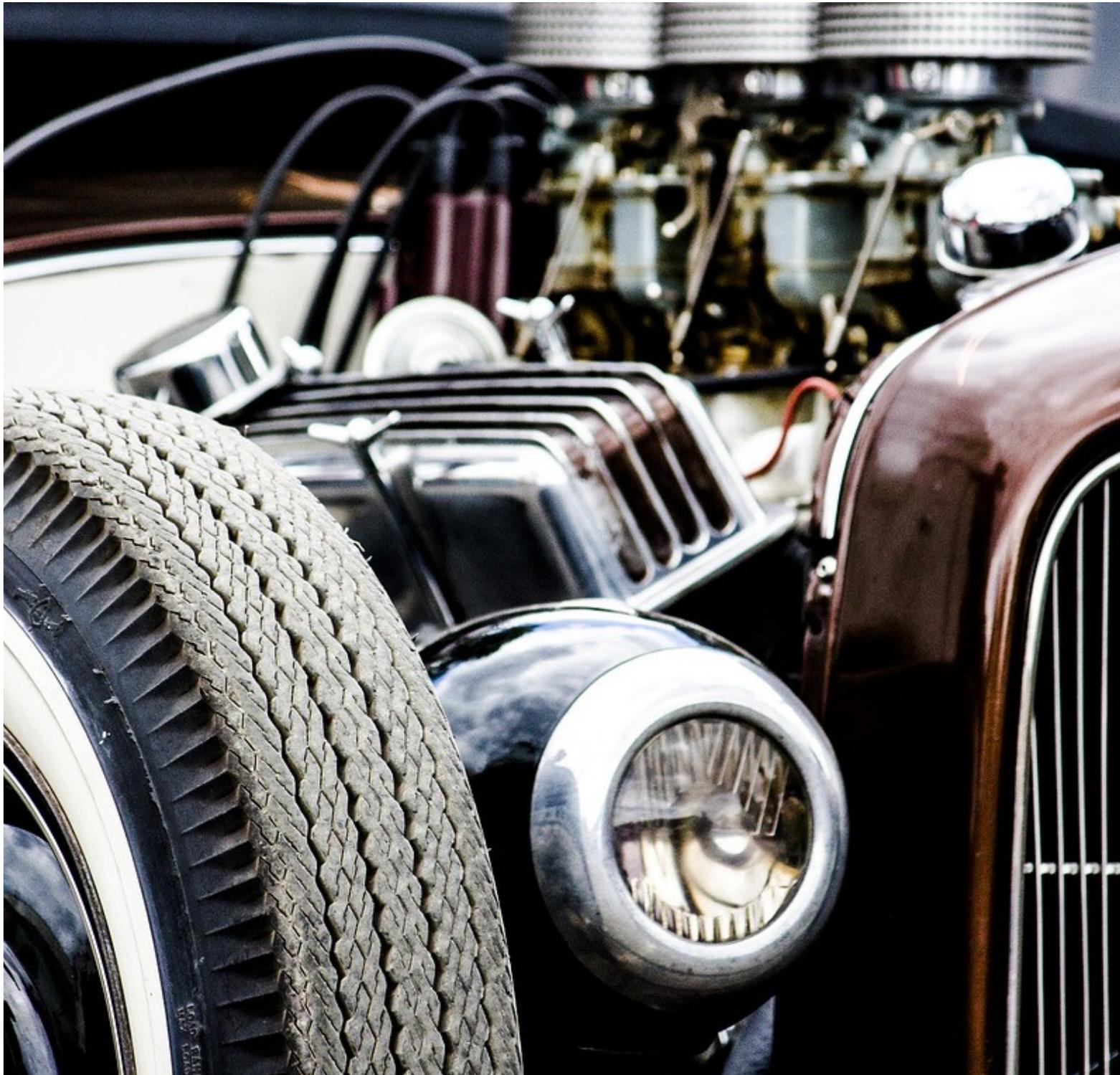


ISSN 2594-2921

Científica

Científica: Journal of Electromechanical Engineering | vol. 25, no. 1 | January-June 2021 | Instituto Politécnico Nacional | <https://cientifica.site/>



Volumen 25 Issue 1, January-June 2021

Rúbrica socioformativa para validar el constructo “gestión del conocimiento” durante el desarrollo de proyectos formativos con estudiantes de ingeniería

Socioformative Rubric to Validate the “Knowledge Management” Construct during the Development of Training Projects with Engineering Students

Paula Flora **Aniceto-Vargas**; Josemanuel **Luna-Nemecio**; María de Lourdes **Rodríguez-Peralta**.

Procedimiento para la obtención de modelos CAD de piezas prismáticas a partir de la técnica de digitalización de proyecciones ortogonales. Caso de estudio de un punzón de llaves de cerraduras

Procedure for Obtaining CAD Models of Prismatic Pieces from Orthogonal Projection Digitization Techniques. Lock Key Punch Study Case

Santiago Amaury **Santana-Reyes**; José Félix **Morales-Leslie**; René Misael **Arias-Hidalgo**; Alexis **Álvarez-Cabrales**; Yoan Manuel **Ramos-Botello**.

Estudio evaluativo de riesgo psicosocial en el desempeño de labores de seguridad privada

Evaluation Study of Psychosocial Risk in the Performance of Private Security Work

Raquel **Muñoz-Hernández**; Saúl **Rangel-Lara**.

Reintroducing Industrial Engineering Students to Manufacturing through Environmental Pertinence

El acoplamiento de la manufactura con la pertinencia ambiental como motivador de interés en estudiantes de Ingeniería Industrial

Stephanie Marie **Villanueva-Pérez**; Valerie **Odeh-Couvertier**; Viviana **Vázquez-García**; Rocío Isabel **Fernández Lafuente**; Verónica **Díaz Cruz**; Zulma **Acevedo Figueroa**; Jomar **Cintrón-Font**; Mónica **Rivera-Díaz**; Rick **Méndez**; César **Rivera-Collazo**; Neshmayda **Díaz-Llanos**; María Fernanda **Sayago Capelo**; Kelvin Gabriel **Chávez-Rojas**; Esmeralda **Niño-Pérez**; Yaileen **Méndez-Vázquez**; Mauricio **Cabrera-Ríos**.

Metodología de diseño para robots paralelos de cinco eslabones y dos grados de libertad

Design Methodology for five-bar Parallel Robots with two Degrees of Freedom

David **González-Reyes**; Heebum **Kim**; Daniela **Rubio-Martínez**; Héctor **Cervantes-Culebro**; Milton **Eliás-Espinosa**.

Design of Control Interface for a SCARA Manipulator with Subactuated Final Effector

Diseño de la interfaz de control para un manipulador SCARA con efector final subactuado

Julio Cesar **Cordero Muñoz**; Humiko Yahaira **Hernández Acosta**;
Raúl **Benítez Álvarez**; Gerardo Julián **Pérez Mendoza**.

Análisis de falla de encendido en motores de combustión utilizando señales de vibración basado en el cálculo y reducción de indicadores estadísticos

Misfire Analysis in Combustion Engines Using Vibration Signals Based on the Calculation and Reduction of Statistical Indicators

Alejandro **García-Basurto**; Juan José **Saucedo-Dorantes**; Ángel **Pérez-Cruz**; Roque Alfredo **Osornio-Ríos**.

Análisis de falla sobre roles para cuerdas metálicas

Failure Analysis on Metallic Thread Rolls

Steven Geovanny **García-Hernández**; Norberto **Mendoza-Saucedo**; Beatriz **Muñoz-González**; Marco Antonio **Doñu-Ruiz**.

Análisis comparativo de la modificación del parámetro de inercia para la mejora en el desempeño del algoritmo PSO

Comparative Analysis of the Modification of the Inertia Parameter for the Improvement of the PSO Algorithm Performance

Valeria **Álvarez-Garduño**; Natalia **Guadiana-Ramírez**; Álvaro **Anzueto-Ríos**.

Estudio mecánico de un acero cromo-molibdeno con recubrimiento duro

Mechanical Study of a Chrome-Molybdenum Steel with Hard Coating

Daniel **Sánchez-Huerta**; José Antonio **Juanico-Loran**; Víctor Jorge **Cortes-Suarez**; Noé **López-Perrusquia**.

CIENTIFICA, year 25, issue 1 January-June 2021. Biannual Journal online published by Instituto Politécnico Nacional (Mexico) at Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Zacatenco. Av. Luis Enrique Erro S/N, Unidad Profesional Adolfo López Mateos, Col. Zacatenco, Alcaldía Gustavo A. Madero, C.P. 07738, Mexico City, Tel. +52 55 57296000 ext. 54518, <https://www.cientifica.site>, email: cientifica@ipn.mx, Editor: PhD Christopher René Torres San Miguel. INDAUTOR Certificate of Reserve 04-2018-021313432600-203, ISSN 2594-2921, granted by Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsible for the last update: Cuauhtémoc Jiménez Pérez, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Av. Luis Enrique Erro S/N, Edificio 5, Unidad Profesional Adolfo López Mateos, Col. Zacatenco, Alcaldía Gustavo A. Madero, C.P. 07738, Mexico City.

The responsibility of the materials published in Cientifica rests solely with their authors and their content does not necessarily reflect the criteria of the Editorial Board or the Instituto Politécnico Nacional. The total or partial reproduction of the texts hereby published is authorized as long as the complete source and the electronic address of the publications are cited, they are distributed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License, there is no fee for article processing, submission or publication.

Rúbrica socioformativa para validar el constructo “gestión del conocimiento” durante el desarrollo de proyectos formativos con estudiantes de ingeniería

Socioformative Rubric to Validate the “Knowledge Management” Construct during the Development of Training Projects with Engineering Students

Paula Flora **Aniceto-Vargas**¹, Josemanuel **Luna-Nemecio**², María de Lourdes **Rodríguez-Peralta**³

¹Instituto Politécnico Nacional, MÉXICO

<https://orcid.org/0000-0002-6634-6210> | paniceto@ipn.mx

²Centro Universitario CIFE, MÉXICO

<https://orcid.org/0000-0002-6850-3443> | josemanueluna@cife.edu.mx

³Instituto Politécnico Nacional, MÉXICO

<https://orcid.org/0000-0002-6634-6210> | mlrodriguezp@ipn.mx

Recibido 25-03-2020, aceptado 22-06-2020.

Resumen

Una de las necesidades que se tiene en escuelas de nivel superior, es la falta de instrumentos confiables para realizar evaluaciones objetivas de los desempeños que los estudiantes desarrollan. En ese contexto, en este artículo, se reportó el proceso que se llevó a cabo para validar el constructo “gestión del conocimiento” (GC), en una rúbrica socioformativa, diseñada para evaluar la “GC” en estudiantes de nivel superior en el área de Ingeniería, durante el desarrollo de proyectos formativos y se determinó su confiabilidad. Se aplicó un estudio metodológico descriptivo de validez y confiabilidad de constructo “GC” a través del análisis factorial exploratorio, se usó el software estadístico SPSS. Este estudio, se llevó a cabo con una muestra población objetivo de 152 estudiantes de la Carrera de Ingeniería en Comunicaciones y Electrónica (ICE), de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME), Unidad Culhuacán (UC), del Instituto Politécnico Nacional (IPN). La rúbrica Socioformativa resultó con validez de contenido, determinada a través del cálculo de la V de Aiken, con valores superiores a 0.8, en la mayoría de las variables, con aportaciones de juicio de expertos. La fiabilidad del instrumento se determinó a través de dos métodos: el alfa de Cronbach (grupo piloto) y a través del análisis factorial exploratorio (muestra población objetivo), resultando en ambos métodos, valores mayores de 0.8. Se concluye: la rúbrica socioformativa, con la que se pretende evaluar el constructo “gestión del conocimiento”, muestra validez de constructo aceptable y alta confiabilidad para ser aplicado en el contexto descrito.

Palabras clave: Constructo, evaluación, gestión del conocimiento, proyectos formativos, rúbrica socioformativa, validez.

Abstract

One of the needs of higher-level schools is the lack of reliable instruments to carry out objective evaluations of the performance that students develop. In that context, this paper reported the process implemented to validate the construct “Knowledge Management” (GC - For its acronym in Spanish) in a socio-formative rubric designed to evaluate the “GC” on University Engineering students during the development of formative projects and its reliability was determined. A descriptive methodological study of “GC” construct validity and reliability through the exploratory factor analysis, using the SPSS statistical software. This study was applied to a sample target population of 152 students of Electronics and Communications Engineering (ICE), of the Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME), Culhuacán Campus (UC), at Instituto Politécnico Nacional (IPN). The socio-formative rubric resulted in content validity, determined through the calculation of the Aiken’s V with values over 0.8 in most of the variables, with judgment contributions of experts. The instruments’ reliability was determined through two methods: Cronbach’s alpha (Pilot group) and the Exploratory Factor Analysis (sample target population), resulting in both methods values over 0.8. it is concluded: The socioformative rubric, with which it is intended to evaluate the construct “knowledge management”, shows acceptable construct validity and high reliability to be applied in the described context.

Index terms: Construct, evaluation, knowledge management, training projects, socioformative rubric, validity.

I. INTRODUCCIÓN

En escuelas de nivel superior, en el área de ingeniería; existe la necesidad de implementar instrumentos diseñados, validados y confiables, para evaluar objetivamente el proceso de gestión del conocimiento "GC" durante el desarrollo de proyectos formativos, como fuente de construcción de los aprendizajes y desempeños que los estudiantes desarrollan durante su formación académica. En ese sentido, [1] considera que la evaluación es un proceso que no se puede aislar de las personas que continuamente están buscando mejorar, tanto su entorno, como de sí mismas, es por ello, que se considera un tema relevante que debe ser atendido desde la experiencia del docente, de los funcionarios de una Institución educativa, por los mismos estudiantes, los empresarios, desde la familia, o cualquier otro rol que se desempeñe como miembro de una sociedad.

Desde la socioformación se propone la evaluación socioformativa, ésta ha ido incrementando su importancia por considerar en sus procesos los aspectos metodológicos con enfoque en la formación integral en donde se ha iniciado con la sistematización y aplicación de instrumentos de evaluación, como son las rúbricas socioformativas, éstas se han llevado a las aulas a través de la evaluación diagnóstica, continua y sumativa articulando la autoevaluación, coevaluación y la heteroevaluación con enfoque colaborativo [2]. Posibilitando el mejoramiento continuo, tomando como base a la taxonomía socioformativa que considera los 5 niveles de desempeño: preformal, receptivo, resolutivo, autónomo y estratégico [3]. Desarrollando el talento en los estudiantes a través de la retroalimentación en la evaluación, co y heteroevaluación en la resolución de problemas de contexto y análisis de evidencia [4]. [2] Dar la oportunidad de visualizar y mejorar el nivel de dominio y desempeño en los estudiantes en una gama de indicadores y descriptores con niveles de dominio. Contribuir en la mejora de los desempeños a través de una evaluación metacognitiva, que los estudiantes se preparen para la vida, con ética, valores, para la contribución en la mejora del planeta en todos los ámbitos: educativo, social, político, económico y sostenibilidad [5].

Haciendo referencia al constructo "gestión del conocimiento" (GC), [6] [7] lo describen como una capacidad para organizar e innovar en otros conocimientos. [8] lo considera como una función que proyecta, dispone e interviene en el movimiento del conocimiento que se genera en una empresa en función con las actividades y con el entorno para crear nuevos conocimientos. [9] la concibe, como capacidad colaborativa para adquirir y generar conocimiento para ser aplicado para un bien común ante la sociedad. [6] resume diciendo que la GC, es integralmente organizar la información y el conocimiento de una empresa o en una persona.

Etimológicamente, [4] comparten la definición de gestión del conocimiento, quienes consideran, que está compuesta de los términos gestión y conocimiento; en donde, gestión, hace referencia a las acciones o trámites que se realizan para conseguir o resolver algo. Del latín *gestio*, acción y consecuencia de administrar o gestionar algo [10], ahí mismo se define conocimiento, como acción o efecto de conocer, relacionado con el entendimiento, inteligencia, razón natural y a las facultades sensoriales del hombre, su noción y concepto se encuentra principalmente inscrito con la ciencia y/o sabiduría.

Desde el enfoque socioformativo, se considera que, a partir de la GC, las personas busquen, seleccionen, organicen, analicen, apliquen idóneamente, adopten y desarrollen conocimiento, para que identifiquen, interpreten, argumenten y solucionen problemas del contexto, aplicando diferentes saberes, actuando con ética y trabajando colaborativamente [2], en el desarrollo de proyectos formativos. La evaluación del constructo (GC), se hace a través de un instrumento confiable y validado en su contenido a través de juicio de expertos. En la actualidad el juicio de expertos es considerado un proceso en donde el investigador comparte el instrumento con personas especialistas en el tema y que son reconocidos por otros como expertos calificados en él. La finalidad es recibir información certera, reflexiones y valoraciones del instrumento [11], [12].

Con respecto a los proyectos formativo, [3] los describen, como una metodología que se aplica para desarrollar y evaluar competencias; para su implementación es necesario articular acciones para resolver problemas de contexto, bajo la colaboración, ética, valores y la cocreación del conocimiento, buscando que los estudiantes adquieran aprendizajes útiles en la sociedad del conocimiento, para su evaluación es necesario involucrar tres etapas: al inicio del proceso, (evaluación diagnóstica), durante el proceso (evaluación formativa) y al final del proceso (evaluación para acreditar). Para evitar que haya subjetividad en la evaluación al incorporar en el proceso estos tipos de evaluación, se recomienda la implementación de rúbricas socioformativas como instrumentos que evalúen la GC, durante el desarrollo de proyectos formativos. Para ello, se cuenta con una rúbrica socioformativa, con validez

3

de contenido, realizada en otra investigación por los mismos autores, su diseño se hizo bajo el principio de una escala tipo Likert, considerando la taxonomía socioformativa para la redacción de los niveles de desempeño.

Con respecto a la validez del constructo "GC" en la rúbrica Socioformativa, se aborda el proceso descriptivo del análisis factorial exploratorio, con la finalidad de dar cuenta sobre que variables cargan en mayor proporción para cada factor de los considerados en el diseño de la rúbrica socioformativa, con la finalidad de evaluar objetivamente la gestión del conocimiento en estudiantes del área de ingeniería, durante el desarrollo de proyectos formativos. Este análisis abona al investigador, información sobre las variables que son relevantes a considerar por cada dimensión o factor, para validar el constructo "GC" en la rúbrica socioformativa en cuestión. En función del análisis factorial confirmatorio, en este estudio no se trastocó información al respecto, con la finalidad de dejar huecos en la investigación y dar la oportunidad de realizar o continuar con este estudio en otro momento o por otros investigadores.

El software estadístico SPSS, es una herramienta que aporta elementos para realizar análisis estadístico de muestras significativas de una población a la que está dirigida la investigación. Entre los análisis, que se encuentran en su repertorio están, el análisis factoria exploratorio. [13] lo consideran como uno de los análisis estadísticos más usados en la investigación en ciencias sociales, para determinar el número apropiado de factores o componentes y descubrir cuales variables son indicadores razonables de dichos factores, no se especifica de antemano entre las variables y número de factores o componentes. Así también el análisis de factor confirmatorio, se aplica con la finalidad de evaluar discrepancias metodológicas y de medición psicométricas que pudiera tener el instrumento, además es el método relevantemente aplicado para evidenciar validez de constructo, puesto que informa sobre la estructura interna del instrumento de medida [14].

A partir del software estadístico SPSS, se confirma la fiabilidad del instrumento [15]. Se determinó mediante la aplicación de la rúbrica socioformativa a un grupo piloto de 54 estudiantes de diferentes semestres de la carrera de Ingeniería en Comunicaciones y Electrónica (ICE), de acuerdo con el mapa curricular vigente. La aplicación de la rúbrica socioformativa la hicieron 9 docentes de los mismos semestres y de la misma carrera a la que pertenecen los estudiantes considerados en el proceso, previo a la aplicación de la rúbrica, los estudiantes desarrollaron colaborativamente un proyecto formativo, asesorado y evaluado por los mismos docentes, quienes llevaron el proceso de aplicación. Cabe mencionar que la aplicación del instrumento se hizo a través de un formulario diseñado con Google, se puede observar para más detalle en el enlace siguiente https://docs.google.com/forms/d/1mEg01_djKFBb86gN0n8y1EHRYZJTufZzMRyGhLhDC1Xw/edit.

Con los resultados de la aplicación, se generó una matriz con los valores de las variables involucradas, asignadas de acuerdo con los niveles de desempeño, estos dan la oportunidad al docente de medir el progreso de los estudiantes, durante el proceso de aprendizaje. Se muestra una semblanza de las características observables para cada nivel de desempeño desde la socioformación [3] (véase Tabla 1).

Como resultado de la aplicación del software estadístico SPSS, en el cálculo del alfa de Cronbach (un índice de confiabilidad), se tienen valores superiores a 0.8. [16]; [17] La evaluación de los aprendizajes en escuelas de ingeniería, que se realice aplicando rubricas socioformativas, es un tema relevante puesto en discusión por los autores de este artículo, mismo que se ha tratado por varios autores, debido a la importancia que enmarca en el proceso de aprendizaje y mejora continua de los estudiantes. [3] hacen referencia que, en el modelo educativo basado en competencias, la evaluación es el eje central de la formación académica por la importancia que tiene en el proceso de aprendizaje de los estudiantes.

TABLA 1
NIVELES DE DESEMPEÑO DESDE LA SOCIOFORMACIÓN

Preformal	Receptivo	Resolutivo	Autónomo	Estratégico
Desempeño tiene ideas o acercamiento al tema o problema, sin claridad conceptual ni metodológica.	Desempeño con nociones de las cosas y reproducción de herramientas sin comprensión.	Desempeño con conceptos y herramientas con comprensión y problemas sencillos.	Desempeño con autonomía cognitiva y abordaje de problemas con análisis y argumentación.	Desempeño con base en estrategias, la creatividad, el antro poético y el abordaje de problemas inter y transdisciplinarios.

4

El problema que se enmarca en el contexto descrito, es la falta de instrumentos de evaluación, validados en su contenido, confiables y que el constructo GC sea viable para ser aplicado en la población objetivo, para este caso específico, estudiantes de la Carrera de ICE, del Instituto Politécnico Nacional, Se observa que los docentes, al menos los invitados a participar y que no se involucraron, se muestran ajenos y con falta de conocimientos previos sobre las metodologías de aplicación de la estrategia de proyectos formativos, el constructo GC y la aplicación de instrumentos durante la evaluación de los aprendizajes. Se visualiza la necesidad de lograr que los estudiantes se apropien del conocimiento de manera colaborativa, resuelvan problemas de su contexto, que contribuyan en la economía del país, en la sostenibilidad del ambiente en todo el planeta, se formen para la vida a través de acciones éticas, responsables e idóneas [5].

En este trabajo se presenta las características propias de la rúbrica socioformativa que se diseñó para evaluar la gestión del conocimiento durante el desarrollo de proyectos formativos, el conocimiento que tanto los estudiantes como los docentes deben tener de ella y su aplicación como instrumento de evaluación en el contexto descrito, así también se comparten los procesos previos a la validación del constructo, estos son la validación de contenido y confiabilidad.

Con base en lo descrito, se consideran las siguientes metas que se tienen previstas en este documento:

1. Realizar una investigación en la literatura correspondiente y en función de ella crear preguntas o variables integradas en dimensiones (Diseño de la rúbrica socioformativa) que correspondan a la evaluación de la gestión del conocimiento que se lleva a cabo durante el desarrollo de proyectos formativos, por estudiantes de la carrera de ICE.
2. Aplicar la rúbrica socioformativa a una población objetivo de la carrera de ICE y tener resultados sobre la interpretación de las variables por cada dimensión.
3. Usar los resultados de la aplicación de la rúbrica socioformativa, para realizar el análisis factorial exploratorio con el programa estadísticos SPSS y conocer si el modelo propuesto corresponde con el resultado del análisis.
4. Analizar los resultados del factor exploratorio, para saber cómo la población objetivo, está interpretando las variables, cuales se relacionan con cuales y determinar la fiabilidad del instrumento y la validación de constructo GC durante el desarrollo de proyectos formativos.

II. DESARROLLO

A. Tipo de estudio

Se aplicó un estudio metodológico descriptivo de validez y fiabilidad de constructo "gestión del conocimiento" a través del análisis factorial exploratorio, en donde se aplicó el programa estadístico SPSS (AFE). [13] ellos lo considera un método estadístico que es usado con frecuencia en la investigación en ciencias sociales y una técnica en la que los investigadores deben aplicar criterios al momento de la ejecución de dicho análisis, por su parte [18] define el análisis factorial exploratorio (AFE) [*Exploratory Factory Analysis*; EFA] "como una técnica estadística que permite explorar con mayor precisión las dimensiones subyacentes, constructos o variables latentes de las variables observadas, es decir, las que observa y mide el investigador" [18, p. 1] para la aplicación del AFE, es necesario considerar un tamaño de muestra no menor de 50 participantes, la sugerencia es que el tamaño de la muestra sea mayor de 100, lo más recomendado, es considerar el rango que está entre 300 y 400, Ahí mismo se hace referencia a los casos por variables (Ratio de observaciones), considerando que no hay un consenso unificado, se puede discurrir que haya por lo menos 10 a 15 casos por variable. Este estudio, se aplicó en el semestre agosto-diciembre de 2019, participaron en el proceso 172 estudiantes del área de ingeniería a la cual se le llamó población objetivo, que se integró en 41 proyectos formativos, mismos que fueron evaluados por 11 docentes de las asignaturas de Calculo integral y diferencial de 1° semestre, Química Aplicada de 2° semestre, Humanidades V de 5° semestre, Electrónica digital de 6° semestre y diseño y administración de redes de 9° semestre.

B. Participantes

En la Tabla 2 y Tabla 3 se observan las características de los participantes.

TABLA 2
DATOS SOCIODEMOGRÁFICOS DE LA POBLACIÓN OBJETIVO, TOMADOS DE LA ENCUESTA SOCIODEMOGRÁFICA.

Sexo	hombres 73% mujeres 27%
Promedio de edad	24 años
Estado civil	solteros
Promedio de años de estudio entre	Entre 12 y 18
Condiciones económicas	Media - Alta
Zona de residencia	Ciudad de México y Estado de México
Situación laboral	No trabajan

TABLA 3
DATOS SOCIODEMOGRÁFICOS DE DOCENTES PARTICIPANTES EN LA APLICACIÓN DE LA RÚBRICA SOCIOFORMATIVA, TOMADOS DE ENCUESTA.

Sexo	hombres 45% mujeres 55%
Promedio de edad	48 años
Estado civil	Casados
Promedio de años de estudio	25
Condiciones económicas	Media - Alta
Zona de residencia	Ciudad de México y Estado de México
Situación laboral	Buena

C. Instrumentos

Se tiene la rúbrica socioformativa que fue diseñada con formato de escala tipo Likert, contiene 8 ítems (variables), con sus niveles de desempeño, redactados bajo las características de la taxonomía socioformativa, distribuidos en tres dimensiones, misma que evalúan el constructo "gestión del conocimiento", fue validada en contenido y fiabilidad [19] Fue diseñada para ocuparla en la evaluación del constructo "gestión del conocimiento" en estudiantes de ingeniería (entre 18-25 años aproximadamente), durante el desarrollo de proyectos formativos. La rúbrica socioformativa se diseñó con formato de cuestionario de Google, así se trabajó para todos los procesos de evaluación. Se comparte el enlace para su consulta:

<https://docs.google.com/forms/d/1OG94EJFcB6vd0LNo9QqVRJvCVcNX3pnstlJ9Jyv-ie0/edit>

D. Método

1) Diseño del instrumento

Se hace una semblanza del proceso que se siguió previamente para llegar a la Rubrica socioformativa del constructo "gestión del conocimiento". Después de haber hecho revisión de la literatura en bases de datos indexadas: Redalyc, Scielo, Conricyt y Google Académico, para tener artículos relacionados con el tema y siguiendo los procedimientos de construcción y evaluación de instrumentos cuantitativos y su forma de aplicación [11], [15], [20].

Se redactaron 8 ítems (variables), que se agruparon en tres dimensiones (factores), con escala tipo Likert, en base a la taxonomía socioformativa: 1. Identificación de los requerimientos de información, 2. Estrategias para el procesamiento de la información, 3. Aplicación de conocimiento con calidad y pertinencia para resolver el problema.

a) *Mejoramiento del instrumento*

Los ítems y dimensiones se sometieron a una revisión por un grupo de 4 expertos en diseño y redacción de instrumentos, con sus observaciones y sugerencias se mejoró de manera general, tanto el orden como la ubicación de los ítems en las diferentes dimensiones que tiene el instrumento.

b) *Validez de contenido*

Se hizo a través de juicio de expertos, para ello participaron 12 docentes de diferentes escuelas del Instituto Politécnico Nacional, de las áreas de Ingeniería, Sociales y Administración, con experiencia en diseño y evaluación de instrumentos. Sus recomendaciones sirvieron para tener un instrumento pertinente y con buena redacción, se hizo el análisis del cálculo de la V de Aiken teniendo buenos resultados, en donde un valor aproximado a 1, que significa buena concordancia entre las respuestas de los jueces [12].

c) *Confiabilidad del instrumento*

Está referida a la consistencia interna entre los ítems, [21] hacen referencia en su investigación que un valor total del alfa de Cronbach de 0.97 es un buen resultado del coeficiente de confiabilidad. En la investigación previa, [22] para la determinación del alfa de Cronbach, la rúbrica Socioformativa se aplicó a un grupo piloto integrado por 54 estudiantes de la Carrera de Ingeniería en Comunicaciones y Electrónica (ICE), del Instituto Politécnico Nacional (IPN) de la Ciudad de México de los semestres 2°, 5°, 6°, 8° y 9° respectivamente (grupo piloto). Estos estudiantes durante el tiempo de la intervención en la asignatura correspondiente trabajaron colaborativamente la gestión del conocimiento en el desarrollo de un proyecto formativo.

d) *Validez de constructo*

Finalmente, la validez de constructo "gestión del conocimiento", se hizo a través de la aplicación de la rúbrica Socioformativa a la población objetivo, los resultados se evaluaron a través de la técnica de análisis factorial exploratorio (AFE), aplicando el método de componentes principales y rotación Varimax [23], [13], se comprobó la fiabilidad del instrumento con la determinación del alfa de Cronbach entre todos los ítems del instrumento y de manera específica para cada dimensión, debe tener valores aproximados a 1.0.

Antes de realizar el análisis factorial, se necesita calcular y analizar la matriz de correlaciones o covarianzas de las variables para comprobar si los datos tienen las características apropiadas para llevar a cabo el análisis, con esa mira, se determina el test de esfericidad de Bartlett y el índice de medida de adecuación de la muestra KMO [24] para estos casos, los rangos de valores para estas características son 0.000 y valores que pueden ir desde 0.7 y hasta 1.0 respectivamente. De la misma manera se debe considerar el tamaño de muestra, en ese sentido, la rúbrica socioformativa se aplicó a una muestra de población objetivo de 172 estudiantes, se refiere a [25] quienes consideran que nunca se debe hacer un AFE con una muestra menor de 50 observaciones, de preferencia trabajar con 100 o más unidades o considerar un rango de entre 300 y 400 casos, cabe mencionar que la muestra de la población objetivo fue de 172; sin embargo, en el análisis de eliminación de blancos, la muestra total, bajo la cual se realizó todo el proceso de análisis quedó en 152 casos, no necesariamente se requiere la palabra desarrollo, se pueden denominar las secciones según se requiera y numerar las subsecciones con esta nomenclatura. En la Tabla 4: para el procesamiento de la información y su análisis, se aplicó el software estadístico SPSS versión 24.

TABLA 4
DISTRIBUCIÓN DE LA MUESTRA POR APLICACIÓN DE LA RÚBRICA SOCIOFORMATIVA.

Área de formación	Asignatura	Semestre	%
INGENIERÍA	Calculo diferencial e integral	Primero	27.61
	Química aplicada	Segundo	54.60
	Humanidades V	Quinto	4.90
	Electrónica digital	Sexto	11.66
	Diseño y administración de redes	Noveno	1.23

Nota relevante: Los datos para hacer el análisis estadístico correspondiente fueron recogidos al final de la tercera evaluación ordinaria: diciembre de 2019, del semestre agosto – diciembre de 2019 (periodo escolar 1° del 2020).

e) *Consideraciones éticas*

En todo momento, la participación tanto de docentes como de estudiantes fue consensada y de manera voluntaria, quedando claro que los datos personales serían confidenciales y se les explicó el uso que se le daría.

2) *Resultados*

a) *Revisión del instrumento*

Las recomendaciones sugeridas por los 4 expertos en diseño y evaluación de instrumentos, después de haber hecho la revisión de manera general sobre ubicación y distribución de los ítems en las diferentes dimensiones, brindó la oportunidad de mejorar la Rúbrica socioformativa en esos aspectos.

b) *Validez de contenido*

En la etapa de validación de contenido, realizada por juicio de expertos, con las aportaciones se realizó un análisis de los datos descriptivos de acuerdo con el coeficiente de la *V* de Aiken en función de la redacción y pertinencia. Los resultados del cálculo del coeficiente de la *V* de Aiken brindaron la oportunidad de mejorar las variables en los aspectos recomendados, estos se describen en la Tabla 5.

TABLA 5
RESULTADOS DE VALIDEZ DE CONTENIDO MEDIANTE LA *V* DE AIKEN.

Dimensión	Ítem	Redacción <i>V</i> de Aiken	Pertinencia
Dimensión 1: Identificación de los requerimientos de información.	1. ¿En qué nivel los estudiantes identificaron las necesidades de la información para resolver el problema de contexto?	0.83	0.70
	2. ¿En qué nivel el informe escrito contiene citas y referencias actuales de la información propuesta para resolver el problema de contexto?	0.50	0.50
	3. ¿En qué nivel en el informe escrito se integra la lista de referencias bibliográficas de fuentes de información confiable y especializada para resolver el problema de contexto?	0.70	0.83
Dimensión 2: Estrategias para el Procesamiento de la información.	4. ¿En qué nivel los estudiantes aplicaron estrategias de selección y sistematización de la información?	0.83	0.83
	5. ¿En qué nivel los estudiantes emplean estrategias para el trabajo colaborativo?	0.83	0.83
	6. ¿En qué nivel los estudiantes presentan evidencias de trabajo colaborativo, realizado de manera presencial y a distancia para resolver el problema de contexto?	0.70	0.83
Dimensión 3: Aplicación de conocimiento con calidad y pertinencia para resolver el problema.	7. ¿En qué nivel el conocimiento se aplicó con objetividad y pertinencia en la resolución del problema?	0.83	0.83
	8. ¿En qué nivel los estudiantes gestionan conocimiento pertinente para resolver el problema de contexto?	0.5	1.00

Nota: Los ítems en donde resultó el cálculo de la *V* de Aiken menor de 7, se mejoraron en función de las recomendaciones de los jueces expertos.

c) *Fiabilidad del instrumento*

Con respecto a la confiabilidad, el análisis estadístico realizado con el programa SPSS, resultó un valor del alfa de Cronbach de 0.85, lo que significa que el instrumento es confiable, los ítems están altamente correlacionados entre sí (véase Tabla 6).

TABLA 6
CÁLCULO DEL ALFA DE CRONBACH DE LA APLICACIÓN AL GRUPO PILOTO CON DATOS DE ANÁLISIS FACTORIAL EXPLORATORIO (SPSS VERSIÓN 24).

Estadísticas de fiabilidad			
Alfa de Cronbach	Alfa de Cronbach basada en elementos estandarizados	N de elementos	
.851	.857	8	
Estadísticas de elemento			
	Media	Desviación estándar	N
VAR00001	4.1818	.95799	22
VAR00002	3.5455	1.22386	22
VAR00003	3.4091	.95912	22
VAR00004	3.3636	1.25529	22
VAR00005	3.6364	1.25529	22
VAR00006	3.7273	.76730	22
VAR00007	4.2727	.98473	22
VAR00008	3.9091	.75018	22

Se aplicó la encuesta de satisfacción del instrumento a los participantes, de donde resultó que el grado de comprensión de las instrucciones del instrumento, el grado de comprensión de las preguntas o ítems, el grado de satisfacción con el instrumento y el grado de relevancia de las preguntas, de manera general, está entre bueno y excelente, los valores sombreados en la Tabla 7 dan indicadores sobre la buena calidad del instrumento en función de la comprensión de las instrucciones, las preguntas, satisfacción y relevancia.

TABLA 7
GRADO DE COMPRENSIÓN Y DE ACEPTACIÓN DE LA RÚBRICA SOCIOFORMATIVA PARA EVALUAR LA GESTIÓN DEL CONOCIMIENTO DURANTE EL DESARROLLO DE PROYECTOS FORMATIVOS, APLICADO A UN GRUPO PILOTO DE ESTUDIANTES DE LA ESIME UC DEL IPN.

Encuesta de satisfacción	Bajo	Aceptable	Bueno	Excelente
¿Cuál fue el grado de comprensión de las instrucciones del instrumento?		4.5	68.2	27.3
¿Cuál fue el grado de comprensión de las preguntas o ítems?		13.6	59.1	27.2
¿Cuál fue el grado de satisfacción con el instrumento?			68.2	31.8
¿Cuál es el grado de relevancia de las preguntas?	4.5	4.5	54.5	36.4

3) Validez de constructo: gestión del conocimiento con Análisis factorial exploratorio (AFE)

Antes de iniciar el proceso del AFE, se hizo una revisión a la base de datos en Excel para eliminar todos aquellos casos en los que no hubo variabilidad en los resultados, para ello se calculó la varianza total y todos aquellos datos que resultaron valores de cero, se eliminaron, después de este proceso, de un total de 172, quedaron 152 casos. Con el SPSS se calculó y analizó la matriz de correlaciones o covarianzas de las variables para comprobar si los datos tienen las características apropiadas para llevar a cabo el análisis. Obsérvese los resultados en la Tabla 8.

9

9 TABLA 8
ANÁLISIS DE VARIABILIDAD DE DATOS Y DATOS PERDIDOS CON DATOS DE ANÁLISIS FACTORIAL EXPLORATORIO (SPSS VERSIÓN 24).

Notas		
Salida creada		05-MAR-2020 00:25:23
Comentarios		
Entrada	Conjunto de datos activo	ConjuntoDatos1
	Filtro	<ninguno>
	Ponderación	<ninguno>
	Segmentar archivo	<ninguno>
	N de filas en el archivo de datos de trabajo	152
Manejo de valor perdido	Definición de ausencia	MISSING=EXCLUDE: Los valores perdidos definidos por el usuario se tratan como perdidos.
	Casos utilizados	LISTWISE: Los estadísticos se basan en casos sin valores perdidos para cualquier variable utilizada.
Sintaxis		FACTOR /VARIABLES VAR00001 VAR00002 VAR00003 VAR00004 VAR00005 VAR00006 VAR00007 VAR00008 /MISSING LISTWISE /ANALYSIS VAR00001 VAR00002 VAR00003 VAR00004 VAR00005 VAR00006 VAR00007 VAR00008 /PRINT INITIAL KMO AIC EXTRACTION ROTATION /FORMAT SORT BLANK (.10) /PLOT EIGEN /CRITERIA MINEIGEN (1) ITERATE (25) /EXTRACTION ML /CRITERIA ITERATE (25) /ROTATION VARIMAX.
Recursos	Tiempo de procesador	00:00:07.36
	Tiempo transcurrido	00:00:27.86
	Memoria máxima necesaria	9264 (9.047K) bytes

Así también, para comprobar si los datos tienen las características apropiadas para llevar a cabo el análisis factorial exploratorio, se determinó la prueba de esfericidad de Bartlett y el índice de medida de adecuación de la muestra KMO, teniendo los resultados que se muestran en la Tabla 9. Mismos que indican, que los datos son apropiados.

TABLA 9
PRUEBA DE KMO Y DE BARTLETT, CON DATOS DE ANÁLISIS FACTORIAL EXPLORATORIO (SPSS VERSIÓN 24).

Prueba de KMO y Bartlett		
Medida Kaiser-Meyer-Olkin de adecuación de muestreo		.803
Prueba de esfericidad de Bartlett	Aprox. Chi-cuadrado	781.948
	gl	28
	Sig.	.000

10

Continuando con los resultados del análisis factorial exploratorio, se tiene la matriz factorial y matriz factorial rotado, en donde se observa el número de factores y la contribución de cada variable en los factores o componentes (véase Tabla 10).

TABLA 10
MATRIZ FACTORIAL Y FACTOR DE MATRIZ ROTADO, CON DATOS DE ANÁLISIS FACTORIAL EXPLORATORIO (SPSS VERSIÓN 24).

Matriz factorial		
	Factor	
	1	2
VAR00008	.848	-.435
VAR00001	.807	
VAR00002	.786	
VAR00003	.721	
VAR00005	.693	
VAR00004	.608	.416
VAR00006	.599	
VAR00007	.609	.723
Prueba de bondad de ajuste		
Chi-cuadrado	gl	Sig.
73.555	13	.000
Matriz de factor rotado		
	Factor	
	1	2
VAR00008	.937	
VAR00002	.860	
VAR00006	.612	
VAR00005	.551	.421
VAR00007		.944
VAR00004		.700
VAR00001	.490	.687
VAR00003	.499	.534

En un cuarto resultado se tiene la varianza total explicada, en donde se observa un porcentaje acumulado de 72.909, lo que indica que se tienen las condiciones de realizar una valoración global de los resultados obtenido en la aplicación del análisis, [25] en las ciencias sociales es normal considerar como satisfactorio una solución que represente como mínimo un porcentaje del 60% de la varianza total (véase Tabla 11).

TABLA 11
VARIANZA TOTAL EXPLICADA, CON DATOS DE ANÁLISIS FACTORIAL EXPLORATORIO (SPSS VERSIÓN 24).

11

Varianza total explicada						
Factor	Autovalores iniciales			Sumas de extracción de cargas al cuadrado		
	Total	% de varianza	% acumulado	Total	% de varianza	% acumulado
1	4.415	55.191	55.191	4.087	51.088	51.088
2	1.417	17.719	72.909	1.161	14.513	65.601
3	.691	8.642	81.551			
4	.574	7.173	88.724			
5	.314	3.925	92.650			
6	.284	3.556	96.206			
7	.175	2.194	98.399			
8	.128	1.601	100.000			
Varianza total explicada						
Factor	Sumas de rotación de cargas al cuadrado					
	Total	% de varianza	% acumulado			
1	2.839	35.483	35.483			
2	2.409	30.118	65.601			
-	-	-	-			

Un quinto resultado está relacionado con las comunalidades, la comunalidad indica la proporción de varianza por cada variable que queda explicada por los factores que se han identificado en el análisis, esta información es un buen indicador para establecer hasta qué punto una variable o ítem queda bien representada en el modelo factorial (véase Tabla 12).

TABLA 12. COMUNALIDADES CON DATOS DE ANÁLISIS FACTORIAL EXPLORATORIO (SPSS VERSIÓN 24).

	Comunalidades	
	Inicial	Extracción
VAR00001	.730	.712
VAR00002	.749	.768
VAR00003	.581	.534
VAR00004	.571	.543
VAR00007	.666	.893
VAR00008	.792	.908
VAR00006	.488	.409
VAR00005	.539	.480

III. CONCLUSIONES

Los desempeños de los estudiantes en escuelas de ingeniería, las estrategias que el docente aplique para llegar a ellos, el reconocimiento por parte del docente, del como aprenden sus estudiantes, el proceso de la gestión del conocimiento (GC), como una capacidad colaborativa para adquirir y generar conocimiento, la aplicación de instrumentos confiables, diseñados y validados para realizar evaluaciones en el aula; son temas relevantes y de pronta atención por los docentes, directivos, familia y para los mismos estudiantes, debido a que son determinantes que implican en la formación académica, para que ésta sea de calidad y haya un desarrollo pleno como resultado del proceso de formación académica [26], [9]. Al respecto del proceso de la GC y cómo llevar a cabo su evaluación; en esta sección se considera que la validación del constructo "GC" y la determinación de la fiabilidad de la rúbrica socioformativa diseñada para evaluar el proceso de la gestión del conocimiento durante el desarrollo de proyectos formativos con estudiantes de nivel superior en el área de ingeniería, es una estrategia necesaria de implementar en el aula, para mejorar los aprendizajes y desempeños de los estudiantes. El resultado del proceso de validación del constructo "GC" a través del análisis factorial exploratorio (AFE), dio la oportunidad de saber que el total de las variables (ítems) consideradas en el diseño de la rúbrica socioformativa en función del constructo "GC" se conservaron, debido a que los valores que resultaron están dentro de rangos establecidos o se inclinan a valores aceptables, lo que indica que las variables consideradas miden sin dificultad el constructo GC en el contexto establecido [13]. El análisis de efecto de los ítems, sobre la validez de constructo permite mencionar que las 8 variables, presentan valor adecuado en la carga factorial del ítem sobre el factor aceptable al valor de la comunalidad. Los ocho ítems o variables presentan carga superior a 0.5. El presentar valores de comunalidades dentro de los rangos mayor de 3, indica que gran parte de la variabilidad del ítem, está siendo explicada por los factores extraídos [18].

A través de los resultados obtenidos en el análisis de fiabilidad con la determinación del alfa de Cronbach [16] realizado a los datos generados de la aplicación de la rúbrica socioformativa a un grupo piloto y a través del análisis factorial exploratorio, permiten afirmar, que se tiene un instrumento con una apropiada consistencia interna entre sus ítems y, en consecuencia, válido para medir el constructo "gestión del conocimiento" (GC) [3].

La aplicación de rúbricas Socioformativas, como instrumento para evaluar el proceso de la GC, durante el desarrollo de proyectos formativos, que brinde a la comunidad involucrada las garantías para ser utilizada en los contextos descritos, es un factor que servirá para asegurar que los niveles de desempeños sean los óptimos y las evaluaciones que se realicen se hagan objetivamente, considerándolo un aporte que en escuelas de Ingeniería se requiere con la finalidad de consolidar estrategias efectivas que aporten en las mejoras de los problemas del contexto descritos [27], [6], [13].

Se puede considerar, en función de los diversos análisis que se realizaron, que pensar en la implementación en el aula de instrumentos de este tipo, puede contribuir en la evaluación del constructo "gestión del conocimiento", durante el desarrollo de proyectos formativos, en donde se ofrecen datos que faciliten la toma de decisión para el diseño del instrumento descrito, accionar puntualmente para el mejoramiento de los desempeños [28].

De manera paralela, considerando las garantías de validez de constructo y fiabilidad que ofrece la rúbrica socioformativa, se piensa que este instrumento, supone una herramienta con valor significativo para futuras investigaciones que deseen profundizar en esta temática. Conocer cómo se perciben las rúbricas socioformativas por los estudiantes del área de ingeniería o de otras áreas de formación y contribuir en la mejora de los desempeños a través de una evaluación metacognitiva, que los estudiantes se preparen para la vida, con ética, valores, para la contribución en la mejora del planeta en todos los ámbitos: educativo, social, político, económico y sostenibilidad [29], [30], [5].

AGRADECIMIENTOS

A las Autoridades de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME), Unidad Culhuacán (UC), del Instituto Politécnico Nacional (IPN), de la Carrera de Ingeniería en Comunicaciones y Electrónica (ICE), Se agradece y reconoce el interés para que haya evaluaciones objetivas de los aprendizajes que los estudiantes adquieren y por las facilidades brindadas para que se llevara a cabo esta investigación en el interior de la Unidad Académica. A los docentes, de igual manera se agradece el entusiasmo y espíritu de ayuda que manifestaron durante el proceso de aplicación a un grupo piloto y una

muestra significativa de estudiantes de diferentes semestres de ICE, de la rúbrica Analítica Socioformativa como instrumento de evaluación del constructo "gestión del conocimiento", con la finalidad de corroborar su confiabilidad. A los estudiantes de primero, segundo, quinto, sexto octavo y noveno semestre, se les agradece su participación por haber respondido con honestidad y responsabilidad a la aplicación de la rúbrica analítica Socioformativa, como instrumento de evaluación del constructo "gestión del conocimiento", durante el desarrollo de proyectos formativos.

REFERENCIAS

- [1] J. S. Hernández-Mosqueda, "Procesos de evaluación de las competencias desde la socioformación," *Ra Ximhai*, vol. 9, no. 4, Sep. 2013, pp. 11-19, available: <https://www.redalyc.org/pdf/461/46129004001.pdf>
- [2] S. Tobón, *Formación integral y competencias: pensamiento complejo currículo, didáctica y evaluación*, 3ª ed. Bogotá, Colombia: Ecoe, 2010.
- [3] S. Cardona, J. Vélez, S. Tobón, "Contribución de la evaluación Socioformativa al rendimiento académico en pregrado," *Educación*, vol. 52, no.2, pp. 423-447, 2016, available: <http://dx.doi.org/10.5565/rev/educar.763>
- [4] M. F. Ortega-Carbajal, J. S. Hernández-Mosqueda, S. Tobón, "Análisis documental de la gestión del conocimiento mediante la cartografía conceptual," *Ra Ximhai*, vol. 11, no. 4, pp. 141-160, Jul. 2015, available: <https://www.redalyc.org/pdf/461/46142596009.pdf>
- [5] J. Luna-Nemecio, *Para pensar el desarrollo social sostenible: múltiples enfoques, un mismo objetivo*, Mount Dora (USA)/Quito (Ecuador): Kresearch/ Religación, Centro de Investigaciones en Ciencias Sociales y Humanidades desde América Latina, 2020, doi: <https://doi.org/10.35766/dss20>
- [6] I. Cantón, E. Ferrero, "La gestión del conocimiento en revistas de educación," *Educación*, vol. 52, no. 2, pp. 401-422, Jul. 2016, doi: <http://dx.doi.org/10.5565/rev/educar.757>
- [7] Á. L. Arbonés, *Cómo evitar la miopía en la gestión del conocimiento*, Madrid, España: Díaz de Santos, 2011.
- [8] E. Bueno, "El gobierno o gestión del conocimiento como estrategia de creación de valor," *Cuadernos de Gestión del Conocimiento Empresarial*, no. 16, pp. 1-5, Oct. 2009, available: <http://www.directivoscede.com/sites/default/files/document/conocimiento/31-07-2013/10cuademo0000003578.pdf>
- [9] Medical Law UK. "Home." Medical Law UK. <http://www.unsystemceb.org>
- [10] RAE, *Ortografía de la lengua española*, Madrid, España: Espasa, 2010, p. 745.
- [11] J. Vázquez- Antonio, S. Tobón, J. M. Vázquez- Antonio, C. E. Guzmán, S. R. Herrera- Meza, "Diseño y validez de contenido de una rúbrica socioformativa para evaluar la tesis de investigación en la Educación Normal," *Revista espacios*, vol. 39, no. 53, pp. 28, 2018, available: <http://www.revistaespacios.com/cited2017/cited2017-28.html>
- [12] J. Escobar-Pérez, A. Cuervo-Martínez, "Validez de contenido y juicio de expertos: una aproximación a su utilización," *Avances en medición*, no. 6, pp. 27-36, 2008, available: http://www.humanas.unal.edu.co/psicometria/files/7113/8574/5708/Articulo3_Juicio_de_expertos_27-36.pdf
- [13] D. Frías-Navarro, M. Pascual Soler, "Prácticas del análisis factorial exploratorio (AFE) en la investigación sobre conducta del consumidor y marketing," *Suma pedagógica*, vol. 19, no. 1, pp. 47-58, Jun. 2012, available: <https://www.uv.es/~friasnav/FriasNavarroMarcopsSoler.pdf>
- [14] M. S. Moscoso, C. Merino-Soto, S. Domínguez-Lara, C. Cecilia, B. Chau, M. Mary-Claux, "Análisis factorial confirmatorio del inventario multicultural de la expresión de la ira y hostilidad," *Liberabit*, vol. 22, no. 2, pp. 137-152, 2016, available: <http://www.scielo.org.pe/pdf/liber/v22n2/a02v22n2.pdf>
- [15] S. Ibarra- Piza, S. Segredo-Santamaría, L. G. Juárez-Hernández, S. Tobón, "Estudio de validez de contenido y confiabilidad de un instrumento para evaluar la metodología socioformativa en el diseño de cursos," *Revista espacios*, vol. 39, no. 53, pp. 24, 2018, available: <http://www.revistaespacios.com/cited2017/cited2017-24.html>
- [16] L. J. Cronbach, "Coefficient alpha and the internal structure of tests," *Psychometrika*, no.16, pp. 297-334, 1951.
- [17] J. R. A. Santos, "Alfa de Cronbach: una herramienta para evaluar la fiabilidad de las escalas," *Herramientas del oficio*, vol. 37, no 2, 1999.
- [18] I. Mavrou, "Análisis factorial exploratorio: cuestiones conceptuales y metodológicas," *Revista Nebrija de Lingüística Aplicada*, no. 19, pp. 1-10, Nov. 2015. Disponible en: <https://revistas.nebrija.com/revista-linguistica/article/view/283/248>
- [19] L. G. Juárez-Hernández, S. Tobón, "Análisis de los elementos implícitos en la validación de contenido de un instrumento de investigación," *Revista espacios*, vol. 39, no. 53, pp. 23, 2017, available: <https://www.revistaespacios.com/cited2017/cited2017-23.pdf>
- [20] J. A. Dorantes Nova, S. Tobón, "Instrumentos de evaluación: Rubricas Socioformativas," *Praxis Investigativa ReDIE*, vol. 9, no. 17, 2017, available: http://praxisinvestigativa.mx/assets/17_7_instrumentos.pdf
- [21] C. S. Juárez-Lugo, K. Pichardo-Silva, M. C. Escoto-Ponce-de-León, E. Luna Montijo, "Confiabilidad y validez de la Escala de Estrategias de Aprendizaje acra en estudiantes universitarios del Estado de México," *Investigación y práctica en psicología del desarrollo*, vol. 1, pp. 261-268, 2015, available: <https://revistas.uaa.mx/index.php/ippd/article/view/656>
- [22] Aniceto-Vargas, Luna-Nemecio, Rodríguez-Peralta. "Diseño y validación del instrumento: Gestión del Conocimiento en Proyectos formativos," (en proceso de publicación) *Revista Educar*, 2019.

- [23] A. B. Mirete-Ruiz, F. A. García-Sánchez, F. Hernández-Pina, "Cuestionario para el estudio de la actitud, el conocimiento y el uso de TIC (ACUTIC) en Educación Superior. Estudio de fiabilidad y validez," *Revista Interuniversitaria de Formación del Profesorado*, vol. 83, no. 29.2, pp. 75-89, 2015, available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5249496>
- [24] M. A. Morata-Ramirez, F. P. Holgado-Tello, M. I. Barbero-García, G. Mendez, "Análisis factorial confirmatorio. Recomendaciones sobre mínimos cuadrados no ponderados en función del error Tipo I de Ji-Cuadrado y RMSEA," *Acción psicológica*, vol. 21, no.1, pp. 79-90, 2015, doi: <http://dx.doi.org/10.5944/ap.12.1.14362>
- [25] J. F. Hair, W. C. Black, B. J. Babin, R. H. Anderson, *Edition Multivariate Data Analysis*, 7a ed. USA: Pearson Education, 2014.
- [26] C. E. Bruna, V. A. Villarroel, D. V. Bruna, J. A. Martínez, "Experiencia de Diseño y Uso de una Rúbrica para Evaluar Informes de Laboratorio en Formato Publicación Científica," *Formación Universitaria*, vol. 12, no. 2, pp. 17-28, 2019, doi: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50062019000200017>
- [27] I. I. Neira Neaves, M. Ibáñez Cruz, H. M. López Oviedo, "Proceso de Validación de una Rúbrica Diseñada con el enfoque Socioformativo," in *XIV Congreso Nacional de Educación Educativa (COMIE)*, San Luis Potosí, México, 2017, available: <http://www.comie.org.mx/congreso/memoriaelectronica/v14/doc/2101.pdf>
- [28] V. Quesada Serra, G. Rodríguez Gómez, M. S. Ibarra Sáiz, "Planificación e innovación de la evaluación en educación superior: la perspectiva del profesorado," *Revista de Investigación Educativa*, vol. 35, no.1, pp. 53-70, 2017, doi: <http://dx.doi.org/10.6018/rie.35.1.239261>
- [29] S. Tobón, *Evaluación de competencias mediante rúbricas*, México: CIFE, 2014, available: http://issuu.com/cife/docs/evaluaci_n_con_rubricas4
- [30] C. Severiche-Sierra, E. Gómez-Bustamante, J. Jaimes-Morales, "La educación ambiental como base cultural y estrategia para el desarrollo sostenible," *Telos: Revista de Estudios Interdisciplinarios en Ciencias Sociales*, vol. 8, no. 2, pp. 266-281, 2016, available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5655393>

Procedimiento para la obtención de modelos CAD de piezas prismáticas a partir de la técnica de digitalización de proyecciones ortogonales. Caso de estudio de un punzón de llaves de cerraduras

Procedure for Obtaining CAD Models of Prismatic Pieces from Orthogonal Projection Digitization Techniques. Lock Key Punch Study Case

Santiago Amaury **Santana-Reyes**¹, José Félix **Morales-Leslie**², René Misael **Arias-Hidalgo**³
Alexis **Álvarez-Cabrales**⁴, Yoan Manuel **Ramos-Botello**⁵

¹Universidad de Granma, CUBA

<https://orcid.org/0000-0002-0059-0990> | ssantanar@udg.co.cu

²Empresa Hidrogreen, MÉXICO

<https://orcid.org/0000-0002-9442-4394> | moralesjosefelix52@gmail.com

³Universidad de Granma, CUBA

<https://orcid.org/0000-0002-9661-1214> | rariash@udg.co.cu

⁴Universidad de Granma, CUBA

<https://orcid.org/0000-0003-4222-6449> | aalvarezc@udg.co.cu

⁵Universidad de Granma, CUBA

<https://orcid.org/0000-0001-7838-5981> | yramosb@udg.co.cu

Recibido 30-07-2020, aceptado 26-08-2020.

Resumen

Las técnicas de Diseño e Ingeniería Asistido por Computadora (CAD/CAE) han alcanzado enorme importancia en la industria mecánica, pues reducen tanto el costo económico como el tiempo de diseño de piezas, máquinas y componentes estructurales. En el proceso de conformado de metales es crucial controlar la geometría del punzón y la matriz de corte, pues los defectos geométricos en este tipo de herramientas suelen ser muy costosos. Para el análisis efectivo por el Método de Elementos Finitos (MEF) es importante determinar las características geométricas de los modelos que se analizan. En la presente investigación se presenta un procedimiento para determinar la geometría de un punzón de corte para llaves de cerraduras a partir de la técnica de digitalización de proyecciones ortogonales en la cual se hace uso de un proyector de perfiles digital de banco CPJ-3000A. Posteriormente, se importa la geometría a un programa CAD para obtener el modelo virtual de la herramienta de conformado. El modelo virtual presentó características geométricas aptas para el posterior trabajo de simulación numérica, demostrando que el procedimiento planteado constituye una alternativa viable para la digitalización 3D de piezas mecánicas de mediana complejidad.

Palabras clave: modelos CAD, punzón, digitalización, proyector de perfiles.

Abstract

The Computer Aid Design and Engineering technics (CAD/CAE) has reached enormous importance in the mechanical industry, because it reduces as much the economic cost as the design time of pieces, machines and structural components. In the metals forming process it is crucial the punch and die geometry control, since geometric defects in this type of tool are usually very expensive. For the effective analysis using the Finite Elements Method (FEM) it is important to determine the models geometric characteristics. In the present investigation, a procedure is presented to determine the blanking punch geometry for locks keys from digitization technique of orthogonal projections in which is used a digital bench profiles projector CPJ-3000A. Later, the geometry is imported to a CAD software for obtain the virtual model of forming tool. The virtual model presented capable geometric characteristics for a subsequent numerical simulation work, demonstrating that the presented procedure constitutes a viable alternative for the 3D digitization of medium complexity mechanical pieces.

Index terms: CAD models, punch, digitization, profile projector.

I. INTRODUCCIÓN

El diseño de productos mecánicos es una actividad crítica, porque se estima que el 70 % u 80 % del costo de desarrollo y manufactura de un producto está determinado por las decisiones tomadas en las etapas iniciales del diseño. Este proceso comienza con el desarrollo de un concepto de un producto original [1], para luego finalizar en la obtención de las dimensiones y la forma de las piezas (los elementos de máquina), otra cuestión importante es la selección de los materiales y procesos de manufactura adecuados, de modo que la máquina resultante ejecute sin falla la función esperada [2].

El proceso de conformación de metales juega un papel importante en la industria mecánica actual, varios artículos industriales y de uso común se obtienen con el empleo de este proceso. Los componentes de los troqueles, en especial el punzón y la matriz de corte, son elementos de particular importancia en el proceso de corte de la chapa metálica. Todo lo cual es corroborado por Kalpakjian y Schmid [1] quienes plantean que la geometría del punzón tiene gran importancia en la distribución y magnitud de la fuerza de corte necesaria.

La predicción de la vida útil de los punzones es usualmente realizada a partir de la experiencia de los diseñadores de herramientas de conformado [3]. No obstante, la simulación con el MEF es una técnica que permite determinar las variables físicas y el comportamiento de los elementos del sistema de conformado [4].

El MEF puede acercarse bastante a un buen diseño siempre y cuando se tomen en mayor número las condiciones reales [5]; así el primer paso en el análisis, generalmente, lo constituye la construcción geométrica del sistema a estudiar.

Según Vlajkov *et al.* [6] la utilización de los programas CAD contribuye a mejorar el proceso de diseño, las piezas complejas pueden ser rápidamente diseñadas y representadas visualmente todas sus características geométricas por parte del usuario. La tecnología CAD permite el desarrollo de modelos tridimensionales (3D) a partir de los cuales pueden producirse vistas ortogonales convencionales en dos dimensiones [7].

Uno de los aspectos que más tiempo consume de la creación de modelos virtuales en 3D es la generación de modelos geométricos de los objetos, en particular si el modelo virtual es derivado de una versión física de los mismos. El proceso de digitalización en 3D está compuesto por dos fases: la de toma de datos seguida por la de reconstrucción [8].

La generación de modelos digitales de piezas en programas CAD es posible de realizar haciendo uso de instrumentos convencionales de medición como: calibrador de pie de rey, micrómetro, galga de radio y ángulos, entre otros tal y como lo demuestra Arroyave *et al.* [9]. Así mismo, otro medio tradicional de generación de modelos digitales es la captura de imágenes fotográficas de las piezas, el cual es utilizado, con buenos resultados, por Alshennawy *et al.* [10] en su investigación.

La integración entre los equipos de digitalización y los sistemas CAD ha alcanzado significativa importancia. Hoy es posible pasar, en forma automática (a través de intercambio de información computacional), de la información obtenida de una máquina de medición por coordenadas (MMC) a un sistema CAD [9].

De igual manera, en los últimos años un gran número de tecnologías de escáner para la captura de la forma de un objeto físico están disponibles en el mercado. El punto de partida de todas estas tecnologías es la adquisición de un conjunto de coordenadas (X , Y , Z) en el espacio, llamados puntos de la nube, con una forma de salida apropiada a la geometría real del objeto [8]. Los digitalizadores de objetos tridimensionales permiten obtener el contorno superficial del objeto por más complicado e irregular que sea [11].

Una vez establecidas las características geométricas de las piezas, con el empleo de las técnicas CAE, el diseño de las mismas puede someterse al análisis de ingeniería e identificar problemas potenciales como: exceso de carga, deflexión e interferencia en superficies de contacto durante el ensamble [1]. El modelo geométrico de las piezas debe representar lo mejor posible la realidad, y luego aplicar métodos matemáticos para darle la forma y disposición adecuada para poder obtener resultados numéricos [12].

Varios autores han empleado técnicas de digitalización que permiten la obtención de modelos geométricos de piezas mecánicas, esculturas y estructuras anatómicas para un posterior intercambio de datos con programas CAD. Almaguer *et al.* [13], realizan el escaneo de una probeta compacta con el uso del escáner 3D Konika Minolta Range 7 como paso previo a la realización de simulaciones numéricas para determinar el estado tensional de la misma. Los autores establecen una comparación del comportamiento de las tensiones y las

deformaciones entre el modelo de la probeta escaneado y uno de una probeta ideal, esta última obtenida haciendo uso del programa SolidWorks. A pesar de no encontrar diferencias significativas entre los valores resistivos analizados, plantean que el modelo escaneado, como se acerca más a la pieza real, va a permitir juzgar mejor el comportamiento de las uniones soldadas frente a fenómenos como la fatiga y la fractura.

Una investigación interesante es la desarrollada por Borri y Grazini [14], quienes presentan los resultados del análisis por el MEF de los ensayos realizados en un modelo digital, obtenido al hacer uso de un escáner láser ISTI-CNR, de la estatua El David de Michelangelo Buonarroti. En la investigación es resaltada la importancia de la precisión del modelo geométrico como paso previo para el análisis estructural de la escultura haciendo uso del MEF.

En ese mismo orden, Acosta *et al.* [15], evalúan numerosas metodologías que permiten reproducir la geometría del rodete del compresor centrífugo de un turbo cargador HT3B satisfactoriamente, de modo que a partir del modelo virtual obtenido se pueda realizar una simulación computacional de flujo en dicho compresor; estos autores optaron por la toma de Tomografías Axiales Computarizadas (TAC) como la metodología más adecuada para la obtención de un modelo CAD en 3D.

En la investigación realizada por Bosch *et al.* [16] se propone un procedimiento para la obtención de un fémur humano utilizando tomas de TAC, lo cual permite la modelación en un ambiente CAD, en el que se puede asignar propiedades mecánicas y realizar trazos de fractura en la geometría del fémur, con el objetivo de analizar, por el MEF, el comportamiento resistivo del conjunto fémur-fijador.

De igual manera, la toma de TAC es empleada por López *et al.* [17], para la obtención de los modelos CAD de cada componente del oído medio humano, con lo cual es posible analizar numéricamente los diferentes fenómenos mecánico-acústicos que actúan sobre la estructura de este conjunto de órganos. De esta manera se corrobora la viabilidad de la TAC como el método de adecuado para la modelación CAD de estructuras anatómicas debido a su alto grado de precisión geométrica.

Los autores mencionados anteriormente resaltan la importancia de la geometría exacta de los modelos CAD simulados por el MEF, pues de esta manera se garantiza la exactitud de los resultados. Sin embargo, a pesar de la precisión de las dimensiones entre el modelo digital y la pieza real es importante resaltar el elevado costo económico por concepto de disponibilidad experimental asociado a los equipos de medición.

Los proyectores ópticos de perfiles se desarrollaron inicialmente en la década de 1940 a fin de verificar la geometría de las herramientas de corte para maquinar roscas de tornillos [1], estos dispositivos miden dimensiones y áreas, por amplificación óptica, y permiten la realización de mediciones directas sobre una pantalla de proyección. El uso más básico de un proyector de perfiles es identificar un punto o borde en la sombra de proyección del objeto de estudio y desde este punto o borde calcular una longitud [18].

Dentro de las potenciales aplicaciones de los proyectores de perfiles se encuentra la medición del desgaste en piezas, especialmente en herramientas de conformado de metales. Esta característica es utilizada por Silva y Alvares [19] quienes reportan la factibilidad de empleo del proyector de perfiles en la determinación del desgaste en una herramienta de conformado y destacan, igualmente, la precisión en las mediciones realizadas.

El objetivo de esta investigación es mostrar un procedimiento que permita obtener un modelo virtual de piezas que presenten características geométricas aptas para el posterior trabajo de simulación numérica; como una alternativa viable para la digitalización 3D de piezas mecánicas de mediana complejidad. En la consecución de este objetivo, se emplea un proyector de perfiles para el levantamiento de la geometría de la pieza, para posteriormente exportar la información geométrica a un programa CAD.

II. DESARROLLO

A. Procedimiento para la obtención de modelos CAD a partir de la técnica de digitalización de proyecciones ortogonales

En la Fig. 1 se muestra el procedimiento seguido para la obtención del modelo digital del punzón de corte que sirve para la fabricación de llaves de cerraduras; dicho modelo, con una geometría más cercana a la realidad, es exportado a un programa CAD con la finalidad de realizar futuras simulaciones numéricas. Cada paso del

procedimiento contiene una serie de operaciones que deben ser realizadas de manera precisa, sin violar el orden establecido para ello, todo lo cual repercute en la correcta consecución del modelo CAD.

4

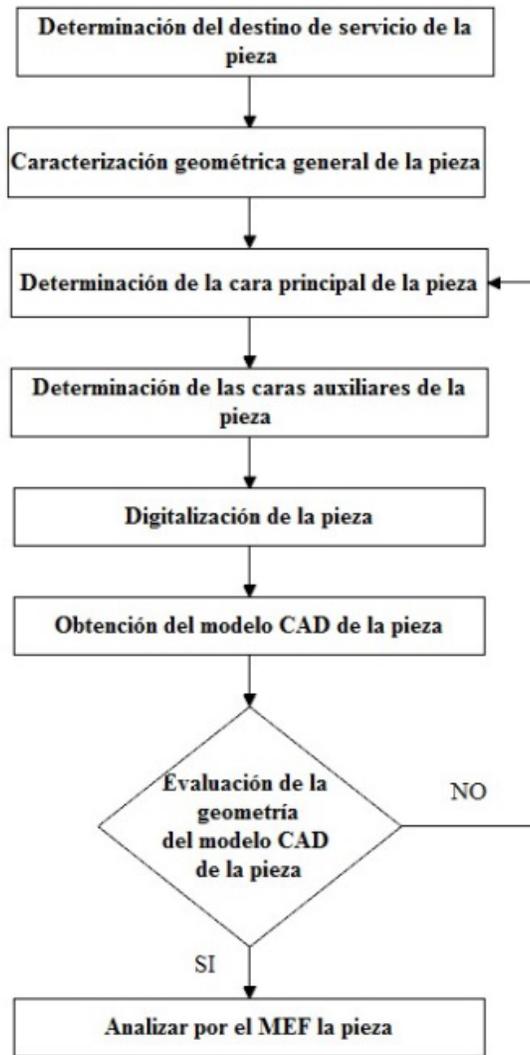


Fig. 1. Procedimiento seguido para la obtención del modelo digital del punzón de corte de llaves de cerraduras.

El análisis mediante el MEF del modelo CAD del punzón, obtenido de acuerdo con el procedimiento propuesto en esta investigación, permite determinar la influencia de la geometría real sobre el comportamiento funcional y resistivo de la herramienta de conformado.

La obtención de modelos CAD de piezas, a partir de técnicas de digitalización de proyecciones ortogonales, alcanza gran importancia a causa de la relación costo-beneficio que presenta el empleo del proyector de contornos [20].

B. Determinación del destino de servicio de la pieza

Es importante comprender el funcionamiento de la pieza en el conjunto mecánico, lo cual garantizará no obviar ninguna dimensión que pueda resultar importante para su correcto desempeño.

El troquel de corte, de acción simple, para la obtención de llaves de cerraduras se muestra en la Fig. 2, los principales elementos de este conjunto son el punzón y la matriz, lo cual está dado por el régimen de funcionamiento, a la responsabilidad geométrica que tienen en la precisión dimensional de las piezas a fabricar y a la complejidad tecnológica de la manufactura de dichas herramientas de conformado.

5

En el punzón, objeto de estudio en esta investigación, la cara de corte posee una gran importancia funcional pues su perímetro define la calidad geométrica de las llaves de cerraduras. Por tal motivo, es importante determinar detalladamente la dimensión exacta de esta zona de la herramienta.

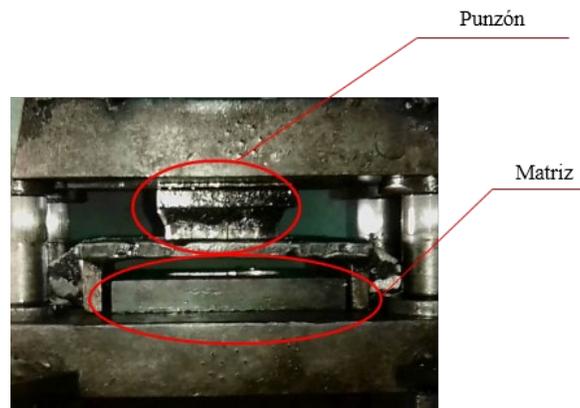


Fig. 2. Disposición del punzón y la matriz en el troquel de corte de llaves de cerraduras.

C. Caracterización geométrica general de la pieza

Resulta importante determinar las principales dimensiones geométricas de la pieza, así como los detalles de forma que particularmente la caracterizan.

El punzón de corte de llaves de cerraduras (véase Fig. 3) está constituido por dos componentes: la base de sujeción, la cual tiene una forma rectangular con cuatro agujeros y la sección de corte, la cual describe el perímetro de la pieza a lograr, la misma posee un ángulo en la zona de corte, para así garantizar un menor esfuerzo de conformado. Ambos componentes están unidos por un cordón de soldadura. Las dimensiones generales del punzón son: 26,38 mm × 49,28 mm × 60,23 mm.

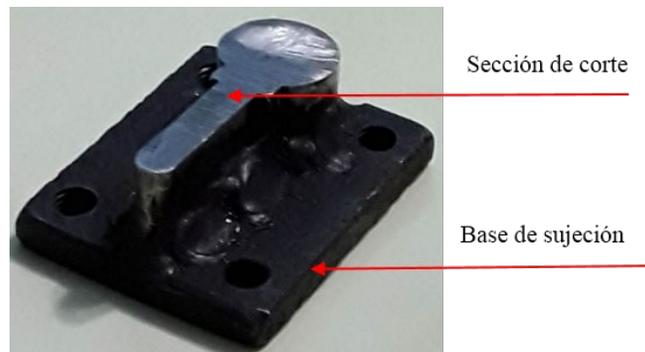


Fig. 3. Punzón de corte empleado en la fabricación de llaves de cerraduras.

El material del punzón de sus dos componentes es el acero SAE 4320 recocido, las propiedades se muestran en la Tabla 1.

TABLA 1
PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO SAE 4320 [20]

Propiedad	Valor	Unidad de medida
Límite de rotura	745	MPa
Límite de fluencia	469	MPa
Coefficiente Poisson	0,27	---
Módulo elástico	207	GPa

6

D. Determinación de la cara principal y de las caras auxiliares de la pieza

Se debe seleccionar la vista que más información geométrica brinda de la pieza, en este caso es la cara que define el perímetro de corte de la herramienta. Por otro lado, las vistas que aportan otra información geométrica relevante como: la altura, la profundidad de la pieza y el área de la sección transversal del cordón de soldadura, de igual manera deben ser tomadas en cuenta. Todo lo cual se realiza atendiendo al principio de proyecciones ortogonales de la pieza (véase Fig. 4).



Fig. 4. Proyecciones ortogonales del punzón de corte de llaves de cerraduras.

E. Digitalización de la pieza a partir del uso del proyector de contorno

Se procede al levantamiento de las dimensiones del punzón de corte de llaves de cerraduras mediante el uso de un proyector de contornos digital, lo que permite obtener un fichero digital con la información dimensional de la herramienta de conformado.

El instrumento empleado para la digitalización del punzón de corte es un proyector de contornos digital de banco CPJ-3000A. La disposición para la obtención de la geometría digital del punzón de corte se muestra en la Fig. 5.



Fig. 5. Disposición para la digitalización de la geometría del punzón de corte.

El programa informático empleado como interfaz gráfica para interactuar con el proyector de contornos es QIM1008CPJ. Este programa permite registrar las coordenadas cartesianas de la pieza en un plano (previamente definido el origen del sistema de coordenadas), igualmente permite crear entidades asociadas a la geometría de la pieza como: líneas definidas por dos puntos, líneas spline, arcos de tres puntos, ángulos, rectángulos, entre otras. Es necesario hacer uso de las entidades, antes mencionadas, pues la geometría real del punzón está compuesta por la concatenación de las mismas.

En la Fig. 6 se muestra el proceso de creación del croquis de la cara principal del punzón de corte, lo cual se hace a través de la toma de datos en la herramienta de conformado. Es importante garantizar una geometría con el contorno cerrado con el objetivo de lograr una futura operación de extrusión en la plataforma CAD que permita obtener el modelo en 3D.

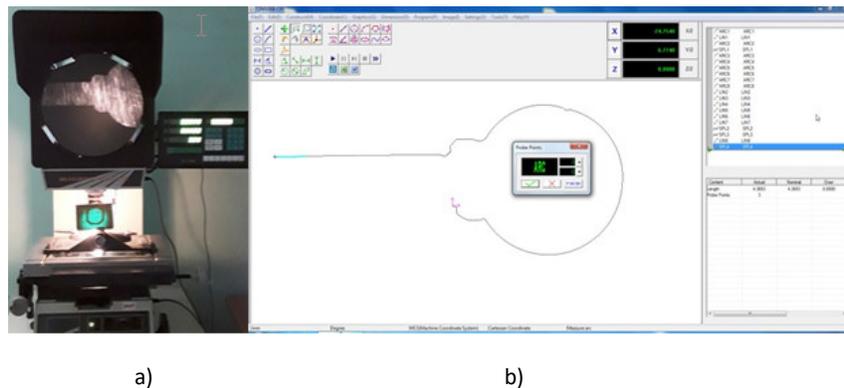


Fig. 6. Proceso de creación del croquis de la cara principal del punzón de corte; a) Toma de datos en el punzón de corte y b) Trazado de las entidades geométricas del croquis.

Para establecer la verdadera magnitud de la cara de corte del punzón se emplea un dispositivo de alineación angular, el cual garantiza que exista paralelismo entre la referida cara y la bandeja porta muestras del proyector

de contornos (véase Fig. 7). Con este proceder se garantiza que el haz óptico del proyector incida de manera perpendicular a la pieza.

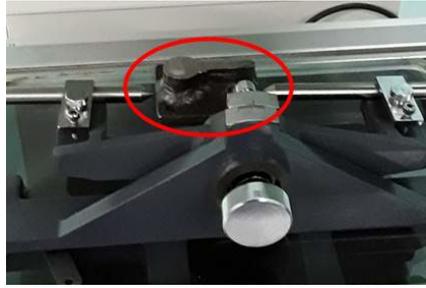


Fig. 7. Posicionamiento del punzón de corte sobre la mesa porta muestras del proyector de contornos.

F. Procedimiento para la obtención del modelo CAD del punzón de corte

La información geométrica almacenada, en los ficheros digitales (con extensión .pgm) procedentes del programa empleado como interfaz gráfica, se exporta a un archivo (con extensión .dxf) que permite la interoperabilidad entre los archivos informáticos que utilizan la tecnología CAD. En este caso, una vez realizada la exportación de las entidades al formato de archivo (con extensión .dxf), estas se visualizan en forma de croquis en el programa informático SolidWorks 2019.

En la Fig. 8a), se muestra la disposición del croquis de la vista principal del punzón de corte sobre la cara del prisma CAD, que posee las dimensiones máximas del punzón, es importante destacar que el contorno de corte debe ser cerrado y colineal con la arista que define la cara del sólido.

Una vez posicionado el croquis de la cara principal con el uso de las operaciones típicas de modelación de piezas del programa SolidWorks 2019 (Extruir en corte, Saliente/Base barrido, entre otras) es posible obtener la geometría del punzón (véase Fig. 8b)).

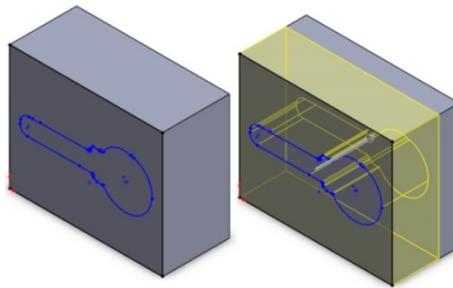


Fig. 8. Obtención del modelo CAD del punzón de corte: a) Disposición del croquis de la vista principal del punzón y b) Operación de extrusión.

III. RESULTADOS

El modelo geométrico digital del punzón de corte de llaves de cerraduras obtenido a través del procedimiento propuesto en esta investigación es plenamente funcional y modificable dentro de un entorno CAD, toda vez que se emplean operaciones propias del programa SolidWorks 2019 para la construcción de su geometría.

Las proyecciones ortogonales del modelo CAD del punzón de corte de llaves de cerraduras (véase Fig. 9) cuentan con las características geométricas de la pieza original. En la vista principal de dicha herramienta se observan las discontinuidades que presenta el perímetro de corte asociadas al método de elaboración y a su

complejidad geométrica. Mientras que, en la vista superior, un detalle importante a destacar es el desgaste presente en la sección de corte producto a su funcionamiento.

9

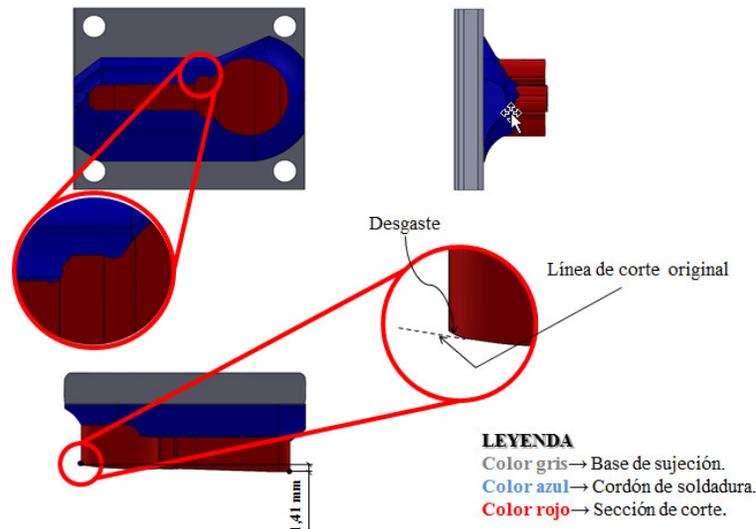


Fig. 9. Obtención del modelo CAD del punzón de corte: a) Disposición del croquis de la vista principal del punzón.

Las características geométricas antes mencionadas son importantes factores que se deben tomar en cuenta durante la simulación numérica de este tipo de herramientas de conformado, pues en gran medida influyen en el comportamiento tensional de las mismas. Si este análisis de detalle no se toma en consideración durante la simulación numérica, entonces no se garantiza que exista una adecuada precisión en los resultados, pues se parte de la premisa de basar los mismos en modelos CAD ideales.

A. Evaluación de la geometría del modelo CAD de la pieza

Se debe comprobar que en el modelo CAD no existen discontinuidades en las entidades del croquis como: aristas cortas y aristas faltantes, las cuales pueden provocar contornos abiertos y superficies con coeficiente de longitud/ancho muy elevado; estos defectos geométricos provocan la imposibilidad de realizar el proceso de mallado en dicho modelo.

Las comprobaciones antes mencionadas fueron realizadas en el modelo CAD del punzón de corte de llaves de cerraduras y al no detectarse errores geométricos fue posible realizar el proceso de mallado, utilizando el complemento Simulation del programa SolidWorks 2019; los resultados se muestran en la Fig. 10.

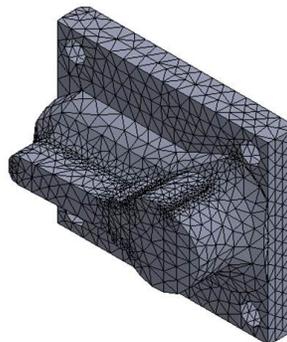


Fig. 10. Malla del modelo CAD del punzón de corte de llaves de cerraduras.

La malla del modelo CAD del punzón de corte de llaves de cerraduras cuenta como característica principal la de poseer un alto porcentaje de elementos (96,7 %) con cociente de aspecto menor a 3, lo que indica la poca distorsión de los elementos de la malla asociada a la configuración geométrica del modelo. Autores como Vera *et al.* [21] y Remache *et al.* [22] resaltan que el alto porcentaje de los elementos de malla con cociente de aspecto es fundamental en la calidad del mallado, pues la relación entre el lado más largo y el más pequeño del elemento tiene una tendencia a 1.

La Tabla 2 muestra las características de la malla del tipo sólida basada en la curvatura con elementos cuadráticos de alto orden (10 nodos), con tres grados de libertad por nodo. Este tipo de malla, a pesar de consumir más recursos computacionales, garantiza una mejor correspondencia con la geometría de la pieza, especialmente aquellas con geometría curva.

TABLA 2
PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO SAE 4320 [20]

Características	Definición	Unidad de medida
Tamaño máximo del elemento	3,5	mm
Tamaño mínimo del elemento	0,75	mm
Número de nodos	5337	---
Número de elementos	25425	---

Las características de la malla constituyen un elemento fehaciente de la viabilidad del análisis (por el MEF) de los modelos de piezas cuya geometría ha sido obtenida haciendo uso del procedimiento descrito en esta investigación. En este caso, el modelo CAD del punzón de corte de llaves de cerraduras puede ser analizado a partir del MEF.

La generación de la malla, al ser un paso sumamente importante en las simulaciones por el MEF y guardar una relación estrecha con las características geométricas de las piezas mecánicas, que se analizan a través del mencionado método, constituye un factor decisivo en la evaluación de la geometría del punzón de corte.

B. Análisis por el MEF del modelo CAD de la pieza

Entre las condiciones de fronteras del análisis estático lineal por el MEF del punzón de corte de llaves de cerraduras se encuentran las restricciones de desplazamiento del modelo, las cuales son del tipo fijo y se ubican en toda la base de sujeción y en los agujeros (véase Fig. 11a).

Mientras que, la fuerza de corte se aplica en la sección de corte del punzón, en dirección al eje Z; así mismo se asume que todo el perímetro cortante está en contacto con la lámina. Según Kalpakjian y Schmid [1] el valor de la fuerza de corte se determina de acuerdo con la ecuación 1.

$$F_C = 0,7 \cdot e \cdot P \cdot \sigma_{ETF} = 0,7 \cdot 2 \text{ mm} \cdot 126,89 \text{ mm} \cdot 1\,023,469 \text{ MPa} = 181\,815,199 \text{ N} \quad (1)$$

donde:

- e Espesor de la lámina (mm).
- P Perímetro de corte (mm).
- σ_{ETF} Esfuerzo tensional final (MPa). Latón 70-30 recocido, de acuerdo con Kalpakjian y Schmid [1].

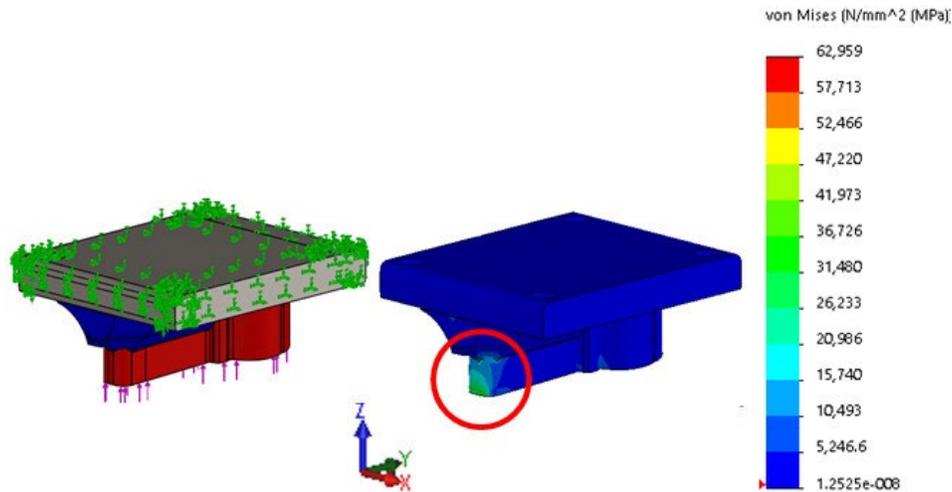


Fig. 11. Análisis por el MEF del modelo CAD del punzón de llaves de cerraduras; a) Condiciones de frontera y b) Resultados del comportamiento tensional.

Las máximas tensiones, de acuerdo con el criterio de von Mises, tienen un valor de 62,959 MPa, las mismas se encuentran ubicadas en la zona de menor área de la sección de corte (véase Fig. 11b). El límite elástico del material del punzón no es superado durante su funcionamiento, por lo que es posible afirmar que no existen deformaciones permanentes y que la herramienta de conformado cumple su destino de servicio en condiciones tensionales elásticas.

Para la validación de la precisión de los resultados tensionales se redujo el tamaño global de los elementos de la malla, declarados en la Tabla 2, a la mitad y el error relativo obtenido fue de 2,781 %. Entonces, es posible afirmar que los resultados obtenidos son válidos y razonables dado a que no existen cambios significativos asociados a la variación del tamaño del elemento de la malla.

IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El análisis numérico de piezas que han sido fabricadas es tan importante como el análisis de piezas que aún están en fase de diseño, pues el primero presenta la ventaja de evaluar la influencia de las imperfecciones ocasionadas por el método de fabricación y por las condiciones de funcionamiento, pero tiene como inconveniente el costo del procedimiento de captura de los datos geométricos; mientras que, en el segundo se debe partir de la suposición de la no existencia de errores asociados al método de fabricación y no es muy común que se tomen en cuenta el efecto de las condiciones de funcionamiento (desgaste del par tribológico como es el caso del punzón objeto de esta investigación), todo lo cual puede provocar variaciones en la precisión de los resultados.

El procedimiento de digitalización de piezas, presentado en esta investigación, a través del desarrollo del modelo CAD de un punzón de corte de llaves de cerraduras, ofrece grandes ventajas económicas pues se utiliza la funcionalidad de un proyector de contornos de capturar y exportar los datos geométricos a un formato CAD.

El trabajo en el entorno CAD, con el empleo de los croquis obtenidos mediante el procedimiento descrito en esta investigación, debe partir del supuesto de que la sección transversal definida por dichos croquis es constante. Esta particularidad está dada porque el procedimiento de digitalización se basa en la obtención de los croquis a partir de las proyecciones ortogonales de la pieza.

Aunque lo antes planteado se pudiera considerar como una deficiencia es importante recalcar la alta precisión dimensional y nivel de detalle que se alcanza en la geometría de las proyecciones ortogonales, lo que hace que el error asociado a esta causa sea poco significativo.

V. CONCLUSIONES

El procedimiento propuesto permite determinar la geometría, con índices de exactitud dimensional satisfactorios, de piezas prismáticas de mediana complejidad geométrica a partir de la técnica de digitalización de proyecciones ortogonales, haciendo uso de un proyector de contornos digital de banco.

El modelo CAD del punzón de corte obtenido a través del procedimiento empleado en la investigación presenta características geométricas aptas para la simulación por el MEF.

El procedimiento presentado en esta investigación contribuye a la realización de estudios por el MEF de piezas, que se encuentran en explotación, en aras de establecer metodologías para evaluar el desempeño de futuros prototipos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al grupo de Soluciones Ingenieriles Asistidas por Computadora (SIAC) del Departamento de Ingeniería Mecánica perteneciente a la Universidad de Granada.

REFERENCIAS

- [1] S. Kalpakjian, S. R. Schmid, *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*, 5ª ed. México: Pearson, 2008.
- [2] R. Norton, *Diseño de máquinas. Un enfoque integrado*, 4ª ed. México: Prentice Hall, 2011.
- [3] S. Kashid, S. Kumar, "Prediction of life of punches of compound die using artificial neural network," in *5th International & 26th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference* Guwahati, Assam, India, 12-14 diciembre, 2014, available: <https://pdfs.semanticscholar.org/a9e0/8aaae2c4071b11858b282facc3586313f1d0.pdf&ved=2ahUKewj0-oihx-LqAhXsYN8KHTdTAycQFjAAegQIBxAC&usg=AOvVaw3Msk3giPTlTFsMLSIZLK1v>
- [4] M. Wang, *Design and development of metal-forming processes and products aided by finite element simulation*, 1a ed. Gewerbestrasse, Switzerland: Springer International Publishing AG, 2017.
- [5] J. Atonal, A. Reyes, R. Vázquez, "Determinación de esfuerzos entre dos piezas en contacto utilizando el Método de Elementos Finitos," *Científica*, vol. 19, no. 1, pp. 5, 2015.
- [6] V. Vljakov, E. Desnica, I. Palinkaš, "3D modeling of casting tool using software package SolidWorks," *Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara-International Journal of Engineering*, vol. 15, pp. 71-74, 2017, available: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=asn&AN=121771753&lang=es&site=ehost-live>
- [7] R. Budynas, K. Nisbett, *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*, 9ª ed. México: McGraw-Hill/Interamericana, 2012.
- [8] J. Stjepandić, N. Wognum, W. J. C. Verhagen, Eds., *Concurrent Engineering in the 21st Century. Foundations, Developments and Challenges*. Switzerland: Springer International Publishing Switzerland, 2015.
- [9] J. Arroyave, C. Romero, and C. Montilla, "Ingeniería inversa de un reductor de tornillo sinfin-corona," *Scientia Et Technica*, vol. XVII, pp. 204-210, 2012, available: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84925149023>
- [10] A. A. Alshennawy, E. S. Gadelmawla, I. M. Elewa, M. M. Koura, "A new computer vision algorithm for the extraction of straight and curved features of two-dimensional products," *Journal of Engineering Manufacture*, vol. 220, pp. 1141-1150, 2006, available: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1243/09544054JEM475&ved=2ahUKewjK5uHdzOLqAhXpTN8KHWWFA0gQFjABegQIBxAC&usg=AOvVaw2Dtrz45fsxOEdEso3MO5Zx>
- [11] B. Vera, D. Vidarte, "Tecnologías informáticas utilizadas en el diseño y la fabricación de moldes y troqueles," *Informador Técnico*, vol. 65, pp. 7-12, 2002, available: http://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec/article/view/893&ved=2ahUKewi5iI6rzeLqAhUknuAKHSEuC2YQFjAAegQIBhAC&usg=AOvVaw0lvK30zUwCsUeZty81-wPD
- [12] O. Rojas, L. Rojas, "Diseño asistido por computador," *Industrial Data*, vol. 9, pp. 7-15, 2006, available: <https://www.redalyc.org/pdf/816/81690102.pdf>
- [13] P. Almaguer, P. Zambrano, R. Estrada, "Evaluación numérica del estado tensional en probetas compactas simuladas y escaneadas," *Ingeniería Mecánica*, vol. 21, pp. 36-44, 2018, available: <http://www.ingenieriamecanica.cujae.edu>

- [14] A. Borri, A. Grazini, "Diagnostic analysis of the lesions and stability of Michelangelo's David," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 7, pp. 273-285, 2006.
- [15] J. Acosta, C. Duque, C. Galeano, J. Mantilla, "Digitalización 3D del rodetes de un compresor centrífugo: un procedimiento alternativo " *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, vol. 15, pp. 236-244, 2007, available: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-33052007000300004
- [16] J. Bosch, Y. Ramos, R. Estrada, Y. Morales, R. Beltrán, "Obtención de modelos CAD personalizados de las superficies cortical y trabecular de un fémur humano a partir de imágenes tomográficas," *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*, vol. 21, pp. 45-51, 2017, available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6064615>
- [17] A. López, D. López, H. Caicedo, A. González, M. González, "Biomodelado de los componentes del oído medio humano haciendo uso de imágenes de resonancia magnética " *Científica*, vol. 21, pp. 3-8, 2017, available: <https://www.redalyc.org/jatsRepo/614/61449593001/html/index.html>
- [18] C. Contreras, J. Meneses, "Calibración y automatización de un proyector de perfiles usado para el control de calidad en la fabricación de perfiles plásticos extruidos," *Revista Investigaciones Aplicadas*, vol. 9, pp. 7-11, 2015. available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5230979>
- [19] P. J. Silva, A. J. Alvares, "Investigation of tool wear in single point incremental sheet forming," *Journal of Engineering Manufacture*, pp. 1-19, 2019, available: <https://doi.org/10.1177/0954405419844653>
- [20] R. Mott, E. M. Vavrek, J. Wang, *Machine elements in mechanical design*, 6a ed. New York: Pearson Education, 2018.
- [21] A. Vera, D. Aguilar, J. Campos, J. Campos, A. Carrasco, H. Jaime, "Comparación estática estructural y de pandeo de dos materiales compuestos y acero inoxidable en una prótesis de miembro inferior," *Investigación en Ingeniería*, vol. 1, pp. 1-14, 2020.
- [22] Á. Remache, J. Leguisamo, E. Tamayo, "Análisis topológico mediante el Método de Elementos Finitos del chasis de una motocicleta de competencia," *Enfoque UTE*, vol. 10, pp. 81-97, 8 Sep. 2019, available: <http://scielo.senescyt.gob.ec/pdf/enfoqueute/v10n3/1390-6542-enfoqueute-10-03-00081.pdf>

Estudio evaluativo de riesgo psicosocial en el desempeño de labores de seguridad privada

Evaluation Study of Psychosocial Risk in the Performance of Private Security Work

Raquel Muñoz-Hernández¹, Saúl Rangel-Lara²

¹Universidad Politécnica del Valle de México, MÉXICO

<https://orcid.org/0000-0002-4461-8027> | jael2222@hotmail.com, raquel.munoz@upvm.edu.mx

²Universidad Politécnica del Valle de México, MÉXICO

<https://orcid.org/0000-0003-1498-340X> | industrial@upvm.edu.mx

Recibido 13-02-2020, aceptado 17-07-2020.

Resumen

El estudio se realizó con el personal de vigilancia y seguridad en una institución de educación superior del Estado de México, en ella se analizan factores relacionados a un requerimiento normativo que establece los elementos para identificar, analizar y prevenir los factores de riesgo psicosocial, así como para promover un entorno organizacional favorable en los centros de trabajo e incrementar la Productividad en el desempeño del personal de seguridad. El Proyecto se refiere a la sensibilización de la NOM-035-STPS-2018 que fue dada a conocer para consulta pública el 26 de octubre de 2016 y fue publicada el 23 de octubre del 2018, para entrar en vigor el 23 de octubre de 2019. El método estadístico aplicado fue el análisis de regresión entre la productividad en el desempeño administrativo (Variable suma de productos ya que en forma conceptual se expresa como la producción de recursos por unidad de tiempo), de las Variables de la Ergonomía Organizacional y para darle sustento explicativo a las variables, se utiliza una matriz de correlaciones entre las variables y los Método Ergonómicos RULA y OWAS. Los Resultados muestran que existe un alto riesgo para los trabajadores de seguridad de adquirir patologías a mediano y largo plazo.

Palabras clave: riesgo, violencia laboral, normatividad.

Abstract

The study was carried out in an institution of higher education in the State of Mexico, it analyzes factors related to a regulatory requirement that establishes the elements to identify, analyze and prevent psychosocial risk factors, as well as to promote a favorable organizational environment in work centers and increase productivity in the performance of security personnel. The Project refers to the sensitization of NOM-035-STPS-2018 that was released for public consultation on October 26, 2016 and was published on October 23, 2018, to enter into force on October 23, 2019 The Statistical Method applied was the Regression Analysis between productivity in administrative performance (Variable sum of products since in conceptual form it is expressed as the production of resources per unit of time), of the Variables of the Organizational Ergonomics and to give it explanatory support for the variables, a matrix of correlations between the variables and the Rula and OWAS Ergonomic Methods is used. The results show that there is a high risk for security workers to acquire pathologies in the medium and long term.

Index terms: risk, workplace violence, regulations.

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, con los avances tecnológicos, se ha incrementado la cantidad de industrias manufactureras, de servicios y de todo en los sectores de la sociedad a nivel mundial. Esto aumenta por consecuencia las fuentes de trabajo en todas las áreas, incluyendo el personal de seguridad con sus particulares implicaciones en riesgo laboral. La Organización Internacional del Trabajo (OIT) [1], reporta que anualmente ocurren más de 317 millones de accidentes en el trabajo y cada día mueren 6,300 personas a causa de accidentes o enfermedades relacionadas con el trabajo. El coste de esta adversidad diaria es enorme y la carga económica de las malas prácticas de seguridad y salud se estima en un cuatro por ciento del Producto Interno Bruto (PIB), global de cada año, implicando además de las pérdidas humanas, pérdidas financieras. En 2008, la OIT adoptó el Programa de Seguridad y Salud en el Trabajo y Medio Ambiente, que tiene como objetivo crear conciencia mundial sobre la magnitud y las consecuencias de los accidentes, las lesiones y las enfermedades relacionadas con el trabajo y los riesgos disergonómicos.

En la actualidad existe un considerable vacío en la aplicación de la ergonomía y solo se aplica en algunos puestos de trabajo del sector manufacturero, sin considerar que es una herramienta de prevención de accidentes y preservación de la salud de todo tipo de persona que realiza una actividad en el desempeño de sus funciones, contribuyendo a mejorar las condiciones de seguridad y salud en el trabajo y por consecuencia en el incremento de la productividad.

El presente estudio se desarrolla en una institución de educación superior pública en el estado de México, específicamente en el grupo de trabajadores de vigilancia que está conformado por personas en un rango de edades entre 45 y 65 años, los cuales tienen turnos de 24 por 24 horas, es decir, 24 horas de trabajo por 24 horas de descanso. Su trabajo consiste en resguardar las instalaciones, equipo, mobiliario, laboratorios, abrir y cerrar oficinas, y además recibir a los estudiantes al ingresar verificando que no introduzcan objetos peligrosos o no permitidos revisando las mochilas uno por uno.

También realizan recorridos constantemente por todas las áreas de la institución, sin importar las condiciones climatológicas. En sus recesos no cuentan con áreas asignadas especialmente para el consumo de alimentos o descanso, solo cuentan con las cabinas de entrada y salida para resguardarse de las inclemencias del tiempo, además de ser muy pequeñas donde solo pueden estar dos personas como máximo. La institución está ubicada en una zona recién urbanizada y es muy solitaria, por lo que ha sido propicia para la delincuencia; se han presentado asaltos a maestros y estudiantes y en ocasiones los vigilantes han tenido que intervenir exponiendo su vida, debido a que no todos cuentan con armas de cargo y solo pueden acceder a toletes o gas pimienta. Lo anterior ha desencadenado una serie de afectaciones en su salud, tales como hipertensión, diabetes, problemas articulares, entre otras; dando lugar a incapacidades y ausentismo. La empresa que los contrata es externa y no considera las condiciones en que están desempeñando sus funciones, tales como factores psicosociales y condiciones ambientales.

Las condiciones de seguridad y salud en el trabajo difieren enormemente entre países, sectores económicos y grupos sociales, inclusive entre tipos de trabajo y profesiones, aun cuando en el caso de México la Secretaría del Trabajo y Previsión Social (STPS), establece los mecanismos (Leyes, Reglamentos, Normas, entre otras), mediante los cuales se rigen las relaciones Laborales y de Seguridad y Salud así como el mantenerlos actualizados según las propias necesidades de la sociedad y vigilar el cumplimiento de los mismos; y están muy enfocados en la industria manufacturera por la importancia de las certificaciones necesarias para la exportación de productos. Pero en el caso de servicios, aún están muy olvidados algunos sectores y grupos vulnerables tales como el del presente estudio.

Cabe reconocer que legalmente las instituciones gubernamentales están trabajando en mejorar las condiciones de los trabajadores, entre las acciones más trascendentes se encuentran las reformas publicadas el día 13 de noviembre de 2014, en el Diario Oficial de la Federación (DOF, 2014), referentes al Reglamento Federal de Seguridad y Salud en el Trabajo, entrando en vigor el 13 de febrero de 2015. Con el cual se abrogó el Reglamento Federal de Seguridad, Higiene y Medio Ambiente de Trabajo del 21 de enero de 1997. Con el objetivo de establecer las disposiciones en materia de Seguridad y Salud en el Trabajo que deberán observarse en los Centros, a efecto de contar con las condiciones que permitan prevenir riesgos y de esa manera, garantizar

a los trabajadores el derecho a desempeñar sus actividades en entornos que seguro para su vida y su salud, con base en lo que señala la Ley Federal del Trabajo.

Lo anterior generó la entrada en vigor de otras Normas Oficiales Mexicanas como la NOM-035-1-2018-STPS referente a factores psicosociales y la NOM-036-2018-STPS que trata sobre movimientos repetitivos y los factores de riesgo ergonómico pueden conllevar sobre esfuerzo físico, movimientos o posturas forzadas en el desempeño de las actividades laborales, con la consecuente fatiga, errores, accidentes y enfermedades profesionales derivados del diseño de las instalaciones, maquinaria, equipo, herramientas o puesto de trabajo.

“El término ergonomía proviene de las palabras griegas *ergon* (trabajo) y *nomos* (ley, norma o doctrina); la primera referencia a la ergonomía aparece en el libro Compendio de Ergonomía [2]. La *International Ergonomics Association* (IEA, 2016), define la ergonomía como la disciplina científica que se ocupa de la comprensión de la interacción entre los seres humanos y los demás elementos de un sistema, entre los objetivos de la ergonomía está contemplado el logro de la satisfacción en el trabajo, considerando las responsabilidades, actitudes, creencias y valores para el desarrollo personal, así como las diferencias individuales y culturales. Otro enfoque es el que considera la ergonomía como un “elemento educativo del entorno, que facilita la interacción entre el individuo y su ambiente laboral; se traduce en mejor calidad de vida, reducción de posibles accidentes y enfermedades, incremento del bienestar, productividad, cuidado de la salud y medio ambiente” [3].

Considerando que para el desempeño de sus funciones los trabajadores de seguridad y vigilancia se ven sometidos a gran presión psicosocial y exigencia física, y con base en la NOM-035-STPS, en el presente estudio se analiza cómo se relaciona la ergonomía y el desempeño, en un sentido integral, en el que se incluyen aparatos, herramientas, materiales, métodos, con la finalidad de conocer la situación laboral que prevalece en los trabajadores y se enfoca principalmente a la productividad del desempeño, factores psicosociales y factores Ergonómicos, considerando que ésta disciplina está poco explotada en México y más aún, donde la función de un vigilante está expuesta a riesgos en su ámbito laboral, y son susceptibles a optimizar los recursos y condiciones laborales a través de una cultura ergonómica y en especial su vinculación con la administración.

Cabe destacar de acuerdo con Llana, que las quejas y demandas formuladas por los trabajadores referentes a las condiciones del ambiente físico, esconden problemas de origen psicosocial como la desmotivación, lo cual se refleja en la baja productividad y accidentabilidad en las empresas tanto manufactureras como de servicio [4].

La función de la Ergonomía en el diseño de lugares de trabajos y procesos cognitivos es controlar el impacto del entorno en el usuario y se basa en el principio de preservar la vida y la salud de las personas por encima de todo interés material y/o económico. Para lograrlo se establece adaptar el lugar del trabajo al trabajador y no a la inversa. Crear condiciones confortables, gratas y sobre todo seguras, así como un ambiente de cordialidad, que brinde al trabajador un sentido de pertenencia, aprecio por su trabajo y cuidado de su persona. Las condiciones adecuadas en la estación de trabajo que facilitan la realización de actividades, sin exponer la salud del trabajador, minimizan el ausentismo por enfermedad o por desmotivación, dando continuidad al flujo de procesos con un mejor desempeño e incremento de la productividad.

II. DESARROLLO

Los factores de riesgo psicosocial son aquellos que pueden provocar trastornos de ansiedad, no orgánicos del ciclo sueño-vigilia y de estrés grave y de adaptación, derivado de la naturaleza de las funciones del puesto de trabajo, el tipo de jornada de trabajo y la exposición a acontecimientos traumáticos severos o a actos de violencia laboral al trabajador, por el trabajo desarrollado. [5]

En el estudio se analizan factores relacionados con el requerimiento de la NOM-035-STPS, que fue dada a conocer para consulta pública el 26 de octubre de 2016 y fue publicada el 23 de octubre del 2018, para entrar en vigor el 23 de octubre de 2019. Cabe señalar que, algunos requisitos (5.2, 5.3, 5.6, 5.8, 8.3, 8.4, 8.5, y Capítulo 7) serán de cumplimiento obligatorio hasta el 23 de octubre de 2020. [6].

En ella se establecen los elementos para identificar, analizar y prevenir los factores de riesgo psicosocial, así como para promover un entorno organizacional favorable en los centros de trabajo e incrementar la Productividad en el desempeño administrativo.

Para analizar las variables establecidas, se llevó a cabo el método Estadístico de Análisis de regresión para verificar la incidencia entre la variable productividad en el desempeño administrativo (Variable suma de productos ya que en forma conceptual se expresa como la producción de recursos por unidad de tiempo), y las Variables de la Ergonomía Organizacional; para darle sustento explicativo a las variables, se utiliza una matriz de correlaciones entre las variables y los Método Ergonómicos Rula (Rapid Upper Limb Assessment) para la evaluación ergonómica de la carga postural en las extremidades superiores y OWAS (Ovako Working Analysis System), su objetivo consiste en una evaluación del riesgo de carga postural en términos de frecuencia por gravedad [7].

En los últimos años, debido a la violencia que se ha desatado en el país, el personal de seguridad está sometido con mayor frecuencia al distrés laboral, que se conoce como el estrés desagradable, de acuerdo a la asociación española de seguridad ocupacional Prevencionar (2018), es un estrés que ocasiona un exceso de esfuerzo en relación a la carga de trabajo y va acompañado siempre de un desorden fisiológico, aceleración de las funciones, hiperactividad, acortamiento muscular, somatizaciones, en suma: envejecimiento prematuro, mismos que se ha asociado con el incremento de las exigencias laborales que tienen que ser asumidas con la finalidad de mejorar el salario y en la participación en diversos programas por estímulos económicos. [8]

Existen referencias anteriores de estudios similares sobre las presiones a las cuales se ven sometidos los trabajadores de la Universidad Autónoma Metropolitana, aun cuando fue aplicado a profesores y administrativos, refleja que un trabajo de servicios no es tan relajado como aparenta; en dichos estudios se recopiló la cuantificación porcentual de los daños encontrando los siguientes resultados: la migraña fue de 23%, la disfonía con 38% , un tercio de su población se sentía fatigado todo el tiempo; la fatiga neurovisual 25%, cefalea tensional de 24%, problemas para conciliar el sueño 32%, trastornos músculo-esqueléticos 38% y los lumbares 26%. El estrés laboral también es generado por permanecer más tiempo de la jornada laboral en el mismo lugar y éste trastorno también se presentó en la población UNAM, asociado al hecho de recibir órdenes confusas y poco claras por parte del jefe [9].

También es muy importante considerar el costo beneficio de las aplicaciones ergonómicas y su incidencia en la productividad para incentivar las aplicaciones Ergonómicas se debe justificar su rentabilidad. Para ello existen diversos métodos, y uno de ellos es el método Occupational Repetitive Action (OCRA), método de evaluación del riesgo de movimientos repetitivos en extremidades superiores. Los niveles de riesgo permiten una ponderación y una de las ventajas es que se pueden identificar el porcentaje de trabajadores con riesgo de adquirir daños acumulativos y que potencialmente, van disminuyendo su productividad de forma paulatina y adquiriendo así mismo una enfermedad profesional.

Otro factor relevante es que la matrícula estudiantil incrementa sin que la planta laboral crezca en la misma proporción y en ocasiones tiende a disminuir. Este conjunto de hechos racionaliza recursos económicos e instrumentales de los trabajadores, aumentando la carga con la consecuencia de afectar su productividad con riesgo de dañar también su salud física y mental. Para su análisis se dividió en Ergonomía Ambiental, Ergonomía Física y Ergonomía del Factor Humano, los cuales se explican a continuación:

- Ergonomía ambiental: Es la rama de la Ergonomía, especializada en el estudio de los factores ambientales, generalmente físicos, que constituyen el entorno del sistema formado por la persona y el equipo de trabajo y su influencia en los aspectos relacionados con la seguridad, la eficiencia y la confortabilidad. Incluye el estudio de los ambientes térmico, visual, acústico, mecánico, electromagnético y de distribución del puesto de trabajo [10].
- Ergonomía Física: Se preocupa de las características anatómicas, antropométricas, fisiológicas y biomecánicas del usuario, en tanto que se relacionan con la actividad física [11].
- Ergonomía del Factor Humano: Es la disciplina científica relacionada con el conocimiento de la interacción entre el ser humano y otros elementos de un sistema, y la profesión que aplica la teoría, principios, datos y métodos para diseñar buscando optimizar el bienestar humano y la ejecución del Sistema Global. Condiciones que se encuentran presentes en una situación laboral y que están directamente relacionadas con la organización, el contenido del trabajo y la realización de la tarea, y

que tienen capacidad para afectar tanto al bienestar o a la salud (física, psíquica o social) del trabajador como al desarrollo del trabajo [6].

Debido a que en la investigación se evalúan, condiciones ambientales y puestos de trabajo, la muestra se enfocó a trabajadores de seguridad y vigilancia, por contar con las características requeridas; sin embargo, no se incluyó a todos; la investigación se vio limitada por los tiempos de trabajo del personal. Se identificaron los factores de Ergonomía Organizacional, que a continuación se presentan:

5

Ergonomía del Factor humano.

- Sexo
- Edad
- Participación, implicación, responsabilidad
- Formación, comunicación e Información
- Gestión de tiempo
- Cohesión de grupo

Ergonomía Ambiental.

- Ambiente luminoso
- Ambiente térmico
- Ambiente sonoro

Ergonomía Física.

- Postura estática
- Postura dinámica
- Repeticiones
- Carga mental
- Gasto metabólico
- Antropometría

A. Método

La muestra se conformó de 31 trabajadores, en representación del 41% de la población total, como base para estudios posteriores; fueron encuestados todos los participantes de la muestra seleccionada, con el propósito de obtener información confiable, en los parámetros estadísticos de la Productividad del desempeño, en relación con la Ergonomía Organizacional. Un instrumento de medición, según [1] es, en principio, cualquier recurso de que se vale el investigador para acercarse a los fenómenos y extraer de ellos información. De este modo, el instrumento sintetiza en sí toda la labor previa de investigación: resume los aportes del marco teórico al seleccionar datos que corresponden a los indicadores y, por lo tanto, a las variables o conceptos utilizados.

1) Instrumentos de evaluación

El Instrumento de medición referente a la evaluación de Ergonomía Organizacional fue adaptado por la autora con base en el Manual para la evaluación y prevención de riesgos ergonómicos y psicosociales en la PYME del Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT, 2014), del Ministerio del Trabajo y asuntos sociales, específicamente en las listas de comprobación básica de la colección Cuestionarios; y en la Normatividad vigente en México de la STPS (2014), referentes al Ruido (NOM-011-STPS-2011), Temperaturas (NOM-015-STPS-2011) y Luminiscencia (NOM-025-STPS-2001).

También se aplica para la Ergonomía del Factor Humano el Instrumento de Factores Psicosociales, identificación de situaciones de riesgo, del Instituto Navarro de Salud Laboral, el cual se adaptó para la aplicación de la NOM-035-1-2018-STPS; cabe hacer mención que la Norma establece dos tipos de

cuestionarios: uno para trabajadores con vivencia de hechos traumáticos y el segundo sin hechos traumáticos, en la presente investigación por ser el estudio inicial se aplicó sin eventos traumáticos y en futuros estudios se abordarán ambos cuestionarios. En el Instrumento se identifican cuatro variables relacionadas con el entorno laboral y que afectan a la salud del trabajador y al desarrollo de la tarea a realizar. Consta de 30 preguntas las cuales se muestran en el Anexo 1 [12].

Estas variables son:

- Participación, Implicación, Responsabilidad.
- Formación, Información, Comunicación.
- Gestión del tiempo.
- Cohesión de grupo.

Este método de evaluación tiene como objetivo obtener información, respecto a las cuatro variables anteriores, que permita detectar situaciones en la organización desfavorables o muy insatisfactorias, que pueden ser fuente de riesgo para la salud de los trabajadores. Con el análisis de los resultados obtenidos se adquiere una visión general de la empresa respecto a los factores de riesgo psicosocial. [13]

Se pretende que esto sea el punto de partida para una evaluación específica más concreta en aquellas áreas en las que aparezcan aspectos deficitarios. Además de los cuatro factores mencionados anteriormente, se han incluido tres preguntas con el objetivo de reconocer la vulnerabilidad a la existencia de hostigamiento psicológico en el trabajo. La metodología se basa en la aplicación de una serie de cuestionarios en la empresa a una muestra representativa de la plantilla (se recomienda una muestra en torno al 20-30% del total), condición que se cumple en la presente investigación.

Los resultados obtenidos en cada cuestionario se trasladan a una hoja de valoración y de categorización que permite diagnosticar. El cuestionario lo componen 30 preguntas, con varias alternativas de respuesta y una opción de respuesta cualitativa (Observaciones) que posibilita una aclaración de la respuesta aportada y se han agrupado en cuatro variables con sus respectivos factores: [10]

a) Participación, Implicación, Responsabilidad

Especifica el grado de libertad e independencia que tiene el trabajador para controlar y organizar su propio trabajo y para determinar los métodos a utilizar, teniendo en cuenta siempre los principios preventivos. Define el grado de autonomía del trabajador para tomar decisiones. Se entiende que un trabajo saludable debe ofrecer a las personas la posibilidad de tomar decisiones.

En la dimensión Participación, Implicación, Responsabilidad se han integrado estos factores:

- Autonomía
- Trabajo en equipo
- Iniciativa
- Control sobre la tarea
- Control sobre el trabajador
- Rotación
- Supervisión
- Enriquecimiento de tareas

Las preguntas del cuestionario que se refieren a esta variable son: 1, 2, 8, 9, 13, 18, 19, 20 y 25.

b) Formación, Información, Comunicación

Se refiere al grado de interés personal que la organización demuestra por los trabajadores, facilitando el flujo de información es necesarias para el correcto desarrollo de las tareas. Las funciones y/o atribuciones de cada persona, dentro de la organización, tienen que estar bien definidas para garantizar la adaptación óptima entre

los puestos de trabajo y las personas que los ocupan. En el área de Formación, Información, Comunicación se han incorporado los siguientes aspectos:

- Flujos de comunicación
- Acogida
- Adecuación persona-trabajo
- Reconocimiento
- Adiestramiento
- Descripción de puesto de trabajo
- Aislamiento

7

Las preguntas del cuestionario que se refieren a esta variable son: 4, 5, 11, 16, 17, 24 y 26.

c) Gestión de tiempo

Establece el nivel de autonomía concedida al trabajador para determinar la cadencia y ritmo de su trabajo, la distribución de las pausas y la elección de las vacaciones de acuerdo con sus necesidades personales. En la dimensión Gestión del Tiempo se han integrado estos factores:

- Ritmo de trabajo
- Apremio de tiempo
- Carga de trabajo
- Autonomía temporal
- Fatiga

Las preguntas del cuestionario que se refieren a esta variable son: 3, 10, 14, 15 y 22.

d) Cohesión de grupo

Definimos cohesión como el patrón de estructura del grupo, de las relaciones que emergen entre los miembros del grupo. Este concepto incluye aspectos como solidaridad, atracción, ética, clima o sentido de comunidad. La influencia de la cohesión en el grupo se manifiesta en una mayor o menor participación de sus miembros y en la conformidad hacia la mayoría.

La variable Cohesión de grupo contiene los siguientes aspectos:

- Clima social
- Manejo de conflictos
- Cooperación
- Ambiente de trabajo

Las preguntas del cuestionario que se refieren a esta variable son: 6, 7, 12, 21, 23 y 27.

2) Hostigamiento psicológico (mobbing)

El hostigamiento psicológico en el trabajo hace referencia a aquellas situaciones en las que una persona o un grupo de personas ejerce un conjunto de comportamientos caracterizados por una violencia psicológica extrema, de forma sistemática y durante un tiempo prolongado, sobre otra persona en el lugar de trabajo.

El efecto que se pretende alcanzar es el de intimidar, apocar, reducir y consumir emocional e intelectualmente a la víctima, con vistas a eliminarla de la organización. Las preguntas del cuestionario que se refieren a esta variable son: 28, 29 y 30.

Importante: En el supuesto de obtener un punto en alguna de estas tres preguntas se debe profundizar con un cuestionario específico sobre identificación de hostigamiento psicológico en el trabajo con el fin de descartar la posibilidad de que se esté dando esta situación, por sus nefastas consecuencias. [10]

Recursos

Equipo de medición de Condiciones ambientales.

- Unidad Central de Procesamiento: Science cube Pro.
- Sensor de temperatura.
- Sensor de luz.
- Sensor de ruido.

III. RECOLECCIÓN DE DATOS

∞

Se analizaron cada uno de los métodos de evaluación ergonómica para identificar cuál era el más apropiado para esta investigación, optando por elegir la lista de revisión (*check list*) ya que es un instrumento práctico, rápido y fácil de utilizar para revisar las condiciones de riesgo ergonómico a los que se somete un usuario al desarrollar una actividad, proporcionan la información preliminar que permite identificar las principales áreas o condiciones de riesgo a evaluar con mayor detalle, repeticiones, posturas, condiciones, entre otros factores. Para la aplicación se llevó a cabo una visita a cada uno de los puestos a estudiar, para conocer el proceso de trabajo, las tareas que se llevan a cabo en la organización y características de trabajo se seleccionaron a personas puestos y momentos de la jornada.

Previamente, fue necesario establecer claramente con qué criterios se realizaría esta selección, por lo tanto se recabó información referente al tipo de plaza, cantidad de horas laborables y tipo de personal para poder facilitar la selección de la muestra, para lo cual se realizaron una serie de observaciones y entrevistas generales acerca de los diversos aspectos que son base del procedimiento a seguir., así mismo se aplicó la lista de comprobación básica del sitio de trabajo modificada del Check List emitido por la *Occupational Safety and Health Administration* (OSHA, 2003), debido a la diversidad de horarios y funciones del personal del área de estudio, una vez seleccionado los criterios se pudo aplicar al trabajo de investigación a 35 trabajadores de la siguiente manera:

El Test de Autoevaluación de Puestos de Trabajo, en forma de entrevista para responder las dudas que fueran saliendo durante la aplicación.

La evaluación del ambiente luminoso se realizaron mediciones en los puestos de trabajo seleccionados, utilizando como equipo un medidor de luminancia, el cual proporciona datos de iluminación en luxes, con la siguiente escala:

- Inadecuada
- Insuficiente
- Suficiente
- Adecuada
- Muy adecuada

IV. RESULTADOS

En el aspecto de la vibración es de 4.3 HTZ, y con base a la NORMA-024-STPS-2001 [8], se muestra la Tabla 1 y el trabajador se encuentra laborando en un estado óptimo lo cual indica que está en el rango aceptable.

El valor de la iluminación es de 158.92 lux, se realiza a la intemperie, permaneciendo alrededor de 5 horas al día y con algunos lapsos de descansos en algún lugar sombreado y de acuerdo con lo establecido en la norma el rango aceptable para realizar su trabajo.

La condición a la que está trabajando es de 99 dB durante 4 horas, y de acuerdo con la norma como se observa en la tabla nos indica que están sobrepasando el límite permisible de exposición.

TABLA 1
CONDICIONES AMBIENTALES

Medidas tomadas por la mañana		Medidas tomadas a medio día	
Ruido	64 dB	Ruido	109.89 dB
Humedad Relativa	97.2 HR	Humedad Relativa	62.7HR
Iluminación	107.52 Lux	Iluminación	158.92 Lux
Temperatura	17.90 °C	Temperatura	22.50 °C
Vibración	4.3 Hz	Vibración	4.4 Hz
Frecuencia cardiaca	101.21 ps	Frecuencia cardiaca	108.9 ps

La validación y correlación se muestran en las pruebas de normalidad obtenidas como se muestra en la Tabla 2.

TABLA 2
PRUEBAS DE NORMALIDAD

	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Productividad	.059	246	.095	.993	246	.350
Ergonomía Organizacional	.054	246	.078	.993	246	.268

La estimación de correlación lineal entre la Ergonomía y la Productividad tiene un coeficiente de determinación alto con un nivel del 85.5%, como se observa en el análisis de la Tabla 3.

TABLA 3
RESUMEN DEL MODELO Y ESTIMACIONES DE LOS PARÁMETROS

Resumen del modelo						Estimaciones de los parámetros	
Ecuación	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante	b1
Lineal	,855	15,441	1	28	,001	,105	1,984

Variable dependiente: Productividad | Variable independiente Ergonomía

Con los datos obtenidos en la correlación y el modelo de estimación de los parámetros se llevó a cabo la interpolación de las variables para identificar la tendencia entre las variables (véase Fig. 1).

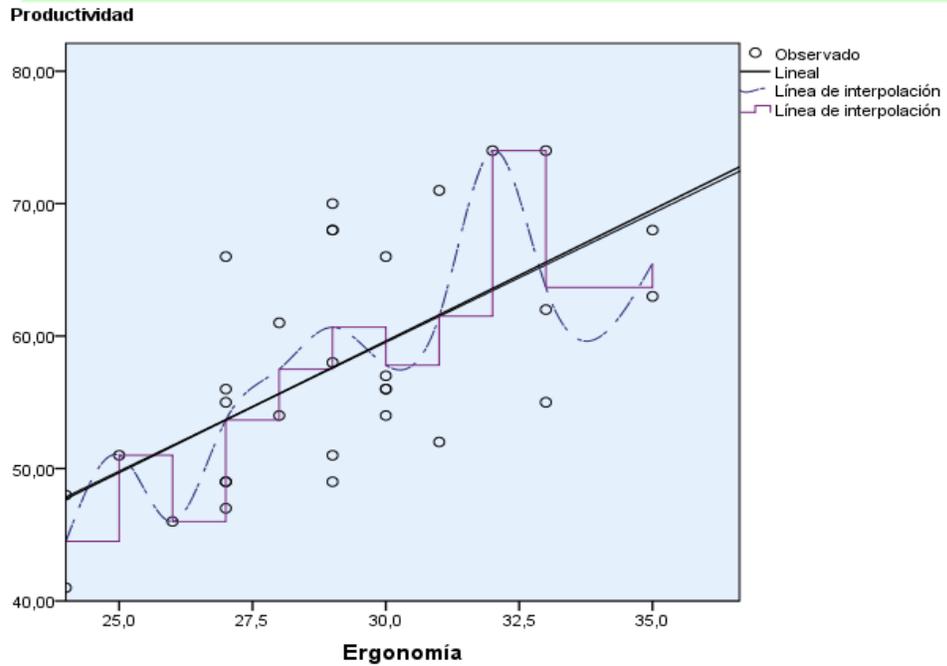


Fig. 1. Análisis de relación entre Ergonomía y Productividad.

En la institución la mayoría de los elementos de seguridad y vigilancia predomina el género masculino (véase Fig. 2).

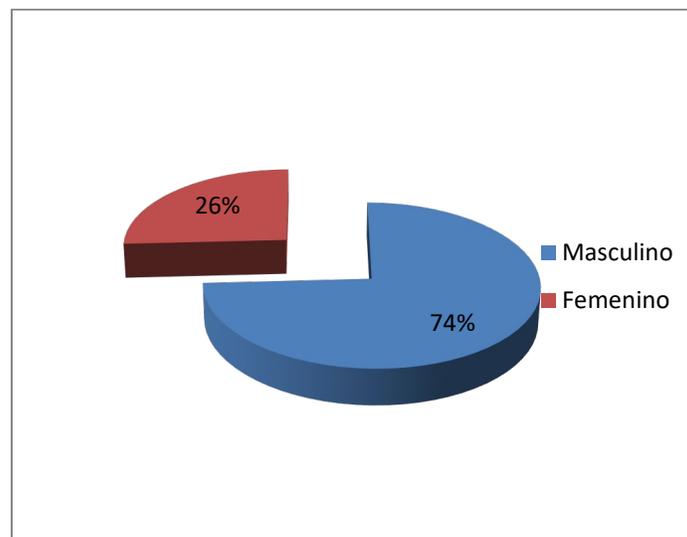


Fig. 2. Distribución por género.

Destaca que las edades de los trabajadores de seguridad y vigilancia por encima de los 50 años (véase Fig. 3).

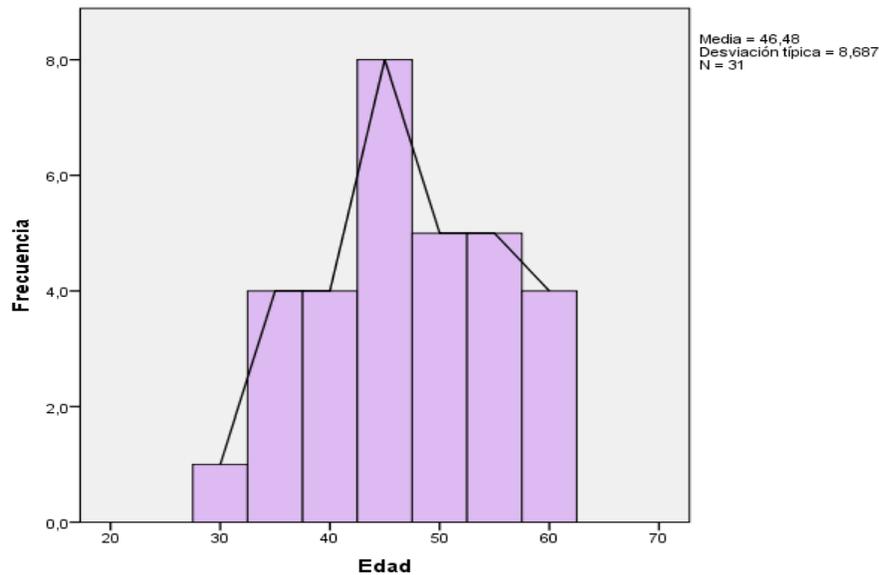


Fig. 3. Histograma de tendencia por edades.

Para llevar a cabo la evaluación de los movimientos en el método RULA se utilizó el formato diseñado por Ergonomics Plus Inc. [14] (véase Fig. 4).

ERGONOMICS P.L.U.S. **RULA Employee Assessment Worksheet** Task Name: _____ Date: _____

A. Arm and Wrist Analysis

Step 1: Locate Upper Arm Position: +1, +2, +2, +3, +4. **Upper Arm Score: 3**

Step 2: Locate Lower Arm Position: +1, +2. **Lower Arm Score: 2**

Step 3: Locate Wrist Position: +1, +2, +3. **Wrist Score: 4**

Step 4: Wrist Twist: +1, +2. **Wrist Twist Score: 2**

Step 5: Look-up Posture Score in Table A: **5**

Step 6: Add Muscle Use Score: **0**

Step 7: Add Force/Load Score: **2**

Step 8: Find Row in Table C: **7**

Table A: Wrist Score

Upper Arm	Lower Arm	Wrist Twist	Wrist Twist	Wrist Twist	Wrist Twist
1	1	1	2	2	2
1	2	2	2	2	3
1	3	2	2	2	3
1	4	2	2	2	3
2	1	2	3	3	3
2	2	2	3	3	3
2	3	2	3	3	3
2	4	2	3	3	3
3	1	2	3	3	3
3	2	2	3	3	3
3	3	2	3	3	3
3	4	2	3	3	3
4	1	2	3	3	3
4	2	2	3	3	3
4	3	2	3	3	3
4	4	2	3	3	3
5	1	2	3	3	3
5	2	2	3	3	3
5	3	2	3	3	3
5	4	2	3	3	3
6	1	2	3	3	3
6	2	2	3	3	3
6	3	2	3	3	3
6	4	2	3	3	3

Table B: Neck, Trunk and Leg Analysis

Step 9: Locate Neck Position: +1, +2, +3, +4. **Neck Score: 3**

Step 10: Locate Trunk Position: +1, +2, +3, +4. **Trunk Score: 2**

Step 11: Legs: +1, +2. **Leg Score: 1**

Table B: Trunk Posture Score

Neck Posture Score	1	2	3	4	5	6
1	1	2	3	4	5	6
2	2	3	4	5	6	7
3	3	3	4	5	6	7
4	4	4	4	5	6	7
5	5	5	5	6	7	8
6	6	6	6	6	7	8
7	7	7	7	7	8	8
8	8	8	8	8	8	8
9	9	9	9	9	9	9

Table C: Neck, Trunk, Leg Score

Neck	Trunk	Leg	Score
1	1	1	2
1	2	1	3
1	3	1	4
1	4	1	5
1	5	1	6
1	6	1	7
2	1	1	3
2	2	1	4
2	3	1	5
2	4	1	6
2	5	1	7
2	6	1	8
3	1	1	4
3	2	1	5
3	3	1	6
3	4	1	7
3	5	1	8
3	6	1	9
4	1	1	5
4	2	1	6
4	3	1	7
4	4	1	8
4	5	1	9
4	6	1	10
5	1	1	6
5	2	1	7
5	3	1	8
5	4	1	9
5	5	1	10
5	6	1	11
6	1	1	7
6	2	1	8
6	3	1	9
6	4	1	10
6	5	1	11
6	6	1	12
7	1	1	8
7	2	1	9
7	3	1	10
7	4	1	11
7	5	1	12
7	6	1	13

Final RULA Score = 7

Fig. 4. Resultados Método RULA. Fuente: Formato de Ergonomics Plus Inc. [14].

Los resultados del cuestionario en cada uno de los criterios mostraron la necesidad de tomar medidas para un mejor clima laboral:

- ✓ Participación, Implicación, Responsabilidad: **Adecuada**
- ✓ Formación, Información, Comunicación: **Deficiente**
- ✓ Gestión del Tiempo: **Insuficiente**
- ✓ Cohesión de Grupo: **Inadecuada**

V. CONCLUSIONES

Se encontró un alta correlación entre los factores de Ergonomía Organizacional y los efectos en la salud física, mental y emocional de los trabajadores, lo cual implica la gran necesidad de considerar cambios en las unidades y centro de trabajo rediseñando, acondicionando y evaluando conforme a la normatividad vigente de la Secretaría del Trabajo y Previsión Social, se identificaron riesgos psicosociales internos y externos en que se desempeñan los trabajadores; además se requiere un estudio más exhaustivo por puesto de trabajo y a todos los niveles de la organización para que los cambios sean integrales y así evitar ambientes nocivos tanto físicos, como organizacionales y humanos.

Con base en la evaluación a través del Método RULA se analizaron las extremidades superiores y con el método OWAS se analizaron brazos, tronco, piernas, cabeza la puntuación obtenida es la más alta en ambos métodos, lo que implica que el trabajador presente fatiga muscular por posturas forzadas, es decir, que una o varias regiones anatómicas dejan de estar en una posición natural de confort y pasan a una posición (forzada) que genera hiperextensiones, hiperflexiones o hiperrotaciones, osteoarticulares con la consecuente producción de lesiones por sobrecarga y Disfunciones Traumático Acumulativas (DTA); existen numerosas actividades en las que el trabajador de seguridad puede adoptar posturas forzadas, siendo comunes bipedestación o sedestación prolongadas [9].

En la ergonomía física, las condiciones ambientales en lo referente al ruido sobrepasan los límites aceptables establecidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-011-STPS-2001, ocasionando que los trabajadores estén expuestos a stress, irritabilidad, hipertensión arterial y puede estar asociado a otras situaciones de riesgo como cardiopatías.

La zona donde se ubica la institución, como ya se mencionó, es aislada y con poca afluencia por lo cual es vulnerable a delincuencia y vandalismo. Es muy importante enfatizar que la siniestralidad causa grandes efectos de stress, irritabilidad, hipertensión arterial y temor al desempeñar sus funciones cotidianas, además no se han establecido oficialmente protocolos de seguridad y el equipo de protección es escaso o nulo, dependiendo la antigüedad del trabajador; tales como armas de cargo, chalecos salvavidas, escudos ante manifestaciones estudiantiles y todo lo relacionado con equipo de protección personal, esto genera una gran tensión y sentimiento de vulnerabilidad como lo han expresado, y somatizado en malestares y deterioro de su salud. [13].

Con lo que se puede concluir que la suma de riesgo por factores psicosociales según lo contemplado en la NOM-035-1-2018-STPS, confirma la existencia de alto riesgo en el desempeño de la actividad y su incidencia en el desempeño y productividad. Resulta importante que se consideren los aspectos mencionados debido a que la salud de los trabajadores se encuentra expuesta con diversos factores, es necesario una intervención ergonómica para evitar riesgo de adquirir, enfermedades, lesiones y accidentes en las áreas de trabajo, además de proporcionar seguridad y confort al trabajador, lo cual se verá reflejado en mayor fidelización y mejor desempeño laboral.

REFERENCIAS

- [1] E. Apud, F. Meyer, "La importancia de la ergonomía para los profesionales de la salud," *Ciencia y enfermería*, vol. 9, no. 1, pp. 15-20, 2003, doi: <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-95532003000100003>
- [2] J. L. González, *Lesiones musculoesqueléticas*, 2007, available: <http://www.ergocupacional.com/4910/57873.html>
- [3] Universidad Politécnica de Valencia, *Métodos de evaluación de la ergonomía de puestos de trabajo*, Ergonautas, 2006, available: <https://www.ergonautas.upv.es/metodos-evaluacion-ergonomica.html>

- [4] J. Llanea-Álvarez, *Ergonomía y psicosociología aplicada. Manual para la formación del especialista*, 10ª ed., Valladolid, LEX NOVA, España, 2008.
- [5] B. Moreno, “Factores y riesgos laborales psicosociales: conceptualización, historia y cambios actuales,” *Medicina y Seguridad del Trabajo*, vol. 57, no.1, pp. 4-19, 2011, doi: <http://dx.doi.org/10.4321/S0465-546X2011000500002>
- [6] Diario Oficial de la Federación, 30 diciembre 2019, available: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5541828&fecha=23/10/2018
- [7] J. A. Diego-Mas, *Evaluación Postural Mediante El Método OWAS*, Ergonautas, Universidad Politécnica de Valencia, 2015, available: <https://www.ergonautas.upv.es/metodos/owas/owas-ayuda.php>
- [8] M. A. Carranza, Secretaría del Trabajo y Prevención Social, 14 junio 2019, available: <http://www.stps.gob.mx/bp/secciones/dgsst/normatividad/normas/Nom-015.pdf>
- [9] M. A. Carranza, Diario Oficial de la Federación, 01 noviembre 2002, available: http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=737289&fecha=11/01/2002
- [10] D. Prado, *La fatiga física y su recuperación*, 2019, available: <http://www.imf-formacion.com/blog/prevencion-riesgos-laborales/actualidad-laboral/la-fatiga-fisica-y-su-recuperacion/>
- [11] Instituto Nacional de Seguros, *Principios de Ergonomía*, 2012, available: https://www.ins-cr.com/media/2631/1007800_principiosdeergonomc3ada_web.pdf
- [12] M. Lahera, J. J. Góngora, *Factores Psicosociales. Identificación de situaciones de riesgo*, INSL, Navarra, España, 2014.
- [13] L. Mertens, M. Falcón, *Salud y seguridad en el trabajo y el papel de la formación en México*, CEPAL, Santiago de Chile, 2004.
- [14] Ergonomic Plus Inc, *RULA: A Step-by-Step Guide*, 2019, Ergonomics Plus Inc., www.ergo-plus.com

ANEXO 1

INSTRUMENTO DE FACTORES PSICOSOCIALES, IDENTIFICACIÓN DE SITUACIONES DE RIESGO, DEL INSTITUTO NAVARRO DE SALUD LABORAL (INSL)

FACTORES PSICOSOCIALES

IDENTIFICACIÓN DE SITUACIONES DE RIESGO

14

Este cuestionario pretende obtener una visión global de su organización respecto a los factores de riesgo de tipo psicosocial.

A continuación le presentamos una serie de preguntas con varias alternativas de respuesta. Desde un punto de vista general, elija la opción que más se acerque a su empresa.

Le informamos de que cualquier dato que usted aporte en el cuestionario será tratado de manera CONFIDENCIAL.

En cada pregunta le ofrecemos un apartado denominado OBSERVACIONES, utilícelo siempre que desee hacer alguna aclaración o puntualización al respecto, cuando necesite explicar alguna de sus opciones o cuando la alternativa escogida no englobe a la totalidad de las personas que forman parte de su empresa.

Ante cualquier duda que le surja durante la ejecución de la encuesta, no dude en pedir cualquier aclaración o información adicional.

Muchas gracias por su colaboración.

DATOS RELATIVOS A LA EMPRESA

Actividad a la que se dedica:

Sector al que pertenece:

Jornada laboral **1 turno 2 turnos 3 turnos MIXTO**

Pregunta 1

¿Usted como trabajador de seguridad tiene libertad para decidir cómo hacer su propio trabajo?

- A. No.
- B. Sí, ocasionalmente.
- C. Sí, cuando la tarea se lo permite.
- D. Sí, es la práctica habitual.

A B C D

Pregunta 2

Existe un procedimiento de atención a las posibles sugerencias y/o reclamaciones planteadas por los trabajadores?

- A. No, no existe.
- B. Sí, aunque en la práctica no se utiliza.
- C. Sí, se utiliza ocasionalmente.
- D. Sí, se utiliza habitualmente.

A B C D

Pregunta 3

¿Usted como trabajador de seguridad tiene la posibilidad de ejercer el control sobre su ritmo de trabajo?

- A. No.
- B. Sí, ocasionalmente.
- C. Sí, cuando la tarea se lo permite.
- D. Sí, es la práctica habitual.

A B C D

Pregunta 4

¿Usted como trabajador de seguridad dispone de la información y de los medios necesarios (equipo, herramientas, etc.) para realizar su tarea?

- A. No.
- B. Sí, algunas veces.
- C. Sí, habitualmente.
- D. Sí, siempre.

A B C D

Pregunta 5

Ante la incorporación de nuevos trabajadores, ¿se les informa de los riesgos generales y específicos del puesto?

- A. No.
- B. Sí, oralmente.
- C. Sí, por escrito.
- E. Sí, por escrito y oralmente

A B C D

Pregunta 6

Cuando usted como trabajador de seguridad necesita ayuda y/o tiene cualquier duda acude a:

- A. Un compañero de otro puesto.
- B. Una persona asignada. (mantenimiento,
- C. Un encargado y/o jefe superior.
- D. No tiene esa opción por cualquier motivo.

A B C D

Pregunta 7

Las situaciones de conflictividad entre trabajadores, ¿se intentan solucionar de manera abierta y clara?

- A. No.
- B. Sí, por medio de la intervención del mando.
- C. Sí, entre todos los afectados.
- D. Sí, mediante otros procedimientos.

A B C D

Pregunta 8

¿Pueden los trabajadores elegir sus días de vacaciones?

- A. No, la empresa cierra por vacaciones en periodos fijos.
- B. No, la empresa distribuye periodos vacacionales, sin tener en cuenta las necesidades de los trabajadores.
- C. Sí, la empresa concede o no a demanda del trabajador.
- D. Sí, los trabajadores se organizan entre ellos, teniendo en cuenta la continuidad de la actividad

A B C D

Pregunta 9

¿Usted como trabajador de seguridad interviene y/o corrige los incidentes en su puesto de trabajo (equipo, máquina, etc.)?

- A. No, es función del mando superior o persona encargada.
- B. Sí, sólo incidentes menores afectados.
- C. Sí, cualquier incidente.

A B C

Pregunta 10

¿Usted como trabajador de seguridad tiene posibilidad de realizar pausas dependiendo del esfuerzo (físico y/o mental) requerido por la actividad?

- A. No, por la continuidad del proceso.
- B. No, por otras causas.
- C. Sí, las establecidas.
- D. Sí, según necesidades.

A B C D

Pregunta 13

La actuación del mando intermedio respecto a sus subordinados es:

- A. Únicamente marca los objetivos individuales a alcanzar por el trabajador.
- B. Colabora con Usted como trabajador de seguridad en la consecución de fines.
- C. Fomenta la consecución de objetivos en equipo.

A B C D

Pregunta 16

¿Se facilitan las instrucciones precisas a los trabajadores sobre el modo correcto y seguro de realizar las tareas?

- A. No.
- B. Sí, de forma oral.
- C. Sí, de forma escrita (instrucciones).
- D. Sí, de forma oral y escrita.

A B C D

Pregunta 11

¿Se utilizan medios formales para transmitir informaciones y comunicaciones a los trabajadores?

- A. No.
- B. Charlas, asambleas.
- C. Comunicados escritos. Sí, medios orales y escritos

A B C D

Pregunta 14

¿Se recuperan los retrasos?

- A. No.
- B. Sí, durante las pausas.
- C. Sí, incrementando el ritmo de trabajo.
- D. Sí, alargando la jornada

A B C D

Pregunta 17

¿Usted como trabajador de seguridad tiene la posibilidad de hablar durante la realización de su tarea?

- A. No, por la ubicación del trabajador.
- B. No, por el ruido.
- C. No, por otros motivos.
- D. Sí, algunas palabras.
- E. Sí, conversaciones más largas

A B C D E

Pregunta 12

En términos generales, ¿el ambiente de trabajo posibilita relaciones amistosas?

- A. No.
- B. Sí, a veces.
- C. Sí, habitualmente.
- D. Sí, siempre

A B C D

Pregunta 15

¿Cuál es el criterio de retribución al trabajador?

- A. Salario por hora (fijo).
- B. Salario más prima colectiva.
- C. Salario más prima individual.

A B C

Pregunta 18

¿Han recibido los mandos intermedios formación para el desempeño de sus funciones?

- A. No
- B. Sí, aunque no ha habido cambios significativos en el estilo de mando.
- C. Sí, algunos mandos han modificado sus estilos significativamente.
- D. Sí, la mayoría ha modificado su estilo de mando.

A B C D

Pregunta 19

¿Existe la posibilidad de organizar el trabajo en equipo?

- . No.
- . Sí, cuando la tarea se lo permite.
- . Sí, en función del tiempo disponible.
- . Sí, siempre se hace en equipo

A B C D

Pregunta 20

¿Usted como trabajador de seguridad controla el resultado de su trabajo y puede corregir los errores cometidos o defectos?

- A.** No.
- B.** Sí, ocasionalmente.
- C.** Sí, habitualmente.
- D.** Sí, cualquier error.

A B C D

Pregunta 21

¿Se organizan, de forma espontánea, eventos en los que participa la mayoría de la plantilla?

- . En términos generales, ¿el ambiente de trabajo posibilita relaciones No.
- . Sí, una o dos veces al año.
- . Sí, varias veces al año, según surja el motivo.

A B C

Pregunta 22

¿Usted como trabajador de seguridad puede detener el trabajo o ausentarse de su puesto?

- A.** No, por el proceso productivo.
- B.** No, por otros motivos.
- C.** Sí, con un sustituto.
- D.** Sí, sin que nadie le sustituya.

A B C D

Pregunta 23

¿Existe en general un buen clima laboral en su lugar de trabajo?

- A.** No.
- B.** Sí, a veces.
- C.** Sí, habitualmente.
- D.** Sí, siempre.

A B C D

Pregunta 24

¿Usted como trabajador de seguridad recibe información suficiente sobre los resultados de su trabajo?

- A.** Se le informa de la tarea a desempeñar (cantidad y calidad)
- B.** Se le informa de los resultados alcanzados con relación a los objetivos que tiene asignados.
- C.** Se le informa de los objetivos alcanzados por la empresa.
- D.** Se le anima a participar en el establecimiento de metas.

A B C D

Pregunta 25

¿Usted como trabajador de seguridad tiene la opción de cambiar de puesto y/o de tarea a lo largo de su jornada laboral?

- A.** No.
- B.** Se cambia de manera excepcional.
- C.** Sí, se rota entre compañeros de forma habitual.
- D.** Sí, se cambia según lo considera el trabajador.

A B C D

Pregunta 26

Ante la incorporación de nuevas tecnologías, nueva maquinaria y/o nuevos métodos de trabajo ¿se instruye al trabajador de seguridad para adaptarlo a esas nuevas situaciones?

- A.** No.
- B.** Sí, oralmente.
- C.** Sí, por escrito.
- D.** Sí, oralmente y por escrito.

A B C D

Pregunta 27

¿Qué tipo de relaciones son las habituales en la empresa?

- A.** Relaciones de colaboración para el trabajo y relaciones personales positivas.
- B.** Relaciones personales positivas, sin relaciones de colaboración.
- C.** Relaciones sólo de colaboración para el trabajo
- D.** Ni relaciones personales, ni colaboración para el trabajo..

A B C D

Pregunta 28

De los problemas que existen en un departamento, sección... ¿está siendo culpada alguna persona en concreto?

- A. Sí.
- B. No.

A B

Pregunta 29

¿Han aumentado las bajas de origen psicológico de larga duración en la plantilla?

- A. Sí.
- B. No.

A B

Pregunta 30

¿Hay alguna persona que está siendo aislada, ignorada o excluida del grupo en virtud de características físicas o personales?

- A. Sí.
- B. No.

A B

Reintroducing Industrial Engineering Students to Manufacturing through Environmental Pertinence

El acoplamiento de la manufactura con la pertinencia ambiental como motivador de interés en estudiantes de Ingeniería Industrial

Stephanie Marie **Villanueva-Pérez**¹, Valerie **Odeh-Couvertier**², Viviana **Vázquez-García**³,
Rocío Isabel **Fernández Lafuente**⁴, Verónica **Díaz Cruz**⁵, Zulma **Acevedo Figueroa**⁶, Jomar **Cintrón-Font**⁷,
Mónica **Rivera-Díaz**⁸, Rick **Méndez**⁹, César **Rivera-Collazo**¹⁰, Neshmayda **Díaz-Llanos**¹¹,
María Fernanda **Sayago Capelo**¹², Kelvin Gabriel **Chávez-Rojas**¹³, Esmeralda **Niño-Pérez**¹⁴,
Yaileen **Méndez-Vázquez**¹⁵, Mauricio **Cabrera-Ríos**¹⁶

¹University of Puerto Rico at Mayagüez, The Applied Optimization Group, PUERTO RICO
<https://orcid.org/0000-0002-8124-8483>

²University of Puerto Rico at Mayagüez, The Applied Optimization Group, PUERTO RICO
<https://orcid.org/0000-0001-7840-7132>

³University of Puerto Rico at Mayagüez, The Applied Optimization Group, PUERTO RICO
<https://orcid.org/0000-0002-8791-7254>

⁴University of Puerto Rico at Mayagüez, The Applied Optimization Group, PUERTO RICO
<https://orcid.org/0000-0002-7814-259X>

⁵University of Puerto Rico at Mayagüez, The Applied Optimization Group, PUERTO RICO
<https://orcid.org/0000-0003-1351-1857>

⁶University of Puerto Rico at Mayagüez, The Applied Optimization Group, PUERTO RICO
<https://orcid.org/0000-0002-9459-6196>

⁷University of Puerto Rico at Mayagüez, The Applied Optimization Group, PUERTO RICO
<https://orcid.org/0000-0002-8005-0280>

⁸University of Puerto Rico at Mayagüez, The Applied Optimization Group, PUERTO RICO
<https://orcid.org/0000-0002-1531-5246>

⁹University of Puerto Rico at Mayagüez, The Applied Optimization Group, PUERTO RICO
<https://orcid.org/0000-0002-3053-5634>

¹⁰University of Puerto Rico at Mayagüez, The Applied Optimization Group, PUERTO RICO
<https://orcid.org/0000-0002-5902-2066>

¹¹University of Puerto Rico at Mayagüez, The Applied Optimization Group, PUERTO RICO
<https://orcid.org/0000-0002-9061-5548>

¹²University of Puerto Rico at Mayagüez, The Applied Optimization Group, PUERTO RICO
<https://orcid.org/0000-0003-3249-5717>

¹³University of Puerto Rico at Mayagüez, The Applied Optimization Group, PUERTO RICO
<https://orcid.org/0000-0003-3182-9084>

¹⁴Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, MÉXICO
<https://orcid.org/0000-0001-5833-9582>

¹⁵Milwaukee School of Engineering, USA
<https://orcid.org/0000-0002-2467-2173>

¹⁶University of Puerto Rico at Mayagüez, The Applied Optimization Group, PUERTO RICO
<https://orcid.org/0000-0002-2845-7147> | mauricio.cabrera1@upr.edu

Recibido 23-03-2020, aceptado 27-08-2020.

Reintroducing Industrial Engineering Students to Manufacturing through Environmental Pertinence

El acoplamiento de la manufactura con la pertinencia ambiental como motivador de interés en estudiantes de Ingeniería Industrial

2

Abstract

Manufacturing is a key economic activity. Its know-how and its competitive advantages have shaped the history of humankind. In many Industrial Engineering (IE) programs, however, manufacturing is not taught as related to process know-how, but as systemic integration and management. It is possible to capitalize on the recent 3D printing technologies to reintroduce IE students to manufacturing principles through prototyping projects. Sparking the interest of IE students, though, can also be achieved through selecting problems of environmental awareness. This work describes a project of self-assemblies developed under the scheme of undergraduate research that makes prototyping a central endeavor with the aim to foster plastic recycling as an end goal.

Index terms: 3D Printing, Recycling, Manufacturing Education.

Resumen

La manufactura es una actividad económica fundamental. El conocimiento experto y las ventajas competitivas que se asocian con ella han dado forma a la historia de la humanidad. Es notorio, sin embargo, que varios programas educativos en Ingeniería Industrial se han alejado poco a poco de conocer más a fondo los procesos de transformación en pos de ver la manufactura a un nivel sistémico y como una actividad puramente de gestión administrativa. El desarrollo relativamente reciente de la tecnología de impresión 3D provee una oportunidad de reintroducir a los estudiantes de Ingeniería Industrial a los principios de procesamiento a través de proyectos que se enfoquen en la creación de prototipos. Sin embargo, para atemperarlo a los tiempos actuales, esta creación de prototipos debe de venir de la mano con un fin como el de tener un impacto positivo en el medio ambiente. Este artículo describe un proyecto de piezas autoensamblables desarrolladas a través de un esquema de investigación subgraduada en el que se hizo énfasis en las actividades de manufactura de prototipos como un medio para eventualmente llegar al fin de favorecer el reciclaje de plástico.

Palabras clave: Impresión 3D, Reciclaje, Educación sobre procesos de manufactura.

Recibido 23-03-2020, aceptado 27-08-2020.

I. INTRODUCTION

Manufacturing is a key economic human activity that importantly drives technology and scientific development. Knowing how to manufacture better goods, massively, in less time, with a minimal cost has often decided the survival of countries, the outcomes of wars, and the possibility to move upward in the wellbeing scale. Although Industrial Engineering (IE) was intrinsically related to manufacturing in the past, the versatility of its techniques and its fitness for systemic analysis has taken the discipline to diversify and take a macro view. This often leaves many IE students with little experience in actual manufacturing processes.

A clear opportunity to reacquire acquaintance with manufacturing processes for IE students is the relatively recent development of 3D printing [1]. 3D printing is perhaps the best-known process from additive manufacturing, which implies creating an object adding material in a layer-by-layer fashion. This differs from forming processes, which usually require the use of molds and cores, and from machining processes, which require removing material. An excellent overview in 3D printing technology can be found elsewhere [2].

In order to start reintroducing students to 3D printing, in our case it was necessary to use the flexibility of undergraduate research credit hours. Although the presence of a 3D printer was important to call the attention of students, it was placing importance in the actual application and its effect on the environment what allowed more people to be engaged, especially female students. This way, learning to prototype was tied to having a positive effect through designing for recycling. In short, the idea was to create an endeavor that is both, purpose-driven and skill-building. Indeed, this kind of integration has been deemed attractive in other higher education endeavors [3], [4].

In summary, this work describes primarily a technical project that involves the design, prototyping, and iterative improvement of a self-assembly unit intended to be eventually manufactured with recycled PET from water bottles. A key enabler of this project, however, was the organization of undergraduate students across generations to carry it out along with the motivation to keep them engaged. Thus, the narrative involves the development of a hard system along with the soft system that supported its creation. The final results are also twofold: an injection mold ready to be used for production of the self-assembly units and a renewed interest in manufacturing processes in our IE students.

II. METHODOLOGY

The solution of manufacturing problems involves Engineering savvy, resources, and stick-to-itiveness. Manufacturing systems are considered hard systems, as they can be dealt with precision, mathematical analysis, and technical methods. Marshaling the expertise, the resources, and the follow-through, however, is more akin to a management endeavor, and, therefore falls in the category of soft systems. An effort is here made to describe the development of a hard system supported by a soft system. The methods used in this work will be explained referring to each system separately.

A. The Soft System: Undergraduate Research Scheme

In our Industrial Engineering program at University of Puerto Rico at Mayagüez, it is possible to use up to six credit hours in undergraduate research as part of the curriculum. These are counted either as professional or free electives, depending on the student's choice. Students were proposed to take undergraduate research in three consecutive semesters with one, two, and three credits respectively. Students who signed up were usually assigned to work in pairs. Although not all students were involved in research for three semesters, it was possible to have continuity with incoming students on each semester. It is also important to note that students from Mechanical Engineering (ME) got involved enthusiastically due to the opportunity to design a part from scratch.

Students were encouraged to learn to use the 3D printer by using the manual and ready-to-print models downloaded from Thingiverse.com. Those who advanced more rapidly were usually incredibly open to train their peers. The true bottleneck, however, was computer-aided modeling (CAD) of individual parts. This skill is strong in ME students, but not usually in IEs. So, initially, part modeling was left to ME students who then trained IE students.

A critical component for the success of this work had to do with explicitly incorporating the positive potential effect of the project in something important: the environment. The rapid accumulation of plastic waste together with its slow decomposition rate spanning centuries is a problem of global proportions. The fact that the islands of Puerto Rico do not have working plastic recycling centers aggravates the problem locally. Environmental effects are evident when analyzing the deterioration of sealife and the formation of plastic islands in the Caribbean [5]. With this in mind, it was decided to concentrate in –eventually- recycling PET water bottles.

B. The hard system: initial assembly

In order to design an operation to eventually recycle PET water bottles as a means of mitigation of environmental pollution, the aim of the project was initially set to prototype a piece –through 3D printing- that could be assembled with others similar to it. These assemblies, depending on the number of units integrating them, would result in different planar pieces that could function as coasters, cutting boards, sink protections, floor covers, or garden stepping stones. The latter instance, the garden stepping stone, was chosen as the target design of this endeavor. An important constraint was that the pieces should self-assemble, as they would in a puzzle. This implied that no fasteners could be used. The idea behind this restriction had to do with keeping the operation convenient for a final user who would not require any other accessory to assemble the units together. These self-assemblies would, in a posterior stage, be fabricated using recycled PET water bottles, as noted previously.

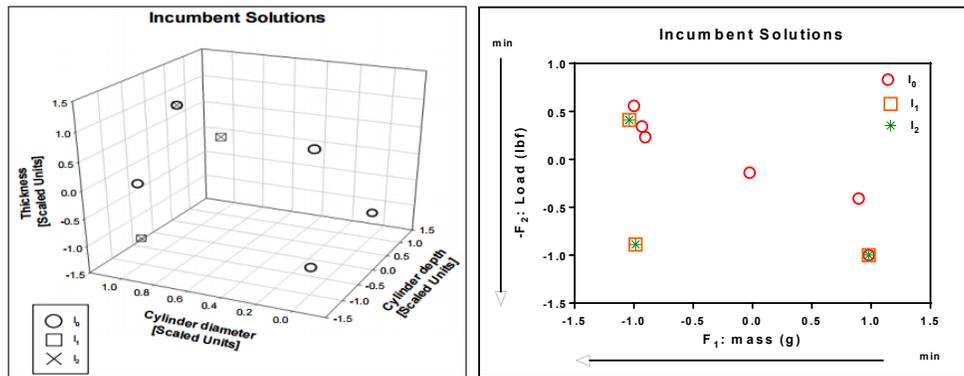
The first parts created in this project are shown in Figure 1 already assembled as a garden stepping stone. A total of 124 units conform the assembly.



Fig. 1. 124 initial units assembled in a garden stepping stone.

To determine the dimension of the initial self-assembly unit, a formal multiple criteria optimization process was undertaken, as described in [6]. Graphically, final results of this process are shown in Figure 2. The two criteria to be optimized were: mass (minimal) and load (maximal). Three configurations were deemed the best compromises between these two conflicting criteria. Their dimensions are also shown in Figure 2.

5



BEST DESIGNS UNDER TWO CRITERIA: MINIMAL MASS AND MAXIMAL LOAD

Assembly ID	Thickness (in)	Cylinder diameter (in)	Cylinder depth (in)	Mass (g)	Max Load (lbf)
1	0.092	0.041	0.230	11.2716	139.597
2	0.230	0.041	0.230	11.0938	44.333
5	0.161	0.041	0.460	17.8560	147.733

Fig. 2. A formal multiple criteria optimization problem was set up to arrive to the best configuration under two criteria: minimal mass and maximal load in a flexural strength test. [6].

C. The Hard System: scaling up the assembly

Despite the feasibility of the first assembly, when translating the mass of the individual pieces, it was calculated that a regular bottle of plastic (PET water bottles), would generate between 6 and 8 pieces. A decision was then made to rather keep the ratio of 1 PET bottle to 1 piece. This would further facilitate the transfer from 3D printing prototyping to injection molding, where it was deemed more convenient to have a one-cavity mold as opposed to a multicavity one. Using the average mass of a PET bottle as a guide (11.75 g), the design was scaled up as illustrated in Figure 3.



Fig. 3. Scaled up version of the self-assembly using 34 units.

D. The Hard System: A first step into the final stage

The 3D printed prototype led to a geometry that allowed self-assembly and performance. The next challenge in this work required a redesign of the piece that would facilitate injection molding while keeping a similar mass. This meant moving from a targeted solid piece to a thin-walled one that could avoid part distortion due to jetting and short shots. The resulting redesign and the injection mold are shown in Figure 4.

6

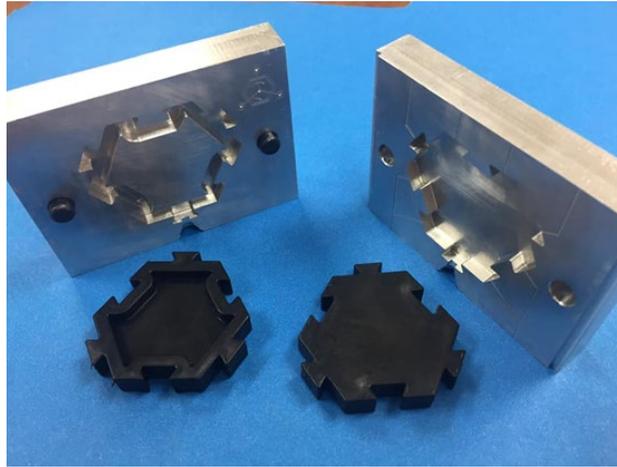


Fig. 4. Self-assembling units redesigned for injection molding and the two halves of the mold.

III. DISCUSSION

The progression of the project outlined here has taken roughly 5 years. The initial assembly, as discussed previously, was supported not only by mechanical design and prototyping, but by mathematical optimization. Figure 2 shows the tradeoff that needed to be understood in the self-assembly unit: load bearing could only be achieved at the expense of mass. It also showed which features had an important effect on both criteria, and which did not. Transferring this knowledge to the scaled-up version was important to remain feasible.

Clearly, adjustments through the different design versions of the self-assemblies had to be made, especially as more requirements became apparent. An important one was making sure that the self-assembly could be produced through injection molding. In this sense, the design aspect of this work was faithful to its well-known iterative nature.

This project -along with others of similar nature- has awakened the interest from IE students, and importantly women, in manufacturing processes to support efforts in recycling. In fact, every semester in the last two years, between 15 and 25 students have signed up for undergraduate research credits to get involved in manufacturing projects coupled with significant positive impacts, including recycling, making products for communities with little resources, or supporting humanitarian efforts in disasters. The next stage in this project involves setting up a recycling operation using at least a plastic shredder and an injection-molding machine.

IV. CONCLUSIONS

It is difficult to overlook how plastics have become an environmental nightmare. Although there are many efforts into alleviating such situation, this work focused on reawakening the interest of IE students in

manufacturing to marshal an approach to recycling. As it can be seen, the project had to be nurtured through a scheme of undergraduate research and a series of technical iterations that has led to a feasible design. More importantly, the project has been successful in reawakening the interest in manufacturing in our IE students and, in particular, our female students. The effort is going into its fifth year, with the goal to start a recycling operation in the future.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors acknowledge the support of the Industrial Engineering Department at UPRM. This work was partially supported by USDA-NIFA Award 2015-38422-24064 sub award 1000000920. BE AWARE Project.

REFERENCES

- [1] T.W. Simpson, C.B. Williams, M. Hripko, "Preparing Industry for Additive Manufacturing and Its Applications: Summary & Recommendations From a National Science Foundation Workshop," *Additive Manufacturing*, vol. 13, no. 13, pp. 166-178, Jan., 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.08.002>
- [2] J. Kietzmann, L. Pitt, P. Berthon "Disruptions, decisions, and destinations: Enter the age of 3-D printing and additive manufacturing", *Business Horizons*, vol. 58, no. 2, pp. 209-215, doi: <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2014.11.005>
- [3] M. E. Zepeda-Hurtado, L. Campos-Monroy, M. Cuéllar-Orozco "El Proyecto Aula, metodología para el desarrollo de competencias profesionales", *Científica*, vol. 21, no. 2, pp. 135-142, julio-diciembre 2017, available: http://www.cientifica.esimez.ipn.mx/manuscritos/V21N2_135_142.pdf
- [4] J. García-Ortega, J. Bernardo Parra-Victorino, M.L. Santos-Palacios, G. Zarza-Arronte "Proveedores de tecnología, spin-off universitarios a partir de los Laboratorios de Innovación Tecnológicos," *Científica*, vol.18, no. 1, pp. 31-37, enero-marzo 2014, available: http://www.cientifica.esimez.ipn.mx/manuscritos/completos/VOL18_NUM1_2014.pdf
- [5] J.A. Ivar do Sul, M.F. Costa "Marine debris review for Latin America and the Wider Caribbean Region: From the 1970s until now, and where do we go from here?," *Marine Pollution Bulletin*, vol. 54, no. 8, pp. 1087-1104, agosto, 2007, available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17624374>
- [6] E. Niño Pérez, C.A. Rivera-Collazo, M. Cabrera-Ríos, Y. M. Méndez-Vázquez, "Iterative multicriteria simulation and prototyping optimization in manufacturing," en 2017 Winter Simulation Conference (WSC), Las Vegas, EE.UU., 3-6 diciembre, 2017, available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8247809>

Metodología de diseño para robots paralelos de cinco eslabones y dos grados de libertad

Design Methodology for five-bar Parallel Robots with two Degrees of Freedom

David **González-Reyes**¹, Heebum **Kim**², Daniela **Rubio-Martínez**³
Héctor **Cervantes-Culebro**⁴, Milton **Elías-Espinosa**⁵

¹Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, MÉXICO
<https://orcid.org/0000-0002-1535-3007> | dgr@exatec.tec.mx

²Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, MÉXICO
<https://orcid.org/0000-0002-2330-3026> | Heebum.Kim@exatec.tec.mx

³Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, MÉXICO
<https://orcid.org/0000-0003-1221-5431> | a01165714@exatec.tec.mx

⁴Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, MÉXICO
<https://orcid.org/0000-0002-5481-2640> | hector_cervantes@tec.mx

⁵Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, MÉXICO
<https://orcid.org/0000-0002-1377-3569> | mielias@tec.mx

Recibido 05-10-2020, aceptado 19-12-2020.

Resumen

En el presente trabajo se propone una metodología de diseño de robots paralelos de cinco eslabones y dos grados de libertad que hace uso de herramientas tecnológicas para simplificar el proceso de diseño. El uso de simuladores permite el diseño sin necesidad del uso y cálculo del modelo dinámico del sistema, de esta manera agilizar el proceso de diseño y permitir ajustes en el diseño de manera eficiente. La metodología se presenta con un diagrama de flujo donde se desarrollan los siguientes pasos: definición de problema y restricciones, cálculo de cinemática inversa, propuesta de longitud de eslabones, propuesta de actuadores, propuesta de diseño y material de eslabones, diseño CAD, simulación dinámica, análisis por elemento finito, construcción de prototipo, programación de microcontrolador, selección de etapa de potencia y diseño de interfaz. Un robot paralelo de cinco eslabones y dos grados de libertad es desarrollado para ejemplificar la metodología de diseño y se valida que este cumpla adecuadamente con el problema y la tarea definida.

Palabras clave: Cinemática, diseño, metodología, simulación, motor brushless.

Abstract

In this paper, a methodology for the design of two-degree-of-freedom five-bar parallel robots is proposed that makes use of technological tools to simplify the design process. The use of simulators allows design without the need for the use and calculation of the dynamic model of the system, thus speeding up the design process and allowing design adjustments efficiently. The methodology is presented with a flow diagram where the following steps are developed: definition of problem and constraints, calculation of inverse kinematics, proposal of the length of the links, proposal of actuators, proposal of design and material of links, CAD design, dynamic simulation, finite element analysis, prototype construction, microcontroller programming, power stage selection and interface design. A two-degree-of-freedom five-bar robot is developed to exemplify the design methodology and it is validated that it fulfills the problem and the defined task.

Index terms: Brushless motor, design methodology, kinematics, simulation.

I. INTRODUCCIÓN

En la literatura se pueden encontrar múltiples metodologías para el diseño de sistemas mecatrónicos, como: método óptimo robusto, que se enfoca en un diseño menos sensible ante variables de incertidumbre, proponiendo índices de firmeza [1]. Otra metodología es diseño óptimo de la fiabilidad, que busca la optimización ante externalidades por medio de probabilidades de fallo y de valores esperados [1]. La metodología de diseño concurrente conjunta el diseño de la estructura mecánica y el control, de manera paralela, con el fin de optimizar el proceso de generación de producto [2]. El método paramétrico robusto busca maneras de controlar la robustez ante factores externos llamados ruido, como factores ambientales, condiciones de temperatura, o desgaste del mecanismo [3].

Las metodologías presentadas anteriormente necesitan conocer el modelo dinámico para el diseño de robots. Sin embargo, para la metodología de diseño de un robot paralelo de cinco eslabones y dos grados de libertad, que se estudia en este trabajo, no es necesario conocer el modelo dinámico del robot. Esto se debe a que se utiliza la síntesis estructural y la dinámica no lineal del sistema para la propuesta de actuadores. La metodología de diseño presente propone un procedimiento para construir un robot de dos grados de libertad.

El modelado dinámico de un robot necesita la cinemática inversa del robot paralelo de cinco eslabones para ser resuelta. Los diferentes métodos permiten generar el modelo dinámico y cinemático del robot a partir de métodos numéricos que relacionan fuerzas, velocidades, energía, posiciones o pares [4]. Entre los modelos dinámicos más comunes para el robot paralelo se encuentran el Método de Euler- Lagrange, Método Newton Euler [5], Método de Rigidez dinámica y el Método de Gibbs-Appell.

El modelo dinámico a partir del método de Newton sería mayormente útil para una cadena cinemática sin demasiadas restricciones. En el método de rigidez dinámica se debe establecer la cadena cinemática compuesta por cuerpos rígidos y flexibles que se conectan por articulaciones. La matriz de rigidez mapea las deformaciones de los nodos que contienen fuerzas dinámicas y los pares [6]. Para los robots paralelos se deben incluir los operadores de Lagrange para cumplir las restricciones de cadena cinemática cerrada. El Método Gibbs-Appell analiza el sistema a partir de la transformación de un sistema restringido de ecuaciones de número de coordenadas generalizadas y de ecuaciones de restricción en un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias. Esto se logra mediante la separación de varias cadenas abiertas que se obtienen del sistema mecánico restringido [7]. Por lo tanto, existe una complejidad en resolver la restricción de cadena cinemática usando los métodos de modelado mencionados anteriormente.

El presente trabajo busca eliminar este modelado dinámico, principalmente porque es complicado el análisis de dos cadenas cinemáticas donde una de la otra para determinar la posición del efector final. Las simulaciones evitan que el diseñador tenga que resolver las restricciones de cadena cinemática cerrada en el modelo dinámico con el fin de agilizar el proceso de diseño y que posibles o ajustes cambios sean fáciles de realizar.

II. DESARROLLO

La metodología de diseño propuesta se ejemplifica con el diagrama de flujo de la Fig. 1. Posteriormente, se encuentra el desarrollo de cada paso del proceso descrito en el diagrama.

3

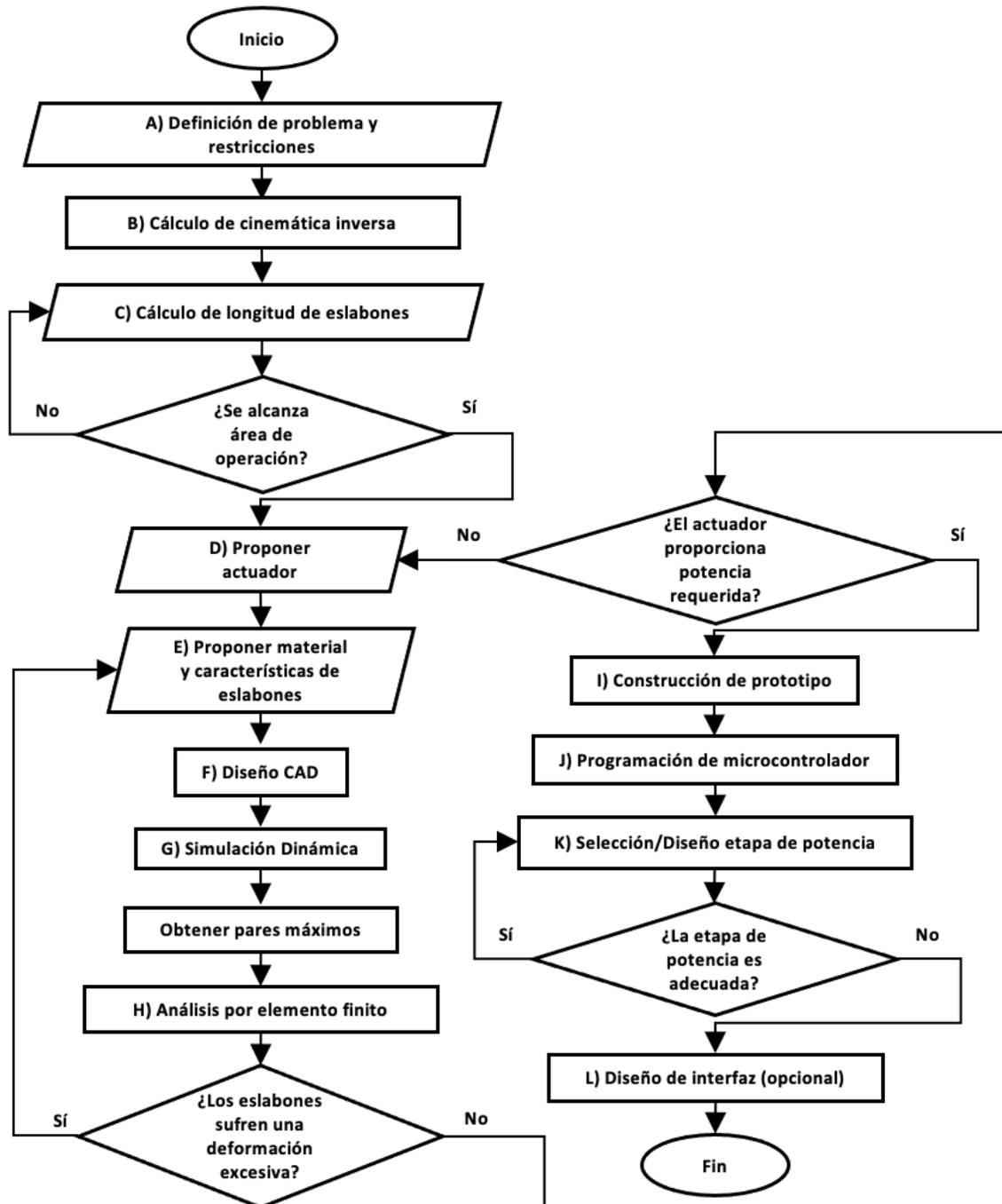


Fig. 1. Diagrama de flujo de la metodología propuesta.

4

A. Definición del problema y restricciones

El primer paso del diseñador es definir la tarea que desea llevar a cabo el robot a diseñar, en qué tiempo y con qué precisión. La aplicación más común del robot de cinco barras paralelo es para tareas de pick and place. Aquí se definen los puntos en el plano que el robot de dos grados de libertad debe alcanzar, delimitando un área de operación y se planea una trayectoria. Posteriormente, se deben marcar las restricciones como son: capacidad máxima de carga, tipo de efector final, presupuesto, materiales, acceso a equipo y herramienta, entre otras.

En el presente se ejemplifica la metodología de diseño propuesta al desarrollar un robot paralelo de cinco eslabones y dos grados de libertad. Dicho robot busca mover piezas por debajo de 100 g al menos 25 cm paralelos a la línea que pasa por el centro de rotación de los actuadores, con una velocidad mínima de 0.5 m/s y una precisión de ± 5 mm.

B. Cálculo de cinemática inversa

El análisis de cinemática inversa permite conocer las posiciones angulares de los actuadores al proponer una posición del efector final en el plano (x, y) . Para el robot paralelo de cinco eslabones, se utiliza trigonometría para su cálculo. La Fig. 2 le asigna un nombre a cada eslabón del robot.

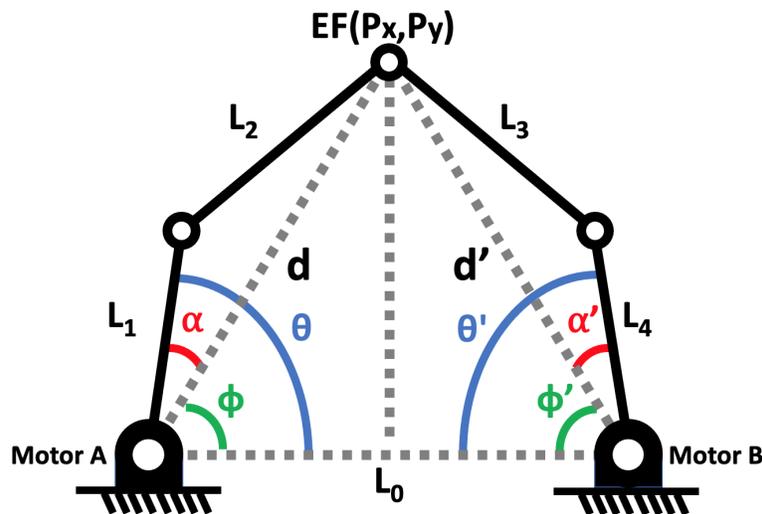


Fig. 2. Modelo matemático.

$$\phi = \text{atan}(Py/Px) \tag{1}$$

Conociendo el ángulo ϕ a partir de (1):

$$d = \sqrt{Px^2 + Py^2} \tag{2}$$

$$L_2^2 = d^2 + L_1^2 - 2 * d * L_1 \cos(\alpha) \tag{3}$$

$$\alpha = \arccos\left(\frac{d^2 + L_1^2 - L_2^2}{2 * d * L_1}\right) \quad (4)$$

Posición angular de actuador izquierdo:

$$\theta = \alpha + \phi \quad (5)$$

5

Del lado derecho se realiza el mismo análisis, sin embargo, la distancia Px es reemplazada por $L_0 - Px$ para obtener los ángulos deseados.

$$\phi' = \arctan\left(\frac{Py}{L_0 - Px}\right) \quad (6)$$

$$d' = \sqrt{(L_0 - Px)^2 + Py^2} \quad (7)$$

$$\alpha' = \arccos\left(\frac{d'^2 + L_4^2 - L_3^2}{2 * d' * L_4}\right) \quad (8)$$

Posición angular de actuador derecho:

$$\theta' = \alpha' + \phi' \quad (9)$$

C) Cálculo de longitud de eslabones

El área de trabajo de un robot se da por las longitudes de sus eslabones. El cálculo del área de trabajo de un robot de cinco barras paralelo se puede simplificar a dos ecuaciones si se consideran las restricciones (10), (11), (12) y (13).

$$L_1 = L_4 \quad (10)$$

$$L_2 = L_3 \quad (11)$$

$$L_0 < L_1 + L_2 + L_3 + L_4 \quad (12)$$

$$L_0 + L_1 + L_4 = L_2 + L_3 \quad (13)$$

Tomando en cuenta estas restricciones, el área de trabajo se calcula a partir de la intersección de las áreas dadas por la ecuación (14) restando las áreas dadas por la ecuación (15), [8]. El usuario debe proponer longitudes para los eslabones y calcular el área de trabajo hasta que se valide que la trayectoria propuesta (sección A) se encuentra dentro de esta.

$$(Px + L_0)^2 + Py^2 = (L_1 \pm L_2)^2 \quad (14)$$

$$(P_x - L_0)^2 + P_y^2 = (L_1 \pm L_2)^2 \quad (15)$$

Para encontrar las posibles soluciones que cumplan con la tarea definida en la sección A se desarrolla un script (programa) en *Matlab* que calcula todas las áreas de trabajo (en mm²) posibles al insertar un límite superior y un límite inferior a la longitud de los cinco eslabones. Estos límites pueden provenir por límites físicos, por un espacio de instalación, límites del proceso de manufactura, límites a partir de peso, acceso a material, etc. Posteriormente, se buscan las dimensiones que maximicen el área de trabajo. El procedimiento del script está descrito en el diagrama de flujo de la Fig. 3. El script necesita que se proponga un área de trabajo meta donde se escoge un rectángulo de 400×800 mm (480,000 mm²). Este calcula el porcentaje del área de trabajo que puede cubrir el robot con respecto al área propuesta y guarda el resultado de cada iteración en un archivo en forma de lista. Para reducir el número de iteraciones del ciclo del script y el tiempo de cálculo se indica que las longitudes L_1 , L_2 , L_3 y L_4 aumenten de 5 mm en 5 mm.

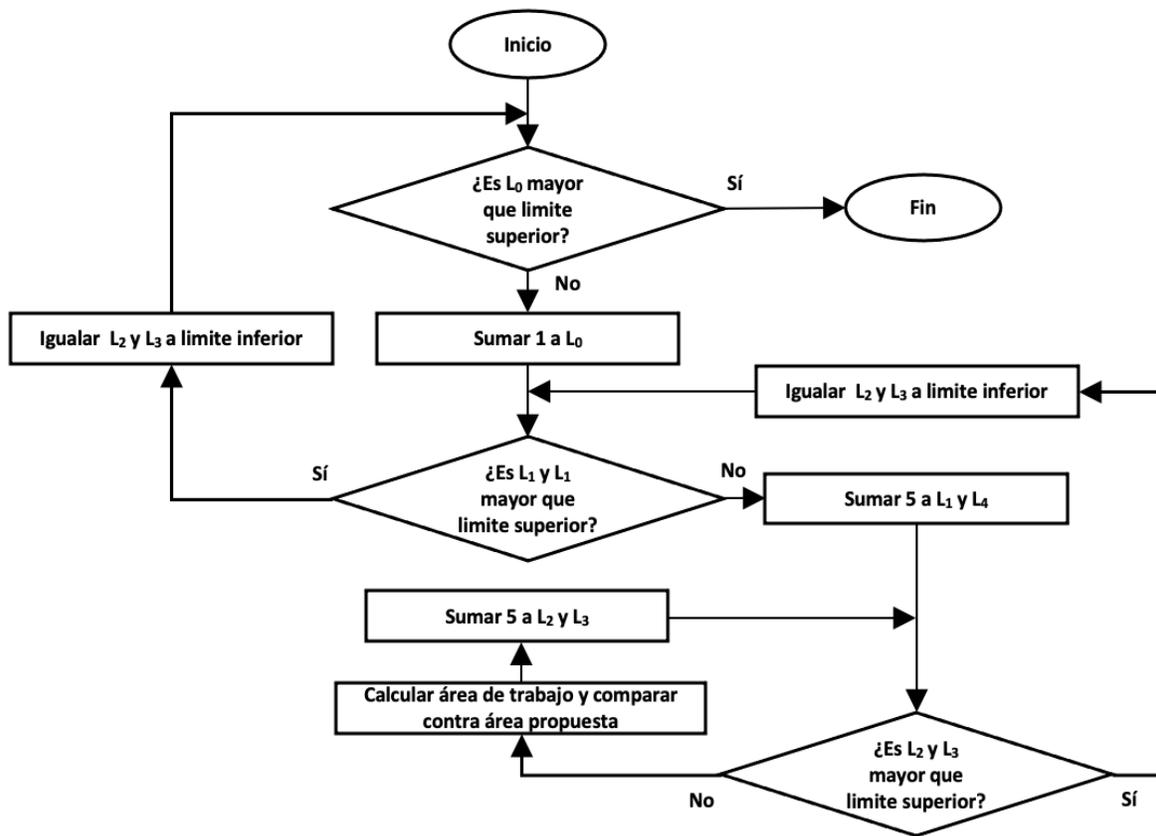


Fig. 3. Diagrama de flujo del script de Matlab

Una vez que el programa es ejecutado, se busca entre las más de 30000, iteraciones las combinaciones de eslabones que cumplen con la restricción mostrada en la ecuación (5) y dentro de estas se buscan las combinaciones que maximizan el área de trabajo. Al graficar las longitudes de los eslabones con respecto al área total de trabajo, como se muestra en las Figs. 4, 5, y 6, se observa la tendencia que al aumentar la longitud de L_0 disminuye el área de trabajo mientras que al aumentar la longitud del resto de los eslabones el área de trabajo total aumenta.

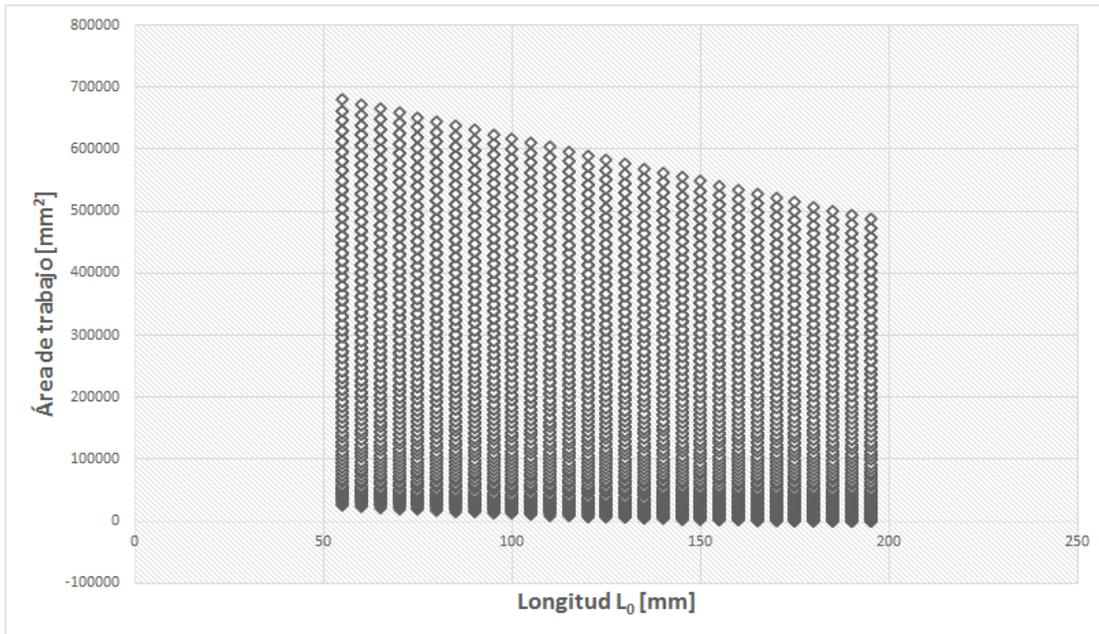


Fig. 4. L_0 vs. Área.

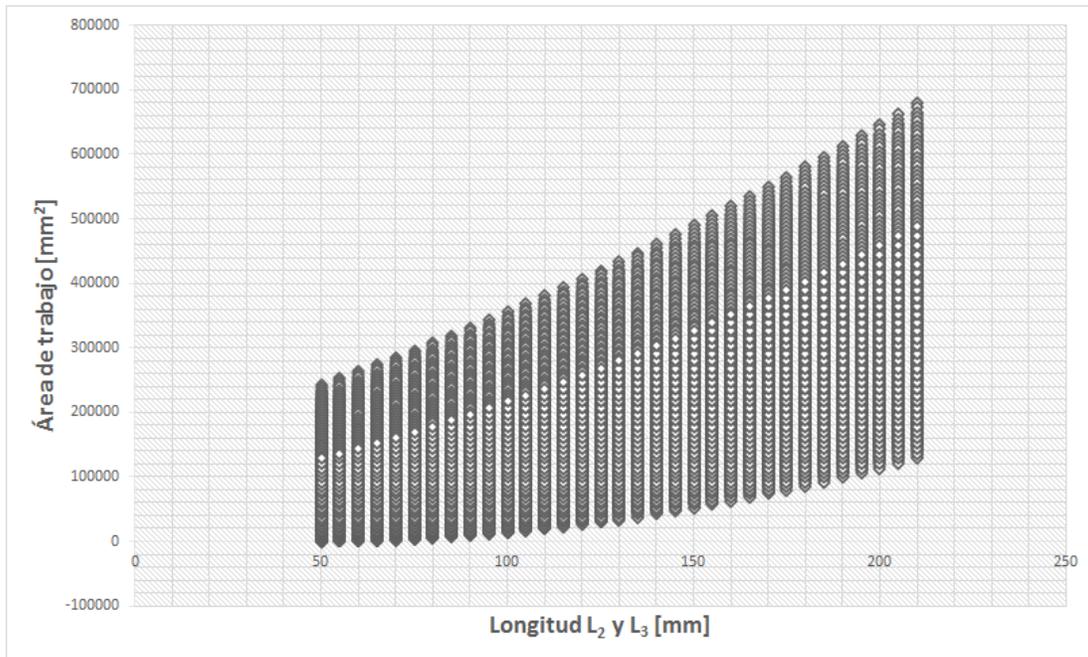


Fig. 5. L_2 y L_3 vs. área de trabajo

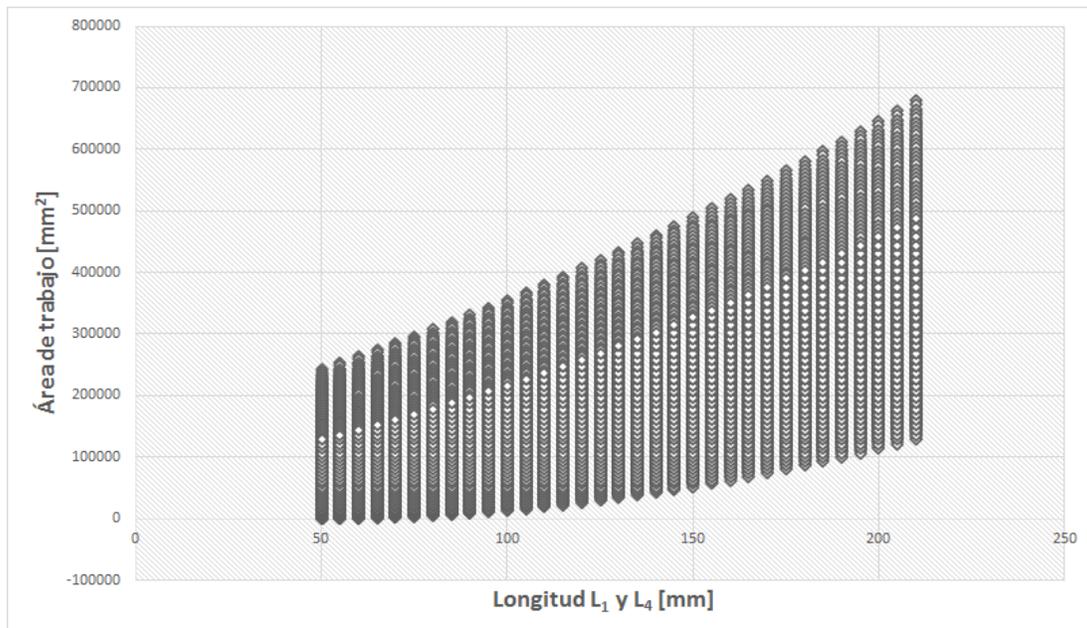


Fig. 6. L_1 y L_4 vs. área de trabajo

La Tabla 1 muestra la combinación con mayor área de trabajo calculada por el script, sin embargo, por restricciones físicas como el tamaño del efector final y tamaño de los actuadores, se elige la combinación 2. A pesar de que la combinación 2 tiene considerablemente menor área de trabajo que la combinación 1, esta permite cumplir con la tarea definida en la sección A y la trayectoria propuesta. Se verifica esto con el análisis de cinemática inversa calculado en la sección B. La región sombreada de la Fig. 7 y 8 muestran el área de trabajo que se obtiene con ambas combinaciones de la tabla y el rectángulo morado muestra el área meta propuesta para el script.

TABLA 1
DIMENSIONES DE LOS ESLABONES

Número de combinación	Longitud				
	L_0 (mm)	L_1 (mm)	L_2 (mm)	L_3 (mm)	L_4 (mm)
1	70	175	175	210	210
2	150	135	135	210	210

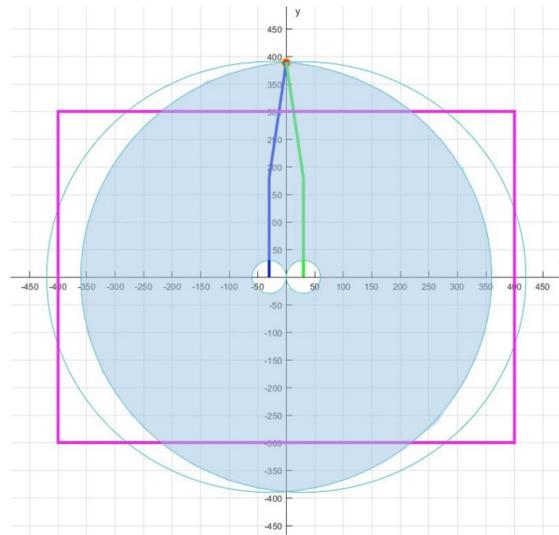


Fig. 7. Área de trabajo combinación número 1.

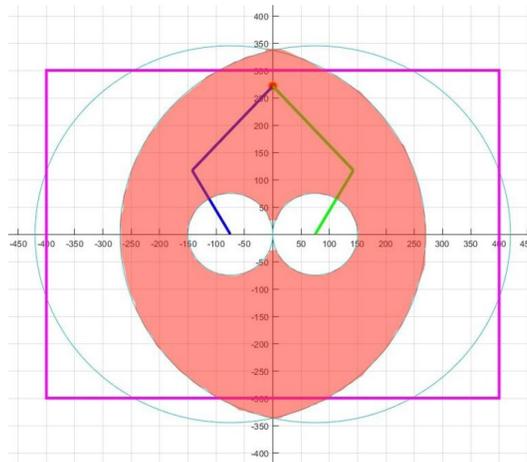


Fig. 8. Área de trabajo combinación número 2.

D) Propuesta de actuadores

Una vez definida el área de trabajo, el diseñador debe proponer un tipo de actuador rotacional para el robot tomando en cuenta el objetivo y las restricciones definidas en la sección A.

Se propone utilizar motores brushless (sin escobillas) por las ventajas que estos ofrecen, ya que, al no utilizar escobillas, tiene una mayor vida útil que un motor DC, de igual manera no genera ruido en la operación causado por arcos eléctricos, lo cual es común en motores de escobillas. Además, el motor brushless permite operar con carga nominal a altas velocidades [9]. El sistema está propuesto utilizando los motores brushless de manera directa, sin ningún tipo de reducción, para evitar la imprecisión que estas puedan presentar y así obtener la precisión definida en la sección A.

Se propone utilizar el motor YUNM4234 que cuenta con las siguientes especificaciones: resistencia interna 0.04Ω , 7 par de polos y una constante de velocidad KV700 (rpm por volt). El motor se recoge con una baja

resistencia interna para que se pueda utilizar una etapa de potencia de un voltaje menor, idealmente igual o menor a 12V. Entre mayor número de polos se puede tener un movimiento más suave y preciso, 7 es un número común para este tipo de motores. La constante KV va directamente ligada al par que puede entregar el motor (véase sección K); generalmente entre menor es este número mayor es el par nominal pero la velocidad nominal es menor.

10 E) Propuesta de material y características de eslabones.

Con base a las restricciones definidas y las longitudes calculadas, el diseñador debe de proponer un material y un diseño para los eslabones. Para el robot se propone utilizar barra redonda de fibra de carbón de $\frac{1}{4}$ de pulgada de diámetro por su rigidez, bajo peso, durabilidad y bajo costo.

F) Diseño CAD

Una vez seleccionado el actuador y propuesto un material y forma de los eslabones (secciones D y E) se realiza un diseño CAD incluyendo el resto de los componentes mecánicos necesarios. El CAD debe ser muy preciso ya que funciona como la base de los análisis y simulaciones de las siguientes secciones. Utilizando *SolidWorks* se diseña un prototipo del robot, el cual puede ser visto en la Fig. 9. Los componentes mecánicos que se seleccionan son: Perfil de aluminio extruido 20×20 mm (1640 mm de longitud total), impresión 3D para base de los motores y la unión de los eslabones, baleros M4 y tornillería M4. El volumen total de la estructura es de 2,707.5 cm³.



Fig. 9. Vista Isométrica superior CAD.

G) Simulación dinámica

Con ayuda de un software de simulación, como puede ser *Matlab* o *Adams*, el diseñador realiza una simulación dinámica que permite conocer el par máximo que requieren los actuadores en función del tiempo, al realizar la trayectoria planteada en la definición de problema (sección A). Aquí el diseñador debe incluir un controlador para el seguimiento de trayectoria durante la simulación asegurando que se cumplen las restricciones marcadas en la sección A. El diseñador debe observar que no existan picos de par en la gráfica al realizar la trayectoria planeada, ya que esto indicaría que la trayectoria del robot pasa por alguna singularidad. De existir un pico así

se debe buscar si se puede realizar la misma trayectoria de manera diferente o planear una nueva trayectoria que logre cumplir con el mismo objetivo.

Se utiliza el software *Adams* para la simulación dinámica del robot. La Fig. 10 muestra el par máximo que requieren los actuadores para mover los eslabones con la trayectoria propuesta. El par máximo calculado fue de 100 Nmm, es decir, 0.1 Nm. Se incorpora un controlador PI de velocidad en cascada con un controlador *P* de posición para el control de los actuadores.

11

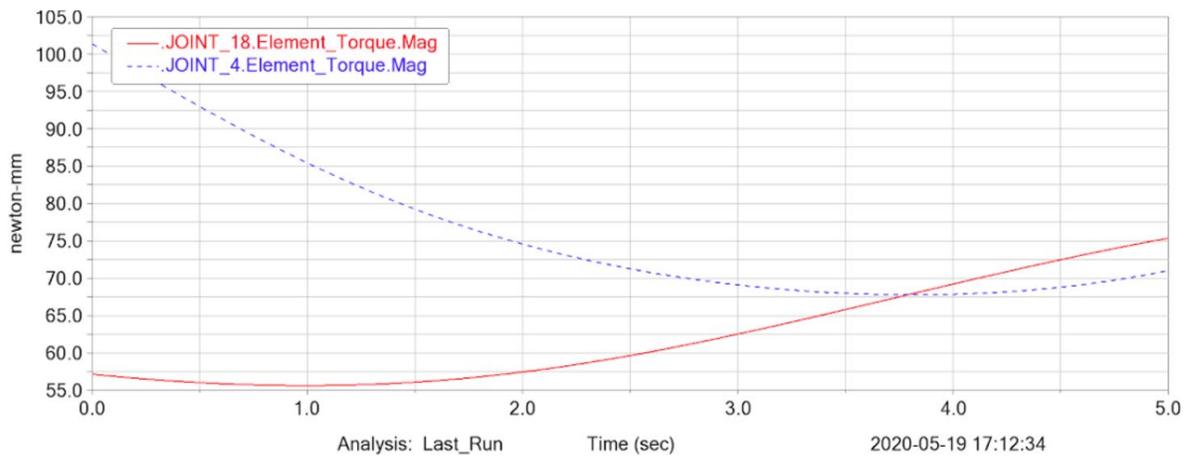


Fig. 10. Gráfica de par vs. Tiempo.

H) Análisis por elemento finito

El análisis por elemento finito permite al diseñador validar que los materiales y la geometría de su diseño es adecuada para llevar a cabo la tarea propuesta. El software *Adams* permite realizar un análisis por elemento finito de un CAD al proponer una trayectoria y al definir el material de los elementos. En la Fig. 11 se observa que la deformación máxima de los eslabones es de 3.45 E-03 mm.

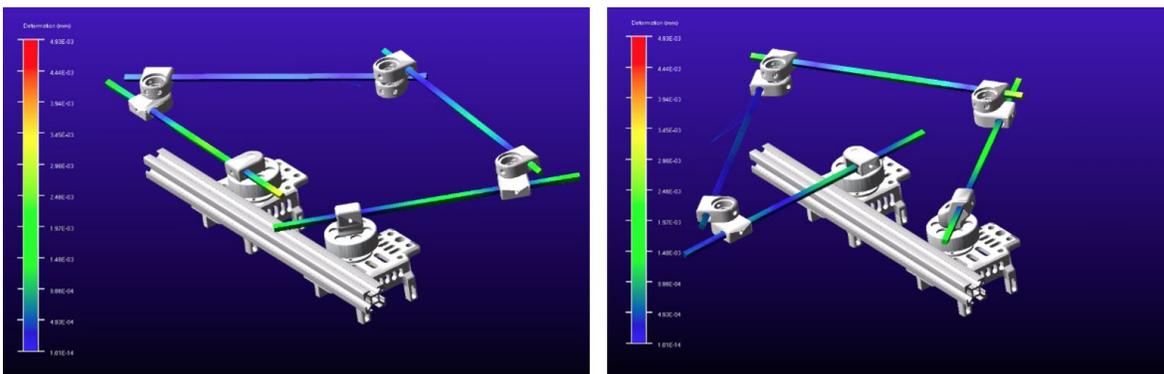


Fig. 11. Análisis de elemento finito posición media y final de trayectoria

En caso de que la deformación sea inaceptable, se debe volver a proponer el grosor de los eslabones (sección E) y repetir los pasos anteriores hasta este punto, sección F a H.

I) Construcción de prototipo

El prototipo se construye una vez que los pasos (A-H) son validados con las simulaciones necesarias. La Fig. 12 muestra el prototipo armado del robot. Es importante que el prototipo físico sea lo más cercano al diseño CAD para poder tomar las simulaciones como válidas.

12

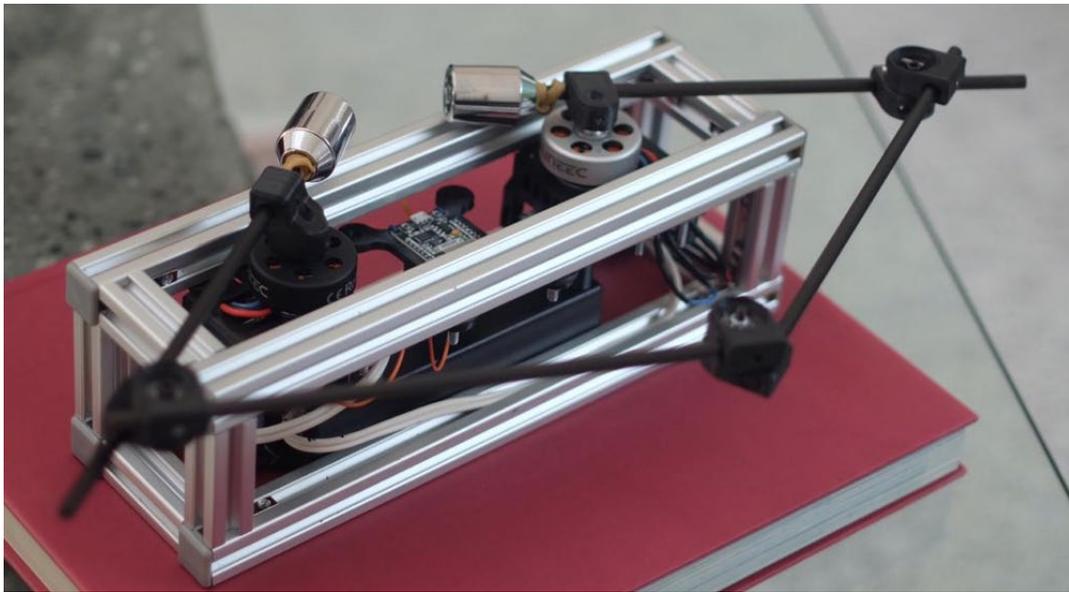


Fig. 12. Prototipo físico de robot

J) Programación de microcontrolador

El diseñador debe programar la trayectoria propuesta (sección A), calculada con cinemática inversa (sección B), para que realice la tarea definida en la problemática (sección A). Para esto el diseñador debe implementar el controlador de posición para los actuadores considerado en la simulación dinámica (sección G).

El controlador del robot está basado en el microcontrolador ESP32 programado en Arduino, utilizando la librería llamada *SimpleFOC* para el control de posición de los motores brushless [10]. Esta librería permite implementar el controlador PI de velocidad en cascada con el controlador P de posición propuesto en la sección G.

K) Selección/diseño de etapa de potencia

La etapa de potencia debe ser adecuada para el actuador/motor seleccionado y el par máximo requerido (secciones D y G). Esta puede ser escogida dentro de soluciones existentes o puede ser diseñada de manera específica para el diseño.

Como en la sección D se escoge utilizar motores brushless se deben considerar las siguientes ecuaciones para calcular la corriente máxima que debe soportar el controlador. La ecuación (16) muestra una manera de

aproximar el par ideal para motores brushless dada una corriente. La ecuación (17) permite calcular la corriente necesaria para obtener el par máximo requerido, es decir, 0.1 Nm (sección G).

$$\tau = \frac{60}{2\pi} * \frac{i}{KV} \tag{16}$$

13

$$i = KV * \tau * \frac{2\pi}{60} = 700 * 0.1 * \frac{2\pi}{60} = 7.35 [A] \tag{17}$$

Con base a la corriente calculada se selecciona una etapa de potencia dentro de la especificación. Si la corriente calculada es mayor a la que puede soportar el motor, hay que regresar a la propuesta de actuador (sección D).

El control de los motores brushless se realiza utilizando la tarjeta desarrollada llamada JANUS CONTROLLER 20.01 (véase Fig. 13). Esta tarjeta implementa el algoritmo de *Field Oriented Control* (FOC) para el control de posición y velocidad de motores brushless. La tarjeta tiene tres elementos principales: una etapa de potencia basada en MOSFETS, un sensor de temperatura y un encoder magnético con una resolución de 0.088 grados.

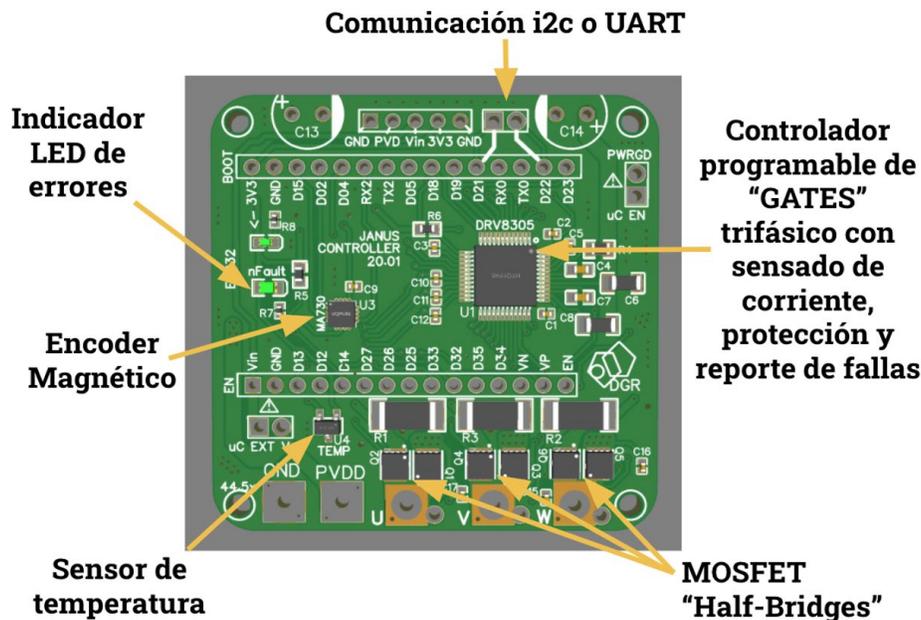


Fig. 13. Elementos principales del JANUS CONTROLLER 20.01

L) *Diseño de interfaz (opcional)*

El diseñador tiene la opción de diseñar una interfaz la cual permita a un operador reproducir secuencias programadas, programar nuevas secuencias o controlar directamente el efector final. Para el robot se implementa una interfaz humano-máquina que permite a un operador mover el efector final del robot al dar instrucciones a través de un *joystick* virtual (resolviendo cinemática inversa, sección B). Además, incluye

botones para reproducir trayectorias preprogramadas y puede salvar y reproducir trayectorias programadas por el operador (véase Fig. 14).

14

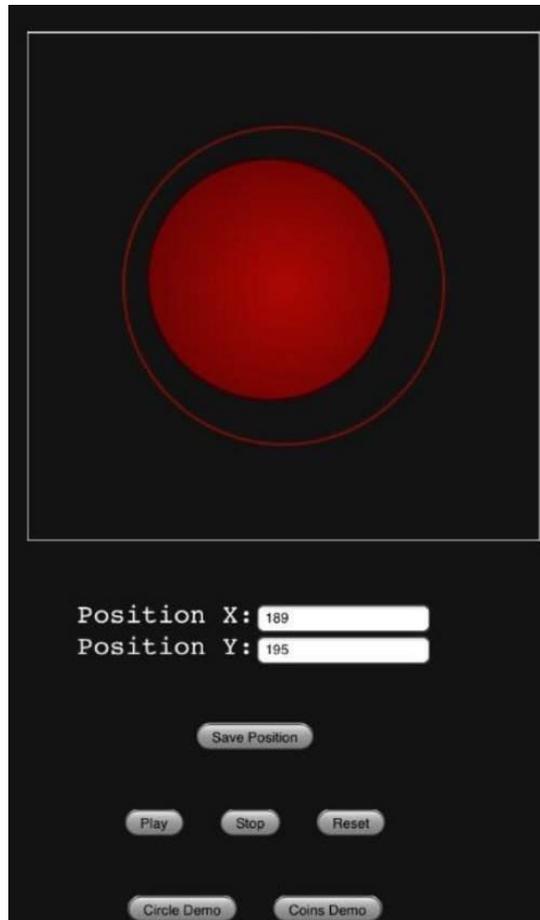


Fig. 14. Interfaz HMI robot

III. RESULTADOS

El robot cumple satisfactoriamente con la tarea propuesta moviendo una masa de 100 gramos a una velocidad de hasta 1 m/s. Tiene un área de trabajo de 340 101.1927 mm², precisión para tareas de *pick and place* de ± 4 mm (medido experimentalmente) y una masa total del robot de 1650 g.

La validación del controlador se realiza al reproducir una trayectoria circular del efector final. Se proponen dos velocidades de operación, dos y cuatro segundos respectivamente, donde se mide el error obtenido en el seguimiento sin la modificación de los parámetros del controlador. Se grafica en el plano la posición experimental del efector final contra la posición teórica, como se observa en las Figs. 15 y 16, donde se observa el error porcentual contra el tiempo. El error promedio del primer intervalo de tiempo es de 9.8658%, el segundo es del 4.02%. El error de seguimiento es menor al 5% en la trayectoria de 4 segundos, por lo que se considera aceptable para trabajos de baja velocidad.

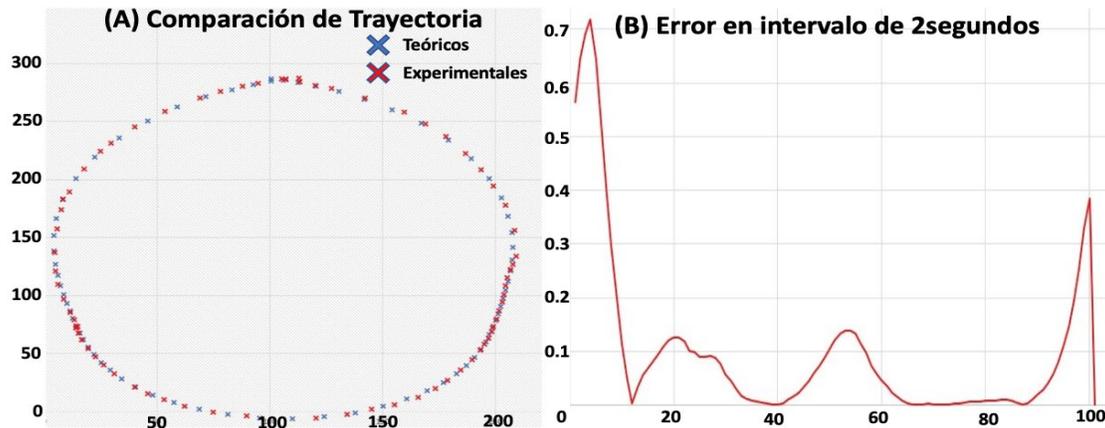


Fig. 15. Seguimiento de trayectoria (A) y error (B) en intervalo de 2 segundos.

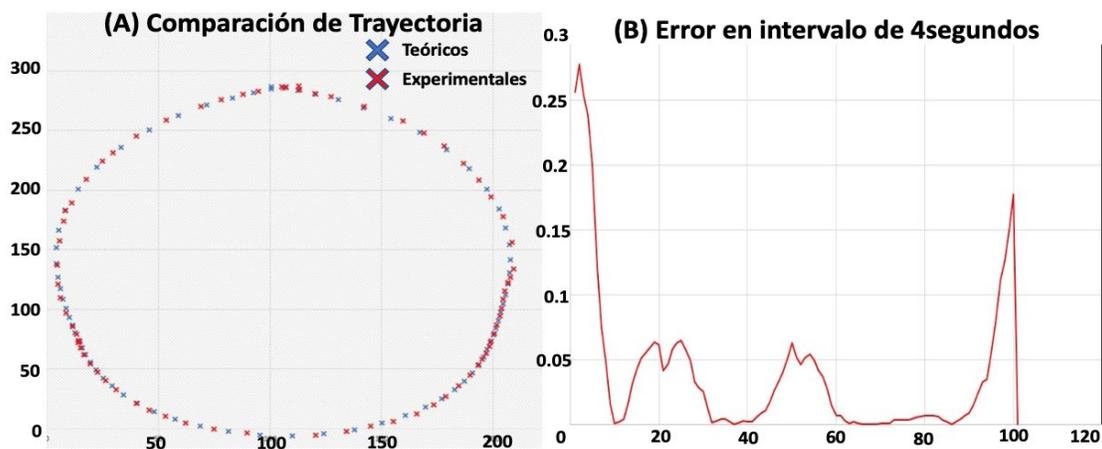


Fig. 16. Seguimiento de trayectoria (A) y error (B) en intervalo de 4 segundos

IV. CONCLUSIONES

La metodología creada es útil si no se conoce el modelo dinámico del robot, ya que este proceso solamente utiliza síntesis estructural y dinámica no lineal del sistema. Esto hace que la metodología sea accesible, ya que no se tiene problema con el modelo dinámico y todos los pasos que lo requieren son sustituidos por simulaciones, las cuales representan los requerimientos del sistema. Esto permite al diseñador agilizar el proceso de diseño y permitir ajustes en el diseño de manera eficiente.

Se demuestra que el control de posición de motores brushless se puede hacer sin necesidad de equipo industrial y que se pueden aplicar para la robótica y la automatización. Es importante seleccionar el motor brushless adecuado y para esto se debe conocer el par requerido.

El robot paralelo de cinco eslabones y dos grados de libertad tiene beneficios y desventajas, por lo que hay que conocer la aplicación para saber si es el brazo robot adecuado. Entre las ventajas del robot está la

adaptabilidad mediante la selección de las longitudes de los eslabones y la repartición de esfuerzo entre los actuadores. En el cálculo de longitudes de los eslabones se observa que aumentar la longitud del eslabón L_0 afecta negativamente el área total de trabajo mientras que incrementar la longitud de los demás eslabones la afecta positivamente.

REFERENCIAS

- [1] J. Martínez-Frutos, P. Martí, Diseño óptimo robusto utilizando modelos Kriging: aplicación al diseño óptimo robusto de estructuras articuladas. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, vol. 30, no. 2, 2014, pp. 97-105, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2013.01.003>
- [2] Ben Hamida, M. A. Laribi, A. Mlika, L. Romdhane, S. Zegloul, G. Carbone, Multi-Objective Optimal Design of a Cable Driven Parallel Robot for Rehabilitation Tasks, *Mechanism and Machine Theory*, vol. 156, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2020.104141>
- [3] E. H. Arias-Nava, A. J. Ríos-Lira, J. A. Vázquez-López, R. Pérez-González, Estudio comparativo entre los enfoques de diseño experimental robusto de Taguchi y tradicional en presencia de interacciones de control por control, *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, vol. 16, no. 1, 2015, pp. 131-142, doi: [https://doi.org/10.1016/S1405-7743\(15\)72114-1](https://doi.org/10.1016/S1405-7743(15)72114-1)
- [4] M. Aquino, E. Pozo, O. Zambrano, W. Venegas, Análisis cinemático y dinámico de un robot paralelo según el principio de trabajos virtuales para rehabilitación, Proyecto PIMI 15-04: Robot Paralelo, 2017.
- [5] P. Shao, Z. Wang, S. Yang, Z. Liu, Dynamic modeling of a two-DoF rotational parallel robot with changeable rotational axes, *Mechanism and Machine Theory*, vol. 131, 2019, pp. 318-335, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2018.08.020>
- [6] Cammarata, I. Calì, D. D'Urso, A. Greco, M. Lacagnina, G. Fichera, Dynamic stiffness model of spherical parallel robots, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 384, 2016, pp. 312-324, <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2016.08.014>
- [7] M. Díaz, S. Provenzano, M. Vergara, R. Chacón, Dinámica Directa de Robots Paralelos Utilizando las Ecuaciones de Gibbs-Appell, *Información Tecnológica*, vol. 18, no. 4, pp. 75-82, 2007, doi: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642007000400011>
- [8] L. Tien, K. Hee-Jun, D. Quang, A method for optimal kinematic design of five-bar planar parallel manipulators. *2013 International Conference on Control, Automation and Information Sciences, ICCAIS 2013*, pp. 7-11, doi: <https://doi.org/10.1109/ICCAIS.2013.6720521>
- [9] R. Crowder, *Brushless motors, Electric Drives and Electromechanical Systems*, 2nd ed., Butterworth-Heinemann, 2020, pp. 165-185.
- [10] A. Skuric, *Arduino Compatible Open Source Field Oriented Control (FOC) project, SimpleFOCproject*, 2020 <https://simplefoc.com/>

Design of Control Interface for a SCARA Manipulator with Subactuated Final Effector

Diseño de la interfaz de control para un manipulador SCARA con efector final subactuado

Julio Cesar **Cordero Muñoz**¹, Humiko Yahaira **Hernández Acosta**²
Raúl **Benítez Álvarez**³, Gerardo Julián **Pérez Mendoza**⁴

¹Universidad Politécnica del Valle de México, MÉXICO

<https://orcid.org/0000-0002-1535-3007> | julio.cordemunoz05@gmail.com

²Universidad Politécnica del Valle de México, MÉXICO

<https://orcid.org/0000-0002-2330-3026> | humikoyah@hotmail.com

³Universidad Politécnica del Valle de México, MÉXICO

<https://orcid.org/0000-0003-1221-5431> | rbentz-mx@hotmail.com

⁴Universidad Politécnica del Valle de México, MÉXICO

<https://orcid.org/0000-0002-5481-2640> | geras493@hotmail.es

Recibido 16-01-2020, aceptado 31-03-2020.

Abstract

The decoupled control of robots eases the generation of trajectories of position, speed and acceleration, as well as the combination of sequences of movement in the joints. The aim of this work is to develop an application for motion control, integrating a virtual model into a prototype SCARA manipulator of 4 DOF. The methodology consists: 1. Definition of the manipulator's workspace; 2. Preparation of the control diagram in LabVIEW; 3. Configuration and communication with Arduino hardware. 4. Development of the interface for simultaneous movements; 5. Configuration of the communication interface with SolidWorks. Developing such integration requires particular hardware characteristics that support simulation and communication environments between the different software mentioned, as well as the acquisition and processing of analog signals used in the control algorithm applied to the model, with Lagrange polynomials and direct and inverse kinematics modelling by the Denavit-Hartenberg method.

Index terms: Arduino, kinematics, virtual Interface, SCARA, dynamics.

Resumen

El control desacoplado de robots facilita la generación de trayectorias de posición, velocidad y aceleración, así como la combinación de secuencias de movimiento en las articulaciones. El objetivo del trabajo es desarrollar una aplicación para el control de movimiento, integrando un modelo virtual en un prototipo de manipulador SCARA de 4 GDL. La metodología consiste en: 1. Definición del espacio de trabajo del manipulador; 2. Elaboración del diagrama de control en LabVIEW; 3. Configuración y comunicación con el hardware Arduino. 4. Elaboración de la interfaz para movimientos simultáneos; 5. Configuración de la interfaz de comunicación con SolidWorks. Desarrollar dicha integración requiere características particulares de hardware que soporte los ambientes de simulación y comunicación entre los diferentes softwares citados, así como, la adquisición y procesamiento de señales analógicas utilizadas en el algoritmo de control aplicado al modelo, con polinomios de Lagrange y ecuaciones de cinemática directa e inversa por el método Denavit-Hartenberg.

Palabras clave: Arduino, cinemática, Interfaz virtual, SCARA, dinámica.

I. INTRODUCTION

Automatic control in the industry has become a priority due to the increasing of production requirements. Therefore, we have seen the need to develop new hardware and software for the automation of processes that allow compliance with both national and international standards, as well as making a faster and more efficient manufacturing of products [1]. This has been satisfied with the development of industrial robots, manipulating both objects and tools in certain tasks. A virtual interface can be added with which to reliably control the movement parameters of both the manipulator and the final effector in real time, and even be able to visualize a 3D model of its real operation before performing the tasks.

Industrial manipulators are closed architecture, so only specialists can make modifications. However, tools such as LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) allow the development of control algorithms in restricted virtual environments, which simplify the simulation of the physical model. Thanks to its specialized National Instruments programming environment, this software allows the creation of simple control algorithms through the visual programming of functional control blocks called VI (Virtual Instruments) that are dragged and released [2]. It makes possible to convert test techniques and validation of complex algorithms into simpler and more flexible programming.

From the creation of virtual instruments, we can achieve control structures of both the SCARA manipulator and its final effector, as well as its simulation of the CAD model in real time; all this, thanks to the creation of a virtual interface in real time. The hypothesis was based on the possibility of establishing real-time parameter control in the robot.

II. METHODOLOGY

The first stage in the control interface design methodology is the mechanical design of the SCARA manipulator and its subsequent study of movement with the SolidWorks Motion complement. The next step is to know the parameters of the potentiometers in each joint according to the angle of position or the distance to subsequently enter these parameters in the control program. Next, the control block diagram in LabVIEW is designed for each one of manipulator joints; for this, the direct and inverse kinematics modelling must be calculated, as well as the dynamics of the manipulator. Subsequently, the electrical circuit must be made for the connection of the Arduino board with the manipulator and the computer that will control the program instructions. Finally, tests of the movement control of the manipulator are performed.

III. MOTION STUDY IN SOLIDWORKS

The SolidWorks model designed has two rotational joints (shoulder and elbow), a prismatic joint (sliding or Z axis) and a gripper with an opening and closing system consisting of two rotating gears, which are considered as a degree of rotational type freedom, because the sensor is coupled to generate a single signal (see Fig. 1).

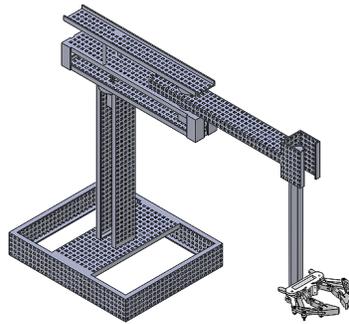


Fig. 1. SCARA manipulator model designed in SolidWorks.

To achieve the motion study, is needed the SolidWorks Motion add-on, which can be used to connect rotary and linear motors to the model, among others. For the manipulator at hand, the movements for the study are those shown in Table 1.

TABLE 1
PARAMETERS FOR STUDY MOVEMENT IN SOLIDWORKS

Parameters for study movement in SolidWorks				
Joint	Type	Range	Time	Animation type
Shoulder	Rotational	0-180°	1 s	Rotatory Motor
Rotatory Motor	Rotational	0-90°	1 s	Rotatory Motor
Rotatory Motor	Prismatic	0-8 in	1 s	Linear Motor
Gripper	Rotational	0-40°	1 s	Rotatory Motor

Link dimensions and robot slide will be necessary to perform the kinematics modelling of the robot, so these dimensions are shown in Table 2:

TABLE 2
SCARA MANIPULATOR LINK DIMENSIONS

Link	Dimension (in)
l_1	15.5"
l_2	10"
l_3	12"
l_4	3"
d_1 max.	8"

A. Direct and inverse kinematics modelling of the SCARA manipulator

Kinematics of a robot is the branch that "studies its movement with respect to a reference system" [3]. For a robot kinematics modelling there are two problems that must be solved: direct kinematics and inverse kinematics. The first involves determining the position and orientation of the final effector of the robot, with respect to a coordinate system that is taken as a reference; the second one resolves the configuration that the robot must have for a known position and orientation of the final effector.

4

One of the most used methods to establish the direct and inverse kinematics modelling of a robot is through Denavit-Hartenberg algorithm, which is a systemic method that describes and represents the spatial geometry of the elements of a kinematic chain, with respect to a fixed reference system. Such method uses a homogeneous transformation matrix to describe the spatial relationship between two immediate rigid elements, whereby the direct kinematic problem can be reduced to a 4x4 homogeneous transformation matrix that relates the spatial location of the final effector of the robot with respect to the coordinate system of its base. The reference systems, distances, lengths and turning angles of the joints of the SCARA manipulator are shown in diagram below (see Fig. 2).

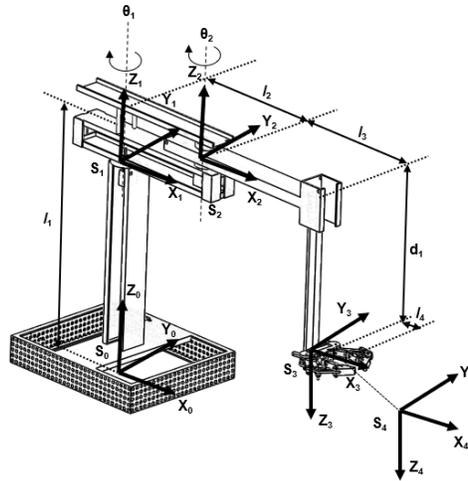


Fig. 2. Modelo matemático.

Taking as reference the steps of the Denavit-Hartenberg method, the parameters for the homogeneous matrix are shown in Table 3. Together, based on the matrix, the equations are obtained to find the position of the robot in the space of work according to the angles formed by the links, as shown in Table 4.

TABLE 3
DENAVIT-HARTENBERG PARAMETERS FOR SCARA MANIPULATOR

Joint	θ	D	a	α
1	0	l_1	0	0
2	θ_1	0	l_2	0
3	θ_2	$-d_1$	l_3	180
4	0	0	l_4	0

TABLE 4
DIRECT KINEMATIC EQUATIONS FOR SCARA MANIPULATOR

Direct kinematic equations	
X position	$p_x = 10\cos(\theta_1) + 15[\cos(\theta_1 + \theta_2)]$
Y position	$p_y = 10\sin(\theta_1) + 15[\sin(\theta_1 + \theta_2)]$
Z position	$p_z = 15.5 - d_1$

Likewise, the inverse kinematics can also be obtained so that the angles are in function of the position. The equations of the above are shown in Table 5:

TABLE 5
INVERSE KINEMATIC EQUATIONS FOR THE SCARA MANIPULATOR. r_x , r_y AND r_z ARE THE POSITIONING POINTS (x, y, z)
OF THE FINAL EFFECTOR

Inverse kinematic equations	
Joint 1	$\theta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{r_y}{r_x}\right) - \tan^{-1}[15\sin(\theta_2)/(10 + 15 \cos(\theta_2))]$
Joint 2	$\theta_2 = \tan^{-1} \frac{\pm\sqrt{1-M^2}}{M}$, $M = (r_x^2 + r_y^2 - 325)/(300)$
Joint 3	$d_1 = l_1 - r_z$

With the above equations, both the inverse and direct kinematic control diagram can be made in LabVIEW programming, to know the value of the angles from a given point x, y, z and to know the current position of the SCARA manipulator (see Fig. 3).

B. SCARA manipulator dynamics

Dynamics is one that deals with the relationship between the forces that act on a body and the movement that originates from them [3]. Dynamic model relates mathematically: the location of the robot defined by its own articular variables and their derivatives (speed and acceleration); the forces and torques applied at the end of the robot or in the joints; and the dimensional parameters of the robot (length, masses and inertia of the elements). The method to be used to make the dynamic model of the manipulator is that of Newton-Euler and Lagrange.

From the equations of direct kinematics, it is derived with respect to time to obtain the velocity matrix, which is used, in turn, to obtain the equations of kinetic energy, potential energy and, finally, the equation of force-pairs, according to the formula (1).

$$\mathcal{L} = \mathcal{K} - \mathcal{U} = \frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q} \quad (1)$$

The kinetic energy equations of our model for each joint are as follows:

$$k_1 = \frac{1}{2}(m_1 l_2^2 + I_1) \dot{q}_1^2$$

$$k_2 = \frac{1}{2} m_2 (l_2^2 + 2l_2 l_3 c q_2 + l_3^2) \dot{q}_1^2 + \frac{1}{2} I_2] + \frac{1}{2} (m_2 l_3^2 + I_2) \dot{q}_2^2 + m_2 (l_3^2 + l_2 l_3 c q_2) \dot{q}_1 \dot{q}_2$$

$$k_3 = \frac{1}{2} m_3 (l_2^2 + 2l_2 l_3 c q_2 + l_3^2) \dot{q}_1^2 + I_3] + \left(\frac{1}{2} m_3 l_3^2\right) \dot{q}_2^2 + [m_3 (l_3^2 + l_2 l_3 c q_2)] \dot{q}_1 \dot{q}_2 + \left(\frac{1}{2} m_3\right) \dot{q}_3^2$$

$$\mathcal{K} = \frac{1}{2} [(m_1 l_2^2 + I_1) + (m_2 + m_3)(l_2^2 + 2l_2 l_3 c q_2 + l_3^2)] \dot{q}_1^2 + (m_2 + m_3) [(l_3^2 + l_2 l_3 c q_2)] \dot{q}_1 \dot{q}_2 + \frac{1}{2} [(m_2 + m_3) l_3^2 + I_2] \dot{q}_2^2 + \left(\frac{1}{2} m_3\right) \dot{q}_3^2$$

The potential energy equations are as shown below:

$$U_1 = m_1 g l_1$$

$$U_2 = m_2 g l_1$$

$$U_3 = m_3 g (l_1 - q_3)$$

$$\mathcal{U} = (m_1 + m_2 + m_3) g l_1 - m_3 g q_3$$

6

Remembering that the Lagrangian results from the difference between kinetic energy and potential energy, we have:

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & \frac{1}{2} [(m_1 l_2^2 + I_1) + (m_2 + m_3)(l_2^2 + 2l_2 l_3 c q_2 + l_3^2)] \dot{q}_1^2 + (m_2 + m_3) [(l_3^2 + l_2 l_3 c q_2)] \dot{q}_1 \dot{q}_2 \\ & + \frac{1}{2} [(m_2 + m_3) l_3^2 + I_2] \dot{q}_2^2 + \left(\frac{1}{2} m_3\right) \dot{q}_3^2 - (m_1 + m_2 + m_3) g l_1 + m_3 g q_3 \end{aligned}$$

Deriving partially the Lagrangian with respect to \dot{q}_1 , \dot{q}_2 y \dot{q}_3 , it turns out:

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_1} = [m_1 l_2^2 + I_1 + (m_2 + m_3)(l_2^2 + 2l_2 l_3 c q_2 + l_3^2)] \dot{q}_1 + (m_2 + m_3)(l_3^2 + l_2 l_3 c q_2) \dot{q}_2$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_2} = (m_2 + m_3) [(l_3^2 + l_2 l_3 c q_2)] \dot{q}_1 + [(m_2 + m_3) l_3^2 + I_2] \dot{q}_2$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_3} = m_3 \dot{q}_3$$

Deriving from time the previous equations, the accelerations for each joint are obtained:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_1} \right] = & [m_1 l_2^2 + (m_2 + m_3)(l_2^2 + 2l_2 l_3 c q_2 + l_3^2) + I_1] \ddot{q}_1 + (m_2 + m_3)(l_3^2 + l_2 l_3 s q_2) \ddot{q}_2 + \\ & (-2m_2 l_2 l_3 s q_2 - 2m_3 l_2 l_3 s q_2) \dot{q}_1 + (-m_2 l_2 l_3 s q_2 - m_3 l_2 l_3 s q_2) \dot{q}_2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_2} \right] = & (m_2 + m_3)(l_3^2 + l_2 l_3 c q_2) \ddot{q}_1 + [(m_2 + m_3)(l_3^2) + I_2] \ddot{q}_2 + (-m_2 l_2 l_3 s q_2 - \\ & m_3 l_2 l_3 s q_2) \dot{q}_1 \dot{q}_2 \end{aligned}$$

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_3} \right] = m_3 \ddot{q}_3$$

Deriving the previous equations with respect to q_1 , q_2 y q_3 , you get:

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_1} = 0$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_2} = (-m_2 l_2 l_3 s q_2 - m_3 l_2 l_3 c q_2) \dot{q}_1^2 + [(-m_2 l_2 l_3 s q_2 - m_3 l_2 l_3 s q_2)] \dot{q}_1 \dot{q}_2$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_3} = m_3 \dot{q}_3 + m_3 g$$

The Lagrangian equation states that: $\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_1} \right] - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_1} = \tau$, so that the following general equation of force-pairs can now be written as follows:

$$\begin{aligned} \tau = & [m_1 l_2^2 + (m_2 + m_3)(l_2^2 + 2l_2 l_3 c q_2 + l_3^2) + I_1] \ddot{q}_1 + (m_2 + m_3)(l_3^2 + l_2 l_3 s q_2) \ddot{q}_2 \\ & + (-2m_2 l_2 l_3 s q_2 - 2m_3 l_2 l_3 s q_2) \dot{q}_1 + (-m_2 l_2 l_3 s q_2 - m_3 l_2 l_3 s q_2) \dot{q}_2 \\ & + (m_2 + m_3)(l_3^2 + l_2 l_3 c q_2) \ddot{q}_1 + [(m_2 + m_3)(l_3^2) + I_2] \ddot{q}_2 \\ & + (-m_2 l_2 l_3 s q_2 - m_3 l_2 l_3 s q_2) \dot{q}_1 \dot{q}_2 + m_3 \dot{q}_3 + (m_2 l_2 l_3 s q_2 + m_3 l_2 l_3 c q_2) \dot{q}_1^2 \\ & + [(+m_2 l_2 l_3 s q_2 + m_3 l_2 l_3 s q_2)] \dot{q}_1 \dot{q}_2 - m_3 \dot{q}_3 - m_3 g \end{aligned}$$

The previous equation can become a matrix equation of force-pairs applied to each link.

$$\begin{aligned} \tau = & \begin{bmatrix} [m_1 l_2^2 + (m_2 + m_3)(l_2^2 + 2l_2 l_3 c q_2 + l_3^2) + I_1] & [(m_2 + m_3)(l_3^2 + l_2 l_3 s q_2)] & 0 \\ [(m_2 + m_3)(l_3^2 + l_2 l_3 c q_2)] & [(m_2 + m_3)(l_3^2) + I_2] & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \\ \ddot{q}_3 \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} -2[(m_2 + m_3)(l_2 l_3 s q_2)] & -(m_2 + m_3) l_2 l_3 s q_2 & 0 \\ -\dot{q}_2 [(m_2 + m_3)(l_2 l_3 s q_2)] & \dot{q}_1 [(m_2 + m_3)(l_2 l_3 s q_2)] & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} + g \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ m_3 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

The matrix relates the location of the robot based on the interrelation of all the dimensional parameters, as well as its joint variables.

C. Motor control diagram with LabVIEW-Arduino

The VEX 393 motors used are controlled by the value of the VEX potentiometer range. The range of potentiometers ranges from 0 to 4096, giving a corresponding output voltage of 0 to 5 volts. The functional values were obtained experimentally, which are detailed in Table 6. In addition, the Lagrange polynomial method [4] was necessary to obtain the equivalence between the angle of rotation of the motors 1 and 2 the value of the range of the potentiometers used, since their behavior corresponded to a quadratic equation. The other motors showed a linear behavior in their angle-range potentiometer ratio. The equations below describe the value of the range of potentiometers 1 to 4 depending on the required angle, which is obtained with the inverse kinematic modelling.

$$y(x) = 0.016296296x^2 + 13.7333333x + 500 \quad (2) \quad \text{Joint 1}$$

$$y(x) = 0.0237037x^2 + 11.5111111x + 664 \quad (3) \quad \text{Joint 2}$$

$$y = \frac{3832}{7}x + 232 = 547.428571x + 232 \quad (4) \quad \text{Joint 3}$$

$$y = \frac{-950}{40}x + 1250 = -23.75x + 1250 \quad (5) \quad \text{Gripper}$$

TABLE 6
FUNCTIONAL VALUES OF THE POTENTIOMETERS FOR EACH JOINT

Parameter	Motor of joint 1 (Rot)		
	Origin	Medium	Maximum
Angle of rotation (x)	0°	90°	180°
Potentiometer value (y)	500	1868	3500
Parameter	Motor of joint 2 (Rot)		
	Origin	Medium	Maximum
Angle of rotation (x)	0°	90°	180°
Potentiometer value (y)	664	1892	3504
Parameter	Motor of joint 3 (Pris)		
	Minimum	Maximum	
Distance (in) (x)	0 in	7 in	
Potentiometer value (y)	232	4064	
Parameter	Gripper Motors 4, 5 (Rot)		
	Closing	Opening	
Opening angle (x)	0°	40°	
Potentiometer value (y)	1250	300	

With the above, we can introduce these equations in a LabVIEW block diagram and use the blocks corresponding to the MakerHub plug-in for LabVIEW-Arduino communication, to obtain the reading / writing of signals [5]. The complete control diagram uses the robot's end point (x, y, z) in inches, in order to generate the angles of movement of each joint (see Fig. 3).

D. Communication settings between SolidWorks and LabVIEW

For communication between LabVIEW and SolidWorks it is necessary to install the RealTime and SoftMotion plug-ins in LabVIEW, and Motion in SolidWorks. Subsequent, a series of steps must be followed to link the motion study engines generated in SolidWorks with the LabVIEW project manager. Afterwards, the “Straight Line Move” blocks of the SoftMotion plug-in are used to control the free movement of each motor in SolidWorks, through the LabVIEW interface, which allows real-time movement of both the physical manipulator and the virtual prototype the diagram capable of controlling and recording the movements of the SCARA manipulator is shown in Fig. 3.

E. Creation of the interface for movement control in LabVIEW

The LabVIEW front panel consists of writing the desired parameters (manipulator position, gripper opening-closing, PWM for each of the motors, input voltage and number of positions to be recorded) and reading the

parameters of each joint (positions, ranges and current degrees, as well as corresponding degrees to each joint depending on the desired position). In addition, it has buttons to activate / deactivate motor movement, record and stop the program (see Fig. 4).

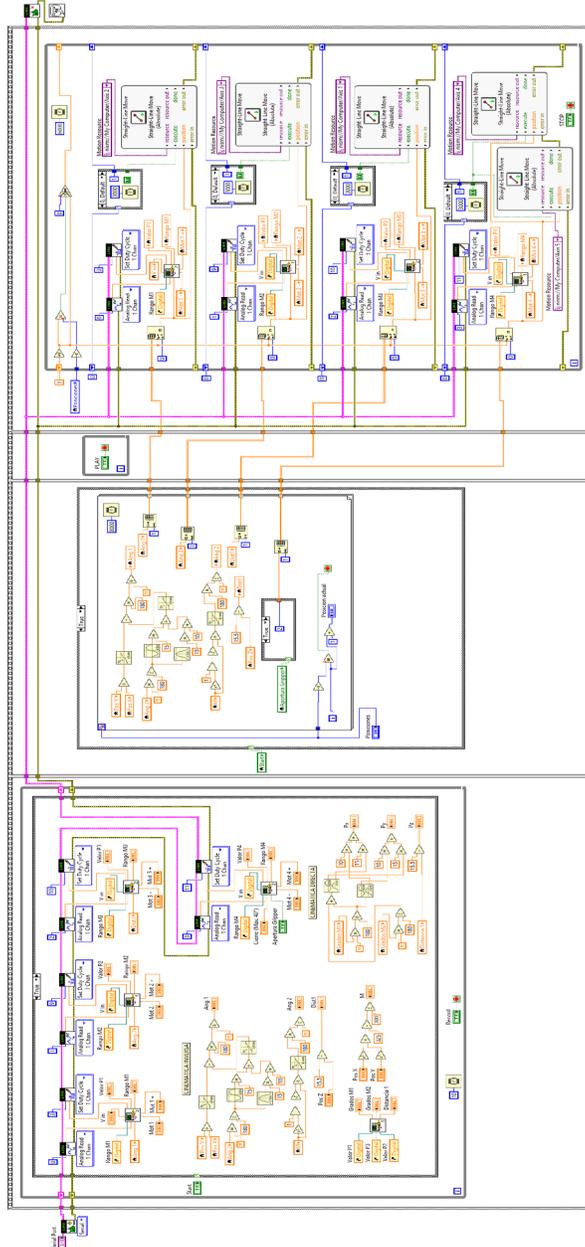


Fig. 3. Block diagram in LabVIEW for control and recording of SCARA manipulator positions.



Fig. 4. Front panel to control and display the SCARA manipulator parameters.

IV. SUMMARY OF RESULTS

A routine for each joint was tested separately, introducing the positioning points (x, y, z) and the opening and closing value of the final effector (gripper). It was theoretically proven that the angular results of inverse kinematics were correct. In addition, the graph of the coordinates (x, y) vs time and the value of the angles (θ_1, θ_2) vs time was made to visualize the change of the latter as values are given in x and y . The Waveform chart block was used for the graphs (see Fig. 5).

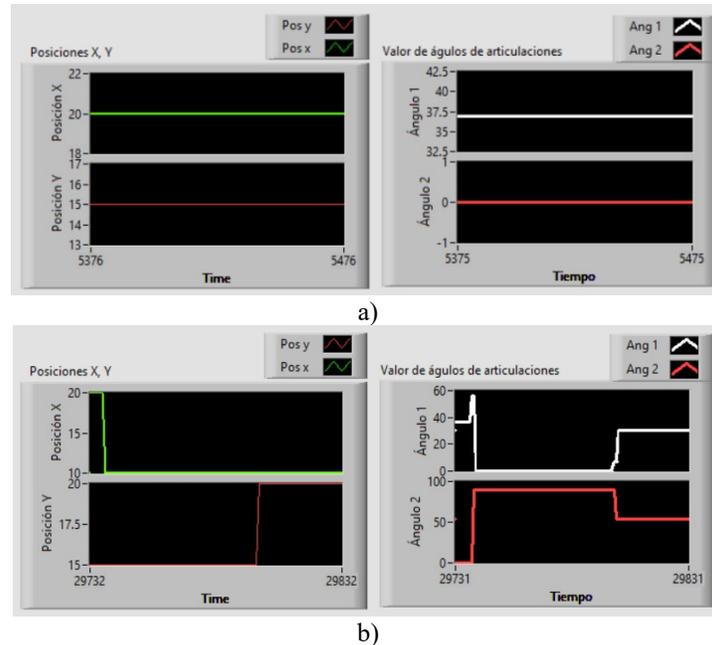


Fig. 5. a) Position (20,15) results in $\theta_1 = 36.86^\circ$, $\theta_2 = 0^\circ$ with inverse kinematic equations;
b) Position (10,20) results in a change to $\theta_1 = 30.4^\circ$, $\theta_2 = 54.3^\circ$ with inverse kinematic equations.

Physically, reading/writing of signals from the potentiometers and to the motors was verified, being able to obtain movement in each articulation of the manipulator. A simple electrical circuit was made with Arduino capable of sending and receiving signals (see Fig. 6).

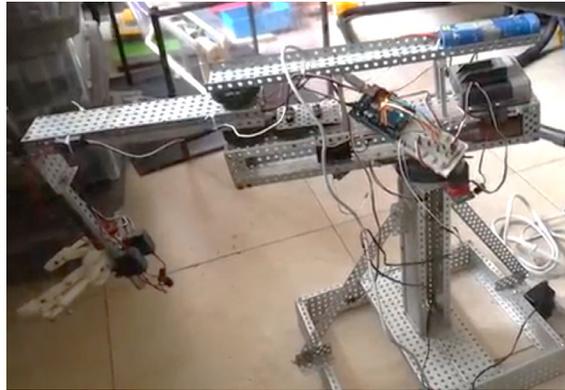


Fig. 6. Signal test in manipulator using a simple circuit made with Arduino.

The interface was able to control the movement of the manipulator and the CAD model in real time, so that each physical movement desired was assigned a virtual physical movement (see Fig. 7).



Fig. 7. Real-time virtual interface of the SCARA manipulator along with its CAD model.

V. CONCLUSIONS

A SCARA manipulator can be controlled with a virtual interface in real time, designing a program based on control blocks in LabVIEW that eases programming and eliminates physical interfaces that can be damaged in the medium term by use. A subactuated and adaptive final effector was adapted, which also was controlled with such interface, demonstrating flexibility of working with virtual interfaces. In addition, the above allows to

simulate in real time and off-line the movement of all the articulations and links of the manipulator, as could be observed in the start-up of each of the SCARA manipulator's joints.

The interface made in LabVIEW is also especially useful when it is needed to simulate the movement of a model with SolidWorks that has not yet been manufactured. Finally, it was learned that this type of interfaces saves material costs since no physical controls are needed because it works with the commands of the front panel and only, in our case, a simple circuit with which to read and manipulate the movements was needed, the equipment to run the simulation and an external power supply for both motors and potentiometers. This project can be useful for handlers who are programmed using a conventional method and need to optimize their equipment with a low cost.

12

REFERENCES

- [1] N. Kodaira, "Expected innovation in industrial robots," *Advanced Robotics*, p. 8, 2016.
- [2] B. B. Rhoades, J. P. Sabo, J. M. Conrad, "Enabling a National Instruments DaNI 2.0 robotic development platform for the Robot Operating System," SoutheastCon 2017, Concord, NC, USA, 2017, pp. 1-5, doi: <https://doi.org/10.1109/SECON.2017.7925293>
- [3] A. Barrientos, L. Peñin, C. Balaguer, R. Aracil, *Fundamentos de Robótica*, España: McGraw-Hill, 2007.
- [4] G. Montiel, R. Cantoral, "Una presentación visual del polinomio de lagrange," *Números. Revista de Didáctica de las Matemáticas*, n° 55, pp. 3-22, 2003.
- [5] K. García, Youtube, 4 Oct. 2015 [online], available: <https://www.youtube.com/watch?v=cLdIPzvQAQw>
- [6] M. Hägele, K. Nilsson, J. Pires, R. Bischoff, *Industrial robotics, Springer handbook of robotics*, Springer, Cham, 2016.

Análisis de falla de encendido en motores de combustión utilizando señales de vibración basado en el cálculo y reducción de indicadores estadísticos

Misfire Analysis in Combustion Engines Using Vibration Signals Based on the Calculation and Reduction of Statistical Indicators

Alejandro **García-Basurto**¹, Juan José **Saucedo-Dorantes**², Ángel **Pérez-Cruz**³, Roque Alfredo **Osornio-Ríos**⁴

Universidad Autónoma de Querétaro, MÉXICO

¹alejandro.garcia.basurto@uaq.mx

²<https://orcid.org/0000-0001-9026-6694> | juan.saucedo@uaq.mx

³<https://orcid.org/0000-0001-5320-4064> | angel.perez@uaq.mx

⁴<https://orcid.org/0000-0003-0868-2918> | raor@uaq.mx

Recibido 12-10-2020, aceptado 08-12-2020.

Resumen

En este trabajo de investigación se propone una metodología de diagnóstico basada en el cálculo y reducción de indicadores estadísticos estimados de señales de vibración para la detección de fallas de encendido o por chispa en un motor de combustión interna (MCI). El trabajo realizado por los autores incluye la caracterización de señales de vibración mediante cuatro indicadores estadísticos capaces de modelar la tendencia y describir cambios en las señales. Además, en el método propuesto se introduce el uso de las técnicas de reducción de indicadores estadísticos como análisis de componentes principales y análisis discriminante lineal las cuales tienen la capacidad de reducir la dimensionalidad de la base del conjunto original de indicadores en el dominio del tiempo y obtener representaciones visuales de los patrones característicos de las condiciones de operación evaluadas. El método propuesto se evalúa sobre datos experimentales adquiridos durante la operación normal y con falla de encendido de un MCI en régimen de velocidad baja y alta. El procesamiento de las señales de vibración adquiridas y la aplicación de la metodología de diagnóstico propuesta se hizo bajo el entorno de programación de Matlab. Los resultados obtenidos en patrones característicos bidimensionales presentan claramente la separación de las diferentes condiciones de operación, dichos resultados demuestran que la metodología permite detectar fallas en MCI generadas en el sistema de encendido y que la detección de las fallas se puede realizar de forma efectiva independientemente de la velocidad de giro del motor.

Palabras clave: Análisis discriminante lineal, análisis de vibraciones, detección de fallas, indicadores estadísticos, motor de combustión interna.

Abstract

In this research work, a diagnosis methodology based on the calculation and reduction of statistical features that are obtained from vibration signals is proposed for the detection of misfire or spark failure in an internal combustion engine (ICE). This work is carried out by the characterization of vibration signals using four statistical features that are capable of modeling trends and describing changes in the acquired vibration signals. In addition, the proposed method introduces the consideration of dimensionality reduction techniques such as principal component analysis and linear discriminant analysis, which allows to obtain the reduction of an original feature space leading to achieve a visual representation of the characteristic patterns, represented by the set of statistical features, that characterizes different evaluated conditions in the ICE. The proposed method is evaluated on experimental data acquired during normal and misfire operation of an ICE in low and high speed regime. The processing of the acquired vibration signals and the application of the proposed diagnosis methodology is performed under Matlab®, which is a sophisticated software that may be used in a wide range of engineering applications. The results obtained in two-dimensional characteristic patterns clearly show the characterization of different operating conditions evaluated in the ICE, these results demonstrate that the methodology allows detecting faults in an ICE that are generated in the ignition system and that the detection of faults can be carried out effectively regardless of the rotational speed of the engine.

Index terms: Fault detection, internal combustion engine, linear discriminant analysis, statistical indicators, vibration analysis.

I. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, los avances y desarrollos tecnológicos han influenciado directamente sobre diferentes áreas generando nuevas tendencias. En este sentido, la industria automotriz no ha quedado exenta de dichos avances, sin embargo, en México, aunque se han presentado grandes avances que van desde la optimización del consumo de combustible hasta la aplicación de motores híbridos y eléctricos, aún en la actualidad circulan millones de automóviles impulsados por motores de combustión interna (MCI). En este sentido, existe una gran necesidad en los talleres de servicio automotriz por desarrollar nuevas herramientas aplicadas al monitoreo, diagnóstico y detección de fallas en MCI con el objetivo de incrementar su vida útil y minimizar los gastos de mantenimiento.

La problemática actual radica en que la aparición de fallas de encendido o por chispa en la bujía en MCI son las más comunes y pueden darse de forma repentina produciendo principalmente pérdidas de potencia y altas emisiones contaminantes, afectando su desempeño (véase Tabla 1) [1]. Por otra parte, el diagnóstico de fallas producidas en el sistema de encendido se realiza tradicionalmente en forma heurística, lo que implica en la mayoría de los casos, que se debe de realizar una inspección física de los componentes y en consecuencia un criterio de diagnóstico individual. Aunque existen herramientas que asisten en el diagnóstico de este tipo de fallas, generalmente el acceso a estas herramientas es drásticamente limitado por ser herramientas comercialmente costosas.

TABLA 1
SISTEMAS QUE PUEDEN CAUSAR PÉRDIDA DE POTENCIA, ALTAS EMISIONES Y BAJO DESEMPEÑO DEL MCI

Sistemas del Motor de Combustión Interna	Cantidad de Causas	Porcentaje
Sistema de Encendido	9	30 %
Sistema de Tren Valvular	7	23.3 %
Sistema de Inyección de Combustible	6	20 %
Sistema de Emisiones	5	16.7 %
Sistema de Distribución	2	6.7 %
Otros Sistemas	1	3.3 %
	30	100 %

Asimismo, la identificación de fallas en MCI ha representado un tema interesante para algunos investigadores que intentan resolver problemáticas que pueden presentarse durante el diagnóstico. En este sentido, tanto el monitoreo y adquisición de diferentes señales, como el uso de técnicas de procesamiento aplicadas como método de diagnóstico y detección de fallas, son una de las alternativas y enfoques que se ha estudiado en los últimos años. Así, entre las señales más utilizadas se encuentran las vibraciones y por ejemplo, mediante la representación de la señales de vibración en mapas del dominio tiempo-frecuencia estimadas por el uso de la transformada continua Wavelet (CWT, *Continuous Wavelet Transform*) se ha logrado demostrar que las vibraciones del MCI representan una medida fiable y apropiada para la identificación de fallas [2]. También se propuso una técnica de diagnóstico de fallas en MCI basada en patrones de puntos visuales de las señales acústicas y de vibración adquiridas, los resultados experimentales indicaron que el método propuesto es efectivo para la identificación de fallas en el MCI [3]. Además, existen otros trabajos que han logrado realizar la identificación de fallas en los sistemas de encendido, combustión, e inyección mediante el procesamiento de señales de vibración, en donde, el cálculo de indicadores estadísticos representa una estrategia aceptable para analizar la tendencia y cambios de señales [4]. De igual forma se han logrado novedosas caracterizaciones de

fallas inducidas en un motor instrumentado con un acelerómetro mediante el método probabilístico Naive-Bayes, el cual demostró que detecta y clasifica con precisión fallas mecánicas que ocurren en múltiples componentes simultáneamente [5]. En este contexto también los investigadores han trabajado sobre la clasificación de fallas en MCI utilizando indicadores calculados con técnicas en el dominio de tiempo y algoritmos de selección de variables, basado en análisis de varianza [6]. Aunque, ya existen avances en el desarrollo de estrategias de monitoreo y diagnóstico aplicadas a MCI, aún se tiene la necesidad de continuar con el desarrollo de nuevas estrategias que ayuden en la identificación de fallos que pueden aparecer de forma repentina.

Por lo tanto, la contribución de este trabajo se basa en la propuesta y desarrollo de una metodología de monitoreo de condición, aplicada al diagnóstico y detección de fallas producidas en el sistema de encendido de MCI mediante el análisis de señales de vibración. Las novedades de la metodología propuesta incluyen: a) la adquisición de señales de vibración para describir la operación continua de trabajo de un MCI; b) la caracterización de señales de vibración mediante un conjunto de indicadores estadísticos en el dominio del tiempo para obtener los patrones representativos de la condición de operación del MCI y c) la consideración de técnicas de reducción de dimensionalidad para fusionar la información de los diferentes indicadores estadísticos y obtener una representación visual de las condiciones evaluadas. La validación de la metodología propuesta se realiza mediante el análisis de señales de vibración adquiridas experimentalmente en un MCI que opera bajo condiciones normales y condiciones anormales producidas por fallas en el sistema de encendido.

II. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

A. Técnicas para el cálculo de indicadores

El objetivo de las técnicas de procesamiento de señales es el de caracterizar una señal específica para resaltar y obtener sus mejores atribuciones. La mayoría de técnicas de procesamiento incluyen análisis en el dominio del tiempo, de la frecuencia y tiempo-frecuencia. Referente a las técnicas del dominio del tiempo, el cálculo de indicadores estadísticos sigue prevaleciendo como una de las mejores estrategias para modelar tendencias y cambios de señales, incluso, el cálculo de indicadores estadísticos es preferido debido al bajo costo computacional requerido [7]. Por otra parte, las técnicas del dominio de la frecuencia y tiempo-frecuencia, pueden ser de mayor complejidad y requieren el previo conocimiento de su uso para obtener buenas representaciones y resultados de alto rendimiento; dentro de estas técnicas destacan la transformada rápida de Fourier (FFT, *Fast Fourier Transform*), la transformada corta de Fourier (STFT, *Short-time Fourier Transform*) y transformadas Wavelet (CWT, *Continuous Wavelet Transform*) [8], [9], [10].

B. Técnicas de reducción de indicadores

Es posible utilizar una gran cantidad de indicadores pensando en poder aumentar las capacidades de discriminación entre fallas, sin embargo, este aumento de indicadores no garantiza el incremento de información importante y relacionada con las diferentes condiciones de operación. Por esta razón, se requiere utilizar algunas de las diferentes estrategias y procedimientos de reducción de indicadores [11]. El uso de técnicas de reducción de indicadores aplicadas en estrategias de monitoreo de condición y diagnóstico de fallas han demostrado ser de gran utilidad para resaltar las diferencias que existen entre distintos patrones de falla y para la reducción de la dimensionalidad de un conjunto de datos representados en un espacio dimensional d . Dentro de estas técnicas, las más usadas y conocidas son: Análisis de Componentes Principales (PCA, *Principal Component Analysis*) y Análisis Discriminante Lineal (LDA, *Linear Discriminant Analysis*) [12].

La PCA tiene sus bases en el álgebra lineal y es una técnica no supervisada por no requerir información de la clase a la que pertenecen las muestras analizadas. Su enfoque de reducción de la dimensionalidad se basa en mantener la variabilidad del conjunto de datos originales. En forma más específica, cuando se aplica la técnica PCA sobre un conjunto de indicadores, se extrae un nuevo conjunto de indicadores llamados componentes principales y cada uno de estos es una combinación lineal de los indicadores originales. En adición a esto, en las componentes principales no hay información repetida por ser ortogonales entre sí; de esta manera se mantiene la variabilidad del conjunto de indicadores originales [13]. El proceso matemático es bastante simple

utilizando el criterio del error cuadrado para minimizar la distancia entre el vector x_w y los demás vectores, como en la ecuación (1).

$$J_0(x_0) = \sum_{i=1}^N \|x_w - x_i\|^2 \quad (1)$$

Primero, se calcula la media del vector dimensional d y la matriz de covarianza μ , para el todo el conjunto de datos normalizados. A continuación, se calculan los vectores propios $x_{\lambda-i}$ y los valores propios λ_i de la matriz de covarianza y se ordenan de acuerdo con el valor propio decreciente, finalmente, se eligen los k vectores propios más significativos para realizar la transformación y proyección de los nuevos indicadores, véase la ecuación (2).

$$Y_i = x_{\lambda-i} * X_i \quad (2)$$

Por otro lado, la LDA es una técnica supervisada de reducción de la dimensionalidad cuyo objetivo se centra en maximizar tanto como sea posible la separación lineal entre conjuntos de muestras que pertenezcan a diferentes clases o diferentes condiciones. Para casos prácticos de aplicación en la identificación de fallas, la LDA es una técnica apropiada que puede conducir a la identificación de diferentes condiciones. considerando que esta técnica engloba problemas de múltiples clases con C clases compuestas por N muestras, la LDA calcula una matriz de dispersión entre clases con la ecuación (3).

$$S_b = \sum_{j=1}^C N_j (m_j - \bar{m})(m_j - \bar{m})^T \quad (3)$$

donde N_j corresponde al número total de muestras de la j -ésima clase C_j , teniendo en cuenta todas las clases \bar{m} es la media de todas las muestras y m_j es la media de la clase C_j . También considera el cálculo de la matriz de dispersión dentro de las clases como en la ecuación (4). El vector óptimo de proyección W_{LDA} que es elegido por la LDA permite obtener clases bien separadas con la ecuación (5).

$$S_w = \sum_{j=1}^C \sum_{i=1}^{N_j} (x_i^j - m_j)(x_i^j - m_j)^T = \sum_{j=1}^C S_{w_j} \quad (4)$$

$$W_{LDA} = \arg \max \frac{|W^T S_b W|}{|W^T S_w W|} = [w_1 \quad w_2 \quad \dots \quad w_m] \quad (5)$$

donde $\{w_i | i = 1, 2, \dots, m\}$ pertenece al conjunto de vectores propios generalizados también conocidos como vectores discriminantes de la matriz S_b y S_w que corresponden a los valores propios generalizados de mayor relevancia de la clase $C-I \{ \lambda_i | i = 1, 2, \dots, m \}$. De este modo, la extracción de indicadores que resulta en V se obtiene a través de la proyección del conjunto de datos original de indicadores X en el espacio de dimensión reducida W_{LDA} como se ve en la ecuación (6) [11]. El desarrollo teórico-matemático de ambas técnicas es bien conocido y sus detalles pueden consultarse en [12], [14],[15].

$$V = W_{LDA}^T X \quad (6)$$

III. METODOLOGÍA

A. Experimento

La metodología propuesta es aplicada sobre datos experimentales adquiridos de un MCI, la puesta en marcha del experimento consistió en instalar un acelerómetro triaxial de bajo costo (ADXL345) sobre una parte sólida del motor, específicamente fue instalado sobre el bloque del MCI. Para la adquisición de señales se desarrolló un sistema de adquisición de datos bajo el lenguaje de programación en hardware basado en tecnología FPGA (*Field Programmable Gate Array*). El sistema de adquisición de datos cuenta con su etapa de acondicionamiento correspondiente para evitar el *aliasing*. Las señales de vibración se adquirieron experimentalmente bajo dos condiciones diferentes de operación del MCI, es decir, bajo condición sana o normal y bajo condición de falla en el sistema de encendido. Para las dos condiciones evaluadas en el MCI, las señales de vibración fueron adquiridas durante 60 segundos cuando el MCI se encontraba operando en modo ralentí aproximadamente a 950 rpm.

La condición de falla en el MCI se indujo de forma artificial mediante la desconexión de uno de los cables de bujías, lo cual produjo que la bujía de uno de los cilindros dejara de producir chispa y así afectar a la combustión del MCI. El acelerómetro fue operado con una frecuencia de muestreo de 3200 Hz y los datos adquiridos fueron almacenados en una PC para su posterior análisis.

B. Metodología de diagnóstico propuesta

La metodología de diagnóstico propuesta para la detección de fallas ocasionadas en el sistema de ignición de un MCI consta principalmente de cuatro etapas diferentes como se muestra en el diagrama a bloques de la Fig. 1.

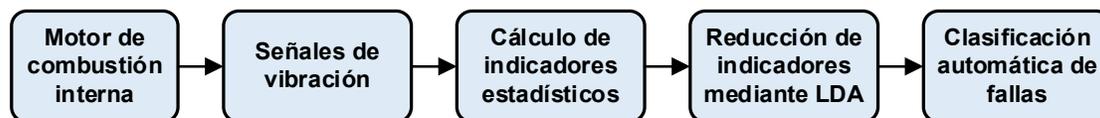


Fig. 1. Diagrama bloques la metodología de diagnóstico propuesta para la identificación de fallas en motores de combustión interna mediante el análisis de señales de vibración.

Primero: se realiza el monitoreo continuo de la operación sobre el MCI, dicho monitoreo considera la adquisición de señales de vibración que son adquiridas mediante un sistema de adquisición de datos de arquitectura abierta y enviadas para ser almacenados en una computadora personal para su análisis posterior. Cabe mencionar que los datos adquiridos corresponden a la medición de vibraciones producidas en el MCI que opera bajo diferentes condiciones de operación.

Segundo: después de adquirir las señales de vibración, se efectúa el cálculo de indicadores estadísticos que describirán el comportamiento y tendencias las señales de vibración adquiridas; así, se realiza la caracterización de las señales adquiridas mediante la estimación numérica de dicho conjunto de cuatro indicadores estadísticos del dominio de tiempo. El objetivo principal es obtener la caracterización de los patrones de las señales de vibración que representan diferentes condiciones de operación del MCI.

Tercero: en la etapa de reducción de indicadores, el conjunto original de cuatro indicadores estadísticos es sometido a un proceso de compresión y transformación de base mediante la aplicación de las técnicas de reducción de la dimensionalidad PCA y LDA. La finalidad de la aplicación del proceso de reducción es obtener una representación visual en un espacio bidimensional (2D); además, el uso de estas técnicas permite fusionar la información de cada uno de los indicadores estadísticos lo que conduce a una mejor caracterización de las condiciones evaluadas.

Cuarto: mediante la aplicación de un clasificador basado en una red neuronal de estructura simple se obtiene el diagnóstico y clasificación automática de la aparición de fallas en el MCI. El uso de la red neuronal como herramienta de clasificación ayuda a generar una estructura de diagnóstico automática debido que las salidas del diagnóstico las basa en el análisis de los resultados obtenidos por el uso de las técnicas

PCA y LDA. Es decir, dicho clasificador se enfocará en realizar la clasificación basándose en el análisis de las proyecciones resultando en el espacio bidimensional (2D).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

El procesamiento de las señales adquiridas y la aplicación de la metodología de diagnóstico propuesta se hizo bajo el entorno de programación de Matlab®. Como anteriormente se mencionó, la adquisición de las señales de vibración se realizó durante 60 segundos cuando el MCI operaba a aproximadamente 950 rpm. En la Fig. 2 se muestran las señales de vibración adquiridas para ambas condiciones de operación, sano y falla, respectivamente, se puede observar también un claro incremento en la amplitud de las vibraciones producidas por el MCI cuando se encuentra operando bajo la influencia del fallo inducido en el sistema de encendido, este incremento de vibraciones tiene una buena representación por estar asociado al mal funcionamiento del MCI y tendrá un patrón específico representativo.

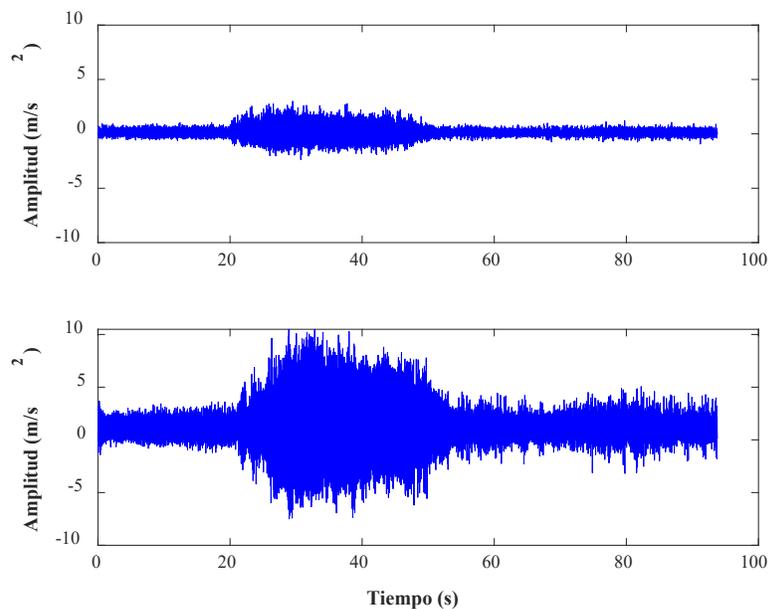


Fig. 2. Señales de vibración adquiridas durante la operación del MCI en operaciones de trabajo sana (superior) y una condición de falla ocasionada en el sistema de ignición (inferior).

Posteriormente, cada una de las señales de vibración adquiridas fue segmentada en partes iguales de 0.5 segundos con la finalidad de formar un conjunto de muestras consecutivas. Enseguida, para obtener una caracterización de las señales adquiridas, sobre cada uno de los segmentos de las señales se calcularon los cuatro indicadores estadísticos en el dominio del tiempo: valor eficaz (RMS -Root Mean Square), ecuación (7), la desviación estándar (σ), de acuerdo a la ecuación (8), el sesgo (S_k), con la ecuación (9), y la curtosis (K_w), como se muestra la ecuación (10) [11], [16].

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i)^2}{n}} \quad (7)$$

7

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (8)$$

$$S_k = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^3}{\sigma^3} \quad (9)$$

$$K_{ur} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^4}{\sigma^4} \quad (10)$$

Sucesivamente, con el objetivo de obtener una representación visual de las condiciones de operación evaluadas en el MCI (sano y falla), el conjunto de indicadores estadísticos estimados fue sometido al proceso de reducción y transformación de base mediante las técnicas PCA y LDA. Como resultado de este proceso, se obtuvieron las gráficas mostradas en la Fig. 3 y la Fig. 4, respectivamente.

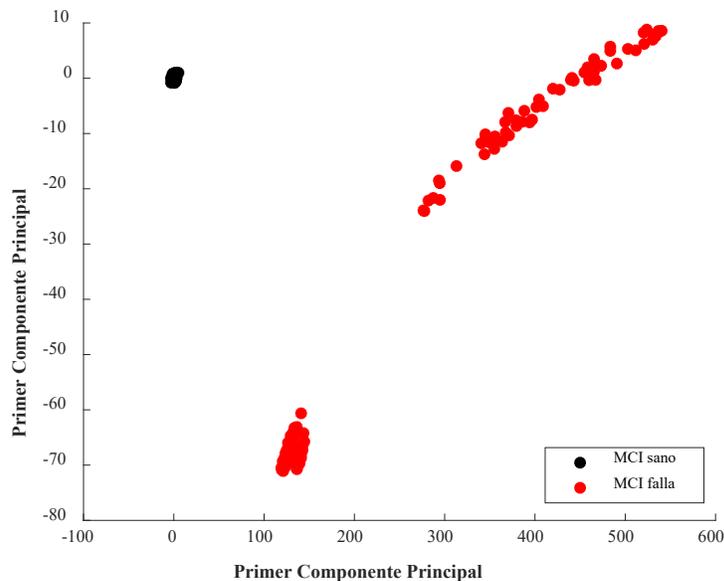


Fig. 3. Proyección resultante obtenida tras aplicar la PCA al conjunto original de indicadores estadísticos calculados de las señales de vibración disponibles.

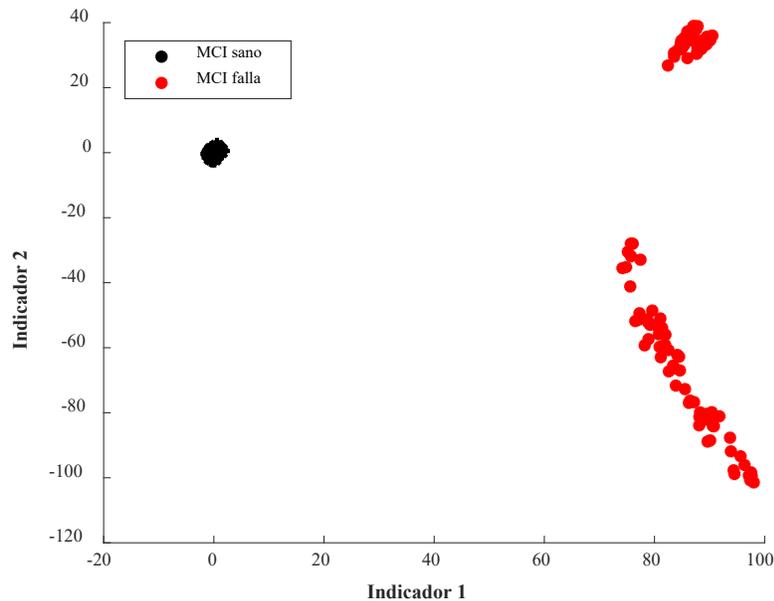


Fig. 4. Proyección resultante al aplicar la LDA como técnica de reducción de indicadores sobre el conjunto de indicadores estadísticos que caracterizan las señales de vibración cuando el MCI opera bajo condiciones diferentes de operación.

De los resultados obtenidos al aplicar la reducción de indicadores debe mencionarse que la aplicación de la PCA para las diferentes condiciones, sano y falla evaluados a dos velocidades de giro del MCI, 950 rpm y 5000 rpm; lo que muestra que se mantuvo la variabilidad del conjunto de señales de vibración de MCI como se muestra en la Fig. 3, y la separación de condiciones se obtiene debido a que existe una desviación en la varianza de los indicadores de la condición evaluadas. Por otra parte, al aplicar la LDA se obtiene una maximización de la separación entre clases y una minimización de la distancia entre datos de cada condición como se muestra en la Fig. 4. Estos resultados prueban que las técnicas de reducción de indicadores son una herramienta útil que pueden conducir a la detección de fallas en un MCI, incluso, el uso de estas técnicas también lleva a obtener una representación visual para proyectar un conjunto original de datos en 2D.

Para validar la aplicación del método propuesto, la misma condición de falla en el MCI fue evaluada a una velocidad de giro variable, por lo tanto, un conjunto de señales de vibración fue también adquirido cuando el MCI operaba de aproximadamente 900 rpm a 5000 rpm; es decir, se adquirieron durante un periodo de incremento de velocidad del motor para observar el comportamiento de la falla. Posteriormente, la metodología de diagnóstico fue aplicada como se explicó anteriormente y el conjunto de muestras correspondientes a esta operación de fallo fue proyectado sobre las representaciones visuales obtenidas tras aplicar la PCA y LDA respectivamente. Los resultados de la evaluación del fallo en progreso (evolución) en un rango de velocidad de giro del motor de 900 rpm a 5000 rpm, y la reducción de la dimensionalidad se muestran en las Fig. 5 y Fig. 6 respectivamente. Así, como se puede observar en las Fig. 5 y Fig. 6, la metodología de diagnóstico y detección de falla en el sistema de encendido de un MCI también es capaz de determinar que existe un área en las proyecciones resultantes en donde prevalece el comportamiento y se muestra la evolución de la aparición del fallo en el sistema de ignición del MCI.

De acuerdo con los resultados obtenidos, la metodología propuesta de diagnóstico y detección de fallas en MCI permite detectar de forma precisa la aparición de fallas en el sistema de encendido, independientemente de la velocidad de giro del MCI. Además, en el caso de aplicación de la técnica LDA, esta proporciona mejores resultados debido a que se trata de una técnica enfocada a la solución de problemas de múltiples clases. Por otra

parte, aunque la PCA también es capaz de separar las condiciones evaluadas, su rendimiento comenzará a decrementar en cuanto se incremente el número de condiciones.

9

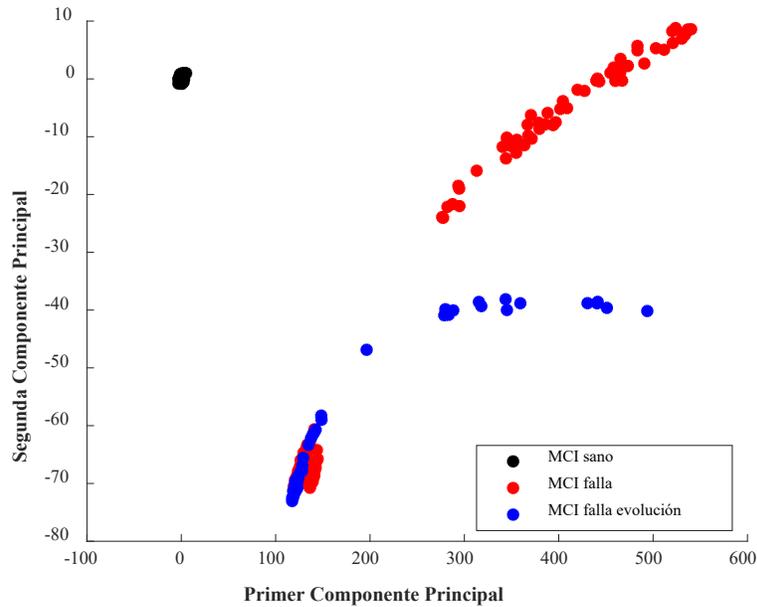


Fig. 5. Proyección resultante que se obtuvo al aplicar la PCA al conjunto original de indicadores que muestra el comportamiento de las muestras que corresponden a la evaluación del fallo en un rango de revoluciones entre 900 rpm a 5000 rpm.

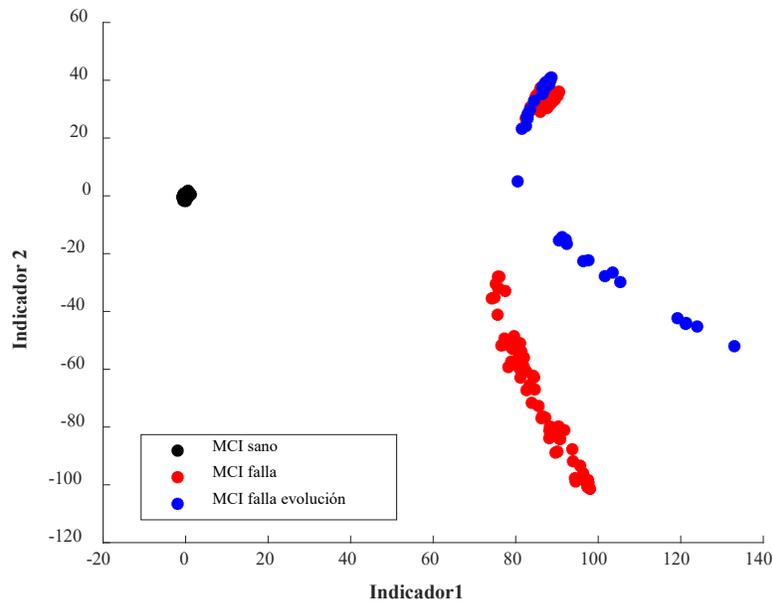


Fig. 6. Proyección resultante obtenida al aplicar la LDA como técnica de reducción de indicadores donde se muestra el comportamiento de un conjunto de muestras que corresponden a la evaluación del fallo en un rango de revoluciones entre 900 rpm a 5000 rpm.

Respecto a la aplicación del clasificador de fallas automático, se utilizó una estructura básica de una red neuronal de tres capas, en la capa de entrada la red neuronal consta de dos neuronas que corresponden al número de la dimensionalidad a la cual fue reducido el conjunto original de indicadores estadísticos; es decir, en la capa de entrada se evaluar las muestras proyectadas en esos espacios reducidos de dos dimensiones. En la capa oculta la red neuronal se conformó con diez neuronas como en algunas de las aplicaciones de clasificación lo recomienda; finalmente, en la capa de salida la red neuronal conto con dos neuronas debido a que dos condiciones son las que fueron evaluadas, condición sana y de falla, respectivamente. Por lo tanto, cuando fueron evaluados los conjuntos de muestras obtenidos en las proyecciones obtenidas tras aplicar la PCA y LDA, la red neuronal obtuvo porcentajes de clasificación global promedio del 99.8% y 100% durante el entrenamiento y evaluación de dicha red neuronal. La red neuronal es una red de propagación hacia atrás y fue entrenada durante 50 épocas usando funciones de activación sigmoideal.

V. CONCLUSIONES

El desarrollo de esta metodología de diagnóstico incluye el uso de técnicas de reducción de indicadores para la aplicación del diagnóstico de falla de encendido por chispa en un MCI, probando que la reducción de indicadores estadísticos mediante la PCA y la LDA permiten determinar la aparición de fallas a diferentes velocidades de operación del MCI. Así, mientras que PCA mantiene la variabilidad de las señales, la LDA maximiza la separación entre clases, sano y fallo. Además, se demostró que el uso de señales de vibración y su caracterización mediante el cálculo de indicadores estadísticos son herramientas fiables para ser aplicadas con fines de monitoreo y diagnóstico en MCI. Además, el uso e implementación de herramientas de inteligencia artificial, como redes neuronales, ayuda a generar respuestas automáticas en durante la tarea de monitoreo y diagnóstico que pueden ser aplicadas en MCI. Una de las prospectivas de este trabajo reside en la evaluación de otras fallas en el MCI para generar una metodología de monitoreo y diagnóstico con mayores capacidades de detección, incluso, la implementación de esta metodología en hardware podría ayudar a generar herramientas de diagnóstico en tiempo real.

REFERENCIAS

- [1] L. Warren y J. H. Haynes, *Chevrolet/GMC Camionetas. Manual de Reparación*, vol. 99040. California, USA: Haynes de Norte América, 1995.
- [2] A. Moosavian, G. Najafi, B. Ghobadian, M. Mirsalim, S. M. Jafari, y P. Sharghi, "Piston scuffing fault and its identification in an IC engine by vibration analysis", *Appl. Acoust.*, vol. 102, pp. 40-48, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2015.09.002>
- [3] J. Da Wu y C. Q. Chuang, "Fault diagnosis of internal combustion engines using visual dot patterns of acoustic and vibration signals", *NDT E Int.*, vol. 38, núm. 8, pp. 605-614, 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2005.02.007>
- [4] S. Delvecchio, P. Bonfiglio, y F. Pompoli, "Vibro-acoustic condition monitoring of Internal Combustion Engines: A critical review of existing techniques", *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 99. Academic Press, pp. 661-683, 15-ene-2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2017.06.033>
- [5] J. Flett y G. M. Bone, "Fault detection and diagnosis of diesel engine valve trains", *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 72-73, pp. 316-327, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2015.10.024>
- [6] E. Ftoutou, M. Chouchane, y N. Besbès, "Internal combustion engine valve clearance fault classification using multivariate analysis of variance and discriminant analysis", *Trans. Inst. Meas. Control*, vol. 34, núm. 5, pp. 566-577, 2012, doi: <https://doi.org/10.1177/0142331211408492>
- [7] J. J. Saucedo-Dorantes, M. Delgado-Prieto, R. A. Osornio-Rios, y R. De Jesus Romero-Troncoso, "Multifault Diagnosis Method Applied to an Electric Machine Based on High-Dimensional Feature Reduction", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 53, núm. 3, pp. 3086-3097, 2017, doi: <https://doi.org/10.1109/TIA.2016.2637307>
- [8] K. Jafarian, M. Mobin, R. Jafari-Marandi, y E. Rabiei, "Misfire and valve clearance faults detection in the combustion engines based on a multi-sensor vibration signal monitoring", *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 128, núm. March, pp. 527-536, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.04.062>
- [9] A. Taghizadeh-Alisarai y A. Mahdavian, "Fault detection of injectors in diesel engines using vibration time-frequency analysis", *Appl. Acoust.*, vol. 143, pp. 48-58, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.09.002>

- 11
- [10] J. Da Wu y J. C. Chen, "Continuous wavelet transform technique for fault signal diagnosis of internal combustion engines", *NDT E Int.*, vol. 39, núm. 4, pp. 304-311, jun. 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2005.09.002>
 - [11] J. J. Saucedo-Dorantes, "Metodologías para mejorar la confiabilidad del diagnóstico de fallas en cadenas cinemáticas basado en algoritmos inteligentes y fusión de datos", tesis de doctorado, mecatrónica, Universidad Autónoma de Querétaro, San Juan del Río, Querétaro, México, 2017.
 - [12] R. O. Duda, P. E. Hart, y D. G. Stork, *Pattern Classification*, Second Edi. New York, N.Y., U.S.A: John Wiley & Sons, 2012.
 - [13] X. Wan, D. Wang, P. W. Tse, G. Xu, y Q. Zhang, "A critical study of different dimensionality reduction methods for gear crack degradation assessment under different operating conditions", *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 78, pp. 138-150, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.09.032>
 - [14] S. Theodoridis y K. Koutroumbas, *Pattern Recognition*, Third Edit. San Diego, California, USA: Academic Press, 2006.
 - [15] S. I. Grossman y J.-J. Flores-Godoy, *Álgebra Lineal*, Séptima Ed. D.F., México: McGraw-Hill, 2012.
 - [16] A. Rustom J., *Estadística Descriptiva, Probabilidad e Inferencia*, Primera ed. Santiago, Chile: Universidad de Chile, 2012.

Análisis de falla sobre roles para cuerdas metálicas

Failure Analysis on Metallic Thread Rolls

Steven Geovanny **García-Hernández**¹, Norberto **Mendoza-Saucedo**²
Beatriz **Muñoz-González**³, Marco Antonio **Doñu-Ruiz**⁴

¹Universidad Politécnica del Valle de México, MÉXICO

<https://orcid.org/0000-0003-4507-6722> | stevngarch@hotmail.com

²Universidad Politécnica del Valle de México, MÉXICO

ing.norberto.mendoza@hotmail.com

³Instituto Politécnico Nacional, MÉXICO

beatriz_mugo@hotmail.com

⁴Universidad Politécnica del Valle de México, MÉXICO

<https://orcid.org/0000-0002-3411-7990> | marco.donu@upvm.edu.mx

Recibido 20-09-2020, aceptado 30-11-2020.

Resumen

Se realizó un análisis de falla usando técnicas de caracterización sobre elemento mecánico llamado Rol; diseñado para realizar cuerdas internas a flechas, el material del elemento mecánico es un acero AISI M5. Se utilizó el análisis visual de la pieza, líquidos penetrantes, dureza HRC, microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido, con el fin de determinar la causa de su falla en servicio. El estudio demuestra que el fallo ocurrió por fatiga mecánica. En la zona cercana a la periferia del rol, presenta unas zonas con carburos irregulares en la matriz con dureza irregular y presencia de cambios microestructurales. El rol presenta una grieta en la periferia de la pieza, esto conlleva posteriormente al colapso y fractura del rol. Con técnicas de caracterización se determinan, los diversos factores que ocasionaron la fractura, los resultados de los estudios metalúrgicos y concluyendo que el tratamiento térmico no fue el óptimo

Palabras clave: carburos, microestructura, elementos de aleación, fractura.

Abstract

A failure analysis using characterization techniques on a mechanical element called Rol was done; designed to make internal ropes with arrows, the material of the mechanical element is an AISI M5 steel. Visual analysis of the part, penetrating liquids, HRC hardness, optical microscopy and scanning electron microscopy to determine the cause of its failure in service. The study shows that failure occurred due to mechanical fatigue. In the area around the periphery of the role, there are areas with irregular carbides in the matrix with irregular hardness and presence of microstructural changes. A crack is presented in periphery role; this leads later to the collapse and fracture of the role. With characterization techniques, the diverse factors that caused the fracture are determined, as well as the results of the metallurgical studies, concluding that the thermal treatment is not optimal.

Index terms: carbides, microstructure, alloy elements, fracture.

I. INTRODUCCIÓN

La manufactura es una rama muy importante en la industria mundial, asimismo muchos materiales son utilizados como elementos de máquinas para manufacturar telas, envases, ductos, piezas automotrices, piezas aeronáuticas, piezas para el campo, contenedores para almacenamiento de energía renovable por mencionar algunas ramas de la ingeniería [1], [2]. Por otro lado, estos elementos son materiales que tienen tratamientos térmicos convencionales y tratamientos de superficie para aumentar su vida útil en servicio como herramientas de corte (maquinado), cizallas, troqueles, roles de cuerda, forja, embutido por mencionar algunos [3], [4]. Los materiales que son utilizados para realizar procesos de manufactura primarios y secundarios están sometidos a elevados esfuerzos, a carga por impacto, torsión, flexión, tensión, por ello se requiere que tengan propiedades mecánicas óptimas para su servicio, retardando su falla en uso [5], [6].

Otro de las situaciones que afecta a los elementos mecánicos que trabajan para obtener un producto terminado, son la sensibilidad a los defectos microestructurales por tratamientos térmicos y termoquímicos inadecuados, que conllevan a la disminución de la producción en la industria manufacturera [7], [8].

Otros de los fundamentos claves en la fractura de los elementos mecánicos son la selección de los materiales para cierta aplicación ingenieril y los métodos de manufactura. Por ello, el análisis de falla o la mecánica forense busca determinar las posibles fallas que puedan desencadenar la fractura del componente ingenieril. El estudio del análisis de fallas es de gran valor técnico y científico, dado que estos manifiestan conocimiento sobre los motivos de fallo, que al momento de estudiarse a fondo pueden ser reducidas en ocurrencia o hasta llegar a ser eliminadas totalmente, de tal forma este trabajo tiene el objetivo de establecer las causas de la falla de esta pieza ingenieril utilizada para realizar cuerdas en ejes; mediante técnicas de caracterización microestructural y análisis fractográfico de la fractura del rol con el fin de determinar la causa probable de falla.

II. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Se realizó inicialmente la inspección visual del rol, así como recabar información sobre lo ocurrido en el momento de la falla. La falla del rol se estudió utilizando las siguientes técnicas: a) Inspección visual con líquidos penetrantes, b) Fractografía, mediante microscopía electrónica de barrido (MEB), usando un equipo marca JSM 6360 LV, c) Metalografía, mediante microscopía óptica usando un microscopio marca Olympus GX 51 y MEB, d) Análisis químico, empleando espectroscopia de energías dispersivas de rayos X (EDS), e) Ensayo mecánico de dureza, utilizando un durómetro universal marca Mitutoyo.

III. RESULTADOS Y DISCUSIONES

A. Inspección visual

El rol para cuerdas metálicas en este estudio presenta un agrietamiento en la superficie exterior del mismo el crecimiento de estas grietas como se muestra en la Fig. 1(a). Por otra parte, se realizaron la inspección por líquidos penetrantes como se observa en la Fig. 1(b), con la finalidad de obtener la longitud de la grieta que nace del exterior y colapso en su vida útil. Como describe en su estudio Ebara *et al.* la importancia de identificar las zonas de grietas en este tipo de trabajos [7].

3

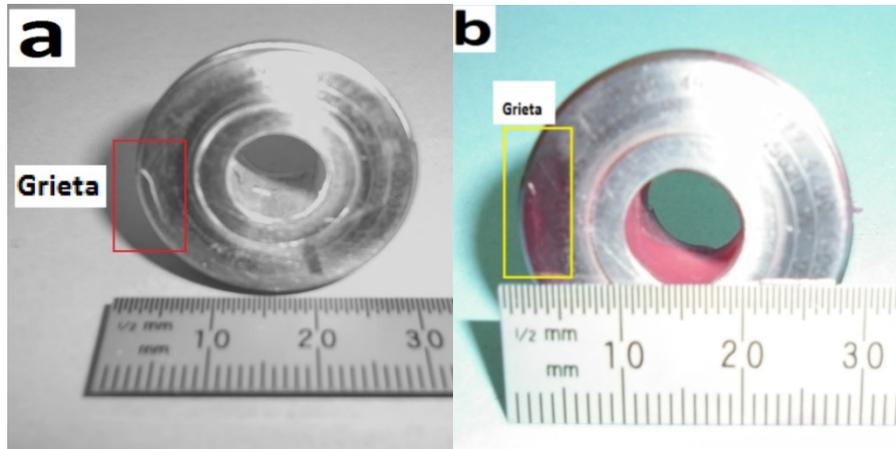


Fig. 1. (a) Grieta localizada en el exterior del rol; (b) Grieta revelada con líquidos penetrantes.

B. Dureza y fractografía

En la Fig. 2 se presentan diferentes zonas (a-1), (a-2), (b-1) y (b-2), de estudio y medición de la dureza. Pelcastre *et al.* en su estudio muestra que se deben realizar mediciones de dureza con el fin obtener información necesaria para un estudio más a detalle de deterioro del componente ingenieril [8]; por ello se obtuvieron mediciones de dureza de cada zona mostrando un cambio en las zonas de estudio. Además, en la Fig. 3 se muestran las micrografías de las fracturas; observando zonas con carburos irregulares en la matriz, además indica una fractura frágil, esto se debió a que se generaron grandes tensiones, por el cambio de dureza que hay en cada zona.

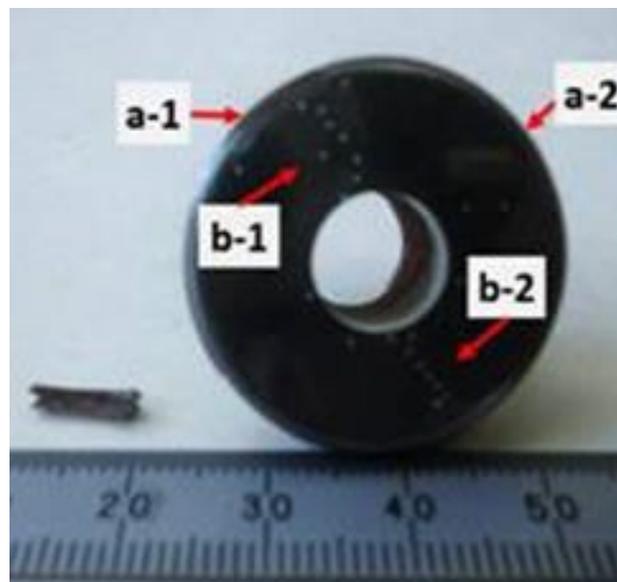


Fig. 2. Zonas de estudio y ensayos de dureza.

4

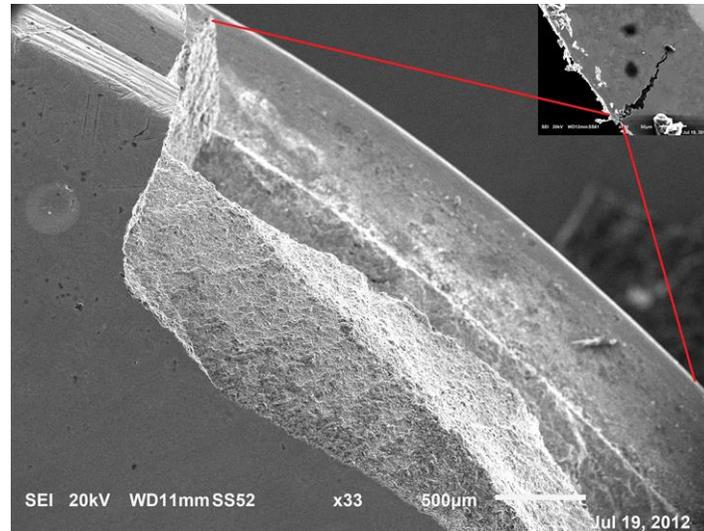


Fig. 3. Fractura en el área de inicio de la grieta zona (a-1).

En la Tabla 1 se muestra la medición de la dureza obtenida encada una de las zonas del rol; mostrando un cambio significativo el cual repercute en la vida útil del componente.

TABLA 1
PROMEDIO DE DUREZA EN ZONAS, ESCALA HRC.

Material	Zona	Dureza promedio
AISI M5	a1	64±2.03
AISI M5	a2	60± 2.48
AISI M5	b1	63.± 1.78
AISI M5	b2	55 1.18

C. Microestructura y micrografías

Zhua *et al.* [9] y Baggerly *et al.* [10] describen en sus trabajos que la presencia de cambios microestructurales afecta las propiedades de los materiales; por ende, se realizó el análisis metalográfico de rol para cuerdas metálicas en el sitio de la zona cercana a la fractura. Además, posteriormente en una distancia donde no se encontraba ninguna grieta o fisura del rol. En la Fig. 4 muestra las zonas de grietas y falla del rol. La Fig. 5 muestra los grupos de carburos distribuidos en una dirección perpendicular a la dirección de crecimiento de la grieta, sin embargo se encontró formación de descarburación en la zona de fractura. Por otro lado, la microestructura está constituida por carburos primarios aleados alineados (color blanco), en una matriz de martensita revenida con carburos secundarios. Por otra parte, en la zona sin falla no se encuentra este tipo de cambio microestructural y la presencia de descarburación.

5

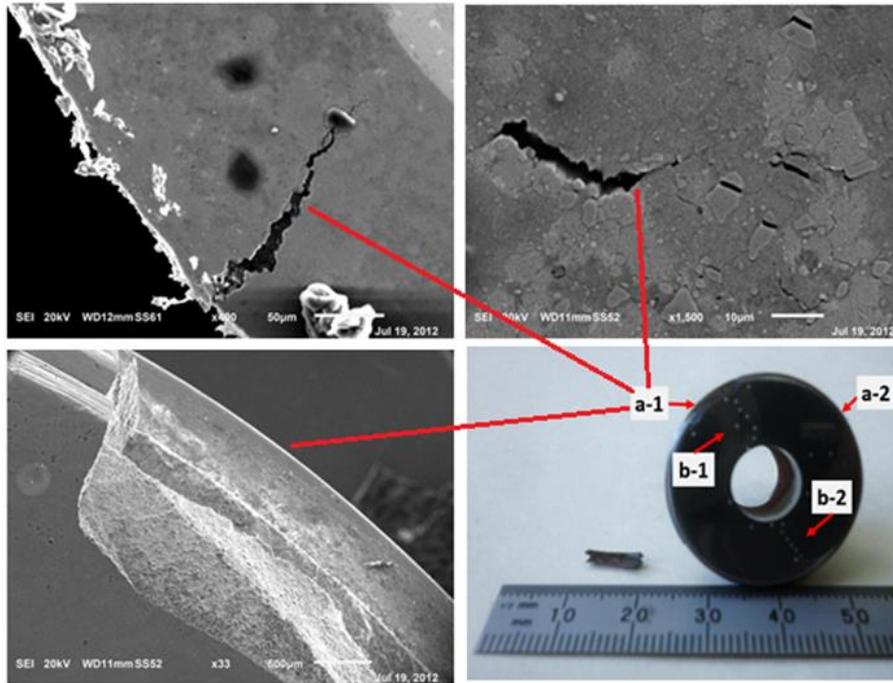


Fig. 4. Micrografías de la zona (a-1) de la superficie de fractura y grietas.

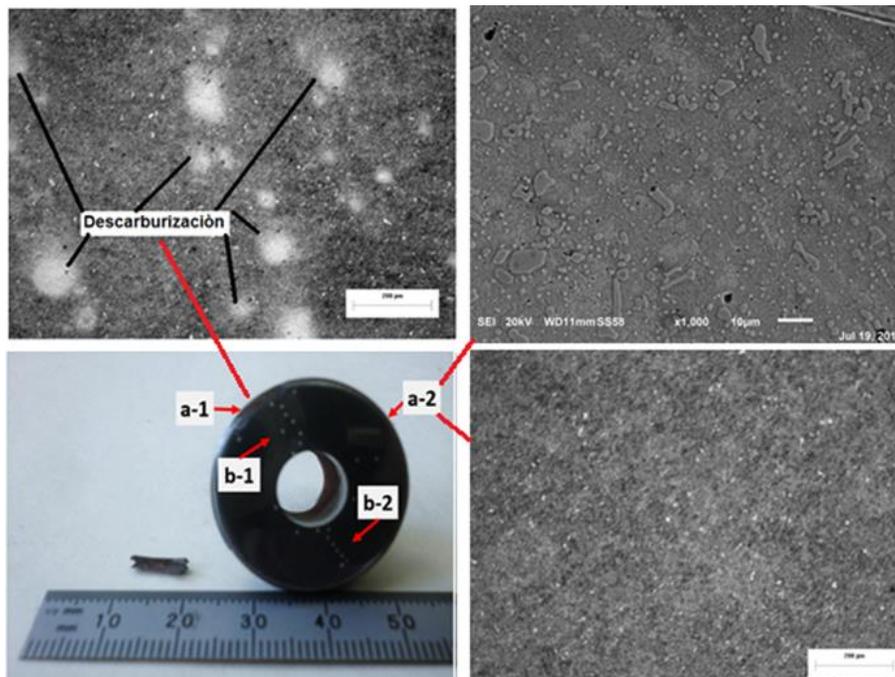


Fig. 5. Micrografía en la zona (a-1) y las micrografías en la zona sin grietas y fractura zona (a-2).

D. Energía dispersa de espectrometría

En la Fig. 6 se muestran el análisis de las diferentes zonas del espécimen; donde se revela los diferentes elementos de aleación del material de estudio, asimismo en la Tabla 2 se determinan los elementos acumulados en cada área del material de estudio.

6

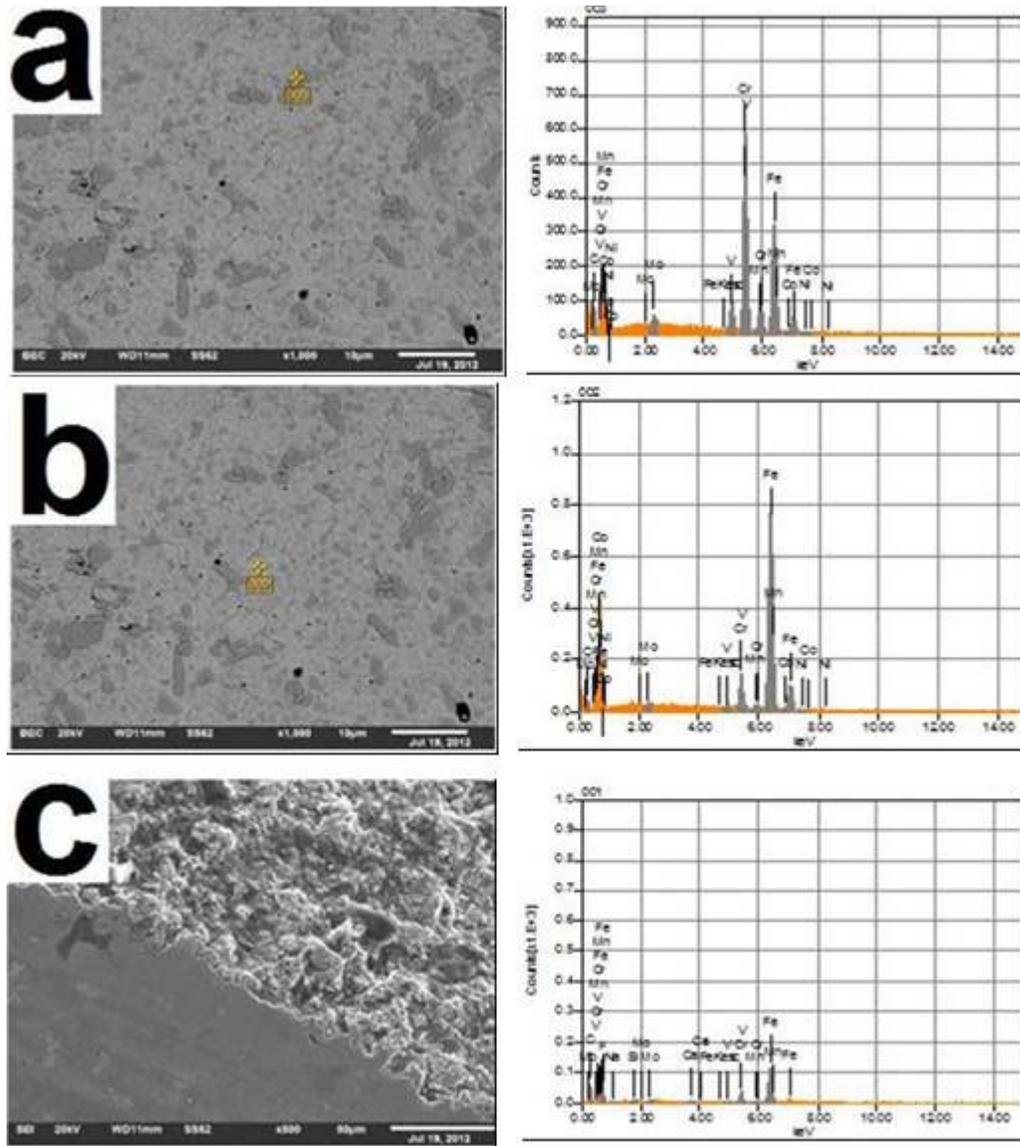


Fig. 6. Energía Dispersa de Espectrometría (EDS) de la zona puntual de carburo (a), zona donde no hay carburos (b), zona donde se generó la falla (c).

TABLA 2
COMPOSICIÓN QUÍMICA GENERADA MEDIANTE EDS EN LAS DIFERENTES ÁREAS DE ESTUDIO.

Muestra	Composición Química en ms%								
	Fe	Cr	C	Mo	Mn	F	Si	Ni	V
a	45.18	8.59	43.06	1.74	0.06	0.22	0.26	-	0.39
b	79.14	7.72	9.86	0.5	1.33	-	-	0.82	0.5
c	38.13	40.26	14.19	2.3	0.11	-	-	0.11	4.76

7

Los resultados obtenidos indican, la distribución de elementos en la cada área de estudios y detectar los elementos de cada componente químico. Evidenciando que hay un incremento de concentración de elementos en la zona de falla, esta muestra el inadecuado tratamiento térmico al rol.

IV. CONCLUSIONES

Los procedimientos y protocolos generales para llevar a cabo investigaciones de análisis de fallas se han documentado en muchos libros, manuales y artículos. Se discuten las razones y las características que pueden estar presentes en las superficies de fractura, además de hacer recomendaciones para prevenir la falla.

El fallo prematuro de la vida útil de rol de cuerdas metálicas se produjo por el tipo de estructura, ya que de las microestructuras que se obtuvieron en la sección de fractura se tiene una presencia de decarburación en especial de esta área como se determina en las micrografías de tal forma la dureza tiene un cambio drástico por el tipo de fases que son diferentes en la zona de falla.

El objeto final de un análisis de falla es la determinación de las causas de rotura del componente en servicio y la manera de evitarla en el futuro, sea mediante un nuevo diseño de la pieza o tratamiento térmico óptimo. En este estudio de falla se intenta resumir brevemente la contribución de la fractografía electrónica a este problema general donde nos muestra el tipo de fractura por el tratamiento térmico del componente ingenieril. La formación de carburos su orientación y morfología constituyen concentradores de esfuerzos que pueden inducir la generación y crecimiento de grietas, los cuales identificamos con la técnica de barrido, además pueden generar la falla en un corto periodo de tiempo de servicio.

El análisis por los diferentes estudios del caso relacionado con falla del rol reveló que la falla podría ser el resultado de anomalías presentes y de factores que pueden ocasionar este tipo de falla por los cambios microestructurales. También la combinación de factores como la lubricación, cargas, fricción, que pueden afectar este tipo de materiales y llevarlos a disminuir su vida útil.

Aplicar el proceso de temple y revenido a temperaturas de transición para el acero AISI M5, con el propósito de aliviar las tensiones iniciales negativas en la superficie de la zona crítica de rol donde se iniciaron las grietas. Las tensiones iniciales negativas permiten reducir las tensiones operativas durante el trabajo de rol.

En este caso se requiere un estricto control de calidad para evitar el origen del defecto y la inspección debe ser muy sólida para restringir el paso de los componentes defectuosos al producto final terminado.

Evitar una decarburación, durante el proceso de fabricación, así como lograr una estructura total de martensita revenida durante el tratamiento térmico.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecemos a PRODEP para el trabajo; como la divulgación mediante el proyecto UPVMEX-CA-4 otorgado.

REFERENCIAS

- ∞
- [1] American Society for Metals, *Engineering Aspects of Failure and Failure Analysis, Failure Analysis and Prevention*, vol 10, 8th ed., Metals Handbook, 1975.
 - [2] J. J. Asperger, Legal Definition of a Product Failure: What the Law Requires of the Designer and the Manufacturer, *Proc. Failure Prevention through Education: Getting to the Root Cause*, 23–25 May 2000 (Cleveland, OH), ASM International, 2000, p 25–29.
 - [3] N. López-Perrusquia, M. A. Doñu-Ruiz, J. V. Suarez-Cortez, D. Sánchez, F. Vázquez. Characterization of the Fracture of an Automobile Drum, *Bra. MRS Proceedings*, 1372, pp. 3-13, 2012, doi: <https://doi.org/10.1557/opl.2012.112>
 - [4] M. A. Doñu-Ruiz, N. López-Perrusquia, V. J. Cortés-Suárez, S. A. Pérez-Moo, J. C. Vargas-Caballero, “Análisis de un sistema homogenizador de jugo de naranja,” *Científica*, vol. 21, núm. 2, pp. 107-112, julio-diciembre 2017.
 - [5] G. H. Farrahi, H. Ghadbeigi, “An investigation into the effect of various surface treatments on fatigue life of a tool steel,” *Mater Process Technol.*, vol. 174, pp. 318-324, 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.01.014>
 - [6] A. Persson, S. Hogmark, J. J. Bergström, “Temperature profiles and conditions for thermal fatigue cracking in brass die casting dies,” *Mater Process Technol.*, vol. 152, pp. 228-36, 2004, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.241>
 - [7] R. Ebara, K. Takeda, Y. Ishibashi, A. Ogura, Y. Kondo, S. Hamaya, “Microfractography in failure analysis of cold forging diez,” *Eng Fail. Anal.*, vol. 16, pp. 1968-1976, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2008.10.023>
 - [8] L. Pelcastre, J. Hardell, N. Herrera, B. Prakash, “Investigations into the damage mechanisms of form fixture hardening tools,” *Eng Fail Anal.*, vol. 25, pp. 219-226, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2012.05.014>
 - [9] W. Zhua, S. Cruchley, W. Yina, X. J. Hao, C. L. Davis, A. J. Peyton, “Examining the effects of green supply chain management practices and their mediations on performance improvements,” *NDT&E International*, vol. 46, pp. 63-69, 2012, doi: <https://doi.org/10.1080/00207543.2011.571937>
 - [10] R. G. Baggerly, R. A. Drollinger, “Determination of decarburization in steel,” *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 2, pp. 47-50, 1993, doi: <https://doi.org/10.1007/BF02649673>

Análisis comparativo de la modificación del parámetro de inercia para la mejora en el desempeño del algoritmo PSO

Comparative Analysis of the Modification of the Inertia Parameter for the Improvement of the PSO Algorithm Performance

Valeria Álvarez-Garduño¹, Natalia Guadiana-Ramírez², Álvaro Anzueto-Ríos³

¹Instituto Politécnico Nacional, MÉXICO
<https://orcid.org/0000-0003-2173-8947> | valvagar18@gmail.com

²Instituto Politécnico Nacional, MÉXICO
<https://orcid.org/0000-0002-4123-0895> | nagura.bio@hotmail.com

³Instituto Politécnico Nacional, MÉXICO
<https://orcid.org/0000-0003-1627-0323> | aanzuetor@ipn.mx

Recibido 30-07-2020, aceptado 26-08-2020.

Resumen

En este trabajo se presenta un desarrollo para mejorar el desempeño del algoritmo de optimización metaheurístico nombrado *Particle Swarm Optimization* (PSO). El algoritmo PSO está inspirado en el comportamiento que demuestran los grupos de individuos en la naturaleza, como ejemplo podemos mencionar las parvadas y los cardúmenes. Cada individuo o partícula, de forma análoga en un proceso matemático; es considerado como una posible solución y en ellos se contempla, como información relevante, su posición y la velocidad. La velocidad de cada partícula es modificada al multiplicarse por un parámetro nombrado factor de inercia y es este parámetro que proponemos modificar para mejorar el desempeño del algoritmo. La modificación del factor de inercia se desarrolla de dos maneras, decremento lineal y decremento caótico. Se han considerado las funciones de referencia Eggholder y Six-Hump Camelback, para determinar la mejora en el desempeño del algoritmo PSO. Los resultados presentados en este trabajo indican un mejor desempeño al aplicar el decremento de tipo caótico al factor de inercia.

Palabras clave: PSO, inercia, optimización, inercia caótica.

Abstract

In this work an improvement of the metaheuristic algorithm called Particle Swarm Optimization (PSO) is shown. The PSO algorithm is inspired in the behavior that groups of individuals from nature exhibit, it can be mentioned for example flocks and shoals. Each individual or particle, on a mathematical process in an analogue manner, is considered as a possible solution and from them it is contemplated, as relevant information, its position, and velocity. The velocity of each particle is modified as it is multiplied by a parameter named inertia weight and it is this parameter that we propose to modify for the improvement of the performance of the algorithm. The variation of the inertia weight develops as the following two manners, linear decreasing, and chaotic decreasing. The functions Eggholder and Six-Hump Calmelback were considered to determine the improvement of the performance in the PSO algorithm. The reported results in this work indicate a better performance in the application of chaotic decreasing to the inertia weight.

Index terms: PSO, inertia weight, optimization, chaotic inertia.

I. INTRODUCCIÓN

El método de optimización por enjambre de partículas (PSO, por sus siglas en inglés) es un algoritmo estocástico originalmente presentado por Kennedy y Eberhart en 1995 inspirándose en el comportamiento que manifiestan las agrupaciones de entes biológicos como es el caso de una parvada y un banco de peces en busca de comida [1]. Para este algoritmo, un pez o un ave representa una ‘partícula’, cada partícula está definida por 3 elementos: posición, velocidad y ajuste (fitness). Cada una de ellas viajará a través del espacio de búsqueda o solución, considerando su propia experiencia y ajustando su conocimiento de acuerdo con el mejor resultado de entre los más exitosos del resto de los miembros del enjambre; por lo que cada partícula representa una solución potencial [2].

En PSO, un enjambre está conformado de N partículas o individuos y, matemáticamente, puede ser representado por el siguiente vector:

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\} \quad (1)$$

En donde la posición de la i -ésima partícula en la iteración (o generación) t es:

$$x_i(t) = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ij}] \quad (2)$$

siendo j un parámetro que representa una característica o variable en el espacio de solución. La posición es modificada utilizando el vector velocidad:

$$v_i(t) = [v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{ij}] \quad (3)$$

para la siguiente ecuación de movimiento:

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1) \quad (4)$$

Donde t y $t+1$ indican dos generaciones sucesivas del algoritmo. El vector de velocidad (Ec. 3) determina la forma en que las partículas se desplazan a través del espacio de búsqueda o solución. La exploración o desplazamiento de las partículas dentro del espacio de búsqueda está determinado por las siguientes 3 componentes:

1. Parámetro de inercia o momento, evita un cambio drástico de dirección al realizar un seguimiento del flujo anterior;
2. Componente cognitivo, explica la tendencia de las partículas a regresar a la mejor posición previamente registrada, si la nueva posición no representa un mejor valor; y
3. Componente social, identifica la predisposición de una partícula a moverse hacia la mejor posición o solución determinada por todo el enjambre.

Conforme a lo anterior el vector de velocidad de la i -ésima partícula en una generación $t+1$ se define como:

$$v_{ij}(t+1) = w(t+1)v_{ij}(t) + r_1c_1(p_{ij} - x_{ij}(t)) + r_2c_2(g_{ij} - x_{ij}(t)) \quad (5)$$

Para $j = 1, 2, \dots, dim$.

donde r_1, r_2 son números aleatoriamente generados dentro del rango $[0,1]$; c_1 y c_2 denotan los coeficientes de aceleración cognitivo y social, respectivamente, y el rango típico para ellos es $[0,4]$; $w(t+1)$ es la inercia en una generación $t+1$ con un rango de $[0,1]$, que para nuestro caso inicia con un valor igual a la unidad y decrece conforme avanza el proceso de optimización; p_{ij} es el mejor personal encontrado por la i -ésima partícula; y finalmente g_{ij} es el mejor global hasta el momento.

Lo que destaca a PSO de otros algoritmos es su fácil implementación, robustez en control de parámetros y eficiencia computacional, por lo que los campos de estudio y los problemas en los que se puede utilizar son numerosos. Inicialmente, PSO se aplicó para resolver múltiples problemas matemáticos con funciones no lineales, funciones multimodales con y sin restricciones [1]. Debido a su aceptación, esta técnica no sólo se puede encontrar en artículos para análisis matemático o estadístico, sino también hace su incursión en el diseño de antenas, optimización biomecánica, *clustering*, minería de datos, optimización combinatoria, solución de ecuaciones implicadas en leyes de control, entrenamiento en redes neuronales, entre otros [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11].

8

II. OPTIMIZACIÓN DE FUNCIONES DE REFERENCIA

Para las pruebas desempeño del algoritmo PSO se utilizaron dos funciones de referencia para ser evaluadas, las cuales serán descritas a continuación.

A. Función Eggholder

El espacio de solución en esta función está acotado en un rango de $-512 \geq x_i \leq 512$ para las variables de solución, con un mínimo global ubicado en $f_{EH}(512, 404.2319) = -956.6407$ [12], y su representación, en una vista isométrica, se puede observar en Fig. 1. La función en su forma matemática está definida como:

$$f_{EH}(x_1, x_2) = -(x_2 + 47) \sin\left(\sqrt{\left|x_2 + \frac{x_1}{2} + 47\right|}\right) - x_1 \sin\left(\sqrt{|x_1 - (x_2 + 47)|}\right) \quad (6)$$

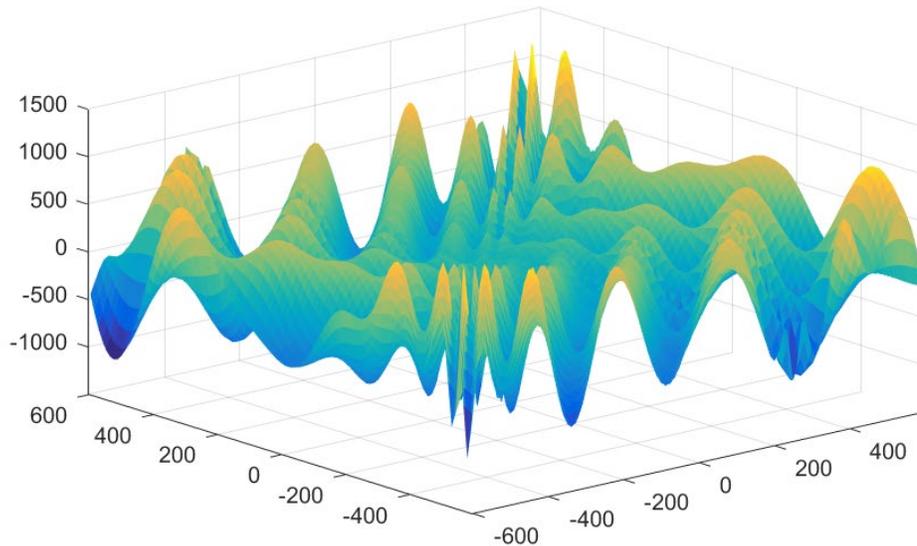


Fig. 1. Representación gráfica de la función Eggholder.

B. Función Six-Hump Camelback

Esta función de prueba tiene dos parámetros como variables de búsqueda, cuenta con seis mínimos locales, donde dos de ellos son globales. El área de prueba se encuentra normalmente en los rangos $-3 \geq x_1 \geq -2$ y $-2 \geq x_2 \geq 2$. Los mínimos globales se encuentran en $f_{SHC}(-0.0898, 0.7126) = -1.0316$ y $f_{SHC}(0.0898, -0.7126) = -1.0316$, su representación en vista isométrica se presenta en la Fig. 2 [13].

$$f_{SHC}(x_1, x_2) = \left(4 - 2 - 1x_1^2 + \frac{x_1^4}{3}\right)x_1^2 + x_1x_2 + (-4 + 4x_2^2)x_2^2 \quad (7)$$

4

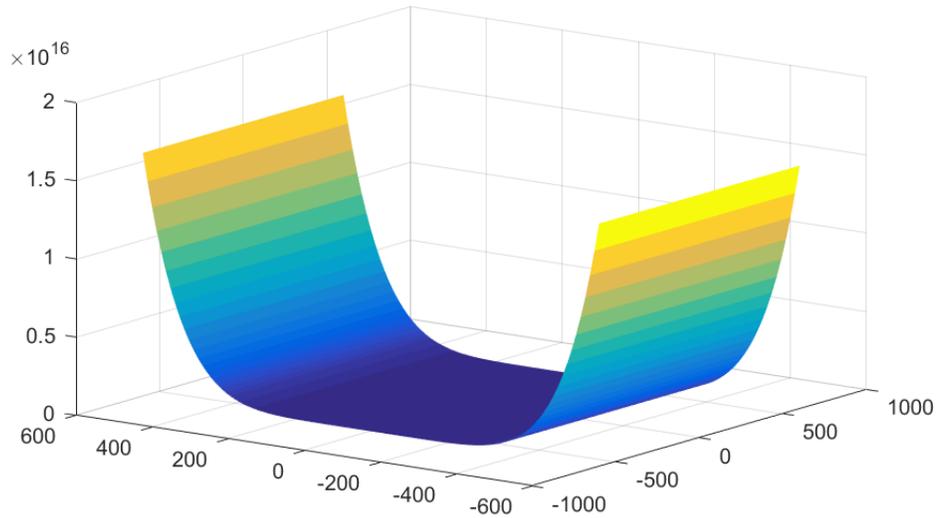


Fig. 2. Representación gráfica de la función Six-Hump Camelback.

III. MÉTODOS PARA EL CÁLCULO DEL DESCENSO DEL PARÁMETRO DE INERCIA

El parámetro nombrado "inercia" se encarga de regular el vector de velocidad asociado a cada partícula. Disminuir este parámetro, durante la ejecución de algoritmo ha demostrado que mejora el desempeño del algoritmo PSO [14], [15], aunque en el trabajo originalmente no se contemplaba [1]. Fue hasta 1998, que por primera vez Shi y Eberhart [16] introdujeron el concepto de masa inercial al aplicar un coeficiente de inercia para limitar la velocidad de las partículas en el algoritmo PSO; a su vez establecieron que dicho coeficiente facilitaba la búsqueda global cuando se trataba de un número grande, mientras que si se trataba de un número pequeño se facilitaba la búsqueda local.

Sin embargo, se ha demostrado en numerosos estudios que el parámetro de inercia, con ajuste dinámico en el tiempo, puede aumentar significativamente la convergencia de una solución, comparándolo con un valor constante [14], [17], [18].

Para las pruebas realizadas se consideraron dos métodos de descenso de la inercia: lineal y caótico.

A. Método de descenso inercial lineal

Este método ajusta w (Ecu. 5) con la siguiente fórmula:

$$w(t+1) = (w_{max} - w_{min}) \left(\frac{t_{max}-t}{t_{max}} \right) + w_{min} \quad (8)$$

De donde w_{max} es el valor inicial del parámetro de inercia al iniciar el algoritmo y w_{min} representa el valor final. Se ha reportado que el rango idóneo para el parámetro w es de [0.9 - 0.4] [19]. El método de descenso lineal habitualmente presenta problemas de convergencia con funciones que tiene una mayor cantidad de variables en su solución.

B. Método de descenso inercial caótico

La inercia caótica fue propuesta por Feng *et. al* [15] en donde agrega al método de descenso lineal un factor que genera un mapeo caótico en el rango [0,1]:

$$z = \mu(z)(z - 1) \quad (9)$$

donde $3.57 < \mu \leq 4$ y z es un número aleatorio de [0,1]. Sin embargo, cuando $\mu = 4$ se cubre el intervalo de [0,1]. Se ajusta entonces con la siguiente fórmula

$$w(t + 1) = (w_{max} - w_{min}) \left(\frac{t_{max} - t}{t_{max}} \right) + w_{min}(z) \quad (10)$$

IV. METODOLOGÍA

Se realizan dos estudios donde se modifica el método de descenso inercial, y que para cada uno de los estudios se analizarán los resultados para las dos funciones de prueba (Ec. 6, Ec. 7).

Para ambos estudios se establecen los parámetros mostrados en la Tabla 1.

TABLA 1
PARÁMETROS GENERALES PARA EL ALGORITMO PSO PARA LOS ESTUDIOS PROPUESTOS

Parámetros	Valores
$[c_1, c_2]$	[2.5, 2.5]
Máx. núm. iteraciones	1000
Límites eje x	[-512, 512]
Límites eje y	[-512, 512]
Partículas	250 - 1000
Corridas	200

A. Estudio 1. Método de descenso inercial lineal

Para este estudio se considera el uso de la Ec. 8 para su implementación dentro del algoritmo PSO, analizándose las funciones Eggholder (Ec. 6) y Six-Hump Camelback (Ec. 7), considerando que ambas dependen de dos variables.

B. Estudio 2. Método de descenso inercial caótico

Para este estudio se considera el uso de la Ec. 10 para su implementación dentro del algoritmo PSO, analizándose las funciones Eggholder (Ec. 6) y Six-Hump Camelback (Ec. 7), considerando que ambas dependen de dos variables.

La construcción del algoritmo, así como la realización de los estudios y obtención de resultados se realiza a través del software MATLAB® versión 14.0 en un sistema operativo Windows 10 con plataforma de 64-bits.

Los resultados se darán con base en una comparación entre las dos funciones de referencia. Para cada una de ellas se han tomado en cuenta tres factores:

1. Iteración: número de iteración en la que el sistema detecto el mínimo global.
2. Costo: valor obtenido al evaluar matemáticamente la función de referencia.
3. Gráficos asociados al registro de múltiples pruebas realizadas, empleando las funciones de referencia.

Para lo anterior se considerarán datos estadísticos.

V. RESULTADOS

A. Estadísticas asociadas al número de iteraciones

En la Tabla 2 se presentan los datos estadísticos asociados a las iteraciones en las que se alcanzó el costo óptimo (este costo óptimo corresponde al valor numérico obtenido al evaluar la función de referencia con los datos que presenta como solución final el algoritmo PSO), para cada una de las funciones en el Estudio 1, mientras que en la Tabla 3 se muestran los datos para el Estudio 2.

6

TABLA 2
ESTADÍSTICA ASOCIADA AL NÚMERO DE ITERACIÓN EN QUE SE ALCANZA EL COSTO ÓPTIMO
PARA UN MÉTODO DE DESCENSO INERCIAL LINEAL

	Función Eggholder			Función Six-Hump Camelback		
	Posición	Costo	Iteración	Posición	Costo	Iteración
Iteración Mínima	[512, 404.2318]	-959.6407	438	[-0.088 0.713]	-1.0314	820
Iteración Máxima	[512, 404.2318]	-959.6407	972	[-0.088 0.713]	-1.0314	1000
Mediana de las Iteraciones	[512, 404.2318]	-959.6407	607	[0.088 -0.713]	-1.0314	969

TABLA 3
ESTADÍSTICA ASOCIADA AL NÚMERO DE ITERACIÓN EN QUE SE ALCANZA EL COSTO ÓPTIMO
PARA UN MÉTODO DE DESCENSO INERCIAL CAÓTICO

	Función Eggholder			Función Six-Hump Camelback		
	Posición	Costo	Iteración	Posición	Costo	Iteración
Iteración Mínima	[512, 404.2318]	-959.6407	32	[-0.088 0.713]	-1.0314	68
Iteración Máxima	[512, 404.2318]	-959.6407	360	[-0.088 0.713]	-1.0314	455
Mediana de las Iteraciones	[512, 404.2318]	-959.6407	56	[0.088 -0.713]	-1.0314	154

B. Estadísticas asociadas al costo

Para este caso se debe resaltar que para la función Six-Hump Camelback no se realiza esta comparación, ya que no hubo variación en el valor para todas las corridas realizadas en ambos estudios, por lo que sólo se mencionarán los datos asociados a los estudios realizados con la función Eggholder. En la Tabla 4 se muestran los resultados para ambos estudios.

TABLA 4
ESTADÍSTICA ASOCIADA AL COSTO ENCONTRADO POR EL ALGORITMO PARA LA FUNCIÓN EGGHOLDER USANDO UN MÉTODO DE DESCENSO INERCIAL LINEAL Y CAÓTICO

	Inercia Lineal			Inercia Caótica		
	Posición	Costo	Media de Iteración	Posición	Costo	Media de Iteración
Costo Mínimo	[512, 404.2318]	-959.6407	584	[512, 404.2318]	-959.6407	59.8496
Costo Máximo	[283.0759, -487.1257]	-718.1675	808	[283.0759, -487.1257]	-718.1675	54
Mediana del Costo	[512, 404.2318]	-959.6407	584	[482.353, 432.879]	-959.6407	59.8496

C. Historial de convergencia asociado a las estadísticas de las iteraciones

Para esta sección se mostrarán los gráficos del historial de convergencia, comparando para cada función el método de descenso lineal y el método de descenso caótico. Para ello se utilizará la corrida asociada a la iteración mínima, así como la media de todas las corridas realizadas.

En la Fig. 3 se muestra el historial para la corrida asociada a la iteración mínima de la función Eggholder.

7

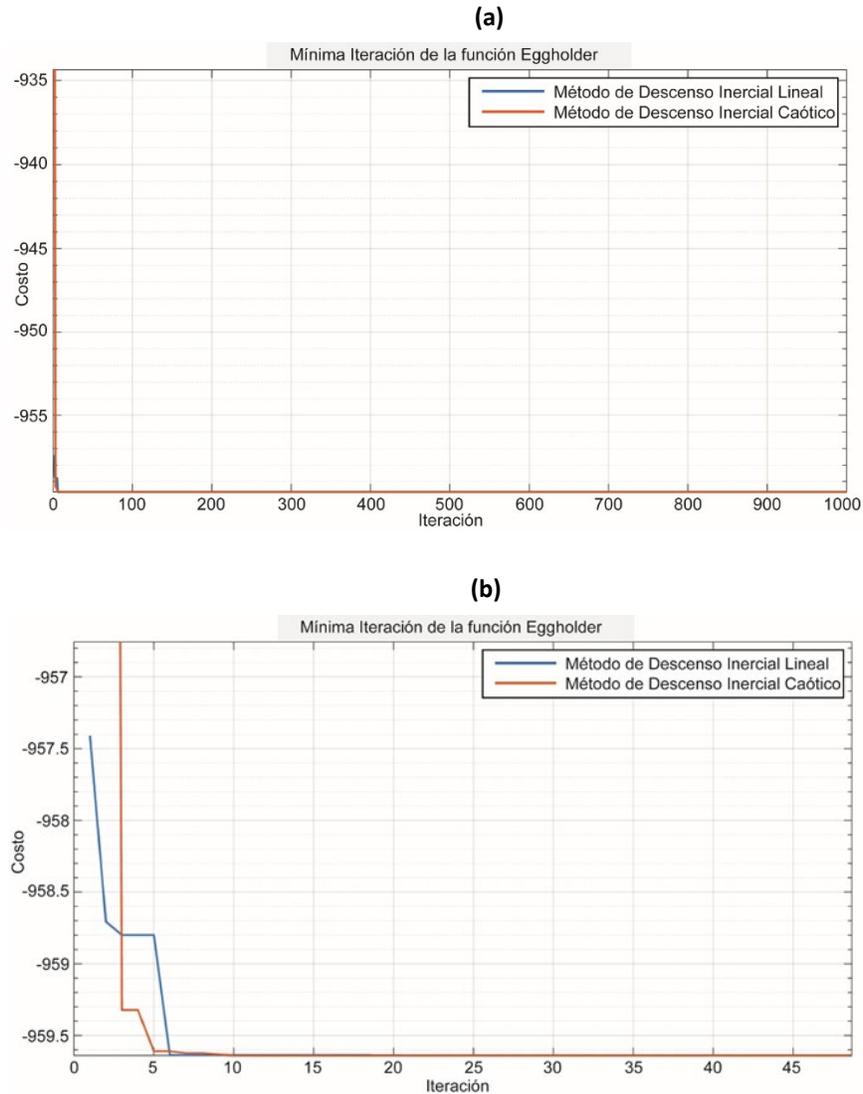


Fig. 1. Historial de convergencia de los dos métodos de variación del parámetro de inercia de la corrida con la mínima iteración de la función Eggholder. (a) Muestra el historial completo y (b) un acercamiento donde se observa de la iteración 0 a la 50, aproximadamente.

En la Fig. 4 se aprecia el historial de convergencia promedio para la función Eggholder.

8

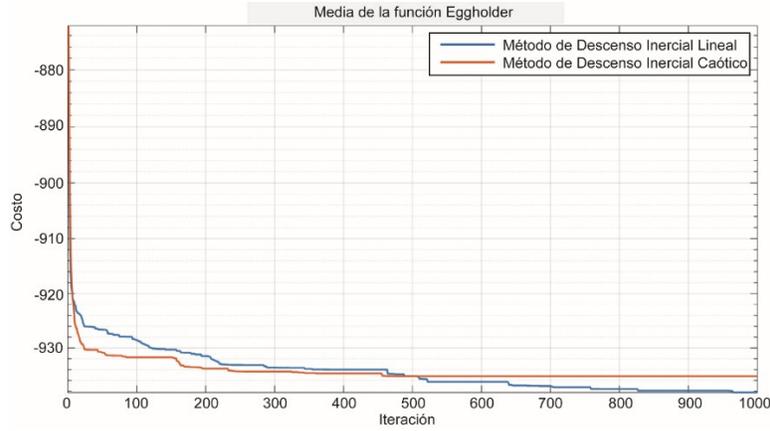


Fig. 2. Historial de convergencia promedio de los dos métodos de variación del parámetro de inercia de la función Eggholder. Se muestra el historial completo.

Para la función Six-Hump Camelback se muestra en la Fig. 5 el historial asociado a la corrida con la mínima iteración de convergencia. Mientras que en la Fig. 6 se observa el historial de convergencia promedio.

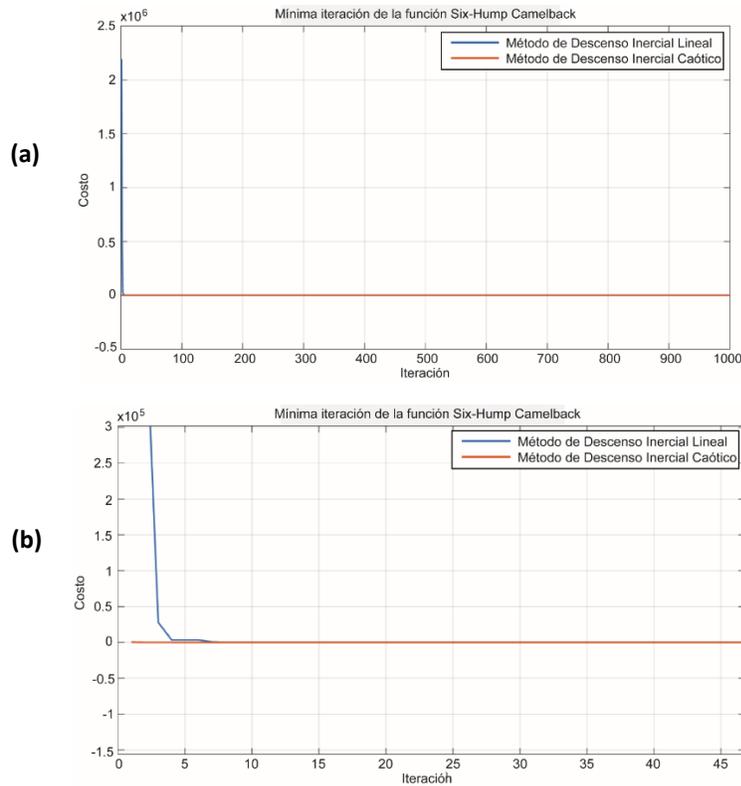


Fig. 3. Historial de convergencia de los dos métodos de variación del parámetro de inercia de la corrida con la mínima iteración de la función Six-Hump Camelback. (a) Muestra el historial completo y (b) un acercamiento donde se observa de la iteración 0 a la 45, aproximadamente.

9

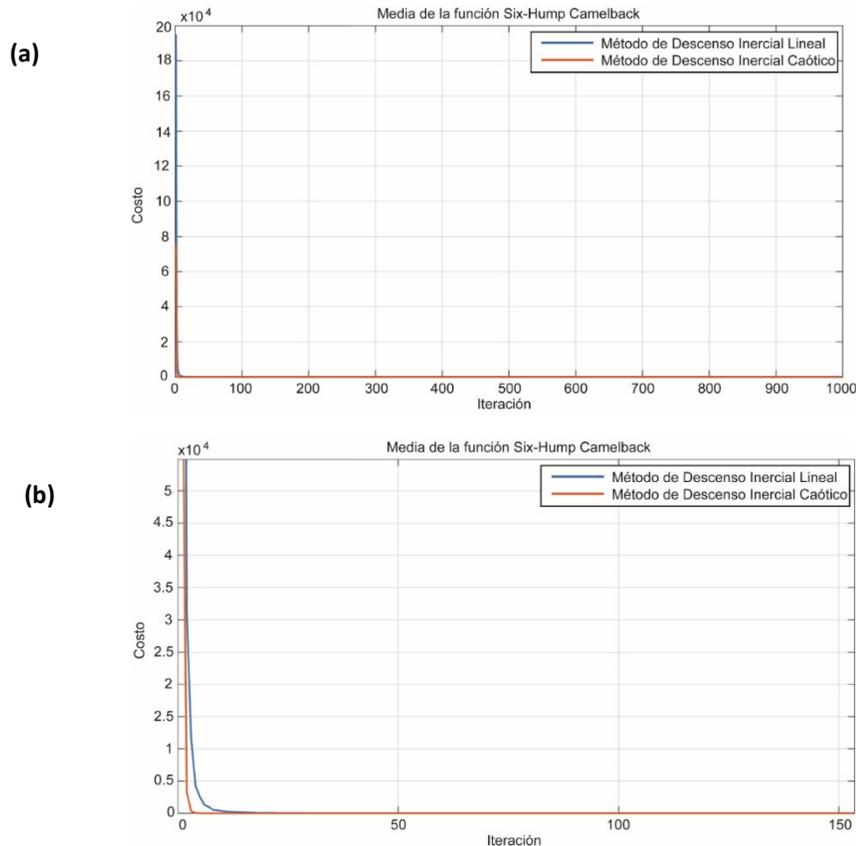


Fig. 4. Historial de convergencia promedio de los dos métodos de variación del parámetro de inercia de la función Six-Hump Camelback. (a) Muestra el historial completo y (b) un acercamiento donde se observa de la iteración 0 a la 150, aproximadamente.

VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A partir de los resultados obtenidos, al considerar los criterios de iteración, costo y el registro de resultados en múltiples pruebas de convergencia aplicado en las funciones de referencia, se puede mencionar que, los valores numéricos al evaluar las funciones de referencia con los parámetros obtenidos al aplicar el algoritmo PSO, no presentaron diferencias significativas al considerar la variación del valor del parámetro de inercia de forma caótica o de forma lineal.

Para la función Six-Hump Camelback, se obtuvo un valor de -1.0314 al evaluar la función con los parámetros obtenidos al ejecutar el algoritmo PSO en 200 ocasiones, variando únicamente en la posición de los dos puntos considerados como mínimos globales, establecido en los antecedentes teóricos.

Para el caso de la función Eggholder, nuevamente se ejecutó el algoritmo PSO en 200 ocasiones, tanto para la variación del valor del parámetro de inercia de forma caótica y lineal. Para los dos tipos de variación, en ciertas ocasiones se alcanzó el valor de -718.1675 al evaluar la función; sin embargo, el mejor costo que se puede obtener con esta función de prueba es de -959.6407 . Esta diferencia es debida a la múltiple cantidad de mínimos locales, que caracteriza a esta función y a los valores iniciales de las partículas [20].

Entonces, la diferencia entre ambos métodos de variación del parámetro de inercia se puede observar en las estadísticas asociadas al número de iteraciones en que se alcanza la convergencia al ser ejecutado el algoritmo PSO en una ocasión. Para la inercia lineal, es necesario un número mayor de iteraciones para alcanzar la convergencia en comparación a lo requerido en inercia caótica.

Además de las características estadísticas, se tienen los gráficos del historial de convergencia, de los cuales específicamente, los asociados a la media de las corridas muestran aspectos interesantes respecto a la velocidad de convergencia. Para la función Eggholder se observó una convergencia más rápida en el método de descenso caótico con respecto al método de descenso lineal, sin embargo, para este último se observa que se llegó al resultado óptimo en más ocasiones con respecto al descenso caótico (véase Fig. 4), es decir, que llega al valor esperado en un mayor número de ocasiones con respecto al método caótico.

Para el caso de la función Six-Hump Camelback se pueden percibir dos situaciones: Primero, el método de descenso caótico es más rápido y certero al llegar al costo óptimo. Segundo; desde la primera iteración, el valor del costo es más cercano al valor óptimo (véase Fig. 6).

10

VII. CONCLUSIONES

En este trabajo se hace un comparativo de la modificación del parámetro de inercia del modelo PSO, entre dos métodos, el lineal y el caótico. De acuerdo con el análisis de resultados se puede mencionar principalmente que el hecho de que para el método caótico se requiera de menos iteraciones para alcanzar el costo óptimo en relación con el número de iteraciones para el método lineal, se puede asociar con la eficacia del método, es decir, que el método de descenso inercial caótico representa un mejor modelo para la obtención de mínimos sin requerir de una gran cantidad de iteraciones.

Esta razón permite establecer parámetros para futuros trabajos, recomendando el uso del método de descenso inercial caótico, así como la utilización de determinado número de iteraciones máximas, la cantidad de veces que hay que accionar el algoritmo, mejorando de esta manera la eficiencia computacional y asegurando la obtención de mejores resultados.

REFERENCIAS

- [1] J. Kennedy, R. Eberhart, "Particle swarm optimization," Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks, Perth, WA, Australia, 1995, pp. 1942-1948 vol.4, doi: <https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968>
- [2] E. Ozcan, C. K. Mohan, "Particle swarm optimization: surfing the waves," Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation-CEC99 (Cat. No. 99TH8406), Washington, DC, USA, 1999, pp. 1939-1944, vol. 3, doi: <https://doi.org/10.1109/CEC.1999.785510>
- [3] R. Poli, "Analysis of the Publications on the Applications of Particle Swarm Optimisation", *Journal of Artificial Evolution and Applications*, 2008, pp. 1-10, vol. 2008, doi: <https://doi.org/10.1155/2008/685175>
- [4] N. Jin, Y. Rahmat-Samii, "Advances in Particle Swarm Optimization for Antenna Designs: Real-Number, Binary, Single-Objective and Multiobjective Implementations," en *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 55, no. 3, pp. 556-567, Mar. 2007, doi: <https://doi.org/10.1109/TAP.2007.891552>
- [5] M. P. Wachowiak, R. Smolikova, Yufeng Zheng, J. M. Zurada, A. S. Elmaghraby, "An approach to multimodal biomedical image registration utilizing particle swarm optimization," en *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 8, no. 3, pp. 289-301, Jun. 2004, doi: <https://doi.org/10.1109/TEVC.2004.826068>
- [6] M. Houcine, S. Amin, C. Mondher, M. Nouri, "Improved Particle Swarm Optimization for the Mutual Inductance of an Implantable Biomedical Application," *2019 International Conference on Wireless Technologies, Embedded and Intelligent Systems (WITS)*, Fez, Morocco, 2019, pp. 1-6, doi: <https://doi.org/10.1109/WITS.2019.8723760>
- [7] S. Fong, R. Wong, A. V. Vasilakos, "Accelerated PSO Swarm Search Feature Selection for Data Stream Mining Big Data," en *IEEE Transactions on Services Computing*, vol. 9, no. 1, pp. 33-45, 1 Ene.-Feb. 2016, doi: <https://doi.org/10.1109/TSC.2015.2439695>
- [8] S. Easter Selvan, S. Subramanian, S. Theban Solomon, "Novel technique for PID tuning by particle swarm optimization", *Seventh Annual Swarm Users/Researchers Conference*, 2003.

- [9] J. Salerno, "Using the particle swarm optimization technique to train a recurrent neural model," *Proceedings Ninth IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence*, Newport Beach, CA, USA, 1997, pp. 45-49, doi: <https://doi.org/10.1109/TAI.1997.632235>
- [10] A. I. El-Gallas, M. El-Hawary, A. A. Sallam, A. Kalas, "Swarm-intelligently trained neural network for power transformer protection," *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering 2001. Conference Proceedings (Cat. No.01TH8555)*, Toronto, Ontario, Canada, 2001, pp. 265-269 vol.1, doi: <https://doi.org/10.1109/CCECE.2001.933694>
- [11] A. Chatterjee, K. Pulasinghe, K. Watanabe, K. Izumi, "A particle-swarm-optimized fuzzy-neural network for voice-controlled robot systems," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 52, no. 6, pp. 1478-1489, Dec. 2005, doi: <https://doi.org/10.1109/TIE.2005.858737>
- [12] R. Ernesto, L. Ernesto, B. Rafael, G. Yolanda, "Perfiles de comportamiento numérico de los métodos de búsqueda immune network algorithm y bacterial foraging optimization algorithm en funciones benchmark", *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, vol. 17, no. 4, pp. 479-490, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.riit.2016.11.007>
- [13] X. Yang, *Engineering Optimization: An Introduction with Metaheuristic Applications*, 1a ed. UK: John Wiley & Sons, 2010, p. 264.
- [14] R. C. Eberhart, Yuhui Shi, "Tracking and optimizing dynamic systems with particle swarms," *Proceedings of the 2001 Congress on Evolutionary Computation (IEEE Cat. No.01TH8546)*, Seoul, South Korea, 2001, pp. 94-100 vol. 1, doi: <https://doi.org/10.1109/CEC.2001.934376>
- [15] Y. Feng, G. Teng, A. Wang, Y. Yao, "Chaotic Inertia Weight in Particle Swarm Optimization," *Second International Conference on Innovative Computing, Information and Control (ICICIC 2007)*, Kumamoto, 2007, pp. 475-475, doi: <https://doi.org/10.1109/ICICIC.2007.209>
- [16] Y. Shi, R. Eberhart, "A modified particle swarm optimizer," *1998 IEEE International Conference on Evolutionary Computation Proceedings. IEEE World Congress on Computational Intelligence (Cat. No.98TH8360)*, Anchorage, AK, USA, 1998, pp. 69-73, doi: <https://doi.org/10.1109/ICEC.1998.699146>
- [17] J. Xin, G. Chen, Y. Hai, "A Particle Swarm Optimizer with Multi-stage Linearly-Decreasing Inertia Weight," *2009 International Joint Conference on Computational Sciences and Optimization*, Sanya, Hainan, 2009, pp. 505-508, doi: <https://doi.org/10.1109/CSO.2009.420>
- [18] M. Arumugam, M. Rao, "On the performance of the particle swarm optimization algorithm with various inertia weight variants for computing optimal control of a class of hybrid systems", *Discrete Dynamics in Nature and Society*, vol. 2006, pp. 1-17, 2006, doi: <https://doi.org/10.1155/ddns/2006/79295>
- [19] R. C. Eberhart, Y. Shi, "Comparing inertia weights and constriction factors in particle swarm optimization," *Proceedings of the 2000 Congress on Evolutionary Computation. CEC00 (Cat. No.00TH8512)*, La Jolla, CA, USA, 2000, pp. 84-88 vol.1, doi: <https://doi.org/10.1109/CEC.2000.870279>
- [20] J. Czerniak, D. Ewald, H. Zarzycki, P. Augustyn, "Application of the New FAAO Metaheuristics in Modeling and Simulation of the Search for the Optimum of a Function with Many Extremes", *Advances in Intelligent Systems and Computing*, pp. 301-309, 2020, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-47024-1_30

Estudio mecánico de un acero cromo-molibdeno con recubrimiento duro

Mechanical Study of a Chrome-Molybdenum Steel with Hard Coating

Daniel **Sánchez-Huerta**¹, José Antonio **Juanico-Loran**³
Víctor Jorge **Cortes-Suarez**², Noé **López-Perrusquia**⁴

¹Universidad Autónoma Metropolitana | Universidad Politécnica del Valle de México, MÉXICO
<https://orcid.org/0000-0002-4762-2160> | ingenierodaniel@outlook.com

²Universidad Autónoma Metropolitana, MÉXICO
vjcs@azc.uam.mx

³Universidad Politécnica del Valle de México, MÉXICO
<https://orcid.org/0000-0003-4423-6552> | jjuanico@upvm.edu.mx

⁴Universidad Politécnica del Valle de México, MÉXICO
<https://orcid.org/0000-0001-9209-8612> | nlopezp@upvm.edu.mx

Recibido 06-10-2020, aceptado 15-12-2020.

Resumen

Se evalúa el tratamiento termoquímico de boro a temperaturas de 950 y 1000 °C, con un tiempo de exposición de 2 y 0.5 h; la adhesión de la capa se analiza mediante la técnica de Rockwell C prescrita por la norma alemana VDI 3198 y obtener una clasificación cualitativa; por microscopía óptica se observa la tasa de crecimiento y la morfología de la capa de FeB / Fe₂B en la superficie del material; la presencia de fases FeB / Fe₂B se determinó por difracción de rayos X (XRD). La técnica de microscopía electrónica de barrido (EDS) muestra la distribución de los elementos de aleación en la capa del sustrato FeB / Fe₂B formada en la superficie del acero de medio carbón. El módulo elástico y la dureza se obtuvieron con ensayos de nanoindentación en la capa bifásica generada. Esta investigación tiene como objetivo caracterizar la morfología, comportamiento adhesivo y mecánico del recubrimiento de boruro formado en un acero AISI 4140 mediante la técnica de pasta deshidratada, con bajos tiempos de difusión que evitan la formación en demasía de la fase frágil FeB.

Palabras clave: adherencia, borurado, delaminación.

Abstract

The thermochemical treatment of boron is evaluated at temperatures of 950 and 1000°C, with an exposure time of 2 and 0.5 h; the adhesion of the layer is analyzed using the Rockwell C technique by the German VDI 3198 standard and a qualitative classification is obtained. By optical microscopy the growth and morphology of the FeB/Fe₂B layer on the surface of the material is observed; the presence of FeB/Fe₂B phases was determined by X-ray diffraction (XRD). The scanning electron microscopy (SEM) technique shows the distribution of the alloy elements in the substrate FeB / Fe₂B layer formed on the surface of the medium carbon steel. The elastic modulus and hardness obtained with nanoindentation tests on the generated two-phase layer. The aim of this research is to characterize the morphology, adhesive and mechanical behavior of the boride coating formed on an AISI 4140 steel by means of the dehydrated paste technique, with low diffusion times that prevent the formation of too much of the fragile FeB phase.

Index terms: adherence, boriding, delamination.

I. INTRODUCCIÓN

En la manufactura industrial se utilizan diferentes tratamientos térmicos y recubrimientos que generan características mecánicas beneficiosas en un material metálico, el recubrimiento de boruro, genera aumento en la dureza superficial del material. Cuando un material metálico ferroso de medio carbón y baja aleación, es sometido a un tratamiento termoquímico de boro, adquieren altas durezas superficiales (1600 a 2000 Mpa) debido a la difusión de átomos de boro en el acero, generando capas tipo Fe_2B y FeB ; estas fases se forman por la calidad en el proceso de borurado y por los elementos químicos que se encuentran en el acero a tratar termoquímicamente, siendo eficiente en aceros con bajos aleantes o microaleantes [1], [2].

Los recubrimientos duros se han estudiado para aplicaciones que beneficien el entorno industrial, por mencionar algunas: corrosión, fricción, cargas estáticas, cargas dinámicas, entre otros; generadas por las necesidades del proceso de producción de las empresas. Para tener un comportamiento adecuado, se estudia la adherencia del recubrimiento duro de boro. Existen diferentes pruebas que miden la calidad de los recubrimientos duros, la que se utilizara es mediante cargas mecánicas [3], [4] utilizadas para determinar la calidad de la adherencia en un recubrimiento duro, se realiza con una indentación Rockwell C prescrita en la norma VDI 3198 (véase Fig. 1). El principio de este método consta de un penetrador de geometría circular, penetra en la superficie de un material cubierto, lo que induce la deformación plástica masiva al sustrato y la fractura del recubrimiento.

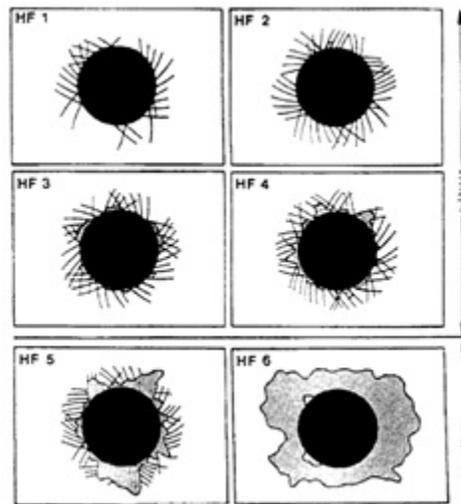


Fig. 1. Evaluación de la adherencia de la capa en el sustrato mediante la norma VDI 3198 [7].

El objetivo del presente estudio es determinar cualitativamente la adhesión, por la prueba de Rockwell-C. Se evalúa la adherencia de un recubrimiento bifásico en un acero de medio carbón con capa de boruro de hierro producido por un tratamiento termoquímico de pasta deshidratada. Se realiza este tipo de pruebas por la simplicidad con la que se puede llevar a cabo, tanto en el área de investigación como en cualquier industria de manufactura, obteniendo la información básica de las características mecánica y así poder generar diseños de elementos mecánicos con recubrimientos de boro que se acoplen a las necesidades de los procesos industriales [5], [6].

II. DESARROLLO EXPERIMENTAL

A. Proceso de borurado

El tratamiento termoquímico de borurización se llevó a cabo a muestras de acero AISI 4140, con un diámetro de 25.4 mm. Posteriormente el proceso de borurado se realiza por la técnica de caja, con pasta de boro deshidrata en

polvo ($B_4C + Na_3AlF_6$). Las temperaturas de tratamiento fueron 950 y 1000°C; con permanencia de 0.5 y 2 h, para cada espécimen a la temperatura indicada. Las muestras boruradas se prepararon para metalográfica, se mide el espesor de la capa de boruro de hierro en un microscopio óptico, Olympus GX; las mediciones de las capas se estimaron con el software imagen pro-plus v 4.0. Se determina el módulo de elasticidad por la técnica de nanoindentación.

B. Adherencia

El estudio de adherencia se realizó por el ensayo de Rockwell-C con un equipo Mitutoyo; determinando cualitativamente la adhesión de la capa formada en la superficie del acero AISI 4140 con tratamiento termoquímico de borurado. Los resultados de la capa fracturada se compararon con la norma de adherencia VDI 3198.

C. Nanoindentación

Se realiza la nanoindentación a cuatro pruebas con temperatura de 950 y 1000°C y tiempo de exposición de 0.5 y 2 h, se efectúan ensayos de indentación, desde la superficie hasta el material base, obteniendo las gráficas esfuerzo-desplazamiento, la nanoindentación se centra en las fases Fe_2B y FeB generadas por el tratamiento de borurado.

D. Microscopio óptico

Se estudia mediante microscopía óptica la formación de las fases Fe_2B y FeB en el recubrimiento de las muestras tratadas termoquímicamente a 950 y 1000°C, se estudia el espesor bifásico Fe_2B y FeB generado en cada muestra.

III. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Se tiene un espesor de crecimiento en función de las temperaturas y tiempos de permanencia de estudio, como se muestra en la Tabla I.

TABLA I
 ESPESORES DEL RECUBRIMIENTO BIFÁSICO DE BORO EN EL ACERO AISI 4140

Temperatura (°C)	Tiempo de permanencia (h)	Espesor promedio del boruro (µm)	
		Fe_2B	FeB
950	0.5	28.42 ± 9.29	4.65 ± 1.99
	2.0	46.70 ± 13.10	17.82 ± 6.88
1000	0.5	30.31 ± 6.38	5.35 ± 4.42
	2.0	43.77 ± 8.59	29.12 ± 8.32

Se presentan las micrografías en la Fig. 2; revelando la morfología aserrada para el acero AISI 4140, para un tiempo de permanencia de 2 h a una temperatura de 950 (Fig. 2b) y 1000°C (Fig. 2d). El tipo de morfología de la capa generada en este trabajo, como las propiedades mecánicas resultantes depende de la composición química, calidad en la pasta de boro, temperaturas de tratamiento y tiempo de borurado.

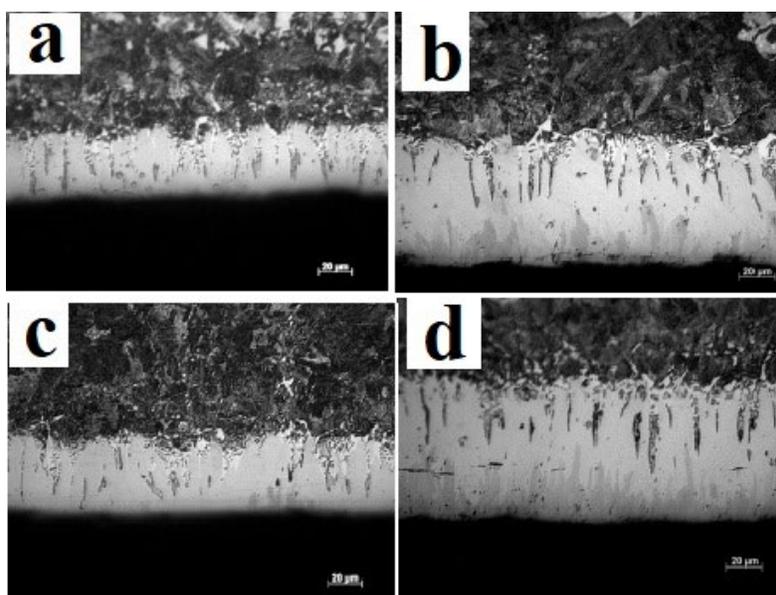


Fig. 2. Perfil del boruro de hierro formado en el acero AISI 4140 a una temperatura 950°C, tiempo de permanencia; a) 0.5 h y b) 2 h y temperatura 1000°C, con tiempo de permanencia; c) 0.5 h y d) 2 h.

La Tabla II y III muestran los resultados de dureza y módulo de elasticidad para una carga de 250 mN; en función de los resultados experimentales, los resultados de dureza dan a demostrar que los boruros de hierro formados en la superficie del acero AISI 4140 adquieren un factor de dureza mayor al del material base.

TABLA II
 PROMEDIO DE MICRODUREZA DEL BORURO DE HIERRO EN ACERO AISI 4140 A 950°C.

Tiempo (h)	Fases	Módulo de Elasticidad (Gpa)	Dureza (Hv)
2.0	Fe ₂ B	288 ± 4.8	1465.42 ± 66.29
2.0	FeB	317 ± 4.3	2132.66 ± 32.72
0.5	Fe ₂ B	233 ± 3.9	1083.03 ± 30.23
0.5	FeB	277 ± 3.3	1930.34 ± 50.06

TABLA III
 PROMEDIO DE MICRODUREZA DEL BORURO DE HIERRO EN ACERO AISI 4140 A 1000°C.

Tiempo (h)	Fase	Módulo de Elasticidad (Gpa)	Dureza (Hv)
2.0	Fe ₂ B	327 ± 5.5	2072.62 ± 22.19
2.0	FeB	337 ± 4.5	2141.61 ± 60.30
0.5	Fe ₂ B	279 ± 4.3	1375.79 ± 73.98
0.5	FeB	281 ± 3.6	1828.92 ± 36.81

Se pudo determinar mediante gráficas esfuerzo-desplazamiento, el comportamiento a la dureza del material, el comportamiento del acero AISI 4140, con una temperatura a 1000°C, con un tiempo de exposición de 2 h, presenta una deformación similar al del acero de 950°C pero se evidencia un desplazamiento menor, generado por las altas durezas del recubrimiento, se determina su comportamiento por fases obtenidas en la difusión de átomos de boro (véase Fig. 3), se analiza el comportamiento de la penetración después de la indentación, evidenciando que el material base tiene menos dureza, que el material borurado; así mismo, la fase FeB tiene mayor resistencia a la penetración comparado a la fase Fe₂B.

5

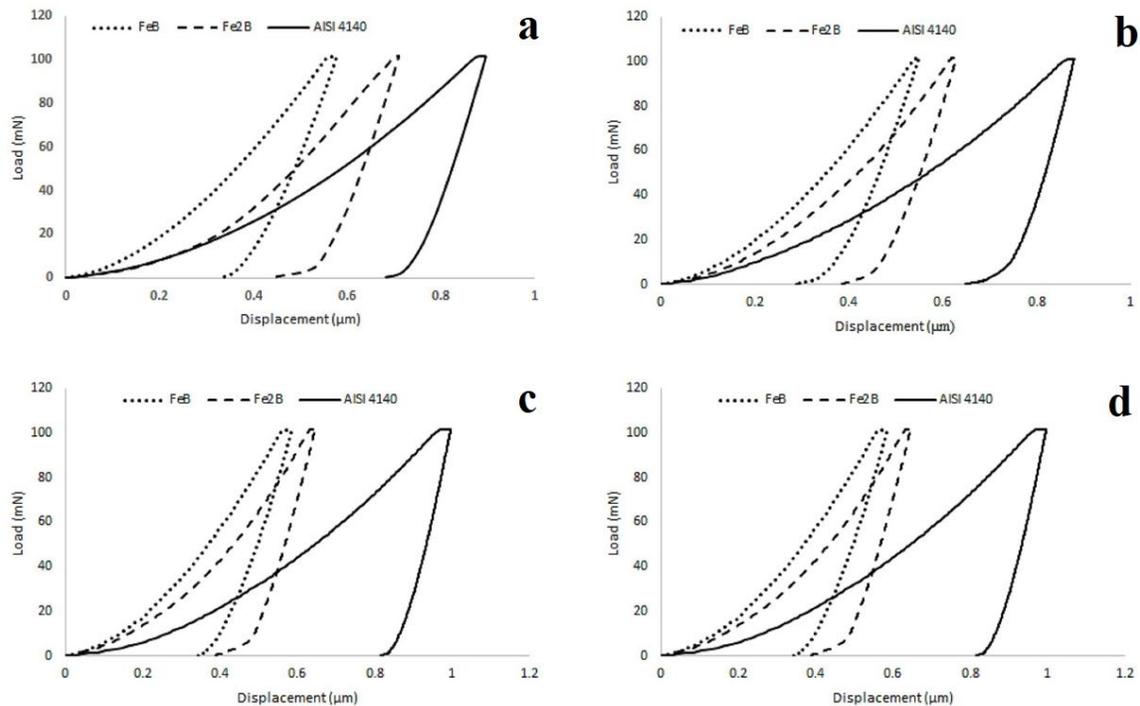


Fig. 3. Gráficas esfuerzo-desplazamiento del comportamiento a la penetración de las fases, en el material AISI 4140 con un tiempo de exposición a) 0.5 y b) 2 h a 950°C, con un tiempo de exposición c) 0.5 y d) 2 h a 1000°C.

El patrón de difracción de rayos X se presenta en la Fig. 4a, muestra la presencia de la fase Fe₂B y FeB; además, en la Fig. 5b se evidencia con el EDS la presencia de los elementos aleantes sobre la superficie del acero AISI 4140 borurado para las probetas tratadas termoquímicamente a la temperatura de a 1000°C con 2 h de tiempo de exposición. Los XRD (Fig. 4a) y el EDS (Fig. 4b), muestran la formación de la capa bifásica FeB y Fe₂B en este estudio.

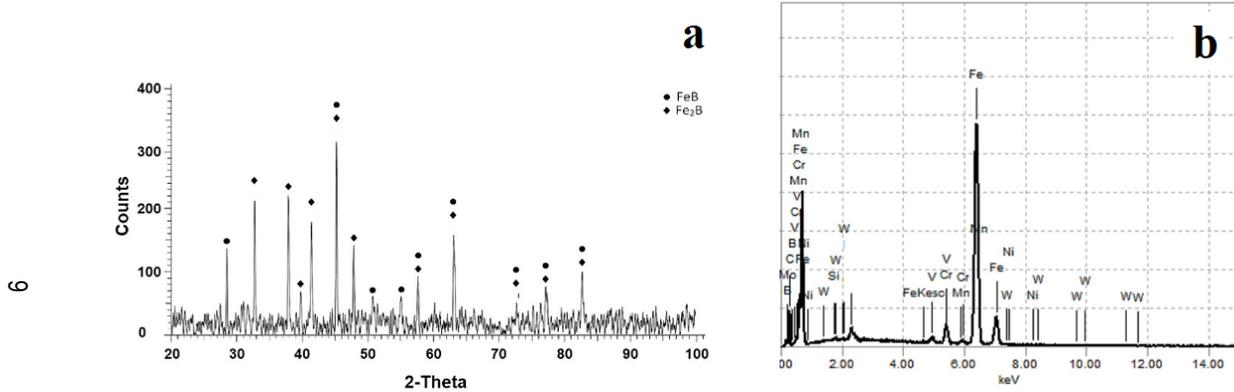


Fig. 4. Patrón de Rayos XRD (a) y EDS (b); sobre el AISI 4140, borurado a temperatura de 1000°C con 2h de exposición.

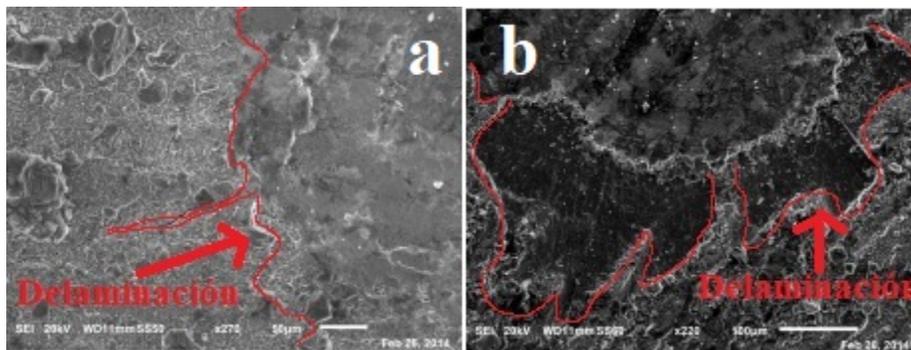


Fig. 5. Delaminación de especímenes borurados a 1273 k con a) 0.5 h y b) 2 h de exposición.

Por otra parte, en este tipo de ensayos se genera una zona central, con fallo cohesivo; se tiene una zona intermedia con insuficiencia cohesiva y adhesiva, causada por esfuerzos generados por la técnica de ensayo Rockwell [8], [9], [10]. En la Fig. 6 se observa delaminación, encontrándose entre rangos de HF3 y HF4, además se observan grietas largas; estos especímenes fueron expuestos a una temperatura de 1000°C. La Fig. 6a y la Fig. 6b, muestran un incremento en la delaminación del boruro de hierro, además una mayor cantidad de grietas a exposiciones de temperaturas mayores. En la Fig. 6 se observa un comportamiento con una delaminación menor encontrándose entre un rango de HF2 y HF3, estos especímenes fueron expuestos a una temperatura de 900°C. La Fig. 6a y Fig. 6b muestran una delaminación menor en el espécimen evaluado a 0.5 h, observando un comportamiento HF2, teniendo resultados óptimos. Con el espécimen sometido a 2 h, existe delaminación con una adherencia adecuada, teniendo un factor de HF3. Este método cualitativo de adherencia sirve para evaluar la resistencia, rendimiento y falla de los recubrimientos duros a los materiales metálicos, cerámicos, además de los materiales compuestos por mencionar algunos. Se tiene presencia de la fase FeB en estos especímenes; que es propensa a generar grietas por la acción mecánica del ensayo de dureza, debido a tensiones residuales en estos aceros y la alta dureza que tiene esta fase en el recubrimiento

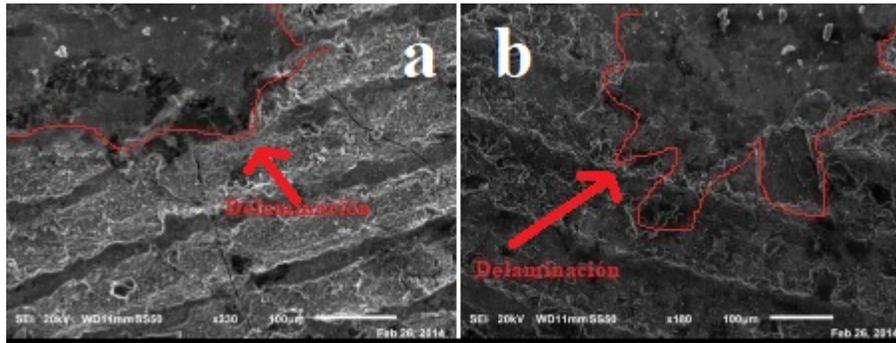


Fig. 6. Delaminación de especímenes borurados a 1223 k con a) 0.5 h y b) 2 h de exposición.

IV. CONCLUSIONES

Se pudo determinar el crecimiento de la capa de boro, obtenido de las fases FeB y Fe₂B, muestra una difusión con morfología aserrada, aumentando la dureza y la adherencia en el material metálico, los especímenes sometidos a una temperatura de 950 y 1000°C, con tiempos de exposición de 2 h, tuvieron resultados afines, la mayor difusión observada se presentó en el espécimen sometido a 1000°C, siendo la fase FeB susceptible a generar mayor cantidad de grietas a menor tiempo de borurización.

La norma VDI, mostro un rango de delaminación de entre HF2 a HF4, la muestra expuesta a una temperatura de 1000°C y 900°C con una exposición de 2 h, obtuvo una clasificación de HF3 a HF4, con una delaminación mayor, además de un incremento grietas, resulta inadecuada debido a la fragilidad y delaminación mayor que se observa, siendo inconveniente por el desprendimiento de partículas, que para aplicaciones tribológicas resultaría perjudicial expuesta a una temperatura de 1000°C y 900°C con una exposición de 0.5 h confirma una aceptable adhesión el recubrimiento duro. Definiendo que, a tiempos menores de 0.5 h, se obtiene una adhesión HF2 óptima del recubrimiento por la poca presencia de la fase FeB.

Se pudo determinar el crecimiento de la capa de boro, obtenido de las fases FeB y Fe₂B, muestra una difusión con morfología aserrada, aumentando la dureza y la adherencia en el material metálico, los especímenes sometidos a una temperatura de 950°C y 1000°C, con tiempos de exposición de 2 h, tuvieron resultados afines, la mayor difusión observada se presentó en el espécimen sometido a 1000 °C, siendo la fase FeB susceptible a generar mayor cantidad de grietas a menor tiempo de borurización.

La norma VDI, mostro un rango de delaminación de entre HF2 a HF4, la muestra expuesta a una temperatura de 1000°C y 900°C con una exposición de 2 h, obtuvo una clasificación de HF3 a HF4, con una delaminación mayor, además de un incremento grietas, resulta inadecuada debido a la fragilidad y delaminación mayor que se observa, siendo inconveniente por el desprendimiento de partículas, que para aplicaciones tribológicas resultaría perjudicial expuesta a una temperatura de 1000°C y 900°C con una exposición de 0.5 h confirma una aceptable adhesión el recubrimiento duro. Definiendo que, a tiempos menores de 0.5 h, se obtiene una adhesión HF2 óptima del recubrimiento por la poca presencia de la fase FeB.

REFERENCIAS

- ∞
- [1] W. Heinke , A. Leyland , A. Matthews, G. Berg , C. Friedrich, E. Broszeit, “Evaluation of PVD nitride coatings, using impact, scratch and Rockwell-C adhesion tests,” *Thin Solid Films*, vol. 270, 431-438, 1995.
 - [2] K. Holmberg, A. Matthews, Properties, “Techniques and Applications in Surface Engineering,” *Coatings Tribology, Elsevier Science Press*, vol. 56, pp. 65-70, 1994, doi: [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(95\)06934-8](https://doi.org/10.1016/0040-6090(95)06934-8)
 - [3] A. Meneses Amador, I. Campos Silva, J. Martínez Trinidad, S. Panier, U. Figueroa López, A. Torres Hernández, “An expression to determine the Vickers indentation fracture toughness obtained by the finite element method on Fe₂B layers,” *Surface and Coatings Technology*, vol. 215, pp. 285-290, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.06.091>
 - [4] N. López Perrusquia, I. Campos Silva, J. Martínez Trinidad, A. Avilés, E. Alvarez Castañeda, S. Juárez Torres, “Evaluation of brittle layers obtained by boriding on AISI H13 steels” *Advanced Materials Research*, vol. 65, pp. 47-52, 2009, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.65.47>
 - [5] N. López Perrusquia, M.A. Doñu Ruiz, V.J. Cortés Suarez, L. D. Rosado Cruz, D. Sánchez Huitron, “Study of Surface Hardening to Injectors of Gasoline,” *Advanced Materials Research*, vol. 538-541, pp. 239-242, 2012, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.538-541.239>
 - [6] N. López Perrusquia, M. A. Doñu Ruiz, F. Vásquez-Ramírez, O. Trujillo Alfaro, E.Y. Vargas Oliva, “Study of Adhesion in Steels Surface Hardened,” *Advanced Materials Research*, vol. 535-537, pp. 513-516, 2012, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.535-537.513>
 - [7] Daimler Benz Adhesion Test, Norma No. 3198, Verein Deutscher Ingenieure (VDI), 1992.
 - [8] S. Taktak, “Some mechanical properties of borided AISI H13 and 304 steels,” *Materials and Design*, vol. 28, pp. 1836–1843, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.04.017>
 - [9] D. Sanchez Huerta, T. De la Mora Ramírez, M.A. Doñu Ruiz, N. López Perrusquia, J.V. Cortés Suarez, “Characterization of Adherence Steels Hardened Superficially,” *MRS Proceedings*, vol. 1616, no. S5C, P041, 2013, doi: <http://dx.doi.org/10.1557/opl.2014.232>
 - [10] S. Taktak, “Identification of delamination failure of boride layer on common Cr based steels,” *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 15, no. 5, pp. 570-574, 2006, doi: <https://doi.org/10.1361/105994906X124587>