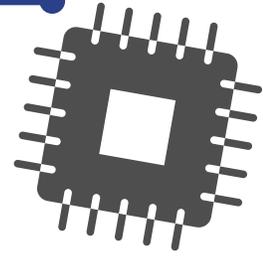
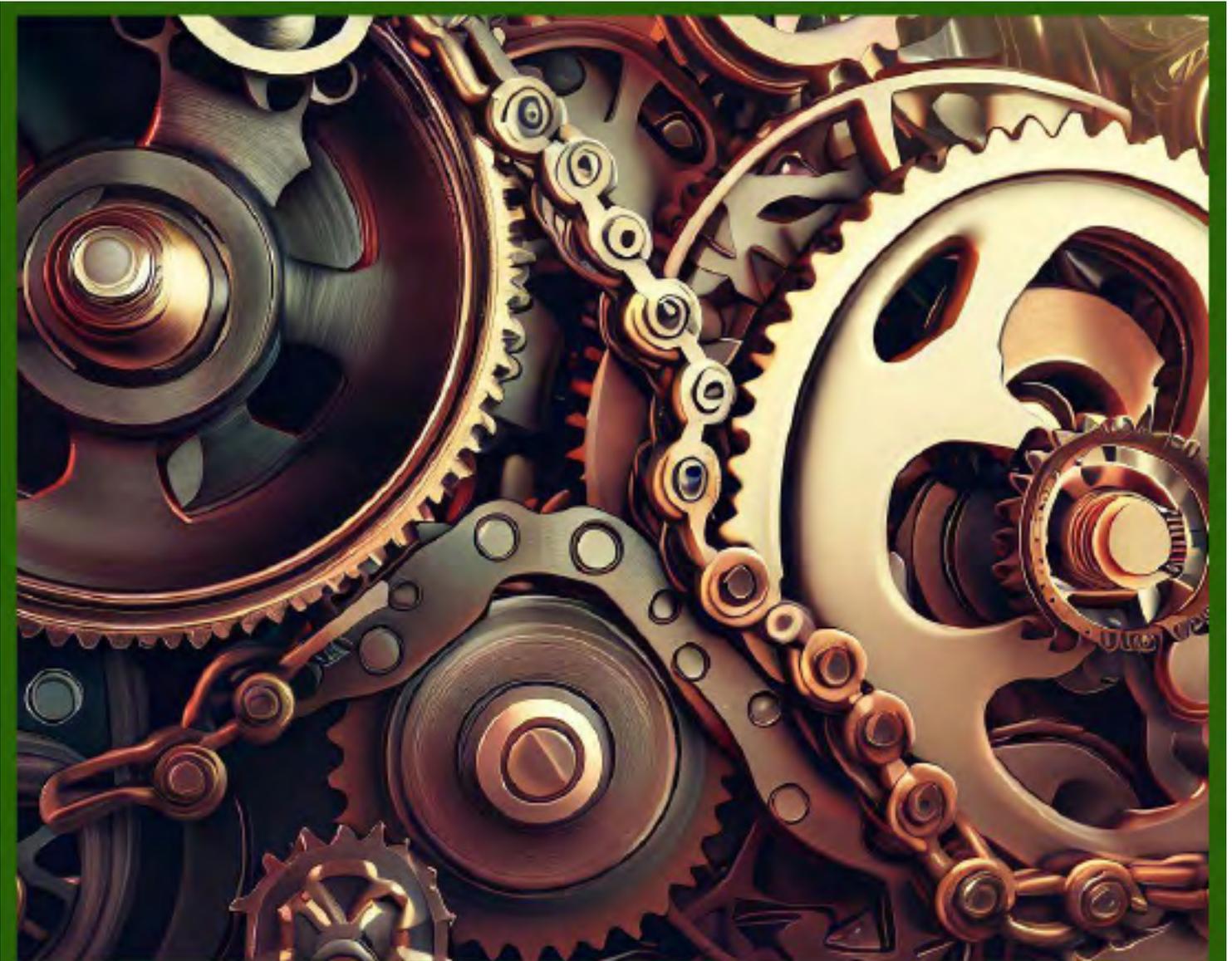


# CULCYT



CULTURA CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA • ISSN 2007-0411



VOLUMEN 19 | NÚMERO 3

SEPTIEMBRE - DICIEMBRE 2022

**Directorio Institucional****Mtro. Juan I. Camargo Nassar**  
RECTOR**Dr. Daniel Constandse Cortez**  
SECRETARIO GENERAL**Dr. Juan F. Hernández Paz**  
DIRECTOR DEL INSTITUTO DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA**Mtro. Jesús Meza Vega**  
DIRECTOR GENERAL DE COMUNICACIÓN UNIVERSITARIA**Dra. Nelly Gordillo Castillo**  
COORDINADORA DE APOYO AL DESARROLLO DE  
LA INVESTIGACIÓN Y AL POSGRADO DEL IIT**Comité Editorial****Dra. Nelly Gordillo**  
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ  
Editora en Jefe**Mtro. Raúl Alfredo Meza González**  
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ  
Coordinador Editorial**Dr. Víctor Manuel Castaño Meneses**  
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**Dr. Ramón Gerardo Guevara González**  
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO**Dr. Klavdia Oleschko Lutkova**  
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**Dr. Abdiel Ramírez Reyes**  
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ**Dra. Santos Adriana Martel Estrada**  
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ**Dr. David Cortés Sáenz**  
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ**Dr. David Ortega Gaucín**  
INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA

CULCYT se fundó en diciembre de 2003 como parte del programa para la formación de investigadores del Instituto de Ingeniería y Tecnología. Lanzó su primer número en abril de 2004. Fundador: Dr. Victoriano Garza Almanza. A partir de 2019, ha fungido como Editora en Jefe la Dra. Nelly Gordillo Castillo.

**CULCYT. CULTURA CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA**

Vol. 19, núm. 3, septiembre-diciembre 2022, es una publicación académica, editada de manera cuatrimestral por la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, a través del Instituto de Ingeniería y Tecnología.

D.R. © UACJ, Avenida del Charro núm. 619 norte, C. P. 32310, Ciudad Juárez, Chihuahua, México.

Editora responsable: Dra. Nelly Gordillo Castillo.

Reserva de derechos al uso exclusivo núm.  
04-2022-101711332100-102.

ISSN (electrónico): 2007-0411.

Sitio OJS: [erevistas.uacj.mx/ojs/index.php/culcyt](http://erevistas.uacj.mx/ojs/index.php/culcyt). Correo electrónico: [culcyt@uacj.mx](mailto:culcyt@uacj.mx). Teléfono +52 (656) 6884848.

DOI: 10.20983/culcyt.2022.3

Modalidad de publicación continua. Tan pronto como un artículo ha sido preparado, se publica en línea.

Los trabajos a publicar en CULCYT deben ser originales e inéditos. En este momento, la revista no tiene costos de publicación para los autores.

El acceso a la revista es libre, sin requerimientos, bajo lo establecido en la normatividad mexicana de acceso abierto, y se da a través de su sitio

<https://erevistas.uacj.mx/ojs/index.php/culcyt>

o mediante el Repositorio Institucional de la UACJ

<http://ri.uacj.mx/vufind/>



UACJ | Repositorio Institucional

Los artículos firmados son responsabilidad de sus autores.

Se autoriza la reproducción total o parcial, siempre y cuando se cite la fuente.

Información para autores:

<https://erevistas.uacj.mx/ojs/index.php/culcyt/autores>

Los contenidos e imágenes de la publicación están sujetos a una licencia CC 4.0 internacional BY NC.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA  
DE CIUDAD JUÁREZ

latindex

Dialnet

## Contenido CONTENTS

### Artículos de investigación / Research articles

- Simulación de esfuerzos en diseño digital de ortesis lumbar** **15**  
Simulation of efforts in digital design of lumbar orthoses  
Juan Ismael Pérez Guadián, Erika Guadalupe Meraz Tena, Edson Francisco Estrada Meneses
- Implementación de la metodología Lean Sigma en un proceso de ensamble de engranes y cadenas: Caso de estudio** **23**  
Lean Sigma approach methodology applied in a gear & chains assembly process: Study case  
Omar Celis Gracia, Juan Alfonso Toscano Moctezuma
- Satisfacción laboral de personas con discapacidad motriz por la tendencia postural** **33**  
Job satisfaction of people with motor disabilities due to postural tendency  
Adolfo Velázquez Macías, Luis Fernando Maldonado Azpeitia, Jorge Arturo García Pitol, Juvenal Rodríguez Reséndiz
- Implementación de metodología Seis Sigma para la solución de bolas de soldadura en tablillas electrónicas** **41**  
Implementation of Six Sigma methodology for the solution of solder balls in electronic boards  
Gustavo Vázquez Silva, Luis Alberto Rodríguez-Picón, Roberto Romero López
- Notas de información técnica / Technical information notes**
- Estrategia general para el desarrollo de ontologías** **4**  
General strategy for ontology development  
Marco Antonio Lozano Castro, Blanca Elena Cazares Salais, Mariel Sofía Cisneros Pérez, Hugo Alberto Morales Casas, Jose Heriberto Bretado Retana, Jorge Enrique Rodas-Osollo, Alicia Margarita Jiménez-Galina

# Estrategia general para el desarrollo de ontologías

## General strategy for ontology development

Marco Antonio Lozano Castro<sup>1</sup>✉, Blanca Elena Cazares Salais<sup>1</sup>, Mariel Sofía Cisneros Pérez<sup>1</sup>, Hugo Alberto Morales Casas<sup>1</sup>, Jose Heriberto Bretado Retana<sup>1</sup>, Jorge Enrique Rodas-Osollo<sup>1</sup>, Alicia Margarita Jiménez-Galina<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ), Instituto de Ingeniería y Tecnología.

### RESUMEN

Para diversas organizaciones, se ha vuelto parte fundamental de sus principios el tener que adaptarse a una era cognitiva que se basa en presentar estrategias apropiadas y efectivas para la resolución de problemas utilizando el conocimiento organizacional. Por ello, se suele utilizar estas herramientas para la toma de decisiones con base en la información que han ido obteniendo a través del tiempo en sus campos. Con el propósito de modelar y tener la posibilidad de consultar el conocimiento disponible de algún dominio de estructura informal, el presente documento introduce una estrategia general basada en un conjunto de actividades que sustentarán la creación de ontologías para este tipo de dominios, implementada en lenguaje OWL. Esta estrategia fue probada empleando dos casos de estudio distintos: la terapia electroconvulsiva y el estrés laboral, resultando favorable en ambos casos y demostrando su efectividad y posible implementación para cualquier otro dominio de este tipo.

**PALABRAS CLAVE:** ontología; léxico extendido del conocimiento del dominio; modelado conceptual.

### ABSTRACT

For several organizations, having to adapt to a cognitive era that is based on presenting appropriate and effective strategies for problem solving using organizational knowledge has become a fundamental part of their principles. For this reason, these tools are usually used for decision-making based on the information they have been obtaining over time in their fields. With the purpose of modeling and having the possibility of querying the available knowledge of some domain of informal structure, this paper introduces a general strategy based on a set of activities that will support the creation of ontologies for this type of domains, implemented in OWL language. This strategy was tested using two different cases: electroconvulsive therapy and work stress, resulting favorable in both cases and demonstrating its effectiveness and possible implementation for any other domain of this type.

**KEYWORDS:** ontology; knowledge domain extended lexicon; conceptual modeling.

#### Correspondencia:

**DESTINATARIO:** Marco Antonio Lozano Castro  
**INSTITUCIÓN:** Universidad Autónoma de Ciudad Juárez,  
Instituto de Ingeniería y Tecnología  
**DIRECCIÓN:** Av. del Charro núm. 450 norte, col. Partido Romero,  
C. P. 32310, Ciudad Juárez, Chihuahua, México  
**CORREO ELECTRÓNICO:** al206562@alumnos.uacj.mx

**Fecha de recepción:** 2 de junio de 2022. **Fecha de aceptación:** 21 de septiembre de 2022. **Fecha de publicación:** 4 de octubre de 2022.



## I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, diversas organizaciones requieren integrarse a la era cognitiva para contar con alternativas que les apoyen en la resolución de problemas y la toma de decisiones con base en su conocimiento [1], [2]. Por ello, deben pasar por la era digital (transformación digital). Para resolver problemas y tomar decisiones, los seres humanos utilizan su experiencia y precisamente esta es la que se necesita representar en el proceso de transformación digital [3].

Sin embargo, el poder representar ese conocimiento no siempre es fácil, debido a que este puede estar disperso o provenir de varias fuentes, ya que depende de la experiencia y contexto [4]. Por ejemplo, se sabe que el conocimiento está en constante evolución, es decir, algo que se asegura el presente año muy probablemente estará obsoleto en cinco o diez años [5]. También se puede ver como obstáculo el hecho de que, además de ser voluminoso, es difícil representar el conocimiento con precisión.

Este conocimiento se puede clasificar en explícito, es decir, estructurado y bien definido, y tácito, mayormente informal y no estructurado [4]. De la misma manera, los dominios (áreas del conocimiento), de acuerdo con la cantidad de conocimiento tácito y explícito que contengan, se pueden clasificar en dominios formales y dominios de estructura informal (Informally Structured Domains, ISD) [6].

En los ISD, la representación del conocimiento es compleja debido a se encuentra repartido tanto en fuentes estructuradas como en no estructuradas y corresponde mayormente a conocimiento tácito con base en la experiencia de los especialistas que se desempeñan dentro del dominio [7]. Por tanto, para poder representar la mayor parte de ese conocimiento es necesario un proceso que, auxiliándose de diferentes modelos, permita contextualizar y formalizarlo, eliminando ambigüedades y llegando a un consenso entre los especialistas del dominio y de la solución [8].

Entonces, las soluciones cognitivas (con base en conocimiento) en la era cognitiva representan un reto debido a la complejidad de representar formalmente el conocimiento tácito en explícito de un dominio en particular [7], [9]. Algunas de las formas más utilizadas para esta tarea son las ontologías, las redes semánticas, la lógica y las reglas, entre otras.

Para representar el conocimiento en los ISD en el ámbito de la salud, se han desarrollado algunas ontologías, como las mencionadas en [10], [11], [12], [13]. En parte, esto se debe a la posibilidad de representar de manera estructurada la complejidad del conocimiento del dominio sin perder el detalle en cada una de sus partes. Conforme pasa el tiempo, las ontologías han logrado posicionarse como una herramienta de representación cuando se trata de formalizar el conocimiento para estos dominios [9].

Una *ontología* es una representación del conocimiento que reduce la ambigüedad de comunicación entre los usuarios y especialistas en un dominio de aplicación particular [14]. Se encuentra formada por un conjunto de conceptos con atributos y relaciones entre sí, los cuales tienen una terminología específica para ese dominio [9], y básicamente describe el dominio de manera específica y puntual. Todo esto sirve para representar conocimiento compartido y consensuado del dominio que pueda ser comunicado entre usuarios y especialistas.

El objetivo del presente artículo es comunicar la aplicación de una estrategia para el desarrollo de una ontología dados dos casos de estudio.

### A. ANTECEDENTES

La transformación digital integra diversas tecnologías dentro de las organizaciones para cambiar el modo en que funcionan e implementan nuevas herramientas en la obtención de mejores resultados [2]. Las organizaciones dependen de la transformación digital para mantenerse en el mercado actual.

La transformación digital permite a las empresas responder a las necesidades de los consumidores a la vez que las sitúa en una mejor posición para competir, ya que no desarrollarse o adaptarse significa quedarse atrás y perecer en el futuro [15].

Todas las empresas se construyen por medio de procesos. La transformación digital busca automatizar los procesos de trabajo de las organizaciones con el fin de obtener datos valiosos, así como mejorar los servicios y productos que ofrecen. A través del procesamiento y análisis de dichos datos, se puede obtener conocimiento y así brindar una mejor experiencia al usuario [16].

El proceso para llegar al conocimiento parte de los datos, los cuales tienden a no tener un sentido o valor por

sí solos. Una vez que los datos son ordenados y permiten tener un entendimiento de ellos, se convierten en información. Esta última se transforma en un material para inicializar la formalización del conocimiento, pues si bien contiene datos estructurados, necesita de un entorno en el que tenga un significado. Esta significancia es la que convierte la información en conocimiento [4], de manera que se vuelve necesario representarlo para tener un entendimiento en detalle de él.

Ahora bien, en los ISD la complejidad de la representación del conocimiento se debe a que no todos los conceptos y sus relaciones están formalmente definidos, sino que estas definiciones se tendrán que basar en un consenso. Además, las soluciones de los problemas en estos dominios son diversas, consensuadas e inverificables, por lo que no existen algoritmos para llegar a estas. Por tanto, los especialistas generalmente construyen una estructura parcial con el conocimiento explícito para obtener la solución de un problema de esta índole. Por esto siempre se requiere una gran cantidad de conocimiento tácito para obtener una solución aceptable, generada ayudándose de todas las personas inmersas en el dominio [8].

### B. REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

En este sentido, una ontología permite explicitar el conocimiento de un dominio en particular. Para lograrlo, se *elicita* el conocimiento, es decir, se extrae y recopila el conocimiento e información de especialistas del dominio, teorías, documentos y algunas otras fuentes. Por medio de entrevistas grabadas que son analizadas en detalle, así como de artículos disponibles, se extraen los conceptos relevantes del dominio a representar. Por tanto, se realizan las siguientes tareas: se define el léxico extendido del conocimiento del dominio (Knowledge Domain Extended Lexicon, KDEL), posteriormente se construye el modelo conceptual y, finalmente, la ontología. Estas tareas son descritas a continuación.

### C. LÉXICO EXTENDIDO DEL CONOCIMIENTO DEL DOMINIO

Esta tarea corresponde a una evolución de lo que es conocido como el léxico extendido del lenguaje (Language Extended Lexicon, LEL). El KDEL está basado en una representación semántica semiformal, en la que se profundiza el entendimiento de los símbolos a través del recurso de nuevos elementos. Estos son clasificados en objetos, sujetos y verbos, y además se agrega a la es-

tructura del LEL el comportamiento actual y futuro, así como los requisitos no funcionales y definiciones. [17].

La elaboración de cada uno de los elementos del KDEL implica una adquisición de conocimiento e identificación de conceptos claves, a los cuales se necesita definirles una relación entre ellos. En la Figura 1 se muestra un esquema conceptual del KDEL, en el cual se observan los elementos que lo componen.

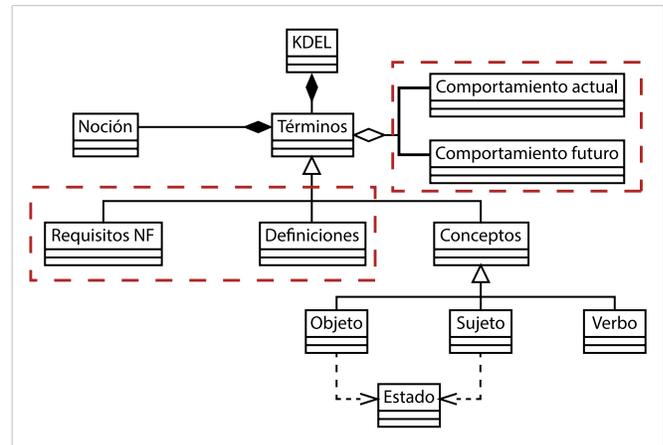


Figura 1. Esquema conceptual del KDEL tomado de [17].

Al ser el KDEL la evolución que enriquece el LEL, se agregan nuevos símbolos, como definiciones y requisitos no funcionales, así como el comportamiento actual y futuro [18], de manera que cada símbolo esté enriquecido y se obtenga el mayor entendimiento de cada uno, con lo que se logra emparejar la comunicación entre los especialistas del dominio y de la solución [19]. También, el KDEL es de gran ayuda para construir un modelo conceptual gráfico que provee un medio visual para facilitar su validación por los especialistas [19].

### D. MODELO CONCEPTUAL

Con esta tarea se busca generar una representación gráfica de los conceptos utilizados en un dominio, así como las relaciones existentes entre ellos [20] a partir del KDEL. Este modelo permite construir una estructura formal del conocimiento existente en el dominio, de manera que los involucrados en el proceso puedan entender el entorno en el que se desempeñaran sin la necesidad de ser un especialista en ello.

Hay maneras estructuradas para generar modelos conceptuales a partir del KDEL, por ejemplo, en [21] se utiliza un metamodelo con el fin de poder ordenar los



de conocimiento según las necesidades del especialista. Por ello, el proceso de elaboración de una ontología no se representa en un proceso lineal, sino uno cíclico y evolutivo.

Este proceso formaliza el conocimiento del dominio, trasladando la experiencia de los especialistas y la información disponible en registros a una estructura que permita representar el conocimiento.

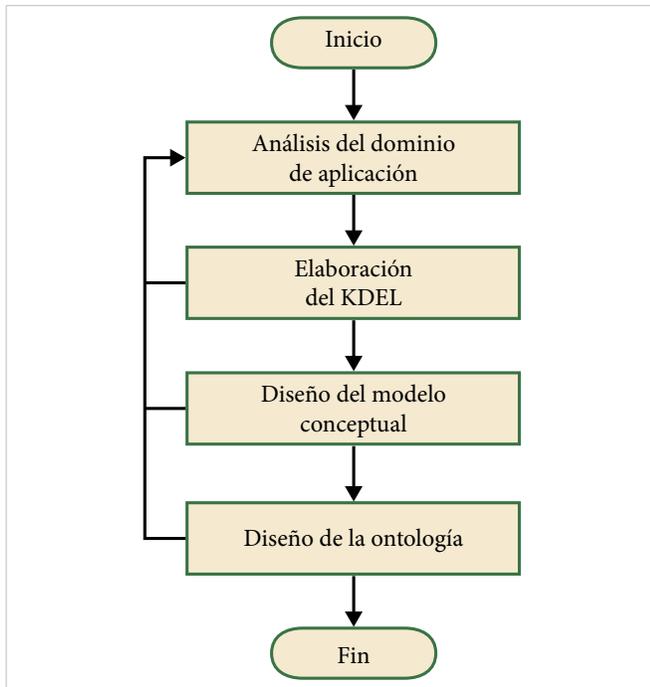


Figura 3. Proceso para elaboración de la ontología.

#### A. ANÁLISIS DEL DOMINIO DE APLICACIÓN

Para comenzar a desarrollar una ontología, de cualquier dominio de aplicación, es necesario tener en claro aquellos componentes que esta debe incluir [25], entre los que se encuentran los siguientes:

- Conceptos: las ideas básicas que se intentan formalizar respecto al dominio.
- Relaciones: aquellas interacciones entre los conceptos del dominio.
- Funciones: tipo específico de relación, donde se identifica un elemento mediante el cálculo de una función.
- Instancias: utilizadas para representar objetos de un concepto.
- Axiomas: afirmaciones o enunciados que se declaran sobre las relaciones que deben efectuar los elementos de la ontología.

Después de considerar todos los puntos anteriores, se obtendrá suficiente material para comenzar a estudiar el dominio. Con la ayuda de los especialistas se realiza todo el proceso, desde las sesiones iniciales hasta la validación de cada tarea. Esto será un proceso iterativo que se detendrá una vez que se logre un consenso entre los especialistas, donde no exista variación o ambigüedad en el lenguaje del dominio.

Usualmente, para apoyar esta primera tarea se suele hacer uso de recursos existentes en la literatura, por ejemplo, investigando algunos documentos que sugieran los especialistas, como lecturas especializadas y documentación de procesos que se desarrollan en el dominio. Esto puede aportar mayor conocimiento y reducir la dificultad de comprensión a aquellos individuos ajenos al dominio que vayan a trabajar en él.

#### B. ELABORACIÓN DE KDEL

Para elaborar el KDEL se enlistan conceptos identificados en la tarea anterior como peculiares o relevantes para el dominio para posteriormente documentar su definición, buscando un nivel de entendimiento y conocimiento balanceado entre el desarrollador y el especialista del dominio.

Cada entrada o símbolo del léxico se identifica con un nombre (o más de uno en caso de sinónimos, siempre y cuando este no genere confusión) y tiene dos tipos de descripciones: una llamada *noción*, que describe la denotación del símbolo, y la otra *impacto*, que describe la connotación de este [21]. Las entradas se clasifican generalmente en tres grupos, los cuales son objeto, sujeto y verbo [19].

El principio de circularidad del LEL (un símbolo es definido a través de sus relaciones con otros símbolos del dominio) obligará a los conceptos a tener al menos una relación, por lo que, al existir conceptos sin relación, se podrá identificar conceptos faltantes o aquellos que no son requeridos en el dominio. Además, el principio de vocabulario mínimo (minimización del vocabulario externo al dominio) reduce el lenguaje que puede ser utilizado para describir los símbolos del léxico [21]. Puesto que el KDEL es una evolución del LEL, aplican los mismos principios.

El proceso de construcción consta de seis actividades, las cuales pueden ocurrir simultáneamente [19]:

1. Identificar fuentes de información. En esta actividad se identifican todas y cada una de las posibles fuentes de información relacionadas con el dominio de interés.
2. Identificar símbolos. Durante esta actividad se identifican todos y cada uno de los términos correspondientes al dominio de interés.
3. Clasificar símbolos. Para la clasificación de los símbolos se consideran los tres tipos generales (sujeto, objeto y verbo). En caso de ser necesario se deberá adoptar nuevos tipos según se requiera.
4. Describir símbolos. En este paso se debe definir el símbolo, describiendo una posible relación entre uno o más objetos.
5. Verificar el KDEL. El especialista comprueba que los símbolos y el contexto sean los adecuados al dominio de estudio.
6. Validar símbolos. Durante la validación se confirma la fiabilidad de los conceptos, la definición y clasificación generadas durante el KDEL.

En caso de ser necesario se enriquece el KDEL con descripciones y fuentes de información, además de la posibilidad de registrar en el modelo quién ha validado cada uno de los conceptos. Con ello se puede lograr un KDEL con el que los especialistas de la solución tendrán un mayor nivel de entendimiento del dominio.

### C. DISEÑO DEL MODELO CONCEPTUAL

Si bien existen trabajos en los que se presentan procesos de derivación de modelos conceptuales <sup>[21]</sup> y aspectos fundamentales en el proceso de modelación <sup>[26]</sup>, la realidad es que al ser una actividad de análisis los resultados van a depender principalmente de dos factores: la calidad de la información de entrada, en este caso el KDEL, y la experiencia del especialista de la solución <sup>[26]</sup>.

El modelado consiste en plasmar los conceptos identificados en el proceso de elaboración del KDEL para luego identificar las relaciones existentes según sus definiciones. Las relaciones deberán ser identificadas como jerárquicas o taxonómicas, de manera que podrán observarse del tipo especialización, generación, todo-parte, agregación y composición, así como asociaciones entre pares, de manera que se pueda elaborar un diagrama de clases utilizando los conceptos y sus relaciones identificadas <sup>[20]</sup>.

Si bien existen múltiples herramientas que pueden ayudar con la tarea de modelado, este trabajo promueve el uso del lenguaje de modelado unificado (Unified Modeling Language, UML), debido principalmente a su sencillez y a la facilidad de editar de manera rápida el modelo, agregando elementos comunes para representar los conceptos y sus relaciones.

Una vez que el modelo inicial se considere completo, este deberá ser validado por los especialistas del dominio, con lo que se podrá identificar si algún símbolo del KDEL no fue agregado al modelo o en caso de que se identifiquen algunos otros que hagan falta, podrán definirse los conceptos correctos para añadirlos. De esta manera se formará un ciclo entre la modelación y la validación hasta que el especialista considere que se adapte de la mejor manera al dominio de aplicación (aun cuando pudiera seguir existiendo área de mejora en el modelo) y con ello se podrá proseguir con el desarrollo de la ontología.

### D. DESARROLLO DE LA ONTOLOGÍA

El desarrollo de la ontología representa la última fase del proceso, en la que se requiere un amplio conocimiento sobre los formalismos y herramientas existentes para llegar a los mejores resultados.

Para su desarrollo, existen primordialmente dos maneras: una compleja, que involucra la edición de archivos formateados, y otra más intuitiva, mediante el uso de editores de ontologías. Específicamente, en la primera alternativa se requiere generar un archivo con extensión específica y, de acuerdo con el lenguaje usado, seguir un conjunto de reglas semánticas. Por ejemplo, en el caso del lenguaje de ontología web se requiere un archivo de extensión OWL y de estructura XML para definir la ontología <sup>[27]</sup>.

## III. RESULTADOS

Los dominios de la ECT y el estrés laboral en los que se aplicó la estrategia se trabajaron en colaboración con sus respectivos especialistas, los cuales brindaron soporte, retroalimentación y validación a lo largo de la implementación de cada una de las tareas para el desarrollo de las ontologías. A continuación, se describen los resultados obtenidos para los casos de estudio.





Sin embargo, aplicar esta estrategia permitió elicitar el conocimiento de los especialistas, representar el conocimiento por medio del KDEL, el modelo conceptual y la ontología. Además, se adaptó el KDEL de acuerdo

con las necesidades específicas de cada caso de estudio, por lo que se puede considerar esta estrategia para representar el conocimiento en otros ISD con características semejantes.

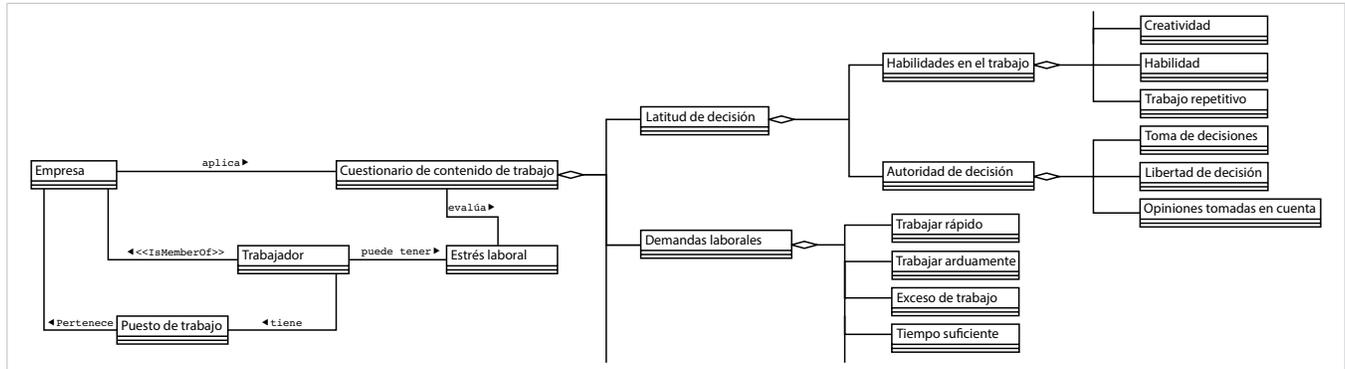


Figura 6. Extracto del modelo conceptual para el caso de estrés laboral.

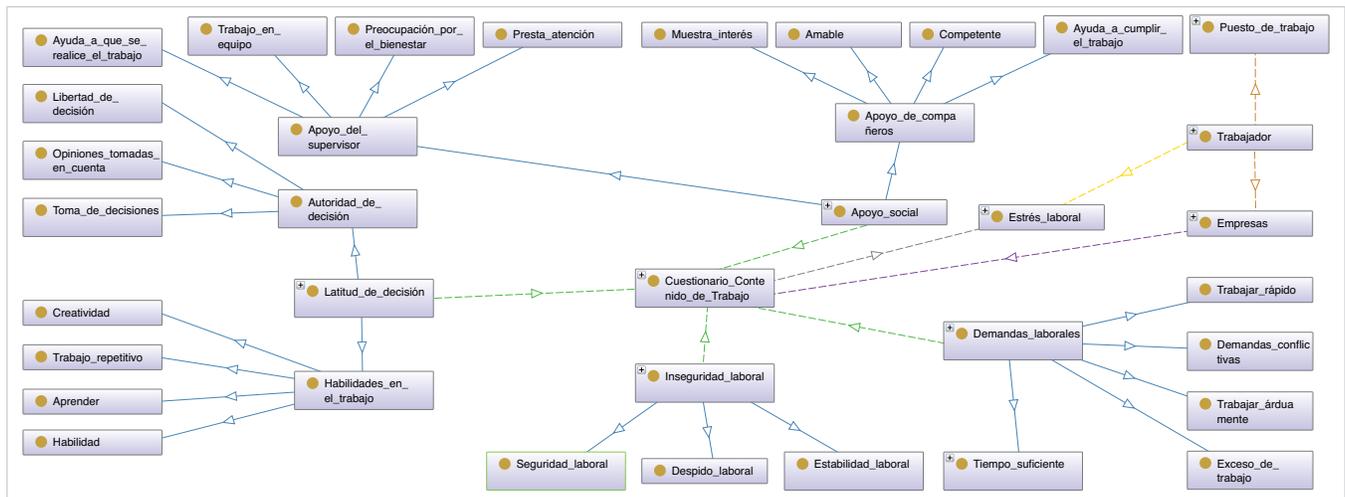


Figura 7. Ontología para el caso de estrés laboral.

## REFERENCIAS

- [1] F. Sánchez y M. B. Etxebarria, “La importancia de la toma de decisiones empresariales en la optimización de la gestión del conocimiento”, en *3rd Int. Conf. on Industrial Engineering and Industrial Management / XIII Congr. de Ingeniería de Organización (CIO 2009)*, Barcelona-Terrassa, sept. 2-4, 2009, pp. 1737-1744.
- [2] C. Ebert y C. H. C. Duarte, “Digital Transformation”, en *IEEE Software*, vol. 35, no. 4, pp. 16-21, jul./ag. 2018, doi: 10.1109/MS.2018.2801537.
- [3] J. J. Sarell, “Competencias dinamizadoras: Una propuesta para la gestión de conocimiento en la era de transformación digital”, *Rev. Gestión I+D*, vol. 3, no. 2, pp. 9-35, 2018. Acceso: may. 15, 2022. [En línea]. Disponible en: <http://portal.amelica.org/ameli/jatsRepo/134/134624003/html/index.html>
- [4] I. Nonaka, “A Dynamic Theory of Organizational Knowledge Creation”, *Organ. Sci.*, vol. 5, no. 1, pp. 14-37, feb. 1994, doi: 10.1287/orsc.5.1.14.
- [5] Y. Rojas, “De la gestión de información a la gestión del conocimiento”, *ACIMED*, vol. 14, no. 1, 2006, Acceso: may. 25, 2022. [En línea]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/28131889\\_De\\_la\\_gestion\\_de\\_informacion\\_a\\_la\\_gestion\\_del\\_conocimiento](https://www.researchgate.net/publication/28131889_De_la_gestion_de_informacion_a_la_gestion_del_conocimiento)
- [6] K. Olmos-Sánchez y J. Rodas-Osollo, “Knowledge Management for Informally Structured Domains:

- Challenges and Proposals”, en *Knowledge Management Strategies and Applications*, M. Mohiuddin, N. Halilem, S. M. A. Kobir y C. Yuliang, eds. Londres: IntechOpen, 2017, doi: [10.5772/intechopen.70071](https://doi.org/10.5772/intechopen.70071).
- [7] C. Brewster y K. O’Hara, “Knowledge representation with ontologies: the present and future”, *IEEE Intell. Syst.*, vol. 19, no. 1, pp. 72-81, en. 2004, doi: [10.1109/MIS.2004.1265889](https://doi.org/10.1109/MIS.2004.1265889).
- [8] K. Olmos, J. Rodas y L. F. Fernández, “Requirements Engineering Process Model for Informal Structural Domains”, *Int. J. Comput. Commun. Eng.*, pp. 75-77, en. 2013, doi: [10.7763/IJCCE.2013.V2.141](https://doi.org/10.7763/IJCCE.2013.V2.141).
- [9] G. Stephan, H. Pascal y A. Andreas, “Knowledge Representation and Ontologies Logic, Ontologies and Semantic Web Languages”, en *Semantic Web Services*, S. Grimm, P. Hitzler y A. Abecker, eds. Berlín: Springer, 2007, doi: [10.1007/3-540-70894-4\\_3](https://doi.org/10.1007/3-540-70894-4_3).
- [10] D. B. Yamada et al., “Proposal of an ontology for mental health management in Brazil”, *Procedia Comput. Sci.*, 2018, vol. 138, doi: [10.1016/j.procs.2018.10.020](https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.10.020).
- [11] M. Hadzic, M. Chen, y T. S. Dillon, “Towards the mental health ontology”, *2008 IEEE Int. Conf. on Bioinformatics and Biomedicine*, 2008, pp. 284-288, doi: [10.1109/BIBM.2008.59](https://doi.org/10.1109/BIBM.2008.59).
- [12] E. Nasiri y M. Hadzic, “Designing the human stress ontology: A formal framework to capture and represent knowledge about human stress”, *Aust. Psychol.*, vol. 45, no. 4, pp. 258-273, dic. 2010, doi: [10.1080/00050061003664811](https://doi.org/10.1080/00050061003664811).
- [13] Z. Zhang et al., “Developing an ontology for representing the domain knowledge specific to non-pharmacological treatment for agitation in dementia”, *Alzheimer’s Dement. Transl. Res. Clin. Interv.*, vol. 6, no. 1, 2020, doi: [10.1002/trc2.12061](https://doi.org/10.1002/trc2.12061).
- [14] R. Stevens, C. A. Goble y S. Bechhofer, “Ontology-based knowledge representation for bioinformatics”, *Brief. Bioinformatics*, vol. 1, no. 4. 2000, doi: [10.1093/bib/1.4.398](https://doi.org/10.1093/bib/1.4.398).
- [15] C. McLellan, “Digital transformation: The difference between success and failure”, en *Digital Transformation: A CXO’s Guide*, M. Wachsman, ed. CBS Interactive Inc, 2020, pp. 4-13.
- [16] L. Osuszek, S. Stanek y Z. Twardowski, “Leverage big data analytics for dynamic informed decisions with advanced case management”, *J. Decis. Syst.*, vol. 25, pp. 436-449, jun. 2016, doi: [10.1080/12460125.2016.1187401](https://doi.org/10.1080/12460125.2016.1187401).
- [17] K. Olmos-Sánchez, J. Rodas-Osollo, Y. Garay y S. Herrera, “Generation of an OWL ontology from a knowledge domain extended lexicon”, en *CEUR Workshop Proc.*, 2016, vol. 1784.
- [18] K. Olmos-Sánchez y J. Rodas-Osollo, “A Strategy of Requirements Engineering for Informally Structured Domains”, *Int. J. Comb. Optim. Probl. Informatics*, vol. 7, no. 2, pp. 49-56, 2016.
- [19] K. Olmos-Sánchez y J. Rodas-Osollo, “Helping organizations manage the innovation process to join the Cognitive era”, presentado en *8th Int. Conf. in Software Engineering Research and Innovation (CONISOFT)*, 2020, doi: [10.1109/CONISOFT50191.2020.00012](https://doi.org/10.1109/CONISOFT50191.2020.00012).
- [20] M. Ben-Ari y T. Yeshno, “Conceptual models of software artifacts”, *Interact. Comput.*, vol. 18, no. 6, pp. 1336-1350, dic. 2006, doi: [10.1016/j.intcom.2006.03.005](https://doi.org/10.1016/j.intcom.2006.03.005).
- [21] J. C. S. d P. Leite y A. P. M. Franco, “A strategy for conceptual model acquisition”, [1993] *Proc. of the IEEE Int. Symp. on Requirements Engineering*, 1993, pp. 243-246, doi: [10.1109/ISRE.1993.324851](https://doi.org/10.1109/ISRE.1993.324851).
- [22] K. W. Fung y O. Bodenreider, “Knowledge Representation and Ontologies”, en *Clinical Research Informatics*, R. Richesson y J. E. Andrews, eds. Londres: Springer, 2012, pp. 255-275.
- [23] J. Rodas-Osollo, K. Olmos-Sánchez, A. Jiménez-Galina, M. Soltero-Romero y A. Pérez-Campos, “Towards Optimisation of Electroconvulsive Therapy with a Little Help from Knowledge Management”, en *New Perspectives in Software Engineering. CIMPS 2021. Advances in Intelligent Systems and Computing*, J. Mejia, M. Muñoz, Á. Rocha, H. Avila-George y G. M. Martínez-Aguilar, eds. Springer, 2022, doi: [10.1007/978-3-030-89909-7\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-030-89909-7_8).
- [24] R. Karasek, C. Brisson, N. Kawakami, I. Houtman, P. Bongers y B. Amick, “The Job Content Questionnaire (JCQ): an instrument for internationally comparative assessments of psychosocial job characteristics”, *J. Occup. Health Psychol.*, vol. 3, no. 4, pp. 322-355, 1998, doi: [10.1037/1076-8998.3.4.322](https://doi.org/10.1037/1076-8998.3.4.322).

- [25] Y. Rosell, J. A. Senso y A. A. Leiva, “Diseño de una ontología para la gestión de datos heterogéneos en universidades: marco metodológico”, *Rev. Cuba. Inf. en Ciencias la Salud*, vol. 27, no. 4, 2016.
- [26] S. J. B. A. Hoppenbrouwers, H. A. Proper y T. P. van der Weide, “A fundamental view on the process of conceptual modeling”, en *Conceptual Modeling – ER 2005. Lecture Notes in Computer Science*, L. Delcambre, C. Kop, H. C. Mayr J. Mylopoulos y O. Pastor, eds. Berlín: Springer, 2005, vol. 3716, doi: 10.1007/11568322\_9.
- [27] D. L. McGuinness y F. van Harmelen, eds. “OWL Web Ontology Language Overview”. W3.org. <https://www.w3.org/TR/owl-features/> (acceso: may. 27, 2022).
- [28] S. C. Litin, *Mayo clinic family health book*, 5.<sup>a</sup> ed. Rochester, MN, E. U. A.: Mayo Clinic Press, 2018.
- [29] T. M. Araújo y R. Karasek, “Validity and reliability of the Job Content Questionnaire in formal and informal jobs in Brazil”, *SJWEH Suppl*, vol. 34, no. 6, 2008, disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/41464059>.
- [30] Marco Antonio Lozano Castro > *archivos compartidos > Ontologías Artículo*, sept. 19, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://alumnosuacj-my.sharepoint.com/>

## RECONOCIMIENTOS

El autor principal y coautores estudiantes del Programa de Maestría en Cómputo Aplicado de la UACJ agradecen el apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) a sus estudios de posgrado, así como a la Dra. Aidé Aracely Maldonado Macías por su participación como especialista en el caso de estudio del estrés laboral, al Dr. Jorge Enrique Rodas Osollo y a la Mtra. Alicia Margarita Jiménez Galina que fungieron como especialistas del área de modelado y desarrollo de ontologías, todos ellos profesores adscritos al Instituto de Ingeniería y Tecnología de la UACJ.

# Simulación de esfuerzos en diseño digital de ortesis lumbar

## *Simulation of efforts in digital design of lumbar orthoses*

Juan Ismael Pérez Guadián<sup>1</sup>✉, Erika Guadalupe Meraz Tena<sup>1</sup>, Edson Francisco Estrada Meneses<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Maestría en Diseño y Desarrollo del Producto | Instituto de Arquitectura, Diseño y Arte | Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

### RESUMEN

Al analizar los distintos métodos para tratar una lesión lumbar, el tratamiento por medio de antiinflamatorios y opioides, así como el uso de exoesqueletos en el más avanzado de los casos, se observa que no existen muchos dispositivos que se puedan utilizar para la prevención de estas y que las ortesis actuales están enfocadas a tratar el dolor o bien a ofrecer algún tipo de rehabilitación. La presente investigación tiene como finalidad ofrecer un análisis de los esfuerzos lumbares que ayude en el diseño de ortesis de soporte lumbar como una alternativa para prevenir lesiones en trabajadores del área de la enfermería, en la que existe un alto índice de lesiones de tronco y raquis por la naturaleza del trabajo en el que se tiene que mover pacientes inmóviles varias veces al día. Por medio de la simulación de un modelo antropométrico y la programación de musculatura independiente en el software OpenSim, se obtuvieron datos de esfuerzos máximos que pudieran ser utilizados para el diseño de ortesis de soporte lumbar, con beneficios como la rapidez para obtenerlos, no tener que utilizar equipo de análisis físico costoso ni tener que intervenir sujetos de prueba.

**PALABRAS CLAVE:** ortesis; lumbar; lumbalgia; enfermería; soporte.

### ABSTRACT

When analyzing the different methods to treat a lumbar injury, the treatment through anti-inflammatories and opioids, as well as the use of exoskeletons in the most advanced of cases, it is observed that there are not many devices that can be used for prevention of these and that current orthoses are focused on treating pain or offering some type of rehabilitation. The present research aims to offer an analysis of lumbar efforts that helps in the design of lumbar support orthoses, as an alternative to prevent injuries in workers in the nursing area in which there is a high rate of trunk and spinal injuries due to the nature of the work in which immobile patients have to be moved several times a day. Through the simulation of an anthropometric model and independent muscle programming in the OpenSim software, data on maximum efforts were obtained that could be used for the design of lumbar support orthoses, with benefits such as the speed to obtain them, not having to use of expensive physical analysis equipment or the intervention of test subjects.

**KEYWORDS:** orthosis; lumbar; low back pain; nursing; support.

#### Correspondencia:

**DESTINATARIO:** Juan Ismael Pérez Guadián  
**INSTITUCIÓN:** Universidad Autónoma de Ciudad Juárez | Instituto de Arquitectura, Diseño y Arte  
**DIRECCIÓN:** Av. del Charro núm. 450 norte, col. Partido Romero, C. P. 32310, Ciudad Juárez, Chihuahua, México  
**CORREO ELECTRÓNICO:** ismael.perezg20@gmail.com

**Fecha de recepción:** 10 de agosto de 2022. **Fecha de aceptación:** 6 de octubre de 2022. **Fecha de publicación:** 28 de octubre de 2022.



## I. INTRODUCCIÓN

La lumbalgia es un padecimiento clínico que se caracteriza principalmente por la presencia de dolor en la región de la espalda y la cintura, también llamada región lumbar, que con frecuencia se recorre a los glúteos y muslos. Generalmente se presenta después de realizar un gran esfuerzo con una postura inadecuada o bien por hacer esfuerzos de levantamiento constantemente con esta zona del cuerpo <sup>[1]</sup>.

Según la página oficial del Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS), “La lumbalgia tiene 3 tipos de clasificaciones, puede presentarse en forma aguda (inmediata) al realizar un esfuerzo como levantar o cargar peso o torcer el tronco; en forma subaguda, apareciendo poco tiempo después del esfuerzo; o crónica, cuando su evolución es insidiosa y prolongada. El dolor agudo suele durar menos de seis semanas, el subagudo entre seis y doce semanas, y el dolor crónico excede las doce semanas o bien existe un daño permanente” <sup>[2]</sup>.

En México, existen pocos estudios relacionados con la lumbalgia ocupacional. Sin embargo, según datos de la Organización Mundial de la Salud (OMS), esta es la primera causa de consulta médica a nivel mundial <sup>[3]</sup>.

En 2017, el IMSS reportó haber atendido más de 300 000 consultas por lumbalgia y dolor de espalda baja, siendo el padecimiento más frecuente en la población trabajadora de México y la segunda causa de atención con médicos de especialidad en traumatología y ortopedia, por lo que representa grandes costos asociados a incapacidades <sup>[4]</sup>.

De acuerdo con datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), en su censo de 2015, 475 295 personas ejercían la profesión de enfermería en México, de las cuales 9 de cada 10 eran mujeres, con una edad promedio de 38 años, y atendían a 112 millones de habitantes. De esta manera, cada 4 profesionales de enfermería estaban a cargo de 1000 habitantes cuando lo ideal, según la OMS, es 6 por cada 1000 habitantes. Esto refleja un desabasto de enfermeros en México, dejando a los disponibles con una sobrecarga permanente de trabajo y una mayor predisposición a lesiones lumbares <sup>[5]</sup>.

En México no existen cifras relacionadas con lumbalgia en el ejercicio de la enfermería, sin embargo, en los Estados Unidos se reporta que el 52 % del personal de

enfermería cuenta con padecimientos crónicos de dolor en la espalda baja <sup>[6]</sup>.

Una ortesis, de acuerdo con la International Organization for Standardization (ISO), es un apoyo o bien un dispositivo externo (aparato) aplicado al cuerpo para modificar condiciones de estructura en las que se cimienta el sistema neuromusculoesquelético <sup>[7]</sup>.

Actualmente existen muchas investigaciones en el campo referente a la zona lumbar, la mayoría de las cuales utilizan exoesqueletos para atender la lesión, mas estos suelen ser costosos <sup>[8]</sup> y los proyectos que están enfocados en el efecto de las ortesis lumbares para el tratamiento del padecimiento lumbar casi en su totalidad están dirigidos a la rehabilitación de personas lesionadas y no en la prevención de la lesión en sí.

En este artículo se presenta un nuevo diseño de ortesis desarrollado con la finalidad de evitar lesiones en los trabajadores del ramo de la enfermería, el cual fue evaluado para demostrar una mejora en el nivel de esfuerzos lumbares, así como para incluir mecanismos de limitación mecánica ante los movimientos que propicien una posible lesión en el usuario. Se incluyen también simulaciones computarizadas, así como un análisis estadístico para comprobar que el diseño de ortesis puede evitar lesiones lumbares de manera mecánica.

La lumbalgia es un padecimiento muy común que afecta al 80 % de la población, índice que se agrava con la combinación de otras condiciones, como el sedentarismo y la obesidad <sup>[9]</sup>.

En México, el 30 % de las consultas por lumbalgia terminan en incapacidad laboral, lo que representa altos costos para el sistema de salud <sup>[10]</sup>.

Otros factores, tanto psicosociales como de carga física, no suelen asociarse con el dolor lumbar al momento de su aparición en primera instancia, sin embargo, son considerados importantes cuando el dolor prevalece por periodos prolongados de tiempo <sup>[11]</sup>.

En el personal de enfermería, el dolor de espalda es común, el riesgo se incrementa debido a las grandes cargas de trabajo físico y estrés psicológico y estos son los profesionales con mayor tasa de incidencia de dolor lumbar <sup>[11], [12]</sup>.

Existen también otros factores que causan el padecimiento lumbar en la enfermería y que están más relacionados con la organización del hospital que funge como empleador <sup>[13]</sup>, entre ellos los siguientes:

- Sobrecarga de trabajo.
- Alta demanda laboral.
- Cortos periodos de tiempo para atender al paciente.
- Necesidad de movimientos apresurados.
- Falta de equipo que evite posturas inadecuadas de carga.

Las condiciones anteriores incrementan la carga mecánica en el personal de enfermería y tienen una relación directa con la organización de los hospitales al delegar funciones que no competen directamente a ellos debido a malas decisiones <sup>[13]</sup>.

Con el tiempo, se ha obtenido evidencia de que las fuerzas de presión vertical no lesionan el disco ni le provocan fallos en su estructura, sin embargo, un estudio anatómico encontró, analizando 600 discos vertebrales, que la degeneración discal lumbar aparece en los varones a partir de los 20 años de edad y de los 30 en las mujeres <sup>[14]</sup>.

Una mala técnica de levantamiento es la principal causa de lesión discal, sin embargo, el mecanismo de torsión es el que puede producir más fácilmente una lesión, sobre todo en los discos inferiores que suelen ser más ovalados. A su vez, existen también otros mecanismos que ayudan a darle solidez y soporte a la zona lumbar, como el pilar posterior compuesto de articulaciones superpuestas y que es el medio en el que los istmos transmiten la presión de manera vertical, convirtiéndolos en puntos débiles susceptibles a la fractura por fatiga <sup>[15]</sup>.

Un complemento externo de estas estructuras son las fajas de tela, como las que utiliza la gente del campo o la del halterófilo, que actúan como una cincha sobre la que se apoya la musculatura abdominal para ser más competente. Ello representa una disminución de un 10 % de la función muscular y un aumento de un 60 % de la tensión que soportan los ligamentos posteriores <sup>[16]</sup>.

La obesidad y el embarazo suelen aumentar la lordosis debido a la debilidad de la musculatura de la zona abdominal que representa un desequilibrio lumbar posterior. Para ambos casos se recomienda llevar a cabo rutinas de ejercicios isométricos para mantener equilibrados los dos grupos musculares.

El mecanismo de fatiga por estar en una postura erguida y sin movimiento se debe a que la evolución ha adaptado al hombre más a la locomoción que a la posición erecta y esto detona el mecanismo de fatiga por estar de pie quieto. Por tanto, se puede decir que la columna no está diseñada exclusivamente para este fin y que le resulta imprescindible un mínimo movimiento y preparación física para soportar las cargas acumuladas a lo largo de la vida <sup>[15]</sup>.

Actualmente existen investigaciones similares <sup>[17]</sup>, <sup>[18]</sup> que abordan en qué momento prescribir el tratamiento lumbar en enfermería, en las que se vincula el uso de las ortesis para el tratamiento de lesiones lumbares en enfermería. La presente investigación utiliza por primera vez una simulación en el software OpenSim para proveer datos de una ortesis lumbar específica para el ramo de la enfermería.

## II. METODOLOGÍA

El presente estudio tiene como variables la actividad muscular en la zona lumbar de oblicuos externos, fascia toracolumbar, fascia glútea y abdominal recto, así como el desplazamiento angular de la zona lumbar y piernas. Los esfuerzos y movimientos en general, incluyendo los lumbares, se calcularon en OpenSim usando un modelo anatómico que representó la tarea de realizar un levantamiento de carga de 10 kg. En el caso específico de la zona lumbar, las fuerzas calculadas durante el movimiento dinámico corresponden al segmento de vértebras comprendido entre la L1 y L5. El programa simuló la carga en los músculos de la fascia toracolumbar

### SIMULACIÓN

Se creó un modelo anatómico óseo (Figura 1) utilizando el software OpenSim. A este modelo base le fueron incorporados 19 segmentos en el tronco, brazos y piernas. La región lumbar, la más importante para el proyecto, se dividió en cinco vértebras de L1 a L5, mientras que las cervicales y espinas torácicas fueron modeladas como un solo cuerpo rígido.

La columna vertebral tiene 33 huesos, 12 de los cuales son vértebras torácicas a cuyos lados hay 24 costillas. Este modelo anatómico fue basado en una persona con una altura de 1.53 m, de acuerdo con la información previamente revisada de antropometría y biomecánica para ingenieros y diseñadores industriales <sup>[19]</sup>.



Figura 1. Modelo anatómico durante la simulación en OpenSim.

Para la simulación de los movimientos en OpenSim fue necesario programarlos aparte, utilizando el programa Matlab. Los movimientos en la columna torácica, así como la flexión-extensión entre vértebras, se realizaron combinando una articulación y una junta universal a tres grados de libertad. Cabe destacar que los músculos del modelo, debido a la aplicación simulada, solo son generadores de fuerza. Otros aspectos de la dinámica muscular, como las relaciones con la velocidad y longitud, no fueron considerados en este proyecto.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en la simulación con el software OpenSim se muestran en la [Tabla 1](#), de acuerdo con el grupo muscular al que pertenecen, y de estos se generaron las [Figuras 2, 3 y 4](#).

TABLA 1  
RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN EN OPENSIM (NEWTONS).

FUERZA LUMBAR EN INCLINACIÓN	MOMENTO LUMBAR EN ELEVACIÓN	MOMENTO DE ROTACIÓN LUMBAR	FUERZA LUMBAR Tx	FUERZA LUMBAR Ty	FUERZA LUMBAR Tz	MOMENTO DE EXTENSIÓN LUMBAR	MOMENTO DE INCLINACIÓN LUMBAR	FUERZA LUMBAR AL GIRAR
7.8458	-16.7681	-2.8023	42.2600	178.5788	-39.9743	11.1425	2.5494	-0.3903
7.1711	-5.82352	-1.7120	25.2158	119.0234	-17.8356	13.6712	6.7881	1.6433
6.4274	3.411	-0.2925	11.2225	65.4456	2.0145	15.6635	10.8220	3.4170
5.3555	10.1227	0.2613	1.6370	25.3400	15.2306	16.1716	14.3374	4.5173
0.4339	14.3718	-0.6164	-8.4393	1.0589	19.4081	15.1040	17.2733	4.7974
-6.2623	17.73235	-3.1055	-18.9400	-9.9161	14.1251	12.9808	19.6329	4.3794
-12.7182	22.9606	-5.9958	-27.8294	-10.2805	0.9077	10.4480	21.3294	3.5643
-17.8017	27.4065	-7.7686	-32.1629	-3.4742	-11.9748	7.9871	22.2347	2.7015
-17.3138	27.5911	-8.1166	-26.9598	6.2838	-15.9455	5.8883	22.3138	2.0400
-18.5625	24.5578	-8.8936	-21.0454	12.4793	-9.3203	4.3375	21.6997	1.6339
-21.9700	18.1391	-9.5806	-14.2344	18.4787	7.0744	3.4568	20.6719	1.3725
-24.4505	9.7510	-9.7675	-6.2371	26.9656	27.6873	3.2841	19.6000	1.1180
-21.5963	1.7641	-9.3206	0.3709	40.8744	45.0579	3.8056	18.8767	0.8430
-12.6348	-4.4775	-7.5942	3.8860	55.1753	53.3032	5.0218	18.7172	0.6285
MOMENTO DE FLEXIÓN DE CADERA DERECHO	MOMENTO DE ABDUCCIÓN DE CADERA DERECHO	MOMENTO DE ROTACIÓN DE CADERA DERECHO	MOMENTO DE FLEXIÓN DE CADERA IZQUIERDO	MOMENTO DE ABDUCCIÓN DE CADERA IZQUIERDO	MOMENTO DE ROTACIÓN DE CADERA IZQUIERDO	MOMENTO ANGULAR MTP* DERECHO	MOMENTO ANGULAR MTP* IZQUIERDO	
29.6351	-11.7376	2.9738	-8.6507	-46.1480	0.4089	0.1029	0.0446	
21.8369	-8.3899	2.0788	-7.6996	-45.8954	-0.3208	0.0935	0.0427	
14.7435	-5.5348	1.5316	-6.5874	-45.3831	-1.3702	0.0881	0.0410	
8.9180	-4.0561	1.5420	-4.5446	-45.8951	-2.3857	0.0880	0.0396	
3.5048	-3.3718	1.8048	-3.6574	-46.9974	-3.1936	0.0921	0.0386	
-1.9882	-2.0626	1.8658	-2.2422	-48.4609	-3.6107	0.0974	0.0379	
-7.1566	0.7008	1.5685	0.2234	-51.4440	-4.5331	0.0999	0.0374	
-9.6208	3.7412	1.1340	1.6325	-54.5116	-5.8096	0.0950	0.0370	
-8.0239	4.7756	0.7882	4.0207	-56.7035	-6.6801	0.0790	0.0369	
-11.0127	3.4294	0.4539	8.8610	-58.2571	-6.8604	0.0525	0.0371	
-14.4223	-1.0257	-0.0455	11.5763	-59.6148	-7.1003	0.0225	0.0378	
-14.7787	-6.7142	-0.6818	11.6121	-60.2098	-7.3347	-0.0031	0.0390	
-12.24825	-10.6293	-1.1659	13.5195	-58.6794	-6.8133	-0.0176	0.0404	
-5.6277	-11.8295	-0.9708	16.2197	-54.8536	-5.7885	-0.0176	0.0411	

\*mtp = momento tibial posterior.

TABLA 1 (CONT.)  
RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN EN OPENSIM (NEWTONS).

ESFUERZO EN RODILLA DERECHA	ESFUERZO EN RODILLA IZQUIERDA	MOMENTO ANGULAR RODILLA DERECHA	MOMENTO ANGULAR RODILLA IZQUIERDA	ÁNGULO SUBLANTAR RODILLA DERECHA	ÁNGULO SUBLANTAR RODILLA IZQUIERDA
-5.7629	-23.7250	2.1248	-62.7244	-0.7615	15.1556
-3.8952	-26.5819	1.9414	-65.3038	-0.6309	15.7987
-2.7884	-29.71451	1.8251	-68.5255	-0.5383	16.6118
-2.6398	-32.4394	1.8025	-71.8170	-0.5080	17.0886
-3.6938	-35.5870	1.8238	-74.8953	-0.5070	17.4684
-5.8599	-38.3450	1.8108	-77.7148	-0.4754	18.0792
-8.6348	-40.6417	1.6930	-80.5033	-0.3766	18.3669
-10.8109	-43.6821	1.4468	-83.8652	-0.2333	18.5642
-11.6572	-46.0408	1.0654	-87.3087	-0.1119	18.9697
-14.1430	-46.4663	0.4722	-90.1700	-0.0700	19.5477
-16.7322	-47.9570	-0.1286	-94.2104	-0.1307	19.8030
-17.8291	-50.8919	-0.5622	-99.8699	-0.2430	19.6096
-17.0958	-51.1911	-0.7341	-103.7370	-0.3322	19.0220
-13.0300	-49.9935	0.5018	-106.8282	-0.4588	18.5820

En las Figuras 2, 3 y 4 están representados los datos inicialmente expuestos en la Tabla 1 y se pueden observar los gráficos de cada grupo de datos representados por el color utilizado para los mismos en dicha tabla. En la Figura 2 a) se puede observar cómo los esfuerzos lumbares en X (línea amarilla) y en Y (línea azul claro) son altos al comienzo, con valores de 42.26 N y 178.57

N, respectivamente, y al final del movimiento con valores de 26.95 N y 55.17 N, respectivamente, es decir, en los puntos en que la postura al momento del levantamiento es más incómoda y bajan en la parte media del levantamiento, dando mediciones de 1.63 en X y 1.05 en Y debido a que la postura de la espalda se mantiene más recta.

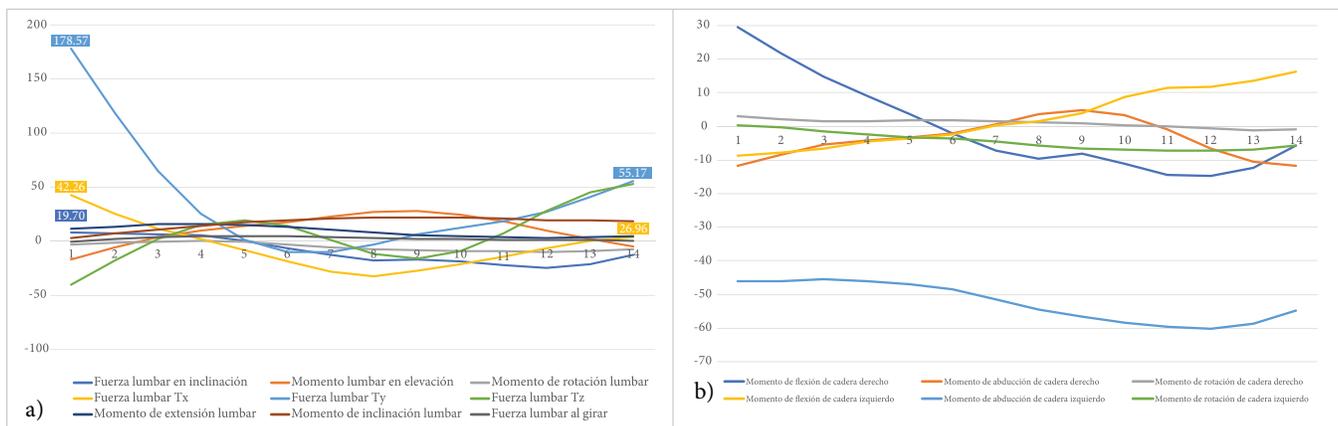


Figura 2. Gráficas de simulación: a) esfuerzos lumbares y b) movimiento de cadera (Newtons). El eje horizontal representa el tiempo en segundos de la prueba (del 1 al 14) y el vertical el esfuerzo en Newtons.

Por otra parte, el movimiento en esta zona lumbar (línea naranja) aumenta hasta 27.40 N cuando se endereza la espalda de manera abrupta a la mitad del tiempo en el que se realiza el movimiento. A la vez, el movimiento en la cadera [línea naranja, Figura 2 b)] aumenta conforme transcurre el tiempo y el movimiento de abducción [líneas azules, Figura 2 b)] se reduce con el paso del tiempo. El valor más alto de fuerza lumbar registrado en X fue de 42.26 N y el más alto en Y fue de 178.57 N, lo cual

cobra sentido, ya que OpenSim considera fuerza en Y a la aplicada en el levantamiento en el plano sagital.

En el movimiento de carga, los músculos más utilizados, aparte de los de la zona lumbar, son los de las piernas y pies. De hecho, la técnica de levantamiento que busca evitar lesiones lumbares precisamente trata de enfocar el mayor esfuerzo en estos grupos musculares y liberar la zona vertebral.

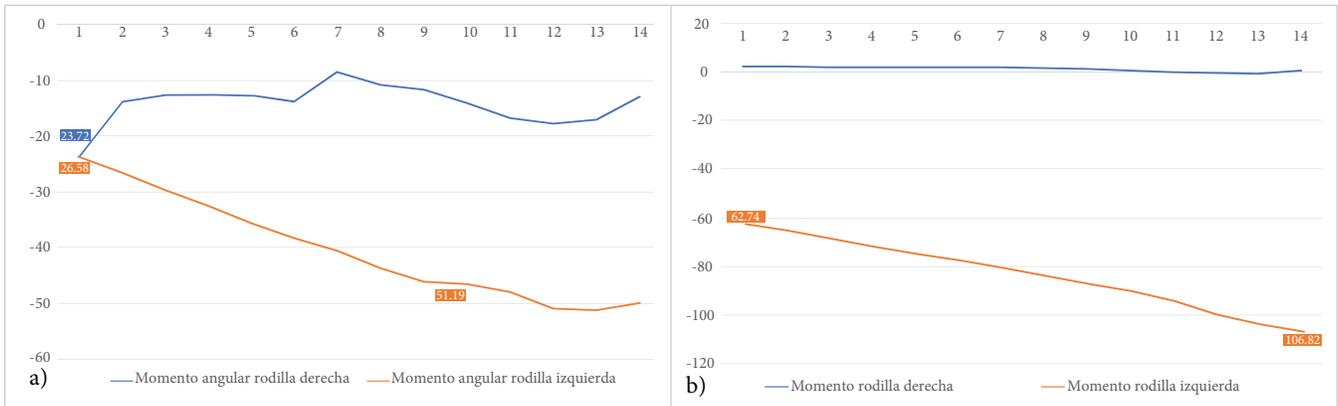


Figura 3. Gráficas de simulación de esfuerzos en a) rodillas y b) tobillos (Newtons).

Los esfuerzos realizados durante la simulación en rodillas y tobillos se representan en la Figura 3, en las que se observa que para las rodillas, los esfuerzos de la rodilla derecha (línea azul) y de la izquierda (línea naranja) de la Figura 3 a) son altos al inicio del movimiento de carga (23.72 N y 26.58 N respectivamente), en el cual fueron flexionadas para levantar el peso, mientras que bajan hasta valores de 2.63 N y 2.78 N entretanto el sujeto se va enderezando, y tienden a subir de nuevo

casi cuando alcanza la postura erguida hasta 50.89 N y 51.19 N respectivamente.

Por otro lado, por las mediciones en los tobillos [Figura 3 b)] se asume que se mantiene la misma fuerza para el tobillo derecho (línea azul) y la fuerza disminuye para el izquierdo, de 62.74 N a 106.82 N (línea naranja), mostrando cómo el sujeto del modelo tiende a recargarse más en el pie derecho que en el izquierdo.

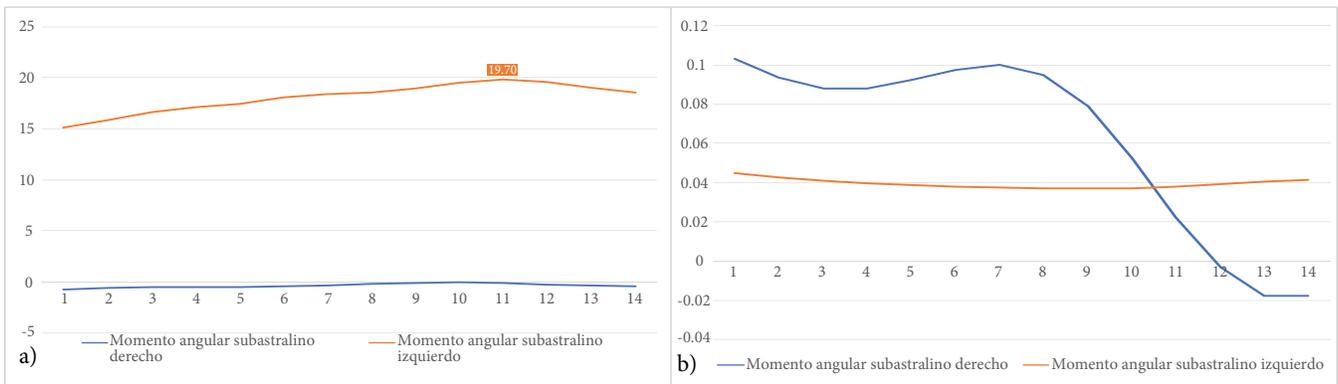


Figura 4. Gráficas de simulación de esfuerzos: a) unión lumbosacra en pies y b) del ángulo metatarsiano en grados (Newtons).

Para la zona de la unión lumbosacra, se simularon los esfuerzos en los ángulos laterales respecto a los pies y los movimientos de la “sentadilla” se fueron acrecentando conforme pasó el tiempo [Figura 4 a)] en el movimiento de carga hasta llegar a un valor máximo de 19.70 N. Respecto al ángulo metatarsiano, referente a la altura de la parte superior del pie respecto a los dedos [Figura 4 b)], no mostró un cambio aparente para el pie izquierdo (representado por la línea naranja) pero cambia de manera abrupta para el pie derecho (línea azul).

El modelo anatómico, así como la simulación del movimiento de carga, tienen restricciones respecto a las

pruebas que podrían realizarse a sujetos vivos. Para el modelo de OpenSim, los músculos están programados para servir como generadores de fuerza y desprecian las interacciones de fuerza-velocidad y fuerza-desplazamiento que tienen los músculos realmente en un ser vivo, por lo que este recurso no es adecuado para simular problemas clínicos o recopilar datos de pacientes que sufren lumbalgia. Sin embargo, los resultados de fuerzas generadas son comparables a los que se pueden obtener a través de un electromiograma de superficie y el software no tiene restricciones, como el índice de grasa corporal que puede intervenir en la toma de mediciones.

La mayor limitación al simular en OpenSim es que el software no muestra los errores de programación, por lo que es muy difícil encontrarlos y es necesario tener de preferencia otro equipo con Matlab corriendo simultáneamente para corregirlos.

#### IV. CONCLUSIONES

Los datos de esfuerzos máximos en la [Tabla 2](#), obtenidos por medio de simulación de un modelo antropométrico y programación de musculatura independiente en OpenSim, pudieran ser utilizados para el diseño de ortesis de soporte lumbar, con beneficios tales como la rapidez para obtenerlos, no necesitar el uso de equipo de análisis físico costoso ni tener que intervenir sujetos de prueba.

TABLA 2  
ESFUERZOS MÁXIMOS POR ZONA MUSCULAR (NEWTONS)

ZONA MUSCULAR	ESFUERZO MÁXIMO
Fuerza lumbar en inclinación	21.97008065
Momento lumbar en elevación	27.59113049
Momento de flexión de cadera derecho	29.63515338
Momento de abducción de cadera derecho	11.82955951
Esfuerzo en rodilla derecha	17.82918401
Esfuerzo en rodilla izquierda	51.19116914
Momento de rotación lumbar	9.767565957
Fuerza lumbar Tx	42.26008087
Momento de rotación de cadera derecho	2.973817664
Momento de flexión de cadera izquierdo	16.21976785
Momento angular rodilla derecha	2.124800904
Momento angular rodilla izquierda	106.8282973
Fuerza lumbar Ty	178.5788462
Fuerza lumbar Tz	53.30322858
Momento de abducción de cadera izquierdo	60.20985607
Momento de rotación de cadera izquierdo	7.334789846
Angulo subltantar rodilla derecha	0.761551481
Angulo subltantar rodilla izquierda	19.80302497
Momento de extensión lumbar	16.17161347
Momento de inclinación lumbar	22.31380044
Momento angular mtp derecho	0.102958194
Momento angular mtp izquierdo	0.044635795

Entre los datos más importantes, destaca que el esfuerzo lumbar máximo obtenido durante la simulación fue de

178.57 N y de 19.70 N para el esfuerzo en la unión lumbosacra. Sin embargo, también se observaron esfuerzos en zonas no lumbares importantes, como esfuerzos en rodillas que llegan hasta los 51.19 N y en los tobillos de hasta 106.82 N. Sin duda, esto afecta al diseño de una ortesis lumbar porque se tendrán que considerar estos esfuerzos y agregarle soporte a estas partes del cuerpo, ya que son estresadas significativamente junto con la zona lumbar al momento de realizar un movimiento de carga.

Es importante también resaltar que en el diseño de ortesis para la zona lumbar se deben considerar maneras de trasladar estos esfuerzos y compartirlos con zonas musculares no afectadas durante el levantamiento de carga con el fin de disminuir la incidencia de lesiones tanto en la zona lumbar como en rodillas y tobillos.

Por haberse diseñado los músculos de la simulación meramente como generadores de fuerza y al no considerar deformaciones con el tiempo o la elongación de fibras musculares, no se recomienda el uso de estos datos para análisis de cuadros clínicos.

#### REFERENCIAS

- [1] C. E. Champo, “Fortalecimiento abdominal como tratamiento para la lumbalgia inespecífica. Metaanálisis”, tesis de licenciatura, Fac. de Ciencias Odontol. y Salud Pública, Univ. de Ciencias y Artes de Chiapas, Tuxtla Gutiérrez, Chis., 2017.
- [2] IMSS. “Lumbalgia”. IMSS.gob.mx. <http://www.imss.gob.mx/salud-en-linea/lumbalgia> (acceso: sept. 11, 2020).
- [3] A. Aguilera y A. Herrera, “Lumbalgia: Una dolencia muy popular ya la vez desconocida”, *Comunidad y salud*, vol. 11, no. 2, pp. 80-89, 2013, disponible en: <http://ve.scielo.org/pdf/cs/v11n2/art10.pdf>.
- [4] IMSS. “En el IMSS, más de 300 mil consultas por lumbalgia en 2017”. IMSS.gob.mx. <http://www.imss.gob.mx/prensa/archivo/201810/246> (acceso: ag. 9, 2020).
- [5] Notimex, “A México le faltan enfermeras”, *Notimex: economía*, may. 10, 2012. [En línea]. Disponible en: <https://expansion.mx/economia/2012/05/10/mexico-con-deficit-en-enfermeria>. [Acceso: ag. 25, 2020].
- [6] O. Ovayolu, N. Ovayolu, M. Genc y N. Col-Araz, “Frequency and severity of low back pain in nurs-

- es working in intensive care units and influential factors”, *Pak J Med Sci*, vol. 30, no. 1, pp. 70-76, 2014, doi: 10.12669/pjms.301.3455.
- [7] F. Vargas, “Indicaciones de las ortesis en atención primaria”, *FMC Form. Médica Contin. en Atención Primaria*, vol. 24, no. 8, pp. 465-478, oct. 2017, doi: 10.1016/j.fmc.2017.02.010.
- [8] D. Greenbaum, “Ethical, legal and social concerns relating to exoskeletons”, *ACM SIGCAS Computers and Society*, vol. 45, no. 3, pp. 234-239, 2015.
- [9] CIDICS. “El 30% de las personas que padecen lumbalgia en México requieren incapacidad”. CIDICS.UANL.mx. <http://cidics.uanl.mx/allnotes/> (acceso: nov. 2, 2020).
- [10] A. Covarrubias-Gómez, “Lumbalgia: Un problema de salud publica”, *Rev. Mex. de Anestesiología*, vol. 3, supl. 1, pp. S106-S109, 2010.
- [11] M. Soto-Padilla, R. L. Espinosa-Mendoza, J. P. Sandoval-García y F. Gómez-García, “Frecuencia de lumbalgia y su tratamiento en un hospital privado de la Ciudad de México”, *Acta ortop. mex.*, vol. 29, no. 1, pp. 40-45, 2015.
- [12] V. Y. B. Yip, “New low back pain in nurses: work activities, work stress and sedentary lifestyle”, *J Adv Nurs*, vol. 46, no. 4, pp. 430-440, 2004, doi: 10.1111/j.1365-2648.2004.03009.x.
- [13] L. N. Cuesta, “Análisis de los factores de riesgo relacionados con el dolor lumbar en auxiliares de enfermería por actividad laboral”, monografía de especialidad, Universidad Católica de Manizales, Manizales, 2018.
- [14] R. C. Miralles, “Biomecánica de la columna”, *Rev. Soc. Esp. Dolor*, vol. 8, supl. II, pp. 2-8, 2001.
- [15] D. E. Torres, “Valoración funcional mediante la escala de Oswestry en pacientes de 30 a 80 años con diagnóstico de discopatía cervical degenerativa tratados quirúrgicamente con artrodesis cervical anterior con cajas intercorpales, placa cervical en el grupo de columna del servicio de ortopedia y traumatología del Hospital Metropolitano de Quito, en el periodo enero 2011 a septiembre 2016”, tesis de especialidad, Univ. Central de Ecuador, Quito, 2017.
- [16] S. Astorga, S. Gonzalez, G. Rojas y A. Martinez, “Efectividad de la técnica de liberación de la fascia toracolumbar sobre la resistencia muscular del esternocleidomastoideo bilateral y el ángulo de anteposición de cabeza y cuello”, *Rehabilitación*, vol. 53, no. 3, pp. 162-168, 2019, doi: 10.1016/j.rh.2019.04.003.
- [17] G. Joubert, “Common muscular-skeletal injuries among nurses and the orthotic prescription”, *Prof Nurs Today*, vol. 21, no. 4, pp. 17-19, 2017, disponible en: <http://www.pntonline.co.za/index.php/PNT/article/view/909>.
- [18] H. Lu, J. Hu, Y. Cao y J. Qu, “Lumbosacral orthoses for preventing the onset of low back pain among healthy hospital nurses: a randomized controlled trial: SP17”, *Spine Journal Meeting Abstracts*, vol. 99, may. 19, 2017.
- [19] J. L. Hernández, K. G. Gómez y J. A. Castillo, *Antropometría y biomecánica para ingenieros y diseñadores industriales*. México: ErgoTech, 2018.

# Implementación de la metodología Lean Sigma en un proceso de ensamble de engranes y cadenas: Caso de estudio

*Lean Sigma approach methodology applied in a gear & chains assembly process: Study case*

Omar Celis Gracia<sup>1</sup>✉, Juan Alfonso Toscano Moctezuma<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Ciencias Sociales y Administración | Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

## RESUMEN

La metodología orientada a solución de problemas propuesta en este artículo de investigación tiene como objetivo actuar a la velocidad de Lean brindando resultados en al menos cuatro semanas. Las cinco fases de esta metodología son: identificar y medir el problema; encontrar las posibles causas que están generándolo; desarrollar una solución empleando herramientas de Lean o de Seis Sigma; una vez implementada la solución, verificarla con una corrida de comprobación y, finalmente, desarrollar un plan de control para asegurar que el estado alcanzado se mantenga en el mediano y largo plazos. Para comprobar la efectividad de la metodología Lean Sigma, se presenta un caso de aplicación en un proceso que no cumple con los requerimientos de entrega a tiempo. Por medio de herramientas Lean, como rebalanceo de la línea, *takt time* y *just in time*, se logró incrementar el porcentaje de entregas a tiempo de un 66 % a un 100 % y, a su vez, la productividad aumentó de 1.8 a 2.5 piezas/min\*hombre y el *lead time* disminuyó de 26.07 a 17 segundos, equivalente a una mejora del 35 %. El problema fue resuelto en 24 días y la capacidad del proceso fue de un 2.6 a 3.4 sigma.

**PALABRAS CLAVE:** Lean Sigma; solución de problemas; balanceo de líneas; Lean; *takt time*.

## ABSTRACT

The problem-solving-oriented methodology proposed in this research article aims to act at the speed of Lean, providing results in at least four weeks. The five phases of this methodology are: identify and measure the problem; find the possible causes that are generating it; develop a solution using Lean or Six Sigma tools; once the solution has been implemented, verify it with a check run and, finally, develop a control plan to ensure that the state achieved is maintained in the medium and long term. To verify the effectiveness of the Lean Sigma methodology, an application case is presented in a process that does not meet the requirements of delivery on time. Through Lean tools, such as rebalancing of the line, *takt time* and *just in time*, it was possible to increase the percentage of deliveries on time from 66% to 100% and, in turn, productivity increased from 1.8 to 2.5 pieces./min\*man and the lead time decreased from 26.07 to 17 seconds, equivalent to a 35% improvement. The problem was solved in 24 days and the process capability was 2.6 to 3.4 sigma.

**KEYWORDS:** Lean Sigma; problem solution; line balancing; Lean; *takt time*.

### Correspondencia:

**DESTINATARIO:** Omar Celis Gracia

**INSTITUCIÓN:** Universidad Autónoma de Ciudad Juárez,  
Instituto de Ciencias Sociales y Administración

**DIRECCIÓN:** Av. Universidad y Heroico Colegio Militar s/n  
C. P. 32300, Ciudad Juárez, Chihuahua, México

**CORREO ELECTRÓNICO:** al198993@alumnos.uacj.mx

**Fecha de recepción:** 22 de febrero de 2022. **Fecha de aceptación:** 17 de octubre de 2022. **Fecha de publicación:** 28 de octubre de 2022.



## I. INTRODUCCIÓN

### LEAN

La metodología de mejora continua Lean busca reducir y eliminar los ocho desperdicios y a su vez trabajar con base en la demanda a través del *takt time* y el *pull system*, herramientas que permiten reducir las actividades que no agregan valor, obteniendo procesos capaces de adaptarse a los cambios en la demanda [1]. El objetivo de Lean se enfoca primordialmente en identificar, reducir y/o eliminar los desperdicios, los cuales generalmente están clasificados como *Muda*, *Mura* y *Mudi* [2].

Dentro de *Muda* se tienen aquellos que se conocen como los 8 desperdicios: defectos, sobreproceso, inventarios, esperas, movimientos, transportes, sobreproducción y el talento humano. Por otro lado, *Mura* son todos aquellos cambios en la planeación de producción y, por último, *Muri* es considerada como todos los malos diseños de manufactura que principalmente no cumplen con cuestiones ergonómicas, repercutiendo en el desempeño de los trabajadores [3].

La metodología Lean brinda resultados de una forma rápida que se ven reflejados principalmente en la productividad y, a fin de lograrlo, hace uso de diversas herramientas para eliminar desperdicios, en las cuales se encuentran *value stream map*, *takt time*, trabajo estandarizado y el análisis de *lead time* [4].

### SEIS SIGMA

Seis Sigma es una metodología cuyo enfoque de mejoramiento está centrado en la reducción de la variación en los procesos de producción y servicios. El objetivo es lograr como máximo 3.4 defectos o errores por cada millón de oportunidades. Los resultados son a largo plazo, visualizados a través de ahorros anualizados [5].

Esta estrategia de trabajo se caracteriza por seguir una metodología bien estructurada, tal y como se muestra en la Figura 1, realizando un análisis profundo y a detalle y con el fin de tomar decisiones, donde por último se establece un plan de control concreto para asegurar el control de calidad del proceso [6].

Esta metodología de mejoramiento continuo utiliza el enfoque de Lean, en conjunto con el de Seis Sigma, buscando un propósito en común: mejorar la calidad a

través de la reducción de la variación y eliminación de los desperdicios [7].

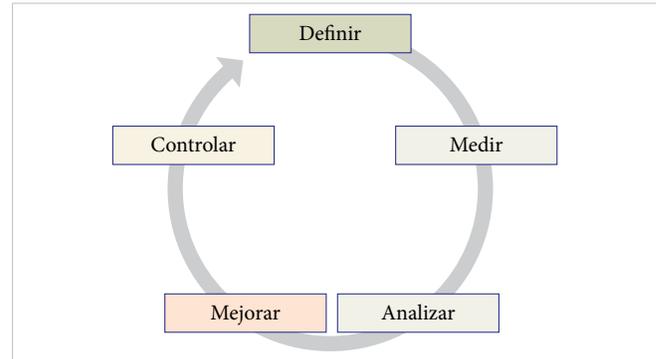


Figura 1. Metodología DMAIC. Adaptada de [6].

### LEAN SEIS SIGMA

Lean Seis Sigma utiliza el ciclo DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar), en el que se hace uso de herramientas de Lean tales como manufactura celular, Just in Time (JIT), Kanban y Heijunka, entre otros, como mecanismos de mejora reducir desperdicios y, en consecuencia, mejorar la calidad de los procesos [8], [9].

### LEAN-SIGMA

La metodología Lean-Sigma comprende principios básicos de la solución de problemas a corto plazo en lugar de ahorros anualizados para la compañía y se enfoca en el principio de Lean “Just Do It”, el cual implica reaccionar de inmediato ante cualquier obstáculo en el flujo continuo de la producción. Esta metodología tiene como propósito solucionar problemas en el menor tiempo posible, combinando las herramientas de manufactura esbelta y el análisis estadístico de Seis Sigma. Lean-Sigma es una metodología orientada al corto plazo en la solución de problemas, a diferencia de Lean y Seis Sigma cuyo enfoque es a mediano y largo plazo orientadas a proyectos de ahorros [10], [11].

Además de ofrecer resultados en el corto plazo, Lean-Sigma ha sido utilizada en diferentes procesos, desde el de *rump up* hasta el de fin de vida de producto, y también permite mantener y mejorar la calidad y productividad de los procesos de producción durante las diversas etapas del producto [12].

Las empresas en la actualidad requieren soluciones rápidas y efectivas. Por medio de la metodología Lean-Sigma se puede lograr incrementar el nivel sigma del

proceso desde 1.1 hasta un valor de 5.5 sigmas en un periodo de tres días [12], [13].

La metodología de Lean-Sigma consta de cinco pasos, como se aprecia en la Figura 2.



Figura 2. Metodología Lean-Sigma adaptada de [10].

### CASO DE ESTUDIO

Esta aplicación se llevó a cabo en una línea en donde se producen engranes y cadenas, en una empresa ubicada en Ciudad Juárez, Chihuahua, México, del 4 de octubre al 17 de diciembre de 2021. Antes de la presente investigación, se estuvieron presentando cambios en la demanda. Al principio, se hacían embarques semanales y luego el cliente pidió tres diarios, lo cual originó problemas de cumplimiento en tiempo y forma. Además, otra dificultad fue que se agregaron tres nuevos modelos, teniendo un total de cuatro. La planta cuenta con cuatro estaciones de trabajo, un área de inspección, dos materialistas y un área de embarque.

### DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La cantidad de partes entregadas al cliente ha sido insuficiente, resultando en entregas con retardo y paros continuos en las líneas de producción. En los últimos cuatro meses de 2021, la meta de 90 % de entregas a tiempo (On-Time Delivery [OTD]) no se ha cumplido. Adicionalmente, una tendencia en el métrico OTD se ha observado desde el 94 % en agosto hasta llegar al 66 % en diciembre. Antes de la presente investigación, no se cumplía con los tres embarques diarios requeridos por el cliente, lo que originaba un alto número de quejas.

## II. METODOLOGÍA

La metodología propuesta (Lean-Sigma, adaptada de [10]) consta de cinco fases que se enlistan a continuación y para cada una se mencionan las herramientas utilizadas.

1. Identificar y medir el problema. Herramientas: prueba *one-sample t*, productividad, nivel Sigma, *lead time*.

2. Análisis y causa raíz. Herramientas: lluvia de ideas, técnica de los 5 porqués.
3. Desarrollar una solución. Herramientas: balanceo de líneas, *takt time*, JIT.
4. Verificar la solución. Herramienta: corrida de comprobación.
5. Plan de control. Herramienta: estandarización.

## III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### IDENTIFICAR Y MEDIR EL PROBLEMA

Como parte del primer paso de la metodología, se llevó a cabo un muestreo del proceso al inicio de la presente investigación (los datos se registran en la Tabla 1).

A través de los datos obtenidos en este paso, se obtuvo lo siguiente:

- Con 130 piezas defectuosas de un total de producción de 1130, usando la Ecuación (1) se obtuvo  $DPPM = 115\,044$ . Mediante tablas, se identificó un nivel sigma inicial de 2.6 [14].

$$DPPM = \frac{\text{total defectos}}{\text{total producidas}} * 10^6 \quad (1)$$

donde  $DPPM$  es piezas defectuosas por millón (del inglés Defect Parts Per Million).

- La productividad en promedio fue de 1.8 piezas/min\* hombre.
- El *lead time* promedio fue de 26.07 segundos.
- La eficiencia del cumplimiento de embarques fue de 2 de 3.
- La producción promedio por turno fue de 38 piezas.

Este primer paso permite ver qué tan grande ha sido el problema, puesto que solo el 66 % de los embarques llegaba a tiempo al cliente y además el nivel sigma del proceso estaba muy bajo. Al finalizar la aplicación de la metodología Lean Sigma, se espera una disminución considerable en cuanto al *lead time* y un aumento en la productividad, el nivel sigma y el cumplimiento de embarques.

### ANÁLISIS Y CAUSA RAÍZ

Una vez analizada la información, como segundo paso se llevó a cabo una sesión de lluvia de ideas con el objetivo de determinar cuáles causas potenciales están originando el incumplimiento en las entregas a tiempo. Con la finalidad de hacer más efectiva la reunión,

TABLA 1  
DATOS EN CONDICIONES INICIALES. SEMANA 1, DE UN TOTAL DE 5 SEMANAS

TURNOS	EMBARQUE	PRODUCCIÓN POR EMBARQUE	PRODUCCIÓN	LEAD TIME	PRODUCTIVIDAD	NIVEL SIGMA	CUMPLIMIENTO
1	1	25	38	29.98	1.88	2.90	66 %
	2	10			2.40	2.30	
	3	3			1.18	6.00	
2	1	12	35	27.21	1.69	2.90	66 %
	2	20			1.89	3.10	
	3	3			1.32	6.00	
3	1	15	36	23.09	1.76	3.00	66 %
	2	21			1.98	2.80	
	3	0			0.00	N/A	
4	1	15	35	26.97	1.66	3.00	66 %
	2	17			1.89	2.70	
	3	3			1.50	1.90	
5	1	19	35	25.09	1.71	2.50	66 %
	2	16			1.92	2.40	
	3	0				N/A	

se involucraron jugadores clave del área de producción: supervisor producción, operadores, ingenieros de manufactura y de calidad. Durante la sesión se consideró una lista considerable de ideas y una vez aplicada la técnica de grupo nominal se acortó la lista y, finalmente, la técnica de 5 porqués permitió determinar los principales factores: un aparente desbalanceo de las cargas de trabajo, desgaste de fixturas y la falta de *poka-yokes* para evitar problemas de calidad. Posteriormente, se realizaron corridas bajo control con las principales causas, con el propósito de ver cuál tiene mayor impacto en la solución. Para este propósito, se utilizó el *lead time* como variable de respuesta y se hizo uso de pruebas estadísticas 2-sample-t, las cuales se muestran a continuación.

TABLA 3  
PRUEBA 2T PARA LEAD TIME INICIAL VS. POKA-YOKES

Two-Sample T-Test and CI: Lead Time Inicial, Lead Time Pokayokes				
Two-sample T for Lead Time Inicial vs Lead Time Pokayokes				
	N	Mean	StDev	SE Mean
Lead Time Inicial	25	26.07	1.89	0.38
Lead Time Pokayokes	25	23.873	0.920	0.18
Difference = $\mu$ (Lead Time Inicial) - $\mu$ (Lead Time Pokayokes)				
Estimate for difference: 2.201				
95% lower bound for difference: 1.490				
T-Test of difference = 0 (vs >): T-Value = 5.24				
P-Value = 0.000 DF = 34				

TABLA 2  
PRUEBA 2T PARA LEAD TIME INICIAL VS. BALANCEO

Two-Sample T-Test and CI: Lead Time Inicial, Lead Time Balanceo				
Two-sample T for Lead Time Inicial vs Lead Time Balanceo				
	N	Mean	StDev	SE Mean
Lead Time Inicial	25	26.07	1.89	0.38
Lead Time Balanceo	25	20.73	1.02	0.20
Difference = $\mu$ (Lead Time Inicial) - $\mu$ (Lead Time Balanceo)				
Estimate for difference: 5.342				
95% lower bound for difference: 4.616				
T-Test of difference = 0 (vs >): T-Value = 12.43				
P-Value = 0.000 DF = 36				

TABLA 4  
PRUEBA 2T PARA LEAD TIME INICIAL VS. FIXTURAS

Two-Sample T-Test and CI: Lead Time Inicial, Lead Time Fixturas				
Two-sample T for Lead Time Inicial vs Lead Time Fixturas				
	N	Mean	StDev	SE Mean
Lead Time Inicial	25	26.07	1.89	0.38
Lead Time Fixturas	25	25.64	1.39	0.28
Difference = $\mu$ (Lead Time Inicial) - $\mu$ (Lead Time Fixturas)				
Estimate for difference: 0.433				
95% lower bound for difference: -0.355				
T-Test of difference = 0 (vs >): T-Value = 0.92				
P-Value = 0.180 DF = 44				

Como se puede apreciar en la **Tabla 2**, la causa con un balanceo diferente proporciona el mayor efecto, brindando una diferencia de 5.34 segundos en el *lead time*, el cual permite como consecuencia cumplir con el programa de producción. Las otras dos causas se descartan debido a que los efectos que brindan están muy por debajo de lo que ofrece el balanceo de la operación.

Con base en la información obtenida en el paso anterior se llevó a cabo, como parte de la solución, un rebalanceo de la línea de producción.

### BALANCEO DE LÍNEAS

Como primer paso en búsqueda de la solución se realizó un estudio de tiempo debido a que la causa raíz tiene que ver con el desbalance que se presentó en las estaciones de la línea de producción. Inicialmente se tenían cuatro estaciones. En la **Tabla 2** se muestran los tiempos de cada una de las estaciones. En total se tomaron 30 mediciones de tiempo en cada una de las estaciones. Con el propósito de asegurar que la diferencia entre los datos observados y esperados sea mínima, se procedió a realizar una prueba de normalidad con un nivel de significancia del 5 %. Se probó la hipótesis nula, la cual afirma que los datos son normales, contra la hipótesis alterna, que establece que no son normales. De acuerdo con la **Figura 3**, se obtuvo un valor p de 0.203, el cual es mayor al nivel de significancia, por lo tanto, no se rechaza la hipótesis nula y se concluye que los datos son normales.

Tabla 5 ESTUDIO DE TIEMPOS (CON 15 DE 30 DATOS)

LECTURA	ESTACIÓN				SUMA
	10	20	30	40	
1	8.02	7.43	5.60	3.77	24.82
2	6.50	6.18	4.54	5.20	22.42
3	6.60	8.85	4.49	4.10	24.05
4	6.81	8.86	4.93	4.58	25.17
5	6.33	7.79	4.70	3.57	22.39
6	8.03	6.68	4.50	4.14	23.35
7	8.14	7.14	4.82	4.16	24.26
8	6.62	7.25	4.85	4.66	23.38
9	7.92	6.74	4.19	4.01	22.85
10	6.92	7.34	4.33	4.67	23.26
11	6.97	8.37	4.92	3.73	23.99
12	7.15	9.57	4.71	4.64	26.07
13	7.57	9.64	5.55	4.16	26.92
14	9.42	7.64	5.62	4.70	27.38
15	9.54	7.67	4.87	4.96	27.04
Promedio	7.50	7.81	4.84	4.34	24.49

Con base en los tiempos obtenidos, se puede apreciar que las estaciones 10 y 20 están por arriba de 7 segundos y las 30 y 40 por debajo de los 5 segundos.

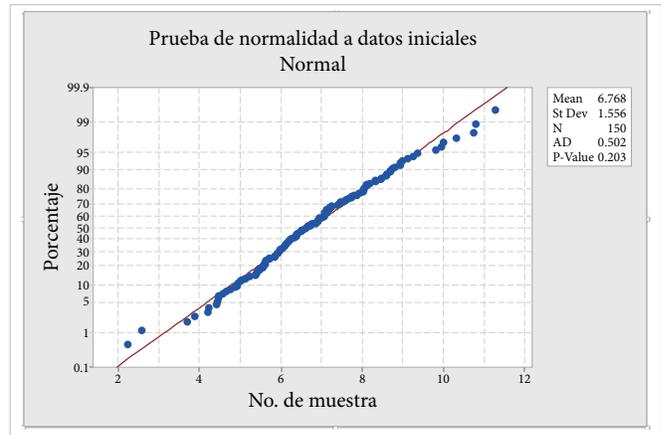


Figura 3. Prueba de normalidad para validar datos de primer muestreo.

Con la Ecuación (2) se calculó el *takt time*, el cual dio un valor de 6 segundos. En la **Figura 4** se muestran los tiempos por estación (barras) y el *takt time* (línea roja), donde se puede apreciar que los tiempos de la estación 10 y 20 están muy por encima del *takt time*, lo que contribuye al incumplimiento de los embarques. Por tanto, es necesario descomponer las estaciones y realizar un rebalanceo para que las operaciones queden por debajo del *takt time* y con la misma carga de trabajo.

$$takt\ time = \frac{tiempo\ disponible}{demanda} \quad (2)$$

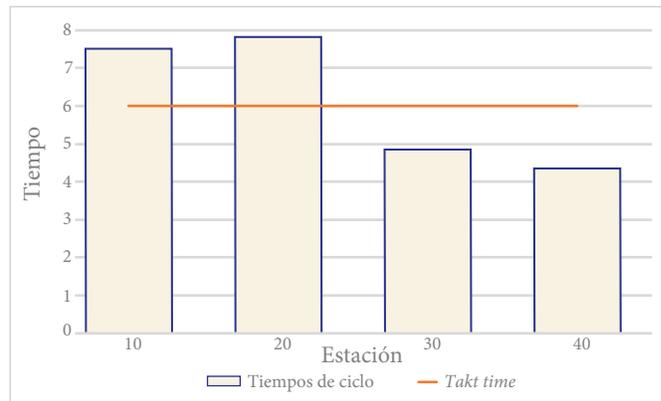


Figura 4. Tiempos de ciclo por estación vs. *takt time*.

A continuación, se calculó el número de estaciones y de operadores que necesita la estación con las Ecuaciones (3) y (4), respectivamente.

$$\text{núm. de estaciones} = \frac{\text{tiempo estándar} * \text{demanda}}{\text{tiempo disponible}} \quad (3)$$

$$\text{núm. de operadores} = \frac{\text{tiempo estándar}}{\text{takt time}} \quad (4)$$

TABLA 6

OBTENCIÓN DE NÚMERO DE OPERADORES Y DE ESTACIONES

	TIEMPO	UNIDADES
Tiempo básico	30.17	Segundos
Tiempo estándar	34.69	Segundos
Tiempo disponible	300	Segundos
Takt time	6	s/piezas
Núm. de estaciones	5.78	Cantidad
Núm. de operadores	5.78	Cantidad

Con base en los cálculos previos, se observó que son necesarios seis operadores y seis estaciones, sin embargo, el agregar trabajadores y estaciones no es una solución factible y se procedió a analizar los tiempos de cada estación por componente para balancear los tiempos.

En la *Tabla 4* se presentan las estaciones con la cantidad de componentes que se ensamblan en cada una. Se puede apreciar que la estación 10 y 20 ensamblan 5 componentes, mientras que la estación 30 y 40 ensambla únicamente 2, por lo que se requiere distribuir los componentes entre estaciones para tener flujo continuo.

TABLA 7

OBTENCIÓN DE NÚMERO DE OPERADORES Y DE ESTACIONES

CÓDIGO DEL COMPONENTE*	ESTACIÓN									
	10	20	30				40			
			A	B	C	D	A	B	C	D
CB8*	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0
CB4	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
CB2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
CR1	0	0	0	0	0	0	1	0	2	2
CR2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
CA1	0	0	1	0	2	2	0	0	0	0
CA2	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
Total	5	5	2				2			

\*En las tablas de la 7 a la 15, son códigos de la empresa que identifican a cada componente para armas las cadenas.

En las Tablas 5-8 se muestra un análisis de las operaciones por estación con su respectivo tiempo, lo cual permite ver cuáles son los componentes con los mayores tiempos de ensamble.

TABLA 8

DESGLASE DE LA ESTACIÓN 10 POR COMPONENTE

NÚM.	OPERACIÓN	TIEMPO
1	Ensamblar CB4 en CB8	1.66
2	Ensamblar CB2 en CB8	2.03
3	Ensamblar CB8 en CB2 y CB4	1.75
4	Ensamblar CB8 en CB4 (superior)	2.07
Tiempo promedio		7.51

TABLA 9

DESGLASE DE LA ESTACIÓN 20 POR COMPONENTE

NÚM.	OPERACIÓN	TIEMPO
1	Ensamblar CB4 en CB8	2.01
2	Ensamblar CB2 en CB8	1.93
3	Ensamblar CB8 en CB2 y CB4	1.83
4	Ensamblar CB8 en CB4 (inferior)	2.01
Tiempo promedio		7.78

TABLA 10

DESGLASE DE LA ESTACIÓN 30 POR COMPONENTE

MODELO	NÚM.	OPERACIÓN	TIEMPO	TIEMPO TOTAL
A	1	Unir Sub1 con Sub2	1.82	2.81
	2	Ensamblar Ca2	0.99	
B	1	Unir Sub1 con Sub2	1.82	3.55
	3	Ensamblar Ca1	1.73	
C	1	Unir Sub1 con Sub2	1.82	4.67
	2	Ensamblar Cr1	1.12	
	3	Ensamblar Ca1	1.73	
D	1	Unir Sub1 con Sub2	1.82	5.66
	2	Ensamblar Ca2	0.99	
	3	Ensamblar Cr1	1.12	
	4	Ensamblar Ca1	1.73	
Tiempo promedio				4.17

TABLA 11

DESGLASE DE LA ESTACIÓN 40 POR COMPONENTE

MODELO	NÚM.	OPERACIÓN	TIEMPO	TIEMPO TOTAL
A	1	Unir Sub1 con Sub2	0.99	0.99
B	1	Unir Sub1 con Sub2	1.12	1.12
C	1	Unir Sub1 con Sub2	1.12	2.85
	2	Ensamblar Cr1	1.73	
D	1	Unir Sub1 con Sub2	0.99	3.84
	2	Ensamblar Ca2	1.12	
	3	Ensamblar Cr1	1.73	
Tiempo promedio				3.76

Con base en el análisis de operaciones por estación, se decidió trabajar con cuatro estaciones y cuatro opera-

dores, realizando únicamente cambios en las operaciones por estación para balancear los tiempos. Se quitó una operación a cada una de las estaciones 10 y 20 y se reasignaron a las estaciones 30 y 40, obteniendo los siguientes resultados mostrados en las Tablas 9-12.

TABLA 12

DESGLASE DE LA ESTACIÓN 10 POR COMPONENTE BALANCEADO

NÚM.	OPERACIÓN	TIEMPO
1	Ensamblar CB4 en CB8	1.66
2	Ensamblar CB2 en CB8	2.03
3	Ensamblar CB8 en CB2 y CB4	1.75
Tiempo promedio		5.44

TABLA 13

DESGLASE DE LA ESTACIÓN 20 POR COMPONENTE BALANCEADO

NÚM.	OPERACIÓN	TIEMPO
1	Ensamblar CB4 en CB8	2.01
2	Ensamblar CB2 en CB8	1.93
3	Ensamblar CB8 en CB2 y CB4	1.83
Tiempo promedio		5.77

TABLA 14

DESGLASE DE LA ESTACIÓN 30 POR COMPONENTE BALANCEADO

MODELO	NÚM.	OPERACIÓN	TIEMPO	TIEMPO TOTAL
A	1	Unir Sub1 y Sub2 con CB8	2.99	3.98
	2	Ensamblar Ca2	0.99	
B	1	Unir Sub1 y Sub2 con CB8	2.99	4.72
	3	Ensamblar Ca1	1.73	
C	1	Unir Sub1 y Sub2 con CB8	2.99	5.84
	2	Ensamblar Cr1	1.12	
	3	Ensamblar Ca1	1.73	
D	1	Unir Sub1 y Sub2 con CB8	2.99	6.83
	2	Ensamblar Ca2	0.99	
	3	Ensamblar Cr1	1.12	
	4	Ensamblar Ca1	1.73	
Tiempo promedio				5.34

TABLA 15

DESGLASE DE LA ESTACIÓN 40 POR COMPONENTE BALANCEADO

MODELO	NÚM.	OPERACIÓN	TIEMPO	TIEMPO TOTAL
A	1	Unir Sub1 y Sub2 con CB8	2.99	3.98
	2	Ensamblar Ca2	0.99	
B	1	Unir Sub1 y Sub2 con CB8	2.99	4.72
	3	Ensamblar Ca1	1.73	
C	1	Unir Sub1 y Sub2 con CB8	2.99	5.84
	2	Ensamblar Cr1	1.12	
	3	Ensamblar Ca1	1.73	

TABLA 15 (CONT.)

DESGLASE DE LA ESTACIÓN 40 POR COMPONENTE BALANCEADO

MODELO	NÚM.	OPERACIÓN	TIEMPO	TIEMPO TOTAL
D	1	Unir Sub1 y Sub2 con CB8	2.99	6.83
	2	Ensamblar Ca2	0.99	
	3	Ensamblar Cr1	1.12	
	4	Ensamblar Ca1	1.73	
Tiempo promedio				5.34

Con la información obtenida, se llevó a cabo un análisis de las operaciones y se decidió trabajar con cuatro estaciones y cuatro operadores. Además, se hicieron los cambios siguientes en la producción:

1. La producción deja de ser en lotes. Ahora se produce conforme la siguiente estación lo demande (*pull system*).
1. La estación anterior únicamente produce una vez que la estación sucesora así se lo demande.
2. Solamente se produce la cantidad requerida por día. Está prohibido producir de más.

El reacomodo de las estaciones y el flujo de producción quedó como se muestra en la Figura 5.

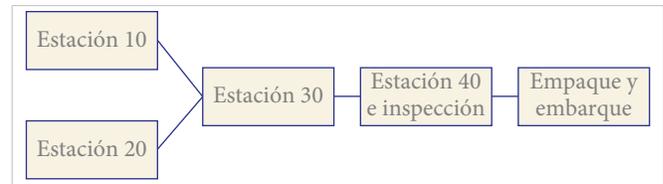


Figura 5. Nueva distribución de estaciones con base en el balanceo de líneas.

En la Figura 6 se muestran graficados los tiempos de cada una de las cuatro estaciones y el *takt time*, donde se tiene que ellas están por debajo del *takt time*, además de que los tiempos son muy similares en cada una de las estaciones.

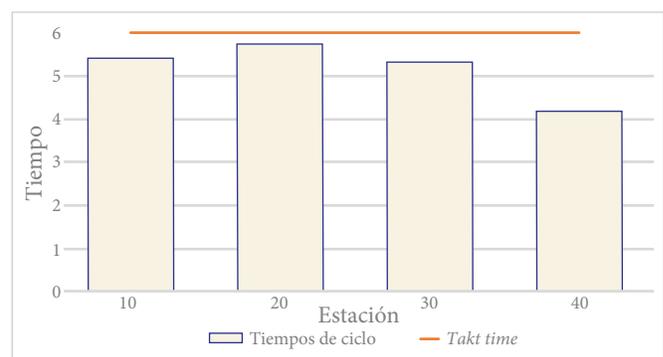


Figura 6. Tiempos de ciclo por estación balanceados vs. *takt time*.

VERIFICAR LA SOLUCIÓN

Para verificar que la solución propuesta resuelve el problema, se procedió a recolectar datos durante 5 se-

manas, en las que se evaluaron las variables analizadas en este caso de estudio: *lead time*, *productividad*, *nivel Sigma* y *eficiencia de cumplimiento*. En la [Tabla 16](#) se muestran los datos de la semana 1.

TABLA 16  
CORRIDA DE COMPROBACIÓN PARA VERIFICAR LA SOLUCIÓN (SEMANA 1)

TURNOS	EMBARQUE	PRODUCCIÓN POR EMBARQUE	PRODUCCIÓN	LEAD TIME	PRODUCTIVIDAD	NIVEL SIGMA	EFICIENCIA DE CUMPLIMIENTO
1	1	25	50	19.49	2.49	3.30	100 %
	2	10			2.70	6.00	
	3	15			2.40	3.00	
2	1	12	50	12.71	2.27	2.90	100 %
	2	20			2.66	3.10	
	3	18			2.50	6.00	
3	1	15	50	11.52	2.33	3.00	100 %
	2	21			2.55	6.00	
	3	14			2.63	6.00	
4	1	15	50	17.42	2.31	3.00	100 %
	2	17			2.63	6.00	
	3	18			2.56	6.00	
5	1	19	50	12.30	2.60	6.00	100 %
	2	16			2.57	6.00	
	3	15			2.32	6.00	

Con base en la corrida de comprobación, se obtuvo que los tres embarques diarios se cumplen, así como un incremento en productividad y una disminución significativa en el *lead time*, por lo que se concluye que la solución propuesta resuelve el problema.

A continuación, se presentan los resultados de las pruebas 2T para la productividad y el *lead time* que permiten analizar estadísticamente, comparando el antes contra el después. En las [Tablas 14](#) y [15](#) se puede apreciar que para ambas pruebas se rechaza la hipótesis nula en favor de la alternativa, por lo que se puede concluir que el *lead time* es menor con la metodología propuesta. Por otra parte, la productividad es mayor al aplicar Lean Sigma.

PLAN DE CONTROL

Como último paso de la metodología, se llevó a cabo una reunión con el equipo para explicar los cambios en cada una de las estaciones.

El proceso se estandarizó y se actualizaron las ayudas visuales y las instrucciones de trabajo, actividades en las cuales participó y cooperó personal del área de producción.

TABLA 17  
PRUEBA 2T PARA LEAD TIME ANTES VS. DESPUÉS

Two-Sample T-Test and CI: Lead time Antes, Lead time Después				
Two-sample T for Lead time Antes vs Lead time Después				
	N	Mean	StDev	SE Mean
Lead time Antes	25	26.07	1.89	0.38
Lead time Después	25	17.09	3.24	0.65
Difference = $\mu$ (Lead time Antes) - $\mu$ (Lead time Después)				
Estimate for difference: 8.982				
95% lower bound for difference: 7.722				
T-Test of difference = 0 (vs >): T-Value = 11.96				
P-Value = 0.000 DF = 48				
Both use Pooled StDev = 2.6547				

TABLA 18  
PRUEBA 2T PARA PRODUCTIVIDAD ANTES VS. DESPUÉS

Two-Sample T-Test and CI: Productividad Antes, Productividad Después				
Two-sample T for Productividad Antes vs Productividad Después				
	N	Mean	StDev	SE Mean
Productividad Antes	75	1.868	0.765	0.088
Productividad Después	75	2.503	0.185	0.021
Difference = $\mu$ (Productividad Antes) - $\mu$ (Productividad Después)				
Estimate for difference: -0.6353				
95% upper bound for difference: -0.4849				
T-Test of difference = 0 (vs <): T-Value = -6.99				
P-Value = 0.000 DF = 148				
Both use Pooled StDev = 0.5567				

## IV. CONCLUSIONES

Con la información obtenida en el primer paso de la metodología, se observa que el proceso tenía un bajo desempeño, equivalente a un nivel sigma de 2.6, y en cuanto a la productividad, se tenía inicialmente 9.54 piezas/turno\*hombre y un *lead time* alto de 26.07 segundos.

Al aplicar la metodología Lean Sigma orientada a la solución de problemas, además de resolver el problema de incumplimiento de embarques requeridos por el cliente, se obtuvieron las siguientes mejoras en el desempeño del proceso:

- Reducción en las piezas defectuosas: 33 de 1250. Con la Ecuación (1) se obtuvo  $DPPM = 26\ 400$ . Mediante tablas, se identificó un nivel sigma de 3.4, lo que implica una mejora de 2.6 a 3.4 sigma (incremento del 30 %).
- Incremento en la productividad de 1.8 a 2.5 piezas/min\*hombre (28 %).
- Disminución en el *lead time* de 26.07 a 17 segundos (35 %).
- Solución del problema en 24 días (3.5 semanas).

## REFERENCIAS

- [1] C. Perera y D. M. A. Kulasoorya, "Lean manufacturing: A case study of a Sri Lankan manufacturing organization", *SAJM*, vol. 18, no. 1, pp. 149-158, 2011.
- [2] M. M. Ravikumar, K. Marimuthu y D. Chandramohan, "Implementation of lean manufacturing in automotive manufacturing plant [TEL]", *Int. J. Appl. Eng. Res.*, vol. 4, no. 10, pp. 2041-2050, 2009.
- [3] R. Shaha y P. T. Ward, "Lean manufacturing: context, practice bundles, and performance", *J. Oper. Manag.*, vol. 21, no. 2, pp. 129-149, 2003, doi: [10.1016/S0272-6963\(02\)00108-0](https://doi.org/10.1016/S0272-6963(02)00108-0).
- [4] J. G. Arrieta, V. E. Botero, y M. J. Romano, "Benchmarking sobre manufactura esbelta (lean manufacturing) en el sector de la confección en la ciudad de Medellín, Colombia", *J. Econ. Finance Adm. Sci.*, vol. 15, no. 28, pp. 141-171, 2010.
- [5] C. Hardeman y P. Goethals, "A case study: applying Lean Six Sigma concepts to design a more efficient airfoil extrusion shimming process", *Int. J. Six Sigma Competitive Advant.*, vol. 6, no. 3, pp. 174-150, 2011, doi: [10.1504/IJSSCA.2011.039717](https://doi.org/10.1504/IJSSCA.2011.039717).
- [6] E. Drohomerecki, S. E., Gouvea da Costa, E. Pinheiro de Lima y P. A. da Rosa Garbui, "Lean, Six Sigma and Lean Six Sigma: an analysis based on operations strategy", *Int. J. Prod. Res.*, vol. 52, no. 3, pp. 804-824, 2014, doi: [10.1080/00207543.2013.842015](https://doi.org/10.1080/00207543.2013.842015).
- [7] K. L. Lee y C. C. Wei, "Reducing mold changing time by implementing lean six sigma", *Qual. Reliab. Eng. Int.*, vol. 26, no. 4, pp. 387-395, 2010, doi: [10.1002/qre.1069](https://doi.org/10.1002/qre.1069).
- [8] J. E. Brady y T. T. Allen, "Six Sigma Literature: A Review and Agenda for Future Research", *Qual. Reliab. Eng. Int.*, vol. 22, no. 3, pp. 335-367, 2006, doi: [10.1002/qre.769](https://doi.org/10.1002/qre.769).
- [9] I. Abdullah, Ghani J. A., M. N. Ab Rahman, B. M. Deros y C. H. Che Haron, "Application of Lean Six Sigma Tools for Cycle Time Reduction in Manufacturing: Case Study in Biopharmaceutical Industry", *Arab J Sci Eng*, vol. 39, no. 2, 1449-1463, 2014, doi: [10.1007/s13369-013-0678-y](https://doi.org/10.1007/s13369-013-0678-y).
- [10] F. J. Estrada-Orantes y N. G. Alba-Baena, "Creating the Lean-Sigma Synergy", en *Lean Manufacturing in the Developing World*, J. L. García-Alcaraz, A. A. Maldonado-Macías y G. Cortes-Robles, eds. México: Springer, 2014, pp. 117-134, doi: [10.1007/978-3-319-04951-9\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-319-04951-9_6).
- [11] N. Alba-Baena, F. J. Estrada y O. O. S. Torres, "Using lean-sigma for the integration of two products during a ramp-up event", en *Sustainable Business: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications*, M. Khosrow-Pour, ed. Estados Unidos: IGI Global, 2020, cap. 43, pp. 954-976.
- [12] F. J. Estrada-Orantes, A. H. García-Pérez y N. G. Alba-Baena, "The E-Strategy for Lean-Sigma Solutions, Latin American Case Study in a New Product Validation Process", en *Best Practices in Manufacturing Processes*, J. L. García, L. Rivera, R. G. González-Ramírez, G. Lealy M. G. Chong, eds. Springer, 2018, pp. 297-322, doi: [10.1007/978-3-319-99190-0\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-319-99190-0_14).
- [13] N. G. Alba-Baena y A. Salcido-Delgado, "Adaptability of the Lean-Sigma Methodology for Operations in a Multicultural Workplace", en *Trends in Industrial*

*Engineering Applications to Manufacturing Process*, J. L. García-Alcaraz, A. Realyvázquez-Vargas y E. Z-Flores, eds. Springer, 2021, pp. 365-387.

<sup>[14]</sup> T. McCarty, L. Daniels, M. Bremer y P. Gupta, *The Six Sigma Black Belt Handbook (Six SIGMA Operational Methods)*. Nueva York: McGraw-Hill Education, 2005.

# Satisfacción laboral de personas con discapacidad motriz por la tendencia postural

## *Job satisfaction of people with motor disabilities due to postural tendency*

Adolfo Velázquez Macías<sup>1</sup>✉, Luis Fernando Maldonado Azpeitia<sup>1</sup>, Jorge Arturo García Pitol<sup>1</sup>, Juvenal Rodríguez Reséndiz<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ), Facultad de Ingeniería

### RESUMEN

El presente documento representa un extracto de una investigación acerca de la perspectiva de la satisfacción laboral de las personas con discapacidad motriz que laboran en una jornada continua en México, con relación a su tendencia postural. Para ello, se llevó a cabo un estudio descriptivo de corte transversal en el que se administró el instrumento denominado Cuestionario de Satisfacción por Factores Ergonómicos para Trabajo en Postura Sedente que, por la pandemia COVID-19, se aplicó a un grupo de 15 personas que comparten características laborales similares a trabajadores con discapacidad motriz, con el objetivo de obtener información acerca de la disciplina postural y condiciones de salud laboral. Los resultados de este instrumento mostraron la satisfacción moderada de los participantes, pues consideran que la carga postural y de trabajo generan fatiga. Asimismo, expresaron su disposición por integrar estrategias de rehabilitación postural que puedan servir para la construcción de un dispositivo que obtenga y comunique la medición del tronco del usuario cuando pierda su simetría y ortogonalidad en una interfaz gráfica. El estudio concluye con la configuración de un panorama de la realidad laboral de las personas con discapacidad motriz que permite comprender el comportamiento postural y la temporalidad que estos perpetúan en la rectitud de su postura.

**PALABRAS CLAVE:** satisfacción laboral; fatiga laboral; higiene postural; ergonomía laboral; personas con discapacidad motriz.

### ABSTRACT

This document represents an extract from an investigation about the perspective of job satisfaction of people with motor disabilities who work a continuous day in Mexico, in relation to their postural tendency. For this, a descriptive cross-sectional study was carried out in which the instrument called Satisfaction Questionnaire for Ergonomic Factors for Work in a Seated Posture was administered, which, due to the COVID-19 pandemic, was applied to a group of 15 people who share similar labor characteristics to workers with motor disabilities, with the aim of obtaining information about postural discipline and occupational health conditions. The results of this instrument showed the moderate satisfaction of the participants, since they consider that the postural and work load generate fatigue. Likewise, they expressed their willingness to integrate postural rehabilitation strategies that can be used to build a device that obtains and communicates the measurement of the user's trunk when it loses its symmetry and orthogonality in a graphic interface. The study concludes with the configuration of a panorama of the labor reality of people with motor disabilities that allows us to understand the postural behavior and the temporality that they perpetuate in the straightness of their posture.

**KEYWORDS:** job satisfaction; work fatigue; postural hygiene; work ergonomics; people with motor disabilities.

#### Correspondencia:

**DESTINATARIO:** Adolfo Velázquez Macías

**INSTITUCIÓN:** Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ingeniería

**DIRECCIÓN:** Cerro de las Campanas s/n, C. P. 76010, Santiago de Querétaro, Querétaro, México

**CORREO ELECTRÓNICO:** avelazquez59@alumnos.uaq.mx

**Fecha de recepción:** 10 de junio de 2022. **Fecha de aceptación:** 29 de septiembre de 2022. **Fecha de publicación:** 7 de noviembre de 2022.



## I. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de una actividad laboral es uno de los factores más importantes para la integración social y la estabilidad económica y emocional del ser humano, pudiéndose decir que si para los individuos es fundamental lograr esta estabilidad, lo es mucho más para las personas con discapacidad (PCD), pues a través de ella es posible alcanzar una vida autónoma óptima [1].

En México, solo el 40 % de las PCD trabaja [2] y el número se reduce para aquellas personas con discapacidad motriz (PCDM), ya que únicamente el 12 % de las personas que conforman este colectivo [3] son económicamente activas que enfrentan obstáculos para competir en el sector productivo [4], [5].

Dicha predisposición deriva principalmente de la falta de criterios en el diseño del entorno laboral y la adecuación del puesto que desempeñan quienes integran este colectivo [1], ya que al no ser ajustados a sus necesidades específicas dan cabida a perturbaciones funcionales (desgaste, agotamiento) que repercuten en insatisfacción con consecuencias probablemente mayores que para otros grupos [6].

Debido a tal impacto, la satisfacción laboral (SL) ha sido estudiada desde el panorama organizacional por parte de diversos expertos en el área, como Hoppock en 1935, Sáenz en 1999 y Tamayo en 2016, entre otros [7], lo que ha resultado en numerosas definiciones en cuanto a este concepto. En un contexto laboral, Peña y Sánchez [8] definen la SL como un conjunto de sentimientos y emociones favorables o no con que los empleados ven su trabajo a través de un estado frecuentemente resultante de condiciones [9] que para las PCDM se asocia a las características del lugar de trabajo y experiencias del puesto.

Jara y Haro [7] enfatizan la importancia del estudio y tratamiento de la SL, dado el impacto que tiene en el bienestar de las personas, en términos de origen y desde el punto de vista conductual y fisiológico. Además, por su carácter perceptual, depende de la peculiaridad del trabajador. Tales percepciones, siendo subjetivas, están conformadas por factores intrínsecos y extrínsecos que Alba et al. [10] y Ponce et al. [11] los relacionan con los factores de higiene y motivacionales, respectivamente, del modelo previamente validado por Herzberg acerca del rendimiento-satisfacción que toma como base

las necesidades de Maslow, como lo indica la Figura 1, donde existe concordancia entre el bienestar laboral evaluado y las condiciones espaciales y de carga de trabajo.

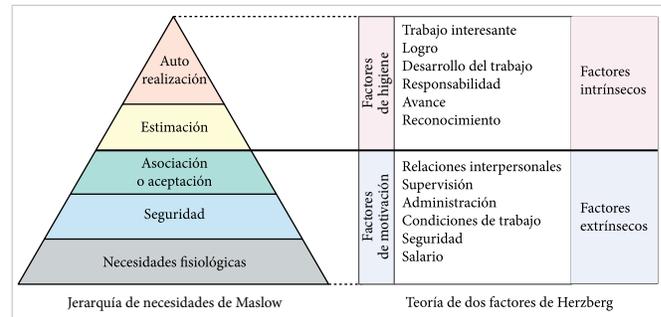


Figura 1. Relación de factores motivacionales y de satisfacción, según el modelo Herzberg-Maslow. Recuperado de [10] y [11].

En México, el Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS) desarrolla la Escala General de Satisfacción Laboral, instrumento adaptado de la Escala de Satisfacción General de Warr et al. de 1979 [12] que hace énfasis en estos factores conductuales y ubica las situaciones más comunes que puede experimentar un trabajador en una jornada estática. La escala se configura de dos secciones sumativas con respuesta de tipo Likert de 7 niveles de calificación: *satisfacción intrínseca*, descrita como aquella que se genera por el contenido de las actividades o la promoción de estas, y *satisfacción extrínseca*, que es todo lo relacionado con el puesto de trabajo, organizándose como se muestra en la Tabla 1.

TABLA 1  
RELACIÓN DE FACTORES SEGÚN LA ESCALA GENERAL DE SATISFACCIÓN LABORAL DEL IMSS

SATISFACCIÓN INTRÍNSECA	SATISFACCIÓN EXTRÍNSECA
Libertad de método de trabajo	Condiciones físicas de trabajo
Reconocimiento	Clima laboral
Responsabilidad	Jefatura
Uso de capacidades	Salario
Promoción	Administración
Atención	Horario de trabajo
Tareas de la jornada	Estabilidad laboral

Algunos autores consideran que la SL, como condición psicológica organizacional perceptible desde aspectos emocionales hasta físicos, está ampliamente relacionada con la fatiga, como Ladino y Rojas [13] que aseguran que una persona que no tiene SL puede tener características de fatiga laboral proveniente de las condiciones de trabajo, evidenciando Olivar et al. [14] que las situa-

ciones del trabajo diario que generan mayor insatisfacción en los trabajadores son las altamente presenciales y burocráticas.

Por otra parte, existe un instrumento que aborda el estudio de la fatiga en relación con el puesto de trabajo denominado Encuesta Nacional de Condiciones de Trabajo, que es una guía de buenas prácticas laborales para la mejora de un lugar de trabajo y se basa en el conocimiento de las condiciones presentes, las cuales son el conjunto de factores de la propia tarea y del entorno en que esta se lleva a cabo y que pueden perjudicar la salud de los trabajadores. La Figura 2 representa tres dimensiones en las que es tratada la fatiga por dicha escala. En este caso, se observa una estrecha relación entre los factores determinantes de la motivación y satisfacción descritos por los modelos anteriores, así como los factores de composición de la fatiga [15].

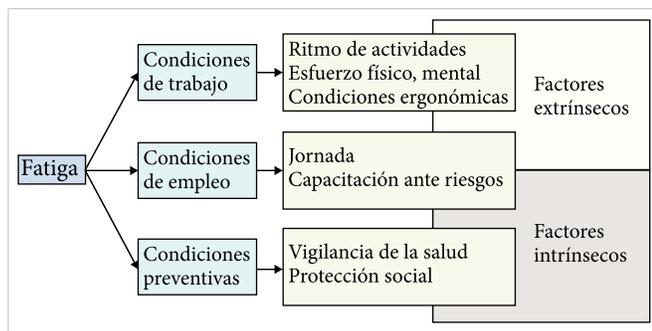


Figura 2. Relación de factores incidentes de la fatiga según el modelo de la encuesta nacional de condiciones de trabajo. Recuperado de [15].

Por otro lado, Tenorio [16], en un estudio con docentes de las unidades educativas de la ciudad de Cuenca, Ecuador, considera importante el análisis comparativo de la fatiga laboral sobre elementos de carácter motriz y postural en la integración del marco COVID-19 y la nueva normalidad laboral, a través del test Yoshitake en su versión 1987, puntualizando que las condiciones ergonómicas de trabajo en confinamiento han modificado radicalmente aspectos relativos a la fatiga en los docentes, tanto a nivel muscular como de órganos superiores, que deriva en una sensación de agobio por el trabajo.

En este sentido, Montoya et al. [17] abordan las condiciones en que se produce la fatiga en conductores de la zona de consolidación del sur del departamento del Tolima, Colombia, haciendo uso del cuestionario Yoshitake y validando la relación entre posturas prolongadas y el

riesgo de fatiga mediante el método Rapid Upper Limb Assessment (RULA), en un resultado multifactorial generado a partir del desarrollo de las actividades de conducción y de las exigencias que demanda el sistema de trabajo, encontrando que los horarios extendidos de trabajo, la sobrecarga postural y el sedentarismo del conductor son factores incidentes en este fenómeno.

Es necesario resaltar que los métodos RULA [18], Rapid Entire Body Assessment (REBA) [19] y Ovako Working Analysis System (OWAS) [20] son modelos posturales indirectos basados en la observación, desarrollados con el objetivo de evaluar la exposición de los trabajadores a factores de riesgo que originan una elevada carga postural y que ocasionan trastornos en los miembros superiores del cuerpo (véanse las Figuras 3, 4 y 5). Por su mínima cantidad de material utilizado y sin interrupción al trabajador, resultan efectivos para un dictamen general de fatiga respecto a la permanencia postural y restricción de movimientos.



Figura 3. Método postural RULA. Posiciones a) del hombro y b) del brazo. Recuperado de [18].

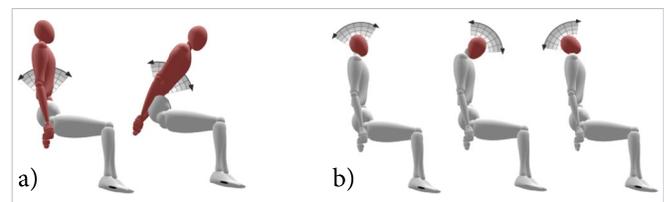


Figura 4. Método postural REBA. Flexiones a) del tronco y b) del cuello. Recuperado de [19].

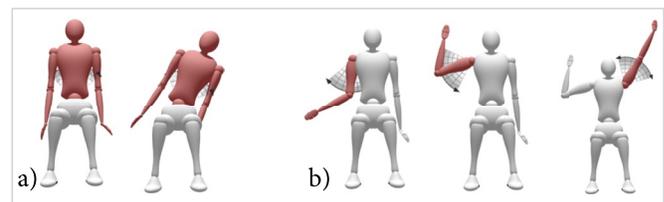


Figura 5. Método postural OWAS. a) Inclinación del tronco. b) Posición de miembros superiores. Recuperado de [20].

La SL ha sido estudiada a través de diversos instrumentos, sin embargo, existe afinidad en las características de los factores de medición, dado que se aplican en si-

milares contextos, y México no es la excepción, por lo que se considera una brecha a la que, a través de este estudio, se intenta aportar al colectivo de las PCDM y a la comunidad científica una evaluación más concreta y específica, puntualizando las particularidades ergonómico laborales de los usuarios.

### VALORACIÓN DE LA SATISFACCIÓN LABORAL

El concepto de SL se ha definido como una serie de sentimientos favorables o no respecto de las condiciones y experiencias de trabajo [9] y que para este estudio se mide a partir de los elementos siguientes: 1) ergonomía, que estudia las relaciones entre el hombre y su puesto de trabajo, optimizando los elementos del sistema humano-máquina-ambiente [21] y es medida a través de los indicadores a) espacio de trabajo, que evalúa el mobiliario y equipo así como la disponibilidad de espacio para este con el que cuenta PCDM; b) condiciones de trabajo, que incurre en el método de trabajo ejecutado por la PCDM en su jornada, y c) satisfacción general, que mide el grado de bienestar del mismo con respecto del espacio y condiciones de trabajo; y 2) fatiga, que se define como un estado de agotamiento físico o emocional que también implica una ausencia de la sensación de logros [22] y se mesura a través de los indicadores de a) control postural, que incide en la relación existente entre la adopción de posturas incómodas del usuario en la interacción con su silla de ruedas, y b) fatiga general, que aborda la percepción de cansancio respecto a la jornada y carga de trabajo.

## II. METODOLOGÍA

El presente estudio se desarrolló bajo un enfoque descriptivo de corte transversal, en el que se observaron las características ergonómicas relacionadas con el espacio de trabajo, la carga postural y las alternativas de descanso que integran en una jornada de 8 horas [23] bajo condiciones posturales restrictivas y repetitivas de los participantes. Además, estas experiencias se documentaron en una etapa de tiempo que busca identificar un panorama de la realidad laboral experimentada por las PCDM.

### TÉCNICAS DE OBTENCIÓN DE INFORMACIÓN

Como técnica para recabar información se aplicó el instrumento denominado Cuestionario de Satisfacción por Factores Ergonómicos para Trabajo en Postura Sedente (CSFE-TPS), adaptado con base en la Escala

General de Satisfacción Laboral del IMSS; el cuestionario Yoshitake; los métodos de control postural RULA, REBA y OWAS, así como la Encuesta de Autovaloración de las Condiciones de Trabajo. Estas herramientas son adecuadas a los contextos nacionales situacionales que conforman la muestra del estudio.

### DESCRIPCIÓN DEL INSTRUMENTO

La **Tabla 2** describe la construcción del instrumento, el cual consta de 20 reactivos ordenados en dos dimensiones: 1) ergonomía, con tres indicadores: espacio de trabajo, condiciones de trabajo y satisfacción general percibida; y 2) fatiga, con un indicador: condiciones físicas, que a su vez se compone por las variables control postural y fatiga laboral.

TABLA 2  
COMPOSICIÓN DEL CUESTIONARIO DE SATISFACCIÓN LABORAL POR FACTORES ERGONÓMICOS PARA EL TRABAJO EN POSTURA SEDENTE

CONSTRUCTO	DIMENSIÓN	INDICADORES
Satisfacción laboral	Ergonomía	Espacio y equipo intrínseco de PCDM
		Condiciones: jornada y carga laboral
		Satisfacción general
	Fatiga	Control postural en silla de ruedas
		Fatiga general

El instrumento midió el grado de satisfacción de un trabajador con o sin discapacidad motriz en postura sedente permanente respecto a la composición ergonómica del puesto de trabajo, así como del estado postural que se mantiene en las actividades laborales.

Para la dimensión de ergonomía, el primer indicador estudia el espacio de trabajo, indagando en la constitución del puesto, los elementos que lo componen, su disposición y acomodo. El segundo indicador analiza las condiciones de trabajo tales como la permanencia del trabajador en el puesto y la secuencia motriz de las actividades de trabajo. El tercer indicador incide en la satisfacción general que percibe el usuario de acuerdo a condicionantes ergonómicas y de carga de trabajo.

Para la dimensión de fatiga, el indicador profundiza en el condicionamiento físico requerido por el puesto,

dividido en dos secciones: control postural, que averigua la situación postural del usuario y cómo se relaciona con las actividades laborales con base en los movimientos y la carga de trabajo, y fatiga general, que examina la manera en la que el trabajador opera ante el agotamiento.

De este instrumento, 14 ítems se evaluaron a través de la escala Likert de 1 a 5, siendo el número uno la relación totalmente en desacuerdo y el número 5 totalmente de acuerdo. Cinco reactivos se respondieron a través de respuestas de opción múltiple y una cuestión fue de respuesta dicotómica.

#### CONFIABILIDAD DEL INSTRUMENTO

La confiabilidad del instrumento se determinó por medio de la prueba estadística de Alfa de Cronbach para establecer el índice de consistencia interna, tomando valores entre 0 y 1. El resultado obtenido arrojó un índice  $\alpha = 0.822680849$ , equivalente a un 82 % de confiabilidad en la recopilación de la información.

#### PARTICIPANTES

Los participantes que colaboraron en la encuesta son 20 sujetos, 7 de ellos mujeres y 13 hombres, de 25 a 45 años de edad, que comparten características laborales similares a las personas con discapacidad motriz que tomaron parte del estudio, realizando actividades mayormente repetitivas en postura sedente durante una jornada diurna de 8 horas frente a una computadora con dos periodos de descanso de 30 minutos, en un espacio laboral compuesto por un escritorio o mesa de trabajo, una silla ajustable y sin alguna interacción activa de descanso.

#### TRABAJO DE CAMPO

El instrumento se administró en el periodo febrero-mayo de 2022 en el estado de Querétaro, solicitando a los participantes los permisos necesarios para realizar el cuestionario y, dado el estado de pandemia por COVID-19, el instrumento se aplicó en una modalidad virtual para comodidad de los participantes, compartida con cada uno de ellos a través de la herramienta web Google Forms, plataforma de llenado de encuestas en línea. Los datos obtenidos fueron capturados y analizados en una hoja de cálculo.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### DIMENSIÓN: ERGONOMÍA

La Figura 6 muestra que el 95 % de los trabajadores participantes cuenta con un área de trabajo individual (B); el 55 % tiene a su alcance el equipo necesario para realizar sus labores (C); el 60 % dispone del espacio necesario para el uso y manejo de una silla (D), sin embargo, solo el 45 % posee un modelo ajustable (E). Además, el 45 % de los usuarios mantiene presencia permanente en su puesto de trabajo (F), el 30 % coexiste bajo repetitividad de movimientos en el desarrollo de sus actividades laborales (G) y el 45 % de ellos tienen libertad para suspender sus actividades (H). Con respecto a la percepción de SL, el 45 % de los encuestados la relacionan directamente al sentimiento de comodidad por el lugar de trabajo (I) y el 50 % considera a la carga de trabajo como un factor que obstaculiza la SL (J), desplegándose en ambos grupos de una manera moderada.

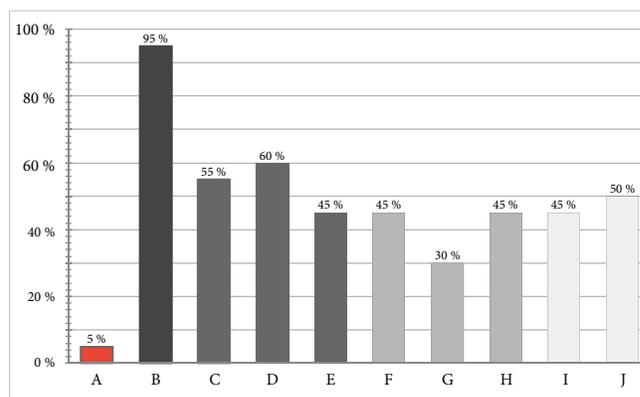


Figura 6. Percepción de satisfacción laboral de acuerdo a factores ergonómicos. A) Área de trabajo individual, B) alcance del equipo de trabajo, C) espacio para silla, D) condiciones de silla, E) permanencia en el puesto, F) repetitividad de movimientos, G) libertad para suspender actividades, H) insatisfacción por el lugar de trabajo, I) insatisfacción por carga de trabajo.

En la encuesta, se ofreció a los participantes tres opciones de respuesta ante la posibilidad de que se insertara un producto para la mejora de su satisfacción relacionado con la ergonomía de su lugar de trabajo y solo el 5 % del total expresó que sentiría impedimento entre ello y sus capacidades; por el contrario, el 50 % percibiría la oportunidad de perfeccionar sus aptitudes, mientras que el 45 % lo utilizaría como soporte para desarrollar un método propio de trabajo (Figura 7).

Con base en el resultado de estos indicadores, se comenzó a gestar una tabla de requerimientos de diseño

validados con principios antropométricos [24] y especificaciones normativas que abordan la implementación de elementos intervinientes en el espacio de trabajo de una PCDM con respecto a la dimensión de sus miembros y movilidad, y la interacción usuario-sistema.

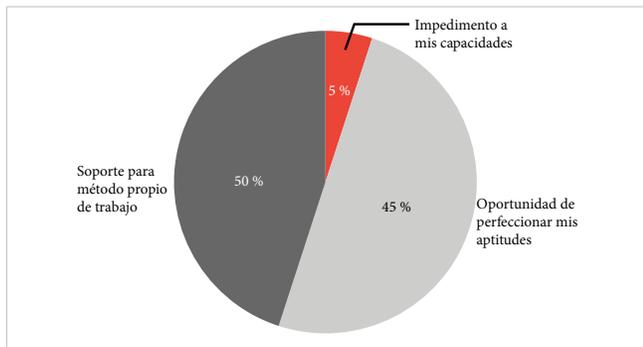


Figura 7. Calificativos del producto para la mejora de satisfacción relacionado a la ergonomía del lugar de trabajo.

#### DIMENSIÓN: FATIGA

Relativo a la disciplina postural, la Figura 8 indica que el 30 % de los encuestados mantiene su postura recta sentada por al menos 30 minutos (A); el 35 % no lo hace debido a la torsión o flexión del tronco (B) y el 40 %, por las mismas posiciones, pero del cuello (C). Cabe destacar que al 65 % de los participantes les es más frecuente perder la alineación de la postura (D) que tratar de permanecer en una posición ergonómicamente ideal (35 %) (E). De acuerdo a la opinión de los participantes, lo anterior se debe a la monotonía de las actividades (40 %) (F) y la falta de periodos de descanso entre cargas de trabajo (40 %) (G), además del espacio y acomodo del área de trabajo (20 %) (H).

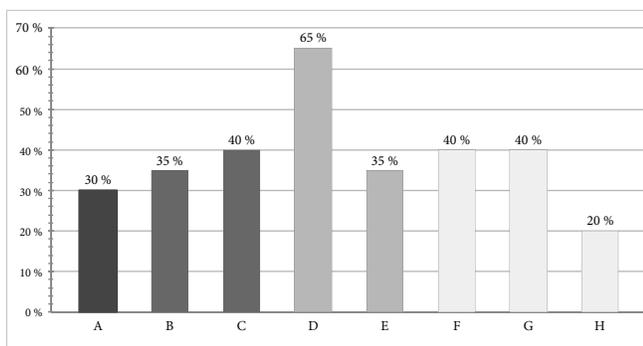


Figura 8. Calificativos de la fatiga respecto a factores posturales. A) Tiempos en permanencia postural sedente, B) torsión o flexión del tronco, C) torsión o flexión del cuello, D) pérdida de alineación postural, E) permanencia postural sedente, F) monotonía de actividades, G) falta de periodos de descanso, H) espacio y alcance del equipo de trabajo.

Por otro lado, el 35 % de los trabajadores encuestados argumentan que su fatiga proviene de la adopción de posiciones incómodas en el puesto de trabajo (A), seguido por la carga de actividades (30 %) (B) y la jornada en sí (25 %) (C). Cuando comienzan a sentirla, solo el 30 % descansa su postura por su propia cuenta (D) y ningún trabajador sigue un programa de reactivación postural (E), como se puede ver en la Figura 9.

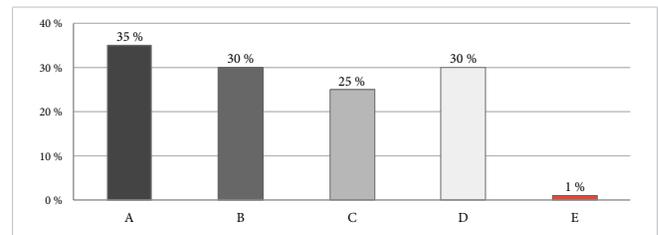


Figura 9. Percepción de fatiga y suministros para contrarrestar el fenómeno. A) Fatiga por posturas incómodas, B) fatiga por carga de trabajo, C) fatiga por la jornada en sí, D) descanso postural bajo propios métodos, E) seguimiento de programa de activación postural.

#### IV. CONCLUSIONES

La adaptación del instrumento con el que se levanta la información resulta efectiva para la creación de un panorama de la realidad laboral de las PCDM que trabajan en una jornada completa, puesto que, desde el punto de vista de las personas sin discapacidad que fueron sometidas a la prueba, permite comprender el grado de satisfacción respecto de la situación ergonómica laboral de un trabajador que desarrolla sus actividades en posición sedente en una jornada de 8 horas.

Al elegirse un grupo de trabajadores sin discapacidad que reflejan a las PCDM, por similitud de condiciones motoras se observa una afinidad en el comportamiento postural del tronco de los participantes, se comprende la temporalidad que estos perpetúan en la rectitud de su postura, así como la disposición para integrar estrategias de rehabilitación postural.

Sin embargo, debido a tal condicionamiento, los participantes omiten algunos aspectos importantes en el estudio de espacios de trabajo que se dictaminan como importantes para las PCDM, como la libertad motora que da mayor cabida a que estos puedan entrar y salir de su rutina de trabajo a voluntad propia.

Esta información podría permitir la realización de un prototipaje de experiencia para el diseño de un dispo-

sitivo que sea capaz de medir la simetría y desviación frontal del torso de un usuario y mediante una interfaz de comunicación le alerta al usuario de incorrecciones de su postura en una línea de tiempo, validadas mediante la captura de una imagen cuando es corrompida dicha simetría. A su vez, el sistema le sugiere al usuario un acomodo óptimo o una estrategia de descanso según sea el caso que se amerite en el transcurso de la jornada.

Se descarta la idea de elementos intrusivos en el sistema de apoyo postural, ya que, por la naturaleza de los usuarios, el éxito del producto dependerá del grado de comodidad que le otorgue este y la sensación de complejidad al usuario en calidad de operatividad de sus herramientas de desplazamiento y trabajo.

## REFERENCIAS

- [1] M. San Juan, A. Martínez, F. Santos y R. Ceña. *Guía Integración laboral de personas con discapacidad en el puesto de caja*. (2010). Acceso: abr. 11, 2022. [En línea]. Disponible en: [https://oiss.org/wp-content/uploads/2018/11/3-guia\\_integracion\\_laboral\\_personas\\_con\\_discapacidad.pdf](https://oiss.org/wp-content/uploads/2018/11/3-guia_integracion_laboral_personas_con_discapacidad.pdf)
- [2] Consejo Nacional para Prevenir la Discriminación. *Ficha temática Personas con discapacidad*. (2017). Acceso: ag. 3, 2021. [En línea]. Disponible en: [http://www.conapred.org.mx/userfiles/files/160620\\_Ficha\\_temática\\_Personas\\_con\\_discapacidad.pdf](http://www.conapred.org.mx/userfiles/files/160620_Ficha_temática_Personas_con_discapacidad.pdf)
- [3] INEGI, *La discapacidad en México, datos al 2014*, versión 2017, México: INEGI, 2017. Acceso: ag. 3, 2021. [En línea]. Disponible en: [https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva\\_estruc/702825094409.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825094409.pdf)
- [4] Centro Nacional de Defectos Congénitos y Discapacidades del Desarrollo de los CDC. “Las discapacidades y la salud”. CDC.gov. <https://www.cdc.gov/ncbddd/spanish/disabilityandhealth/disability-barriers.html> (acceso may. 25, 2022).
- [5] A. Baghdayan. “Derribar los obstáculos para las personas con discapacidad y hacer realidad la ciudadanía mundial”. UN.org. <https://www.un.org/es/chronicle/article/derribar-los-obstaculos-para-las-personas-con-discapacidad-y-hacer-realidad-la-ciudadania-mundial> (acceso: may. 25, 2022).
- [6] Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales. *Ergonomía y discapacidad*. (2004). Acceso: abr. 18, 2022. [En línea]. Disponible en: [https://www.ibv.org/wp-content/uploads/2020/01/Estudio\\_Ergonomia\\_discapacidad.pdf](https://www.ibv.org/wp-content/uploads/2020/01/Estudio_Ergonomia_discapacidad.pdf)
- [7] Z. I. Jara y M. F. Haro, “Estudio de la satisfacción laboral en los niveles jerárquicos en un Sector Público de Salud”, tesis de maestría, Fac. de Postgrado, Univ. Espiritu Santo, Guayaquil, Ec., 2018. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.uees.edu.ec/handle/123456789/2960>
- [8] D. V. Peña y C. E. Sánchez, “Satisfacción laboral de las personas con discapacidad en las instituciones públicas, ciudad de Guayaquil”, tesis de licenciatura, Esc. de Ing. Comercial, Univ. de Guayaquil, Ec., 2017. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/re-dug/23088>
- [9] M. K. Aldana, “Satisfacción laboral y calidad de vida en personas con y sin discapacidad motriz”, tesis de licenciatura, Centro Universitario UAEM Ecatepec, Univ. Autónoma del Edo. de México, Edo. de México, 2020. [En línea]. Disponible en: [http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/109333/SATISFACCION\\_LABORAL\\_Y\\_CALIDAD\\_DE\\_VIDA\\_EN\\_PERSONAS\\_CON\\_Y\\_SIN\\_DISCAPACIDAD\\_MOTRIZ\(2\).pdf?sequence=3](http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/109333/SATISFACCION_LABORAL_Y_CALIDAD_DE_VIDA_EN_PERSONAS_CON_Y_SIN_DISCAPACIDAD_MOTRIZ(2).pdf?sequence=3)
- [10] A. Alba-Leonel, R. A. Salcedo-Álvarez, R. A. Zárate-Grajales y F. Higuera-Ramírez, “Satisfacción laboral del personal de enfermería en el Hospital General de México”, *Rev Enferm Inst Mex Seguro Soc*, vol. 16, no. 3, pp. 155-160, 2008.
- [11] J. Ponce-Gómez, G. Ponce-Gómez e I. Lugo-Chávez, “Satisfacción laboral del personal de enfermería en un hospital de gineco-obstetricia del Instituto Mexicano del Seguro Social”, *Rev Enferm Inst Mex Seguro Soc*, vol. 17, no. 2, pp. 103-108, 2009.
- [12] IMSS, *Escala General de Satisfacción Laboral*. Acceso: may. 24, 2022. [En línea]. Disponible en: <http://www.imss.gob.mx/sites/all/statics/salud/estreslaboral/Test-Satisfaccion-Laboral.pdf>
- [13] H. Ladino y L. L. Rojas, “Modelo de medición de fatiga laboral para el personal de la salud en IPS privadas de Colombia”, tesis de maestría, Esc. de Admón., Univ. del Rosario, Colombia, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://repository.urosario.edu.co/bitstream/hand->

- le/10336/19934/LadinoDiaz-Henry-2019.pdf?sequence=16&isAllowed=y
- [14] C. Olivar, S. González y M. M. Martínez, “Factores relacionados con la satisfacción laboral y el desgaste profesional en los médicos de atención primaria de Asturias”, *Aten. Primaria*, vol. 24, no. 6, pp. 352-359, 1999.
- [15] INSSST. “V Encuesta Nacional de Condiciones de Trabajo - Año 2004”. INSSST.es. <https://www.insst.es/documentacion/catalogo-de-publicaciones/v-encuesta-nacional-de-condiciones-de-trabajo> (acceso: may. 25, 2022).
- [16] M. C. Tenorio, “Análisis comparativo de la fatiga laboral antes y durante la pandemia covid-19 en docentes de las unidades educativas fiscales de la ciudad de Cuenca”, Depto. de Postgrados, Univ. del Azuay, Ec., 2020. [En línea]. Disponible en: <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/10419/1/16025.pdf>
- [17] J. Montoya-Torres, D. Robayo-Barrios y S. Monroy-Caicedo, “Evaluación de la fatiga laboral en conductores de la Cooperativa de Transporte del municipio de Planadas”, *IPSA Sci.*, vol. 5, no. 1, dic. 2020, doi: 10.25214/27114406.1006.
- [18] Universitat Politècnica de València. “RULA”. UPV.es. <https://www.ergonautas.upv.es/metodos/rula/rula-ayuda.php> (acceso: may. 25, 2022).
- [19] Universitat Politècnica de València. “REBA”, UPV.es. <https://www.ergonautas.upv.es/metodos/reba/reba-ayuda.php> (acceso: may. 25, 2022).
- [20] Universitat Politècnica de València, “OWAS”. UPV.es. <https://www.ergonautas.upv.es/metodos/owas/owas-ayuda.php> (acceso: may. 25, 2022).
- [21] Universidad Anáhuac. “¿Qué es la ergonomía?”. Anahuac.mx. <https://www.anahuac.mx/mexico/noticias/Que-es-la-ergonomia> (acceso: sept. 14, 2022).
- [22] Mayo Clinic. “Desgaste laboral: cómo detectarlo y tomar medidas”. MayoClinic.org. <https://www.mayoclinic.org/es-es/healthy-lifestyle/adult-health/in-depth/burnout/art-20046642> (acceso: sept. 14, 2022).
- [23] Gobierno de México / SEGOB. DOF. (2014, abr. 30). *Programa Nacional para el Desarrollo y la Inclusión de las Personas con Discapacidad 2014-2018*. [En línea]. Disponible en: [http://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5343100&fecha=30/04/2014#gsc.tab=0](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5343100&fecha=30/04/2014#gsc.tab=0)
- [24] Sociedad de Ergonomistas de México S. A. “Proyectos”. SEMAC.org.mx <http://www.semac.org.mx/index.php/ergonomia/proyectos.html> (acceso: sept. 15, 2022).

## RECONOCIMIENTOS

Esta investigación ha sido financiada por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y forma parte de un trabajo de grado de la Maestría en Diseño e Innovación de la Universidad Autónoma de Querétaro, por lo cual se expresa un especial agradecimiento a ambas instituciones

# Implementación de metodología Seis Sigma para la solución de bolas de soldadura en tablillas electrónicas

## *Implementation of Six Sigma methodology for the solution of solder balls in electronic boards*

Gustavo Vázquez Silva<sup>1</sup>✉, Luis Alberto Rodríguez-Picón<sup>1</sup>, Roberto Romero López<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Ingeniería y Tecnología | Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ)

### RESUMEN

En este artículo se aborda la investigación realizada en una planta de Ciudad Juárez, Chihuahua, México, donde se trabajan diferentes modelos de tablillas electrónicas para el control de diversas partes y accesorios automotrices. Ahí se identificó una oportunidad de mejora, ya que se estaban generando defectos de bolas y burbujas de soldadura en las tablillas, creando un daño latente y aumento en los costos de producción. Se implementó la metodología Seis Sigma y su herramienta DMAIC en seis diferentes diseños de experimentos con una máquina de inspección de rayos X y un software que procesa las imágenes. Se modificaron diversos parámetros en la etapa de soldeo y, finalmente, se encontró que las tablillas de un proveedor chino causaban el defecto debido a la rugosidad en orificios (*through holes*), pues ahí quedaba flux atrapado y se generaban las bolas de soldadura.

**PALABRAS CLAVE:** tablillas electrónicas; bolas de soldadura; *through hole*; DMAIC.

### ABSTRACT

This article deals with the research carried out in a plant in Ciudad Juarez, Chihuahua, Mexico, where different models of electronic boards are used to control various automotive parts and accessories. There, an opportunity for improvement was identified, since ball defects and solder bubbles were being generated in the slats, creating latent damage and an increase in production costs. The Six Sigma methodology and its DMAIC tool were implemented in six different experimental designs with an X-ray inspection machine and image processing software. Various parameters were modified in the welding stage and, finally, it was found that the boards from a Chinese supplier caused the defect due to the roughness in the through holes, since flux was trapped there and solder balls were generated.

**KEYWORDS:** electronic boards; solder balls; through hole; DMAIC.

#### Correspondencia:

**DESTINATARIO:** Gustavo Vázquez Silva  
**INSTITUCIÓN:** Universidad Autónoma de Ciudad Juárez,  
Instituto de Ingeniería y Tecnología  
**DIRECCIÓN:** Av. del Charro núm. 450 norte, col. Partido Romero,  
C. P. 32310, Ciudad Juárez, Chihuahua, México  
**CORREO ELECTRÓNICO:** al199148@alumnos.uacj.mx

**Fecha de recepción:** 12 de mayo de 2022. **Fecha de aceptación:**  
10 de noviembre de 2022. **Fecha de publicación:** 1 de diciembre  
de 2022.



## I. INTRODUCCIÓN

Una tablilla electrónica es la parte principal del funcionamiento de diferentes dispositivos industriales y domésticos y, actualmente, algunos aparatos dependen de ellas (estufas, hornos de microondas, lavadoras, televisiones, computadoras, etc.) [1]. Por medio de sus circuitos, estas tablillas permiten que las funciones del dispositivo se ejecuten correctamente de acuerdo a cómo y para qué fueron diseñadas, tomando en cuenta la soldadura correcta de todos sus componentes [2].

Los procesos de soldadura son comúnmente utilizados en la industria electrónica para unir los componentes a la PCB (Printed Circuit Board). Un proceso común es el de soldadura de ola, en cual intervienen varios parámetros de contacto de los herramientas de soldadura a la PCB [3], que son importantes y continuamente monitoreados [4].

Actualmente, en una planta de Ciudad Juárez, Chihuahua, México, se trabajan diferentes modelos de tablillas para el control de diversas partes y accesorios automotrices. Precisamente, en la fase de soldadura se identificó un área de mejora, ya que durante el proceso de soldeo de tablillas electrónicas, específicamente en las máquinas soldadoras selectivas, se estaban generando defectos de bolas y burbujas de soldadura entre las terminales de los componentes y los *orificios pasados* (*through holes*) de la PCB, creando un daño latente en esta, ya que se puede fracturar la soldadura fácilmente y generar un problema a corto o mediano plazo. Estos defectos pueden ocasionar un gran problema a la empresa, pues las tablillas que se producen en esta planta son de seguridad nivel 3, de alta confiabilidad (críticos, vitales).

El modelo en donde se está teniendo este problema es en la tablilla que controla los sensores del ABS (Anti-lock Braking System) de los automóviles y las bolsas de protección para los tripulantes en caso de accidentes. Por esta razón, las tablillas deben tener una confiabilidad máxima, ya que su mal funcionamiento pone en riesgo la vida de las personas. Dada esta problemática, resulta necesaria la consideración de metodologías clave que permitan mejorar la condición actual del proceso, entre ellas Seis Sigma, la cual fue propuesta en los años ochenta por Bill Smith para controlar y disminuir la variación o eliminar las fallas y defectos en un producto, proceso o servicio al cliente o consumidor [5].

La meta de Seis Sigma es alcanzar o estar por debajo de 3.4 defectos por millón [6]. Con el término *defecto* se define cualquier falla o discrepancia que tenga el producto o servicio que no cumpla con los requerimientos del cliente o consumidor [7].

Seis Sigma ha ido avanzando y transformándose desde su aplicación solamente como herramienta de calidad a incluirse dentro de diferentes departamentos clave de algunas empresas [7]. Esta metodología tiene como principal aportación que todos los procesos cumplan con los requisitos que el cliente pide, asegurando que la calidad y desempeño cumplan con los estándares de Seis Sigma. Dentro de los parámetros establecidos, en el ámbito organizacional fueron Motorola, General Electric y Honeywell quienes popularizaron este recurso, logrando excelentes resultados en sus procesos [8].

DMAIC, una de las herramientas de Seis Sigma, es el acrónimo de una metodología de cinco pasos: Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar. Es un proceso de mejora, sistemático, científico y basado en hechos [9]. Aunque existen otros recursos, como DMADOV (Definir, Medir, Analizar, Diseñar, Optimizar y Verificar) y PDCA-SVDA (Planificar, Ejecutar, Verificar y Actuar-Estandarizar, Ejecutar, Verificar y Actuar) [9], Seis Sigma ha sido utilizada en diversas aplicaciones, por ejemplo, en la reducción de costos en pequeñas y medianas empresas [10] para mejorar la competitividad y desempeño.

Por otra parte, el uso de Seis Sigma ayudó en el mejoramiento y eficiencia en troqueles de alta velocidad [11], así como en el servicio a usuarios en los laboratorios de una institución de educación superior con el fin de agilizar la atención y disminuir el tiempo que pierden los alumnos en espera de atención [12].

Por otra parte, [13] consideró esta metodología para reducir la variación generada por el producto terminado, ya que se incumplía con las pruebas de calidad. Seis Sigma también fue utilizada para la mejora en una línea de ensamble de bombas de gasolina, obteniendo excelentes resultados en la disminución de tiempos de proceso [14].

En [15] se utilizó Seis Sigma, en conjunto con Lean Seis Sigma, para ayudar a las pequeñas y medianas empresas a mejorar la calidad, la eficiencia y la reducción de costos para ser más competitivas frente a las grandes

compañías. Otra cualidad importante en la que se enfocan las empresas de clase mundial es el aspecto de ser sustentables, reduciendo al mínimo el impacto ambiental negativo que generan sus procesos, dando un equilibrio y cuidando la naturaleza y a sus trabajadores por igual. De la misma manera que en el ejemplo anterior, [14] usó Seis Sigma para el análisis y mejora de un proceso de ensamble de un automóvil de energía potencial.

Asimismo, [16] empleó esta metodología para hacer más eficiente el control en el almacén de productos terminados de la empresa Bakus, que se dedica a la elaboración de bebidas, con excelentes resultados. En otros casos, se usó Seis Sigma para mejorar la producción de lavavajillas y eliminar las causas que originan pérdidas e ineficiencia en el proceso [17], así como en la estandarización de la producción de café de las pequeñas y medianas empresas (PYMES) en Colombia, ya que se tenía un rendimiento de 64.81 % y con la aplicación de esta herramienta se logró reducir los desperdicios y estandarizar los procesos para hacer más eficientes los tiempos de producción [18].

Seis Sigma fue utilizada también en una empresa que fabrica *blocks* de cemento, con la finalidad de implementar un sistema de calidad que ayude a disminuir errores, mermas y retrabajos que incrementaban los costos de producción [19], así como en una empresa automotriz para reducir costos en el proceso de barrenación o perforación de discos automotrices, la cual tenía un porcentaje de rechazo fuera de especificación y en el que se requirió meter en control esa deficiencia para hacer más competitiva la compañía y, sobre todo, evitar la pérdida de clientes [20].

Específicamente, para el caso de estudio de interés, el equipo en donde se originó la problemática es una soldadora selectiva de ola, que consta de tres bloques de proceso: área de flux, área de precalentado y área de soldado o de soldadura. A continuación, se explica en qué consiste cada una de ellas y su función.

**Área de flux:** Tiene dos clasificaciones: *clean* y *no clean*. El flux *no clean* es el que más se utiliza en procesos de producción para la limpieza de impurezas en las tablillas electrónicas [21]. La fórmula del flux está diseñada para limpiar las áreas y componentes a soldar removiendo los óxidos metálicos y ayudando a que la soldadura tenga una mayor fluidez y una mejor unión inter-

metálica [22]. Los activadores del flux *no clean* son ácidos orgánicos débiles, que son menos agresivos y corrosivos que los de un flux lavable. Por medio de brochas y de un mecanismo neumático, las brochas están sumergidas en una tina llena de flux y cuando sube por medio de mecanismos (cilindros neumáticos) toca la PCB e impregna la tablilla y los pines que se van a soldar para limpiar impurezas.

**Área de Precalentado:** El precalentamiento puede ser entendido de acuerdo con la norma de la Asociación de Industrias de Conexiones Electrónicas (IPC), como un paso importante y necesario para disminuir la generación de residuos (solventes volátiles) antes de llegar al proceso de soldadura y también ayuda a disminuir un choque térmico entre componentes y la soldadura líquida [23]. Varios estudios han comprobado que un proceso de precalentado correcto es decisivo e indispensable para que la soldadura fluya entre el orificio pasado de la tablilla y los componentes que se van a soldar, obteniendo una correcta unión intermetálica en ambos lados de la tablilla (superior e inferior). El calentador por infrarrojo está construido de manera que una vez definida la anchura no usada del calentador puede ser desactivada. La combinación de los sistemas infrarrojo y de convección ofrece una perfecta transferencia de calor [22].

**Área de Soldadura:** La unión por soldadura se refiere a la unión entre dos o más componentes, generalmente usando soldadura de estaño, cobre y/o plata como mejores opciones, ya que la de plomo es altamente contaminante. En las máquinas soldadoras de ola, el proceso consiste en unas boquillas inmersas en una tina de soldadura que emergen de esta por un sistema de servos, subiendo hasta llegar a hacer contacto con la tablilla y los componentes a soldar. Esta acción en la que fluye la soldadura hacia el lado superior de la tablilla se le conoce como proceso de capilaridad, logrando una unión sólida y confiable.

En la composición eutéctica (mezcla de dos componentes con punto de fusión o vaporización mínimo), la aleación de 96.5 Sn-3.5 Ag (estaño-plata) es generalmente la más usada de las que son libres de plomo. Se les emplea en uniones de alta temperatura porque generan una gran mojabilidad y resistencia. La combinación de plata y estaño forma aleaciones que son estables e insensibles a reacciones de electromigración [24], como se muestra en la Figura 1.

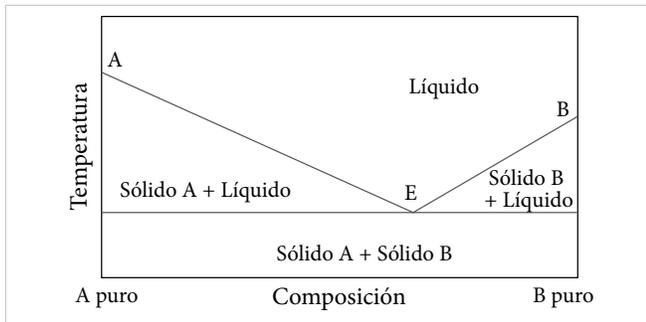


Figura 1. Punto de fusión de la soldadura [25].

Un sistema de servomotores sube una tina llena de soldadura fundida a 325 °C y, a su vez, contienen los herramientas de soldadura que son los que hacen contacto con la superficie de la PCB, formando uniones intermetálicas por el principio de capilaridad entre la PCB y los componentes electrónicos. Así, “el proceso de capilaridad es la acción de que un líquido fluya por espacios pequeños” [26]. En esta área se deben tener controladas y monitoreadas las velocidades con las que suben los herramientas de soldadura para evitar problemas de daño a la PCB o defectos del soldeo.

Como se mencionó anteriormente, durante el proceso de soldadura se generan defectos de bolas de soldadura y burbujas de aire entre las terminales de los componentes y los *through hole* de la PCB, creando un daño latente, ya que la soldadura se puede fracturar fácilmente. Un problema para las bolas con diámetro mayor a 0.5 micras es que se puede generar un corto al moverse, dado que quedan atrapadas entre las terminales de los componentes electrónicos. Otro de los problemas que generan las burbujas en las tablillas electrónicas es que no dejan que se tenga una unión intermetálica correcta, pudiendo generar interferencia eléctrica, cortos o fracturas en la soldadura que impiden una buena conducción de electricidad.

Por otra parte, existen normas por las que se rigen las industrias de manufactura de tablillas electrónicas a escala mundial y que indican el nivel de error o tolerancia con las que se debe trabajar definidas por el IPC. Estas normas rigen a las empresas de clase mundial, donde se indican los criterios de aceptación en los procesos de soldadura. Bajo estas especificaciones, la producción de las tablillas está generando pérdidas importantes dado que el precio de esta con proceso de soldado es de 40 dólares estadounidenses. Dado que se ha tenido alrededor de 16 a 20 piezas defectuosas por cada 24 horas, eso significa una pérdida de 560 a 800 dólares diarios en una sola línea

de producción, haciendo que la proyección de costo al año en defectos sea de 193 200 a 276 000 dólares.

El objetivo de este artículo es presentar la aplicación de Seis Sigma en el problema descrito, con la intención de cumplir con los requerimientos del cliente y los criterios de IPC 610, en donde mencionan los tipos de defectos y algunas de las variables de proceso recomendadas para solucionarlos. Se reseña también cómo se emplearon diversas herramientas de la metodología en las diferentes fases del proceso al tomar en cuenta parámetros de precalentado, velocidad y contacto de soldadura.

## II. METODOLOGÍA

La metodología está basada en cada uno de los bloques y herramientas de DMAIC, como se muestra en la Figura 2.

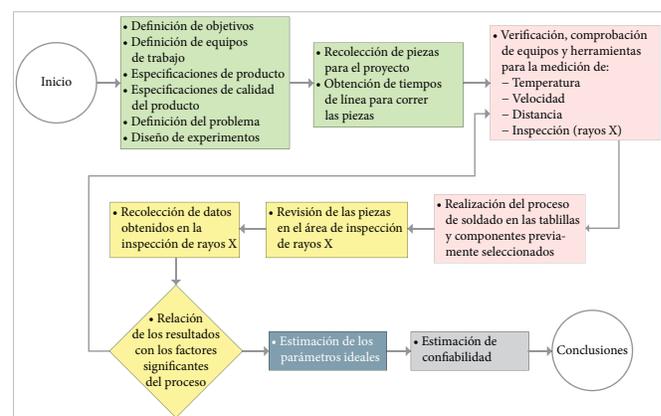


Figura 2. Diagrama de bloques de la metodología empleada.

La metodología Seis Sigma se enfoca en los requerimientos y expectativas del cliente (voz del cliente):

- a) ¿Qué quiere el cliente?
- b) ¿Qué necesita el cliente?
- c) ¿Qué demanda el cliente?
- d) ¿Qué estimula el cliente?
- e) ¿Qué espera el cliente?

Seis Sigma utiliza datos concretos y confiables y usa un método robusto y basado en un sistema de pasos que se ajusta a un método o sistema para solucionar problemas y la mejora de procesos [27].

Asimismo, la calidad está enfocada en la completa satisfacción del cliente y se puede aplicar al producto, servicio o a la organización. La calidad total pretende obte-

ner beneficios para todos los miembros de la empresa, haciendo alusión a la mejora continua como parte de la metodología en que se basa Seis Sigma [28].

Para llevar a cabo este proyecto, el equipo decidió que las pruebas y los diseños de experimentos se llevaran a cabo en una sola línea de producción de las tres existentes en la planta establecida en Ciudad Juárez, en la que este problema debía ser solucionado por la relevancia que tiene en aspectos de calidad, reducción de *scrap* y riesgos de accidentes.

Los materiales que empleados para llevar a cabo los diseños de experimentos seleccionados de acuerdo a las especificaciones de calidad, son los mismos que se usan diariamente en el proceso de producción. El total de las siguientes cantidades de material con las que se contó para hacer los seis diferentes diseños de experimentos fue una de las limitaciones que se tuvieron dentro de este proyecto, ya que los experimentos y los tamaños de muestra fueron determinados por el material y el tiempo de línea disponibles después de cumplir con la planeación de producción requerida por el cliente:

- 4500 tablillas electrónicas con componentes de SMD (Surface Mounting Device) previamente soldados.
- 4500 relevadores NEXEM EX2-N10, voltaje de funcionamiento de 7-12 voltios, capacidad de memoria flash de 100 KB.
- 4500 relevadores NEXEM EX1-N6, voltaje de funcionamiento 4 voltios, capacidad de memoria de flash de 100 KB.
- Flux Cobar Europa BV base alcohol al 96 %.
- Máquina soldadora selectiva INERTEC MLS 2040, voltaje 110/208, año 2007, de manufactura alemana.
- Máquina de inspección de rayos X, modelo X7056-ll, para la revisión de las tablillas de electrónicas. La máquina cuenta con un software con las imágenes de las PCB que se producen en la línea de producción y hace un comparativo al momento de las revisiones. Asimismo, tiene un sistema de medición que es aplicado a los hallazgos encontrados en el comparativo que hace la máquina. Este equipo fue solicitado bajo estas especificaciones por la empresa para que pudiera llevar a cabo estas revisiones y evitar la toma de decisiones a nivel operativo, ya que los modelos que en esta línea se producen son de nivel 3 de seguridad y además es certificado y calibrado por un proveedor externo.

- Computadora Lenovo Thinkpad T560 para utilizar programas computacionales requeridos.
- Programa Microsoft Excel para el registro y control de datos.
- Programa estadístico Minitab para el análisis de diseño experimental.

Los pasos que se siguieron en cada una de las secciones de la metodología se muestran a continuación:

**Definir:** Definición del problema, de equipos de trabajo y de especificaciones de producto; diseño de experimentos; recolección de piezas para el proyecto; obtención de tiempos de línea para correr los experimentos.

**Medir:** Verificación, comprobación de equipos y herramientas para medición de temperatura, velocidad, distancia e inspección de rayos X; ejecución del proceso de soldado de tablillas y componentes manuales previamente seleccionados.

**Analizar:** Revisión de las piezas en rayos X; recolección de datos obtenidos de la inspección de rayos X; relación de resultados con los factores significantes del proceso.

**Mejorar:** Estimación de parámetros ideales.

**Controlar:** Modificación del FMEA (Failure Modes and Effect Analysis) y el plan de control.

Se estableció una lista de comprobación (*check list*) de temperaturas de precalentado diario y turno por turno, y además se implementó un documento con especificaciones de rugosidad para el departamento de *incoming*.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se presentan los resultados de los diferentes esquemas de experimentación que se llevaron a cabo para determinar los valores ideales de temperatura de precalentado. En la etapa 1 (Definir) se conformó un equipo de trabajo con la inclusión de representantes de todos los departamentos que son parte del proceso para la producción del producto terminado. Asimismo, el equipo definió objetivos, alcances, limitaciones, tareas y responsabilidades de cada miembro del grupo; se determinó cuál es el defecto o problema (bola de soldadura) y las posibles variables causantes de este. Se eligió lo más significativo de acuerdo con un diagrama de Ishikawa. Cabe mencionar que el principal problema

que se tuvo fue la disponibilidad de tiempo de los diferentes departamentos.

A continuación, se determinó lo siguiente: el tamaño de muestra para llevar a cabo los experimentos; los encargados del armado de las piezas; los tiempos de línea para las corridas, con las restricciones respectivas de acuerdo con el plan de producción, y la identificación de las piezas de acuerdo con posición, hora, día y parámetros de la corrida por medio de una etiqueta individual.

En la fase de Medir se revisaron todas las máquinas que se utilizarían, así como sus parámetros, etiquetas de calibración y su variabilidad, todo esto por el departamento de calibración y metrología. Aquí se encontró que el equipo de soldadora selectiva, específicamente en el área de precalentado, no estaba siendo monitoreado constantemente porque en su momento se pensó que no debería estar sujeto a un sistema de revisión periódica, pero, en acuerdo con todo el equipo del proyecto, se decidió que se implementará su revisión mensualmente para llevar un control de esta área y validar los parámetros de proceso. Un solo equipo hizo las revisiones de los experimentos, considerando una máquina de rayos X que fue calibrada y revisada por un proveedor externo, el cual colocó la etiqueta de calibración liberada.

La cantidad de defectos en este proceso es pequeña, sin embargo, el costo por pieza defectuosa es importante dado que ronda en los 40 dólares. El número de defectos por día es de 15 a 20 piezas de un total de 4300 piezas producidas, lo cual implica una tasa de falla mínima. Este tipo de características se analiza y modela con un proceso Poisson; específicamente, la capacidad del proceso tiene una tasa de defectos de 0.055 con límites de confianza de 0.028 y 0.097, lo cual implica que este es estable. Por otra parte, los defectos por unidad tienen una tasa de 0.055 con los mismos límites de confianza, lo cual también denota estabilidad.

En general, los defectos observados tienden a ser menos que los esperados, lo cual denota una capacidad relativamente alta del proceso. Sin embargo, dado el costo por unidad defectuosa, resulta necesario establecer una estrategia de mejora dado que la proyección de costos por defectos es de 276 000 dólares por año. Además, la confiabilidad del producto tiene un gran impacto en la seguridad de los clientes, por lo que resulta crítico para la empresa determinar condiciones óptimas del proceso para lograr minimizar aún más la cantidad de defectos.

En la etapa 3 (Analizar), todos los datos y mediciones obtenidos de la inspección de rayos X fueron capturados en una hoja de recolección de datos, para luego ser analizados por medio de diseño estadístico con la herramienta Minitab. En esta sección se llevaron a cabo tres experimentos con diferentes valores de proceso sin obtener algún factor significativo.

La etapa 4 (Mejorar) se llevó a cabo con tablillas de diferentes proveedores y se detectó como causante del problema al proveedor chino. Se establecieron parámetros de temperatura robustos y confiables que dieron como resultado el control sobre la generación de bolas de soldadura.

En la etapa 5 (Controlar) se tuvo como resultado cartas de control conforme a los parámetros de temperatura preestablecidos y hojas de lista de comprobación diarias. Por otra parte, el plan de control desarrollado como parte del proyecto es un documento confidencial que no puede ser reportado en este artículo. Los cambios llevados a cabo en el plan de control fueron los siguientes, específicamente en la sección de maquinaria (parámetros): a) el cambio de 400 °C a 440 °C en el área de precalentado; b) se implementó una lista de comprobación diaria por el técnico del equipo, cambio que fue enviado y aceptado por el cliente, y c) la calibración y certificación del equipo (soldadora selectiva) de seis meses a tres meses periódicamente, la cual será llevada a cabo por el departamento de calibración interno. La certificación y calibración por parte del proveedor externo quedó con la misma periodicidad de un año.

Sin embargo, algunas de las actividades críticas planeadas consisten en la inspección de material y un sistema de control más robusto para el problema de rugosidad en los orificios de las tablillas. De igual manera, se actualizó el FMEA del proceso, teniendo en cuenta los principales resultados obtenidos. Los cambios fueron los siguientes: los parámetros de precalentado del equipo soldadora selectiva de 400 °C a 440 °C, la implementación de una lista de comprobación para el control de estos parámetros, el cambio en la periodicidad de certificación de este equipo y la revisión de material en el área de *incoming* por el defecto de rugosidad en orificios pasados, ya que este no era revisado anteriormente.

Finalmente, se encontró la causa raíz del problema en los experimentos 4 y 5.

DISEÑO DE EXPERIMENTOS 1

Para el primer diseño se conformó un equipo de trabajo con personal invitado de diferentes niveles de la empresa y se definieron objetivos, alcances y limitaciones de este, delegación de tareas y responsabilidades a

cada miembro, así como los tiempos para cada una de las tareas.

También, por medio de una matriz causa y efecto se definieron los posibles factores que podrían tener significancia en el problema (Figura 3).

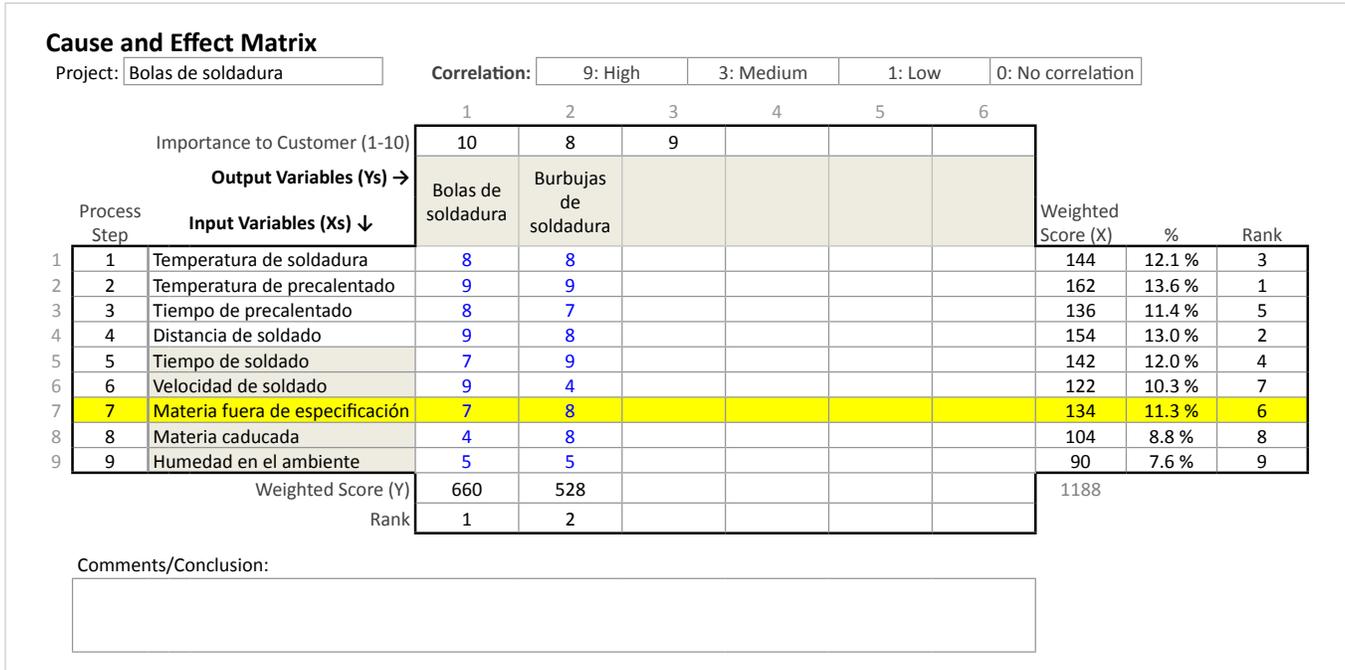


Figura 3. Matriz causa y efecto (elaboración de los autores, en Microsoft Excel).

El equipo de investigación definió el tamaño de la muestra en 100 piezas, las cuales fueron revisadas y analizadas antes de entrar a proceso, así como los conectores y relevadores para el armado de las PCB (un ejemplo se muestra en la Figura 4).

en la que se trabajó y se reunió el equipo de ingeniería para certificar que las temperaturas no tuvieran variación y así dar la aprobación para el experimento con los parámetros de soldadura previamente establecidos, identificando cada una de las piezas que se procesaron.

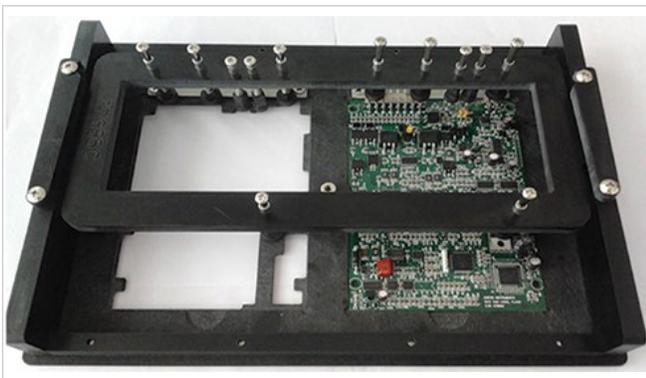


Figura 4. Armado de piezas (fotografía tomada por los autores).

Con el fin de verificar la correcta lectura de temperaturas dentro de la máquina se usó un perfilador para tomar lectura de las diferentes zonas de precalentado y que estas coincidieran con las que se visualizan en la pantalla de la máquina.

Proceso de soldado de las muestras

La primera corrida de 50 piezas se hizo con una temperatura de 340 °C y la segunda con las 50 piezas restantes se hizo a 380 °C, ambas en el área de precalentado.

De acuerdo con la matriz causa y efecto, el primer experimento se llevó a cabo con las temperaturas de precalentado establecidas (340 °C y 380 °C) de la selectiva

Las piezas de estas dos corridas fueron empacadas en bolsas antiestáticas para su manejo y traslado a la máquina de rayos X.

### Revisión de las muestras del experimento 1

Cada una de las piezas se colocó y revisó al 100 % en la máquina de rayos X. A las que salieron con defectos se les tomaron medidas y fotografías de cada uno de estos, con los datos que trae cada una de las piezas.

La información obtenida fue vaciada en una hoja de Microsoft Excel para revisarla y analizarla con la regresión de Poisson del software Minitab, dando como resultado los datos de la [Tabla 1](#).

TABLA 1  
TABLA DE ANOVA (REGRESIÓN DE POISSON)

FUENTE	GL	DESV. AJUST.	MEDIA AJUST.	CHI CUADRADA	VALOR p
Regresión	2	0.5223	0.2611	0.52	0.770
Temp.	1	0.1293	0.1293	0.13	0.719
Posición	1	0.3930	0.3930	0.39	0.531
Error	213	93.7739	0.4403		
Total	215	94.2962			

Abreviaturas: GL = grados de libertad, Desv. ajust. = desviación ajustada, Temp. = temperatura.

Con un nivel de significancia de 0.05:

- $H_0$ : La variación en la temperatura de precalentado no tiene efecto significativo en la aparición de las bolas de soldadura en tablillas electrónicas.
- $H_1$ : La variación en la temperatura de precalentado tiene efecto significativo en la aparición de bolas de soldadura en las tablillas electrónicas.
- Términos significantes: Ninguno de los términos es significativo.
- Decisión: valor p (0.719) es mayor que 0.05.
- No rechazar  $H_0$ .

Se puede observar que ninguno de los términos es significativo, es decir, ningún parámetro del experimento es significativo en la aparición de bolas de soldadura.

La conclusión es que existe evidencia estadística para no rechazar  $H_0$ : la variación en la temperatura de precalentado no influye en la aparición de bolas de soldadura.

Por tanto, se continuó con tres diseños de experimentos más tomando en cuenta cada uno de los factores de la matriz de causa y efecto según su orden de importancia.

### DISEÑO DE EXPERIMENTOS 2

En esta corrida se trabajó con 1, 0.6 y 0.2 mm como parámetros de contacto de soldado. Igual que en el experimento 1, se siguió con los mismos pasos de proceso: el mismo patrón de armado de piezas muestra, verificación de equipo de medición, revisión de muestras y vaciado de resultado.

En la [Tabla 2](#) se observan los datos obtenidos de este diseño de experimentos.

TABLA 2  
ANÁLISIS DE VARIANZA

FUENTE	GL	PRUEBA DE WALD	
		CHI CUADRADA	VALOR p
Regresión	2	0.49	0.781
Posición	1	0.00	1.000
Distancia	1	0.49	0.482

Con un nivel de significancia de 0.05:

- $H_0$ : La distancia de soldado no tiene efecto significativo en la aparición de las bolas de soldadura en las tablillas.
- $H_1$ : La distancia de soldado tiene efecto significativo en la aparición de bolas de soldadura en las tablillas.
- Términos significantes: Ninguno de los términos es significantes.
- Decisión: con un valor p (0.482) mayor que 0.05.
- No rechazar  $H_0$ .

Se puede observar que ninguno de los términos es significativo, así como tampoco sus interacciones, por lo tanto, se puede corroborar que ningún parámetro del experimento es significativo en la aparición de bolas de soldadura.

La conclusión es que existe evidencia estadística para no rechazar  $H_0$ : la distancia no es un factor significativo en la aparición de bolas de soldadura.

### DISEÑO DE EXPERIMENTOS 3

Debido al resultado de los experimentos 1 y 2 en el que no fue significativo la variación en el parámetro *distancia de contacto*, se tomó la decisión de seguir con los experimentos tomando otros factores del diagrama de causa y efecto y hacer interacciones entre ellos.

Se propuso el experimento con los siguientes factores: temperatura de soldadura de 300 °C y 340 °C, velocidad de soldadura de 1 y 3 mm/s y distancia de contacto de soldadura de 1 mm y 0.3 mm. Se siguió el mismo procedimiento de la corrida anterior.

Después de hacer la revisión, se ordenaron los datos para analizar el experimento en Minitab con un diseño de regresión de Poisson en el que se obtuvo el siguiente resultado (Tabla 3 y Figura 5).

TABLA 3 ANÁLISIS DE VARIANZA DE TEMPERATURA

FUENTE	GL	PRUEBA DE WALD	
		CHI CUADRADA	VALOR p
Regresión	6	0.82	0.991
Temperatura	1	0.00	0.998
Velocidad de soldado	1	0.00	0.997
Distancia de soldado	1	0.00	0.998
Temperatura * velocidad de soldado	1	0.00	0.997
Temperatura * distancia de soldado	1	0.00	0.998
Velocidad de soldado * distancia de soldado	1	0.00	0.998

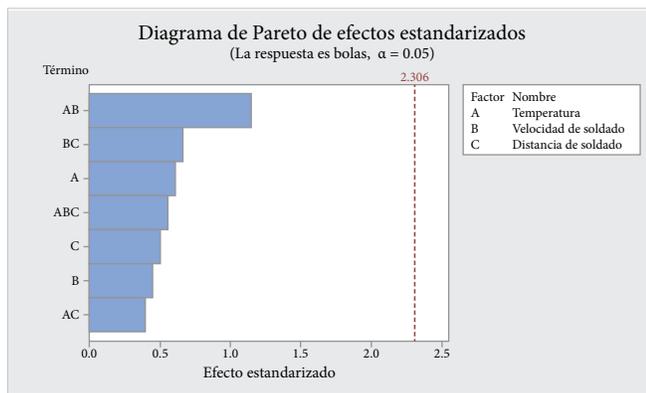


Figura 5. Diagrama de Pareto.

Con un valor de significancia de 0.05, se puede observar que ninguno de los términos es significativo, así como tampoco sus interacciones, por lo tanto, ningún parámetro del experimento es significativo en la aparición de bolas de soldadura, como se observa en el diagrama de Pareto de la Figura 5.

- $H_0$ : El efecto de la variación en la temperatura de soldadura, la velocidad y distancia de soldado y sus

interacciones no tienen efecto significativo en la aparición de bolas de soldadura en las tablillas.

- $H_1$ : El efecto de la variación en la temperatura de soldadura, la velocidad y distancia de soldado y sus interacciones tienen efecto significativo en la aparición de bolas de soldadura en las tablillas.
- Por lo tanto, se rechaza  $H_0$ , como se puede observar la variable de entrada temperatura de soldadura, y se acepta  $H_1$ .
- Decisión: con un valor p (0.991) mayor a 0.05 en todas sus variables de entrada y sus interacciones.

La conclusión es que con un nivel de significancia de 0.05 existe evidencia estadística para no rechazar  $H_0$ . El efecto en la variación en la temperatura de soldadura, la velocidad y distancia de soldado, así como las interacciones entre ellas no son significantes en la aparición de bolas de soldadura.

En concordancia con la secuencia de la matriz causa y efecto y debido a que no se ha encontrado qué factor es significativo en la aparición de bolas de soldadura, se tomó la decisión de continuar con el siguiente factor de la tabla para realizar el diseño de experimentos 4.

#### DISEÑO DE EXPERIMENTOS 4

Con base en los resultados anteriores del software de Minitab en que no fueron significantes los parámetros que se variaron (distancia de contacto, temperaturas de soldadura y de precalentado), se decidió continuar con los factores priorizados del diagrama de causa y efecto para elaborar otro diseño de experimento con el fin de encontrar la variable que está generando las bolas de soldadura. Por esta razón se tomó la variable *material*, ya que la empresa tiene dos proveedores de la tablilla electrónica (fabricada en los Estados Unidos y en China). Este diseño se llevó a cabo en dos réplicas.

En ambas réplicas se trabajó con 100 tablillas del proveedor chino y con 100 tablillas del proveedor estadounidense. En ambos casos, los parámetros fueron temperaturas de soldadura de 320 °C y de precalentado de 400 °C, así como distancia de contacto de 1 mm y 2 mm/s.

Una vez terminada la revisión, se ordenaron los datos para analizar el experimento en Minitab con un diseño Tasa de Poisson de dos muestras en el que se obtuvo el siguiente resultado (Tablas 4 y 5).

TABLA 4  
TASA DE POISSON DE DOS MUESTRAS (RÉPLICA 1)

MUESTRA	N	TOTAL DE OCURRENCIAS	TASA DE LA MUESTRA
Proveedor chino	100	12	0.12
Proveedor de EUA	100	0	0.00

TABLA 5  
TASA DE POISSON DE DOS MUESTRAS (RÉPLICA 2)

MUESTRA	N	TOTAL DE OCURRENCIAS	TASA DE LA MUESTRA
Proveedor chino	100	12	0.12
Proveedor de EUA	100	1	0.01

Hipótesis alterna  $H_1: \lambda_1 - \lambda_2 \neq$

DIFERENCIA ESTIMADA	IC DE 95 % PARA LA DIFERENCIA
0.11	(0.0393325, 0.180668)

Con base en el resultado del experimento de Poisson de dos tasas, se puede observar que sí existe diferencia entre las dos tablillas y que china es la que tiene más ocurrencias en la generación de bolas de soldadura.

#### Comprobación de resultados

Para comprobar el experimento anterior se propuso hacer una corrida con más piezas de la tablilla fabricada en los Estados Unidos para asegurar que esta no tiene problemas en la generación de bolas de soldadura. Esto se hizo con los parámetros de proceso con los que se trabaja en la línea de producción diariamente.

De acuerdo con los datos obtenidos no se encontró ninguna pieza con el defecto de bolas de soldadura. En la corrida con tablilla china apareció nuevamente el problema de bolas de soldadura, razón por la cual se mandaron piezas a revisión de corte transversal para establecer cuál es la diferencia entre estas dos tablillas.

Estos fueron los resultados de lo que se observó en la tablilla china. En el análisis del orificio pasado de las piezas donde se tiene el problema de bolas se observó que los orificios tienen rugosidad, característica que provoca que se quede encapsulado el flux en estas ranuras y al contacto con la soldadura se crean pequeñas explosiones que generan estas bolas y que saltan fuera del orificio, creando así el riesgo de que pueda crearse un corto de soldadura entre terminales de componentes

de los circuitos integrados o de SMT (Surface Mount Technology). En la Figura 6 se muestran dos imágenes obtenidas de estas piezas.

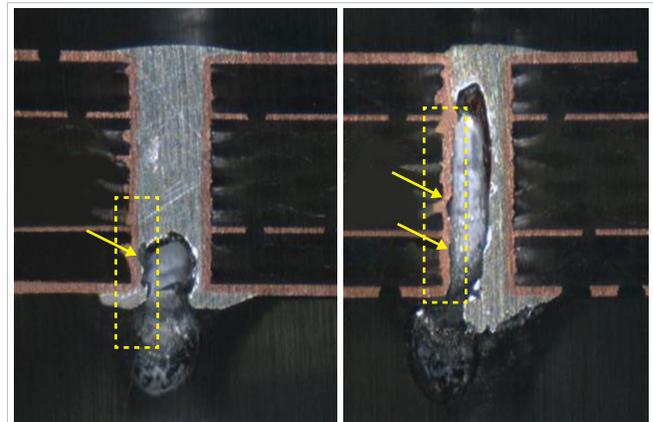


Figura 6. Cortes transversales. Las flechas apuntan a la rugosidad en las paredes de los orificios pasados.

Con los resultados de corte transversal se llegó a la conclusión que las tablillas del proveedor chino tienen problemas de calidad por la variación en la rugosidad de los orificios pasados.

Con base en este hallazgo, se estableció comunicación con el proveedor de las tablillas con defecto, notificándole los resultados que arrojaron los diseños de experimentos y el estudio de corte transversal realizado a las tablillas, para su retroalimentación y en espera de la revisión de sus procesos.

Después de recibir la información del encargado de este proyecto, el proveedor revisó sus procesos para investigar la causa de la rugosidad de los orificios pasados en sus tablillas. El proveedor realizó un reporte que hizo llegar al equipo del proyecto, denotando los siguientes resultados obtenidos de la investigación que llevó a cabo en sus procesos:

- Se cambió el tipo de cortador que estaba utilizando para maquinar los orificios de las PCB: era uno de carburo de 4 filos o 4 labios y se sustituyó por uno de 2 filos.
- Se elevó la velocidad de corte en el equipo que hace los orificios en las tablillas.

#### Estimación de parámetros

Con los resultados del corte transversal, se reunió el equipo para diseñar un plan de trabajo con el fin de

buscar los parámetros ideales con los que el área de producción pueda trabajar con los dos proveedores.

#### EXPERIMENTO 5 PARA ESTIMAR LOS PARÁMETROS IDEALES

Con el mismo procedimiento de los experimentos anteriores, se decidió trabajar con los primeros factores de la matriz de causa y efecto. Se seleccionó el de temperatura de soldadura, variándola a 340 °C.

El resultado del experimento no fue el deseado, pues de 200 piezas que se metieron a proceso 63 de ellas salieron con defecto.

#### EXPERIMENTO 6 PARA ESTIMAR LOS PARÁMETROS IDEALES

Para este experimento se trabajó con el parámetro temperatura de precalentado a 440 °C con tablillas de los dos proveedores. El equipo de ingeniería preparó y armó las piezas que se procesaron en la línea 1, así como la identificación de estas y la revisión y validación de los equipos fue hecha por el departamento de calibración.

Todas las piezas fueron empaquetadas en bolsas antiestáticas y llevadas a su revisión en la máquina de rayos X. Los resultados obtenidos de la experimentación se muestran en las Tablas 6, 7 y 8.

Con estos resultados se hicieron corridas para corroborar los datos obtenidos con el factor de 440 °C en precalentado. La corrida en la primera fase fue con 600 piezas de ambos proveedores sin encontrar bolas de soldadura, en la segunda fase se corrió todo un día de producción con los mismos resultados y en la tercera y definitiva fue un mes completo con el material de los dos proveedores y con los mismos parámetros, teniendo un mes libre de este defecto.

Como seguimiento al experimento seis sin bolas de soldadura, el equipo se reunió para evaluar los resultados obtenidos y dar continuidad a la segunda fase del experimento. Ahí se definió lo siguiente: día de la corrida del experimento (27 de septiembre de 2021), turno (1.º), cantidad de piezas a procesar (600), proveedor (ambos), equipo para armado de tablillas (Ingeniería y Producción), empaquetado de tablillas procesadas, revisión de tablillas en máquina de rayos X (4 de octubre) y análisis de resultados de rayos X.

Los resultados observados en esta segunda fase del experimento 6 fueron mejores de los esperados, como se muestran en las Tablas 6, 7 y 8. De las 600 piezas, revisadas al 100 % en rayos X, solo una tuvo una bola de soldadura de 0.45 mm de diámetro que, de acuerdo con los criterios de calidad del IPC y de la empresa, es considerada pieza buena.

Con estos resultados, el equipo tomó la decisión de mandar a pruebas de funcionalidad y destructivas 50 piezas de esta corrida para su valoración, ya que esta es una corrida especial con la temperatura de precalentado fuera de especificación de proceso y en búsqueda de los parámetros ideales para utilizar las tablillas de los dos proveedores sin tener que estar segregando las del proveedor chino y procesarlas aparte de las del proveedor de los Estados Unidos con diferentes parámetros para cada uno, ya que esto implicaría pérdida de tiempo para que se establezcan las temperaturas de acuerdo a cada proveedor.

La otra decisión que tomó el equipo es hacer una corrida más grande también con los dos proveedores. Se propuso correr todo un turno de producción sin intervención del departamento de ingeniería en el armado de las tablillas y que el proceso se dé en el flujo de un día de trabajo. Las 50 piezas que se enviaron para las pruebas previamente mencionadas fueron identificadas individualmente para que los resultados de funciona-

TABLA 6  
ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS IDEALES

MUESTRA	N	TOTAL DE OCURRENCIAS	TASA DE LA MUESTRA
Buena / Mala	100	1	0.001
Buena / Mala	100	0	0.00

Prueba  
Hipótesis nula  $H_0: \lambda_1 - \lambda_2 = 0$   
Hipótesis alterna  $H_1: \lambda_1 - \lambda_2 \neq 0$

TABLA 7  
PRUEBA DE HIPÓTESIS

MÉTODO	VALOR DE Z	VALOR p
Exacta		1.000
Aproximación normal	100	0.317

TABLA 8  
ESTIMACIÓN DE LA DIFERENCIA

DIFERENCIA ESTIMADA	IC DE 95 % PARA LA DIFERENCIA
0.01	(-0.0095996, 0.0295996)

lidad y destructivas que se obtengan fueran fáciles de identificar.

Como se había acordado en la reunión anterior del equipo, en la tercera fase del experimento 6 se trabajó todo un turno con tablillas de los dos proveedores con los mismos parámetros de la corrida previa, en lo cual participó personal de producción para procesar las tablillas de acuerdo con las condiciones con las que se labora diariamente.

Las piezas elaboradas durante el primer turno fueron 2050 y todas pasaron por el proceso de revisión en la máquina de rayos X al 100 %, la cual cuenta con un software previamente cargado con las imágenes de los diferentes modelos que se trabajan en la línea de producción. Al momento de la revisión de las diferentes áreas de la PCB, el equipo compara lo que debe estar y lo que no debería estar en las imágenes. Cuando se detecta alguna anomalía en las imágenes (escoria, bolas de soldadura o insuficiencias de soldadura), se ejecuta el sistema de medición con el que está habilitado el sistema del software. Si en la medición se obtiene una medida mayor a la permitida, la máquina la detecta como pieza mala o no conformante. En este proceso, la máquina toma la decisión; no interviene el ser humano.

De estas 2050 piezas no se tuvo ningún defecto de bolas de soldadura; fue una corrida sin defectos. Los resultados obtenidos (los de las tres fases del experimento 6 y los de las piezas que se mandaron a pruebas de eficiencia y destructivas) son la base para sacar conclusiones y que la empresa tome las mejores decisiones con respecto al uso de las tablillas del proveedor chino o si se rechazan y se regresan al proveedor.

A continuación, se mencionan algunos otros resultados y aportaciones logrados al cierre del proyecto.

Se encontró la causa raíz del problema de bolas de soldadura, se eliminó el riesgo de falla en campo de las piezas por este defecto, se lograron parámetros de precalentado robustos y confiables, se logró una mejora en el proceso de la materia prima del proveedor, se definió un proceso robusto para trabajar con los dos proveedores de la tablilla con los mismos parámetros.

También, se eliminó el riesgo de falla en campo de las piezas por este defecto, se lograron parámetros de precalentado robustos y confiables, se consiguió una me-

jora en el proceso de la materia prima del proveedor, se redujo el tiempo de ciclo por pieza de 10 a 8 s.

Además, se redujeron tres operadores en el proceso (12 000 USD de ahorro anual), se eliminó el uso de un proceso de inspección de rayos X y se redujo el *scrap* (276 200 USD de ahorro anual).

Como ya se mencionó, el precalentado no era la fuente significativa de la aparición de bolas de soldadura. El factor significativo que arrojó el diseño de Poisson de 2 tasas fue la tablilla del proveedor chino el que tuvo todas las discrepancias en los orificios pasados. Específicamente, se encontró rugosidad en las paredes de los orificios, causada por la variación en la velocidad de perforación de la PCB.

El análisis de capacidad de Poisson, utilizando los datos de la última corrida de validación con PCB de los dos proveedores y con la modificación en los parámetros de precalentado en 440 °C, dio como resultado que la capacidad del proceso resultó con una tasa de defectos de 0.0046, con límites de confianza de 0.0001 y 0.0258. La tasa estimada después de la mejora, así como los respectivos límites de confianza, presentaron una disminución considerable, dado que la tasa de fallas al inicio del proyecto fue estimada en 0.055, con límites de 0.028 y 0.097, lo cual demuestra el impacto de la mejora lograda con la realización del proyecto. Por otra parte, aunque la tasa de fallas inicial resultaba en realidad pequeña, la importancia del proyecto radica en la seguridad y confiabilidad del producto, dado que cualquier defecto o causa de falla latente en las piezas en campo sería muy costosos y afectaría notablemente la reputación de la empresa.

#### IV. CONCLUSIONES

El factor temperatura resultó ser no significativo en la aparición de las bolas de soldadura en las tablillas electrónicas. Se experimentó también con otros factores, como el de distancia de soldado, variando las dimensiones en 1 mm, 0.6 mm y 0.2 mm, y, de acuerdo con la tabla de varianza de Minitab, el valor de  $p$  (0.482) fue mayor que el valor de  $\alpha$  de 0.05, comprobándose que la distancia tampoco era significativa. Dado que no se había encontrado el parámetro o la variable que estaba impactando negativamente, se decidió hacer una interacción de valores de temperatura de soldadura (300 °C y 340 °C) y velocidad de soldado (1 y 3 mm/s) en el experimento 3

con resultados nada favorables con respecto a encontrar el factor que provocó este defecto (el valor p fue de 0.998 mayor de 0.05). Por lo tanto, la temperatura, velocidad o la interacción resultaron no significantes o influyentes en la generación de bolas de soldadura.

En el experimento 4 se trabajó con la variable de material de los dos proveedores de las tablillas y, de acuerdo con el resultado de un diseño Tasa de Poisson de dos muestras con el software Minitab, se observó una diferencia entre las dos tablillas, siendo las del proveedor chino con las que se tuvo el total de ocurrencias en la aparición de bolas de soldadura. Por lo tanto, se diseñó un experimento más solo con piezas del proveedor de los Estados Unidos, dando como resultado cero defectos.

También, en el experimento 6 se obtuvieron buenos resultados elevando la temperatura de precalentado por arriba del rango de permitido para hacer pruebas y buscar el poder trabajar con los dos proveedores de tablillas. Por esta razón, se decidió dejar estos parámetros apoyándose en la aceptación del cliente para trabajar con estos, con sus respectivas pruebas de aseguranza de calidad de las tablillas procesadas. En lo que respecta a futuros experimentos, queda pendiente uno con el método de Taguchi, que no fue posible ejecutar por limitaciones de tiempos y material para este diseño.

## REFERENCIAS

- [1] OIT, “La fabricación de componentes electrónicos para las industrias de las tecnologías de la información: El cambio de las necesidades con respecto a la mano de obra en una economía mundializada”, ILO.org, 2007. [En línea]. Disponible en: [https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed\\_dialogue/---sector/documents/meetingdocument/wcms\\_161175.pdf](https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed_dialogue/---sector/documents/meetingdocument/wcms_161175.pdf). (Acceso: nov., 14, 2020).
- [2] G. D. Asensi et al., *Prácticas de Circuitos y Funciones Electrónicas*, 1.ª ed. Cartagena: CRAI UPCT Ediciones, 2019.
- [3] A. Blanco. “Materiales de construcción de las tarjetas electrónicas”. Altium.com. <https://resources.altium.com/es/p/materiales-de-construccion-de-las-tarjetas-electronicas> (acceso: feb. 20, 2021).
- [4] TMS. “Soldadura por ola”. [tecnologiademontajesuperficial.es](http://tecnologiademontajesuperficial.es). <https://tecnologiademontajesuperficial.es/t/>

[SOLDADURA-SMT-POR-OLA.htm](#) (acceso: mar. 2, 2021).

- [5] R. J. Herrera y T. J. Fontalvo, *Seis Sigma. Métodos Estadísticos y sus Aplicaciones*, 1.ª ed. Pro Quest, 2016.
- [6] E. A. Sánchez, “Seis Sigma, filosofía de gestión de la calidad: Estudio teórico y su posible aplicación en el Perú”, tesis de licenciatura, Fac. de Ing., Univ. de Piura, Perú, 2005.
- [7] R. A. Gómez y S. Barrera, “Seis sigma: un enfoque teórico y aplicado en el ámbito empresarial basándose en información científica”, rep. de inv., 2011. [En línea]. Disponible en: <http://repository.unilasallista.edu.co/dspace/bitstream/10567/515/1/13.223-242.pdf>
- [8] M. Manzano y V. G. Soler, “Lean manufacturing 5S implantation”, *3C Tecnol.*, vol. 5, no. 4, pp. 16-26, 2017, doi: 10.17993/3ctecno.2016.v5n4e20.16-26.
- [9] R. C. Garza, C. N. González, E. L. Rodríguez y C. M. Hernández, “Aplicación de la metodología DMAIC de Seis Sigma con simulación discreta y técnicas multicriterio”, *Métodos Cuantitativos para la Econ. y la Empresa*, vol. 22, pp. 19-35, 2016, doi: 233148815002.
- [10] R. I. García, P. Parroquín, R. Romero, R. D. Molina, I. Canales y A. Garza, “Reducción de costos en pequeñas y medianas empresas con un enfoque Seis Sigma”, *CULCYT*, vol. 12, no. 57, pp. 352-361, 2016, disponible en: <https://erevistas.uacj.mx/ojs/index.php/culcyt/article/view/793>.
- [11] H. Ponce, D. Cornejo, J. Molina y F. J. López, “Implementación de la metodología seis sigma para mejoramientos de troqueles de alta velocidad”, *CULCYT*, vol. 12, no. 56 (esp. no. 1), pp. 165-177, 2015, disponible en: <https://erevistas.uacj.mx/ojs/index.php/culcyt/article/view/811/774>.
- [12] M. A. Polendo, P. C. Parroquín, R. Noriega y R. Romero, “Mejoramiento de tiempos de servicio a usuarios de laboratorios de una institución de educación superior”, *CULCYT*, vol. 13, no. 59 (esp. no. 1), pp. 38-49, 2016, disponible en: <https://erevistas.uacj.mx/ojs/index.php/culcyt/article/view/1445>.
- [13] M. Rodríguez, J. Molina, L. F. Fernández y N. Alba, “Aplicación de la Metodología Seis Sigma para controlar

los parámetros significativos en la producción de un guante de nylon con recubrimiento de látex”, *CULCYT*, vol. 13, no. 58 (esp. no. 1), pp. 271-283, 2016, disponible en: <https://revistas.uacj.mx/ojs/index.php/culcyt/article/view/1436>.

- [14] L. A. Mireles y F. J. Estrada, “Aplicación de la metodología Lean Six Sigma para la mejora de procesos. Caso de estudio en una línea de ensamble de bombas de gasolina”, *CULCYT*, vol. 14, no. 63 (no. esp.), pp. 71-87, 2017, disponible en: <https://revistas.uacj.mx/ojs/index.php/culcyt/article/view/2195>.
- [15] I. Navarro, G. Ibarra y J. G. Palacios, “Análisis con enfoque holístico e implementación de mejora a la línea de producción BTS”, *CULCYT*, vol. 12, no. 56 (esp. no. 1), pp. 152-164, 2015, disponible en: <https://revistas.uacj.mx/ojs/index.php/culcyt/article/view/810>.
- [16] H. Arévalo y E. Paolo, “Aplicación de la metodología seis sigma para aumentar la exactitud de registro de inventario en una empresa de elaboración de bebidas”, 2019”, Universidad Nacional de Ingeniería, 2019. [En línea]. Disponible en: <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/20.500.14076/18470>
- [17] J. Chávez, “Propuesta de aplicación de la metodología de Seis Sigma en el proceso de productivo de lavavajillas de una empresa de consumo masivo para reducción de pérdidas e incremento de su eficiencia”, tesis de licenciatura, Univ. Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC), 2022.
- [18] S. M. Castro-Escobar, L. Jaimes-Cerveleón, Z. Peñaranda-Ayala y Z. Nieto-Sánchez, “Seis sigma para la solución de problemas de la calidad. Caso de estudio proceso de envasado de café molido”, *Mundo FESC*, vol. 11, no. s4, pp. 170-189, 2021.
- [19] J. Chávez-Medina, N. A. Santiesteban-López, J. L. Carmona-Silva e I. Muñoz-Montero, “Efecto del mantenimiento industrial, maquinaria y equipo, mano de obra, métodos de trabajo y materia prima con respecto al nivel de Six Sigma en una Pyme: Caso Bloquera Medina del municipio de San Pedro Cholula, Puebla”, *Revista Ingeniería Industrial*, vol. 2, no. 6, pp. 34-44, 2018.
- [20] J. Chávez, N. A. Santiesteban, F. O. González, M. C. Fierro-Xochitotl y V. G. Luna, “Optimización del proceso de barrenado para el incremento de productividad y reducción de rechazos a través de la metodología DMAIC: Caso empresa del sector automotriz”, *Estudios de Administración*, vol. 29, no. 1, pp. 142-164, 2022, doi: [10.5354/0719-0816.2022.66714](https://doi.org/10.5354/0719-0816.2022.66714).
- [21] S. Joshy, V. Verdingovas, M. Jellesen y R. Ambat, “Simulation of electronic circuit sensitivity towards humidity using electrochemical data on water layer”, *2015 IEEE 17th Electronics Packaging and Technology Conference (EPTC)*, 2015, pp. 1-5, doi: [10.1109/EPTC.2015.7412281](https://doi.org/10.1109/EPTC.2015.7412281).
- [22] M. N. Guerrero, “Optimización del proceso de soldeo por ola mediante diseño de experimentos”, tesis de maestría, Centro Universitario Querétaro, Querétaro, Qro., nov. 2017.
- [23] M. Arra, D. Shangguan, S. Yi, R. Thalhammer y H. Fockenberger, “Development of lead-free wave soldering process”, en *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, vol. 25, no. 4, pp. 289-299, Oct. 2002, doi: [10.1109/TEPM.2002.807731](https://doi.org/10.1109/TEPM.2002.807731).
- [24] J. Tobón, Á. Zapata, A. Orozco, Á. Baena, C. Serna y H. Sánchez, “Fabricación y caracterización de la aleación Au-Si en composiciones próximas al eutéctico”, *Rev. Colombiana de Materiales*, vol. 2, pp. 1-10, 2012, disponible en: <https://revistas.udea.edu.co/index.php/materiales/article/download/11282/10326/34612>.
- [25] A. A. Bonillo, “Nuevos disolventes eutécticos quirales en organocatálisis asimétrica”, tesis de maestría, Univ. de Alicante, Alicante, Esp., 2020.
- [26] B. Salazar. “Las siete herramientas básicas de la calidad”. *IngenieriaIndustrialOnline.com*. <https://www.ingenieriaindustrialonline.com/gestion-de-calidad/las-siete-herramientas-de-la-calidad/> (acceso: mar. 10, 2021).
- [27] J. A. Corrales. “Cómo escuchar la voz del cliente e impulsar tu negocio con ello”. *RockContent.com*. <https://rockcontent.com/es/blog/voz-del-cliente/> (acceso: mar. 25, 2021).
- [28] E. Delahoz-Domínguez, R. Zuluaga-Ortiz, A. Periñan-Luna y S. Mendoza-Brand, “Un enfoque de Seis Sigma para evaluar la calidad de la educación superior en Colombia”, *Revista de Métodos Cuantitativos para la Economía y la Empresa*, vol. 33, pp. 386-407, 2022, doi: [10.46661/revmetodoscuanteconempresa.5313](https://doi.org/10.46661/revmetodoscuanteconempresa.5313)