17-18]. Estos ligandos se pueden dividir en dos clases químicas: compuestos heteroaromáticos planos y ligandos cíclicos o alicíclicos. Algunas de estas moléculas han sido cristalizadas con G4 y han sido usados para generar nuevos modelos de investigación [19]. Los métodos computacionales para encontrar nuevos estabilizadores son varios. Entre los más usados está el farmacóforo, un modelado basado en características específicas para garantizar las interacciones con un objetivo biológico definido y desencadenar su respuesta biológica. En conclusión este método se basa en unión del ligando a su objetivo [18]. Otra estrategia consiste en el modelamiento basado en formas. Se base en la estructura o geometría del compuesto para que este sea complementario al estar activo. Cuando la estructura de la molécula esta activa sirve como plantilla o molde para la generación de un modelo de forma. Para obtener mejores resultados usando esta estrategia se sugiere que se adicione información química. La característica común de estas dos estrategias es que filtran una gran cantidad de compuestos de bases de datos, pues es uno de los requisitos de ambos modelos. Por otra parte, las estrategias de acoplamiento o docking requieren específicamente datos estructurales del target. La eficiencia del método se estima mediante el cálculo de energía libre [15]. La combinación de múltiples métodos mejora el enriquecimiento de las moléculas activas en los resultados virtuales, además, ayuda a solucionar el problema de selectividad que suelen tener este tipo interacciones [14].

D) Métricas de enriquecimiento

Para el rendimiento del modelo se debe tomar en cuenta: área bajo la curva acumulativa (AUAC), Factor de enriquecimiento (EF) y discriminación de ROC mejorada por Boltzmann (BEDROC) [14].

$$UAC = 1 - \frac{1}{nN} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

La ecuación 1, permite determinar la curva AUAC, en donde N es el número total de compuestos, n la cantidad de compuestos activos y X_i el ranking relativo del compuesto i.

La métrica EF calcula el número de veces que se enriquece una fracción con compuestos activos en relación con lo que se espera de una distribución uniforme de activos.

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i}{Xn} \quad \text{cuando } \delta_i = \begin{cases} 1, & \text{si } r_i \leq xn \\ 0, & \text{si } r_i > xn \end{cases} \quad (2)$$

En la ecuación 2 se muestra la métrica EF, donde r_i es la clasificación relativa de $X_i = r_i/N$ en toda la lista clasificada; X es la fracción de la lista ordenada ponderada entre 0 a 1.

$$BEDROC = \frac{RIE - RIE_{min}}{RIE_{max} - RIE_{min}} \quad (3)$$

La ecuación 3 muestra el cálculo para BEDROC considerando un valor de $\alpha=160,9$. Mientras que las ecuaciones 4 refleja cómo obtener BEDROC

$$RIE = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e^{\alpha X_i}}{\frac{1}{N} \left(\frac{\alpha^{1-e^\alpha}}{e^N} \right)} \quad RIE_{min} = \frac{1 - e^{\alpha R_\alpha}}{R_\alpha (1 - e^\alpha)}$$

$$RIE_{max} = \frac{1 - e^{\alpha R_\alpha}}{R_\alpha (1 - e^{-\alpha})} \quad (4)$$

III.METODOLOGÍA

Como punto inicial se buscó del banco de datos de proteínas RCSB PDB las estructuras de tipo paralela, anti paralela e híbrida del G4 telomérico [15]. A partir de la estructura se eligió como receptor la molécula con la molécula de acridina 3, 6,9 –trisustituida BRACO19 (3CE5). Para su preparación se usó de los paquetes de OEDocking el Software MakeReceptor [16]. En el proceso de preparación se eliminaron las moléculas de agua y el ligando. Además se agregaron átomos de hidrogeno y cargas. Para la Preparación del ligando Para generar las conformaciones 3D se empleó el software OMEGA. Se aprovecharon las herramientas MakeFraglib para la generación de fragmentos, Omega 2 para construcción 3D de los fragmentos guardando un total de 200 conformaciones [17]. Mientras que con el Software Quacpac se aplicó molcharge para adicionaron las cargas a las estructuras 3D [18]. Luego de obtenerse el ligando con un máximo de 200 conformaciones 3D mas las cargas y haber preparado el receptor, se realizó el acoplamiento con el software FRED [19]. Se puntuaron con Chemgauss4 500 moléculas para evaluar la calidad de las poses. Se guardaron aquellas con la puntuación más baja para cada conformación de ligando, dando un máximo de 20 poses. Para encontrar estabilizadores de G4 Se usó la base de datos G4LDB [20] y se buscaron compuestos en base a la estabilidad de FRET mayor a 10 grados y menor a 10 grados. De la información que se recopiló se filtró considerando la secuencia del telómero humano y las concentraciones experimentales de los compuestos, máxima de 20 μ M. Para generar moléculas señuelo Se usó la herramienta A Database of useful Decoys: Enhanced (DUD-E) [21]. En la herramienta se ingresó el código SMILES y luego de una hora se obtuvieron los resultados. Del archivo recibido se extrajo las líneas que contenían los ligandos y se agrupó en un solo documento. Los señuelos fueron separados en grupos se cien y se dejó solo con su código SMILES y su código de identificación.

A) Acoplamiento para las moléculas señuelo

Preparación del ligando y receptor: Para la preparación del ligando se usó una metodología similar a la aplicada anteriormente, usando los códigos SMILES de cada molécula señuelo y de los ligandos. La única diferencia que se efectuó tras generar los fragmentos, fue que inicialmente se crearon 200 conformaciones y en un siguiente resultado se corrió el mismo programa, pero generando una única conformación. La adición de cargas solo se efectuó sobre los resultados que generaron una única conformación. De igual modo se mantuvo el receptor preparado previamente. Para el acoplamiento se usó el software FRED [19]. Partiendo de las 200 conformaciones generadas. Únicamente se guardó una pose. También se efectuó el acoplamiento usando una alta resolución. A los resultados obtenidos se le adicionaron cargas usando del Software Quacpac molcharge [18].

B) Re-scoring

Preparación del receptor, esferas y caja: Se usó el software Dock 6.9 [22] y se mantuvieron los parámetros pre-establecidos por el programa para la obtención del receptor, las esferas y la caja. Para realizar la puntuación se usaron las herramientas de DOCK 6.8, OEDOCKING y GOLD. Los parámetros de cada programa se mantuvieron en sus valores por defecto. Además, se calcularon quince funciones de puntuación (tabla I) para las poses obtenidas durante el acoplamiento molecular [23].

TABLA I. Funciones de puntuación.

Docking Program	Scoring Function
Dock 6.8	Grid
	Contact
	Continuous
	Hawkins
	PBSA
Gold	SASA
	PLP
	GoldScore
	ChemScore
OEdocking	ASP
	Shapegauss
	ChemScore
	ChemGauss 3
	ChemGauss 4
	PLP

C) Modelos de cribado virtual

Los modelos de cribado virtual se basaron en la metodología CompScore, la cual se basa en combinar los componentes de distintas funciones de puntuación de acoplamiento que maximiza las métricas de detección virtual [23]. Los valores de los componentes de las funciones de puntuación energética fueron resumidos en una tabla empleando los códigos disponibles con CompScore. A continuación se separaron los ligandos de las moléculas señuelo. Se tomó el 80% de cada grupo y se formó un archivo para el entrenamiento de los modelos. El 20% restante de los datos se reservó para la validación del modelo obtenido. Durante el entrenamiento de los modelos se mantuvieron los parámetros preestablecidos para el método CompScore. El rendimiento del modelo se evaluó usando varias métricas: área bajo la curva acumulativa (AUAC), Factor de enriquecimiento (EF) y discriminación de ROC mejorada por Boltzmann (BEDROC) [23].

IV.RESULTADOS

Se usó la estructura paralela con el código 1kfl. De la base de datos G4LDB se obtuvo un total de 291 estabilizadores iniciales con una actividad de FRET mayor a 10 grados, mientras que se obtuvieron 19 ligandos con actividad menor a 10 grados. Mientras que del programa A Database of useful Decoys, se obtuvo un total de 3728 moléculas de las cuales 3620 eran señuelo y los demás ligandos. Debido a que existían 3 pares de duplicados y 2 compuestos organometálicos. Se generaron 37 carpetas de señuelos y una de ligandos, además se agregó las moléculas que tenían actividad de FRET menor a diez grados. Normalmente se esperaría tener un mayor número de compuestos, sin embargo, en este caso algunos de los ligandos eran muy similares entre sí y por lo tanto comparten señuelos.

Los receptores, ligandos y señuelos para los cálculos de acoplamiento siguieron la metodología descrita anteriormente. A partir de los resultados para cada grupo tanto de señuelos como de ligandos se sometieron a diferentes estrategias de acoplamiento y puntuación. El usar el algoritmo de CompScore se proporciona un valor de enriquecimiento máximo, ya que combina 15 funciones de puntuación lo cual se considera una búsqueda exhaustiva [24].

Los resultados que se obtienen al usar el algoritmo CompScore en comparación con otras funciones de puntuación y sus componentes de puntuación resulta ser superior. El algoritmo genético (GA) ha proporcionado un aumento máximo de enriquecimiento de los resultados, de hasta un 45%. Los datos usados para entrenamiento, que corresponden al 80% de ligandos y 80% de señuelos. Reflejaron métricas más altas usando la metodología CompScore. Se obtuvo un valor de EF de 52,02. Entre las 15 funciones individuales de puntuación, el programa Gold con la función PLP presentó el valor más alto de EF = 20,43. Por otra parte entre los componentes de puntuación, el programa CompScore sugiere 15 componentes de puntuación entre las funciones incluidas en el modelo. De estos, se obtuvo un valor de EF = 18,58 para el componente OEPIPNonPola. Evidentemente estos valores resultan inferiores si se comparan con el algoritmo CompScore (figura 1).

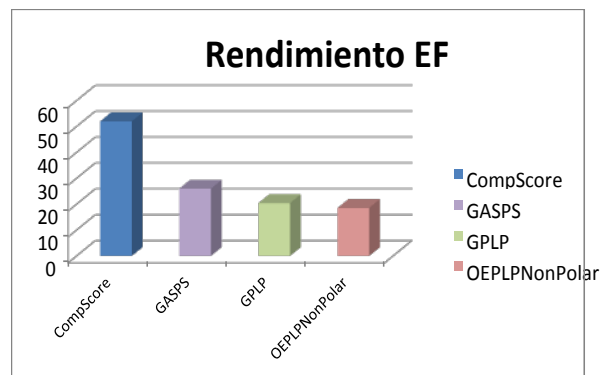


Fig 1. Mejores resultados obtenidos para EF evaluando el 1% de los datos.

En la figura 1 es Evidente que el mejor resultado se da usando el algoritmo CompsCore. Seguido del valor de GASPS el cual es reconocido por el algoritmo como la mejor puntuación individual en el 1% de los datos. El resultado de la mejor función puntuación y el mejor componente sugerido por el algoritmo se encuentran a continuación con resultados no muy altos en comparación con el resultado de CompScore. Está claro que el algoritmo efectivamente combino los componentes de puntuación para maximizar la métrica de enriquecimiento. Por otra parte, los datos de entrenamiento también maximizan el enriquecimiento de los activos usando

BEDROC con un valor de $\alpha=160.9$. En este caso CompScore superó significativamente a las funciones y componentes de puntuación arrojando un valor de BEDROC= 0,875. Siendo este valor más del doble del valor más alto obtenido entre los 15 componentes de puntuación comparados, cuyo valor fue de

BEDROC= 0,410. Aunque la función GPLP y los componentes GASPS y OEPLPNonpolar presenta valores altos en comparación a las demás (tabla II). No es relevante si se compara con los resultados de CompScore (figura 2).



Fig 2. Resultado de la métrica BEDROC.

En la figura 2 CompScore es claramente el mejor resultado. Mientras los otros componentes y funciones presentan valores similares entre sí, pero poco relevantes comparados con el resultado de CompScore. La similitud entre los resultados, que presentan las funciones y componentes de puntuación, sugiere que el componente GASPS puede lograr un rendimiento similar a la mejor función de puntuación completa GPLP. Este tipo de resultados es explicado por la metodología de CompScore. Según su hipótesis los componentes de las funciones de puntuación son de suma importancia e incluso pueden ser más relevantes que las funciones de puntuación completas.

TABLA II. Resultados obtenidos de los componentes de las funciones individuales de puntuación sugeridas por el algoritmo.

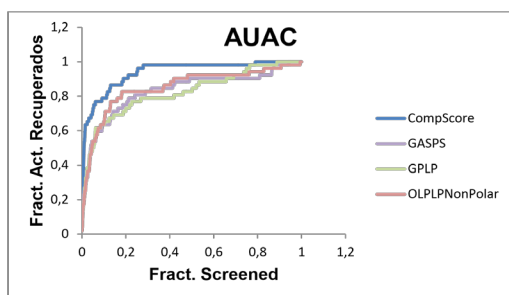
Componentes	AUAC	EF	BEDROC
D6HawkinsGB	0,583	0	1,165E-05
D6PbsaPB	0,529	7,432	1,17E-01
D6PbsaSA	0,754	7,432	0,147
D6SASAComOther	0,549	7,432	0,084
D6SASAOther	0,563	7,432	0,091
D6SASAPercOtherExpo	0,549	7,432	0,084
D6SASAPhilic	0,691	1,858	0,042
GASPASP	0,466	0	0,004
GCSLipo	0,462	0	5,205E-07
GPLPDECLash	0,634	1,858	0,042
GPLPDETors	0,734	0	0,017
OECCG3Don	0,427	1,858	0,040
OECCG4ProDesolv	0,503	0	1,135E-06
OEPLPNonPolar	0,850	18,580	0,410
OEShapegauss	0,811	14,864	0,314
GASPS	0,832	26,013	0,502

Para las métricas EF y BEDROC el programa Gold presentó los componentes de puntuación con valores más altos pero también contiene el componente con menores valores, tanto para EF (0) como para BEDROC (0,004). Por lo tanto no se considera a los componentes y funciones de puntuación de forma individual como estrategias significativas frente a la metodología de CompScore (tabla III).

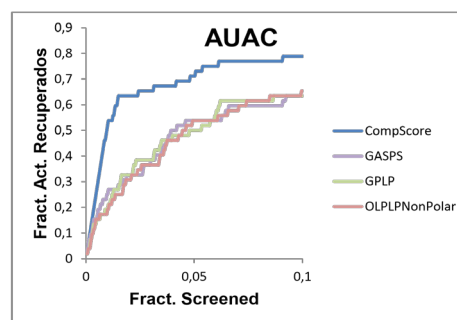
TABLA III. Resultados de las 15 funciones de puntuación analizadas por el algoritmo CompScore

Funciones	AUAC	EF	BEDROC
DContact	0,744	14,864	0,315
DContinuous	0,512	0	0,005
DGrid	0,498	0	0,0006
DHawkins	0,516	1,858	0,024
DPBSA	0,513	0	0,004
DSASA	0,316	0	0,0001
GASP	0,546	1,858	0,034
GChemScore	0,665	11,148	0,235
GGoldScore	0,581	1,858	0,021
GPLP	0,821	20,438	0,436
OEChemGauss 3	0,825	9,290	0,166
OEChemGauss 4	0,772	11,148	0,171
OEChemScore	0,616	5,574	0,100
OEPLP	0,817	14,864	0,332
OEShapegauss	0,811	14,864	0,314

Los resultados del AUAC no fueron tan altos en los componentes de puntuación analizados (tabla 2) ni en las funciones de puntuación evaluadas (tabla 3). Sin embargo los valores de GASPS 0,823 GPLP 0,821 y OEPLP-NonPolar 0,850 si presentaron resultados significativos, muy cercanos al resultado obtenido por la metodología del GA que presentó un valor de 0,937 (figura 3).



(A) Curva AUAC del 100% de datos



(B) curva AUAC del 1% de los datos

Fig 3.a Curvas completas AUAC de la metodología CompScore, de las funciones y componentes de puntuación. B. curvas para el 10% de los datos

La validación externa se realizó siguiendo la metodología antes descrita con el 20% de ligandos y 20% de señuelos. De los resultados obtenidos anteriormente del algoritmo CompScore se efectuó la recalificación de los datos externos y se midió el enriquecimiento sobre los datos restaurados. Es por tal motivo que únicamente se analizaron las 15 funciones completas de puntuación y el algoritmo CompScore.

Para los datos de validación la metodología de CompScore presentó un resultado para la métrica EF= 40,44 un valor muy alto en comparación con el mejor de los resultados de las funciones de puntuación completa GPL que obtuvo un valor EF= 20,22 (figura 4). Considerando que este mismo valor se obtuvo con la función completa GASPS, se podría creer que ambas funciones de forma individual presentan un buen enriquecimiento. Sin embargo el resultado para la métrica de BEDROC y el AUAC es inferior (tabla 4). El único fenómeno que se podría considerar relevante es que la función completa GPLP del programa Gold, presenta resultados relevantes tanto para los datos de entrenamiento como de validación. En promedio las funciones de los programas Gold y OpenEye presentan un valor de EF=13,480 en ambos casos, mientras que las funciones del programa Dock 6.8 fueron inferiores, con un promedio EF=5,616. Por tanto, sería más recomendable usar estos programas para calcular la métrica EF, ya que presentan valores más altos de enriquecimiento para el 1% de los datos.

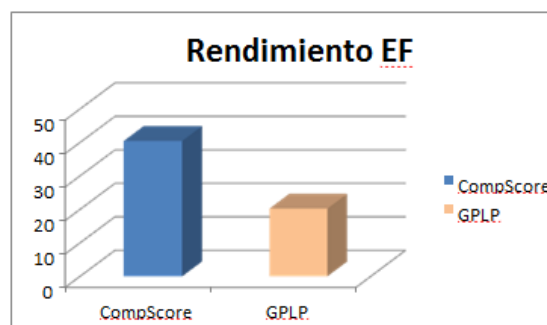


Fig 4. Resultados de EF usando la metodología CompScore en comparación con el mejor resultado de las funciones completa de puntuación GPLP.

Para los resultados de BEDROC el programa Gold presentó entre sus funciones completas en promedio un valor de 0,762 siendo este el valor más alto, seguido de las funciones de OpenEye que presentaron un valor de BEDROC=0,231 y DOCK6.8 con el promedio más bajo 0,105 (tabla 4). Entre estos resultados, el puntaje más alto fue para la función PLP del programa Gold, con un valor de 0,386. Sin embargo, este valor es bajo si se compara con el de la metodología CompScore donde se obtuvo un valor de BEDROC=0,848 (Figura 5).

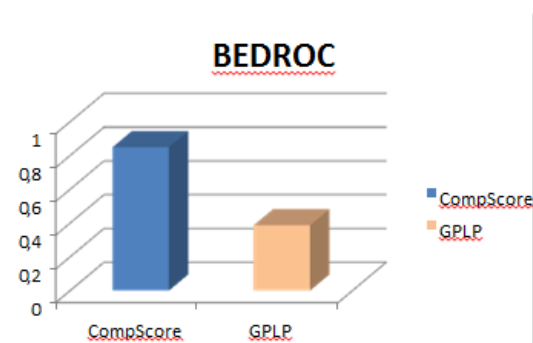


Fig 5. Resultado de BEDROC en la validación externa.

Finalmente el resultado AUAC para CompScore fue de 0,950 y para GPLP fue de 0,836 (Figura 6). En este como en los otros resultados analizados la metodología CompScore fue la mejor estrategia para el enriquecimiento de las métricas.

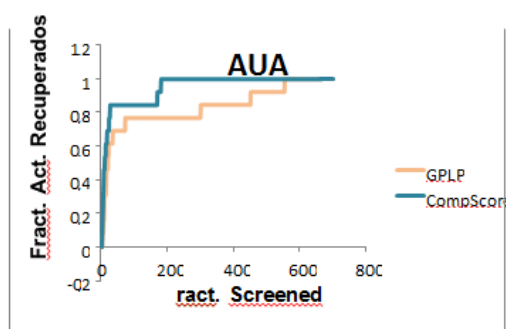


Fig 6. AUAC para los resultados de validación

Tabla IV. Resultados obtenidos de las funciones individuales de puntuación para los resultados de validación externa.

Funciones	AUAC	EF	BEDROC
GASP	0,812	20,221	0,234
GChemScore	0,715	13,480	0,207
GGoldScore	0,683	0	0,011
GPLP	0,835	20,221	0,386
DGrid	0,516	0	0,021
DContact	0,845	13,480	0,231
DContinuous	0,538	6,740	0,054
DHawkins	0,541	6,740	0,108
DPBSA	0,534	6,740	0,216
DSASA	0,181	0	3,261E-26
OEShapegauss	0,836	13,480	0,180
OEChemScore	0,682	13,480	0,243
OEChemGauss 3	0,787	13,480	0,209
OEChemGauss 4	0,709	13,480	0,194
OEPLP	0,847	13,480	0,324

Por otra parte, aunque la metodología CompScore proporciona un alto enriquecimiento para las métricas EF y BEDROC, no se evidencia una distinción clara entre compuestos con baja o nula estabilización. Esto se comprobó al buscar la posición en la que el algoritmo situó los compuestos de FRET menor a 10 grados. Muchos de ellos se encontraban en posiciones intermedias, mientras dos de ellas se encontraron entre los primeros 100 datos.

Es recomendable que la métrica EF sea enriquecida cuando se quiere evaluar la clasificación de los métodos en el cribado virtual. Dado que su principal propósito es clasificar al principio de una lista ordenada los compuestos activos (ligandos) en una fracción específica. Mientras que BEDROC cumple la función de representar el enriquecimiento temprano. Si se desea maximizar su valor es necesario proporcionar el parámetro α .

V.CONCLUSIONES

El uso de moléculas activas e inactivas permite un mejor resultado de acoplamiento para su posterior validación. El uso de las herramientas de CompScore a partir de su algoritmo genético genera un aumento significativo en las métricas de enriquecimiento. El valor EF de 40,44 en los datos de validación es muy superior al obtenido en las funciones de puntuación individuales, lo mismo ocurre en los datos de entrenamiento. Esta característica demuestra que el modelo tiene una calidad superior en comparación a otros. Se ve enriquecidas ambas métricas EF y BEDROC. De forma menos evidente aumenta el valor de AUAC. La capacidad de enriquecimiento de EF considerando el 1% de las moléculas activas es más acertada que considerar fracciones de 5% 10% o 20% ya que las funciones de puntuación generaron una lista ordenada de compuestos activos en orden ascendente. En conclusión la estrategia de VS mostro características relevantes de enriquecimiento y capacidades adecuadas para el reconocimiento temprano. Sin embargo también es evidente que el modelo no distingue entre compuestos con buena o mala estabilización.

REFERENCIAS

- [1]M. Porru, P. Zizza, M. Franceschin, C. Leonetti y A. Biroccio. «EMICORON: A multi-targeting G4 ligand with a promising preclinical profile» 2017. *Biochimica et Biophysica Acta - General Subjects*, 1861(5), 1362–1370. [En línea]. Available: <https://doi.org/10.1007/s00294-018-0836-6>
- [2]K. Tomita. «How long does telomerase extend telomeres ? Regulation of telomerase release and telomere length homeostasis». *Current Genetics*, 64(6), 1177–1181. 2018. [En línea]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.bbagen.2016.11.010>
- [3]M. Jafri, S. Ansari, M. Alqahtani y J. Shay. «Roles of telomeres and telomerase in cancer , and advances in telomerase- targeted therapies. *Genome Medicine.*, 2016. [En línea]. Available: <https://doi.org/10.3390/ijms19020482>
- [4]J. Huppert y S. Balasubramanian. «G-quadruplexes in promoters throughout the human genome». 35(2), 406–413. 2007. [En línea]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.bbapap.2017.06.012>
- [5]S. Joy, Vijayakumar, Y. M., & Sunhye, G. (2015). «Role of computer-aided drug design in modern drug discovery». *Archives of Pharmacal Research*. 2015. [En línea]. Available: <https://doi.org/10.1007/s12272-015-0640-5>
- [6]S. Asamitsu, S. Obata, Z. Yu, T. Bando y H. Sugiyama. «Recent Progress of Targeted G-Quadruplex-Preferred Ligands Toward Cancer Therapy». *Molecules*, 24(3), 429. 2019. [En línea]. Available: <https://doi.org/10.3390/molecules24030429>
- [7]R. Monsen y J. Trent. «Biochimie G-quadruplex virtual drug screening : A review». *Biochimie*, 152, 134–148. 2018. [En línea]. Available: <https://doi.org/10.1039/c9cc06748e>
- [8]J. Beauvarlet, P. Bensadoun, E. Darbo, G. Labrunie, E. Richard, I. Draskovic, M. Djavaheri-mergny. «Modulation of the ATM / autophagy pathway by a G-quadruplex ligand tips the balance between senescence and apoptosis in cancer cells». 1–18. 2019. [En línea]. Available: <https://doi.org/10.1093/nar/gkz095>
- [9].Z. Crees, J. Girard, Z. Rios, G. Botting, K. Harrington y C. Shearrow. « Oligonucleotides and G-quadruplex stabilizers: targeting telomeres and telomerase in cancer therapy».2014. [En línea]. Available: <https://doi.org/10.2174/1381612820666140630100702>
- [10].M. Meier, A. Moya-torres, N. Krahn, M. Mcdougall, L. Orriss, E. Mcrae, T. Patel. «Structure and hydrodynamics of a DNA Gquadruplex with a cytosine bulge». (May), 1–13. 2018. [En línea]. Available: <https://doi.org/10.1093/nar/gky307>
- [11].M. Ivancich, Z. Schrank, L. Wojdyla, B. Leviskas y A. Kuckovic. «Treating Cancer by Targeting Telomeres and Telomerase». 2017. [En línea]. Available: <https://doi.org/10.3390/antiox6010015>
- [12].J. Maciejowski y T. Lange. De. «Telomeres in cancer : tumour». Nature Publishing Group. 2017. [En línea].

Available: <https://doi.org/10.1038/nrm.2016.171>

[13].M. Zurek, J. Altschmied, S. Kohlgrüber, N. Ale-agma y J. Haendeler. «Role of Telomerase in the Cardiovascular System». (Cvd), 1–11. 2016. [En línea]. Available: <https://doi.org/10.3390/genes7060029>

[14].G. Zhou, X. Liu, Y. Li, S. Xu y C. Ma. «Telomere targeting with a novel G-quadruplex-interactive ligand BRA-CO-19 induces T-loop disassembly and telomerase displacement in human glioblastoma cells». 7(12). 2016. [En línea]. Available: <https://doi.org/10.18632/oncotarget.7808>

[15]H. Berman. (2000). The Protein Data Bank. Nucleic Acids Research, 28(1), 235–242. [En línea]. Available: <https://doi.org/10.1093/nar/28.1.235>.

[16]Cheminformatics Software, Molecular Modeling Software | OpenEye Scientific. Retrieved June 11, 2019, [En línea]. Available:<https://www.eyesopen.com/>.

[17]OMEGA 3.1.1.2: OpenEye Scientific Software, Santa Fe, NM. [En línea]. Available: <http://www.eyesopen.com>

[18]QUACPAC 2.0.1.2: OpenEye Scientific Software, Santa Fe, NM. [En línea]. Available: <http://www.eyesopen.com>

[19]OEDOCKING 3.3.1.2: Software científico OpenEye, Santa Fe, NM. [En línea]. Available: <http://www.eyesopen.com>

[20]Q. Li, J. Xiang, Q. Yang, H. Sun, A. Guan y Y. Tang. (2013). G4LDB: a database for discovering and studying G-quadruplex ligands. Nucleic Acids Research, 41(Database issue), D1115–23. [En línea]. Available: <https://doi.org/10.1093/nar/gks1101>

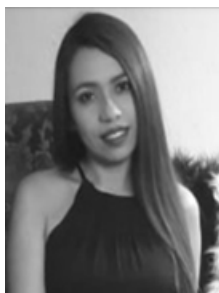
[21]M. Mysinger, M. Carchia, J. Irwin y B. Shoichet. (2012). Directory of useful decoys, enhanced (DUD-E): Better ligands and decoys for better benchmarking. Journal of Medicinal Chemistry, 55(14), 6582–6594. [En línea]. Available:<https://doi.org/10.1021/jm300687e>

[22]P. Lang, S. Brozell, S. Mukherjee, E. Pettersen, E. Meng, V. Thomas e I. Kuntz. (2009). DOCK 6 : Combining techniques to model RNA – small molecule complexes. 1219–1230. [En línea]. Available: <https://doi.org/10.1261/rna.1563609.HIV>

[23]J. Truchon y C.Bayly. (2007). Evaluating Virtual Screening Methods : Good and Bad Metrics for the “ Early Recognition ” Problem. 488–508. [En línea]. Available: <https://doi.org/10.1021/ci600426e>

[24]D. Castillo-González, J. Mergny, A. De Rache, G. Pérez-Machado, M. Cabrera- Pérez, O. Nicolotti, M. Cruz-Monteaugudo. (2015). Harmonization of QSAR Best Practices and Molecular Docking Provides an Efficient Virtual Screening Tool for Discovering New G-Quadruplex Ligands. Journal of Chemical Information and Modeling, 55(10), 2094–2110. <https://doi.org/10.1021/acs.jcim.5b00415>

RESUMEN CURRICULAR



Melissa Correa, Egresada de Ingeniería en Biotecnología en la Universidad de las Américas en Quito-Ecuador. Con participación destacada en el primer foro de CEBIO, congreso internacional de Biotecnología UDLA y final continental Solacyt 2020 en México. Desarrollo de proyectos en Biorreactores de inmersión temporal y fotobiorreactores presentados a nivel internacional.



Santiago Solórzano Máster en Inteligencia Artificial cuenta con una Ingeniería en Redes y Telecomunicaciones, Tecnología en Electrónica Instrumentación & Aviónica; consultor para el PNUD. Su formación le ha permitido manejar y desarrollar proyectos con tecnología de punta impulsando soluciones de múltiples ingenierías, en el ámbito de la Robótica, IA, IoT, WSN, Electrónica.

Metodología Seis Sigma en el Incremento de Producción de Spirulina

Freire Daniel¹, Flor Omar² y Alvarez Gabriela³

{daniel.freire.balseca¹, omar.flor², gabriela.alvarez.velasco³}@udla.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0003-3149-5395>¹, <https://orcid.org/0000-0001-5302-141X>², <https://orcid.org/0000-0002-0882-3875>³

¹Universidad de las Américas, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Ingeniería en Biotecnología, Quito-Ecuador.

^{2,3}Universidad de las Américas, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Ingeniería Industrial, Quito-Ecuador.
Quito - Ecuador

Recibido (09/03/20), Aceptado (27/03/20)

Resumen: En este trabajo se presentan resultados de mejora en la productividad de la *Arthrospira platensis* (spirulina) en una empresa dedicada a su producción. Se aplicó la metodología seis sigma en los procesos productivos que requieren el uso de biorreactores. Partiendo del análisis del estado actual, se identificaron aspectos, variables físicas y químicas que influyen directamente en la productividad alcanzada. Se probaron varios medios de cultivo que posteriormente se escalaron para su producción industrial. Además, se controló la incorporación de carbono al medio de cultivo, optimizando el rango de potencial hidrógeno pH. Se midieron los parámetros identificados y asignaron estrategias de la metodología seis sigma. Se comprobó una mejora en la productividad correspondiente al 66% con la misma calidad de producto final.

Palabras Clave: Seis sigma, biorreactores, productividad, *Arthrospira platensis*.

Six Sigma Methodology in Increasing Spirulina Production

Abstract: This work presents results of improvement in the productivity of *Arthrospira platensis* (spirulina) in a company dedicated to its production. The six sigma methodology was applied in production processes that require the use of bioreactors. Starting from the analysis of the current state, aspects, physical and chemical variables that directly influence the productivity achieved were identified. Various culture media were tested and subsequently scaled for industrial production. In addition, the incorporation of carbon into the culture medium was controlled, optimizing the range of potential hydrogen pH. The identified parameters were measured and six sigma methodology strategies were assigned. An improvement in productivity corresponding to 66% was verified with the same quality of final product.

Keywords: Six sigma, bioreactors, productivity, *Arthrospira platensis*.



I. INTRODUCCIÓN

La alta variabilidad de los parámetros químicos del cultivo de *Arthrospira platensis* como el pH, y la concentración de los compuestos químicos, además de la necesidad de un control adecuado de la temperatura han ocasionado la disminución de la vida productiva del cultivo, incrementando costos de producción y una baja rentabilidad de las productoras [1]. La metodología seis sigma que emplea los procesos DMAMC, cuyas siglas indican: definir, medir, analizar, mejorar y controlar. El uso de estas herramientas, permiten alcanzar los objetivos de mejora en un periodo corto de tiempo. Además, disminuye los errores en los procesos de forma significativa, contribuyendo de manera permanente en el control de dichas actividades [2].

La implementación de la metodología encamina a la reducción de los costos de producción y a la mejora de la productividad del proceso a partir de la optimización de recursos y materias primas. Por lo anteriormente expuesto, se considera esta metodología como ideal para la mejora del proceso productivo en las productoras. El presente proyecto encamina a mejorar la productividad del proceso de obtención de spirulina en al menos un 15%, mediante la implementación de la metodología 6 σ , con el fin de crear un control estadístico, reducir los costos de producción y optimizar los recursos que inciden en el proceso productivo [3].

En la siguiente sección, se describe el proyecto implementado en la planta Industrial Andesspirulina C.A. En la sección de metodología, se explica las consideraciones para su implementación. Posteriormente se exponen resultados de los ensayos realizados y se evidencia la mejora en la productividad, finalizando con sus respectivas conclusiones.

II. DESARROLLO

Para la ejecución de este proyecto, se identificaron los procesos más generales y representativos (Fig. 1) para la producción de espirulina. Se identificaron etapas generales como el escalado, biorreactores, tratamiento de medios de cultivo y concentración de spirulina [4].

Posteriormente se identificaron los parámetros físico-químicos que afectaban la variabilidad de la producción, considerando para ello la temperatura, tiempo, el pH, fuentes de carbono, nitrógeno y fósforo. Se plantó como meta lograr un 15% del proceso productivo de la biomasa de spirulina, presentada en la Fig. 1 [5].

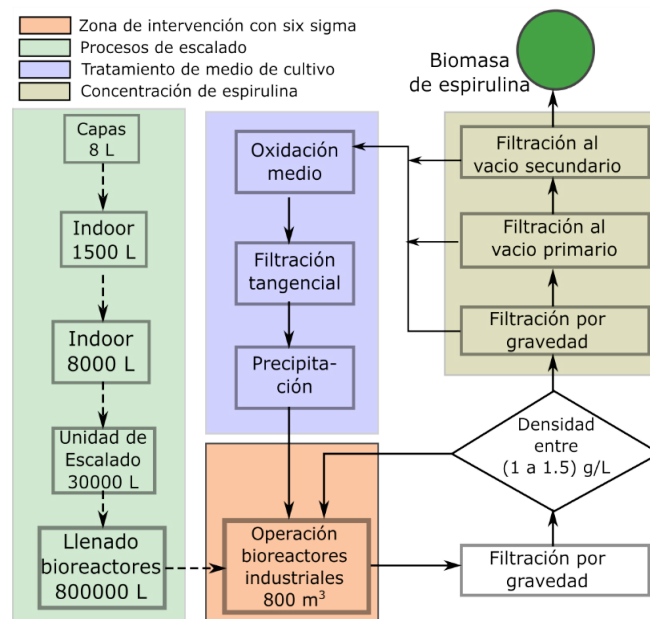


Fig. 1. Procesos para producción de spirulina a escala industrial

Para la intervención de mejora, se consideró relevante analizar los costos y procesos del área de producción de spirulina. Posteriormente, se requerirá la medición de variables físicas-químicas antes especificadas, que se ajustarán a un específico. Un posterior análisis de los datos adquiridos de las variables de control identificadas, servirá de base para la determinación de procesos de mejora a escala industrial.

Para la intervención de mejora, se consideró relevante analizar los costos y procesos del área de producción de spirulina. Posteriormente, se requerirá la medición de variables físicas-químicas antes especificadas, que se ajustarán a un específico. Un posterior análisis de los datos adquiridos de las variables de control identificadas, servirá de base para la determinación de procesos de mejora a escala industrial.

III.METODOLOGÍA

En base a los direccionamientos de la sección de desarrollo y a los procesos presentados en la Fig. 1, se realizó un análisis del costo de producción de la situación actual del proceso. Se presenta además, un apartado sobre los planes de mejora que se realizarán en cierta etapa del proceso del cultivo en el Biorreactor, el mismo que constituye el proceso más representativo y en el que confluyen los demás procesos. Finalmente, se detalla un análisis de la producción a escala piloto.

A.Análisis de costo de la situación actual del proceso

Para definir las actividades operacionales de la producción de spirulina en todas sus etapas, se realizaron diagramas de flujo de procesos y se identificaron los diferentes procedimientos correspondientes a la Fig. 1, según la norma ISO 9000.

Los costos de producción de spirulina deshidratada se obtuvo tomando en cuenta como costos directos, la mano de obra directa (MOD), medio de cultivo, fertilizantes, control de pH y material de empaque. Para la

MOD, se estableció un valor monetario por hora considerando el sueldo base, beneficios de ley, fondos de reserva, el aporte patronal y los bonos de producción [6].

Los costos indirectos consideraron: mano de obra indirecta (MOI), energía eléctrica, insumos de limpieza, control de calidad, depreciación de máquinas, equipos e instalaciones y otros costos indirectos de fabricación, como consumo de agua, uniformes, material de protección para el personal, seguro de las instalaciones y alimentación [6].

Para los cálculos del costo por depreciación, se identificó la cantidad de equipos, área usada en cada proceso y aplicó el método de depreciación de línea recta, con un valor residual del 10% del costo del bien, una vida útil de 10 años para maquinaria y equipos, y de 20 años para instalaciones (construcción), según el reglamento ecuatoriano de ley tributaria, decreto 1051 [7].

Las variables del proceso para ser monitorizadas, se identificaron usando un diagrama de causa efecto con un método de estratificación o enumeración de causas, la cual se analizó en 4 pasos como se describe a continuación: (1) Identificación del problema, (2) Encontrar la causa del problema, (3) Matriz de priorización, (4) Evaluación de ponderaciones [8].

La identificación del problema fue la baja productividad del cultivo y el elevado costo de producción. Se empleó para la determinación del problema un diagrama causa efecto primario y secundario. La causa del problema se pudo corroborar del diálogo con los involucrados: Gerente Técnico, Jefe de Control de Calidad, Supervisores de cultivo y mantenimiento. Los mismos calificaron a la causa más importante con el valor de 5 y a la menos importante con el valor de 1. Validadas las encuestas se determinó que el proceso de incorporación de CO₂ poseía una alta variabilidad, falta de control de parámetros químicos y variabilidad en la temperatura.

B.Plan de Mejora para el proceso de producción

Para mejorar el proceso productivo, se optimizó la inyección de CO₂, medición de parámetros químicos y la variabilidad en la temperatura en los biorreactores. Respecto a la inyección de CO₂, se reemplazó la fuente productora de este gas, que antes combustionaba gas licuado de petróleo por generadores del gas puro.

Para la medición de las variables químicas se implementó un espectrofotómetro para la medición de diferentes compuestos químicos, como: NO₃, NH₃, PO₄, Fe, etc. Para el control de temperatura se implementó una serie de termocuplas para las mediciones facilitando la medición constante en los biorreactores, permitiendo alcanzar temperatura óptima en menor tiempo.

En vista de que la inyección de CO₂, es de suma importancia para el cultivo de spirulina, ya que constituye su fuente de carbono, se implementó un pHmetro digital portable para controlar su rango óptimo.

Mediante el empleo de los sistemas de medida incorporados, se monitorizó la inyección de CO₂ al proceso, el valor del pH, la temperatura, y las concentraciones de los compuestos químicos en el medio de cultivo se monitorizaron y compararon con patrones de soluciones establecidas para estos procesos [9]. Como referencia del valor

de pH, se calculó el valor de los índices (Z_s) y (Z_i) los cuales presentan la capacidad del proceso, el cual se basa en calcular la distancia entre las especificaciones y la media en unidades de la desviación estándar, mediante la ecuación 1 y 2, respectivamente.

$$Z_s = \frac{ES - \mu}{\sigma} \quad (1)$$

$$Z_i = \frac{\mu - EI}{\sigma} \quad (2)$$

En donde, "ES" representa la especificación superior y EI es la especificación inferior μ es la media de los datos y σ es la desviación estándar.

Estos datos fueron registrados y posteriormente ingresados al programa Statgraphics, en el cual se realizaron gráficas de control de lecturas individuales. Se calculó la capacidad del proceso y la desviación estándar a largo plazo, con una frecuencia mensual, para cada uno de los 5 biorreactores del proceso de producción de spirulina [10].

Con el mínimo valor de Z se calculó el nivel σ para cada biorreactor, después de los 6 meses de ensayo para las variables pH y temperatura.

Se definieron intervalos de tiempos para las mediciones del pH y la temperatura en el cultivo de spirulina, en cada uno de los 5 biorreactores. Para las variables químicas no se realizó el análisis del nivel σ , ya que no se poseía históricos de las mediciones, y fue parte del proyecto de mejora implementar el control de estas variables.

Análisis de la productividad a escala piloto

Para mejorar la productividad y reducción de costos de producción, se realizó un ensayo a escala piloto (in-door), variando las materias primas que mayor impacto tienen en el costo de producción de spirulina [11]. Para el análisis se cambió la fuente de nitrógeno de KNO_3 a $(NH_2)_2CO$, y se ensayaron con diferentes concentraciones de $NaHCO_3$ en la formulación del medio cultivo. Se empleó un diseño central compuesto (DCC) con dos factores y dos niveles, representándolo en la ecuación 3.

$$N = 2^k + 2k + n \quad (3)$$

En donde, N es el número de tratamientos o corridas experimentales, k los factores (fuente de nitrógeno y carbono), y n el número de repeticiones de cada tratamiento. Se consideró nueve tratamientos y dos puntos sobre cada eje a una distancia $\pm\alpha$ respecto al origen, representada en la Ecuación 4.

$$\alpha = (F)^{1/4} \quad (4)$$

En donde, F es el número de puntos en la parte factorial y α es la distancia del eje respecto al origen.

Para el análisis estadístico de los resultados se empleó un análisis de varianza (ANOVA) con un intervalo de confianza del 95% ($p \leq 0,05$), para la productividad de spirulina [12].

Para el análisis económico del costo beneficio del cambio de materias primas, se consideraron 4 casos: modelo de producción actual, caso optimista, caso malo y caso deseado. Para la evaluación de estos casos, consideraron indicadores económicos: tasa interna de retorno (TIR), valor actual neto (VAN) y el indicador costo beneficio (CBC) [13]. Para los cálculos se usó un valor de precio venta al público de 25 USD/kg como ingreso y una tasa de costo de capital del 10%.

La viabilidad y rentabilidad del proyecto de mejora, consistió en reducir el costo de producción cambiando materias primas y controlando los procesos productivos de spirulina. Luego de la implementación, se socializó a todo el personal de la planta, las modificaciones que se implementaron en los diferentes procesos para la obtención de spirulina deshidratada [14].

El análisis de la mejora económica se basó en el cálculo de los costos directos e indirectos de todos los procesos de producción en hojas de cálculo, considerando los siguientes rubros: Costos directos: MOD, fertilización, control de pH, material de empaque, agua y medio de cultivo; y como costos indirectos: MOI, GLP, análisis químicos,

análisis microbiológicos, energía eléctrica, insumos de limpieza, caja chica, mantenimiento, uniformes, servicios externos, comida, depreciaciones, seguro de daños de máquinas y calibraciones [15].

Para evaluar la mejora, se realizó un análisis comparativo de la productividad obtenida de la producción en gramos dividida para el área y el número de días. Se obtuvieron los costos de producción por procesos, se calculó el costo por metro cubico de medio de cultivo y finalmente se obtuvo el ahorro monetario, considerando el costo por procesos y producción obtenida con el sistema mejorado [16].

IV.RESULTADOS

A.Análisis de costo de la situación actual del proceso

La Fig. 1, empleada en el desarrollo y usada para identificar la zona de intervención con metodología seis sigma, se obtuvo un diagrama de flujo, considerando etapas y equipos de los procesos más representativos. En la TABLA I., se presenta los costos del medio de cultivo del sistema actual, por m³.

TABLA I. Costo del medio de cultivo por m³.

Medio de cultivo	Costo (USD/m ³)
NaHCO ₃	8,00
NaCl	0,15
K ₂ SO ₄	1,15
MgSO ₄	0,01
CaCl ₂	0,01
KNO ₃	4,11
H ₃ PO ₄	0,30
Total	13,73

En la TABLA II., se puede observar que las materias primas NaHCO₃ y KNO₃ son las que mayor valor económico aportan al medio de cultivo, alcanzan un valor de 12,11 USD/m³, que corresponde al 88% de participación en el costo. Los parámetros a ser monitorizados se determinaron mediante un diagrama causa efecto, aplicando el método de las 6M para el problema de baja productividad por la falta de control de las variables, que intervienen en el proceso de producción de spirulina e inadecuado proceso de control de pH [17]. En la TABLA II., se presentan los resultados de las causas del problema de baja productividad.

TABLA II. Causas de baja productividad en producción de spirulina

No	Causa / Problema a la baja productividad del proceso de cultivo de spirulina.	Participantes				Total
		A	B	C	D	
1	Elevado costo en productos de fertilización	2	2	2	3	9
2	Falta de control de parámetros químicos	3	4	3	2	12
3	Variabilidad en el pH	4	4	3	3	14
4	Variabilidad en la temperatura de los biorreactores	3	4	3	3	13

La causa del problema fue una mala incorporación de carbono al proceso de cultivo, por medio de la combustión de gas licuado de petróleo (GLP), lo que ocasionó que el pH del medio de cultivo del proceso de obtención de spirulina alcance valores de 11,5 a 12,0; lo que ocasionaba problemas de precipitación de compuestos químicos y por tanto, un desbalance en las concentraciones. Según Vonshak [18], los valores aconsejables de pH para el proceso de cultivo de spirulina están en un rango de 9,0 a 10,5.

El sistema de manejo del pH con la quema del gas licuado de petróleo (GLP), no presentó un proceso controlado ya que, en las observaciones, se encontraban fuera de los límites de la especificación, presentando más del 45% de sus observaciones fuera de los límites de control. Este proceso presentó un nivel 1 σ ya que el valor de Z calculado fue de -1,80. La variable temperatura presentó todos los puntos dentro de los límites de control, a pesar de ello se

calculó una alta desviación estándar de $6,48^{\circ}\text{C}$ y un valor $Z = 3,47$, lo cual indica que se encuentra en un nivel de σ de 3,50.

Los datos de pH y temperatura fueron registrados a lo largo de todo el proceso de producción de spirulina que fue de 6 meses, teniendo alrededor de 552 datos para cada uno de los 5 biorreactores. Para las variables químicas del cultivo se obtuvieron 6 mediciones a lo largo del proyecto de mejora. Los límites de la especificación y registros no se presentan debido a cuestiones de confidencialidad de la empresa.

El medio de cultivo optimizado, varió su concentración de NaHCO_3 y cambió el KNO_3 por $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$, con cuyo cambio se redujo el costo del proceso productivo. En la Fig. 2, se presenta el gráfico de superficies del diseño central compuesto como representación del modelo y el comportamiento de las diferentes concentraciones de NaHCO_3 y $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ respecto a la variable de respuesta (crecimiento).

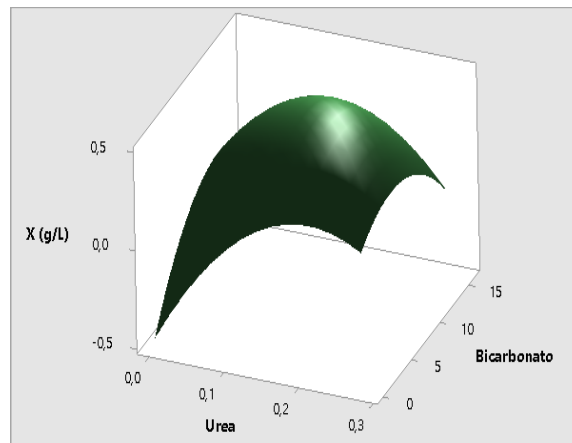


Fig. 2. Superficie de crecimiento de spirulina X (g/L) vs. NaHCO_3 y $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$

Tomando en cuenta el costo de producción inicial, y un antiguo valor de TIR del 2%, se confirma desde el punto de vista económico, que el proceso no era rentable. Respecto del proyecto implementado, este, presentó un valor de TIR del 10% evidenciando y dándole el carácter de viable al proceso de mejora.

Para la mejora en la operación continua de los biorreactores, se aplicó un plan que define la gestión para solucionar los problemas de mala incorporación de CO_2 y control de las variables físicas y químicas del cultivo.

Una vez concluidos los cambios en el proceso de producción se realizó el control del sistema desde el punto de vista técnico y también el económico.

Con la planta a máxima producción se obtuvieron los resultados de los valores económicos presentándolos como costos directos e indirectos; estos valores fueron calculados después de implementar la mejora técnica en los procesos de producción de spirulina anteriormente mencionados, disminuyendo el costo unitario de producción (USD/kg) en un 58%. En la Fig. 3., se presenta una gráfica de control de lecturas individuales del biorreactor 3 al sexto mes de control. Se observa el proceso dentro de los límites establecidos con una variabilidad no sistemática y comportamiento normal.

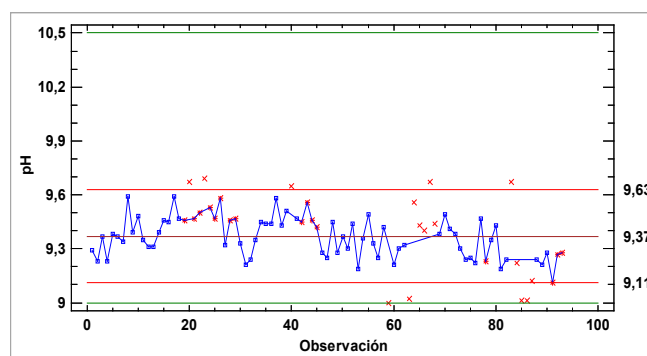


Fig. 3. Control de lecturas del valor de pH del biorreactor en el sexto mes de operación.

En el sistema de producción anterior se obtuvo el costo unitario el cual fue de 21,15 USD/kg y con el sistema de producción mejorado el costo promedio de producción en los 6 meses de análisis bajo a 13,36 USD/kg teniendo una disminución del 58,3%. Mediante el análisis de optimización del medio de cultivo al cambiar y modificar las materias primas (NaHCO_3 y $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$), El costo del nuevo medio de cultivo es de 6,77 USD/m³ comparando con el costo de medio de cultivo de sistema de producción anterior, el cual fue de 13,76 USD/m³

El ahorro monetario mensual aproximado en la operación de la planta, es de 16 000 USD considerado un aumento de un 37% de la producción. Además, se mejoró el costo promedio unitario de producción a 13,36 USD/kg. Lo cual demuestra que el proyecto de mejora seis sigma ayudó a elevar la rentabilidad de la planta de producción AndesSpirulina C.A.

V.CONCLUSIONES

El alto costo en el proceso de producción de spirulina fue afectado por el uso de las materias primas KNO_3 y NaHCO_3 y además influenciado por las continuas actividades de escalado, las cuales demandan de altas cantidades de medio de cultivo y mano de obra directa, debido a que la vida útil del cultivo era de máximo 4 meses debido a un control deficiente.

El diseño central compuesto, permitió optimizar un nuevo medio de cultivo a escala piloto, el cual se implementó a escala industrial y se mantuvo en una productividad promedio de 4,16 g·m²/d. La optimización de las fuentes de nitrógeno y carbono contribuyó a disminuir a la mitad, el costo del medio de cultivo en el proceso de producción de spirulina, y mejoró la optimización de recursos en los diferentes subproceso.

El proceso de mejora, permitió bajar las actividades de escalado de 3,0 a 1,5 por año, ya que el deterioro fisiológico del cultivo se redujo con el control continuo de las variables del proceso de cultivo, evidenciándose con el aumentando de un 33% en la producción de spirulina. La implementación de cartas de control facilitan el mantenimiento de las variables del proceso de producción, dentro de sus límites de control respectivos, a aumentando la vida productiva del cultivo de spirulina en su proceso de obtención.

REFERENCIAS

- [1]E. Ariawan y A. Makalew, "Smart Micro Farm: Sustainable Algae Spirulina Growth Monitoring System" in 10th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE), Bali, 2018, pp. 1-4.
- [2]L. Socconini y C. Reato, Lean six sigma: sistema de gestión para liderar empresas. Primera edición. Barcelona: Marge Books, 2019.
- [3]H. Gutiérrez, Calidad y productividad. Cuarta edición. México D.F.: McGraw-Hill Interamericana, 2014.
- [4]G. Usharani, P. Saranraj y D. Kanchana, "Spirulina Cultivation: A Review" in International Journal of Pharmaceutical & Biological Archives, vol. 3, no. 6, pp. 1327-1336, December 2012.
- [5]J. Udin, O. Gani, A. Mahato, I. Sakib and M. Rakiuzzaman, SPIRULINA (Spirulina platensis) PRODUCTION IN DIFFERENT PHOTOBIOREACTORS ON ROOFTOP, International Journal of Business, Social and Scientific Research, vol. 8, no. 1, pp. 15-19, January 2020.
- [6]M. Arredondo, Contabilidad y análisis de costos. Primera edición. México D.F.: Grupo Editorial Patria, 2015.
- [7]J. García, Contabilidad de costos. Cuarta edición. México D.F.: McGraw-Hill Interamericana, 2014.
- [8]L. Socconini, Certificación Lean Six Sigma Green Belt para la excelencia en los negocios. Primera edición. Barcelona: Marge Books, 2015.
- [9]A. Vian, Introducción a la Química Industrial. Segunda edición. Buenos Aires: Reverté, 2012.
- [10]S. Milton, Estadística para Biología y Ciencias de la Salud. Tercera edición. Madrid: McGraw-Hill Interamericana, 2014.
- [11]M. Messmacher, V. Rubio y M. Andrade, Crecimiento y Productividad. Tomo I. Primera edición. México D.F.: Fondo de Cultura Económica, 2018.
- [12]H. Gutiérrez, R. de la Vara, Análisis y diseño de experimentos. Tercera edición. México D.F.: McGraw-Hill Interamericana, 2012.
- [13]G. Baca, Ingeniería económica. Sexta edición. México D.F.: McGraw-Hill Interamericana, 2015.
- [14]J. De Freitas y H. Costa, "Impacts of Lean Six Sigma over organizational sustainability", in International Journal of Lean Six Sigma, vol. 8, no. 1, pp. 89-108, January 2017.

- [15]R. López, “Proyecto de reducción de costos mediante el seis sigma y su impacto financiero”, Tesis de fin de Máster en Administración, Facultad de Contaduría y Administración, Universidad Autónoma de Querétaro, Santiago de Querétaro, Qro., 2013.
- [16]D. Silva, “Teoría de indicadores de gestión y su aplicación práctica”, Facultad de Ingeniería, Universidad Militar Nueva Granada, Informe de Gestión Efectiva de Emprendimiento Social, no. 1, 2016.
- [17]E. Navarro, V. Gisbert y A. Pérez, “Metodología e implementación de Six Sigma” en 3C Empresa: Investigación y pensamiento crítico, Edición especial, pp. 73-80, Diciembre 2017.
- [18]A. Vonshak, *Spirulina platensis (Arthrospira) Physiology, Cell-biology and Biotechnology*. Primera edición. Inglaterra: Taylor & Francis, 1997.

Sistemas híbridos en diseño de distribución eléctrica con algoritmo genético

Ángel Núñez

angeldnm@gmail.com

Maestría en Ingeniería Eléctrica, Universidad Politécnica Antonio José de Sucre

Sede Puerto Ordáz, Venezuela

<https://orcid.org/0000-0002-8763-5513>

Estado Bolívar - Venezuela

Recibido (02/03/20), Aceptado (20/03/20)

Resumen: Se estudia la incorporación de sistemas híbridos basados en fuentes renovables para la optimización de sistemas de distribución eléctrica y planificación de estrategias de alimentación eléctrica usando algoritmos genéticos (AG). Se eligió una serie de características de sub estaciones eléctricas y mediante simulaciones, se obtuvieron datos para la optimización de la infraestructura existente, que brinde confiabilidad, seguridad, suministro económico y calidad de servicio. Se obtuvo un algoritmo con la configuración óptima de diversos componentes: paneles fotovoltaicos, baterías, generador AC, pila de combustible e inversor, que en el caso de la optimización mono-objetivo se logró la minimización de costos totales del sistema a lo largo de su vida útil. Se obtuvo la estrategia de control o combinación de variables de control más adecuada para minimizar los costos.

Palabras Clave: Distribución eléctrica, Sistemas híbridos, algoritmos genéticos.

Hybrid systems in electrical distribution design with genetic algorithm

Abstract: The incorporation of hybrid systems based on renewable sources for the optimization of electricity distribution systems and planning of power supply strategies using genetic algorithms (GA) is studied. A series of characteristics of electrical sub-stations was chosen and through simulations, data were obtained for the optimization of the existing infrastructure, which provides reliability, security, economic supply and quality of service. An algorithm was obtained with the optimal configuration of various components: photovoltaic panels, batteries, AC generator, fuel cell and inverter, which in the case of mono-objective optimization, minimized total system costs throughout its useful life. The most appropriate control strategy or combination of control variables was obtained to minimize costs.

Keywords: Electrical distribution, Hybrid systems, genetic algorithms.



I. INTRODUCCIÓN

La finalidad de un sistema eléctrico es satisfacer el requerimiento de energía de los consumidores basándose en unas determinadas condiciones técnicas. Los sistemas de generación se instalan donde resultan más provechosos, dicho sistema se emplea para enviar cantidades de energía desde las principales zonas de generación hasta las zonas de demanda, transportan la energía a los consumidores, utilizando el nivel de tensión adecuado. Por lo tanto, la energía eléctrica realiza estas funciones, soportada por cada uno de los subsistemas en que puede dividirse. Por lo general, las compañías eléctricas cubren una o varias de estas funciones dentro de un determinado contexto.

La seguridad en el suministro eléctrico exige gestión exitosa y calidad de las actividades de planificación, desarrollo, mantenimiento y operación de todos los componentes de la infraestructura eléctrica principal (generación, transmisión y distribución), así como de la infraestructura de sus sistemas auxiliares: mediciones, protecciones, supervisión, control y comunicaciones.

A medida que aumentan las cargas se origina un aumento de demanda, llegando incluso a los límites de capacidad de suministro eléctrico en las redes de distribución. Esto implica la optimización del sistema, construcción y/o ampliación de subestaciones, capacidad de transformadores, conductores, entre otras para satisfacer la demanda creciente. En este trabajo se desarrolla la optimización y las estrategias de control de sistemas híbridos de generación de energía eléctrica, basados en diferentes fuentes, aplicando AG.

Los sistemas híbridos de energía eléctrica pueden estar aislados o conectados a la red de suministro eléctrico. Una de las técnicas utilizadas en el diseño óptimo de sistemas de distribución son los algoritmos genéticos, los cuales están basados en métodos adaptativos usados en problemas de búsqueda y optimización de parámetros fundados en la reproducción y en la supervivencia del más apto.

El sistema eléctrico de potencia (SEP) en Venezuela ha presentado un crecimiento en la demanda de suministro eléctrico tanto a nivel industrial como en el ámbito residencial y comercial. En toda instalación eléctrica; que abarque una serie de equipos para satisfacer la demanda de energía eléctrica; el proceso de expansión para la generación, transmisión y distribución de electricidad se vuelve cada vez más compleja debido al aumento de capacidad de los sistemas de potencia. Esta problemática es un tema de gran preocupación debido a su influencia en la seguridad y calidad del Sistema de Potencia.

En un sistema diseñado para convertir, transportar y entregar energía eléctrica se deben realizar estudios para la expansión y optimización en la distribución de energía con varias fuentes alternas, que permitan establecer el equipamiento necesario para cubrir el aumento de las cargas. Estos estudios están basados en futuras predicciones de demanda de energía y obedecen a un compromiso entre los niveles de confiabilidad, márgenes de seguridad del sistema y los costos asociados a la capacidad que se va a instalar.

Los AG forman parte del grupo de técnicas metaheurísticas inspirados en la evolución natural capaz de resolver problemas de optimización con pocos esfuerzos, con cálculos más precisos tanto a niveles económicos como pre dimensionamiento y optimización de equipos, que permiten dar soluciones satisfactorias al ser aplicados a problemas con gran complejidad y con tiempo de cálculos muy bajos. Los AG surgen como soporte en la ingeniería para la predicción y optimización de la demanda en los sistemas de energía instaladas y a futuro, ante posibles aumentos de cargas interconectadas.

Los AG utilizan técnicas de población de soluciones codificadas de forma similar a los cromosomas. Cada uno de estos cromosomas tendrá asociado un ajuste que cuantifica su validez como solución del problema. En función de este valor se le darán más o menos oportunidades de reproducción. Algunas características importantes de los AG son: Usan una codificación de las soluciones, trabajan con una población de soluciones, de manera tal que se pueden obtener un conjunto de soluciones viables para el problema. Además, usan reglas probabilísticas de transición y no determinísticas, los operadores se aplican con una probabilidad determinada.

Entre otros antecedentes a esta investigación, se menciona el de Pinzón [1], quien realizó un diseño óptimo global para un sistema de distribución considerando los componentes principales de una red de distribución (Circuito primario, transformadores de distribución y circuitos secundarios) en la que se evaluaron la complejidad del método, eficiencia computacional, calidad de respuesta y flexibilidad para hallar ventajas y desventajas de las propuestas y escoger la más apropiada para ser implementada en el software correspondiente.

Mendoza [2] estudió diseño multiobjetivo y multietapa en los sistemas de distribución de energía eléctrica aplicando algoritmos evolutivos, planteó la incorporación de dos algoritmos evolutivos multi-objetivos al diseño de un sistema de distribución eléctrica, utilizando un modelo mono-etapa y otro multietapa, se obtuvo una herramienta de diseño que resuelve con tiempos menores de cálculos, los diseños en los sistemas de distribución planteando la

utilización de dos objetivos: los costos económicos globales del sistema de distribución y la fiabilidad, garantizando mantener los requerimientos técnicos y operativos del mismo en cuanto a capacidades de potencia y caídas de tensión.

Vizcón [3] propuso un sistema híbrido, fotovoltaico-diesel, para la generación de energía eléctrica en un policlínico. Analizó la situación actual de la utilización de las energías renovables en el mundo, así como el software más utilizado actualmente en el tratamiento de estos sistemas. Posteriormente se ejecutó la simulación y optimización de un sistema híbrido mediante la aplicación del software HOMER, para determinar la mejor variante de suministro de electricidad. Los sistemas híbridos, poseen un largo período de recuperación de la inversión, motivado por los costos de los paneles solares, por la preservación del medio ambiente, provocando niveles mínimos de contaminación.

Lagunas [4], estudió control supervisorio para un sistema híbrido de generación eléctrica. Presentó el desarrollo de un controlador supervisorio para un Sistema Híbrido de Generación Eléctrica (SHGE). A través de la investigación realizada se definió la configuración y los elementos que componen el SHGE a utilizar, producto de la revisión de configuraciones de sistemas híbridos propuestos actualmente.

Bernal [5] Aplicó algoritmos genéticos en un diseño óptimo para sistemas de distribución de energía eléctrica, con el desarrollo de un modelo de optimización mono-objetivo que considera el tamaño y localización óptimo de líneas de transmisión eléctricas y subestaciones, así como la dimensión temporal del diseño (monoetapa o multietapa). En primer lugar, se planteó la realización del modelo de diseño óptimo mono-objetivo. Inicialmente se define el problema que se desea resolver con el fin de indicar claramente las variables básicas que van a aparecer posteriormente.

La realización del diseño de una red de distribución de energía eléctrica se lleva a cabo tomando en cuenta, además del costo económico global, otros aspectos técnicos de la red, entre los cuales se pueden citar, a título de ejemplo, los siguientes: Optimizar diversas medidas para evaluar la fiabilidad de la red de distribución de energía esperada no suministrada, tiempo de interrupción equivalente de la potencia instalada, etc.).

Una de las técnicas más populares en el diseño óptimo de sistemas de distribución en este momento son los algoritmos genéticos. Miranda [6] usa la confiabilidad del sistema dando un costo en la función objetivo. Se plantea como un problema multi-etapa pero no tiene coordinación entre las diferentes etapas y se puede presentar que las soluciones se superpongan. La incertidumbre en la planeación de un sistema de distribución es tratada a través de una optimización donde se tienen diferentes posibles escenarios. Usando algoritmos evolutivos se encuentra una serie de soluciones para cada uno de los posibles escenarios de los cuales se escogen las respuestas que mejor se comporten en todos los escenarios.

Teniendo en cuenta que el problema de optimización de sistemas de distribución desde el punto de vista práctico está formado por una serie de inversiones en diferentes años, un modelo mono-etapa puede no ser el más apropiado para modelar el problema. Por esta razón el modelo multietapa es de gran importancia, como el de donde se usa programación entera-mixta lineal, costos linealizados, con un modelo multietapa completamente dinámico que incluye el tiempo en el cual se deben hacer las inversiones.

Bernal [5] realiza un estudio de los diferentes modelos que se han usado en la optimización de sistemas de distribución hasta la fecha de su publicación, adicionalmente trabaja con varios modelos para la planeación (mono-objetivo, multiobjetivo, mono-etapa y multi-etapa) pero dando énfasis en un esquema de optimización con programación entera-mixta no lineal con algoritmos genéticos, usando costos no lineales, multietapa y multiobjetivo donde se tiene en cuenta la confiabilidad del sistema.

Ramírez-Rosado [7], trabaja con un modelo de optimización multi-objetivo donde se tienen dos funciones objetivo y como resultado de la optimización se obtienen una serie de posibles soluciones en equilibrio paretiano, se trabaja con un modelo de optimización no lineal entera-mixta. Los factores que presentan incertidumbre son las variaciones de demanda eléctrica, los costos variables de energía y adicionalmente las potencias, tensiones y corrientes difusas ocasionadas por las primeras. Presentaron un modelo fuzzy original basado en optimización no lineal multiobjetivo para planear el sistema mono-etapa o multietapa.

II. DESARROLLO

Algoritmos Genéticos

A grandes rasgos un AG consiste en una población de soluciones codificadas de forma similar a los cromoso-

mas. Cada uno de estos cromosomas tendrá asociado un ajuste, valor de bondad, ajuste o fitness, que cuantifica su validez como solución al problema. En función de este valor se le darán más o menos oportunidades de reproducción. Además, con cierta probabilidad se realizarán mutaciones de estos cromosomas.

La computación evolutiva se refiere al estudio de los fundamentos y aplicaciones de ciertas técnicas heurísticas basadas en los principios de la evolución natural [35]. Estas técnicas podrían clasificarse en tres categorías principales dando lugar a la ecuación evolutiva.

A. Fitness Puro: $r(i, t)$

Es la medida de ajuste establecida en la terminología natural del propio problema. La ecuación 1 establece el cálculo del valor de bondad de un individuo i en un instante t (o generación).

$$r(i, t) = \sum_{j=1}^{Nc} |s(i, j) - c(i, j)| \quad (1)$$

Donde: $S(i, j)$ = Valor deseado para el individuo i en el caso j .

$C(i, j)$ = Valor obtenido por el individuo i para el caso j .

Nc = Número de casos.

B. Fitness Estandarizados: $s(i, t)$

Para solucionar esta dualidad ante problemas de minimización o maximización se modifica el ajuste puro.

En el caso de problemas de minimización se emplea directamente la medida de fitness puro. Si el problema es de maximización se resta de una cota superior r_{max} del error el fitness puro. Empleando esta métrica la bondad de un individuo será mayor cuanto más cercano este a cero el valor del ajuste. Por lo tanto, dentro de la generación t , un individuo i siempre será mejor que uno j si se verifica que $s(i, t) < s(j, t)$.

C. Fitness Ajustado: $\alpha(i, t)$

Se obtiene aplicando la transformación al fitness estandarizado [2] se obtiene:

$$\alpha(i, t) = \frac{1}{1 + s(i, t)} \quad (2)$$

De esta manera, el fitness ajustado tomara siempre valores del intervalo $[0, 1]$. Cuando más se aproxime el fitness ajustado de un individuo a 1 mayor será su bondad.

D. Fitness Normalizado: $n(i, t)$

$$s(i, t) = \begin{cases} r(i, t) & \text{minimización} \\ r_{\max} - r(i, t) & \text{maximización} \end{cases} \quad (3)$$

Los diferentes tipos de fitness vistos hasta ahora hacen referencia únicamente a la bondad del individuo en cuestión. El fitness normalizado introduce un nuevo aspecto: indica la bondad de una solución con respecto al resto de soluciones representadas en la población. Considerando una población de tamaño N , se obtiene la ecuación 4.

$$n(i, t) = \frac{\alpha(i, t)}{\sum_{k=1}^N \alpha(k, t)} \quad (4)$$

Al igual que el fitness ajustado, siempre tomará valores del intervalo $[0,1]$, con mejores individuos cuanto más próximo este a la unidad. Pero a diferencia de lo anterior, un valor cercano a uno, no solo indica que ese individuo represente una buena solución al problema, sino que además es una solución mejor que las proporcionadas por el resto de la población. La suma de los valores del fitness normalizado de todos los individuos de una población dará siempre 1. Este tipo de ajuste es empleado en la mayoría de los métodos de selección proporcionales al fitness.

E.Sistema Híbrido

Un sistema híbrido en los sistemas eléctricos, utilizan múltiples fuentes de generación. Tal es el caso de los sistemas eléctricos aislados que utilizan energías renovables que son una opción emergente y técnicamente confiable para la provisión de energía eléctrica en estos casos. Los elementos que pueden componer el sistema híbrido son: paneles fotovoltaicos, aerogeneradores, turbina hidráulica, pila de combustible, tanque de hidrogeno y electrolizador, además de baterías, regulador de carga de las baterías, inversor (convertor DC/AC), rectificador (convertor AC/DC) y generador AC (DC: corriente continua).

Las cargas del sistema pueden ser: Cargas eléctricas en corriente alterna (AC): aparatos eléctricos que consumen energía eléctrica AC. Cargas eléctricas en DC: aparatos eléctricos que consumen energía eléctrica, cargas de Hidrógeno (producción de H₂ para consumo externo a la instalación, para alimentar vehículos eléctricos basados en pila de combustible), consumo de agua procedente de un depósito de abastecimiento, agua que será previamente bombeada por una electrobomba desde un pozo o río hasta el depósito.

F.Principales herramientas aplicables

Se puede incluir generador fotovoltaico, aerogeneradores, turbina hidroeléctrica, generador auxiliar (diesel, gasolina), inversor o inversor-cargador, baterías (plomo-ácido o litio), cargador y regulador de carga de las baterías, así como componentes del hidrógeno (electrolizador, tanque de hidrógeno y pila de combustible). Ithoga puede simular y optimizar sistemas de cualquier tamaño.

G.Descripción del Sistema Eléctrico Aplicación del Método a Optimizar

Este trabajo incluye la construcción de: dos estaciones de rebombeo en los Oleoductos de Cabrutica, seis tanques de almacenamiento para diluyente y crudo diluido, asimismo las conexiones a las instalaciones existentes de medición y fiscalización de crudo y bombeo.

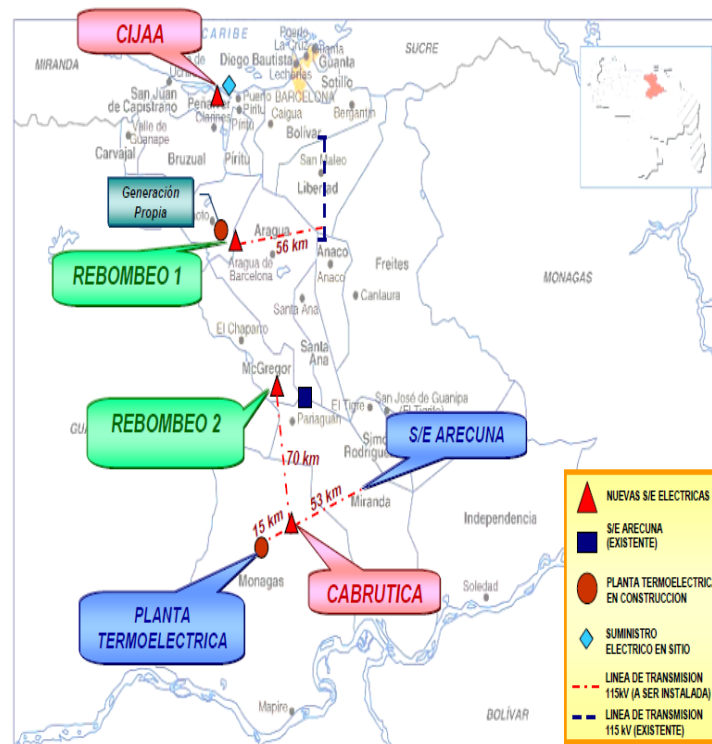


Fig. 1. Suministro Eléctrico.

H.Subestación eléctrica (S/E)

La estación de rebombeo I (Figura 1) comprende la incorporación de cinco (05) bombas principales de crudo diluido y cinco (05) de diluentes. La nueva S/E RBI (Aragua de Barcelona) 115/34.5/4.16 kV estará ubicada en la progresiva Km 70 aproximadamente, en el Municipio Aragua de Barcelona (Figura 2). Las coordenadas de ubicación son Norte: 1048433.878 y Este: 289614.842, para la puesta en servicio de la misma se requiere:

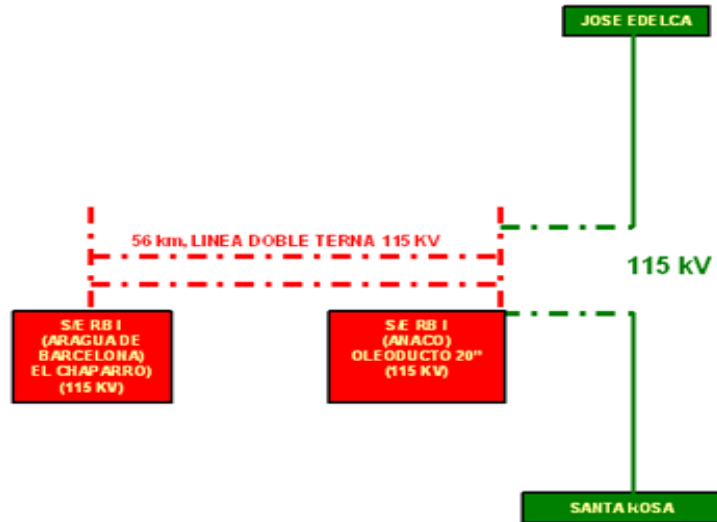


Fig. 2. Suministro Eléctrico para la Sub Estación RB I.

- Construcción de la S/E RBI con todo su equipamiento de protección e interconexión necesarios, configuración dos (2) anillos combinados en bajo perfil.
- Construcción de dos (02) salidas/llegadas de líneas provenientes de la línea de 115 KV.
- Construcción de dos (02) salidas/llegadas de líneas en 115 kV de reserva, para futura interconexión y/o anillar al sistema interconectado de la estatal petrolera, para aumentar confiabilidad en el sistema.
- Construcción de dos (02) salidas para transformación, los transformadores serán en 115/34.5 kV 75/100/125 MVA c/u.
- Instalación de dos (02) transformadores 34.5/4.16 kV 25 MVA c/u. Sistema de Distribución de Potencia de 34.5 Kv.
- La S/E estará conformada por Interruptores en 115 kV, Seccionadores doble apertura en 115 kV, seccionadores de apertura central en 115 kV, Transformadores de Potencial (TP) en 115 kV y pararrayos en 115 kV.

I.Alternativas de suministro eléctrico

Se prevé alimentar a la nueva Estación de Rebombeo de Aragua de Barcelona a través de una línea doble terna 115 kV proveniente de la futura Subestación de Rebombeo del Oleoducto de 20 pulgadas Palmichal-PTO-Morichal ubicada a 56 km de distancia de la misma, la cual será alimentada a su vez en 115 kV mediante la apertura de la línea de transmisión Jose-Santa Rosa.

J.Datos de la Demanda

Se toman en cuenta los servicios de aire acondicionado requeridos por la caseta de mando y la caseta de vigilancia, la misma es estimada utilizando factores de demanda en función del área que se requiere iluminar o acondicionar.

La tabla I corresponde a los servicios auxiliares en corriente alterna requerido por los diferentes equipos y sistemas a ser implementados en las subestaciones. Los mismos han sido calculados utilizando valores típicos suministrados por fabricantes de equipos y sistemas.

Tabla I. Áreas auxiliares necesarias en las subestaciones.

AMBIENTE	ÁREA (m ²)	DENSIDAD DE CARGA ASUMIDA (VA/m ²)	ESTIMADO DE CARGA (VA)	OBSERVACIONES
Subestación Eléctrica	14.400,00	2,5	36.000,0	Iluminación Exterior
Casa de Mando (Iluminación)	1.280,00	2,5	3.200,0	Iluminación Interior
Área de Transformadores	120,00	2,5	300,0	
Casa de Mando (Tomacorrientes)	1.280,00	5,0	6.400,0	Tomacorrientes
Caseta de Vigilancia	25,00	5,0	125,0	Iluminación Interior
Vialidad	480,00	1,0	480,0	
Área de reserva disponible	1.215,00	1,5	1.822,5	
Cuarto de Equipos Electricos (A/A Casa de Mando)	480,0	350,00	168.000,0	Aire Acondicionado
Cuarto de Control (A/A Casa de Mando)	400,0	300,00	120.000,0	
Área ADM/C-AT (A/A Casa de Mando)	400,0	150,00	60.000,0	
Caseta de Vigilancia (A/A)	20,0	150,00	3.000	Aire Acondicionado
TOTALES			399.328	

III.METODOLOGÍA

Cumpliendo con los lineamientos establecidos para el diseño de subestaciones eléctricas de la estatal petrolera de Venezuela establecidos en las normas N-252 Especificaciones Generales para el Diseño en Ingeniería Eléctrica IEEE 141 Recommended Practice for Electric Power Distribution for Plants y considerando la mejor opción que se ajuste a los requerimientos de confiabilidad para mejorar el sistema de distribución se presentan la siguiente alternativa mostrada a continuación.

Como premisa se considera la alternativa común a todas las instalaciones de bombeo y rebombes, la autogeneración mediante un Estudio de Factibilidad Eléctrica para la Estación RBI, en la que se recomienda la evaluación de generación propia en las áreas. Con esto se mejoraría los niveles de confiabilidad y calidad del sistema eléctrico a nivel 115 KV, que comprende un proyecto a desarrollar para su factibilidad de implantación y planificación del sistema de generación.

A.Ventajas de los algoritmos genéticos

Una de las principales ventajas de los AG: es un método que puede ser fácilmente aplicable a cualquier problema combinado. No es difícil aplicar una determinada codificación y obtener funciones de evaluación y de aptitud, aun cuando sea escaso el conocimiento del problema que se deba tratar.

Otros modelos de optimización como los algoritmos o métodos enumerativos pueden alcanzar el mínimo o máximo global del problema que se desea resolver, pero si el número de variables de control es muy elevado, entonces no son apropiados por los grandes recursos computacionales que requieren para su aplicación, siendo los tiempos de cálculos inaceptables para efectos prácticos.

Los AG se han aplicado a diversos casos de diseño óptimo de redes de distribución reales de dimensiones significativas, mucho mayores, aplicando los modelos de diseño óptimo mono-objetivo y multiobjetivo, los cuales contemplan una amplia variedad de aspectos relevantes del diseño. Permiten obtener soluciones satisfactorias al ser aplicados a problemas con un gran nivel de complejidad, y con tiempos de cálculo muy bajos.

IV.RESULTADOS

Para los valores de control del Algoritmo Genético se pueden encontrar en [2], donde han propuesto diversos rangos de población, tasa de cruce y tasa de mutación, que fueron tomados para esta investigación:

- Población: 100.
- Tasa de cruce: 90.
- Tasa de Mutación: 0,5% y 2%.

Con estos rangos establecidos y con máximo número de generaciones de 37 para el control del algoritmo se obtiene una generación a partir de la anterior por medio de los operadores de reproducción.

Se determinó que para una tasa de población en el orden de 100 generaciones se obtenían resultados satisfactorios en la investigación bajo estudio, dado de que los mejores individuos de la población representan soluciones suficientemente buenas para la resolución del problema, el tiempo del cálculo es satisfactorio al aumentar el número de generaciones que forman parte de la población. Se determinó que con el 95% de la población se obtiene una solución óptima.

La tasa de cruce influye en el tiempo del cálculo, el cual se incrementa al aumentar la misma. Se determinó que con una tasa de cruce del 90 % como el valor más adecuado, en vista de que con este se obtuvieron los mejores resultados, mejor convergencia del algoritmo y un menor tiempo de cálculo.

La tasa de mutación aporta carácter aleatorio en la búsqueda de soluciones, en la cual se visualizó en el estudio al observar que valores altos originan resultados no satisfactorios al predominar la búsqueda no dirigida frente a la dirigida. Los mejores resultados en el proyecto se originaron con una tasa de mutación de entre 0.5 y 2%, en vista de la influencia de este parámetro en el tiempo de ejecución del algoritmo, se determinó un valor del 1% como el más adecuado, con el cual se disminuye el tiempo del cálculo sin alterar la convergencia del programa.

La energía no servida máxima permitida influye en la restricción principal de energía que demandan la combinación de los componentes y que permite que el sistema autónomo sea capaz de suplir toda la demanda, se determinó que con un valor de 0,3% de la demanda anual de restricción se obtuvieron resultados aceptables, cubriendo la energía total demandada por las cargas.

En la estrategia de control se indica el tipo de seguimiento de demanda de energía y definir distintas variables de control para ser optimizadas, para la realización de esta investigación se tomó como estrategia el Seguimiento de la demanda [12] dando resultados satisfactorios, se incluyeron baterías y generador AC y la energía faltante en las cargas podrá ser suplida por estos equipos.

Caso 1 (Optimización mono-objetivo): Se corrió un total de 15903 casos, de la evolución del costo total de la mejor solución y de las emisiones de CO₂ (dióxido de carbono) equivalentes anuales del ciclo de vida para la mejor solución de cada generación. En este caso de las 15 generaciones evaluadas se obtuvieron los mejores resultados a partir de la tercera generación con un balance menor de Costo Total Neto y emisiones de CO₂ en un periodo de 25 años.

A.Solución óptima del sistema de distribución eléctrica

Se observa en las figuras 3, 4 y 5 la mejor solución óptima encontrada con los componentes del sistema y la actuación de la estrategia de control, costos de los distintos componentes del sistema híbrido, así como el balance de energía. En la misma se muestran los costos del periodo de estudio de 25 años, así como el costo a lo largo de la vida útil si en lugar del sistema híbrido toda la alimentación eléctrica proviniera exclusivamente de la red AC, así como el mantenimiento de los niveles de tensión de +/- 5% como se estipula en la norma petróleos de Venezuela N-206.

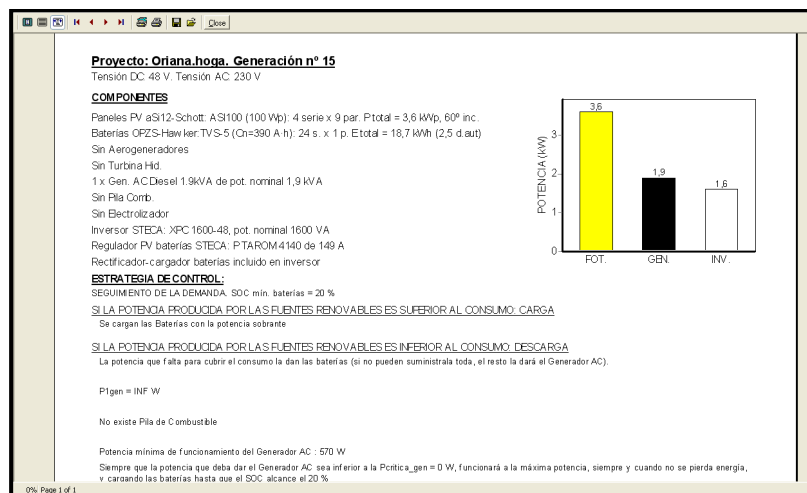


Fig. 3. Mejor solución encontrada (Componentes y estrategia de Control) para la Optimización Mono-objetivo.

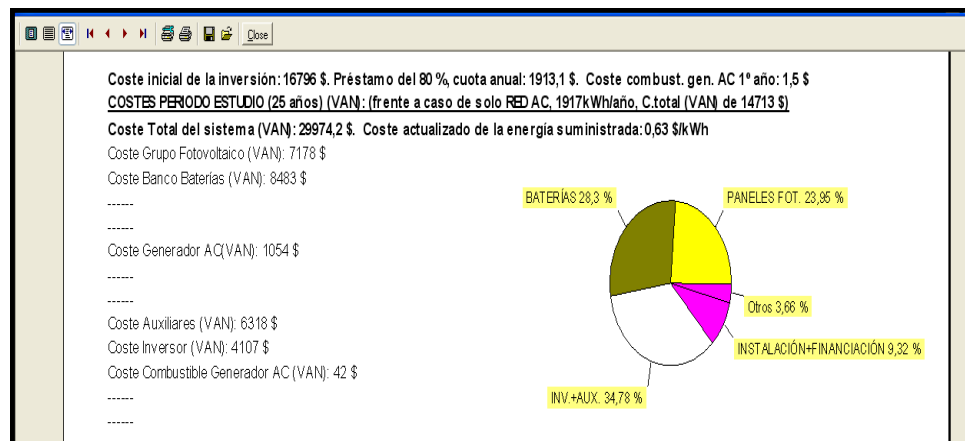


Fig. 4. Informe de la mejor solución encontrada para el costo inicial de la inversión.

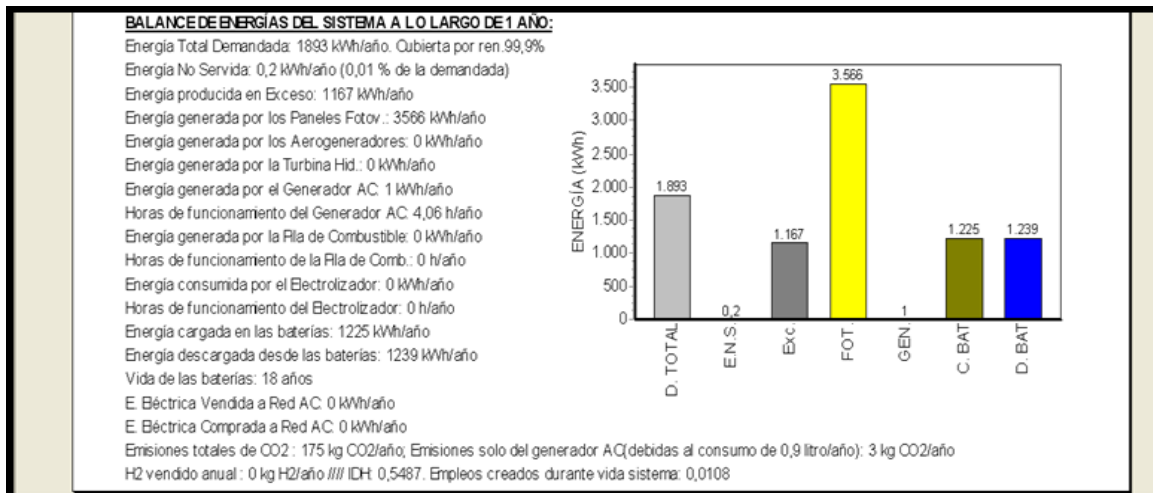


Fig. 5. Informe de la Mejor solución encontrada para el balance de energía del sistema.

Caso 2 (Optimización multiobjetivo): Se corrieron 15903 casos, el cual se refleja el pareto de las soluciones no dominadas entre el costo total de la mejor solución y de las emisiones de CO₂ equivalentes anuales del ciclo de vida para la mejor solución de cada generación. En este caso de las generaciones evaluadas no se especifican los datos de la mejor solución, es decir, no se puede decir que una no dominada sea mejor que otra no dominada.

Para ambos casos de diseño óptimo, los componentes del sistema híbrido y de la estrategia de controles óptimos tanto para la subestación RBI y RBII estarán compuestas por un arreglo con:

- Paneles fotovoltaicos para la adecuación de la iluminación exterior y peatonal de la S/E.
- Banco de baterías para garantizar el funcionamiento en caso de emergencia, como una falla de la fuente normal de suministro eléctrico en CA de la carga instalada con una autonomía de 8 horas.
- Dos rectificadores cargadores para operar como un sistema de suministro de potencia de corriente continua en 125 VDC, e inversores con capacidad nominal de 1600 VA, el cual alimentará las cargas de los gabinetes de protección, medición y control, así como los servicios auxiliares DC de los Centros de Distribución de Potencia (CDP) y Centro de Control de Motores (CCM).
- Un Generador eléctrico AC con capacidad nominal de 2 KVA para suplir las cargas en 480 V, correspondiente a los Servicios Auxiliares de Corriente Alterna.

Con los resultados obtenidos, la potencia producida por las fuentes renovables y para suplir el consumo de las cargas en media tensión, la distribución eléctrica sería suplido por un turbo-generador de 115/34,5 con capacidad de 4x5 MW para la autogeneración con filosofía de transmisión (interconexión con otros sistemas) de tipo "TPC" (configuración de barras en anillo combinado, que consiste en un anillo sencillo con conexión reforzada entre dos circuitos opuestos) para las cargas correspondientes a la sala de rebombes en 4,16 KV en la subestación eléctrica

RBI Aragua de Barcelona. Con una vida útil de 25 años, esto de acuerdo con lo estipulado en la norma petróleos de Venezuela N-205 en la que se estipula que la vida útil de los turbo-generadores no deben ser menores a 20 años y con un periodo operacional antes del primer mantenimiento mayor de 5 años, con frecuencia y factor de variación en la tensión de salida de +/- 5% de la tensión nominal.

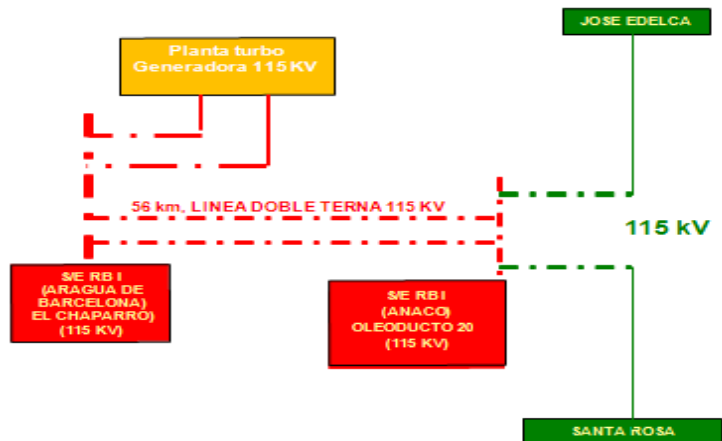


Figura 6. Solución propuesta de Suministro de Energía Eléctrica Sub Estación RB I.

Para garantizar mayor confiabilidad en las operaciones de la S/E Aragua de Barcelona se construyó una línea de transmisión doble terna de 20 KM en 115 KV desde la planta turbogeneradora.

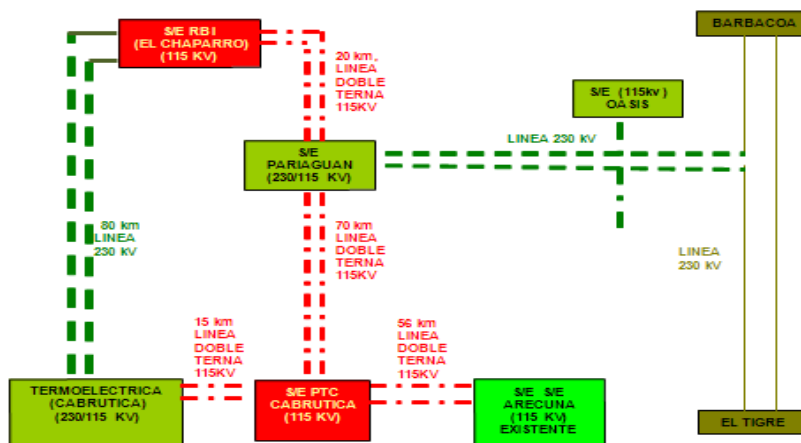


Fig.7. Propuesta para el suministro de Energía Eléctrica Sub Estación RB II.

Para garantizar una mayor confiabilidad en las operaciones de la subestación se realizó la construcción de una línea de transmisión doble terna de 80 KM en 115 KV desde la planta termoeléctrica hasta la nueva subestación eléctrica chaparro (S/E RBII), con esta nueva línea se alimentará las cargas del rebombero en 4,16 KV y cubrirá la demanda total de la nueva subestación eléctrica (12 MW) y la subestación eléctrica Paríaguán (34 MW).

V.CONCLUSIONES

Se ha obtenido la evaluación con un sistema híbrido aplicando los Algoritmos Genéticos indicando los aportes dentro del diseño y la optimización de sistemas de distribución eléctrica. Los Algoritmos Genéticos son una técnica metaheurística en cuyo proceso de optimización está involucrada la aleatoriedad, que es capaz de encontrar el óptimo o una buena respuesta muy cercana a esta, sujeto a un correcto ajuste de sus factores. Esto significa que en diferentes corridas el programa no necesariamente llega a la misma respuesta. A continuación, se presenta los

resultados y aportes:

Se obtuvo un algoritmo principal con la configuración óptima de diversos componentes: paneles fotovoltaicos, baterías, generador AC, pila de combustible e inversor, que en el caso de la optimización mono-objetivo se logró la minimización de costes totales del sistema a lo largo de su vida útil.

Para cada configuración de componentes que proporciona el algoritmo principal, la estrategia de control o combinación de variables de control, más adecuada para minimizar los costos (mediante el algoritmo secundario).

Se alcanzó un balance de energía del sistema a lo largo de un año con una demanda cubierta de casi 100%, con un porcentaje de energía no servida de un 0,01% de la demanda.

Se determinó que con el arreglo se generó un bajo porcentaje de emisiones de CO₂ y un Costo neto bajo a partir de la tercera generación hasta la 15, dando por concluido que a partir de la tercera generación se recogieron los mejores resultados.

El algoritmo desarrollado plantea la posibilidad bajo la estrategia de control de demanda de cargar el banco de baterías al ser la demanda de las fuentes renovables superior a la carga.

Se realizó el diseño óptimo del sistema de distribución eléctrica mediante la aplicación de algoritmos Genéticos Multi-objetivo, basado en el concepto de dominancia de Pareto. En ella se consideraron dos objetivos: costos totales del sistema y emisiones de CO₂ sujeto a las restricciones planteadas, comparando así mismo los resultados de diseño óptimo mono-objetivo y multiobjetivo correspondientes. El tiempo de ejecución del proyecto fue menor con la incorporación de los Algoritmos Genéticos en comparación con algún otro método de evaluación.

Los algoritmos genéticos constituyen el paradigma más completo de los que presenta la computación evolutiva. Permiten resolver problemas con poco esfuerzo computacional, especialmente en los casos en que otros métodos fallan o suponen unos requerimientos computacionales excesivos. Utilizan una población de individuos, los cuales evolucionan al ser sometidos a una serie de transformaciones mediante unos determinados operadores. Se emulan los procesos de selección natural y de reproducción presentes en la naturaleza, siendo los individuos más fuertes los que sobreviven y procrean a lo largo de la ejecución del algoritmo.

REFERENCIAS

- [1] D. F. Pinzón, «Diseño óptimo de Sistemas de Distribución,» Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2014.
- [2] F. A. Mendoza Lameda, «Diseño multiobjetivo y multietapa de sistemas de distribución de energía eléctrica aplicando algoritmos evolutivos,» Universidad de Zaragoza, Zaragoza, 2010.
- [3] L. Miró Hernández y R. Vizcón Toledo, «Sistema Híbrido Propuesto Para la Generación de Electricidad en un Policlínico,» Revista Avanzada Científica, vol. 9, nº 2, pp. 50-56, 2006.
- [4] J. Lagunas M., C. Ortega S. y P. Caratozzolo M., «Control supervisorio para sistemas híbridos de generación eléctrica basado en lógica difusa,» Boletín UE, Monterrey, 2005.
- [5] J. L. Bernal Agustín, «Aplicación de algoritmos genéticos al diseño óptimo de sistemas de distribución de energía eléctrica,» Universidad de Zaragoza, Zaragoza, 1998.
- [6] V. Miranda, J. V. Ranito y L. Proenca, «Genetic Algorithms in Optimal Multistage Distribution Network Planning,» IEEE, Porto, 1994.
- [7] I. Ramirez-Rosado y J. Dominguez-Navarro, «Computer Aided Design of Power Distribution Systems: Multiobjective Mathematical Simulations,» International Journal of Power and Energy Systems, vol. 19, nº 4, pp. 1801 - 1810, 2004.

Análisis térmico-mecánico de los segmentos de máquinas briqueteadoras en industrias siderúrgicas

Jaimes Saúl

sajv911@gmail.com

Universidad Politécnica Antonio José de Sucre, Puerto Ordaz, Venezuela

<https://orcid.org/0000-0002-8763-5513>

Estado Bolívar - Venezuela

Recibido (04/03/20), Aceptado (24/03/20)

Resumen: Se realiza un análisis térmico-mecánico del comportamiento de los segmentos de los rodillos de las máquinas briqueteadoras por efecto del choque térmico y esfuerzos ejercidos en la pieza. Se pretende obtener las principales causas que generan este problema, mediante un análisis mecánico que permitió simular el comportamiento en presencia de varios gradientes térmicos. La finalidad del estudio es reducir costos de mantenimiento y la sustitución y reparación continua de segmentos, así como las pérdidas en toneladas de producción a causa de la falla que son de gran impacto para la industria. Esta investigación permite conocer en qué medida los parámetros operativos, tales como: temperatura del material, presión, torque, velocidad de los rodillos influyen en la vida útil de los segmentos de acuerdo a su material de fabricación y en función de estos se simuló el comportamiento durante el proceso de briquetado.

Palabras Clave: Simulación, elemento finito, briquetas.

Thermal-mechanical analysis of the briquetting machine segments in steel industries

Abstract: A thermal-mechanical analysis of the behavior of the segments of the rollers of the briquetting machines is carried out due to the effect of thermal shock and efforts exerted on the part. It is intended to obtain the main causes that generate this problem, through a mechanical analysis that simulated the behavior in the presence of several thermal gradients. The purpose of the study is to reduce maintenance costs and the continuous replacement and repair of segments, as well as losses in tons of production due to the failure that are of great impact to the industry. This investigation allows us to know to what extent the operating parameters, such as: material temperature, pressure, torque, speed of the rollers influence the life of the segments according to their manufacturing material and based on these the behavior is simulated during the briquetting process.

Keywords: Simulation, finite element, briquettes.



I. INTRODUCCIÓN

ORINOCO IRON es una empresa, dedicada a la producción de briquetas de hierro prerreducido, mediante el proceso de reducción directa MIDREX en el cual, los óxidos de hierro son reducidos por la reacción química de éstos, con gases reductores.

Con este propósito, la planta cuenta con cuatro máquinas briqueteadoras, en las cuales, el hierro prerreducido es compactado mediante la presión ejercida entre rodillos que giran en direcciones opuestas y que poseen anillos segmentados en los cuales se amolda el material; dando lugar a la conformación de las briquetas.

Dado que el proceso de briquetado opera bajo condiciones de presión, temperatura, velocidad y torque elevados, es necesario el empleo de segmentos elaborados de materiales capaces de soportar tales condiciones de trabajo. Sin embargo, los segmentos actualmente presentan una serie de fracturas, que se deben probablemente al material del cual están fabricados o a los parámetros de servicio en los que operan.

Por lo tanto, este trabajo permitió obtener las principales causas que generan este problema, mediante un análisis mecánico que permitió simular el comportamiento al estar presente varios gradientes térmicos, con la finalidad de reducir los costos de mantenimiento y la sustitución y reparación continua de segmentos.

Este trabajo está organizado de la siguiente manera: en la sección I, se muestra la introducción; luego en la sección II, se pueden visualizar la metodología de empleada en la investigación; más adelante en la sección III se muestra el desarrollo del estudio propuesto y en la sección IV se detallan los resultados obtenidos, después en la sección V se realiza la discusión de los resultados obtenidos y por último se presentan las conclusiones más relevantes.

II. DESARROLLO

A. Análisis por Elementos Finitos: Workbench

Análisis por elementos finitos o FEA, por sus siglas en inglés es una representación matemática de un sistema físico que abarca una pieza/montaje (modelo) [4], características materiales, y condiciones de borde aplicables (designadas en el pre-procesamiento), la solución de esa representación matemática (solving), y el estudio de resultados de esa solución (post-procesamiento). Las formas simples y los problemas simples pueden ser, y están a menudo, hechos a mano; pero la mayoría de las piezas del mundo real son muy complejas para hacerlas exactamente, aún menos rápidamente, sin uso de una computadora y de un software apropiado de análisis.

B. Pre-Procesamiento

Es la primera parte para llevar a cabo un análisis, para ello, el software de FEA utiliza típicamente una representación en CAD del modelo físico y lo divide en pedazos más pequeños llamados los elementos finitos (pensar en un rompecabezas tridimensional). Este proceso es llamado mallado. Cuanta más alta es la calidad del mallado, mejor es la representación matemática del modelo físico. El propósito primario de un elemento es conectar nodos con las ecuaciones matemáticas fiables basadas en unión entre los nodos; el tipo de elemento utilizado depende a menudo del problema que se busca solucionar [5].

El comportamiento de cada elemento, por sí mismo, es muy bien entendido. Combinando los comportamientos de cada elemento usando ecuaciones simultáneas, se puede predecir el comportamiento total de las formas que de otra manera no serían entendidas usando las ecuaciones básicas de cálculo encontradas en manuales típicos de la ingeniería.

C. Elementos

Para fines generales, los programas mecánicos modernos de FEA, utilizan típicamente un sistema selecto de elementos elegidos por su flexibilidad, robustez, y su contribución total a la facilidad de la solución. WORKBENCH utiliza varios tipos primarios del elemento y tomará de manera automática los elementos de más alta categoría (10 nodos cuadráticos) tetraedro (H) (SOLID 187 en ANSYS) para las geometrías de modelo sólido, en cualquier caso, se emplean los elementos de categoría alta (20 nodos) elemento ladrillo (SÓLIDO 186).

En los modelos superficiales cerrados [6] [7], “cuadrilátero-dominante” (4 nodos) los elementos de cáscara (SHELL 181), se utilizan proporcionando exactitud y eficacia mientras que son convenientes para los algoritmos de mallado automático robusto usados en la simulación WORKBENCH. Y, para la interacción de las partes dentro de un ensamblaje, se utilizan los elementos de contacto (CONTACT 170/174). Para modelos de vigas con características de soldadura, elementos de viga se emplean (BEAM 188). ANSYS WORKBENCH aplica estos varios tipos

del elemento automáticamente.

Cada elemento abarca dos o más nodos los cuales ayudan a definir la forma para transportar reacciones físicas a partir de un elemento al siguiente. El finito en FEA viene del hecho de que hay un número conocido de elementos en un modelo de elementos finitos. El solver (sistema de solución) suma los comportamientos individuales de cada elemento para predecir el comportamiento del sistema físico entero.

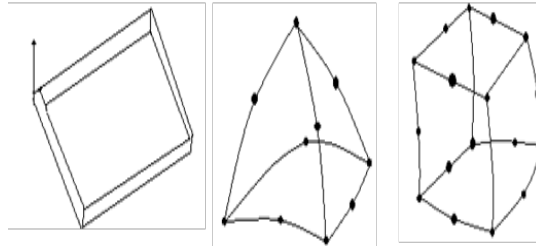


Fig. 1. Tipos de elementos comunes usados en ANSYS WORKBENCH.

D. Mallado (Meshing)

ANSYS WORKBENCH proporciona dos formas de mallado automatizado: Completamente automático y Automático manualmente dirigido. Ambas formas emplean una filosofía de ensayo y error, si ocurre un problema, por lo menos doce tentativas de la resolución del mismo automáticamente se hacen antes de que el mallado falle y marque el área de la dificultad con una etiqueta. El mallado manual dirigido que el usuario puede especificar la malla en áreas puntuales de una pieza (borde, cara) o la densidad de mallado de la línea base en las piezas enteras que diferencian de otras partes dentro del ensamblaje, para los propósitos de la exactitud o de la eficacia.

E. Solución (Solving)

El software emplea tres de los solvers de ANSYS y elige automáticamente el apropiado o eficiente para el trabajo actual. Además de realizar tipos juntados de análisis (térmico-esfuerzo, esfuerzo-modal, térmico-esfuerzo modal) así como algunos limitados tipos de análisis no lineales (térmico con temperatura dependiente de las propiedades del material y convección, geométricos/contacto con despegue de soporte del contacto). Todos los ajustes del solver y propagaciones de la iteración a partir del lapso de la solución al siguiente se realizan automáticamente.

F. Post Procesamiento.

Después de resolver todas las ecuaciones, a la salida del solver se tiene una cantidad considerable de información. Esta cantidad de información en bruto sería normalmente difícil de interpretar sin clasificar los datos y sin representarlos gráficamente es aquí en el post-procesamiento donde se crean las exhibiciones gráficas que demuestran la distribución de las tensiones, esfuerzos, deformaciones, temperaturas, y otros aspectos del modelo.

La interpretación de estos resultados post procesados es la llave a identificar o la información valiosa sobre otras características de funcionamiento del modelo (térmico, modales) que no serían conocidas de otra manera hasta que un modelo físico fuese construido y probado.

G. Análisis Térmico en una Modelación

Un análisis térmico calcula la distribución de temperaturas y otros valores asociados a un sistema o componentes. Los valores que se pueden tener entre este tipo de análisis, son: La distribución de temperatura, la cantidad de calor ganado o perdido, gradiente térmico y flujo térmico [8].

La simulación térmica desempeña un rol importante en el diseño de muchas aplicaciones en la ingeniería, como motores de combustión interna, turbinas, sistemas de tuberías y componentes electrónicos entre otros. En muchos de los casos, se tiene un análisis térmico en combinación con un análisis de esfuerzos para el cálculo de esfuerzos térmicos, esto es referido a esfuerzos causados por dilataciones o contracciones térmicas.

Un análisis básico en Ansys, es obtenido de una ecuación de balance de calor por el principio de conservación de energía. La solución a través de elementos finitos, representa el cálculo de temperatura en nodos, y estos resultados son utilizados para obtener otros valores como pérdidas o ganancia de calor, gradiente térmico entre otros.

H.Mecanismos de Transferencia de Calor

Existen tres formas de transferencia de calor llamadas: Conducción, convección y radiación. Cada uno de estos modos puede estudiarse por separado, si bien la mayoría de las aplicaciones de ingeniería son combinaciones de las tres formas. No obstante, un estudio profundo de los mecanismos asociados a cada una de las formas mencionadas anteriormente permite extender fácilmente el análisis al problema combinado [9] [10].

I.Transferencia de Calor por Conducción

La conducción es el único mecanismo de transferencia de calor posible en los medios sólidos opacos. La conducción térmica es la transferencia de calor en el interior de un medio material sólido, líquido o gaseoso. En los sólidos, y particularmente en los metales, la conducción se debe: (a) al desplazamiento de electrones libres, y (b) a la vibración de la red cristalina. A temperaturas bajas, este último fenómeno, que es la vibración de la estructura cristalina de un material, constituye el mecanismo primario de la conducción térmica. Independientemente del mecanismo, la energía se transfiere de un átomo (o molécula) a otro, dando por resultado un flujo de energía a través del medio físico.

En los líquidos el mecanismo de la conducción de calor es una combinación del movimiento de los electrones y el efecto de colisión molecular. La conducción de estos materiales depende de la temperatura, y no de la presión. En un gas, el mecanismo de la conducción térmica depende de la presión y la temperatura, que intervienen obviamente, haciendo aumentar la posibilidad de las colisiones moleculares.

Cuando en estos cuerpos existe un gradiente de temperatura, el calor se trasmite de la región de mayor temperatura a la de menor temperatura debido al contacto directo entre las moléculas del medio. Cuando en un cuerpo existe un gradiente de temperatura, la experiencia muestra que hay una transferencia de energía desde la región a alta temperatura hacia la región de baja temperatura.

J.Convección

La convección es la transferencia de calor entre una superficie sólida y un fluido. Se trata de una modalidad combinada, ya que el calor en las interfaces sólido-fluido se transfiere por conducción mediante las colisiones o choques entre las moléculas del sólido y las del fluido. Como resultado de estas acciones se produce en el fluido un cambio de temperatura y, en consecuencia, una variación de densidades, de lo que resulta un movimiento del fluido. Ocurre un proceso de mezcla de las diversas porciones a alta y a baja temperatura en dicho fluido, se transfiere así la energía térmica por transporte de masas de fluido.

Los problemas de convección en la transferencia de calor son considerablemente más difíciles que los que se encuentran en la conducción y con demasiada frecuencia es imposible encontrar soluciones analíticas. Dichas dificultades surgen del hecho de que el mecanismo básico para la convección es una combinación de conducción y dinámica de los fluidos. La convección ocurre siempre que una superficie está en contacto con un fluido y este tiene temperatura diferente a la de la superficie en cuestión.

K.Radiación

La radiación presenta una diferencia fundamental respecto a la conducción y la convección; las sustancias que intercambian calor no tienen que estar en contacto, sino que pueden estar separadas por un vacío. La radiación es un término que se aplica generalmente a toda clase de fenómenos relacionados con ondas electromagnéticas.

L.Bases Matemáticas para Análisis Térmicos

Para resolver un problema termo mecánico, se debe obtener la solución de las ecuaciones con las condiciones de borde apropiadas; a continuación, la ecuación general de transferencia de calor y las condiciones de borde térmicas [11].

Ecuación General de la Transferencia de Calor

La ecuación general de conducción de calor que gobierna la distribución y la conducción del flujo de calor en un sólido que tenga propiedades físicas uniformes [12] [13].

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + h \Delta T + \sigma \varepsilon_i F_{ij} A_i (T_i^4 - T_j^4) \quad (1)$$

Conducción

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k_r r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(k_\phi \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q' = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

La ecuación (2) discretizada es

$$\begin{aligned} & \frac{k_r}{r} \left[\frac{T_{(t,(r+1)\Delta r)} - 2T_{(t,r\Delta r)} + T_{(t,(r-1)\Delta r)}}{\Delta r^2} \right] + \frac{k_\phi}{r^2} \left[\frac{T_{(t,(\phi+1)\Delta \phi)} - 2T_{(t,\phi\Delta \phi)} + T_{(t,(\phi-1)\Delta \phi)}}{\Delta \phi^2} \right] \\ & + \frac{k_z}{z} \left[\frac{T_{(t,(i+1)\Delta z)} - 2T_{(t,i\Delta z)} + T_{(t,(i-1)\Delta z)}}{\Delta z^2} \right] + q \\ & = \rho c_p \frac{1}{(\Delta t)^2} [T_{(t+1)} - 2T_{(t)} + T_{(t-1)}] + \iint_A h(T_s - T_\infty) dx.r.d\phi \end{aligned} \quad (3)$$

Ecuaciones de esfuerzos

Deformación

$$\varepsilon_r = \frac{1}{\epsilon} [\sigma_{nr} - \mu(\sigma_{n\phi} + \sigma_{nz})] \quad (4)$$

$$\varepsilon_\phi = \frac{1}{\epsilon} [\sigma_{n\phi} - \mu(\sigma_{nr} + \sigma_{nz})] \quad (5)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{\epsilon} [\sigma_{nz} - \mu(\sigma_{nr} + \sigma_{n\phi})] \quad (6)$$

Esfuerzos

$$\begin{bmatrix} \sigma_{nr} & \tau_{r\phi} & \tau_{rz} \\ \tau_{r\phi} & \sigma_{n\phi} & \tau_{\phi z} \\ \tau_{rz} & \tau_{\phi z} & \sigma_{nz} \end{bmatrix} \quad (7)$$

M.El Proceso de briqueteado

El proceso de reducción es conocido como “reducción directa”, el cual se realiza bajo tecnología MIDREX®, usando 70% y 30% mineral de hierro, estos son llevados por una cinta a 45° a la tolva de carga, la cual a su vez alimenta al reactor, que realiza el proceso de reducción (extraer oxígeno del material). Una vez que el mineral ya está reducido y obtenido el metálico requerido, este inicia el descenso por una serie de elementos hasta llegar a las máquinas briquetadoras, obteniendo Hierro Briqueteado en Caliente (HBC).

Una vez reducido el material, éste baja del horno a 750°C aproximadamente, se alimenta a la máquina por un tubo (pierna), luego el material llega a la tolva, donde está instalado (en su parte inferior) el Coil Assambly, y allí se forma la masa a ser briquetada. Aquí el material es empujado por el tornillo alimentador, el material es mantenido dentro de los rodillos mediante unas pletinas laterales. Al mismo tiempo que el material es alimentado, los rodillos están girando, produciéndose de esta forma la compactación en los bolsillos de los segmentos.

La briqueta es el resultado de haber compacto el hierro reducido, las briquetas son de variados tamaños y dependen del tamaño del bolsillo de los segmentos. Las dimensiones de la briqueta estándar producida por Orinoco Iron son de 106x48x32 mm, para un peso cúbico ≥ 5 gr/cm³.



Fig. 2. Diferentes tipos de Briquetas.

Recientemente se han realizado pruebas variando el tamaño de las briquetas (aumentando el bolsillo de los segmentos y tamaño de segmentos) con el objeto de aumentar la producción y aplicar ciertas modificaciones que mejoren el rendimiento de los segmentos.

Orinoco Iron posee cuatro máquinas briqueteadoras en su línea de producción.

La máquina briqueteadora consta una prensa de rodillo, de un motor eléctrico de velocidad variable de 360 a 1800 revoluciones de 464 kW, un reductor de cinco etapas con un índice de reducción de 110, una tolva de carga, un tornillo alimentador.

La prensa de rodillos está integrada por un bastidor, los rodillos briqueteadores, sistema de presurización (Unid rolls pressure), separador de briquetas, un bajante (String Chute), dos pletinas laterales (Cheek plate) y un anillo (Coil Assembly). Las revoluciones de los rodillos son regulables con un máximo de 16,3 rpm y un mínimo de 3,2 rpm. La presión de 120 kN/cm² y un apriete del sistema hidráulico 2.640 kN [14] [15].

Los rodillos de la máquina están dispuestos de una forma paralela entre sí, separados a una distancia de 3, 2 o 1 mm denominado Gap estático, según sea el caso. La máquina posee un bastidor donde hay dos columnas fijas en las que se apoya uno de los rodillos (rodillo fijo). El proceso de briqueteadado se realiza mediante el giro de los rodillos, generándose compactación a través del empuje horizontal que es transmitido por cuatro gatos hidráulicos en el rodillo opuesto (rodillo flotante). El empuje vertical que ejerce el tornillo alimentador cuando oprime el material contra los rodillos genera una fuerza que trata de separar a los rodillos.

Teniendo un rodillo que no puede moverse (rodillo fijo) el empuje es contrarrestada con cuatro cilindros hidráulicos (instalados en rodillo flotante en los extremos) con una presión máxima de 220 Bar. Este ciclo es constante teniéndose fluctuaciones tanto en el giro como en el empuje, las cuales son controlados por una serie de válvulas reguladoras con un programa de máxima carga que evita picos muy altos de presión.

El rodillo briqueteador es una pieza fabricada de un acero muy especial, de forma cilíndrica maciza de $\varnothing=740$ mm (diámetro donde asientan los segmentos), con una longitud de 2330 mm. El rodillo posee agujeros internos para enfriamiento del núcleo.

Sobre los rodillos se instalan los segmentos (en el núcleo, ubicado en el centro del rodillo) y las chumaceras (en los extremos), siendo los segmentos los elementos que forman la briqueta y las chumaceras los apoyos a los cuales se transmite la carga a los rodillos y funciona como base para el desplazamiento en el chasis de la máquina (el rodillo que corresponde al lado flotante).

Los segmentos son los elementos que conforman a la briqueta, son fabricados de acero especial, dentro de los principales elementos que lo conforman se encuentran el tungsteno, cromo, vanadio, Titanio, manganeso, níquel, entre otros, siendo su dureza de 64 HRC. Estos van dispuestos de forma cilíndrica sobre los rodillos. En cada rodillo se le instalan 12 segmentos, para un total de 24 segmentos por máquina.

Los segmentos están en contacto directo con el material reducido, llegando a trabajar a temperaturas hasta de 400° C. Los esfuerzos a los que se someten los segmentos son de 220 bares de presión.



Fig. 3. Segmento estándar Ø 1010.

Dentro de los daños más frecuentes que se presentan en los segmentos se tiene principalmente:

- Grietas.
- Deformación del bolsillo.
- Desgaste (en la cresta, ganchos).
- Incrustaciones.
- Fluencia lenta (Creeps).

Las grietas son de diferentes formas, tamaños y en diferentes zonas de los segmentos. De todas estas la de mayor consecuencia son aquellas que producen fracturas, más aún cuando estas aparecen prematuramente.



Fig. 4. Típica Rotura de Segmentos, en la cola.

Los segmentos tienen un rango de trabajo que no debe exceder de 350 °C, y no deben ser llevados a presiones máximas (torque de briqueteado) antes de los 230 °C. Cada máquina posee un ciclo de trabajo de aproximadamente 180 horas y un periodo de mantenimiento de 16 horas. En ocasiones el arranque no sucede inmediatamente después de haber realizado el mantenimiento y se espera a que se necesite parar otra máquina para arrancar la máquina que se encuentra parada.

Parámetros de funcionamiento

Parámetros del proceso de briqueteado.

Temperatura del material: 650-700 °C.

Presión: 200-215 bar.

Torque: 3500 N.m

Velocidad de los rodillos: 6,0-7,0 rpm

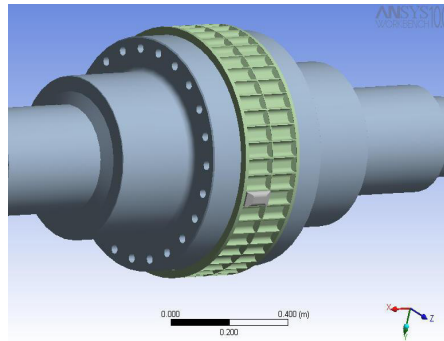


Fig. 5. Modelo representativo del segmento

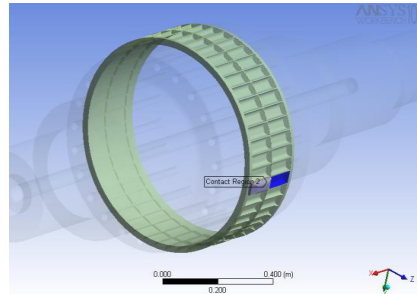


Fig. 6. Región de contacto

Simulación

Se realizó la corrida del paquete de simulación por elementos finitos con datos compilados teóricamente. Para su desarrollo se tomó de un modelo tridimensional de la configuración, con el fin de simular el mecanismo de formación de grietas en los segmentos por efecto del choque térmico [12].

Esta simulación fue realizada en base a un análisis termo-estructural de tipo transitorio, en el cual, se utilizó un mallado libre en forma tetraédrica para cubrir los ángulos y partes circulares del segmento con el menor margen de error posible.

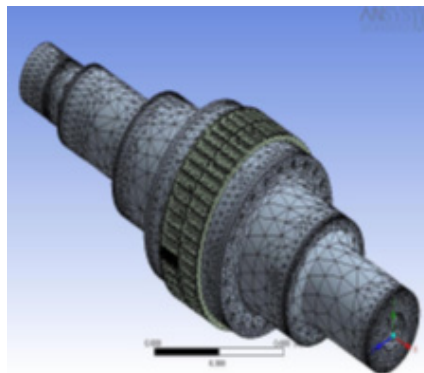


Fig. 7.- Representación del mallado de la configuración.

A continuación, se muestran algunas tablas, en la tabla I los datos de las propiedades constantes del acero herramienta (región de contacto) para la corrida del modelo y en la tabla II los datos de las propiedades de la fundición de hierro (región de contacto) utilizadas en la corrida del modelo:

Tabla I. Propiedades utilizadas para la elaboración de la simulación.

Propiedades del acero herramienta	Unidad	Valor
Densidad	(kg/m ³)	7780
Coefficiente de Poisson		0,3
Calor específico	J/kg.°C	418
Conductividad termica	W/m.°C	28
Permeabilidad relativa		0
Resistividad	Ohm.m	0

Tabla II. Propiedades utilizadas para la elaboración de la simulación

Propiedades del acero herramienta	Unidad	Valor
Densidad	(kg/m ³)	7870
Coefficiente de Poisson		0,29
Calor específico	J/kg.°C	440
Conductividad termica	W/m.°C	72,6
Permeabilidad relativa		0
Resistividad	Ohm.m	0
Modulo de Young	Pa	2x10 ¹¹

Por su parte, es necesario establecer las condiciones a las cuales está sometido el segmento en la simulación, dichas cargas son mostradas en la figura 8.

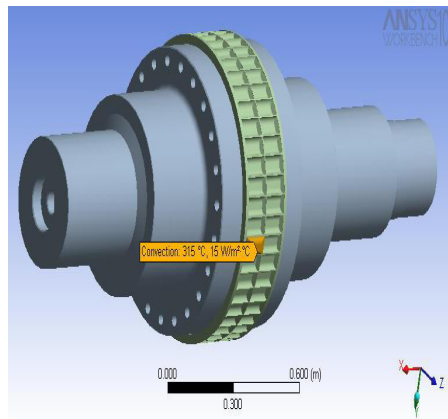


Fig. 8. Condiciones de borde a la cuales están sometidos los segmentos.

En la figura 8 se muestra la convección a la que está sometido el segmento que está a 315 °C y 15 w/m²°C, la temperatura de la briqueta a 640 °C y la presión del sistema que va en esa dirección por la tercera ley de Newton, éste realiza una fuerza de igual intensidad y dirección, pero de sentido contrario sobre el cuerpo que la produjo. Dicho de otra forma, las fuerzas siempre se presentan en pares de igual magnitud, sentido opuesto, la presión obtenida es la resultante de la presión que se aplica en toda el área de la briqueta.

III.METODOLOGÍA

Se consideró conveniente desarrollar una investigación con el propósito de conocer en qué medida los parámetros operativos (temperatura del material, presión, torque, velocidad de los rodillos) influyen en la vida útil de los segmentos de acuerdo a su material de fabricación y en función de estos se simuló el comportamiento durante el proceso de briqueteado [1].

El proceso de la planta, emplea 4 máquinas briquetadoras del tipo rodillos segmentados, cuya producción horaria está entre las 95 -100t/h de unidades. El diseño que poseen los segmentos que compactan el material prerreducido, hacen que las briquetas obtenidas adopten la forma de almohadillas. Estos segmentos están elaborados de

un acero de alta dureza para reducir el desgaste (acero de herramienta AISI M3) el cual pertenece a la categoría de aceros rápidos. Sin embargo, desde el año 1994 [2], se han presentado diversos casos de fracturas en los segmentos.

Las principales causas que generan las fracturas de los segmentos son los materiales con el cual son fabricados, el tránsito de material sobredimensionado y el elevado diferencial de temperatura (ΔT) que existe entre los segmentos y el material prerreducido [3] [4]. Como causas secundarias se tienen: el calentamiento excesivo por falla del sistema de enfriamiento de los rodillos y el mal ensamblaje. El registro de falla de los segmentos muestra la estadística de fractura de éstos, teniendo 4 segmentos fracturados en el año 2000 y 16 segmentos fracturados para el año 2009. Actualmente, alrededor de cada cuatro meses se presentan paradas no programadas, por segmentos que muestran este tipo de falla. Para solventar esta situación, la primera medida que se toma es el cese del funcionamiento de la máquina briquetadora que presenta la fractura, seguido del incremento en las velocidades de los rodillos de las máquinas que queden operativas, esto con el objeto de compensar y mantener la producción horaria.

Con miras a reducir la tendencia creciente que se percibe en los registros históricos de mantenimiento de la planta se hace necesario ahondar en las causas de las fallas que presentan en servicio. En tal sentido, se realizó un análisis mecánico que permitió simular el comportamiento al estar presente varios gradientes térmicos, con la finalidad de reducir los costos de mantenimiento y la sustitución y reparación continua de segmentos, así como las pérdidas en toneladas de producción.

Debido al elevado costo que trae para la empresa, la desincorporación de una máquina, surge la necesidad de hacer una revisión de los segmentos tomando en cuenta los parámetros de temperatura, densidad, conductividad térmica, presión, torque y velocidad de los rodillos, y de esta forma observar donde y porque se originan las fracturas de los mismos.

IV.RESULTADOS

Para el desarrollo del trabajo se consideró la realización de un modelo de la configuración del rodillo y el segmento, utilizando como herramienta un paquete de simulación a través del cálculo por elementos finitos. Las figuras mostradas a continuación, reflejan los resultados obtenidos:

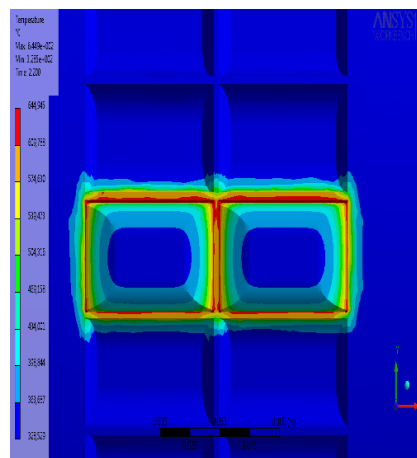


Fig. 9. Distribución de la temperatura entre el segmento y la briqueta.

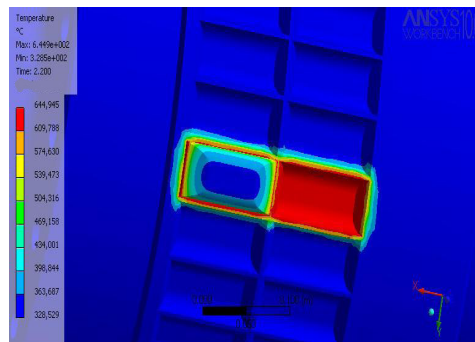


Fig. 10. Distribución de la temperatura entre el segmento y la briqueta.

La figura 9, muestra la distribución de temperatura entre el segmento y la briqueta durante el briqueteado. Esta distribución, a través de isotermas muestran las distintas temperaturas presentes en los primeros momentos donde entra en contacto el mineral pre reducido y los segmentos puestos en servicio.

Se observa que los bolsillos de los segmentos experimentan un mayor calentamiento producto del contacto directo con el mineral de hierro, identificado por la zona de color rojo de la figura, alcanzando valores aproximados de hasta 644,945 °C en un pequeño lapso de tiempo, lo cual tiene incidencia directa en la generación de una gran expansión térmica de este volumen a causa del elevado gradiente térmico.

Por su parte, la figura 10, representa la sección interna del modelo en vista isométrica y vista semi frontal respectivamente, mostrando la distribución de temperatura en la parte interna del segmento, a través, de las distintas isotermas que conforman al mismo.

En la figura es posible observar el incremento de la temperatura desde el interior del segmento hacia los bordes del mismo, producto de la expansión térmica experimentada, como una causa directa del gradiente térmico soportado por el mismo, al momento del proceso de briqueteado.

La forma como se observa la temperatura alcanzada en la parte interior del segmento, aunado con la expansión ocasionada por la gran diferencia de temperatura mineral-segmento, nos proporciona una clara idea acerca del mecanismo de formación de grietas en el segmento, ya que, es notorio que la parte interior, la cual presenta la temperatura más elevada, es la que tiene menor área y el tiempo de briqueteado es muy rápido y se concentra mayor calor en esa área del modelo.

La configuración que experimenta el segmento en la gráfica de isotermas explica que la zona de mayor calentamiento sufre una deformación en los puntos cercanos a las esquinas del segmento, motivado a que es la zona de contacto directo con el mineral. Esta configuración geométrica nos indica que la falla se inicia en las esquinas y bordes del segmento ya que los bordes actúan como concentradores de esfuerzos y la misma puede estar asociada a un debilitamiento de la estructura por los cambios volumétricos (Expansión) y la diferencia de temperatura que aumenta el nivel de energía de los átomos y esto conduce a los cambios en el material.

El comportamiento experimentado por ambos materiales de acuerdo al análisis térmico realizado, arrojaron los resultados reflejados en la figura 11 donde se observa mediante una gráfica de dicho comportamiento:

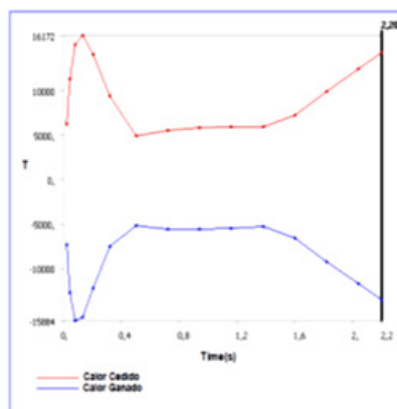


Fig. 11. Representación gráfica del comportamiento del flujo direccional de calor experimentado por las

las piezas.

Se puede observar que las piezas simuladas, manifestaron un comportamiento regular, ya que como se observa son iguales pero inversas (lo cual indica que la simulación esta correcta). La línea roja muestra que el calor está fluyendo de las briquetas a los segmentos, por esa razón se observa que mientras pasa el tiempo la briqueta pierde calor, el cual lo está ganando el segmento. Esto nos indica con más detalle que hay un elemento que está cediendo calor y otro lo está absorbiendo a igual magnitud. Se cumple la ley de conservación de la energía que constituye el primer principio de la termodinámica y afirma que la cantidad total de energía en cualquier sistema aislado permanece invariable con el tiempo, aunque dicha energía puede transformarse en otra forma de energía.

Simulación de los esfuerzos mecánicos a los cuales se someten los segmentos.

En el modelo realizado, se consideró la configuración de un rodillo, al cual, se le incluyó un segmento de briqueteado y al cual se le introdujo un modelo de la briqueta, con el fin de representar los esfuerzos mecánicos presentes en la misma

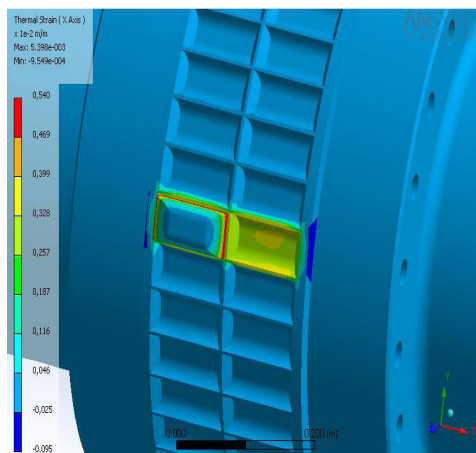


Fig. 12. Deformación térmica.

En las figuras 12 se muestra la deformación térmica, o deformación unilateral térmica, que es el resultado de cambios volumétricos producidos por cambios estructurales durante el calentamiento, así como tensiones térmicas causadas por variaciones de temperatura al interior de la pieza. El acero por la excitación interna de sus moléculas tiende a separarse, por lo que en general produce una expansión del material, algunos también le llaman dilatación térmica.

Evaluación del impacto de los esfuerzos en la estabilidad térmica de las máquinas briqueteadoras.

El indicador FS (Factor de Seguridad), representa una medida para caracterizar cuantitativamente la resistencia a los esfuerzos mediante los análisis realizados a las máquinas briqueteadoras. Es un número que se utiliza en ingeniería para los cálculos de esfuerzos de elementos o componentes de maquinaria, estructuras o dispositivos en general, proporcionando un margen extra de prestaciones por encima de las mínimas estrictamente necesarias.

El factor de seguridad se calcula por medio de los esfuerzos de deformación del acero, es decir, el esfuerzo real a que se está sometiendo el material, y se calcula tomando en cuenta también el esfuerzo admisible del acero, con estos dos valores se calcula el factor de seguridad, y lo que indica es la seguridad o confianza que el material te da para decir si éste va a trabajar con seguridad o no.

Según los comentarios anteriores, la temperatura del producto determina la fuerza requerida en los rodillos de presión, si se mantienen constantes las otras propiedades del producto y la densidad aparente requerida. Esta fuerza de presión se logra usando un sistema hidráulico de alta presión el cual emplea cuatro cilindros hidráulicos de doble acción, dos bombas de alta presión, dos bombas de baja presión, dos acumuladores y válvulas de control direccional.

Si la especificación de la densidad de las briquetas está un poco por debajo de $5,3 \text{ g/cm}^3$, se puede incrementar la presión de trabajo manteniendo constante la temperatura.

Análisis térmico del procesamiento del programa por elemento finito de las máquinas briquetadoras en función de sus parámetros.

El comportamiento experimentado por las máquinas briquetadoras de acuerdo a los análisis realizados para determinación de la falla de las mismas indican que la convección durante el proceso se consideró constante, nos indica también las temperaturas de los elementos en el proceso, en este caso la briqueta la convección no varía en el proceso ya que el tiempo del mismo es muy pequeño; pero si aumenta el volumen y, por lo tanto; se produce la expansión térmica y un cambio en la energía del sistema.

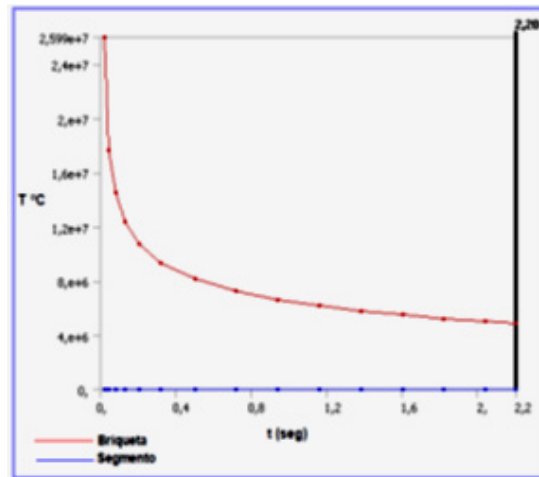


Fig. 13. Comportamiento del flujo de calor.

En la figura 13 se representa el flujo de calor total del sistema de briqueteado. La línea roja demuestra que el calor está fluyendo de las briquetas a los segmentos, por esa razón se puede observar que mientras pasa el tiempo; la briqueta pierde calor, la cual está ganando el segmento, esto cumple con la ley de conservación de la energía.

El calor que ganan los segmentos durante el proceso de briqueteado se controla mediante el sistema de enfriamiento de los rodillos, el cual, consta de un circuito en el interior de los cuerpos del rodillo. La refrigeración se realiza mediante una caña que va de extremo a extremo por el núcleo de los rodillos. En el centro de la caña se encuentra una goma de sello que distribuye el agua por todo el sistema.

El agua entra a una temperatura de 35°C y sale entre los $60\text{-}65^\circ\text{C}$ aproximadamente para así evitar el calentamiento excesivo. La entrada y salida del agua se controla mediante una unión rotatoria. Cuando falla el sistema de enfriamiento, se produce un sobrecalentamiento que funde la goma de sello y los segmentos tienden a fracturarse. Esto puede generarse por un bajo ΔT en el agua de enfriamiento o bien sea, por un alto o bajo flujo de agua de refrigeración en los rodillos.

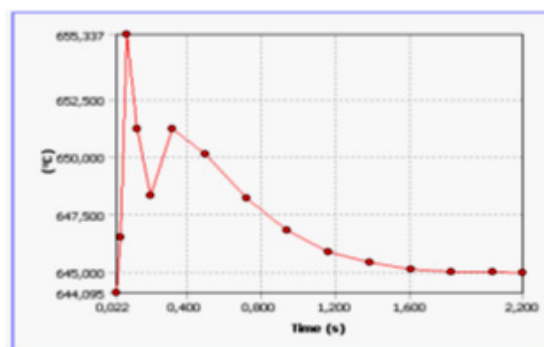


Fig. 14. Comportamiento de la temperatura de la briqueta durante el tiempo.

Por su parte; la figura 14, se representa la variación de temperatura de la briqueta durante el tiempo de briquetado, podemos observar que tiene un comportamiento irregular, éste debido a que el flujo de calor ocurre en un área donde se presentan, curvas y rectas como son los bolsillos de los segmentos, razón por la cual la temperatura de la briqueta tiene ciertos picos al ir disminuyendo su temperatura.

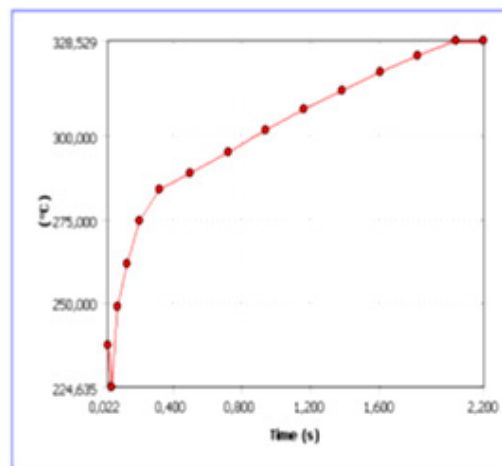


Fig. 15. Comportamiento de la temperatura del segmento.

Estos resultados de la figura 15 son la manifestación del elemento que está absorbiendo calor en este caso el segmento, mientras pasa el tiempo absorbe más calor, el que está emitiendo las briquetas; por lo tanto, el chequeo constante de esta variable de refrigeración de los segmentos es de vital importancia dado que la temperatura de los segmentos al superar los 350°C comienza a fracturarse.

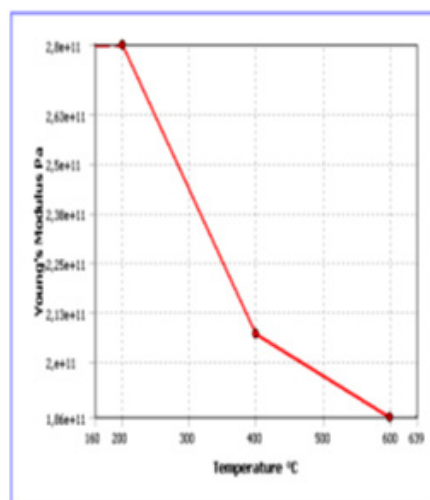


Fig. 16. Comportamiento del módulo de Young con respecto a la temperatura.

La figura 16 muestra el comportamiento del módulo de Young o modulo elástico con respecto a la temperatura, éste puede variar de forma importante con la composición química, con la temperatura y en menor medida con la deformación mecánica. Esta variación presente en la temperatura del sistema; afecta sustancialmente al proceso ya que aumenta linealmente con la temperatura para transiciones en las deformaciones.

V.CONCLUSIONES

El calentamiento brusco del segmento expuesto al contacto directo con el HRD, genera elevados gradientes térmicos ubicados en la sección del bolsillo que causan debilitamiento de su estructura debido a los cambios volumétricos que experimenta el segmento. Mayores presiones ejercidas a los segmentos, generarán una mayor expansión

en el material, ocasionando un mayor esfuerzo y conllevando a una gran probabilidad de agrietamiento.

- Los esfuerzos aplicados a las esquinas del segmento generan roturas en el mismo y fuga de calor, y ésta a su vez conlleva a una distribución térmica desigual, generando inestabilidad.

- El procesamiento del programa es preciso y representa una valiosa herramienta predictiva de los factores que afectan el sistema, ya que las variables involucradas en él, indican la influencia, que tiene cada una de éstas, en los resultados obtenidos.

- Los esfuerzos aplicados a las esquinas del segmento generan roturas en el mismo y fuga de calor, que conlleva a una distribución térmica desigual, generando inestabilidad.

REFERENCIAS

- [1] D. R. Askeland, *Ciencia e Ingeniería de Materiales*, México: Cengage Learning, 2009.
- [2] J. L. G. Velásquez, *Mecánica de Fractura*, México: Limusa, 2004.
- [3] J. E. H. G., *Introducción al análisis estructural por elemento finito*, Manizales: Centro de Publicaciones Universidad Nacional de Colombia, 2002.
- [4] S. H. Avner, *Introducción a la Metalurgia Física*, México: McGraw-Hill, 1998.
- [5] M. B. R. Al-Waked, «CFD simulation of wet cooling towers,» *Applied thermal engineering*, vol. 26, nº 4, pp. 382-395, 2006.
- [6] D. Barbi, L. Neves Filho y V. Silveira Júnior, «Convective heat transfer coefficients evaluation for a portable forced air tunnel,» *Applied Thermal Engineering*, vol. 30, nº 2-3, pp. 229-233, 2010.
- [7] C. Barreno, «Simulación fluido dinámica del túnel de enfriamiento de ánodos verdes de la planta de molienda y compactación de Venalum,» *Universidad Nacional Experimental Politécnica "Antonio José de Sucre" Vice-rectorado Puerto Ordáz, Puerto Ordáz*, 2016.
- [8] Y. Çengel, *Transferencia de Calor*, México: McGraw-Hill, 2004.
- [9] W. Fisher, M. Meir y M. Lustenberger, «Cooling of Green Anodes after forming,» *The Minerals, Metals & Materials Society*, vol. 4, nº 1, pp. 351-357, 2013.
- [10] F. Incropera y D. DeWitt, *Fundamentos de Transferencia de Calor*, México: Prentice Hall, 1999.
- [11] M. W. Meier, *Cracking behaviour of anodes*, Düsseldorf: Aluminium-Verlag, 2007.
- [12] M. J. Morán y H. N. Shapiro, *Fundamentos de Termodinámica Técnica*, México: Reverté, 2004.
- [13] S. Ramakrishnan, R. Wysk y V. V. Prabhu, «Prediction of process parameters for intelligent control of tunnel freezers using simulation,» *Journal of Food Engineering*, vol. 65, nº 1, pp. 23-31, 2004.
- [14] M. A. Reinheimer, S. Mussati y N. J. Scenna, «Optimization of operating conditions of a cooling tunnel for production of hard candies Original Research Article,» *Journal of Food Engineering*, vol. 109, nº 1, pp. 22-31, 2012.
- [15] «Progress of Inert Anodes in Aluminium Industry : Review,» *Journal of Siberian Federal University*, vol. Special, nº Special, pp. 18-30, 2018.

