

# Ingeniería Industrial

Revista de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura • Universidad de Lima  
Año XX • N.º 36 • Enero-diciembre 2018 • ISSN 1025-9929 • Lima, Perú



UNIVERSIDAD DE LIMA • FONDO EDITORIAL

# Ingeniería Industrial

Revista de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura • Año XX N.º 36, 2018 • ISSN 1025-9929



FONDO EDITORIAL

---

*Ingeniería Industrial*

Revista de la Facultad de Ingeniería Industrial y Arquitectura  
de la Universidad de Lima  
Carrera de Ingeniería Industrial  
Núm. 36, noviembre del 2018

Director: Nicolás Francisco Salazar Medina  
Editora: María Teresa Noriega Aranibar

Comité Editorial:

Juan Jaramillo Posada (Adelphi University, Estados Unidos)  
Sergio Caporali Filho (Universidad de Puerto Rico, Puerto Rico)  
Gonzalo Redondo de Cardeno (CEU Universities, España)  
Adolfo Sarmiento Vásquez (Universidad de La Sabana, Colombia)  
Gabriela Gallardo (Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Argentina)  
Marcos Ruiz Ruiz (Universidad de Lima, Perú)  
Silvia Ponce Álvarez (Universidad de Lima, Perú)

© Universidad de Lima  
Fondo Editorial  
Av. Javier Prado Este 4600,  
Urb. Fundo Monterrico Chico, Lima 33  
Apartado postal 852, Lima 100, Perú  
Teléfono: 437-6767, anexo 30131  
fondoeditorial@ulima.edu.pe  
www.ulima.edu.pe

Edición, diseño y carátula: Fondo Editorial de la Universidad de Lima

Imagen de portada: DONOT6\_STUDIO/Shutterstock.com

Publicación anual  
Impresa en el Perú

Los trabajos firmados son de responsabilidad de los autores. Queda prohibida la reproducción total o parcial de esta revista, por cualquier medio, sin permiso expreso del Fondo Editorial.

ISSN 1025-9929

Hecho el depósito legal en la Biblioteca Nacional del Perú n.º 95-0832

# Índice

Presentación	7
Gestión de la producción / Production Management	
Análisis de desempeño del proceso de cucharas en un proceso de sinterizado mediante el <i>software</i> SPSS para identificar su eficiencia dentro de una planta de sinterizado de polvos metálicos	13
<i>Marco Antonio Díaz Martínez, Jesús Gómez Castellanos, Argia Lili Paz Molina, Edgar Jearvavi Vázquez Moreno, Alma Leticia Cruz Méndez</i>	
Mejora en la eficiencia y en el ambiente de trabajo en Texgroup S.A.	35
<i>Jhosselyn Herrera</i>	
Diseño de un método para la determinación de las medidas antropométricas para ser usadas en el tallaje de la población peruana	67
<i>Nicolás Salazar Medina, Marco Henrich Saavedra, Patricia Larios Francia, Martín Reaño Vera, George Schofield</i>	
Calidad y medioambiente / Quality and Environment	
Una evaluación de calidad para soluciones obtenidas a partir de variaciones algorítmicas del método Multi-Start	87
<i>Eduardo Redondo</i>	
Estudio de la conicidad de postes de madera de eucalipto ( <i>Eucalyptus globulus</i> Labill) y pino amarillo ( <i>Pinus sp.</i> ) utilizados en el Perú para la electrificación rural	109
<i>Julio César Canchucaya Rojas, Leonidas Miguel Castro, Francisco García Fernández</i>	

Metodología para determinar la calidad de agua del río Rímac para uso en amasado y curado de concreto <i>Rosa Victoria Altamirano Medina, Ricardo Terreros Lazo</i>	123
Optimización de los costos de muestreo en la manufactura de <i>shampoo</i> y acondicionador <i>María del Carmen Rosas Guerrero, Emilio Pérez Pacheco</i>	137
Ingeniería de negocios / Business Engineering	
Propuesta teórica: degradación de energía en los niveles jerárquicos de toda organización <i>Salvatore Tarantino-Curseri</i>	167
Efecto de la inversión pública en la infraestructura vial sobre el crecimiento de la economía peruana entre los años 2000-2016 <i>Carlos Arturo Palacios Tovar</i>	197
Proyectos empresariales industriales / Industrial Business Projects	
Factores para el procesamiento de la manzanilla común en la industria peruana de infusiones <i>Elio Luis Aliaga Paredes, José Antonio Acevedo Jara</i>	213
Ciencia y tecnología / Science and Technology	
Sistema de locomoción para discapacitados, automatizado con un procesador MyRIO acoplado en una silla de ruedas <i>Fabrizio Paredes Larroca, Juan Carlos Goñi Delión</i>	243
Modelamiento y control de un sistema de tráiler autónomo <i>Wilder Medina Medina</i>	257
Autores	285
Información para los colaboradores y normas para la presentación de trabajos	295

# Presentación

La Carrera de Ingeniería Industrial de la Universidad de Lima tiene el agrado de presentar este año un nuevo número de su revista indexada *Ingeniería Industrial*. Lo hace en cumplimiento de su función de generar conocimiento científico en las diferentes áreas de la ingeniería industrial, tales como Gestión de la producción, Calidad y medioambiente, Ingeniería de negocios, Proyectos empresariales e industriales, y Ciencia y tecnología.

Con este número se cumplen 20 años de continuo esfuerzo, tanto del equipo editorial de la revista como de los reconocidos académicos y profesionales nacionales y extranjeros, quienes con su desinteresada colaboración han hecho posible la consecución de este logro.

La Carrera de Ingeniería Industrial de la Universidad de Lima, en línea con el lema de la universidad, “Scientia et Praxis”, busca desarrollar no solo la gestión académica sino también la práctica, para lo cual ha implementado centros de innovación y desarrollo de proyectos. El Centro de Innovación Tecnológica, el Centro de Innovación Textil y el Centro de Desarrollo Sostenible están al servicio de la comunidad y de la investigación, y esperan ser fuentes generadoras de artículos científicos, no solo para esta revista sino para otras más.

El presente número recoge investigaciones relacionadas con el área de Gestión de la producción. En una de ellas hay un ejemplo del uso de un *software* estadístico para determinar el grado de eficiencia de un proceso productivo minero, lo que es muy interesante, dada la importancia de dicho sector en la economía de muchos países. En otro artículo, se muestra el uso de herramientas de mejora continua en una empresa textil con el objetivo de hacer agradable el ambiente laboral e incrementar la competitividad para buscar también mejoras medioambientales.

Un estudio relacionado con el sector textil es el que desarrolla un método para determinar medidas antropométricas que permitan establecer las tallas de una población, con el fin de satisfacer al cliente y disminuir posibles costos por devoluciones en la industria de la confección.

Las matemáticas aplicadas al área de calidad y medioambiente se observan en un artículo sobre el desarrollo de un algoritmo que sirva para evaluar la calidad de las soluciones para diferentes escenarios productivos. La estandarización de un producto como base importante de la calidad se encuentra en el estudio de las características de conicidad de los postes rurales a ser usados en los proyectos de electrificación rural.

La importancia del cuidado del medioambiente y, sobre todo, del agua como fuente esencial de la vida, e inclusive como recurso productivo, se encuentra en una investigación que analiza químicamente aguas fluviales para determinar si estas se pueden utilizar para la elaboración de concreto.

En el área de ingeniería de negocios, hay un novedoso estudio que compara teóricamente la degradación de energía que se da en la termodinámica con las que se dan en los diferentes niveles jerárquicos de toda organización.

La tecnología aplicada a la búsqueda de solucionar problemas de personas con discapacidad la encontramos en un artículo referido al desarrollo de un sistema de locomoción automatizado para personas discapacitadas.

De esa manera, con la satisfacción del deber cumplido por parte de los autores y el equipo editorial, y siempre con el objetivo de haber contribuido a la difusión del conocimiento, ponemos a su disposición la presente edición de la revista *Ingeniería Industrial* de la Carrera de Ingeniería Industrial de la Universidad de Lima.

Nicolás Salazar Medina  
*Director*

# Introduction

The Industrial Engineering Program of the University of Lima is pleased to present this year a new issue of its indexed journal called *Ingeniería Industrial*. This is performed in accordance with its objective of generating scientific knowledge in the different areas of industrial engineering such as Production Management, Quality and Environment, Business Engineering, Business and Industrial Projects, and Science and Technology.

This last issue represents 20 years of continuous effort of both the journal editorial team and the recognized national and international scholars and professionals who have generously collaborated in achieving this goal.

In line with the university motto “*Scientia et Praxis*”, the Industrial Engineering Program of the University of Lima aims to develop not only academic management but also practice, for which it has implemented project innovation and development centers. The Technological Innovation Center, the Textile Innovation Center and the Sustainable Development Center serve the community and research needs, and expect to become the driving force of scientific articles not only for this journal but also for others.

This issue covers research related to the Production Management area. One of them contains an example of the use of a statistical software to determine the degree of efficiency of a mining production process, which is very interesting given the importance of said sector in the economy of many countries. Another article shows how tools for continuous improvement are used in a textile company in order to make the work environment pleasant, increase competitiveness, and improve the natural environment.

A textile sector-related study develops a method for determining anthropometric measurements that will establish the sizes of a population with a view to meeting customer needs and reducing possible costs for returns in the clothing industry.

Mathematics applied to the Quality and Environment area are observed in an article that discusses the development of an algorithm to be used for assessing the quality of solutions for different production scenarios. The standardization of a product as an important basis for quality is included in the study of the conicity of rural poles to be used in rural electrification projects.

The importance of caring for the environment, and especially caring for water as an essential source of life and even as a productive resource, is included in a research that conducts a chemical analysis of river water to determine whether it may be used for concrete production.

In the Business Engineering area, there is an innovative study that, based on theories, compares the degradation of the energy involved in thermodynamics with the one in the different hierarchical levels of any organization.

The technology applied to the solving of problems of disabled people is the topic of an article about the development of an automated locomotion system for people with disabilities.

In this manner, having the authors and editorial team fulfilled their mission, and having contributed to the dissemination of knowledge, we put at your disposal this issue of the *Ingeniería Industrial* journal of the Industrial Engineering Program of the University of Lima.

Nicolás Salazar Medina  
*Director*

Gestión de la producción

---

Production Management



# Análisis de desempeño del área de cucharas en un proceso de sinterizado mediante el *software* SPSS para identificar su eficiencia dentro de una planta de sinterizado de polvos metálicos

Marco Antonio Díaz Martínez\*, Jesús Gómez Castellanos\*, Argia Lili Paz Molina\*,  
Edgar Jearvavi Vázquez Moreno\*, Alma Leticia Cruz Méndez\*  
Instituto Tecnológico Superior de Pánuco. Veracruz, México.

Recibido: 12 de diciembre del 2017 / Aprobado: 11 de mayo del 2018

doi: 10.26439/ing.ind2018.n036.2448

**RESUMEN:** El presente trabajo consiste en identificar la eficiencia de un proceso de sinterizado en el área de cucharas de una planta minera. Los datos se analizaron con el software SPSS (Statistical Package for the Social Sciences), ya que esta herramienta cuenta con una flexibilidad de manejo de las variables de estudio, así como con los diferentes análisis estadísticos a los que se expusieron los datos analizados y las variables.

*Palabras clave:* administración de la producción – simulación por computadoras / sinterización / SPSS (programa de computadora) / eficiencia industrial / polvos metálicos

## Performance analysis of a sintering process ladle area using the SPSS software to identify its efficiency inside a metallic powder sinter plant

**ABSTRACT:** The present work involves identifying the efficiency of a sintering process ladle area of a mining plant. The data was analyzed with the SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) software since this tool is flexible about handling the study variables, and has the different statistical analyses to which the analyzed data and variables were exposed.

*Keywords:* production management / computer simulation / sintering / SPSS (computer program) / industrial efficiency / metallic powders

---

\* Correos electrónicos: marco.diaz@itspanuco.edu.mx, jesus.gomez@itspanuco.edu.mx, argia.paz@itspanuco.edu.mx, edgar.vazquez@itspanuco.edu.mx, alma.cruz@itspanuco.edu.mx

## 1. INTRODUCCIÓN

La pulvimetalurgia es un proceso de suma importancia, ya que su objetivo es cumplir con las especificaciones requeridas por una empresa dedicada al tratamiento de materiales mediante fundición. Dentro de una planta donde se lleva a cabo el proceso de sinterizado, su función es generar recubrimientos de material o la generación de materia prima para enviar a otra empresa que se dedicará a crear piezas mecánicas o una transformación con esta materia prima obtenida del proceso de sinterizado (manganeso, cobre, plomo, estaño, etc.), junto con la rebaba obtenida del proceso donde se remueve el excedente de la aleación que recibe el nombre de cepillado final y polvo de la misma aleación a fabricar.

La pulvimetalurgia o metalurgia de polvos es el proceso donde los metales en su estado inicial de polvo se compactan mediante el proceso de sinterizado para darles formas deseadas complejas y son calentadas hasta una temperatura por debajo del punto de fusión para formar una pieza sólida (Kalpakjia, 2008).

La fabricación de elementos y materiales se inicia con una mezcla de polvos metálicos, cerámicos o mezcla de ambos elementos con el lubricante y los aditivos. Esta mezcla se compacta dentro de un molde mediante la aplicación de presión y, después de este proceso, pasa al proceso de sinterizado como etapa final (Randall, 1989).

Luego de realizado el proceso de sinterizado, varias piezas son utilizadas puramente de acuerdo con sus propiedades mecánicas, como plasticidad, fragilidad, dureza, maleabilidad, etc., mientras que otras son expuestas a operaciones de acabado como mecanizado, calibrado, recubrimientos o tratamientos térmicos como nitruración, temple, entre otros.

En este trabajo se realizará un análisis completo del desempeño de los operadores que intervienen en el área de producción de cucharas en un proceso de sinterizado y de los resultados obtenidos en cada uno de los turnos de trabajo, con lo cual se determinará la eficiencia del área de las cucharas y el impacto que tiene con respecto al proceso completo de sinterización.

### 1.1 Proceso de sinterizado y proceso de cucharas

La metalurgia de polvos es una competencia muy importante con respecto a los procesos de fundición, forjado y maquinado o mecanizado,

en particular para partes relativamente complejas fabricadas con aleaciones de alta resistencia (Kalpakjia, 2008).

Los metales más utilizados en la metalurgia de polvos son hierro, cobre, aluminio, estaño, níquel, titanio y los metales refractarios, para las partes fabricadas en el proceso de sinterizado que es el último proceso.

En el proceso de cucharas, el cual se realiza dentro del proceso de sinterizado del material, donde las cucharas son unos contenedores cuya función es vaciar la mezcla que viene de las tolvas e inician la reacción de la mezcla, luego de haberse quemado el material, se procede al vaciado del material hacia los patios donde los trascabos transportan el material sinterizado al proceso de fundición.

## 1.2 Manufactura del polvo y sus características

La manufactura del polvo es muy importante y se debe trabajar bajo ciertas especificaciones, las cuales determinan ciertas características como las propiedades físicas y mecánicas de compactación. Estas especificaciones incluyen requerimientos sobre el tamaño, la forma y las estructuras de la partícula, y las áreas de las superficies.

### 1.2.1 Tamaño de partículas y su distribución

Se refiere a las dimensiones de los polvos donde las partículas se separan haciéndolas pasar a través de una serie de cribas de tamaños menores de malla. Los polvos se colocan sobre una criba de un cierto número de mallas y esta vibra para que las partículas pequeñas que caben en las aberturas caigan a la próxima criba.

Cuando las aberturas en la criba son menores que el recíproco del número de malla debido al espesor del alambre de la criba, se tiene que utilizar la siguiente fórmula (Groover, 2007).

$$PS = \frac{1}{MC} - t_w \quad (1)$$

Donde  $PS$  = Tamaño de partícula,  $MC$  = Número de malla,  $t_w$  = Grueso del alambre.

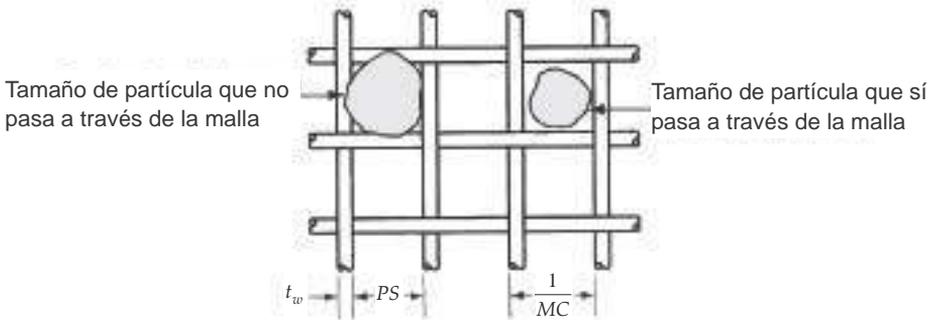


Figura 1. Malla de criba para seleccionar tamaños de partícula

Fuente: Groover (2007)

### 1.2.2 Forma y estructura interna de las partículas

En la siguiente figura, se muestran diferentes formas de polvos metálicos que pueden catalogarse en varios tipos. En estos tipos existen diferencias, tanto en forma como en tamaño; sin embargo, es importante mencionar que una manera útil de medir la forma es el aspecto, así como la dimensión máxima y la mínima de una partícula dada (Groover, 2007).



Figura 2. Formas ideales de partículas de metalurgia de polvos

Fuente: Groover (2007)

Para las partículas esféricas, tienen una razón de 1,0; en el caso de los granos aciculares, pueden ser de 2,0 a 4,0. Cabe mencionar que es de suma importancia conocer técnicas microscópicas para determinar las características de las formas.

### 1.2.3 Área superficial

En cuanto a cómo determinar el área superficial suponiendo que la forma sea una esfera totalmente, su área  $A$  y su volumen  $V$  están dados por:

$$A = \pi D^2 \quad (2)$$

$$V = \frac{\pi D^3}{6} \quad (3)$$

donde  $D$  = diámetro de la partícula esférica, mm (in). La razón de área a volumen  $A/V$  para una esfera se determina entonces por:

$$\frac{A}{V} = \frac{6}{D} \quad (4)$$

En general, la razón del área del volumen puede expresarse para cualquier forma como:

$$\frac{A}{V} = \frac{K}{D} \quad (5)$$

donde  $K$  es el factor de forma y  $D$  es igual al diámetro de una esfera de volumen equivalente al de una partícula no esférica, mm (in) (Groover, 2007).

## 2. REVISIÓN LITERARIA

A continuación, se mencionan algunas aportaciones de investigaciones que hacen referencia a las características, aplicaciones, comportamientos o influencias que tiene el proceso de sinterizado.

La simulación del proceso de compactación en molde de polvo metálico para la elaboración de una pieza pulvimetalúrgica, donde aplica el modelo de plasticidad modificado, es resuelta mediante el uso de softwares de cálculo como Abus. El resultado permite que el movimiento de punzones optimice la calidad de la pieza acabada; asimismo, se obtiene una distribución de tensiones en distintas zonas del molde (M. Prado, D. Riera, 1998).

Las nuevas demandas y solicitudes en el sector automotor están haciendo que se potencialicen los esfuerzos en aumentar las facilidades y reducir los costos de aceros sinterizados. Las propiedades finales de los componentes sinterizados y su costo dependen de dos factores principales: la densidad y el sistema de aleación (Campos, 2008).

La pulvimetalurgia es una tecnología bien conocida por el objetivo de producir piezas de forma amplia a bajo costo, pero constantemente con una pérdida de propiedades mecánicas si se la compara con tecnologías alternativas para obtener las mismas piezas o los mismos resultados. Sin embargo, mediante esta tecnología, también se pueden generar y obtener piezas de alta disponibilidad, de acuerdo con la ruta de procesado y el nivel de porosidad (Torralba, 2014).

Otra modalidad es la del prensado en caliente, en la que la masa de polvo sometida a compresión se calienta simultáneamente por el paso de una corriente de elevada intensidad (Montes, 2003).

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1 Metodología para producción de polvos

Existen varios métodos para poder producir polvos metálicos. La elección depende de los requisitos del producto final y de las operaciones que intervienen en el proceso de metalurgia, como producción de polvos, mezclas, compactación, sinterización y operaciones de acabado.

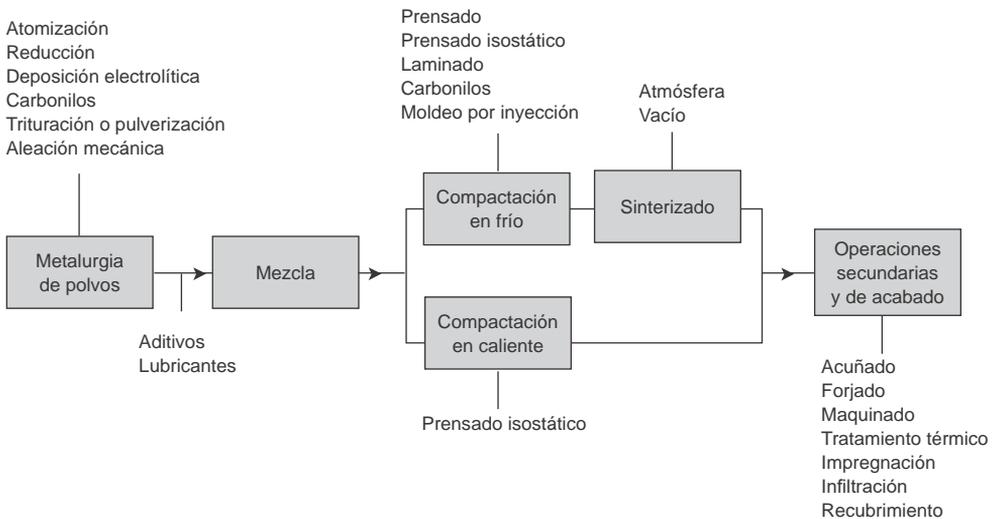


Figura 3. Procesos y operaciones comprendidas en la fabricación de partes mediante metalurgia de polvos

Fuente: Kalpakjian (2008)

El proceso de sinterizado es una operación de tratamiento térmico que se ejecuta mediante una compactación para unir partículas metálicas, lo cual genera un aumento en su fuerza y resistencia. Este proceso y tratamiento se lleva a cabo a temperaturas entre 0,6 y 0,8 del punto de fusión del metal. La fuerza básica que mueve el sinterizado es la reducción de la energía superficial (De Garmo, 2003).

En la actualidad, el proceso de sinterizado controla la atmósfera del horno que se va a trabajar, y el objetivo de tener controlada la atmósfera del horno es proteger la oxidación del material, proporcionar una reducción en la atmósfera para remover los óxidos existentes, y suministrar un ambiente carburizado para ayudar a la remoción de lubricantes y aglutinantes que son utilizados en el proceso de prensado.

La siguiente figura muestra, en una escala microscópica, los cambios que suceden durante el proceso de sinterizado de los polvos metálicos. El sinterizado implica el transporte de masa para la creación de cuellos de botella y transformarlos en granos de botella y transformarlos en granos.

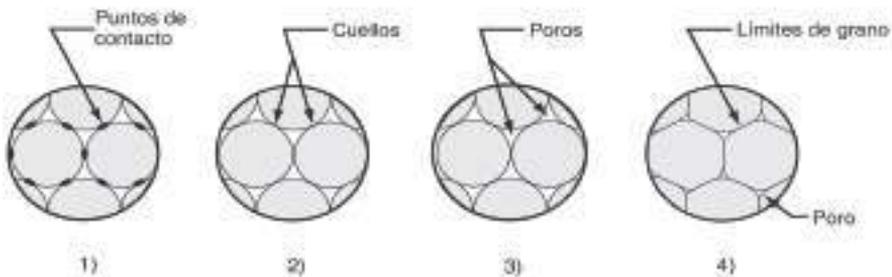


Figura 4. Escala microscópica de sinterizado: 1) la unión de las partículas se inicia en los puntos de contacto, 2) los puntos crecen para convertirse en cuellos de botella, 3) los poros se reducen de tamaño, y 4) se desarrollan límites de grano entre partículas

Fuente: Groover (2007)

### 3.2 Descripción del método

Para la realización del análisis del proceso, se tomaron muestras de desempeño en diferentes turnos de trabajo y se analizaron los tiempos muertos, tiempo de productivo directo, tiempo de espera en proceso, espera de material y mantenimiento.

Asimismo, se realizó un modelado con el software Flexsim del proceso completo de sinterizado, donde se mostraron cada uno de los elementos y las operaciones que intervienen en el proceso de sinterizado. Esto ayudó a poder entender la distribución de las materias primas y las dependencias entre procesos, así como la cantidad de operadores o supervisores que intervienen en el sistema (Beaverstock, 2011).

Los resultados del análisis de desempeño, así como los comparativos en cada turno de trabajo, se realizarán en el software de SPSS, ya que lo que se busca no solamente es analizar los datos sino también implementar nuevas tecnologías con el fin de ir evolucionando a una cultura de pensamiento de la industria 4.0.

En la siguiente figura, se puede visualizar el modelo de simulación de un proceso de sinterizado hecho con el software Flexsim, ya que servirá como apoyo para poder tener un mejor control de las operaciones que intervienen en todo el sistema y, sobre todo, ir impulsando el uso de nuevas tecnologías para la mejora continua del proceso de sinterizado en tiempo real.



Figura 5. Modelado en Flexsim del proceso de sinterizado  
Elaboración propia

### 3.3 Descripción de actividades por área

Tabla 1

*Descripción de las actividades que intervienen previamente al proceso mismo de sinterizado*

Área	Descripción de actividades
1. Área de conos de materia prima	Se necesita de un trascabo exclusivo para hacer las mezclas en el tercer turno únicamente y se trabaja aproximadamente 6 horas efectivas para formar 5 o 7 conos para los 3 turnos. Las prioridades son: desalojar los patios, llenar tolvas de recibo cuando esté por terminarse el material.
2. Tolva de recibo	Trabajan de 30 a 40 minutos en promedio para llenar la tolva de materia prima. Amplían la capacidad de la tolva a 60T. Estas tolvas usan un yucle para acercar la mezcla a la tolva de recibo y así evitar largos recorridos del trascabo y la pérdida del material en el camino.
3. Tolvas de materia prima	Trabajan al 30% o 40% de su capacidad, que son de 90 a 120 minutos, para llenar todas las tolvas. Una vez llenas, deben alcanzar para trabajar entre 4 y 5 horas continuas y volver a reabastecerse.
4. Kan ban	La capacidad a la que trabajan es a 60 toneladas/hora y 450 toneladas/turno 100 % y 360 toneladas/turno 80 %.
5. Mezclador	Tiene una capacidad de 60 toneladas/hora, 450 toneladas/turno 100 % y 380 toneladas/turno 80 %
6. Tolvas de día	Tienen capacidad de 20 toneladas c/u a 30 m o 40 toneladas c/u para tener una capacidad de 60 u 80 toneladas en una hora.
7. Cucharas	Transportan todas las demás operaciones, y esto significa que esta operación no debe tener desabastecimiento de material.

Elaboración propia

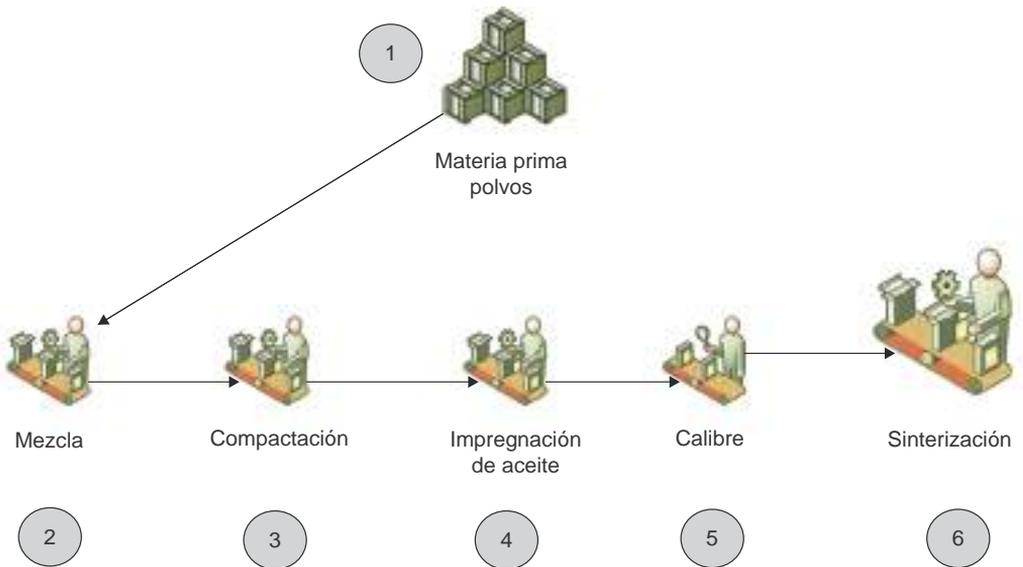


Figura 6. Áreas del proceso de sinterizado  
Elaboración propia

En este diagrama se puede visualizar la existencia de las operaciones que intervienen en el proceso de sinterizado y cómo este proceso es el último y más importante, ya que de este proceso dependerá la intervención de muchas empresas en la compra de la materia prima para la creación de piezas mecánicas y de nuevos elementos de sujeción.

#### 4. RESULTADOS

En las siguientes tablas se muestran los resultados del análisis por día de las cucharas y los resultados de los diferentes tiempos que se obtuvieron, como tiempo muerto (TM), tiempo productivo directo (TPD), tiempo de espera (TE), tiempo de alimentación del personal (TAP) y total (T). Los análisis fueron desarrollados en el *software* de estadística SPSS y la técnica que se utilizó para la toma de tiempos fue la de muestreo del trabajo al considerar una muestra de 12 días y realizar 36 observaciones completas en tres turnos de trabajo.

De acuerdo con los resultados obtenidos en el análisis de desempeño del primer turno (tabla 2), se puede ver que el porcentaje más alto es el tiempo productivo directo con un 53,85 % y el siguiente es el tiempo de espera (TE) con un 32,19 %. Este a su vez se analiza al encontrar tres fuentes principales (tabla 3). Se puede notar que el de mayor impacto es el tiempo de espera de proceso con un 76 % del total (32,19 %). De acuerdo con el primer turno analizado, hay un alto porcentaje de espera de proceso.

De acuerdo con los resultados obtenidos en el análisis de desempeño del segundo turno (tabla 4), se puede ver que el porcentaje más alto es el tiempo productivo directo con un 54,27 % que, en comparación con el primer turno, es ligeramente mayor, y que los tiempos de espera representan el segundo tiempo más elevado con 29,18 %. Al analizarlos, se observa que se debe a tres fuentes principales (tabla 5), y es el tiempo de espera de proceso el de mayor impacto con un 83,16 % del total (29,18 %). De acuerdo con el segundo turno analizado, se ve nuevamente que hay un alto porcentaje de espera de proceso.

Los tiempos de espera se generan principalmente por falta de material (en tolvas), mantenimientos por fallas en equipos o bandas y por falta del camión fuera de carretera o cargador frontal.

Según los resultados obtenidos en el análisis de desempeño del tercer turno, se puede ver que el porcentaje más alto es el tiempo productivo directo con un 50,85 % que, en comparación con el segundo turno, bajó un 3 %, y que los tiempos de espera representan el segundo tiempo más elevado con 33,54 %. Al analizarlos, encontramos que son dos las fuentes principales (tabla 7). El tiempo de espera de proceso es el de mayor impacto con un 84,42 % del total (33,54 %), y se nota que el tercer turno tiene el tiempo más alto de espera. Al comparar los tres turnos es observable que el tercer turno es el menos productivo y sus tiempos de espera más altos son en proceso, lo que indica una mayor falta de control y/o supervisión en las operaciones. En el caso de la actividad de mantenimiento, se presenta con un 0 % debido a que en este turno no se tiene personal de mantenimiento asignado y, en caso de que existiera alguna urgencia, se solicita apoyo a mantenimiento de otras áreas.



**Turno 2:**

Tabla 4  
Resultados totales de tiempos del turno 2

	Día 27/08 (min)	Día 28/08 (min)	Día 29/08 (min)	Día 30/08 (min)	Día 1/09 (min)	Día 2/09 (min)	Día 3/09 (min)	Día 4/09 (min)	Día 5/09 (min)	Día 6/09 (min)	Día 8/09 (min)	Día 9/09 (min)	Total	Valor porcentual
<b>TM</b>	28	28	22	40	90	59	24	72	45	50	89	46	593	10,3
<b>TPD</b>	300	256	300	266	340	306	207	208	269	225	192	257	3126	54,27
<b>TE</b>	122	166	128	144	20	85	219	170	136	175	169	147	1681	29,18
<b>TAP</b>	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	360	6,25
<b>T</b>	480	480	480	480	480	480	480	480	480	480	480	480	5760	100

Elaboración propia

Tabla 5  
Resultados en porcentaje de los tiempos de espera en turno 2

<b>Actividad</b>	<b>Total (min)</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>Porcentaje</b>
Proceso de sinterizado de las cucharas	1398	1	83
Espera de material	143	1	9
Mantenimiento de las cucharas	140	1	8
<b>Total</b>	<b>1681</b>	<b>3</b>	<b>100</b>

Elaboración propia

**Turno 3:**

Tabla 6  
Resultados totales de tiempos de turno 3

	Día 27/08 (min)	Día 28/08 (min)	Día 30/08 (min)	Día 1/09 (min)	Día 2/09 (min)	Día 3/09 (min)	Día 4/09 (min)	Día 5/09 (min)	Día 6/09 (min)	Día 8/09 (min)	Día 9/09 (min)	Día 10/09 (min)	Total	Valor porcentual
<b>TM</b>	19	66	66	31	50	40	41	46	56	43	36	64	558	9,7
<b>TPD</b>	285	303	303	321	298	273	210	228	204	177	144	183	2929	50,85
<b>TE</b>	146	81	81	98	102	137	199	176	190	249	270	203	1932	33,54
<b>TAP</b>	30	30	30	30	30	30	30	30	30	11	30	30	341	5,92
	480	480	480	480	480	480	480	480	480	480	480	480	5760	100

Elaboración propia

Tabla 7  
Resultados en porcentaje de los tiempos de espera en turno 3

Actividad	Total (min)	Frecuencia	Porcentaje
Proceso de sinterizado de las cucharas	1631	1	84
Espera de material	301	1	16
Mantenimiento de las cucharas	0	1	0
Total	1932	3	100

Elaboración propia

De acuerdo con los resultados de los tiempos de los tres turnos, se aplicó una distribución estadística de Erlang en percentiles para observar la separación que puede haber en los resultados de cada uno de los turnos analizados. A continuación, se muestra la cantidad de datos válidos analizados (N).

Tabla 8  
*Resultados de tiempos máximos y mínimos*

		<b>Turno 1</b>	<b>Turno 2</b>	<b>Turno 3</b>
N	Válido	4	4	4
Percentiles	25	373	418,25	395,25
	50	1157	1137	1245
	75	2790	2764,75	2679,75

Elaboración propia

Tabla 9  
*Distribución de frecuencias de los tiempos*

<b>Actividad</b>	<b>Total (min)</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>Porcentaje</b>
<b>Turno 1</b>			
Tiempos muertos	460	1	8
Tiempo de producto directo	3102	1	54
Tiempo de espera	1854	1	32
Tiempo de alimentación personal	344	1	6
<b>Total</b>	<b>5760</b>	<b>4</b>	<b>100</b>
<b>Turno 2</b>			
Tiempos muertos	593	1	10
Tiempo de producto directo	3126	1	54
Tiempo de espera	1681	1	29
Tiempo de alimentación personal	360	1	6
<b>Total</b>	<b>5760</b>	<b>4</b>	<b>100</b>
<b>Turno 3</b>			
Tiempos muertos	558	1	10
Tiempo de producto directo	2929	1	51
Tiempo de espera	1932	1	34
Tiempo de alimentación personal	341	1	6
<b>Total</b>	<b>5760</b>	<b>4</b>	<b>100</b>

Elaboración propia

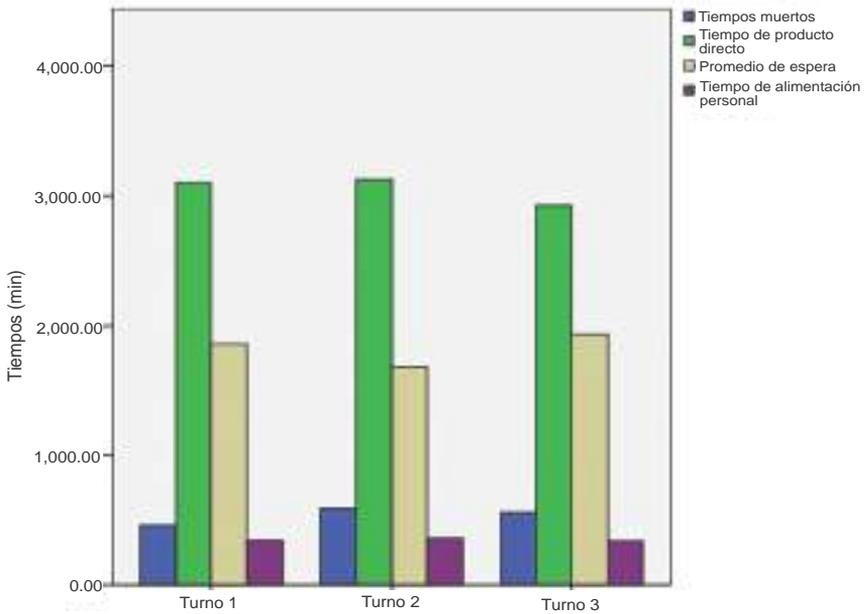


Figura 7. Resultados comparativos de los tiempos máximos y mínimos de los tres turnos de trabajo  
Elaboración propia

Según los resultados de la figura 7, se puede observar que en los tiempos muertos existe una diferencia de 2 % entre los turnos 2 y 3 con respecto al turno 1, que tiene un 8 % que sería el tiempo más óptimo.

En los tiempos de producto directo se observa que los turnos 1 y 2 tienen un 54 % y el turno 3 un 51 %, que sería el tiempo menos productivo y, por último, en los tiempos de espera existe una variación notable donde el turno 2 tiene un 29 %, que es el más bajo; el turno 1 tiene un 32 % y el turno 3, un 34 %, que es el más alto.

#### 4.1 Análisis de resultados de los tiempos de vaciado en el proceso de cucharas (Módulo 1)

Tabla 10

Resultados del análisis del tiempo de vaciado del proceso de cucharas en el turno 1

Cucharas	Vaciadas	Turno anterior	Tiempos por cuchara (min)						Suma	Promedio
1	7	16	42	40	42	57	42	41	264	44,0*
2	6	37	66	67	55	54	66		308	61,6
3	5	57	78	99	89	70			336	84,
Total	18									

\*Proceso con mayor eficiencia observada.

Elaboración propia

Tabla 11

Resultados del análisis del tiempo de vaciado del proceso de cucharas en el turno 2

Cucharas	Vaciadas	Turno anterior	Tiempos por cuchara (min)						Suma	Promedio
1	7	14	49	47	68	46	48	48	306	51,0*
2	5	17	64	50	70	71			255	63,75
3	5	19	64	65	69	73			290	72,5
Total	17									

\* Proceso con mayor eficiencia observada.

Elaboración propia

Tabla 12

Resultados del análisis del tiempo de vaciado del proceso de cucharas en el turno 3

Cucharas	Vaciadas	Turno anterior	Tiempos por cuchara (min)						Suma	Promedio
1	7	11	60	33	114	35	49	35	326	54,33*
2	6	11	54	57	80	59	97		347	69,4
3	4	11	80	57	65				202	67,33
Total	17									

\* Proceso con mayor eficiencia observada.

Elaboración propia

#### 4.2 Análisis de resultados de los tiempos de vaciado en el proceso de cucharas (Módulo 2)

Tabla 13

*Resultados del análisis del tiempo de vaciado del proceso de cucharas en el turno 1*

Cucharas	Vaciadas	Turno anterior	Tiempos por cuchara (min)					Suma	Promedio
4	5	54	45	74	78	97	294	73,5	
5	5	37	52	73	93	94	312	78,0	
6	5	24	54	61	86	21	222	55,5*	
7	6	19	62	51	61	43	133	350	70,0
Total	21								

\*Proceso con mayor eficiencia observada.  
Elaboración propia

Tabla 14

*Resultados del análisis del tiempo de vaciado del proceso de cucharas en el turno 2*

Cuchara	Vaciadas	Turno anterior	Tiempos por cucharas (min)					Suma	Promedio
4	5	45	48	74	60	42	224	56,0	
5	6	20	77	46	85	63	56	327	65,4
6	6	33	91	44	71	47	64	317	63,4
7	5	49	41	72	53	56	222	55,5*	
Total	22								

\* Proceso con mayor eficiencia observada.  
Elaboración propia

Tabla 15

Resultados del análisis del tiempo de vaciado del proceso de cucharas en el turno 3

Cuchara	Vaciadas	Turno anterior	Tiempos por cucharas (min)					Suma	Promedio
4	4	71	66	120	85		271	90,33	
5	6	54	61	55	79	56	58	309	61,8*
6	5	38	62	57	192	27		338	84,5
7	5	18	45	57	169	77		348	87,00
<b>Total</b>	<b>20</b>								

\* Proceso con mayor eficiencia observada.

Elaboración propia

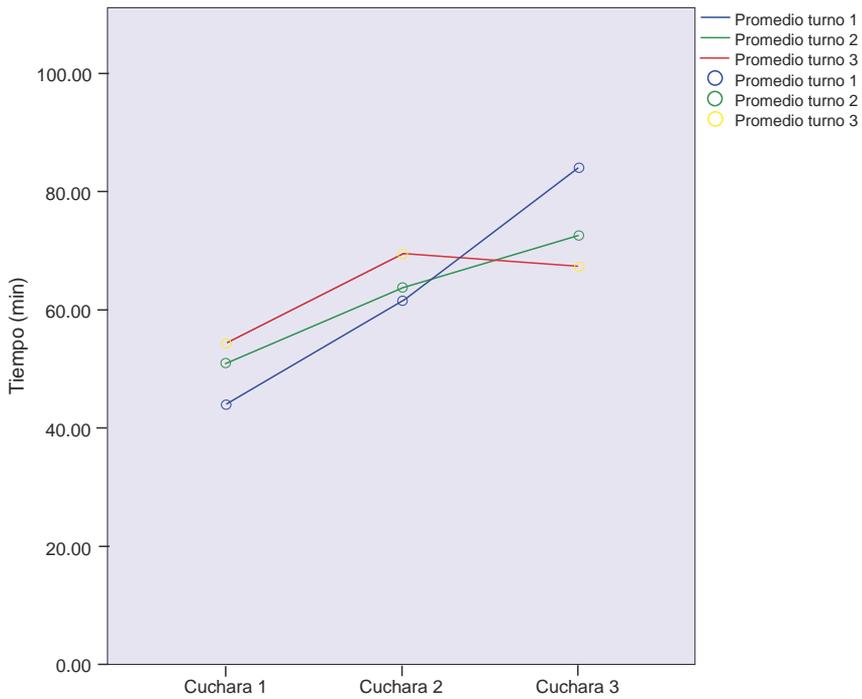


Figura 8. Comparación de los tiempos promedio de vaciado del proceso de cucharas del módulo 1

Elaboración propia

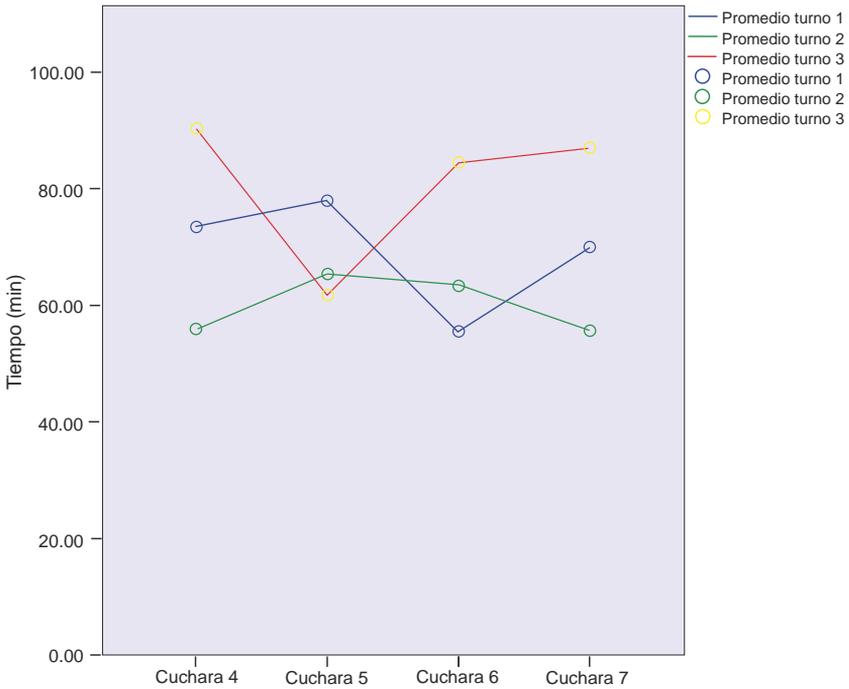


Figura 9. Comparación de los tiempos promedio de vaciado del proceso de cucharas del módulo 2

Elaboración propia

De acuerdo con el comparativo de turnos de la figura 8 referente al módulo 1, se aprecia que la cuchara 1 es la que presenta los tiempos promedio de proceso más bajos, con menor variabilidad entre los turnos y, por lo tanto, la más eficiente en los tres turnos. Podemos notar que en este módulo la variabilidad que hay entre turnos en cada una de las cucharas es poca, y se aprecia también que la cuchara 3 es la menos eficiente.

Al respecto de la figura 9 referente al módulo 2, se observa que hay mayor variabilidad en la eficiencia de las cucharas en cada uno de los turnos; por ejemplo, tenemos que en el primer turno la más eficiente es la 3; en el segundo turno es la número 4; y en el tercer turno se presenta la número 2. En general, se observa un efecto de interacción entre los turnos y las cucharas en este módulo 2.

## 5. CONCLUSIONES

Cada una de las observaciones y resultados son con el fin de poder tomar mejores decisiones en este tipo de procesos de sinterizado en compañías dedicadas al ramo minero y que a todas las empresas de este ramo que cuentan con este proceso les sirva de referencia para la mejora continua de sus sistemas.

De acuerdo con los resultados analizados en el proceso de sinterizado del proceso de cucharas específicamente, se llegó a las siguientes conclusiones:

1. El módulo más productivo es el 2 (54 % de tiempo productivo directo), a diferencia del módulo 1 (53 % de tiempo productivo directo).
2. Lo anterior es debido a que tienen menores tiempos de espera y los tiempos de proceso en cucharas son similares (módulo 2), a diferencia del módulo 1, en el que los tiempos de proceso varían de cuchara a cuchara. No hay estandarización.
3. Falta de programa de mantenimiento preventivo en todas las áreas.
4. En los equipos pesados, en el mantenimiento programado (turno 2), se utilizan hasta dos horas, ya que se incluye la hora de comida.

Como parte de los resultados de este trabajo de investigación del proceso de cucharas, también se proponen recomendaciones de todo el proceso de sinterizado como aportación para poder generar una mejor toma de decisiones:

De acuerdo con el resultado del estudio y tomando en cuenta las condiciones actuales de la planta sinterizadora, en este momento no es posible prescindir de ninguno de los operadores y tampoco realizar contrataciones en dicha planta. Sin embargo, si se estandarizan las operaciones, se mejorarán las condiciones de los equipos con un buen programa de mantenimiento correctivo-preventivo y se implementarán dispositivos mecánicos en áreas que así lo requieran, y en un corto a mediano plazo se podrán realizar ajustes en el personal de esta área.

## REFERENCIAS

- Beaverstock, M., Nordgren, B. y Greenwood, A. (2011). *Applied Simulation. Modeling and Analysis Using Flexsim*, Orem: Shanna Warr.
- Campos, M., Blanco, L., Sicre-Artalejo, J. y Torralba, J. M. (2008). Aceros de baja aleación y alto rendimiento. *Revista de Metalurgia*, (44), 5-12.
- DeGarmo, E. P., Black, J. T. y Kohser, R. A. (2003). *Materials and Processes in Manufacturing*. New York: John Wiley & Sons.
- Groover, P. M., Barrientos, M. A., León, C. J. y Reyes, R.R. (2007). *Fundamentos de manufactura moderna*. México: McGraw-Hill.
- Kalpakjia, S. y Schmid, S. (2015). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. México: Pearson.
- Montes, J., Rodríguez, A., y Herrera, E. J. (2003). Consolidación de polvo de hierro mediante sinterización por resistencia eléctrica. *Revista de Metalurgia*, (39), 99-106.
- Prado, J. M. y Riera, M. D. (1998). Simulación del proceso de compactación de polvos metálicos. *Revista de Metalurgia*, (34), 338-341.
- Randall, M. (1989). *Particle Packing Characteristics*. Princeton, N. J.: Metal Powder Industries Federation.
- Torralba, J. M. y Campos, M. (2014). Toward High Performance in Powder Metallurgy. *Revista de Metalurgia*, 50(2), pp. e017. doi: 10.3989/revmetalm.017



# Mejora en la eficiencia y en el ambiente de trabajo en Texgroup S.A.

Jhosselyn Herrera\*

Universidad de Lima

Recibido: 14 de mayo del 2018 / Aprobado: 1 de junio del 2018

doi: 10.26439/ing.ind2018.n036.2445

**RESUMEN:** La mejora continua representa una oportunidad para incrementar la competitividad y alinear los procesos hacia una producción libre de desperdicio y de alto valor para los clientes de una compañía, lo cual fue analizado y demostrado en la compañía Texgroup S.A., en la que, a través del uso de metodologías como la de los siete pasos, se consiguió mejorar la eficiencia operativa y el ambiente de trabajo.

*Palabras clave: industria de la confección / eficiencia industrial / productividad*

## Improvement on the efficiency and work environment at Texgroup S.A.

**ABSTRACT:** Continuous improvement represents an opportunity to increase competitiveness and to adjust processes towards a waste-free production, which is highly valuable for the customers of a company. These aspects were analyzed and demonstrated at the company Texgroup S.A., where the operational efficiency and work environment were upgraded using methodologies such as the 7-Step Improvement Process.

*Keywords: clothing industry / industrial efficiency / productivity*

---

\* Correo electrónico: [jhosselyn.herrera@gmail.com](mailto:jhosselyn.herrera@gmail.com)

## 1. ANTECEDENTES DE LA EMPRESA

Texgroup S.A. es una empresa peruana que desde el año 1995 se dedica a la fabricación de prendas de vestir en tejido plano y de punto para el mercado internacional. Pertenece a la Corporación Cervesur, conglomerado de importantes empresas de distintos sectores productivos y de servicios. El proceso productivo de Texgroup es llevado a cabo en una planta de 15 000 m<sup>2</sup> ubicada en el distrito de Ate, donde se realiza el desarrollo, el corte, la costura y el acabado de alrededor de 1,8 millones de prendas al año.

## 2. METODOLOGÍA

La metodología utilizada fue la de los siete pasos de la mejora continua, la cual, además de ser una hoja de ruta para llevar a cabo un proyecto, ofrece la ventaja de hacerlo permanente y mejorable por sí mismo. Al ser un proyecto que mejora la productividad de una compañía industrial de mano de obra intensiva, es necesario que cualquier mejora vaya enfocada en obtener el máximo retorno posible mediante la racionalización de los recursos.

Del desglose del costo total de una prenda, se obtiene lo siguiente:

Tabla 1  
*Participación de los principales inyectores de gasto*

<b>Concepto</b>	<b>Participación</b>
Costo de manufactura (mano de obra + maquinaria + servicios generales)	50 %
Costo de materiales de confección (tela + avíos)	45 %
Gastos administrativos y ventas (adheridos al servicio de confección*)	5 %

Fuente: SNI (2014)

En ese sentido, el costo de manufactura representa el mayor porcentaje de participación en los costos de proceso, por lo que cualquier mejora o ahorro en este tendrá un mayor impacto sobre la utilidad de la compañía.

### 3. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA DE LOS 7 PASOS DE LA MEJORA CONTINUA

#### PASO 1: Seleccionar el problema

##### *Selección del proceso por mejorar*

Dentro de la estructura de costos de manufactura están los de mano de obra de los procesos de corte, costura y acabado.

A continuación, se muestra la distribución del personal de la compañía, y se observa que el grueso de los colaboradores se encuentra en la parte productiva:

Tabla 2  
*Distribución de personal*

<b>Personal</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Participación (%)</b>
	<b>842</b>	
<b>Operarios</b>	Producción (Corte/costura/acabados)	660
	Muestras	60
	Control de calidad	110
	Limpieza	12
<b>Empleados</b>	<b>120</b>	<b>12</b>
	Total general	962
		100

Fuente: Texgroup S.A. (2014)

##### *Determinación y descripción del proceso*

El proceso productivo comienza en el área de corte, donde se realiza el tendido de la tela, corte en piezas, fusionado, numerado y habilitado. Luego, la costura se divide en dos: preparado y ensamble. El primero consiste en la confección de cuellos, puños y delanteros, y la segunda etapa es el ensamble de las demás piezas junto a estos. Luego los lotes son sometidos a una auditoría y transportados al área de acabados, la cual se encarga del soplado, planchado, doblado, acomodo, embolsado y encajado. Finalmente, las prendas son trasladadas a un último control de calidad y son ubicadas en el Almacén de Productos Terminados.

*Identificación de los problemas principales*

Para identificar los problemas principales de la compañía, se utilizó la herramienta de calidad “VOC: Voz del cliente”, donde se entrevistó a la alta dirección, la cual está conformada por seis gerentes: gerente general, gerente administrativo y de finanzas, gerente comercial tejidos y prendas, gerente comercial hilado, gerente técnico de hilados y tejidos, y gerente técnico de confecciones.

La entrevista consistió en tres principales aspectos: tiempo, calidad y costos. A continuación se muestra el listado de problemas que detallaron los gerentes:

Tabla 3  
Resumen de comentarios de gerencia técnica de Texgroup S.A.

Variable	Problema	
Tiempo	T1	La cotización de prendas toma muchos días y recursos y retrasa el inicio de la confección.
		Dentro del <i>lead time to market</i> , el tiempo de cotización y preproducción es mayor al asignado a producción.
	T2	Tiempo de atención de almacenes de avíos y telas.
		El almacén de avíos tiene tiempos de búsqueda mayores a los de habilitado efectivo.
		La tela asignada para la última etapa de la preproducción llega junto a la tela de producción, lo cual retrasa el inicio del corte, pues, si bien la tela está disponible, esta no puede ser usada hasta ser liberada por DDP.
	T3	La definición oportuna de avíos de confección es necesaria para evitar retrasos en el inicio de la confección.
		La definición de avíos puede extenderse hasta más de 30 días antes del inicio de la confección, al considerar que este periodo es equivalente al <i>lead time</i> de los proveedores. Frecuentemente la llegada de estos marca el inicio de la costura hasta después de la fecha programada.

(continúa)

(continuación)

Variable	Problema	
Calidad	Q1	Los estándares de calidad deben respetarse al 100 %.
		Los estándares de confección de la compañía, si bien están establecidos, no son de conocimiento de todo el personal (con mayor incidencia en personal con menos de 3 meses), lo cual genera distorsiones en el criterio de evaluación del producto conforme.
	Q2	Los supervisores deben responsabilizarse al 100 % de la calidad de su proceso.
		El personal de supervisión está acostumbrado a que su trabajo sea revisado posteriormente al 100 %, lo cual genera el paradigma de que los defectos deben encontrarse, mas no prevenirse.
	Q3	Los reclamos posventa por calidad se encuentran fuera de control.
		Los rechazos en auditorías en destino, principalmente con clientes nuevos, reducen la posibilidad de futuros pedidos.
	Q4	Los reprocesos generan muchas horas de paro que son compensadas con sobretiempo.
		Los reprocesos posteriores a la clasificación del producto no conforme generan una gran cantidad de minutos trabajados, pero no producidos.
Costos	C1	Las eficiencias de la planta deben aumentar para incrementar el margen.
		Se ha calculado que la eficiencia que satisface la mínima expectativa de los accionistas sin dejar utilidad disponible para reinvertir es de 65 %.
	C2	El control de las mermas debe ser exhaustivo para conocer su impacto económico.
		Las frecuentes compras para mejorar fechas de entrega o no detener los módulos de costura generan excedentes en los almacenes que no pueden ser utilizados posteriormente, pues son compras a pedido para temporadas específicas.
	C3	Dependencia de la mano de obra calificada.
		Al ser una industria de mano de obra intensiva, se requiere personal entrenado en el uso de máquinas y métodos de confección industrial.

Nota: Aplicación de VOC a gerentes de la compañía  
Elaboración propia

Para la evaluación y la ponderación de los factores, se usará la matriz de enfrentamiento.

Tabla 4  
Matriz de enfrentamiento

Factor	T1	T2	T3	Q1	Q2	Q3	Q4	C1	C2	C3	Total	Ponderado %
T1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	2,17
T2	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	2	4,35
T3	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	2,17
Q1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	8	17,39
Q2	1	1	1	0	1	1	1	0	1	0	6	13,04
Q3	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	3	6,52
Q4	1	1	1	0	0	1	1	0	1	0	5	10,87
C1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	7	15,22
C2	1	1	1	0	0	1	0	0	1	0	4	8,70
C3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9	19,57
											46	

Elaboración propia

Del análisis anterior, se obtiene que los factores más relevantes son la dependencia de la mano de obra calificada (19,57 %), la eficiencia de planta (17,39 %) y el cumplimiento de los estándares de calidad (15,22 %).

Con respecto a la mano de obra calificada, esta solo se puede retener al incrementar la parte variable del salario de los trabajadores, la cual sube o baja en función de la eficiencia lograda por los equipos de trabajo. Adicionalmente, la eficiencia de costura es el principal indicador de planta y afecta directamente a la utilidad de la compañía; por lo tanto, cualquier intento de mejora se verá reflejado en los resultados al final de cada periodo. Y, por último, el cumplimiento al 100 % de los estándares de calidad es indispensable para la continuidad del flujo de costura; sin embargo, según los resultados de la última auditoría interna de ISO 9001, solo el 60 % del personal sabe y aplica los procedimientos y las instrucciones de trabajo. Esto se debe principalmente a la alta rotación de personal (6 % mensual en promedio).

Llegado a este punto, el problema más resaltante e integral es la baja eficiencia en planta, porque, al lograr mejorar algunos puntos de eficiencia, indirectamente también se resuelven los otros dos problemas principales: se incrementa el salario y, por ende, se reduce la rotación.

## PASO 2: Clarificar y subdividir el problema

### *Determinación de las causas raíces de los problemas seleccionados*

Con la información recopilada y analizada hasta el momento, se puede observar que existen oportunidades de mejora que representarían un gran impacto en los medios de producción de Texgroup S.A.

Como primera parte de la planificación, se preparó un breve informe de los datos recopilados sin interpretación, el cual fue distribuido al gerente técnico y a los jefes de área, junto a una invitación a una serie de reuniones para identificar las posibles alternativas de solución a los problemas principales.

Para que las reuniones se puedan llevar a cabo de forma objetiva, se decidió utilizar la metodología Sedac, herramienta de calidad que permite facilitar la resolución de problemas de productividad sistemáticamente mediante el análisis de sus causas raíces.

El desarrollo de la dinámica Sedac se realizó en cuatro sesiones con un espacio de una semana entre ellas, con una duración de tres horas. Participaron los gerentes y jefes de la planta de confecciones.

Para el desarrollo de la metodología, es necesario el uso de tarjetas rojas, amarillas y verdes. Las primeras se usan para los problemas o las causas que afectan el indicador; las segundas, solo en caso la causa sea compleja o se necesite cuantificar; y las terceras son tarjetas de soluciones.

En el desarrollo de la primera reunión, se entregaron tarjetas de cada color en blanco a cada miembro y la lista de causas raíces brindada sobre la información recopilada.

Seguidamente, los participantes escribieron en las tarjetas rojas y las colocaron por afinidad en el tablero Sedac. Las afinidades disponibles eran afinidad 1: planeamiento y programación; afinidad 2: personal operario y empleado; afinidad 3: materias primas y materiales; y afinidad 4: información y métodos. Una vez elegida la afinidad se procedía a su lectura en grupo y explicación del por qué ese problema fue seleccionado y va en esa categoría.

En la segunda reunión, cada integrante pudo armar su tablero Sedac personal para posteriormente, en la tercera reunión, en discusión grupal, generar el tablero general con las afinidades asignadas a cada causa raíz determinada por consenso, donde los integrantes discutieron si era necesario cuantificar a fondo alguna causa mediante el uso de las tarjetas amarillas.

Finalmente, en las tarjetas verdes, colocaban las posibles soluciones, las cuales eran revisadas en grupo también hasta llegar a un acuerdo con una cantidad de soluciones mayor o igual al número de causas raíces.

Con el tablero general ya elaborado, en la cuarta reunión se presentó un informe a modo de resumen con los puntos en los que los participantes tuvieron mayor incidencia. A continuación, se muestra el panel Sedac:

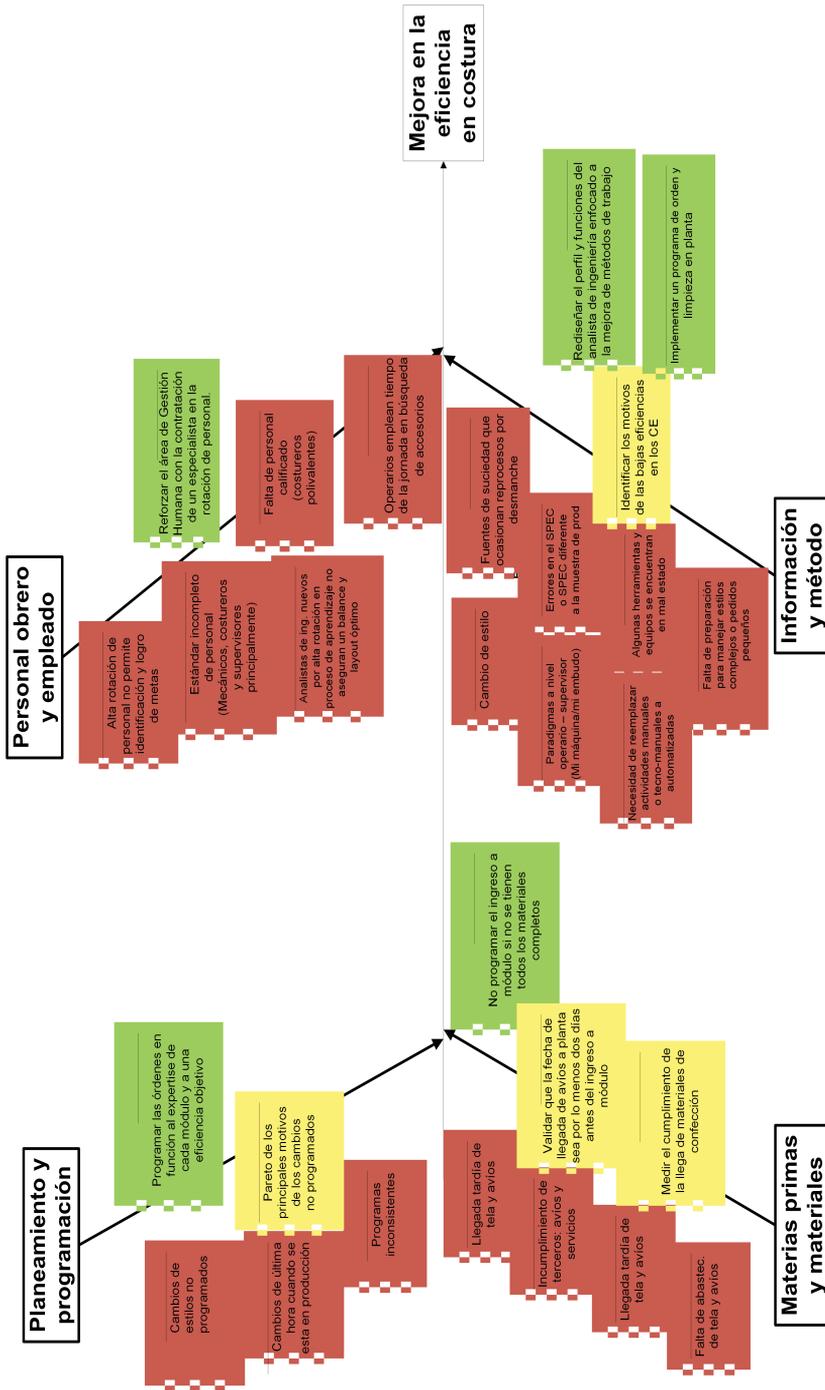


Figura 1. Matriz Sedac  
Elaboración propia

### PASO 3: Analizar las causas de su raíz

Se realizó un análisis en planta, para lo cual se diseñó un formato donde se detallan todas las interferencias y/o paradas en producción más recurrentes. Si bien se conocen estas, no están cuantificadas. Este formato contempla el área responsable, el motivo de la interferencia y tiene un horizonte de información de una semana.

Tabla 5  
*Detalle de interferencias*

Área	Interferencia	Código	Descripción
DDP	Mal tizado	DDP1	Cuando la distribución de las piezas no se ajusta a las características del tejido.
DDP	Error spec	DDP2	La información técnica no es suficiente o no es factible.
DDP	Error marcador	DDP3	Los patrones de cartón para referencia de medidas no están correctos.
DDP	Ingreso muestras	DDP4	Por falta de capacidad de la sala de muestras, se ingresan muestras a producción.
DDP	Falla medidas	DDP5	Las medidas de las piezas no permiten coser de acuerdo con la especificación.
DDP	Información incompleta	DDP6	La información necesaria para arrancar un estilo no está completa.
Corte	Falla corte	CRT1	Error en el proceso de corte.
Corte	Desabastecimiento	CRT2	La orden de producción ha salido fuera de tiempo hacia costura.
Corte	Tela fallada/cambio de piezas	CRT3	Las piezas presentan fallas que no han sido detectadas al momento del corte.
Terceros	Desabastecimiento	TRC1	Abastecimiento tardío de los servicios de bordado/estampado.
Terceros	Falla	TRC2	El producto entregado por el proveedor no cumple lo especificado.
PCP	Cambio de programa	PCP1	El programa de producción ha sido modificado repentinamente.
PCP	Error en liquidación	PCP2	Se ha producido un error en la liquidación (balance) de tela.
PCP	Avío faltante	PCP3	Los avíos no han llegado a la planta en el tiempo requerido para el inicio de costura.

(continúa)

(continuación)

Área	Interferencia	Código	Descripción
PCP	Avío mal asignado	PCP4	Error en la compra de avíos.
Calidad	Desbalances	CAL1	Falta de inspectores o auditores en planta.
Calidad	Definición de criterios	CAL2	No se define la liberación/rechazo de un producto.
Calidad	Rechazo tardío	CAL3	Se ha rechazado un producto en una etapa posterior en la que ha sido aceptado.
Calidad	Avío defectuoso	CAL4	Avíos ingresados al almacén con el V.ºB.º de calidad no están de acuerdo con lo especificado.
RR.HH	Personal faltante	RH1	Reclutamiento no completa los requerimientos pendientes.
Producción	Incumplimiento de spec	PRD1	No se ha cumplido lo indicado en la especificación.
Producción	Reproceso	PRD2	Reprocesos realizados en las horas de trabajo regulares.
Producción	Vacaciones sin coordinación	PRD3	Se han programado vacaciones de manera repentina.
Producción	Ausentismo	PRD4	Ausencia de trabajadores.
Producción	Desabastecimiento de cuellos/puños	PRD5	Cuellos y puños no cumplen con especificación o presentan retraso en entrega.
Producción	Tiraje corto	PRD6	Órdenes de producción menores a 600 prendas.
Ingeniería	Sin máquina/ accesorios	ING1	Falla en la disponibilidad de máquinas o accesorios.
Ingeniería	Operario nuevo/baja eficiencia	ING2	Operario no ha completado la curva de aprendizaje.
Ingeniería	Máquina malograda	ING3	Máquina en mal estado de funcionamiento.
Ingeniería	Tiempo mal estimado	ING4	Tiempo estándar no se ajusta al real.
Ingeniería	Calibración de máquina	ING5	Máquina requerida no está calibrada.
Ingeniería	Regulación por cambio de estilo	ING6	Movimiento de personal/máquinas por cambio de estilo.

Elaboración propia

Se muestra el formato de incidencias:

Tabla 6  
Formato de incidencias

Formato de incidencias										
F. inicio										
F. fin										
Semana										
Área	Interferencia	Código	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado		
DDP	Mal tizado	DDP1								
DDP	Error spec	DDP2								
DDP	Error marcador	DDP3								
DDP	Ingreso muestras	DDP4								
DDP	Falla medidas	DDP5								
DDP	Información incompleta	DDP6								
Corte	Falla corte	CRT1								
Corte	Desabastecimiento	CRT2								
Corte	Tela fallada/cambio de piezas	CRT3								
Terceros	Desabastecimiento	TRC1								
Terceros	Falla	TRC2								
PCP	Cambio de programa	PCP1								
PCP	Error en liquidación	PCP2								
PCP	Avío faltante	PCP3								
PCP	Avío mal asignado	PCP4								

(continúa)

(continuación)

Área	Interferencia	Código	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado
Calidad	Desbalances	CAL1						
Calidad	Definición de criterios	CAL2						
Calidad	Rechazo tardío	CAL3						
Calidad	Avío defectuoso	CAL4						
RR.HH.	Personal faltante	RH1						
Producción	Incumplimiento de spec	PRD1						
Producción	Reproceso	PRD2						
Producción	Vacaciones sin coordinación	PRD3						
Producción	Ausentismo	PRD4						
Producción	Desabastecimiento de cuellos/ puños	PRD5						
Producción	Tiraje corto	PRD6						
Ingeniería	Sin máquina/accesorios	ING1						
Ingeniería	Operario nuevo/baja eficiencia	ING2						
Ingeniería	Máquina malograda	ING3						
Ingeniería	Tiempo mal estimado	ING4						
Ingeniería	Calibración de máquina	ING5						
Ingeniería	Regulación por cambio de estilo	ING6						
Comentarios								

Elaboración propia

El formato fue usado en el 2014 y, para términos de esta investigación, solo se tomarán en cuenta cinco meses elegidos aleatoriamente. La información es registrada diariamente por las supervisoras de cada módulo y es tabulada por el departamento de ingeniería al terminar la semana. Esta misma técnica fue usada para recopilar la información de cinco meses, y los resultados fueron los siguientes:

Tabla 7  
Resumen de interferencias por área

Área	Interferencia
DDP	77
Corte	247
Terceros	117
PCP	14
Calidad	44
RR. HH.	0
Producción	502
Ingeniería	615

Elaboración propia

Para el análisis de datos, se usó el diagrama de Pareto para identificar las principales interferencias.

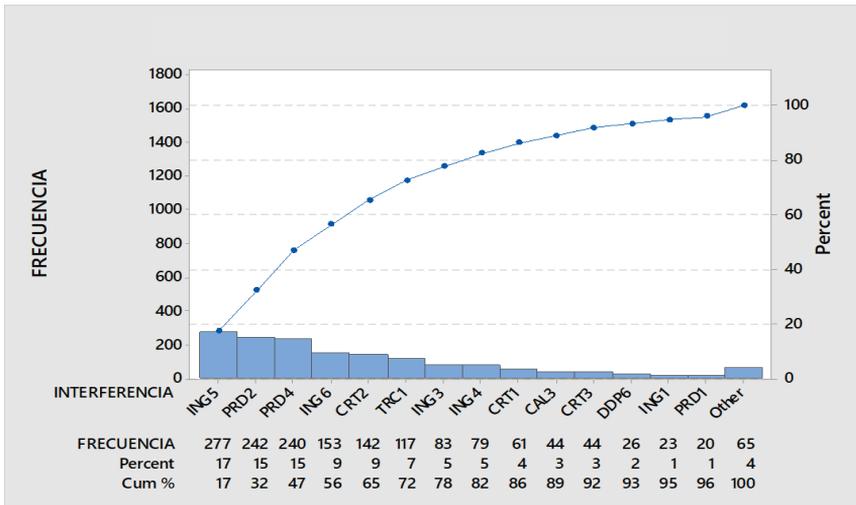


Figura 2. Diagrama de Pareto de interferencias  
Elaboración propia

Del análisis anterior, se obtuvo como resultado que las interferencias ING 5 (calibración de máquina), PRD2 (reprocesos) y PRD4 (ausentismo) representan el 50 % del total de interferencias registradas en el periodo, con lo cual se infiere que su reducción representaría automáticamente la reducción en la mitad del tiempo. Asimismo, se replicó el análisis en función de las áreas responsables de la solución de cada interferencia.

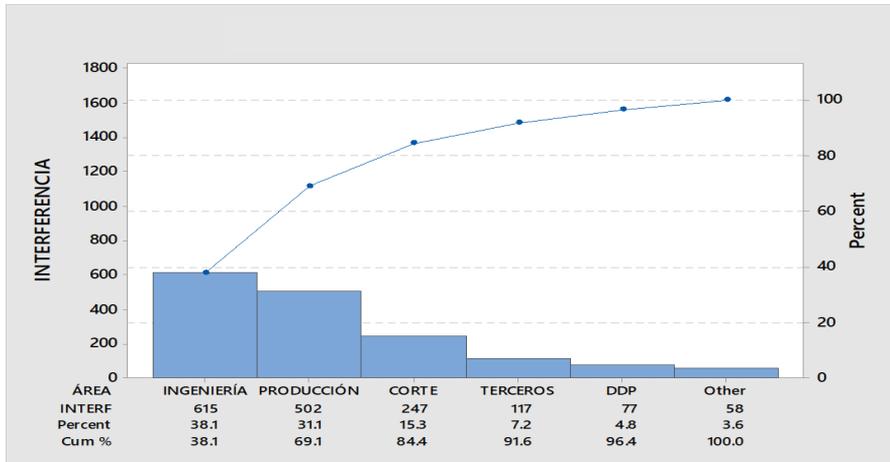


Figura 3. Diagrama de Pareto de interferencias por área  
Elaboración propia

Como resultado del análisis de incidencias, se obtuvo que las áreas de ingeniería y producción son responsables del 70 % del total de interferencias.

Seguidamente, para ubicar las causas raíces atribuidas a cada interferencia mayor, se realizaron diagramas de causa y efecto (Figura 4).

Para la primera interferencia mayor ING5, relacionada con la calibración de máquinas y el tiempo que esta operación podría tomar, el cual en el caso de extenderse, afecta directamente al incremento del tiempo improductivo. Esta tarea es de responsabilidad del mecánico del módulo de costura, bajo la instrucción del analista de ingeniería, quien define y provee el equipo a usar y sus accesorios. Por lo tanto, el efecto se determina como la demora en la calibración de máquina.

Sobre la base de las causas de la interferencia ING5, se realizó un análisis cuantitativo con el uso y el registro de un formato de causas.

El siguiente formato fue usado durante un mes en todos los módulos de costura a cargo del supervisor (Tabla 9).

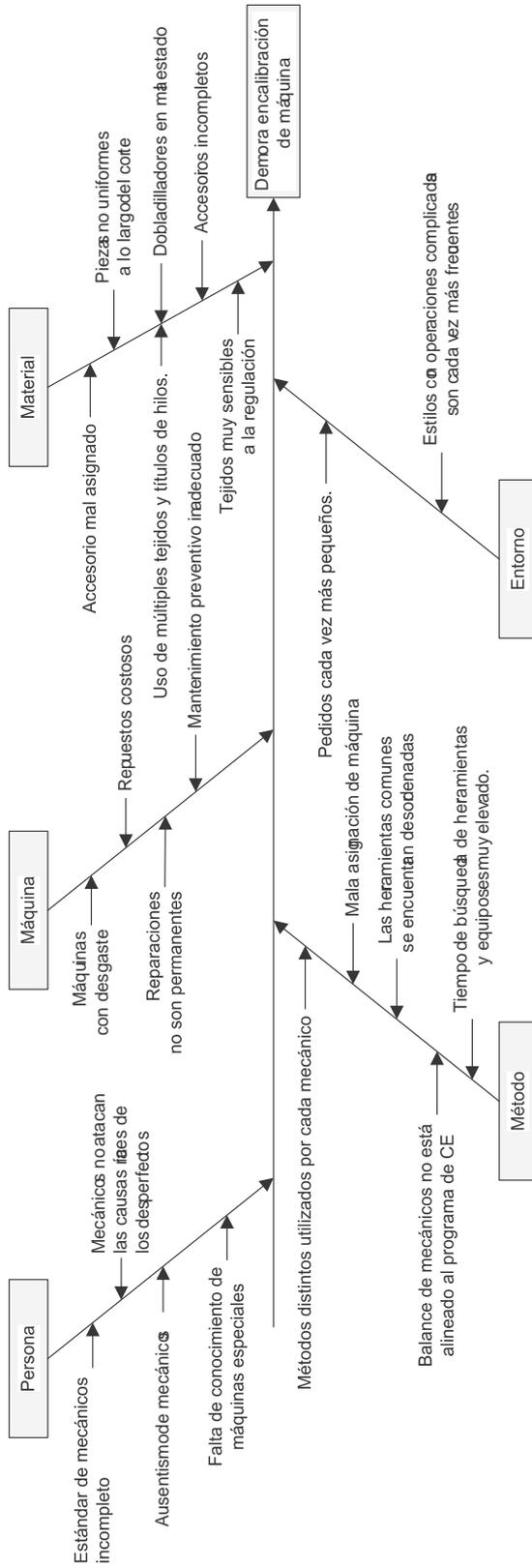


Figura 4. Diagrama de causa y efecto para ING5 (calibración de máquina)  
Elaboración propia

Tabla 8  
Formato de causas – ING5

Formato de causas										
F. inicio										
F. fin										
Semana										
Categoría	Causa	Código	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado		
Persona	Mecánicos no atacan las causas raíces de los desperfectos.	PE1								
Persona	Estándar de mecánicos incompleto.	PE2								
Persona	Ausentismo de mecánicos.	PE3								
Persona	Falta de conocimiento de máquinas especiales.	PE4								
Maquina	Máquinas con desgaste.	MAQ1								
Maquina	Repuestos costosos.	MAQ2								
Maquina	Reparaciones no son permanentes.	MAQ3								
Maquina	Mantenimiento preventivo inadecuado.	MAQ4								
Material	Accesorio mal asignado.	MAT1								
Material	Piezas no uniformes a lo largo del corte.	MAT2								
Material	Dobladores en mal estado.	MAT3								
Material	Accesorios incompletos.	MAT4								
Material	Tejidos muy sensibles a la regulación.	MAT5								
Material	Uso de múltiples tejidos y títulos de hilos.	MAT6								
Método	Métodos distintos utilizados por cada mecánico.	MET1								
Método	Las herramientas comunes se encuentran desordenadas.	MET2								
Método	Balance de mecánicos no está alineado al programa de CE.	MET3								
Método	Tiempo de búsqueda de herramientas y equipos es muy elevado.	MET4								
Método	Mala asignación de máquina.	MET5								
Entorno	Pedidos cada vez más pequeños.	ENT1								
Entorno	Estilos con operaciones complicadas son cada vez más frecuentes.	ENT2								
Comentarios										

La información es registrada diariamente por el departamento de ingeniería y tabulada al terminar la semana. Del resumen de la tabulación se obtuvo el siguiente diagrama de Pareto:

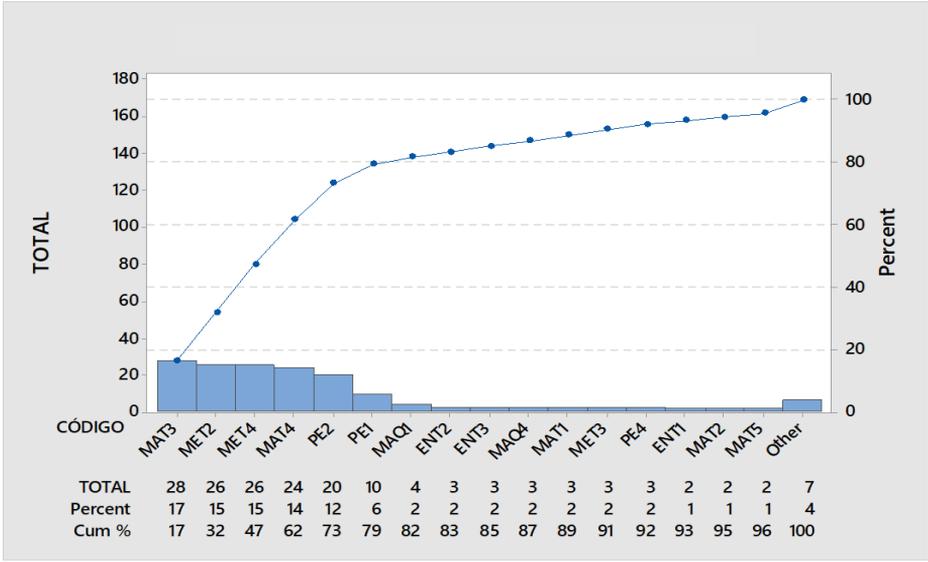


Figura 5. Diagrama de Pareto de causas – ING5  
Elaboración propia

Se puede observar que las principales causas raíces son MAT3, MET2, MET4 y MAT4, las cuales corresponden a dobladilladores en mal estado, herramientas comunes en mal estado, tiempo de búsqueda de herramientas y equipos muy elevado y accesorios incompletos, las cuatro con un porcentaje acumulado de alrededor del 62 % de participación como causas del problema principal.

Para la segunda interferencia mayor PRD2, relacionada con los reprocesos y los recursos (h-h, avíos, tela, productos químicos, etc.) que esta operación podría tomar, en el caso de extenderse, afecta directamente al incremento del tiempo improductivo. Esta interferencia es responsabilidad del supervisor, ya que es el encargado de revisar cada operación del flujo de proceso. Por lo tanto, a continuación, se detallarán las causas de los reprocesos:

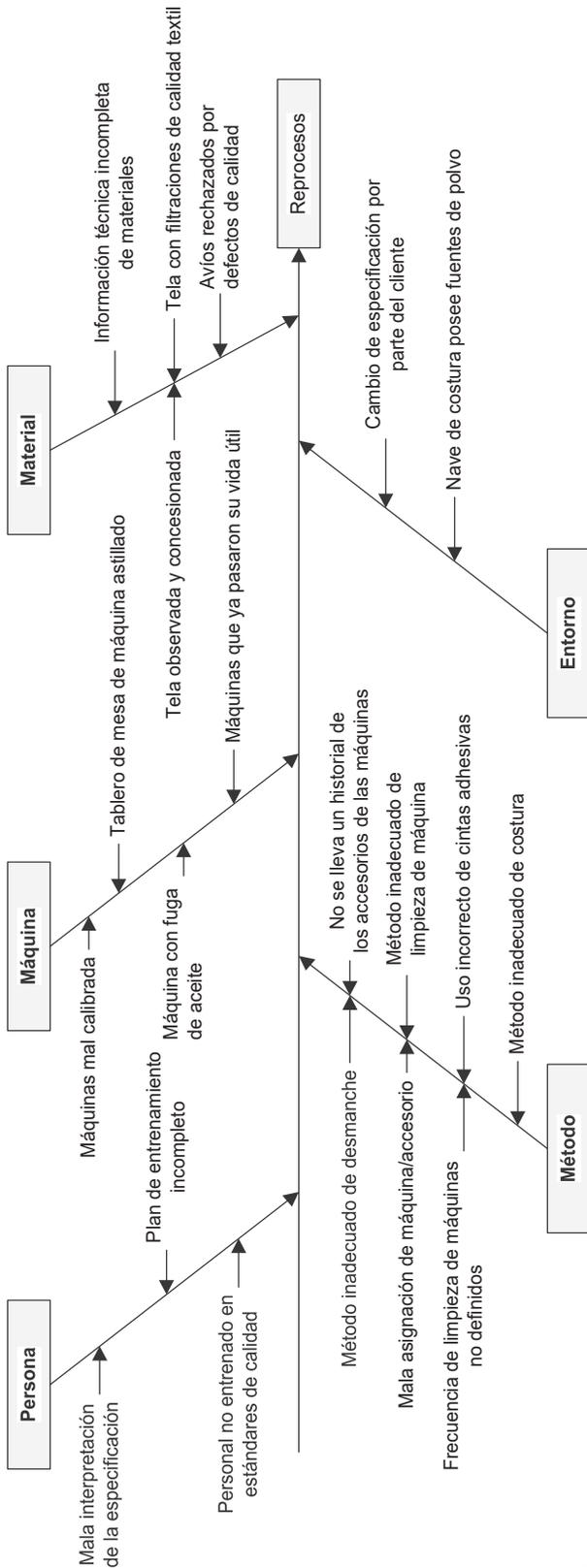


Figura 6. Diagrama de causa y efecto para PRD2 (reproceso)  
Elaboración propia

Del resumen de la tabulación, se obtuvo el siguiente diagrama de Pareto:

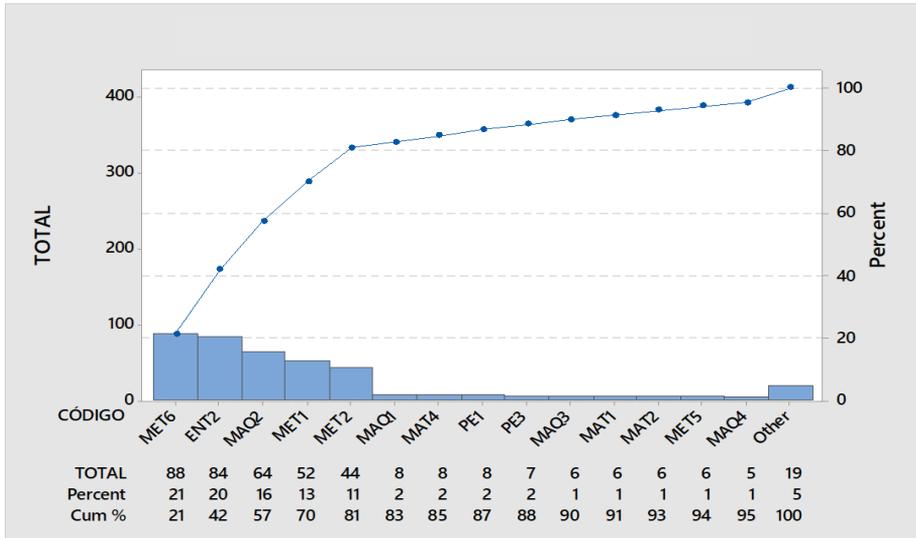


Figura 7. Diagrama de Pareto de causas – PRD2  
Elaboración propia

Se puede observar que las principales causas raíces son MET6, ENT2, MAQ2, MET1 y MET2, las cuales corresponden a uso incorrecto de cintas adhesivas, nave de costura posee fuentes de polvo, tablero astillado, método inadecuado de desmanche y método inadecuado de limpieza de máquina, las cinco con un porcentaje acumulado del 81 % de participación como causas del problema principal. En conclusión, del análisis de causas y efectos de las principales interferencias (ING5 y PRD2), se obtienen sus causas raíces (figura 8).

Por lo tanto, se determinó medir el tiempo de duración de las principales interferencias con el uso de técnicas de cronometraje mediante su registro en planta durante el periodo de un mes, y se limitará solo a los días de cambio de estilo, ya que el mayor número de interferencias son asociadas a esos días. Un cambio de estilo es el proceso por el cual un módulo de costura pasa de coser un producto a otro con diferentes especificaciones técnicas.

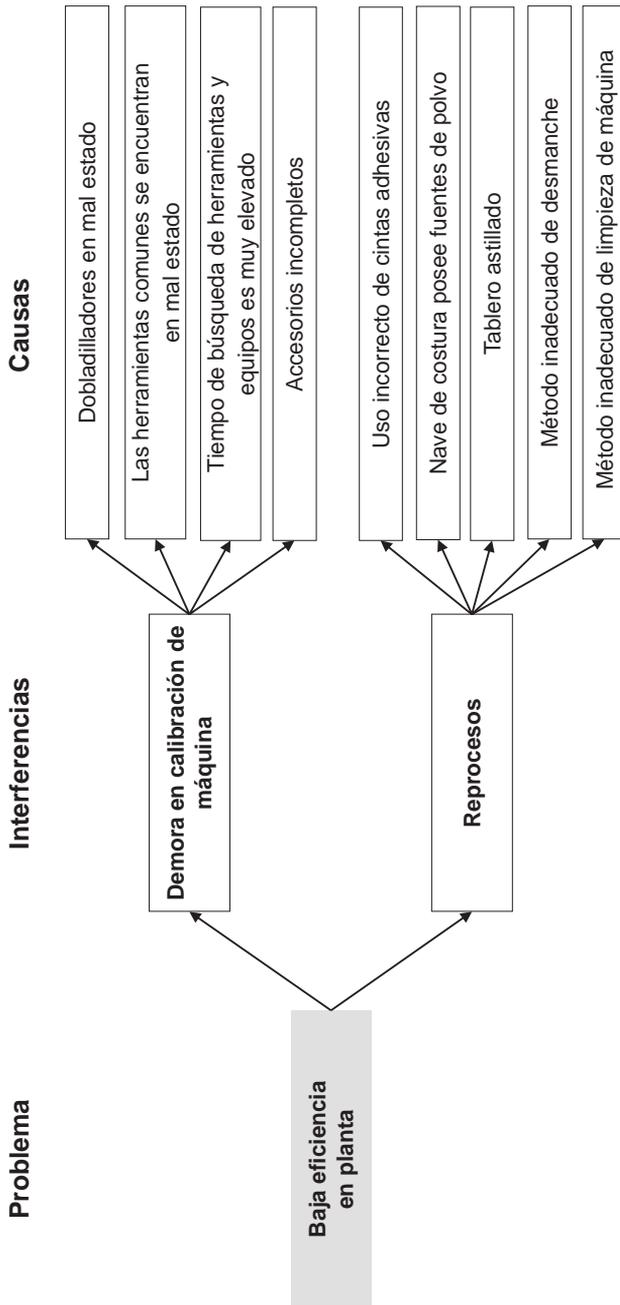


Figura 8. Causas raíces del problema  
Elaboración propia

El registro iniciaba cuando el observador detectaba la ocurrencia con los tiempos de inicio y fin. Por ejemplo:

- Interferencia: Calibración de máquina.

Inicio: Momento en el que el operario manifestaba que la máquina no estaba cosiendo de la forma correcta.

Fin: Momento en el que el operario comenzaba a coser en la máquina calibrada.

Para realizar la medición de las interferencias, se observó un cambio de estilo por día y por módulo durante un mes. Se obtuvieron 21 observaciones, dentro de las cuales cada módulo fue observado por lo menos una vez.

De la medición de duración de interferencias, se obtuvo lo siguiente (se ha considerado una observación por módulo) (véase tabla 11).

Para el registro de datos, el observador anotaba en qué operación de la línea ocurría la interferencia, ya que, al ser un sistema modular, es importante identificar en qué parte del flujo ocurre. Por ejemplo: la interferencia ocurrió en la máquina cerradora de costados (operación 12), es decir, que desde la operación 13 hasta la última operación el flujo se detiene, por lo que el tiempo de una interferencia es la suma de todos los tiempos perdidos desde la operación 12 hasta la última.

Al finalizar la recopilación de datos, se procedió a elaborar un resumen de minutos perdidos y el posible incremento de eficiencia si las interferencias se redujeran en 25 %, 50 % y 75 % (véase tabla 12).

De la tabla se observa que, al reducir las interferencias en una cuarta parte, una mitad o mayor proporción, se obtiene un beneficio de incremento de eficiencia.

Si consideramos que durante el 2014 la planta produjo 81 364,500 minutos con una eficiencia anual de 62 %, así como el incremento de 1 % de eficiencia mediante la reducción en 25 % de las principales interferencias analizadas, se hubieran producido 82 676,831 minutos. Esta diferencia al valor de venta de cada minuto producido generaría un incremento del ingreso en aproximadamente USD 129 000, monto que sería trasladado directamente al beneficio, pues no se incurriría en mayor gasto al usarse los mismos recursos.

Tabla 9  
Registro de interferencias con tiempos

**Módulo 12**

<b>Interferencia</b>	<b>Dobladores en mal estado</b>	<b>Búsqueda de equipos y herramientas</b>	<b>Accesorios incompletos</b>	<b>Calibración de máquina</b>	<b>Reprocesos</b>
<b>Operación</b>	Basta faldón	Cerrado de costados	Pegado de bolsillo	Pegado de botón <i>down</i>	Pegado de manga
<b>Descripción de la observación</b>	Embudo muy abierto	No se encuentra embudo	Accesorios de máquina recta incompletos (bobina y portabobina)	No se logra soltura del botón	Costura tensionada (fruncida)
<b>Ubicación en secuencia</b>	24	14	10	26	13
<b>Total de operaciones en secuencia</b>	28	28	28	28	28
<b>Inicio</b>	7:30 a. m.	9:00 a. m.	10:00 a. m.	11:00 a. m.	2:00 p. m.
<b>Fin</b>	9:30 a. m.	9:40 a. m.	10:50 a. m.	12:25 p. m.	3:00 p. m.
<b>Operaciones afectadas</b>	5	15	19	3	3
<b>Minutos dejados de producir</b>	600	600	950	255	180

Elaboración propia

Tabla 10  
Resumen de posibles resultados por escenario

Módulo	Min. dejados de trabajar	% de tiempo dejado de trabajar	Min. dejados de producir a la eficiencia del día	Eficiencia del módulo en el CE	Minutos prod. en el día	Minutos trabajados	Eficiencia reduciendo interferencias en 25 %	Eficiencia reduciendo interferencias en 50 %	Eficiencia reduciendo interferencias en 75 %
12	2585	16,03 %	1422	55 %	8870	16 128	57 %	59 %	62 %
13	1635	15,77 %	981	60 %	6221	10 368	62 %	65 %	67 %
14	1619	13,38 %	729	45 %	5443	12 096	47 %	48 %	50 %
15	4158	14,44 %	1663	40 %	11 520	28 800	41 %	43 %	44 %
17	1467	11,07 %	807	55 %	7286	13 248	57 %	58 %	60 %
18	944	7,80 %	453	48 %	5806	12 096	49 %	50 %	51 %
19	948	8,66 %	512	54 %	5910	10 944	55 %	56 %	58 %
20	1501	9,31 %	781	52 %	8387	16 128	53 %	54 %	56 %
21	1026	8,91 %	585	57 %	6566	11 520	58 %	60 %	61 %
22	420	4,05 %	273	65 %	6739	10 368	66 %	66 %	67 %
30	1052	8,70 %	473	45 %	5443	12 096	46 %	47 %	48 %
<b>Total</b>	<b>17 355</b>	<b>11,28 %</b>	<b>8824</b>	<b>51 %</b>	<b>78 192</b>	<b>153 792</b>	<b>52 %</b>	<b>54 %</b>	<b>55 %</b>

Elaboración propia

## PASO 4: Establecer nivel exigido

*Determinación de las alternativas de solución*

A continuación, se muestra una tabla de alternativas de soluciones para cada problema encontrado en el punto anterior.

Tabla 11  
*Propuestas de solución*

<b>Interferencia</b>	<b>Causa</b>	<b>Propuesta</b>	<b>Justificación</b>	<b>Impacto</b>
Calibración de máquina	Dobladores en mal estado	Reparar los dobladores que aún pueden ser reutilizados; caso contrario, reponer los que se encuentran deteriorados.	Para reproducir una operación de costura a nivel industrial, es imprescindible para algunas operaciones el uso de dobladores (embudos), los cuales deben encontrarse en buen estado, ya que se rigen a parámetros de ingreso de tela, doblado a medida y salida de las costuras. Además, estos dobladores podrán ser instalados en las máquinas rápidamente si se encuentran en buen estado.	Garantizar la disponibilidad de los dobladores en buen estado junto con el aseguramiento de las costuras en formas y medidas correctas.
	Las herramientas comunes se encuentran desordenadas	Asignar un lugar para las herramientas comunes, organizarlas de acuerdo con la frecuencia de uso y establecer el método de uso y devolución.	Las herramientas de uso común son aquellas que poseen el área de mantenimiento en cantidades limitadas por su alta especialización para algunas máquinas y costo; por lo tanto, es necesario que estas sean usadas correctamente y devueltas enseguida para estar disponibles para su próximo uso.	Alargar la vida útil de las herramientas y asegurar su disponibilidad inmediata.
	Tiempo de búsqueda de herramientas y equipos es muy elevado	Utilizar un método objetivo de orden que permita ubicarlas en función de su frecuencia de uso, tamaño, cantidad disponible y otras variables para reducir su tiempo de búsqueda.	Cuando el tiempo de búsqueda es excesivo, puede interferir con el desenvolvimiento de las actividades de producción. En la industria de la confección, el uso de mano de obra intensiva significa que cada operario cuenta por lo menos con una máquina de coser, las cuales tienen que ser reguladas en función del requerimiento del cliente (cantidad de puntadas, tipo de puntada, tensión de la costura, etc.), por lo que la disponibilidad de las herramientas debe ser la mayor posible.	Elevar la disponibilidad de herramientas y equipos con un tiempo de búsqueda reducido.

(continúa)

(continuación)

<b>Interferencia</b>	<b>Causa</b>	<b>Propuesta</b>	<b>Justificación</b>	<b>Impacto</b>
Calibración de máquina	Accesorios incompletos	Reponer accesorios de todas las máquinas.	Todas las máquinas de costura requieren de accesorios en buen estado para su funcionamiento.	Las máquinas funcionarán con las medidas, tensiones y presión adecuadas. Además, reduce el tiempo de reposición cuando se acaba el hilo de la(s) bobina(s) en uso.
	Estándar de mecánicos incompleto	Completar el estándar con mecánicos calificados.	Los mecánicos asignados a costura son limitados, es imprescindible su presencia para la calibración, movimiento de máquinas, reparación, mantenimientos preventivos, instalación de dobladilladores y preparación de prensatelas.	Reducir el tiempo de preparación de máquinas en el cambio de estilo y su reparación.
Reprocesos	Uso incorrecto de cintas adhesivas	Reemplazar el uso de cintas de embalaje a cintas <i>masking tape</i> de uso industrial.	Las cintas adhesivas son usadas para reforzar la instalación de un dobladillador o equipo a la máquina, unir piezas y pegar complementos a la estación de trabajo.	Reducir las h-h utilizadas en la limpieza de residuos adhesivos.
	Nave de costura posee fuentes de polvo	Modificar el sistema de inyección de aire de la planta por uno que tenga filtros de polvo.	Debido a la ubicación en una zona industrial de la zona este de Lima, la cantidad de polvo que arrastra el aire es considerable, lo cual afecta de manera directa a la calidad del producto y al funcionamiento de los equipos.	Reducir los defectos de mancha por polvo y las fallas de máquina por acumulación de polvo en motor y ventiladores.
	Tablero astillado	Reemplazar y/o reparar los tableros astillados.	Las estaciones de trabajo contemplan el cabezal de la máquina, el tablero y los acoples entre máquinas. Debido al manipuleo requerido por cada operación, estos tableros sufren un desgaste que muchas veces llega a dañar su capa de acabado y puede generar defectos.	Eliminar los efectos generados por el estado de tableros deteriorados.

(continúa)

(continuación)

Interferencia	Causa	Propuesta	Justificación	Impacto
Reprocesos	Método inadecuado de desmanche	Uniformizar el método de desmanche de prendas.	Las prendas principalmente de colores claros son susceptibles a manchas a causa del manipuleo entre operaciones. Además, al no existir almacenes de tránsito en el área de corte, las piezas están expuestas a la espera de su despacho a costura.	Reducir el tiempo y asegurar la efectividad del desmanche.
	Método inadecuado de limpieza de máquina	Establecer el método correcto de limpieza de máquinas de acuerdo con la frecuencia de uso, tipo de cabezal, tipo de motor, tipo de máquina y las zonas donde tenga contacto el tejido.	Alrededor del 60 % de defectos registrados por calidad, como manchas, se debe a lubricantes como aceite o grasa.	Reducir en por lo menos 75 % los defectos por manchas de lubricantes.

Elaboración propia

De las propuestas revisadas, su justificación e impacto, se llegó a tres alternativas de solución:

- Generar un programa de reposición inmediata para herramientas, complementos, acoples y equipos con mal funcionamiento, el cual considere *stocks* para atención de cada evento.
- Implementar un programa de 5S en la planta de Texgroup, el cual permita reducir las interferencias asociadas al orden y la limpieza con el fin de elevar la eficiencia operativa.
- Tomando en cuenta el estado actual de la maquinaria, dobladilladores, accesorios y equipos, efectuar un mantenimiento y/o cambiar aquellos que lo requieran y dejarlos 100 % operativos.

#### PASO 5: Definir y programar las soluciones

##### *Evaluación y selección de la mejor alternativa*

De las alternativas de solución propuestas en el punto anterior, se ha elaborado una escala de valoración por puntos en función de criterios que se detallan a continuación:

- **Costo:** que es el valor monetario estimado de la implementación de la mejora. Incluye costos aproximados de equipos, personal, asesorías, etcétera. Se han establecido tres escalas de puntuación: de USD 0 a 10 000: 6 puntos; de USD 10 001-25 000: 4 puntos; y de USD 25 001-35 000: 2 puntos.
- **Tiempo de implementación:** que es el tiempo estimado desde la aprobación de la mejora por parte de la gerencia hasta la culminación al 100 % del plan de actividades asociado a la mejora, además de la entrega de resultados como memorias e informes. Se han establecido tres escalas de puntuación: de 0 a 6 meses: 6 puntos, de 6 a 12 meses: 4 puntos, y más de 12 meses: 2 puntos.
- **Vigencia:** que es la duración el resultado positivo de la implementación en el tiempo. Se han establecido tres escalas de puntuación: más de 24 meses: 6 puntos, de 12 a 24 meses: 4 puntos, y de 0 a 12 meses: 2 puntos.
- **Impacto:** que es el resultado a nivel cuantitativo y cualitativo de la mejora en la organización, al contemplar los beneficios directos e indirectos de la aplicación del cambio en las formas de trabajo y métodos con un resultado exitoso. Está relacionado con la vigencia del resultado de la implementación. Se han establecido tres escalas de puntuación: alto: 6 puntos, medio: 4 puntos, y bajo: 2 puntos.

Para calificar las alternativas, se diseñó la siguiente tabla (tabla 14), y se elegirá como la mejor alternativa de solución la que tenga mayor puntaje total.

### *Evaluación del alcance y limitaciones de la solución propuesta*

Luego de elegir en el punto anterior a la implementación de un programa de 5S en la planta de Texgroup como la mejor solución, se han evaluado el alcance y sus limitaciones.

Para el alcance se ha decidido que, por ser necesaria la inclusión de la filosofía 5S como parte de la cultura de la organización, este debe ser amplio y abarcar a todas las operaciones de la compañía.

Por otro lado, las limitaciones se describen en la siguiente tabla (tabla 15) y obedecen principalmente a factores presupuestales y de entrenamiento del personal.

Tabla 12  
Evaluación de alternativas

Problema	Alternativa	Criterios de evaluación			Total	
		Costo	Tiempo de implementación	Vigencia		Impacto
Baja eficiencia en planta	Generar un programa de reposición inmediata para herramientas, complementos, acoples y equipos con mal funcionamiento, el cual considere stocks para atención de cada evento.	4	4	4	4	16
	Implementar un programa con la metodología 5S en la planta de Texgroup.	2	4	6	6	18
Elaboración propia	Tomando en cuenta el estado actual de la maquinaria, dobladadores, accesorios y equipos, reparar y/o cambiar aquellos que lo requieran y dejarlos 100 % operativos.	6	6	2	2	16

Tabla 13  
Solución propuesta

Solución propuesta	Alcance	Limitaciones
Implementar un programa con la metodología 5s en la planta de Texgroup.	Áreas productivas y administrativas de la compañía.	Disponibilidad de recursos aprobados por la GG, rotación de personal, diversos grados de instrucción y conocimientos en el personal operario. Disponibilidad de líderes de la empresa para la ejecución del plan de trabajo.

Elaboración propia

PASO 6: Implantar y verificar las soluciones

Implementación de la solución

Llegados a este punto, las etapas del proyecto son las siguientes:

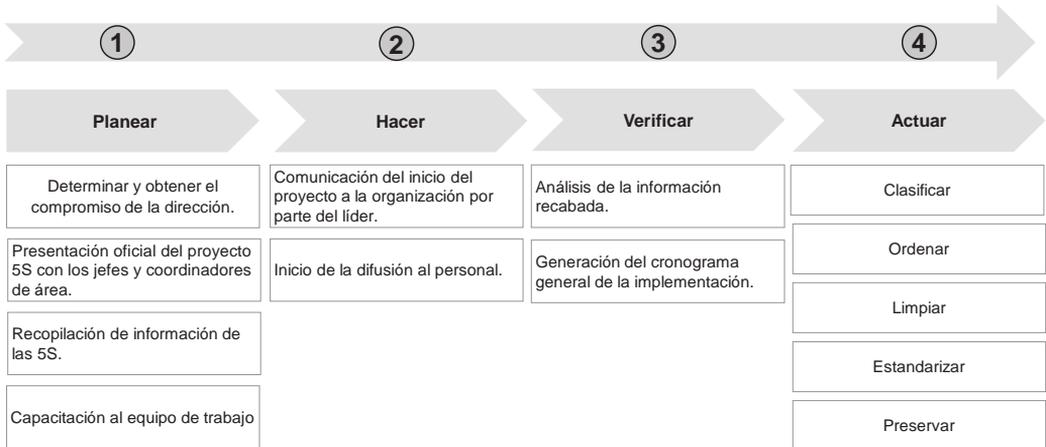


Figura 9. Etapas de la implementación  
Elaboración propia

## PASO 7: Acciones de garantía

En este caso, la solución elegida –un programa de 5S– cuenta con su propia herramienta de preservación del cambio en la quinta S: Shitsuke. Además, es imprescindible generar mecanismos e indicadores de proceso que permitan medir la efectividad de la mejora, los cuales deben ser fáciles de calcular y útiles para la toma de decisiones del equipo gerencial.

En la ejecución del mencionado programa, se usaron los siguientes indicadores: eficiencia en los días de cambio de estilo y razón porcentual entre el número de reprocesos por manchas de tierra, aceite y grasa y reprocesos totales. Y mecanismo: auditorías 5S.

## 4. CONCLUSIONES

Del trabajo de investigación se concluye lo siguiente:

- La mejora de los métodos de trabajo, incluidos los factores relacionados con el orden y la limpieza, genera un beneficio integral tanto en el tiempo de la operación como en su éxito (éxito se entiende como un producto conforme).
- Para validar que la inversión en una implementación de 5S representaba una oportunidad económicamente atractiva para Texgroup, se realizaron mediciones para cuantificar el impacto negativo que actualmente tienen los problemas identificados como principales. Con esto se pudo simular el beneficio en tres escenarios: pesimista, conservador y optimista.
- Las herramientas para el estudio fueron: diagramas de Pareto, histogramas, diagramas de causa-efecto, VSM, DOP, Sedac, las cuales demostraron su efectividad para cuantificar y estratificar la información que podía parecer subjetiva antes del análisis.

## REFERENCIAS

- Aminul Haque, K., Chowdhury, S., y Shahwath, A. (2014). Implementation of 5s and its effect in a selected garments factory: A case study. *Bangladesh Research Publications Journal*, X, 291-297.
- Castillo, M. V. (2009). *Desarrollo de una metodología para mejorar la productividad del proceso de fabricación de puertas de madera*. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral.

- Desta, A. (2014). Analysis of Kaizen Implementation in Northern Ethiopia's Manufacturing Industries. *International Journal of Business and Commerce, III*, 39-57.
- Guachisaca Guerrero, C. A. (2009). *Implementación de 5S como una metodología de Mejora en una empresa de elaboración de pinturas*. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Khan, A. M. (2013). Application of 5S System in the Sample Section of an Apparel Industry for Smooth Sample Dispatch. *Research Journal of Management Sciences, II*, 28-32.
- Khatun, M. M. (2013). Application of industrial engineering technique for better productivity garments production. *International Journal of Science, Environment and Technology, II*, 1361-1369.
- Paneru, N. (s. f.). Implementation of lean manufacturing tools in garment manufacturing process focusing sewing section of Men's Shirt. *Degree Programme in Industrial Management*. Oulu University of Applied Sciences, Oulu.
- Zerón, S. I. (s. f.). Implementación de la herramienta de calidad de las 5 "S" en la empresa "Confecciones Ruvinni" ubicada en Zacualtipán, HGO. *Procesos de Producción*. Universidad Tecnológica de la Sierra Hidalguense, Zacualtipán de Ángeles.

# Diseño de un método para la determinación de las medidas antropométricas para ser usadas en el tallaje de la población peruana

Nicolás Salazar Medina\*, Marco Henrich Saavedra\*,  
Patricia Larios Francia\*, Martín Reaño Vera\*  
Universidad de Lima

**George Schofield Bonello\***  
G&G Consultores Asociados

Recibido: 8 de marzo del 2018 / Aprobado: 12 de julio del 2018

doi: 10.26439/ing.ind2018.n036.2447

**RESUMEN:** El objetivo de la investigación es establecer las bases para la normalización del tallaje de la población peruana al optimizar recursos, procesos y oferta, alineados a la satisfacción de las necesidades del mercado. Encuestas a empresarios, entrevistas con expertos y mediciones antropométricas revelaron resultados significativos. Basados en estándares internacionales y recomendaciones de expertos, se realizaron 28 mediciones corporales, con lo cual se logró un método para la toma manual de medidas corporales.

*Palabras clave: tamaño corporal / antropometría – metodología / estatura / cuerpo humano – pesos y medidas / Perú*

## Designing a method to determine the anthropometric measurements to be used in the clothing sizing of the Peruvian population

**ABSTRACT:** The objective of the research is to establish the bases for the standardization of the Peruvian population clothing sizing by means of optimizing resources, processes and supply, adjusted to the satisfaction of the market needs. Surveys of entrepreneurs, interviews with experts and anthropometric measurements revealed important results. Based on international standards and expert recommendations, 28 body measurements were carried out, achieving a method for taking manual body measurements.

*Keywords: body size / anthropometry – methodology / height / human body – weights and measures / Peru*

---

\* Correos electrónicos: nsalazar@ulima.edu.pe, rlariosf@ulima.edu.pe, mhenrich@ulima.edu.pe, arvera@ulima.edu.pe, grschofield@yahoo.es

## 1. INTRODUCCIÓN

Los estudios de dimensionamiento a gran escala analizan las dimensiones de una muestra representativa de la población para obtener datos de medidas antropométricas. Sus aplicaciones no se limitan a un sector de la industria; por el contrario, son aplicados a todos los ámbitos de la antropometría: ergonomía, seguridad ocupacional, salud, valoración nutricional, moda y arquitectura (Boueri, 2008; Konz y Johnson, 2008).

Desde hace algún tiempo la industria textil ha considerado estudios de dimensionamiento como una fuente de información sobre los consumidores de acuerdo con sus medidas corporales, su forma y su tamaño. Países como el Reino Unido, Estados Unidos, Tailandia o México han desarrollado estudios de su población en colaboración con diferentes miembros del gobierno, institutos científicos y empresas textiles para elaborar una base de datos nacional.

Ante la falta de una norma actualizada de tallas en el Perú (según indicó la Sociedad Nacional de Industrias), solo existe la NTP-ISO 3635-2009, que indica el procedimiento para tomar medidas corporales. La presente investigación tiene como objetivo desarrollar una metodología alternativa que permita determinar la antropometría de la población para definir las tallas de las prendas de vestir en el Perú, y confirmar la necesidad de iniciar un proceso automatizado de toma de tallas a nivel nacional. Ello permitiría optimizar la utilización de los recursos, de los procesos y de la diversificación de la oferta para contribuir a una mayor satisfacción de las necesidades de vestido en el mercado y reducir las compras inadecuadas de insumos para su elaboración.

El aporte del presente estudio es la generación de una base de datos de las variables antropométricas de la población que permitirá a los fabricantes desarrollar sus propios modelos de prendas con medidas dentro del rango que se establezca para cada talla; asimismo, se ha desarrollado una metodología estandarizada para la definición de medidas antropométricas, así como la identificación y el análisis de los sistemas de tallas empleados en el mundo.

En opinión de los expertos del sector, una dificultad que afrontan las empresas de confecciones en el Perú es que no cuentan con estudios que les permitan determinar la distribución de tallas que deben ofrecer al mercado, lo cual vienen realizando en la actualidad de acuerdo con los resultados de cada campaña y con sus propias investigaciones, que

solo tienen un sustento empírico; sin embargo, esto muchas veces les significan quedarse con altos volúmenes de prendas de determinadas tallas y que luego deben tratar de vender como saldos en *outlets*, con la consiguiente reducción de ingresos y de rentabilidad.

## 2. METODOLOGÍA

El desarrollo de la presente propuesta corresponde a un diseño no experimental transaccional que se realizó entre marzo del 2015 y marzo del 2016. En ese periodo, se recolectaron datos con el propósito de describir las variables y analizar su incidencia (Hernández, Fernández y Baptista, 2010). La metodología del estudio incluyó la utilización de las siguientes fuentes primarias: encuestas a empresarios, entrevistas a expertos del sector textil de confecciones y mediciones antropométricas. Del análisis y la obtención de datos preliminares y finales de la encuesta se alcanzaron resultados cualitativos y cuantitativos. Se utilizaron sistemas de análisis de datos y se realizó un estudio antropométrico de las 28 dimensiones que involucró la determinación de las medidas críticas mínimas para tipificar la antropometría de la población.

En la fase de campo de la investigación se aplicó una metodología manual para el acopio de datos en 2D. Los resultados circunscritos a una muestra limitada de individuos localizados en Lima han sido utilizados para obtener datos sobre sus características antropométricas. Nuevos estudios han permitido introducir la tecnología del escáner 3D (volumétrica) de alta producción en escala, la cual ofrece una mayor confiabilidad de los resultados. Esta metodología permite incorporar los criterios morfológicos y las proporciones corpóreas que tipifican la riqueza étnica de la población peruana.

Para la metodología de la medición antropométrica, se tomaron como referencia los estándares para medidas corporales de la norma internacional ASTM D5219 (American Society for Testing Materials), de las normas andinas NA 0026, NA 0027 y NA 0028 y de métodos de medición de expertos en moldaje y construcción de prendas del sector textil de confecciones en el Perú.

Como resultado de la comparación de las normas técnicas internacionales, se han estimado 28 medidas antropométricas, las cuales se han considerado como las más utilizadas para la confección de prendas textiles. Asimismo, se incluyó el registro del peso de los individuos (ver tabla 1).

Tabla 1  
Matriz de principales medidas antropométricas

	<b>Medida</b>		<b>ASTM 5219</b>	<b>NA 26</b>	<b>NA 27</b>	<b>NA 28</b>
1	<i>Subject Height</i>	Altura del sujeto	X	X	X	X
2	<i>Head Circumference</i>	Circunferencia de la cabeza	X		X	
3	<i>Collar Circumference</i>	Circunferencia del cuello base	X	X	X	X
4	<i>Back Shoulder Width Horizontal</i>	Ancho del hombro posterior horizontal	X	X	X	X
5	<i>Shoulder Slope</i>	Caída del hombro	X	X	X	X
6	<i>Shoulder Length</i>	Ancho del hombro	X	X	X	X
7	<i>Across Axilla Chest Front Length</i>	Ancho de pecho frontal	X	X	X	X
8	<i>Across Axilla Chest Back Length</i>	Ancho de espalda	X	X	X	X
9	<i>Arm Hole Circumference</i>	Circunferencia de la sisa	X	X	X	X
10	<i>Arm Length</i>	Longitud del brazo	X	X	X	X
11	<i>Bust To Bust Length</i>	Ancho de busto a busto	X	X		X
12	<i>Vertical Trunk Circumference</i>	Circunferencia vertical del tronco	X	X	X	X
13	<i>Chest / Bust Circumference</i>	Circunferencia del busto / pecho	X	X	X	X
14	<i>OverArm Circumference</i>	Circunferencia sobre el brazo	X	X	X	X
15	<i>Waist Circumference</i>	Circunferencia de la cintura	X	X	X	X
16	<i>Waist Height</i>	Altura de la cintura	X	X	X	X

(continúa)

(continuación)

	<b>Medida</b>		<b>ASTM 5219</b>	<b>NA 26</b>	<b>NA 27</b>	<b>NA 28</b>
17	<i>High Hip</i>	Circunferencia de la cadera alta	X	X		X
18	<i>Wrist Circumference</i>	Circunferencia de la muñeca	X	X	X	X
19	<i>Hip Circumference</i>	Circunferencia de la cadera	X	X	X	X
20	<i>Crotch Height</i>	Altura de la entrepierna	X	X	X	X
21	<i>Crotch Length Full</i>	Longitud de la entrepierna completa	X	X	X	X
22	<i>Thigh Circumference</i>	Circunferencia del muslo	X	X	X	X
23	<i>MidThigh Circumference</i>	Circunferencia del muslo medio	X	X	X	
24	<i>Knee Circumference</i>	Circunferencia de la rodilla	X	X	X	X
25	<i>Calf Circumference</i>	Circunferencia de la pantorrilla	X	X	X	X
26	<i>Ankle Circumference</i>	Circunferencia del tobillo	X	X	X	X
27	<i>Foot Width</i>	Ancho del pie	X		X	
28	<i>Foot Length</i>	Longitud del pie	X		X	

Elaboración propia

Para la muestra inicial de las variables antropométricas para la industria textil, se midieron a 100 personas: 56 hombres y 44 mujeres. El estudio definió este tamaño de muestra preliminar a un 95 % del nivel de confianza 5,8 % de error. Se propuso trabajar en el estudio final con un margen de error de 2 %, y llegar así a un tamaño de muestra de 471 para varones y 278 para mujeres.

Se ha verificado que, si bien la metodología de medición antropométrica manual es muy útil para poder contar con esta información para la industria, al mismo tiempo también puede significar la posibilidad de incurrir en errores de toma de datos; además, se ha evidenciado que el tiempo estándar de cada medición haría innecesariamente extenso y costoso un estudio a escala nacional.

De acuerdo con criterios internacionales, se realizó una investigación en la industria peruana, y se determinaron las medidas antropométricas de la población necesarias para la elaboración de prendas de vestir y se tomaron como referencia las normas andinas elaboradas por el Comité Andino de Normalización y de ASTM International, así como la opinión experta de industriales de la confección en el Perú. La tabla 1 compara la inclusión de las medidas antropométricas más relevantes que son consideradas en las principales normas internacionales.

### 3. ANÁLISIS ANTROPOMÉTRICO

Para definir los equipos y las herramientas para la medición, la investigación desarrolló un método para la toma de medidas corporales de manera manual. Para ello, se utilizaron equipos y herramientas que fueron adquiridos especialmente para llevar a cabo el estudio, razón por la cual no se tuvieron que calibrar. Dichos equipos y herramientas fueron: una báscula digital de columna profesional, un antropómetro (Large Bone Caliper Lafayette), un estadiómetro de acero flexible, una cinta métrica flexible y una herramienta de nivel de burbuja.

El estudio consideró un tamaño de muestra preliminar de 56 hombres y 44 mujeres para las mediciones. Para determinar que la colección de los datos en las diferentes medidas (tanto para hombres como para mujeres) correspondiera a una distribución normal, se utilizó la prueba de bondad de ajuste de Kolmogoroff-Smirnoff, la cual dio como resultado que las medidas se ajustaran a una distribución normal. Todos los datos que se presentan como resultado preliminar representan a la población de Lima Metropolitana. Los datos del censo del 2007 del Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) permitirán determinar los rangos de edades más adecuados para el desarrollo de las mediciones.

#### 4. MEDIDAS CORPORALES DE LA INVESTIGACIÓN ANTROPOMÉTRICA

Para la presente investigación se ha considerado el estudio de 28 medidas corporales. Algunas de ellas detallan la forma de medir a continuación:

- Peso y altura del sujeto

Con la ayuda de la báscula, se realiza el pesaje exacto de manera digital; asimismo, se calcula el índice de masa corporal (IMC) y, con el estadiómetro, se mide la distancia vertical desde la coronilla de la cabeza hasta la base de los pies, tomada con el sujeto de pie y sin zapatos.



*Figura 1. Peso y altura del sujeto\**

---

\* Las fotografías de este artículo han sido tomadas por Patricia Larios.

- **Circunferencia de la cabeza**

Con el estadiómetro, se mide el perímetro de la cabeza sobre las orejas.



*Figura 2.* Circunferencia de la cabeza

- **Circunferencia de la base del cuello**

Con el estadiómetro, se mide la circunferencia del cuello, tomada sobre la cervical y en la parte superior de la clavícula.

- **Circunferencia del busto/pecho**

Con la cinta métrica flexible, se mide la circunferencia horizontal alrededor del torso, tomada bajo los brazos y en la parte más completa del ápice del pecho (hombres) y busto (mujeres), incluida la parte inferior de los omóplatos.

- **Circunferencia de la cadera alta**

Con la cinta métrica flexible, se mide la máxima circunferencia horizontal alrededor del torso, tomada por debajo del nivel de la cintura e incluida la extensión abdominal.

- **Circunferencia de la cadera alta**

Con la cinta métrica flexible, se mide la máxima circunferencia horizontal alrededor del torso, tomada por debajo del nivel de la cintura e incluida la extensión abdominal.

- Ancho del hombro posterior horizontal

Con el antropómetro Large Bone Caliper, se mide la distancia horizontal a través de la espalda de la parte superior del hombro en la intersección de la clavícula con la cabeza del hueso húmero.



*Figura 3. Ancho del hombro posterior horizontal*

- Ancho de espalda

La distancia horizontal es medida con la ayuda del antropómetro a través de la espalda de axila a axila.



*Figura 4. Ancho de espalda*

- **Circunferencia del tobillo**

Con la cinta métrica flexible, se mide la máxima circunferencia horizontal del tobillo, tomada sobre la mayor prominencia de los huesos del tobillo.



*Figura 5. Circunferencia del tobillo*

- **Ancho del pie**

La distancia recta es tomada con la ayuda de un antropómetro, de un lado del pie al otro en la parte más ancha, y tomada con el sujeto de pie y sin zapatos.



*Figura 6. Ancho del pie*

## 5. RESULTADOS

Se realizó una encuesta a empresarios (muestra conformada por 30 gerentes, supervisores y especialistas del sector textil de confecciones) y se obtuvo como resultado que el 80 % consideraba necesario contar con un sistema de tallas estandarizadas. Esto es particularmente importante, ya que el 83 % de estos, a su vez, identificaron la existencia de diferencias entre las tallas que producen para el mercado externo respecto a las que producen para el mercado nacional.

De acuerdo con las encuestas, entrevistas a expertos y estándares internacionales, se determinaron las medidas antropométricas de la población necesarias para la elaboración de prendas de vestir, y se tomaron como referencia las normas andinas elaboradas por el Comité Andino de Normalización y de ASTM International, así como la opinión experta de industriales de la confección en el Perú.

Cabe destacar que, como resultado de la encuesta, se determinó que el 77 % de confeccionistas de prendas en el Perú utiliza algún estándar de tallas, mientras que el 23 % de estos confeccionistas utiliza un estándar propio.

El estudio permite un primer acercamiento a una distribución proporcional para estimar lotes de producción a las empresas del rubro y reducir el margen de error de la cantidad de prendas que deberían producir para cada campaña. En la tabla 2, se aprecia la distribución de los 100 individuos que conformaron la muestra:

Tabla 2  
*Total de sujetos medidos*

Género	Rango de edades						Total
	18-25	26-35	36-45	46-55	56-64	65+	
<b>Masculino</b>	10	13	10	12	7	4	56
<b>Femenino</b>	10	12	8	6	4	4	44

Elaboración propia

A partir de las medidas antropométricas promedio obtenidas, el empresario peruano contará con datos que le permitirán revisar los sistemas de tallas que vienen utilizando actualmente.

Como resultado de las mediciones antropométricas realizadas a la muestra, se obtuvo como resultado:

Tabla 3  
*Medidas antropométricas promedio*

Medida (metros)	Mujeres		Varones	
	Media	Desviación estándar	Media	Desviación estándar
Altura	155.325	5.911	166.556	6.424
Circunferencia de la cabeza	55.220	1.907	56.104	1.954
Circunferencia del cuello	32.698	2.778	39.467	3.121
Ancho del hombro posterior horizontal	36.590	1.844	42.517	2.158
Inclinación del hombro	18.675	3.174	17.722	3.921
Longitud del hombro	13.613	1.487	16.222	1.519
Ancho del pecho frontal	50.250	4.970	52.769	3.911
Circunferencia del busto/ pecho	93.100	8.745	100.585	8.306
Ancho de espalda	29.225	2.437	33.185	2.634
Circunferencia de la sisa	35.050	4.035	39.778	4.652
Longitud del brazo	55.488	3.056	58.713	3.049
Longitud de busto a busto	18.313	2.314	–	–
Circunferencia vertical del tronco	150.765	6.116	170.113	7.043
Longitud de la entropierna completa	72.125	4.275	86.426	6.596
Circunferencia sobre el brazo	26.273	2.463	29.396	3.155
Circunferencia de la cintura	79.380	10.874	93.333	10.773
Altura de la cintura	99.938	5.662	106.620	5.999
Circunferencia de la cadera alta	93.638	9.448	97.583	8.063
Circunferencia de la cadera	96.333	6.532	100.570	6.881
Circunferencia de la muñeca	15.350	1.222	17.154	1.029
Altura de la entropierna	67.675	5.298	71.759	5.757
Circunferencia del muslo	53.168	3.366	53.381	4.433
Circunferencia del muslo medio	47.080	3.396	47.176	4.616
Circunferencia de la rodilla	36.265	2.300	37.639	3.388
Circunferencia de la pantorrilla	33.613	2.327	35.820	3.096
Circunferencia del tobillo	23.453	1.974	25.156	2.036
Ancho del pie	8.728	0.580	9.985	0.848
Longitud del pie	22.800	1.410	25.272	1.189
Peso (kilos)	58.605	8.865	75.533	12.164

Elaboración propia

El análisis cuantitativo de las medidas antropométricas de la muestra concluyó que el tamaño de muestra para un nivel de confianza del 95 % y un margen de error del 5 % es de 77 individuos. El presente estudio evaluó 100 sujetos. Para ser más exigentes, se propone trabajar con un margen de error del 2 %, y llegar así a un tamaño de muestra de 471 para varones y 278 para mujeres para el estudio final; sin embargo, experiencias de otros países señalan que la toma de medidas se debe realizar a un espectro muestral lo más amplio posible.

Dada la cantidad de sujetos que se requerirán en el estudio final, un estudio antropométrico confiable a escala nacional requiere de escáneres corporales 3D que permitan obtener datos antropométricos de todo el cuerpo humano de forma rápida y precisa y sin invadir la privacidad de las personas, ya que estos equipos están diseñados para tomar mediciones a partir de aproximaciones en las que no se tiene contacto directo con el cuerpo. A ello se suma la necesidad de trabajar con sistemas que permitan ser transportados a diferentes lugares a lo largo del país y que no requieran de calificación técnica para instalarlos y desinstalarlos.

## 6. CONCLUSIONES

Se encontró que en la industria de la confección peruana no hay un sistema de tallas estándar, ya que no se ha encontrado evidencia de existencia de valores antropométricos de la población peruana.

En opinión de los expertos del sector, una dificultad que afrontan muchas empresas confeccionistas en el Perú es que no se cuenta con estudios que les permitan determinar la distribución de tallas que deben ofrecer al mercado, lo que trae como consecuencia quedarse con altos volúmenes de prendas y que luego deben tratar de vender como saldos en “outlets”, con la consiguiente reducción de ingresos y rentabilidad.

Este estudio permite un primer acercamiento a una distribución proporcional que permita a las empresas poder estimar con un menor margen de error la cantidad de prendas que deberían producir de acuerdo con el patrón de tallas que estas manejen en sus propios negocios.

Se definió una metodología para establecer una tabla antropométrica de la población peruana que se utilice para definir los sistemas de tallas en prendas de vestir.

A partir de las medidas antropométricas promedio obtenidas en el presente estudio, el empresario peruano contará con una herramienta

basada en datos preliminares para revisar sus sistemas de tallas utilizados actualmente, lo que determinará en la optimización de sus recursos.

La toma manual tuvo un tiempo promedio de 13 minutos por cada sujeto, con el apoyo de tres técnicos debidamente entrenados. Se evidenció que el uso de una metodología de toma de medidas manual causó incomodidad en varias de las personas que aceptaron colaborar con el estudio por razones de pudor o incomodidad en la ejecución de la toma de medidas.

## 7. RECOMENDACIONES

Se recomienda un estudio de la población con mayor alcance territorial que determine resultados de las medidas antropométricas del total de la población peruana, tomando en cuenta las diferentes etnias a lo largo de las regiones del Perú.

Un estudio a nivel nacional debería contar con la participación de la academia, el gobierno, los gremios y la industria.

Los resultados de la investigación pueden ser utilizados como herramienta metodológica y como base de datos para futuros estudios en sectores como salud, estadística, industria de alimentos, manufactura de muebles y otros.

La investigación obtuvo datos que pueden ser utilizados por la industria del calzado, como el ancho y la longitud del pie. En el estudio también se obtuvieron datos a ser utilizados en la confección de accesorios, prendas complementarias e industria de la joyería (circunferencia de cabeza, circunferencia de cuello y circunferencia de muñeca).

Del análisis estocástico de los resultados, se podrán establecer los parámetros representativos y sus rangos que al escalarlos tipifiquen las tallas de las categorías de prendas que conforman el vestuario básico, según género y edad. Se podrán crear los modelos físicos o virtuales (maniqués) normalizados que sirvan para el modelado, patronado y escalado de moldes y desarrollos de moda.

Se recomienda, a partir de los resultados del presente estudio, proponer la elaboración de una norma técnica de formas de medición para ser utilizada en la industria de la confección de prendas de vestir y accesorios en tejido de punto, plano, cuero y ganchillo.

## REFERENCIAS

- Ashdown, S. (ed.). (2007). *Sizing in clothing*. Cambridge: Woodhead Publishing.
- ASTM International. (2013). *ASTM standards for body measurements*. Baltimore: MD.
- Berrios, A. I. (2009). La Antropometría en la Moda. Criterios de identificación del consumidor. En O. Echevarría (dir.), *Actas de Diseño. Facultad de Diseño y Comunicación*. Buenos Aires: Universidad de Palermo.
- Boueri Filho, J. (2008) *Antropometria aplicada a arquitetura, urbanismo e desenho industrial*. São Paulo: Estação das Letras e Cores Editora
- Castano, I. (29 de marzo de 2012). *Study Focuses on Mexican Sizing*. Cámara Nacional de la Industria del Vestido. Recuperado de [http://www.canaive.org.mx/detalleNoticias.php?id\\_notas=878](http://www.canaive.org.mx/detalleNoticias.php?id_notas=878)
- Centro para el control y la prevención de enfermedades (2012). *Ergonomía (desórdenes musculo esqueléticos)*. Recuperado de <http://www.cdc.gov/spanish/niosh/topics/ergonomia.html>
- Charoensiriwath, S. y Srichaikul, P. (2009). *Size Thailand: Constructing Thailand's National Anthropometrics Database using 3D Body Scanning Technology*. Centro Nacional de Electrónica y Tecnología Informática de Tailandia. Recuperado de <http://www.pnclink.org/pnc2009/chinese/PresentationMaterial/Oct08/08-ConfHall-UnfoldingCulture/08-UnfoldingCulture-piyawut.pdf>
- Croem (s. f.). *Prevención de Riesgos Ergonómicos*. Murcia: Instituto de Seguridad y Salud laboral de la Región de Murcia. Recuperado de <http://www.croem.es/prevergo/formativo/1.pdf>
- Expo Textil Perú 2015 (s. f.) *Perú en Cifras*. Recuperado de <http://expotextilperu.com/>
- Faust, M. E. y Carrier, S. (ed.). (2014). *Designing apparel for consumers: The impact of body shape and size*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited.
- Fernández, C., Hernández, R. y Baptista, P. (2010). *Metodología de la investigación* (5.ª ed.). México D.F.: McGraw-Hill.

- Instituto Nacional de Calidad [Inacal]. (2009). *Normas Técnicas Peruanas de Textiles*. Recuperado de <https://www.inacal.gob.pe/repositorioaps/data/1/1/1/jer/prensa/files/TEXTILES.pdf>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática [INEI] (2015). *Comportamiento de la Economía Peruana en el Primer Trimestre de 2015*. Recuperado de [http://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/boletines/informe-tecnico-n02\\_pbi-trimestral\\_2015i.pdf](http://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/boletines/informe-tecnico-n02_pbi-trimestral_2015i.pdf)
- Instituto Nacional de Salud [INS]. (1998). *Módulo medidas antropométricas, registro y estandarización*. Lima: INS.
- INT prepara projeto de pesquisa antropométrica 3D da população. (4 de agosto del 2013). Recuperado de [http://www.int.gov.br/component/docman/doc\\_view/47404ago2013jornalbrasilantropometria](http://www.int.gov.br/component/docman/doc_view/47404ago2013jornalbrasilantropometria)
- Just-Style: Mexico National Sizing Survey to begin next year (27 de octubre del 2003). Recuperado de [http://www.just-style.com/news/national-sizing-survey-to-begin-next-year\\_id67804.aspx](http://www.just-style.com/news/national-sizing-survey-to-begin-next-year_id67804.aspx)
- Konz, S. y Johnson, S. (2008). *Work Design: occupational ergonomics*. Arizona: Holcomb Hathaway Publishers.
- Kuttner, D. (2004). What's on with WEAR. *WEAR: The World Engineering Anthropometry Resource*. Recuperado de <http://www.bodysizeshape.com/newsletterWEAR>
- Lafayette Instrument. (29 de febrero del 2016). Recuperado de [http://www.lafayettelifesciences.com/product\\_detail.asp?itemid=2200](http://www.lafayettelifesciences.com/product_detail.asp?itemid=2200)
- London, U. O. (s.f.). *Size UK -Results from the UK National Sizing Survey*. Recuperado de <http://www.arts.ac.uk/>
- Norma Andina 0026:2007, Tabla Estándar de Medidas Corporales relacionadas con Mujeres con figura tipo talla extra, tallas 14w - 32w. (25 de julio del 2017). Comunidad Andina.
- Norma Andina 0027:2007, Tablas Estándar de Medidas Anatómicas para Hombres de talla 34 a 60 regular. (25 de julio del 2007). Comunidad Andina.
- Norma Andina 0028:2007, Tablas Estándar de Medidas Corporales Juveniles, tallas 0 a 19. (25 de julio del 2017). Comunidad Andina.
- Parra, N. L. y Rico, A. (2007). *Estudio antropométrico de preadolescentes en la ciudad de Ambato* (tesis doctoral, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Ecuador).

- Pheasant, S. y Haslegrave, C. M. (2005). *Bodyspace: Anthropometry, ergonomics and the design of work*. Florida: CRC Press.
- Quaresma, M., de Moraes, A. y Cardoso, V. M. B. (2000). Some Causes of Errors Using Anthropometric Data when Designing Products and Workstations. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 44(33), 323-326.
- Roach, K. (31 de julio del 2002). *Sizing Survey Benefits Many Manufacturers*. Recuperado de <http://scm.ncsu.edu/scm-articles/article/sizing-survey-benefits-many-manufacturers>
- Roebuck, J. (1995). *Anthropometric methods: Designing to fit the human body*. California: Human Factors & Ergonomics Society
- Salazar, N., Henrich, M., Larios, R., Reaño, M. y Schofield, G. (2016). *Análisis antropométrico para la normalización del tallaje de la población peruana*. Lima: IDIC. Universidad de Lima.
- Sizemic (s.f.). *SizeUK - The National Sizing Survey*. Recuperado de <http://www.arts.ac.uk/research/research-projects/completed-projects/sizeuk-results-from-the-uk-national-sizing-survey/>
- Triveño, G. (25 de octubre del 2013). Sector textil genera S/6.600 mlls. de valor agregado. *El Comercio*. Recuperado de [http://elcomercio.pe/economia/peru/gladys-triveno-sector-textil-genera6600-mlls-valor-agregado-noticia-1649730?ref=flujo\\_tags\\_6656&ft=nota\\_19&e=imagen](http://elcomercio.pe/economia/peru/gladys-triveno-sector-textil-genera6600-mlls-valor-agregado-noticia-1649730?ref=flujo_tags_6656&ft=nota_19&e=imagen).
- Woolworths invites public to be part of its national sizing survey. (14 de febrero de 2014). Recuperado de <http://www.marketingupdate.co.za/?IDStory=59494>
- Zamberlan, M.C. (2013). *Cientistas usam scanner tridimensional para descobrir e disponibilizar as verdadeiras medidas da população brasileira*. Recuperado de <http://www.canalciencia.ibict.br/pesquisa/0146-Medidas-antropometricas-da-populacao-brasileira.html>
- Zernike, K. (1 de marzo del 2004). Sizing Up America: Signs of Expansion From Head to Toe. *New York Times*. Recuperado de <http://www.nytimes.com/2004/03/01/us/sizing-up-america-signs-of-expansion-from-head-to-toe.html?pagewanted=1>



Calidad y medioambiente

---

Quality and Environment



# Una evaluación de calidad para soluciones obtenidas a partir de variaciones algorítmicas del método Multi-Start\*

Eduardo Redondo\*\*

Universidad Nacional de Asunción. San Lorenzo, Paraguay

Recibido: 22 de enero del 2018 / Aprobado: 14 de mayo del 2018

doi: 10.26439/ing.ind2018.n036.2449

**RESUMEN:** Para este trabajo se experimentó con dos variaciones algorítmicas del método heurístico de búsqueda local Multi-Start, para la generación y evaluación de la calidad de soluciones provenientes de diferentes escenarios productivos. Estas variaciones fueron aplicadas a 29 modelos de refinerías petroleras para luego inferir sobre efectividad y conveniencia de cada variación sobre los modelos. Se utilizó un *software*, disponible comercialmente, de uso frecuente en problemas de mezclas en el sector industrial.

*Palabras clave: optimización / algoritmos heurísticos*

## A quality assessment for solutions achieved through algorithmic variations of the Multi-Start method

**ABSTRACT:** For this research, an experiment with two algorithmic variations of the Multi-Start heuristic method for local search was held in order to generate and assess the quality of solutions coming from different manufacturing scenarios. These variations were applied to 29 oil refinery models to infer about the effectiveness and convenience of each model variation. A commercially available software, frequently used in blending problems at the industrial level, was used.

*Key words: optimization / heuristic algorithms*

---

\* Se agradece al Dr. Alireza Tehrani por la supervisión de este trabajo.

\*\* Correo electrónico: eredondo@ing.una.py

## 1. INTRODUCCIÓN

La modelización de operaciones industriales a través de la aplicación de la investigación de operaciones puede llegar a órdenes significativos en cuanto a número de restricciones y variables de los modelos correspondientes. Un modelo operativo industrial de base es aquel que representa algún proceso productivo; en este caso, para el estudio presentado en este trabajo, se dispone de modelos en los que se modelan dos tipos de actividades: producción y mezcla. Estos modelos corresponden a problemas no lineales (NLP) del tipo *The Pooling Problem* (Fieldhouse, 1993) y *The Blending Problem* (Gupte *et al.*, 2017), los cuales, debido a la dificultad computacional que representa su resolución, requieren de algoritmos heurísticos o procedimientos empíricos que proporcionen una solución considerablemente buena por parte del decisor. Entre los primeros algoritmos heurísticos utilizados para realizar búsquedas locales o de vecindario, se encuentra el algoritmo Multi-Start (MS), el cual consiste en realizar múltiples búsquedas a partir de muestras o soluciones iniciales aleatorias (Martí *et al.*, 2015), o, en otras palabras, consiste en iterar la etapa de generación de una solución inicial factible seguida de la etapa de búsqueda de una mejor solución en las inmediaciones de dicho punto inicial, repetir los pasos hasta que se satisfaga algún criterio de parada y devolver el mejor valor de la función objetivo (FO) obtenida.

De acuerdo con Dantzing (1963), cronológicamente la primera aplicación industrial fructífera de la programación lineal (LP) se ha dado en el sector petrolero. No obstante, desde la exploración de puntos de extracción, hasta el refinamiento y la distribución del producto, este es un sector que permite la aplicación de técnicas de programación sin limitarse a las lineales. Varvarezos (2008) afirma que las no-linealidades de los procesos que se llevan a cabo en este ámbito han causado el desplazamiento de las técnicas de optimización hacia el uso de métodos de programación no lineal (NLP). Un ejemplo de esto se puede encontrar en los departamentos encargados de la planificación de la producción de las refinerías, en donde frecuentemente se plantean problemas del tipo *The Blending* al momento de planificar la producción (Schrage, 2006). Para la resolución de estos problemas se emplean heurísticas y metaheurísticas de búsqueda local tales como Multi-Start, Variable Neighborhood Search (VNS), Búsqueda Tabú y Recocido Simulado (Herrán, 2012), y es mediante el uso de estos modelos matemáticos con sus respectivas técnicas de optimización que los encargados de planificar periódicamente la producción calculan los niveles de producción

“óptimos” o buenos para cada producto con el fin de proveer buenos y rentables puntos de operación (por ejemplo: reglaje de temperaturas de las columnas de destilación, unidades y máquinas a utilizar, cantidades de producción de cada producto y subproducto, etc.).

El presente trabajo muestra la evaluación de la calidad para soluciones obtenidas a partir de dos variaciones algorítmicas hechas con el método Multi-Start (MS): MS-Continuo (MSC) y MS-Encadenado (MSE), compara los valores medios de las FO arrojadas por los dos algoritmos aplicados en los modelos estudiados, e infiere sobre la efectividad relativa de cada uno de ellos de acuerdo con los análisis de desviación relativa porcentual (RPD) de los valores de las FO pertenecientes a los mismos modelos. En la segunda sección de este trabajo se presenta una introducción al funcionamiento de las heurísticas de búsqueda local y se describe de forma detallada el método MS y sus variaciones. En la tercera sección, se explica cómo fue realizado el experimento y qué factores fueron los analizados. En la cuarta sección, se discuten los resultados obtenidos y, finalmente, en la quinta sección, se presentan las conclusiones y recomendaciones de continuidad para futuras investigaciones.

## 2. HEURÍSTICAS DE BÚSQUEDA LOCAL

Como lo explican Martí y Reinelt (2011), las heurísticas, o simplemente métodos aproximativos, son aquellos utilizados en la práctica y en el ámbito de la optimización a fin de caracterizar cierto tipo de método de resolución de problemas catalogados como NP-difíciles que requieren de una resolución rápida y eficiente; es decir, se caracterizan por enfocarse en la velocidad del proceso de búsqueda y en la calidad de la solución obtenida. De acuerdo con la naturaleza o finalidad para la cual fue creada cada heurística, los mismos autores presentan una clasificación de los métodos más conocidos, en la cual se presenta la búsqueda local como una clase de método que busca mejorar una solución al partir de una solución inicial factible para permitir explorar otras soluciones colindantes a la primera de forma controlada por medio de la evaluación de las soluciones de la vecindad o en torno de la solución inicial. La vecindad se define como el grupo de soluciones que pueden ser obtenidas a consecuencia de pequeños cambios (perturbaciones) en la solución inicial, finalizándola cuando se alcanzan criterios de parada o bien cuando se incurre en perturbaciones no admitidas por el programa.

Por otra parte, el tiempo tomado por un método exacto para hallar una solución óptima en un problema complejo (asumiendo que existiera un método apropiado y exacto para la resolución del problema), sería significativamente superior al que representa la ejecución de un método heurístico. En general, aun sabiendo que no es posible asegurar la globalidad de ninguna solución obtenida a partir de una heurística (Martí *et al.*, 2013), debido a la practicidad en relación con los métodos exactos, el decisor termina recurriendo a estos métodos para la resolución de problemas reales de optimización. Posteriormente, a modo de evaluar cuán óptima o buena ha sido la resolución, se realizan evaluaciones de las calidades de las soluciones encontradas por medio de técnicas estadísticas comparativas.

## 2.1 Caracterización de una heurística de búsqueda local

Dos aspectos que caracterizan la eficiencia de una heurística de búsqueda local corresponden, por un lado, a la velocidad con la que se ejecuta hasta hallar los óptimos, mejorar la solución y/o satisfacer los criterios de parada, y, por otro, a la calidad de la solución hallada en términos de cuán buena es la solución encontrada.

Los métodos de resolución de problemas en investigación de operaciones son representados a través de esquemas o gráficos de bloques que reflejan las acciones lógicas a realizarse sobre los datos, y son descritos en detalle a través de algoritmos, los cuales serán posteriormente traducidos a un lenguaje de programación para su resolución vía herramientas computacionales. A partir de esto, puede explicarse la importancia de la “velocidad”, puesto que, a mayor complejidad del problema (problemas con espacios de búsqueda de grandes dimensiones, restricciones duras que producen espacios de búsqueda muy dispersos, funciones multiobjetivos, variables temporales o que manejan un gran volumen de datos), o del método de resolución o algoritmo que lo describa, mayor será el tiempo utilizado y, por consiguiente, mayores serán los costos asociados al proceso de toma de decisiones. De esta forma, para el caso analizado en este trabajo, debido al volumen de datos y ecuaciones, quedan descartados métodos exactos que pudieran ser utilizados para la optimización del problema de mezcla en refinerías, tales como *Enumerative Search*, *Backtracking*, *Branch and Bound*, *Dynamic Programming* y estrategias de programación lineal y entera, pues en la práctica representarían un elevado consumo de tiempo de ejecución (Nemaschnow, 2014).

En cuanto al segundo aspecto, la evaluación de la calidad de los resultados obtenidos por medio de una heurística se logra mediante la comparación de los resultados obtenidos con valores que pueden pertenecer a otros métodos. Este contraste entre soluciones permite visualizar cuán “óptima” es una solución o bien cuán relativamente acertada resulta la aplicación de una heurística sobre determinado modelo.

Para realizar estos contrastes, generalmente se utiliza la desviación porcentual relativa existente entre el valor de la solución obtenida por la heurística utilizada y los valores de:

- soluciones óptimas halladas en instancias menores del problema o con límites predefinidos que simplifiquen el problema,
- otras soluciones obtenidas a partir de métodos exactos (en caso de que estos métodos existan o sean aplicables al problema), otras heurísticas o métodos híbridos.

## 2.2 Multi-Start

Este algoritmo posee un enfoque iterativo en el cual, a través de cada iteración, se lleva a cabo una búsqueda de óptimos del problema, a partir de soluciones definidas aleatoriamente y perturbándose los valores de los elementos que componen la solución para generar así soluciones o puntos “vecinos” (colindantes) dentro del espacio solución. El propósito es inspeccionar otras soluciones en otras regiones dentro del espacio solución y hallar aquellas que proporcionen un mejor valor de la función objetivo (González y Rivera, 2015).

El hecho de que el algoritmo MS aplique los reinicios aleatorios le brinda una particular ventaja frente a otros métodos, ya que diversificando el análisis en diferentes regiones del espacio solución se lograría salir de la influencia de los óptimos locales con mayor facilidad.

---

Esquema básico del algoritmo MS:

---

- |   |                     |
|---|---------------------|
| (1) Definir $i = 1$   |                     |
| (2) Mientras la condición de parada no sea satisfecha:  |                     |
| (2.1) Construir una solución $x_i$  | <b>(Generación)</b> |
| (2.2) Aplicar una búsqueda local para mejorar $x_i$<br>y asumir $x_i'$ como solución obtenida | <b>(Mejora)</b>     |
| (2.3) Si $x_i'$ mejora la mejor solución, actualizarla<br>Definir $i = i + 1$                 | <b>(Evaluación)</b> |
-

### 2.2.1 Variantes algorítmicas de MS

Martí y Reinelt (2011) afirman que el algoritmo MS puede ser considerado como un puente entre las heurísticas simples o clásicas, y las metaheurísticas complejas o modernas. Así también, otras variaciones del método pueden ser desarrolladas e incluso integradas a otras técnicas que permitan hibridar y mejorar las capacidades de búsqueda. Las variaciones más simples del algoritmo son utilizadas para comparar otros métodos y medir su contribución relativa, tal como se hace en Baluja (1995) para comparar diferentes algoritmos genéticos utilizando MS como base de contraste.

En este trabajo, debido a que se desea evaluar la calidad de dos variaciones propuestas de la heurística MS, se utilizan modelos que disponen de soluciones ya conocidas, lo cual permite contrastar y evaluar las soluciones halladas con estas variaciones. Dichas variantes algorítmicas difieren en el modo de selección de los datos de entrada y en la magnitud en cuanto a la perturbación de los elementos que componen la matriz empírica de base (MEB), cuya definición se presenta en el capítulo siguiente. Estos algoritmos son denominados en función del modo de generación de soluciones: Algoritmo MS-Continuo (MSC) y Algoritmo MS-Encadenado (MSE). Debido a altos tiempos de ejecución, y según experiencias de usuarios experimentados, para este trabajo se acuerda experimentar con la generación aleatoria de 10 casos como mínimo y 50 casos como máximo.

### 2.2.2 Algoritmo MS-Continuo (MSC)

Con esta variante se pretende generar escenarios secundarios a partir de un escenario de base definido por la MEB cuyos elementos crean el escenario de base  $Y_0$ . Y, mediante una perturbación en esos elementos, se generan nuevos escenarios  $Y_i$  con ( $i \neq 0$ ). Un lanzamiento MSC ejecuta 50 búsquedas utilizando escenarios secundarios. Los resultados obtenidos por esta técnica darán aleatoriamente valores en el vecindario más próximo al punto de base. El porcentaje de perturbación de los elementos de la MEB es constante para cada generación.

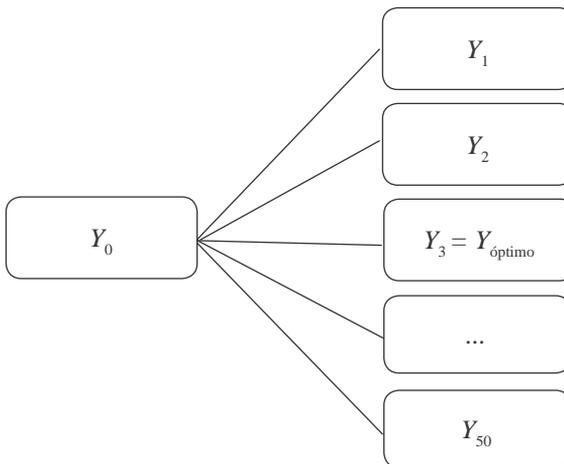
---

Esquema del algoritmo MSC:

---

- (1)  $Y_0$  = Adoptar un escenario de base según la MEB
  - (2)  $s^*$  = Buscar y definir el óptimo local en función de  $Y_0$
  - (3)  $N$  = Definir el tamaño del MS
  - (4) Repetir hasta alcanzar  $N$ 
    - (4.1)  $Y_i$  = Definir nuevo escenario sobre la base de perturbaciones arbitrarias en  $Y_0$
    - (4.2)  $s^i$  = Buscar el óptimo local en función de  $Y_i$
    - (4.3)  $s^*$  = Seleccionar el óptimo local: mejor solución  $s^*$  vs.  $s^i$
- 

La figura 1 muestra un escenario  $Y_0$  sirviendo de base para la generación de otros cincuenta escenarios secundarios que serán adoptados como puntos de partida para la resolución de cincuenta problemas lineales.



*Figura 1.* Escenarios secundarios  $Y_i$  dependientes del escenario de base  $Y_0$  para la variación algorítmica MSC  
Elaboración propia

A modo de interpretar el funcionamiento de la variación MSC, se plantea la hipotética situación en la que existe una sola incógnita en un escenario dado, y esta se simboliza con la letra  $X_i$ . Los valores de esta incógnita variarían según la asignación de perturbaciones en la fase de generación de escenarios yendo desde  $X_0$  para la MEB inicial (escenario inicial  $Y_0$ ) hasta  $X_{50}$  para el escenario  $Y_{50}$ . Estos valores fueron distri-

buidos en el eje de abscisas en la figura 2. En esta figura, en el eje de ordenadas se representan valores genéricos de las FO asociadas a los cincuenta escenarios definidos por las  $X_i$ . Cada círculo representa una de las cincuenta ejecuciones del programa (habiéndose establecido el tamaño de la búsqueda en 50).

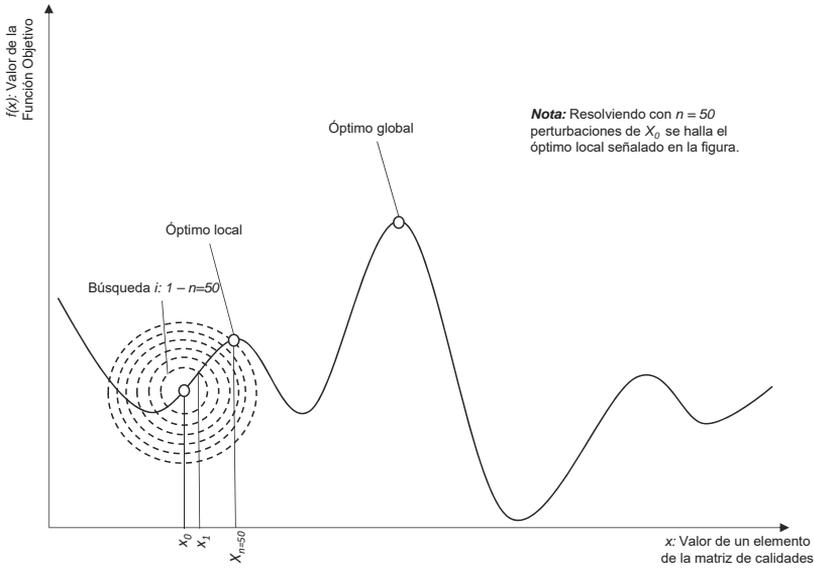


Figura 2. Representación esquemática del proceso de búsqueda local en una función genérica para la variación algorítmica MSC. La abscisa representa un valor asociado a un elemento de la matriz MEB que será perturbado  $N = 50$  veces  
Elaboración propia

Para la variación algorítmica MSC, la mejor solución hallada corresponde a la máxima/mínima solución obtenida ( $s^*$ ).

### 2.2.3 Algoritmo MS-Encadenado (MSE)

Con esta estrategia se resuelven los problemas de forma encadenada, con escenarios de base distintos pero dependientes. Cada escenario de base corresponderá a uno obtenido a partir de una variación realizada sobre el escenario precedente que haya brindado la mejor solución (minimizando o maximizando una FO). En otras palabras, de manera encadenada y sucesiva se crea el escenario  $Y_i$  a partir del escenario  $Y_{i-1}$  que

haya otorgado la mejor FO, y se agrupan consecutivamente formaciones de MSC. Con esta variante en el algoritmo del método MS, se pretende lograr una búsqueda con un grado de libertad extra, y aumentar así la probabilidad de hallar óptimos globales al saltar posibles estancamientos en óptimos locales.

---

Esquema del algoritmo MSE:

---

- (1)  $Y_0$  = Adoptar un escenario de base según la MEB
  - (2) repetir hasta alcanzar  $N$ 
    - (2.1)  $s^*$  = Buscar el óptimo local en función de  $Y_0$
    - (2.2)  $N$  = Definir el tamaño del MS
    - (2.3)  $n$  = Definir el número de fases
    - (2.4) repetir hasta alcanzar  $N/n$ 
      - (2.4.1)  $Y_1$  = Definir el nuevo escenario sobre la base de perturbaciones en  $Y_0$
      - (2.4.2)  $s'$  = Buscar el óptimo local en función de  $Y_1$
      - (2.4.3)  $s^*$  = Seleccionar el óptimo local  $\rightarrow$  mejor solución  $s^*$  vs.  $s'$
- 

En la figura 3 se muestra el encadenamiento logrado entre escenarios del  $MSC_i$  y del  $MSC_{i+1}$ .

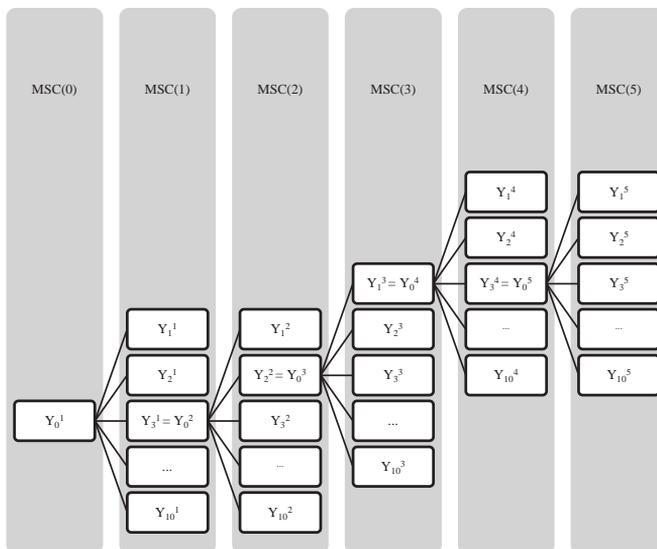


Figura 3. Escenarios secundarios  $Y_i$  dependientes del mejor escenario precedente  $Y_{i-1}$  para la variación algorítmica MSE  
Elaboración propia

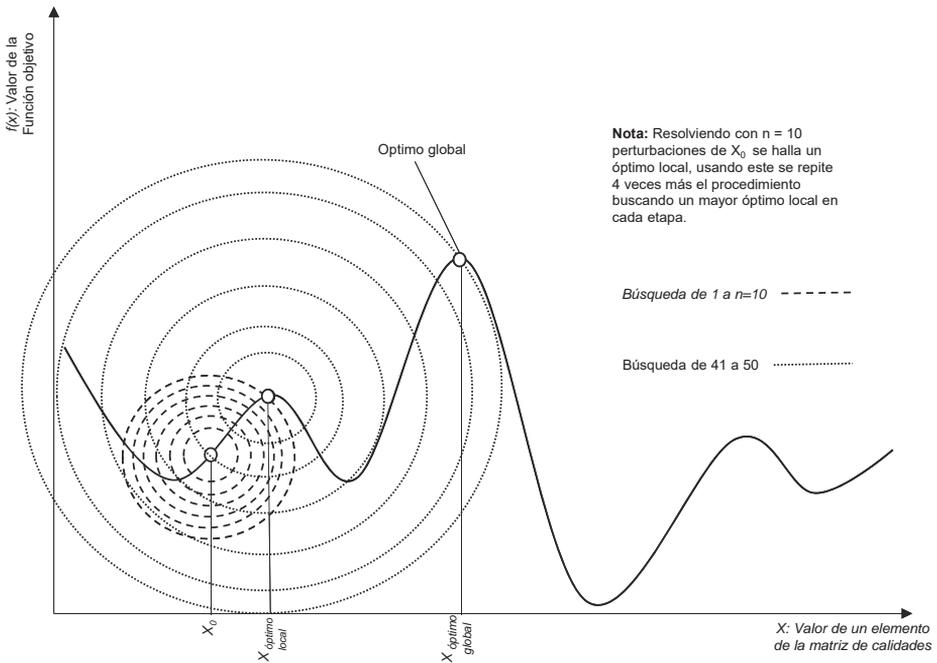


Figura 4. Representación esquemática del proceso de búsqueda local en una función genérica para la variación algorítmica MSE. La abscisa representa un valor asociado a un elemento de la matriz MEB que será perturbado  $n \times N = 5 \times 10 = 50$  veces  
Elaboración propia

En la figura 4, al igual que para la variación MSC, para una mejor interpretación del funcionamiento de la variación MSE, se plantea la hipotética situación en la que existe una sola incógnita en un escenario dado, y esta se simboliza con la letra  $X_i$ . Los valores de esta incógnita variarían según la asignación de perturbaciones en la fase de generación de escenarios. Además, se establece el número de fases  $n = 5$ , con lo cual se deberán realizar cinco fases de búsqueda con tamaño 10 para totalizar las 50 búsquedas. Cada círculo representa una de las 10 ejecuciones del programa en cada fase. Los grupos de 10 círculos concéntricos componen un MSE, es decir, luego de haberse definido cinco fases, existen cinco grupos de MSE con 10 NLP cada uno. El escenario en el cual se haya encontrado la mejor solución del primer grupo será el escenario de base adoptado para la siguiente búsqueda a partir del cual se realizarán las siguientes generaciones. Al final de la búsqueda, se tendrán tantos óptimos locales como grupos de MSE efectuados. La mejor solución hallada corresponde a la máxima/mínima solución obtenida en todos los grupos MSE.

### 3. DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO

En este trabajo, para la resolución de los modelos matemáticos, se aplican métodos de linealización sucesiva (SLP) como el de Expansión de Taylor de Primer Grado. Con este método se quiebran algunas bilinealidades al asignar valores temporalmente “fijos” a ciertas variables. Estas asignaciones definirán el escenario de aplicación del método MS. Estos valores predefinidos están asociados a un posible escenario “Y”, bajo cuya influencia se resuelve el modelo, esto es, al realizar  $i \{i > 0\}$  cambios o conjunto de cambios, se genera el mismo número de escenarios y soluciones, pero con valores y tiempos de resolución distintos. Las  $i$  soluciones halladas corresponden a óptimos locales en la región de factibilidad bajo influencia del escenario en cuestión Y, y el número de pasos realizados para hallar la solución que satisface el criterio de parada define la velocidad de convergencia del modelo estudiado.

Fueron utilizados 29 modelos de planificación de la producción que cuentan en promedio con 3000 (tres mil) ecuaciones y 8000 (ocho mil) incógnitas. Estos modelos pertenecen a 10 refinerías petroleras. Para la linealización y resolución de los problemas, se utilizó el programa Generalized Refining Transportation Marketing Planning System (GRTMPS); *software* comercialmente disponible de la compañía Haverly Systems. Y, para la evaluación de la calidad de los resultados arrojados por los algoritmos, los resultados fueron tratados con las herramientas estadísticas de Microsoft Excel.

#### 3.1 Selección de modelos

La toma de decisión y puesta en marcha de los flujos productivos para la mezcla y obtención de derivados propios del refinamiento del crudo se basa en modelos de planificación que a su vez se construyen sobre modelos matemáticos ajustados vía previa simulación. Puede decirse que cada modelo matemático posee un “comportamiento” único que depende de las variables de entrada (condicionantes de frontera), de los métodos de resolución y de las técnicas de búsqueda local utilizadas. Este comportamiento se refleja en el modo único en el que se resuelve el problema hasta hallar la solución al considerar aspectos como si converge o no en una solución factible, número de pasos hasta la convergencia, tiempo utilizado en cada paso, si la solución hallada corresponde a un óptimo o no, si satisface las tolerancias o no, y el valor de la función objetivo hallada.

A modo de lograr un espacio muestral representativo y así visualizar el comportamiento de cada modelo, fueron seleccionados tres de ellos para cada uno de los 10 sitios industriales existentes ( $A, B, C, \dots, J$ ), a excepción de un sitio cuyo comportamiento reflejó una notable estabilidad, por lo que se optó por recurrir a dos modelos solamente, lo que totalizó en 29 los modelos analizados ( $A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, B_3, \dots, J_1, J_2$ ).

A modo de aumentar la fiabilidad del análisis, para cada sitio se seleccionaron modelos que reflejan el flujo productivo promedio asociado a escenarios con niveles de fluctuación poco cambiantes en lo que refiere a cotizaciones internacionales y parámetros productivos dependientes de los niveles de demanda en el mercado. Esta información fue relevada vía entrevistas a operadores y modeladores de la compañía.

### 3.2 Selección de datos de entrada y parámetros iniciales para la linealización

El MS precisa disponer de datos de base/entrada correspondientes a índices de operación, parámetros industriales, de calidad y de distribuciones, entre otros vinculados a cada sitio en particular (Glover, 2000, 2007). Si bien estos elementos poseen valores desconocidos, estos datos son necesarios pues describen escenarios iniciales para la resolución de los problemas y arranques del método, ya que a partir estos se aplicará el método MS hasta hallar o no los óptimos locales. Algunos métodos, según Chinneck (2008), no permiten llegar a una solución óptima local sin pasar primeramente por soluciones o puntos dentro de la región de factibilidad. Por consiguiente, es deseable que esta primera solución corresponda a una solución conocida proveniente de una colección de resultados históricos, es decir, se utiliza un punto de convergencia factible ya conocido dentro del espacio de soluciones. Mitchell *et al.* (1992), Mammen y Hogg (1997) y Conrad *et al.* (2007) demuestran que en un NLP existe una relación directa entre la dificultad de determinar su factibilidad y la determinación de los parámetros para la aplicación de MS al problema a causa de las restricciones. De hecho, es difícil encontrar una primera solución factible para la generalidad de los NLP. Por lo tanto, existen algunas técnicas que buscan mejorar la convergencia y la resolución del programa; entre ellas, se hallan técnicas de Penalties, Step Bounding, Dynamic Dampening, Dampening y otras técnicas heurísticas como Multi-Start.

Para garantizar la convergencia del problema y que la solución inicial obtenida corresponda a una perteneciente a la región de factibilidad, en concordancia con lo citado en el párrafo anterior para todos los modelos, fueron definidos inicialmente “puntos de base” que corresponden a matrices empíricas de base (MEB), cuyos elementos son incógnitas de operación con valores temporalmente adoptados que servirán para linealizar el problema y resolverlo por medio de un resolvidor de modelos lineales. La MEB es adoptada temporal y empíricamente bajo influencia de resultados obtenidos con el mismo modelo en meses anteriores. De esta forma, pueden conocerse los rangos operativos de las incógnitas (salvo en escenarios operativos amenos), lo cual agiliza significativamente la búsqueda de óptimos, puesto que el punto de partida corresponde a un punto de la vecindad. Los resultados bajo efectos de la MEB se comparan con los valores iniciales, los errores son medidos y analizados para finalmente compararlos con ratios de tolerancia.

### 3.3 Definición de parámetros para la aplicación de MS

- i. Elementos de la MEB: elementos cuyos valores fueron fijados empíricamente mediante soluciones de ejecuciones anteriores del programa productivo en las plantas industriales, es decir, son valores pasados conocidos que pueden adoptar las variables del problema y que, al saberse que en el pasado han adoptado estos valores, se asume que los óptimos buscados deben rondar esta vecindad. Entre los elementos vinculados a la MEB se encuentran, por ejemplo, las variables asociadas a las calidades físico-químicas de las mezclas transportadas entre las unidades de producción, tales como densidades mínimas y máximas admisibles, tenor máximo de azufre, índice mínimo deseado de RON (Ron Octane Number), viscosidades dinámicas y cinemáticas, densidades, distribuciones de masas o volúmenes, temperaturas de operación y mezclado, límite mínimo para el índice de cetano, temperaturas mínimas (Flash Point), máximas (Cloud y Freezing Points).
- ii. Tamaño del MS: número de casos a ser generados {10,50} que indica el número de escenarios “Y” a generar.
- iii. Probabilidad de perturbación de cualquier elemento de la MEB: puede variar entre {0,25; 0,50 y 1,00}
- iv. Semilla de número aleatorio: valor inicial o semilla que se toma de base para generar números pseudoaleatorios. En este caso, este

número aleatorio es empleado para la generación de nuevos coeficientes que serán multiplicados a los elementos de la MEB para así cambiar o perturbar dichos elementos.

- v. Máximo cambio relativo: máxima perturbación relativa y aleatoria aplicable a elementos de la MEB  $\{0,5\}$ . Un elemento  $\mathbf{a}$  puede variar su valor en  $\pm 0,5\mathbf{a}$ .

### 3.4 Creación del banco de soluciones

A partir de la resolución de los problemas descritos anteriormente y considerando la posibilidad de combinar distintos tamaños de búsquedas, se analizaron siete combinaciones para cada uno de los 29 modelos. Para la variante MSC, se trabajó con tamaños de 10 y 50 búsquedas, y variaciones en los valores de los elementos de la MEB en órdenes de magnitudes de 25 %, 50 % y 100 %. Para MSE, se trabajó únicamente con 50 como tamaño de la búsqueda, y variaciones en los valores de los elementos de la MEB en órdenes del 25 %, 50 % y 100 %.

Los resultados fueron analizados utilizando el método de desviación porcentual relativa (RPD: Relative Percentage Deviation), la cual es computada en cada instancia de acuerdo con la expresión (1).

$$RPD\% = 100 \cdot \left| \frac{f_{\text{algoritmo}} - f_{\text{benchmark}}}{f_{\text{benchmark}}} \right| \quad (1)$$

donde  $f_{\text{benchmark}}$  es la mejor solución conocida obtenida empíricamente por resolución previa mediante el algoritmo MS simple, y  $f_{\text{algoritmo}}$  es la solución obtenida con el algoritmo modificado bajo evaluación.

Los datos fueron recopilados para conformar una base de datos consistente en el almacenamiento de las FO obtenidas. Los resultados promediados para cada sitio se presentan en la tabla 1, donde se muestra el RPD con respecto a la FO del escenario inicial, lo cual representa un indicador de mejoría obtenida en la búsqueda efectuada.

## 4. RESULTADOS

Se evaluaron las calidades de dos variaciones algorítmicas del Método de Búsqueda Local Multi-Start. Las variaciones consistentes en leyes de generación de escenarios mediante parámetros de perturbación de los elementos que componen a las matrices de base (escenarios inicia-

Tabla 1  
 RPD entre la solución obtenida con el escenario de base y la mejor de las soluciones halladas por MS según el % de perturbación y los algoritmos MSC y MSE. Nomenclatura XX%-NN-YYY → (% de perturbación; tamaño MS, MSC o MSE).  
 Aclaración: NA = dato sesgado

Banco de datos completo - RPD									
Refinerías	25 % 10 MSC	25 % 50 MSC	50 % 50 MSC	100 % 50 MSC	25 % 50 MSE	50 % 50 MSE	100 % 50 MSE	100 % 50 MSE	
A	0,655 %	0,451 %	1,124 %	0,739 %	0,442 %	0,028 %	0,716 %		Rojo --> El máximo valor de RPD por refinería (fila)
B	0,060 %	0,182 %	0,222 %	0,237 %	0,147 %	0,222 %	0,184 %		
C	0,068 %	0,046 %	0,043 %	0,041 %	0,068 %	0,005 %	NA		
D	0,140 %	0,004 %	0,059 %	0,009 %	0,140 %	0,011 %	0,000 %		
E	0,386 %	0,386 %	0,009 %	0,371 %	0,611 %	0,001 %	0,000 %		
F	0,049 %	0,049 %	0,049 %	NA	0,049 %	0,277 %	NA		
G	0,208 %	0,195 %	0,174 %	0,132 %	0,287 %	0,374 %	0,392 %		
H	0,432 %	0,450 %	0,447 %	0,270 %	0,444 %	0,288 %	0,270 %		
I	0,210 %	0,262 %	0,000 %	0,000 %	0,206 %	0,000 %	0,000 %		
J	0,221 %	0,223 %	0,223 %	0,223 %	0,222 %	0,221 %	0,222 %		

Elaboración propia

les) fueron aplicadas a diferentes modelos para analizar la desviación porcentual relativa a una solución de base ya conocida. Fueron seleccionados modelos con sus respectivas soluciones conocidas a modo de tener un criterio definido que permita la evaluación de la calidad obtenida mediante la variación algorítmica del método MS. Los resultados fueron expuestos en la tabla 1.

#### 4.1 Inferencias sobre el uso de MSC vs. MSE

Las RPD obtenidas permitieron inferir sobre la conveniencia aplicativa de cada variación para con los modelos. Sin embargo, se generaron inconvenientes en el transcurso del estudio, ya que la generación aleatoria de escenarios sin discriminación de la naturaleza de la variable perturbada tiende a producir. Esto se debe a que las modificaciones aleatorias se dieron sobre todas las variables, en ocasiones, obligando al programa a resolver el problema con valores irreales o fuera de los rangos permitidos por las restricciones del modelo productivo. La detección de estos errores o fallas y su correspondiente corrección hicieron posible robustecer el programa.

Tabla 2

*Conveniencias para los 10 sitios industriales en referencia a algoritmos y tamaños de MS para hallar óptimos locales de manera efectiva*

Sitios	MSC o MSE	Perturbación %	Tamaño MS
A	MSC	50	19
B	MSC	50	18
C	MSC	25	23
D	MSC	25	14
E	MSC	25	17
F	MSE	50	3X10
G	MSC	50	14
H	MSC	25	39
I	MSC	25	20
J	MSC	25	21

Elaboración propia

A modo global, los resultados obtenidos no demostraron ventajas contundentes en lo que concierne a la aplicación de una u otra variante. A nivel particular, podría inferirse sobre el tamaño de la búsqueda de acuerdo con la posición usual del óptimo hallado en referencia a la posición promedio en donde fue hallado el óptimo por el método MS. De esta manera, se reduce el espectro de búsqueda en cada modelo de acuerdo con los resultados expuestos. De igual forma, podría inferirse sobre el uso apropiado de una de las dos variaciones algorítmicas y la magnitud de la perturbación a realizar en cada modelo (porcentaje de elementos perturbados). Ver la tabla 2.

#### 4.2 Análisis de efectividad de ambos algoritmos

Realizando comparaciones entre los resultados arrojados por ambos algoritmos (ver gráfico 1), y teniendo en cuenta la globalidad de las FO calculadas por cada método en el mismo modelo, se resume que ambos permiten hallar mejorías en la búsqueda de óptimos locales en distintos grados: según el porcentaje de elementos perturbados en la MEB, puede concluirse que el método MSE ha obtenido una ligera mejoría en el hallazgo de FO mayores.

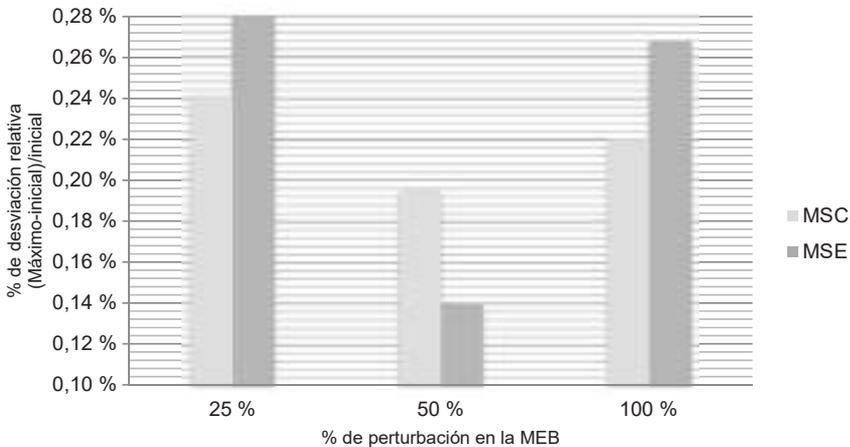


Figura 5. Resultado obtenido en la evaluación de la calidad al analizar las mejoras en las funciones objetivas. Relación entre RPD y porcentaje de perturbación de los elementos de la MEB

Elaboración propia

Sin embargo, como se puede ver en la tabla 3, el resultado no fue contundente debido a la magnitud no considerable de las mejorías. Luego, se asume que ambas estrategias son congruentes a modo general, no así a modo específico. Las estrategias parecieran adaptarse mejor a ciertos modelos al lograr mejoras significativas esporádicas, mientras que en otros modelos no se registraron variaciones.

Tabla 3  
*Resumen de mejoras obtenidas para cada variación  
 algorítmica según el porcentaje de elementos  
 perturbados en la MEB*

<b>Perturbación</b> %	<b>MSC</b> %	<b>MSE</b> %
<b>25</b>	0,24	0,28
<b>50</b>	0,20	0,14
<b>100</b>	0,22	0,27
	0,22	0,23

Elaboración propia

#### 4.3 Efecto secundario de las perturbaciones

Un modelo se degenera cuando los elementos y las variables adoptan valores no previstos en la construcción del modelo. La capacidad de un modelo de soportar perturbaciones es un notorio y básico indicador de su robustez. Por medio de perturbaciones arbitrarias, se logra fortalecer un modelo al hallar sus puntos de quiebre o falla y corregir la falencia. Una fuerte dependencia entre las degeneraciones obtenidas en los modelos y el nivel de perturbación aplicada se ha constatado en todos los modelos evaluados. En el gráfico 2, puede apreciarse en el eje de ordenadas el porcentaje de degeneraciones halladas en el experimento al someterlas al porcentaje de perturbaciones descrito en el eje de abscisas. De esta forma, no solo se logró identificar los sitios con mayores índices de robustez en sus modelos, sino que, a su vez, se logró detectar posibilidades de fortalecimiento del modelo en otros sitios. Los casos con fallas fueron considerados como casos aberrantes y no fueron añadidos al banco de soluciones.

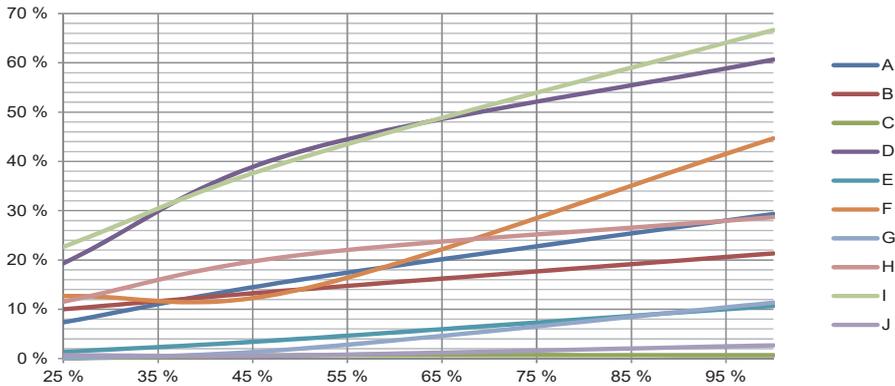


Figura 6. Porcentaje de problemas degenerados o fallas en el eje de ordenadas vs. porcentaje de elementos de la MEB que fueron perturbados para 8 de los 10 sitios analizados  
Elaboración propia

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La aplicación de heurísticas para incrementar las posibilidades de hallar óptimos locales con mayor eficiencia es muy prometedora. Al ser cada modelo una única estructura de condiciones e interconexión entre agentes, es muy difícil garantizar la efectividad de un algoritmo sin una evaluación de calidad de la heurística preliminarmente. De esta forma, es posible optimizar las operaciones actuales reales de una organización al ajustar el uso de una técnica que ya vienen utilizando cotidianamente. Esta mejora, a corto plazo, se traduce en beneficios monetarios para la industria al agilizar sus operaciones y planificar los ciclos operativos de manera más eficiente.

Esta rama ofrece oportunidades de mejora y adaptación de técnicas existentes a situaciones específicas de cada organización que aún no han sido exploradas. En este contexto, se recomienda continuar el estudio abarcado considerando una hibridación de técnicas evolutivas con uso de memoria adaptativa como las propuestas hechas por Lan y DePuy (2006).

## REFERENCIAS

- Baluja, S. (1995). *An Empirical Comparison of Seven Iterative and Evolutionary Heuristics for Static Function Optimization*. Pennsylvania: Carnegie Mellon University.
- Chinneck, J. W. (2008). *Feasibility and Infeasibility in Optimization: Algorithms and Computational Methods*. New York: Springer Science & Business Media.
- Conrad, J., Gomes, C. P., Hoeve, W. V., Sabharwal, A. y Suter, J. (2007). Connections in Networks: Hardness of Feasibility Versus Optimality. *Integration of AI and OR Techniques in Constraint Programming for Combinatorial Optimization Problems Lecture Notes in Computer Science* (pp. 16-28). Berlín: Springer. doi: 10.1007/978-3-540-72397-4\_2.
- Dantzig, G. (1963). *Linear programming and extensions*. Princeton: Princeton University Press.
- Fieldhouse, M. (1993). The pooling problem. En T. Ciriani and R. Leachman (ed.), *Optimization in Industry: Mathematical Programming and Modeling Techniques in Practice* (pp. 223-230). New York: John Wiley & Sons Ltd.
- Glover, F. (1997). Tabu Search and Adaptive Memory Programming-Advances, Applications and Challenges. In *Interfaces in Computer Science and Operations Research: Advances in Metaheuristics, Optimization, and Stochastic Modeling Technologies* (pp. 1-75). Boston: Kluwer Academic Publishers.
- Glover, F. (2000). Multi-Start and Strategic Oscillation Methods-Principles to Exploit Adaptive Memory. In *Computing Tools for Modeling, Optimization and Simulation: Interfaces in Computer Science and Operations Research* (pp. 1-23). Colorado: Kluwer Academic Publishers.
- González, F. y Rivera, J. C. (2015). *A Multi-Start Iterative Local Search for the k-Traveling Repairman Problem*. Medellín: Universidad EAFIT.
- Gupte, A., Ahmed, S., Dey, S. S. y Cheon, M. S. (2017). Relaxations and discretizations for the pooling problem. *Journal of Global Optimization*, 67(3), 631-669. doi:10.1007/s10898-016-0434-4.

- Herrán, A., de la Cruz, J. M. y De Andrés, B. (2012). Global Search Metaheuristics for planning transportation of multiple petroleum products in a multi-pipeline system. *Computers & Chemical Engineering*, (37), 248-261.
- Lan, G. y DePuy, G. W. (2006). On the effectiveness of incorporating randomness and memory into a multi-start metaheuristic with application to the set covering problem. *Computers & Industrial Engineering*, 51(3), 362-374.
- Mammen, D. L. y Hogg, T. (1997). A new look at the easy-hard-easy pattern of combinatorial search difficulty. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 7, 47-66.
- Martí R., Lozano J. A., Mendiburu A. y Hernando L. (2015) Multi-start Methods. En: Martí R., Panos P., Resende M. (eds) *Handbook of Heuristics* (pp.1-21). Cham: Springer.
- Martí, R. y Reinelt, G. (2011). *The Linear Ordering Problem: exact and heuristic methods in combinatorial optimization*, volume 175. Berlin: Springer.
- Martí, R., Resende, M. G. y Ribeiro, C. C. (2013). Multi-start methods for combinatorial optimization. *European Journal of Operational Research*, 226(1), 1-8.
- Mitchell, J. E. y Todd, M. J. (1992). Solving combinatorial optimization problems using Karmarkar's algorithm. *Mathematical Programming*, 56(1-3), 245-284.
- Nesmachnow, S. (2014). An overview of metaheuristics: accurate and efficient methods for optimisation. *International Journal of Metaheuristics*, 3(4), 320-347.
- Schrage, L. E. (2006). *Optimization modeling with LINGO*. Chicago: LINDO Systems.
- Varvarezos, D. K., Joffe, B. J., Paules IV, G. E. y Kunt, T. (2008). New optimization paradigms for refinery planning. In *Proceedings Foundations of Computer-Aided Process Operations*, (pp. 441-445). Cambridge: Focapo.



# Estudio de la conicidad de postes de madera de eucalipto (*Eucalyptus globulus* Labill) y pino amarillo (*Pinus sp*) utilizados en el Perú para la electrificación rural

Julio César Canchucaja Rojas\*, Leonidas Miguel Castro  
Universidad Nacional Agraria La Molina

Francisco García Fernández  
Universidad Politécnica de Madrid

Recibido: 5 de abril del 2018 / Aprobado: 23 de mayo del 2018

doi: 10.26439/ing.ind2018.n036.2450

**RESUMEN:** El Perú está adquiriendo postes de pino amarillo del sur y eucalipto para ejecutar proyectos de electrificación rural. A pesar de que la conicidad es una característica importante para adquirir accesorios para su instalación, no hay estudios sobre el tema. Se evaluó la conicidad de 642 postes de pino amarillo y 1590 de eucalipto, y se concluyó que existen diferencias significativas entre conicidades de ambas especies para un nivel de significación del 5 %.

*Palabras clave:* postes de madera / conicidad / electrificación rural / pinos / eucaliptos

## Study of the conicity of eucalyptus (*Eucalyptus globulus* Labill) and yellow pine (*Pinus sp.*) wooden poles used in Peru for rural electrification

**ABSTRACT:** Peru is purchasing southern yellow pine and eucalyptus poles to carry out rural electrification projects. Even though conicity is an important characteristic to acquire the pertinent installation accessories, there are no studies on said topic. The conicity of 642 yellow pine poles and 1,590 eucalyptus poles was evaluated, and it was concluded that there are significant differences between both species' conicities at a significance level of 5 %.

*Keywords:* wooden poles / conicity / rural electrification / pines / eucalyptus

---

\* Correo electrónico: jccr@lamolina.edu.pe

## 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente en el Perú se está realizando la ampliación de la frontera eléctrica, sobre todo en las zonas rurales, con el uso mayormente de postes de madera preservados, tanto de procedencia nacional como importada, gracias a su bajo costo comparado con el de otros materiales, por su facilidad de transporte, durabilidad en servicio, entre otros. En lo que se refiere a postes de procedencia nacional, el eucalipto (*Eucalyptus globulus* Labill) es la especie mayormente utilizada por su abundancia, disponibilidad y bajo precio, mientras que en los importados resalta el pino amarillo del sur (*Pinus sp.*), de procedencia estadounidense, que completa la demanda anual de este producto, por sus propiedades físicas, mecánicas y buenas características de preservación.

En este aspecto, cuando se instalan los postes en las líneas eléctricas, se requiere de materiales de fijación para las crucetas, los conductores u otros materiales que van insertos en la zona cercana a la cabeza. Por dicho motivo, es de suma importancia conocer las circunferencias mínimas y máximas que pueden presentar las cabezas de los postes utilizados en el país, a fin de determinar las dimensiones de los elementos de sujeción arriba mencionados.

La variable que permite estimar teóricamente estas circunferencias se denomina conicidad, cuya definición indicada en la NTP 251.021 (Inacal, 2016) es “la disminución gradual del diámetro del poste del pie o base a la cabeza, expresada en mm/m”.

La conicidad hace referencia a la disminución del diámetro del fuste desde la base hasta el ápice del árbol. Tiene su origen en la superposición del crecimiento en altura y el crecimiento en grosor que tiene el árbol y que simplícidamente le da una forma cónica (Vignote, Martínez y Villasante, 2013). Además, aunque parte de la conicidad del fuste es intrínseca a la especie y procedencia, otra parte importante es debida a la silvicultura seguida. No en vano la conicidad es una herramienta tecnológica de gran utilidad en el manejo de bosques (González, 1988).

La determinación de la conicidad de los postes utilizados en la electrificación rural es muy importante, sobre todo para determinar las dimensiones de los materiales de ferretería que se deben adquirir para colocar las crucetas u otro tipo de soporte para el sostenimiento del tendido eléctrico, telefónico, etc.

La norma NTP 251.022 (Inacal, 2017) indica que la conicidad es característica según las especies y sus condiciones de crecimiento, la cual se calcula sobre la base de las circunferencias mínimas en la línea de tierra y en la cabeza indicadas en la tabla 3 de dicha norma (Inacal, 2017). Además, se tiene que para las longitudes y clases, que los agrupan de acuerdo con su resistencia a la carga de rotura, de postes de eucalipto las conicidades máximas permitidas fluctúan entre 10,6 y 11,3 mm por metro lineal.

Asimismo, en la tabla 8M de la norma ANSI 05.1 (ANSI, 2017), se tiene que para las longitudes y clases de postes de pino amarillo del sur estudiadas las conicidades máximas permitidas oscilan de 8,9 a 9,6 mm por metro lineal.

Es habitual admitir conicidades con disminución de diámetro entre 6 y 13 mm por metro lineal de poste. Diferentes normas internacionales fijan unos intervalos o valores límite para dicha conicidad. Así, la normativa europea fija un intervalo de 6 mm a 16 mm por metro lineal (Aenor, 2011); la norma argentina fija una conicidad máxima de 10 mm por metro lineal (IRAM, 2007); y la norma ecuatoriana precisa un intervalo de entre 5 y 14 mm por metro lineal (INEN 1998).

En el presente estudio se han determinado las conicidades de los postes de eucalipto (*Eucalyptus globulus* Labill) y de pino amarillo del sur (*Pinus sp.*) de 8 m, 11 m y 12 m de clases 5, 6 y 7, se han comparado ambas especies entre sí, y se han obtenido conicidades en torno a 6,0 mm/m para el caso de los pinos amarillos del sur y en torno a 4,1 mm/m para el caso del eucalipto.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Los postes preservados de eucalipto (*Eucalyptus globulus* Labill) fueron evaluados en las ciudades de Huancayo, Andahuaylas y Lima, mientras que los postes de pino amarillo del sur (*Pinus sp.*), procedentes del estado de Oregon, Estados Unidos de América, fueron evaluados en los almacenes de la empresa HGP Representaciones y Servicios EIRL, ubicados en la zona de Trapiche y Lurín, Lima.

Se estudiaron postes de eucalipto y de pino amarillo del sur preservados con sales hidrosolubles de 8 m – clase 7, 11 m – clase 6 y 12 m – clases 5 y 6. Para las medidas de longitud, se ha utilizado una cinta métrica de 25 m con 1 cm de división de escala y el diámetro se ha

obtenido a partir de la circunferencia medida con una cinta métrica de 3 m con 1 mm de división de escala.

En cada uno de los postes de madera de cada especie y clase de este estudio, se midieron la longitud total, así como la circunferencia en la base y en la cabeza para obtener su conicidad.

Para el cálculo de la conicidad, se utilizó la fórmula señalada en la norma NTP 251.022 siguiente (Inacal, 2016):

$$C_o \text{ (mm / m)} = \frac{D_p - D_c}{L_t} \quad \begin{array}{l} C_o: \text{conicidad (mm/m)} \\ D_p: \text{diámetro en el pie o base (mm)} \\ D_c: \text{diámetro en la cabeza (mm)} \\ L_t: \text{longitud total (m)} \end{array} \quad \text{Ec. (1)}$$

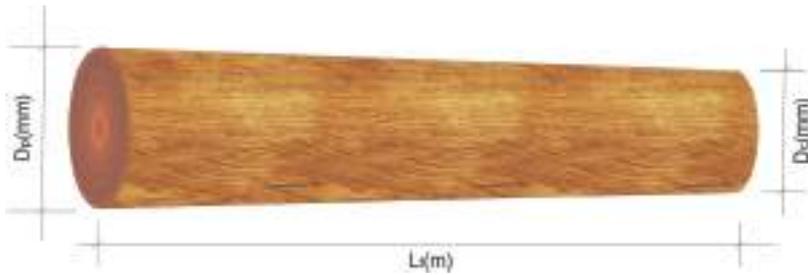


Figura 1. Mediciones para el cálculo de la conicidad de un poste  
Elaboración propia

Para el estudio de los datos, se efectuó un análisis de varianza (Anova) con un nivel de significancia del 5 % para detectar las posibles diferencias significativas entre las dos especies, entre las distintas clases, y evaluar la influencia de la altura.

Previamente a la realización del análisis de varianza, se realizó un estudio de normalidad, independencia y homocedasticidad a partir de los datos de sesgo, curtosis y el Test de Levene.

Para todas las clases, se ha realizado un estudio de existencia de datos anómalos mediante el Test de Grubbs. Cada dato considerado estadísticamente como anómalo se ha examinado individualmente para evaluar su posible eliminación del conjunto total.

En los casos en los que se han detectado diferencias significativas entre los tratamientos, se ha realizado un análisis de intervalos de

confianza a fin de estudiar entre cuáles de los tratamientos existen dichas diferencias. Dicho análisis se ha llevado a cabo mediante los test LSD de Fisher. El método LSD de Fisher es el método que proporciona más diferencias significativas: es una prueba muy eficiente para detectar diferencias verdaderas entre las medias.

Para efectuar los estudios estadísticos descriptivos, los análisis de varianza y los intervalos de confianza, se ha utilizado el programa Statgraphics Centurion XVI, Ver. 16.2.04.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de conicidad obtenidos por especie, altura y clase se exponen en la tabla 1.

Tabla 1  
*Resultados de conicidad*

Especie	Altura (m)	Clase	Conicidad (mm/m)					
			Nº de datos	Media	Desv. típica	Rango	Sesgo	Curtosis
Pino amarillo	8	7	347	5,68	1,27	(1,99 – 9,21)	1,07	1,07
	11	6	39	6,11	1,07	(4,63 – 8,12)	0,75	-1,30
	12	5	103	6,51	1,20	(3,99 – 9,06)	1,04	1,41
		6	153	6,45	0,98	(3,68 – 8,80)	-1,92	1,63
	<b>Todos</b>		642	6,03	1,23	(1,99 – 9,33)	0,90	0,28
Eucalipto	8	7	550	4,19	1,24	(0,39 – 6,78)	-0,93	-0,52
	11	6	330	4,22	1,15	(0,87 – 6,94)	0,25	-0,53
	12	5	215	4,21	1,11	(1,59 – 6,63)	0,88	-1,50
		6	495	4,03	1,07	(1,59 – 6,90)	1,25	-0,18
	<b>Todos</b>		1590	4,14	1,16	(0,39 – 6,94)	0,54	-1,02

Elaboración propia

Todos los valores de sesgo y curtosis se encuentran dentro del intervalo  $(-2, 2)$  correspondiente a una distribución normal, por lo que no se puede rechazar la hipótesis de que los datos de cada una de las clases procedan de una distribución normal.

En la tabla 2 se muestra el test de igualdad de varianzas para las dos especies.

Tabla 2  
*Test de varianzas*

	p-valor
Test de Levene	0,08

Elaboración propia

Puesto que el p-valor es superior a 0,05, se puede afirmar que no existen diferencias significativas entre las varianzas para un nivel de significación del 5%.

Se han estudiado las series de datos, tanto por altura como por clase, y no se encontró ninguno que pudiera ser considerado como anómalo.

Se encontró además que todos los datos recogidos en la tabla 1 para el eucalipto y el pino amarillo del sur están dentro de las especificaciones de las diferentes normas actualmente utilizadas en el Perú. Así, los valores máximos de conicidad en el pino amarillo del sur se encuentran para postes de 12 m y las clases 5 y 6, con valores de 6,51 mm/m y 6,45 mm/m, inferiores a lo especificado por la norma ANSI 05.1 (ANSI, 2017), la cual admite valores máximos de 9,5 mm/m y 9,6 mm/m, respectivamente. Lo mismo sucede con los valores máximos observados. El rango de conicidad del pino amarillo oscila entre 1,99 mm/m y 9,33 mm/m, datos inferiores a los 9,5 mm/m y 9,6 mm/m permitidos por la norma.

Igual sucede en el caso del eucalipto, donde las medidas mayores de las conicidades se obtienen para la clase 6 en postes de 11 m y para la clase 5 en los de 12 m. Estas conicidades, de 4,22 mm/m y 4,21 mm/m son inferiores a las especificadas por la norma NTP 251.022 (Inacal, 2017), que especifica unas conicidades máximas de 11,3 mm/m y 10,9 mm/m. Lo mismo sucede si se evalúan los datos individuales: el rango de todas las conicidades del eucalipto está de 0,39 mm/m a 6,94 mm/m, valores inferiores a los 11,3 mm/m y 10,9 mm/m máximos permitido por la norma.

Asimismo, los postes de eucalipto también están dentro de las especificaciones recogidas por la normativa argentina (IRAM, 2007), la cual fija un valor máximo de conicidad de 10 mm/m para los postes de eucalipto.

Los valores obtenidos se ubican dentro de los intervalos de conicidad obtenidos por Wood, Erickson y Dohr (1960) en sus estudios preliminares de las propiedades de resistencia de la madera para postes. Estos autores estudiaron las conicidades de diferentes especies utilizadas como postes de madera en Estados Unidos de América y obtuvieron, para el caso del pino amarillo, conicidades de 5,0 mm/m para postes de 7,6 m (25'), 6,2 mm/m para postes de 9,1 m (30') y 9,4 mm/m para postes de 16,8 m (55').

Además, los valores obtenidos para los postes de pino amarillo del sur son similares a los encontrados por otros autores para otras coníferas. Así, Martins y Dias (2012) obtuvieron una conicidad de 6,9 mm/m, y Morgado *et al.* (2009), una conicidad media de 6,3 mm/m, ambos para postes de 8 m de pino marítimo (*Pinus sylvestris* L.).

Igualmente, Wood *et al.* (1960), en el resto de las especies de su estudio, obtuvieron valores similares. Así, para el abeto Douglas (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco), encontraron conicidades de 5,1 mm/m para postes de 7,6 m, 3,8 mm/m para postes de 9,1 m y 5,4 mm/m para postes de 16,8 m. Para el alerce americano (*Larix occidentalis* Nutt.), obtuvieron conicidades de 5,8 mm/m para postes de 7,6 m, 4,1 mm/m para postes de 9,1 m y 7,1 mm/m para postes de 16,8 m. Para el pino contorta (*Pinus contorta* Douglas ex Loudon), obtuvieron conicidades de 7,2 mm/m para postes de 7,6 m, 5,4 mm/m para postes de 9,1 m y 9,8 mm/m para postes de 16,8 m. Finalmente, para el cedro rojo americano (*Thuja plicata* J. Don ex D. Don.), obtuvieron conicidades de 9,1 mm/m para postes de 7,6 m, 7,7 mm/m para postes de 9,1 m y 13,4 mm/m para postes de 16,8 m.

Los valores obtenidos para el eucalipto están en consonancia con la bibliografía consultada, aunque ligeramente inferiores. Torrán *et al.* (2009) encontraron coeficientes de conicidad para postes de eucalipto (*Eucalyptus grandis* W.Hill ex Maiden) procedentes de Argentina entre 4,3 mm/m y 7,0 mm/m en el caso de postes de 8 m y entre 6,6 mm/m y 8,8 mm/m para postes de 12 m. También son ligeramente inferiores a los obtenidos por Paula Silveira *et al.* (2011) en su estudio de postes de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. en Pacaratu (Brasil) para el cual obtuvieron conicidades de 7,3 mm/m en postes de 8 m, 7,9 mm/m en postes de 11 m y 6,8 mm/m en postes de 12 m.

Se realizó un análisis de varianza para detectar si existen diferencias significativas tanto a nivel de especie como a nivel de clase; para

ello, se compararon dentro de una misma especie los datos obtenidos para las distintas clases, así como los datos obtenidos en las diferentes especies para una misma clase y altura.

En las tablas 3 y 4 y las figuras 2 y 3 se muestran los resultados del análisis de diferencias significativas para la conicidad a nivel de especie.

Tabla 3  
*Análisis de varianza a nivel de especie*

Fuente	SS	g.l.	MS	F	p-Valor
Altura	1,02	1	1,02	0,73	0,39
Clase	8,60	2	4,30	3,08	0,04
Especie	1609,59	1	1609,59	1154,29	<0,01
Residuos	3105,43	2227	1,39		
Total	4776,49	2231			

Elaboración propia

Tabla 4  
*Intervalos de confianza LSD a nivel de especie*

Especie	Límite inferior (mm/m)	Límite superior (mm/m)	Grupo
Pino amarillo	5,96	6,09	A
Eucalipto	4,11	4,18	B

Nota: Letras distintas en el grupo indican diferencias significativas para un nivel de confianza del 95 %.

Elaboración propia

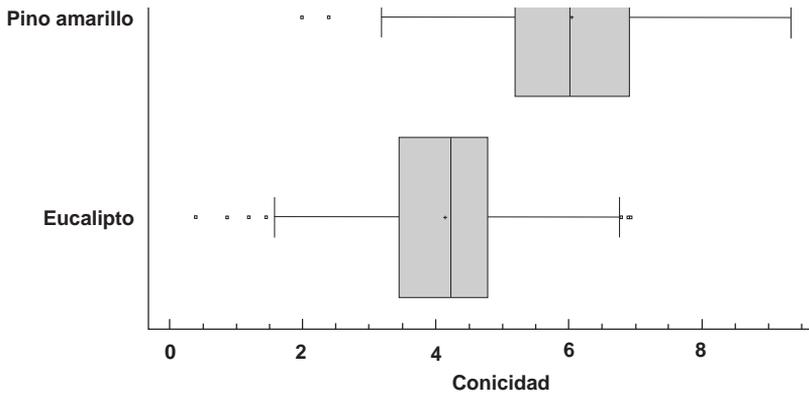


Figura 2. Diagrama de Box-Cox para las dos especies  
Elaboración propia

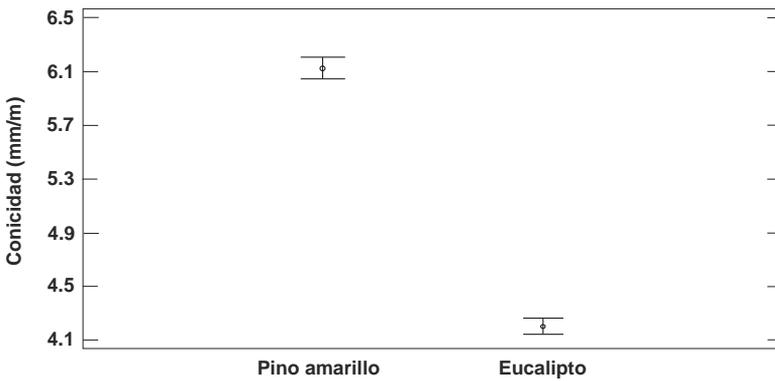


Figura 3. Diagrama de intervalos LSD para el pino amarillo  
Elaboración propia

Puesto que los p-valores correspondientes a la clase y la especie son inferiores a 0,05, se puede afirmar que ambos factores influyen en la conicidad con un nivel de significancia de 5 %, y no sucede lo mismo para la altura del árbol, la cual presenta un p-valor de 0,39. Por lo tanto y de acuerdo con el estudio de los intervalos LSD, se puede afirmar que existe una diferencia significativa en la conicidad de ambas especies para un nivel de confianza del 95 %.

La existencia de estas diferencias entre especies está en consonancia con las propias especificaciones de cada especie recogidas por las

normativas peruana y estadounidense. Así, la norma peruana NTP 251.022 (Inacal, 2017) especifica un rango de conicidad de 10,6 mm/m a 11,3 mm/m para el eucalipto, de acuerdo con su altura y clase, mientras que la norma estadounidense ANSI 05.1 (ANSI, 2017) especifica valores inferiores para los pinos amarillos del sur para fijarlos entre 8,8 mm/m y 9,6 mm/m de acuerdo con la altura y la clase.

En la tabla 5 y las figuras 4 al 8 se puede observar el análisis de diferencias significativas a nivel de clase, tanto intraespecie (figuras 4 y 5) como intracase (figuras 6, 7 y 8). Dicha tabla especifica los intervalos de confianza obtenidos mediante el análisis LSD para poder evaluar si existen diferencias significativas entre los datos experimentales obtenidos para las diferentes clases en cuanto a conicidad se refiere. Es un análisis por clase y especie, y los intervalos de confianza indicados no deben confundirse con los rangos especificados en la tabla 1 a los cuales se les aplica la especificación de la norma NTP 251.022 (Inacal, 2017).

Tabla 5  
*Intervalos de confianza a nivel de clase para las dos especies*

<b>Especie</b>	<b>Clase</b>	<b>Límite inferior (mm/m)</b>	<b>Límite superior (mm/m)</b>	<b>Grupo</b>
Pino amarillo	5	6,34	6,67	A
	6	6,28	6,52	A
	7	5,59	5,77	B
Eucalipto	5	4,10	4,31	C
	6	4,05	4,16	C
	7	4,12	4,25	C

Nota: Letras distintas en el grupo indican diferencias significativas LSD para un nivel de confianza del 95 %

Elaboración propia

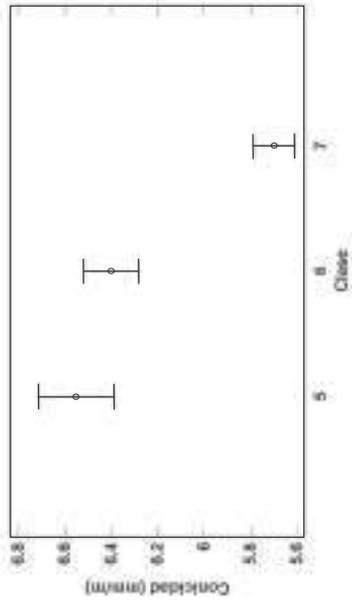


Figura 4. Diagrama de intervalos LSD para el pino amarillo  
Elaboración propia

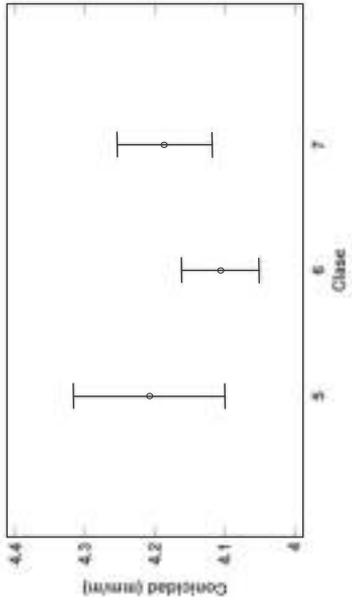


Figura 5. Diagrama de intervalos LSD para el eucalipto  
Elaboración propia

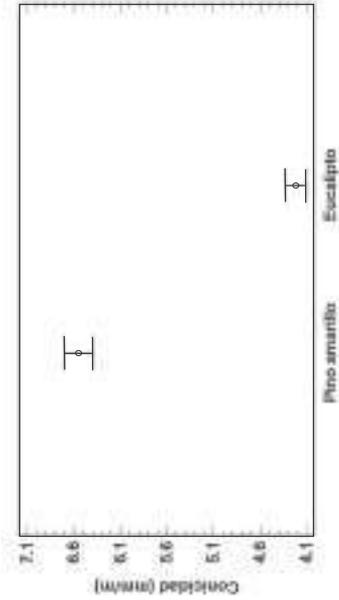


Figura 6. Diagrama de intervalos LSD para la clase 5  
Elaboración propia

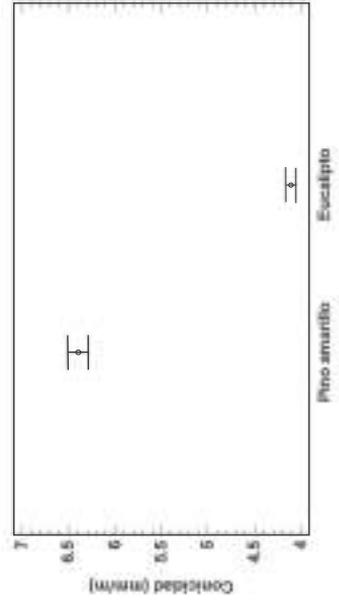


Figura 7. Diagrama de intervalos LSD para la clase 6  
Elaboración propia

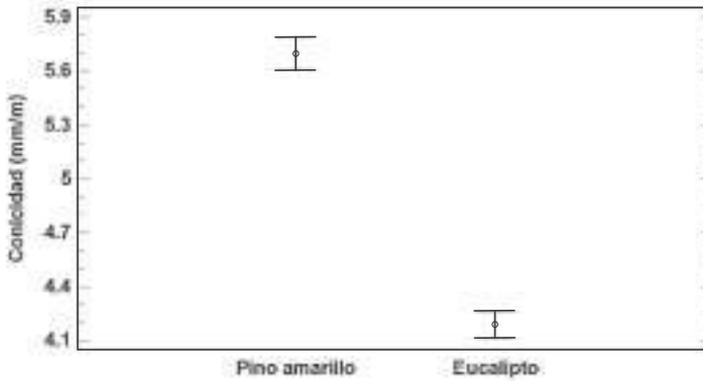


Figura 8. Diagrama de intervalos LSD para la clase 7  
Elaboración propia

En el análisis intraespecies se observa, de acuerdo con los análisis de los intervalos de confianza LSD para un nivel de confianza del 95 %, que no existen diferencias significativas en la conicidad de las distintas clases en el eucalipto. Sin embargo, sí existen diferencias significativas en el pino amarillo, entre la clase 7 y el grupo formado por las clases 5 y 6.

En el análisis intraclases se aprecia que, de acuerdo con los análisis de los intervalos de confianza LSD para un nivel de confianza del 95 %, existen diferencias significativas en la conicidad de ambas especies para una misma clase. Esto último corrobora los resultados obtenidos en el análisis global de las dos especies en los que se apreciaban diferencias significativas entre ambas. Puede comprobarse que esas diferencias significativas están presentes en cada una de las clases estudiadas.

#### 4. CONCLUSIONES

- Las especies pino amarillo del sur (*Pinus* sp.) y eucalipto (*Eucalyptus globulus* Labill) estudiadas cumplen las especificaciones de las normas ANSI 05.1 y NTP 251.022.
- Existen diferencias significativas, para un nivel de confianza del 95 %, entre la conicidad de las dos especies estudiadas.
- Para el caso del pino amarillo, no existen diferencias significativas, para un nivel de confianza del 95 %, entre las clases 5 y 6, pero sí con la clase 7.

- No existen diferencias significativas, para un nivel de confianza del 95 %, entre las diferentes clases para el caso del eucalipto.

## REFERENCIAS

- American National Standard Institute (ANSI). (2017). American National Standard for Wood Poles. Specifications and Dimensions. ANSI 05.1. Washington.
- Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). (2011). Madera estructural. Postes de madera para líneas aéreas. Norma UNE-EN 14229. Madrid.
- González Pérez, H. (1988). La conicidad de los árboles y algunas posibles aplicaciones en el manejo de bosques. *Revista de la Facultad Nacional de Agronomía - Medellín*, 41(1), 51-60.
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM). (2007). Postes y crucetas redondas de eucalipto preservados para líneas aéreas de energía eléctrica y sistemas de telecomunicaciones. Especificaciones. Norma IRAM 9513. Buenos Aires.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN). (1998). Postes de madera para líneas aéreas de energía eléctrica y telecomunicaciones. Requisitos. Norma NTE INEN 2 122. Quito.
- Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y la Propiedad Industrial (Indecopi). (2008). Postes de madera para líneas aéreas de conducción de energía. Glosario 2.<sup>a</sup> edición. NTP 251.021. Lima.
- Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y la Propiedad Industrial (Indecopi). (1974 y revisada el 2012). Postes de madera para líneas aéreas de conducción de energía. Requisitos generales. 1.<sup>a</sup> edición. NTP 251.022. Lima.
- Martins, C. y Dias, A. 2012. Bending strength and stiffness of Portuguese Maritime Pine utility poles. *Forest Products Journal*, 62(2), 114-120.
- Morgado, T. F. M., Rodrigues, J., Machado, J. S., Dias, A. M. P. G. y Cruz, H. (2009). Bending and compression strength of Portuguese Maritime pine small-diameter poles. *Forest Products Journal*, 59(4), 23-28.

- Paula Silveira, D., García Leite, H., Paula Silveira, V. y Nogueira Melido, R.C. (2011). Clasificação de árvores de eucalipto para postes em sistema agroforestal. *Revista Árvore*, 35(4), 875-882.
- Torrán, E. A., Sosa Zitto, M. A., Cotrina A. D. y Piter, J. C. (2009). Bending strength and stiffness of poles of Argentinean Eucalyptus grandis. *Maderas Ciencia y Tecnología*, 11(1), 71-84.
- Vignote, S., Martínez, I. y Villasante, A. (2013). *La silvicultura y la calidad de madera. Lección inaugural 2013*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Wood, L. W., Erickson, E. C. O. y Dohr, A. W. (1960). *Strength and related properties of wood poles*. Philadelphia: ASTM Wood Pole Research Program.

# Metodología para determinar la calidad de agua del río Rímac para uso en amasado y curado de concreto

Rosa Victoria Altamirano Medina\*  
Universidad de Lima

Ricardo Terreros Lazo\*  
Universidad Nacional de Ingeniería

Recibido: 9 de abril del 2018 / Aprobado: 24 de mayo del 2018

doi: 10.26439/ing.ind2018.n036.2451

**RESUMEN:** En el estudio, se realizó el análisis químico de 15 muestras de agua del río Rímac para determinar el contenido de cloruros, sulfatos, alcalinidad, dureza y pH. Los resultados obtenidos se han comparado con los límites permisibles de las normas técnicas vigentes. Los valores encontrados, en su mayoría, se encuentran dentro del rango establecido, por lo que se concluye que el agua estudiada es apta para la elaboración de concreto.

*Palabras clave: tratamiento del agua / concreto-normas / agua para concreto / cloruros*

## Methodology for determining Rímac river water quality for concrete mixing and curing

**ABSTRACT:** In this research, the chemical analysis of 15 Rímac river water samples was performed to determine the chloride and sulfate content, alkalinity, hardness and pH level. The results were compared with the permissible limits of current technical standards. Most found values were within the established range. Thus, it is concluded that the Rímac river water is suitable for concrete production.

*Keywords: water treatment / concrete-standards / water for concrete / chlorides*

---

\* Correos electrónicos: raltamir@ulima.edu.pe; rterros@uni.edu.pe

## 1. INTRODUCCIÓN

Desde la aparición del ser humano, el agua ha sido un recurso indispensable tanto para la supervivencia como para su desarrollo económico. En el transcurso de los años, la demanda de agua ha aumentado tanto para el abastecimiento de la población mundial como para el desarrollo industrial, de tal manera que hoy en día se sabe con certeza que el agua se está agotando (Vásquez, Gonzales y Rocha, 2001).

A pesar de ello, hay otros problemas relativos al agua. Uno de los más graves es la contaminación de las aguas producto de las actividades domésticas, los residuos sólidos urbanos y las actividades mineras e industriales. Estas actividades vierten sus desechos tóxicos a los ríos que traerán consecuencias desfavorables para los seres vivos que habitan; producto de esto las aguas quedan contaminadas y no aptas para el consumo de los seres vivos, ya que poseen cantidades de materiales tóxicos como plomo, cadmio, arsénico, entre otros.

La contaminación de aguas del país es la acumulación de diversos elementos y sustancias aportados por vertimiento de aguas residuales crudas o insuficientemente tratadas que superan la capacidad de asimilación y/o autodepuración del cuerpo receptor, lo que genera concentraciones en el cuerpo de agua que exceden el estándar de calidad normado en la zona sometida a regulación (ANA, 2010, Barceló y López de Alda, 2010).

Debido a que la escasez de agua se hace cada vez un problema más grave, es urgente plantear propuestas para ahorrar este recurso hídrico y destinarlo prioritariamente al consumo de la creciente población (Manco, Guerrero, Ocampo, 2012).

Por ello, en este proyecto se realiza un estudio para encontrar fuentes alternas de agua para que puedan emplearse para la elaboración del concreto.

## 2. PRESENTACIÓN DEL PROBLEMA

En el corto-mediano plazo, el agua potable será un recurso costoso y escaso; por esta razón, la tendencia actual es dar prioridades en el consumo de este recurso vital. Ya que el consumo humano es la prioridad principal, el uso del agua para otras actividades como la construcción requerirá de fuentes alternativas de agua. Entre las posibles alternativas de fuentes de agua para el amasado y curado de concreto pueden estar las

aguas servidas previamente tratadas, aguas de río o agua de mar (Aguirre y Mejía, 2013). El tema del presente estudio corresponde a describir una metodología para determinar la calidad de aguas de río para uso en amasado y curado de concreto; su aptitud como agua para concreto debe cumplir los requisitos físico-químicos contenidos en la Norma Técnica Peruana NTP 339.088 y comparativamente cumplir las normas internacionales, tales como la Norma Oficial Mexicana NOM C-122 (ASTM C-94), recomendadas para aguas que no son potables.

A partir de lo mencionado anteriormente, se deduce que el agua apta para la elaboración de concreto no necesariamente requiere ser potable, aunque sí debe satisfacer determinados requisitos mínimos de calidad (ANA, 2010). Por ello, lo que este estudio plantea es realizar una metodología para determinar si el agua de un río, en este caso particular el río Rímac, puede ser usada para el amasado y el curado del concreto.

### 3. METODOLOGÍA

**Primera etapa.** Se eligieron diversos puntos de muestreo del cauce del río Rímac. La toma de muestras fue realizada por un grupo de apoyo conformado por ayudantes alumnos de los últimos ciclos de la especialidad de Ingeniería Civil, a los que se les instruyó en la forma de tomar muestras de agua según la Norma Técnica Peruana NTP 214.005. Las muestras tomadas fueron seis por cada punto de muestreo, dos al centro del cauce y las otras cuatro en las orillas correspondientes. Se repitió la toma de muestras dos veces más dejando un día, siendo al final un total de 18 muestras a analizar por cada punto de muestreo.

Se eligieron 15 puntos de muestreo y se desarrolló durante los meses de enero a marzo del 2013 en una primera etapa, considerando que eran meses de verano y había una crecida del río Rímac, y luego se repitió esta toma de muestras en octubre del 2014 para hacer comparaciones con la estación seca. Los criterios para seleccionar estos puntos fueron en general el hecho que en estos lugares existen puentes que permiten el acceso con relativa facilidad al centro del cauce; además, están en zonas urbanas a las que se puede llegar fácilmente con movilidad local y, finalmente, porque todos los puntos hacen una continuidad del cauce del río desde el punto de toma aguas arriba en Chaclacayo hasta la desembocadura del río Rímac. Las muestras se tomaron en las siguientes zonas: Base Naval del Callao, aeropuerto Jorge Chávez, Puente del Ejército, puente Santa Rosa, puente Acho, Puente Nuevo, Ramiro Prial-

lé, puente Huaycoloro, puente Huachipa, Santa Clara, puente Ñaña, Carapongo (lavaderos), puente Los Ángeles, Morón, Carapongo (Sedapal), agua del grifo de la Universidad Nacional de Ingeniería.

**Segunda etapa.** Las muestras tomadas fueron llevadas a analizar al laboratorio de química de la Facultad de Ingeniería Civil de la UNI para determinar el contenido de sulfatos, cloruros, alcalinidad y pH. Los datos obtenidos se promediaron y se realizó una gráfica por cada parámetro analizado. Los resultados fueron analizados y discutidos sobre la base de la comparación con los requisitos especificados en las normas técnicas anteriormente mencionadas.

Los resultados obtenidos muestran que en todos los casos la concentración de las sales analizadas (cloruros  $\text{Cl}^-$ , sulfatos  $\text{SO}_4^{2-}$  y alcalinidad), en la mayoría de lugares están por debajo del máximo permitido; solo en la zona del río Huaycoloro y en Carapongo se obtuvieron resultados que sobrepasaban los límites que establecen las Normas Técnicas NTP 339.088 y NOM C-12.

Según la Norma Técnica Peruana de calidad del agua, el pH del agua debe estar entre 5,8 y 8,2, y todos los resultados obtenidos estaban en ese rango.

Cuando los sulfatos  $\text{SO}_4^{2-}$  se encuentran en concentraciones excesivas en el agua ácida, le confiere propiedades corrosivas. Agua con contenidos de sulfatos mayores a 3000 ppm perjudican la resistencia del hormigón (ASTM C-94).

#### 4. RESULTADOS

Los resultados promedio se resumen en la tabla 1, y los siguientes gráficos resumen los resultados de cada prueba realizada en el laboratorio de química de la Facultad de Ingeniería Civil de la UNI.

Las pruebas de pH realizadas en enero muestran una cierta irregularidad en algunos puntos que difieren de la tendencia general, pero están aún dentro de los límites de la norma de 5,8 a 8,2, como se aprecia en la figura 1. Se debe recalcar que el día de muestreo el río estaba tranquilo, con agua de color celeste verdoso, sin presencia de precipitaciones en la zona alta de la cordillera y visibilidad clara, a pesar de tratarse de la estación lluviosa.

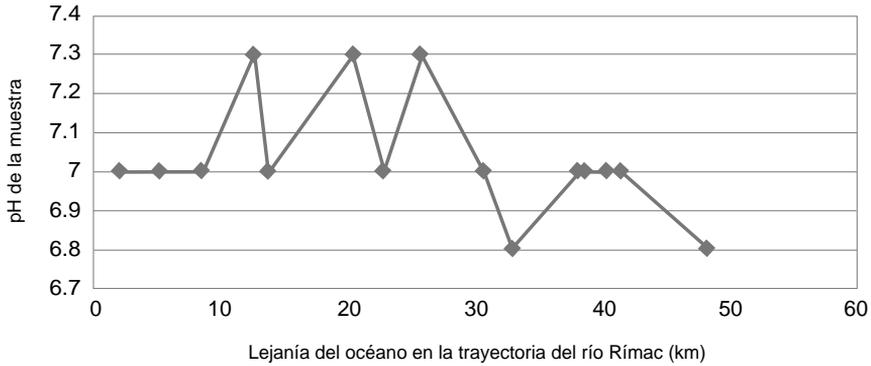


Figura 1. Variación del pH del agua del río Rímac  
Elaboración propia

Se analizó también la dureza correspondiente. Como se observa en la figura 2, el resultado muestra una tendencia en aumento conforme el río se acercaba al mar, pero decrecía enormemente muy cerca a éste, debido a la que había un mayor volumen de agua y la concentración disminuía.

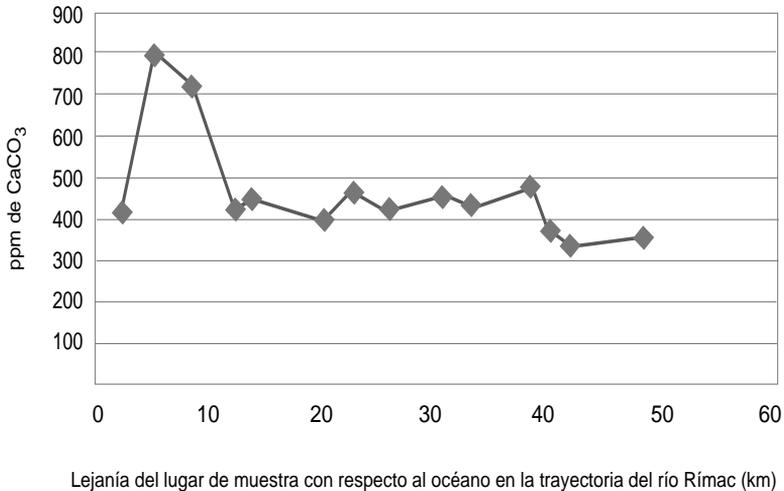


Figura 2. Dureza del agua del río Rímac  
Elaboración propia

Luego, en el segundo muestreo del 21 de enero, se obtuvieron otras tendencias por el clima del día mismo, que era nublado con presencia de fuertes precipitaciones en la parte alta de la cordillera y color del agua chocolatada y muy turbia.

Los valores de pH mostrados en la figura 3, de la nueva muestra, se encuentran dentro del rango permitido y con mayor cercanía entre sí. Hay una tendencia a elevarse justo en la desembocadura del río. Este resultado confirma que el agua de la zona de muestreo tiene un pH dentro del rango especificado en la Norma Técnica Peruana 339.088.

El pico máximo se encuentra en puente Huaycoloro (muestra 8).

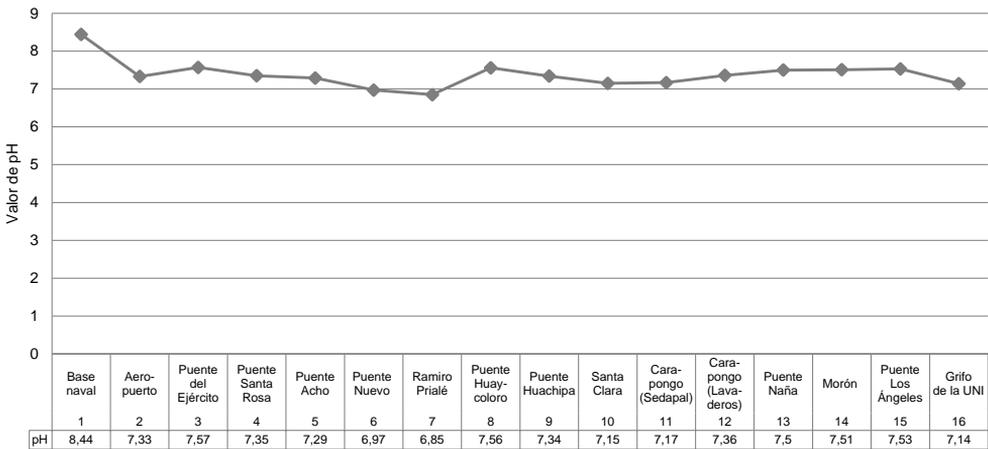


Figura 3. Variación del pH del agua del río Rímac  
Elaboración propia

La figura 4 indica que la dureza de las muestras está en un nivel aceptable. Según la OMS debe estar por debajo de las 500 ppm de  $\text{CaCO}_3$  (consideraciones para el agua potable, Sunass). Esto no significa que es potable, porque el agua presenta altos niveles de bacterias (estudio de agua de Sedapal). Los picos máximos se encuentran en puente Huaycoloro (muestra 8), Carapongo Planta de tratamiento de Sedapal (muestra 11) y en el agua potable de la UNI (muestra 16).

En la muestra 8 se debe a que fue extraída totalmente del caudal del río Huaycoloro. Al poseer un caudal menor al del río Rímac, las concentraciones de las sales disueltas son mayores.

Entre las muestras del 11 al 15 se observa una tendencia creciente, para luego reducirse y nuevamente aumentar. Esto se podría deber a las contribuciones posiblemente por vertederos de fábricas donde utilizan agua para limpiar o por purgas de agua de enfriamiento de maquinaria, por lo que diluyen las sales de calcio y magnesio.

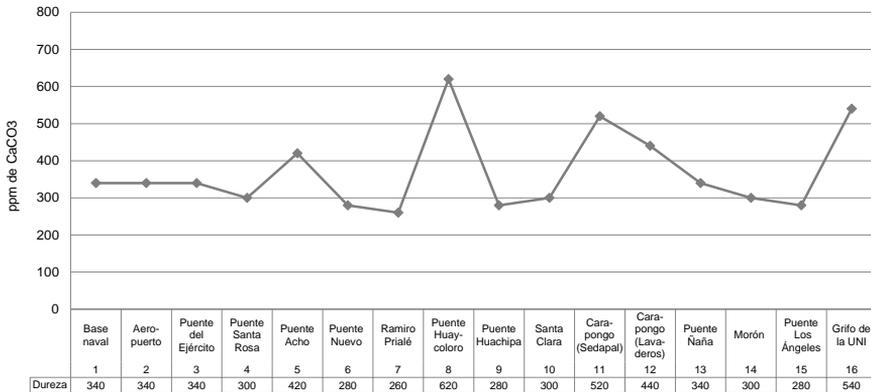


Figura 4. Dureza del agua del río Rímac  
Elaboración propia

La determinación de sulfatos en aguas para uso en amasado y curado de concreto es de gran importancia, ya que son corrosivos atacando a estructuras metálicas y de concreto (ASTM C-94).

La figura 5 muestra un patrón irregular, posiblemente debido a la repentina erosión del fondo del río, lo que causó la disolución de mayor cantidad de sales. Esta erosión del fondo del río ocurre en periodos donde su caudal crece, como fue el caso del día de muestreo.

Los lugares de mayor concentración de sulfatos son en río Huaycoloro (muestra 8), Carapongo Planta de tratamiento Sedapal (muestra 11), puente de Ñaña (muestra 13), Morón Chico (muestra 14) y puente Los Ángeles (muestra 15).

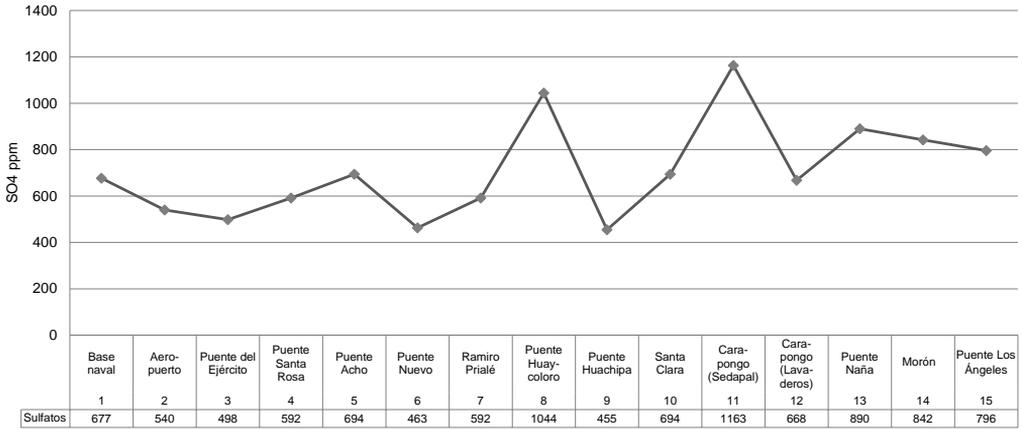


Figura 5. Valores de la concentración de sulfatos en los puntos de muestreo  
Elaboración propia

Los cloruros se mantienen a valores normales en la mayor parte del río Rímac, pero de nuevo en la parte del río Huaycoloro y en Carapongo (Sedapal), muestras 8 y 11, respectivamente, se observaron niveles elevados de cloruros. En el caso 8 posiblemente se deba al menor caudal del río Huaycoloro, y en el caso 11 su causa podría ser el efecto del tratamiento mediante cloración.

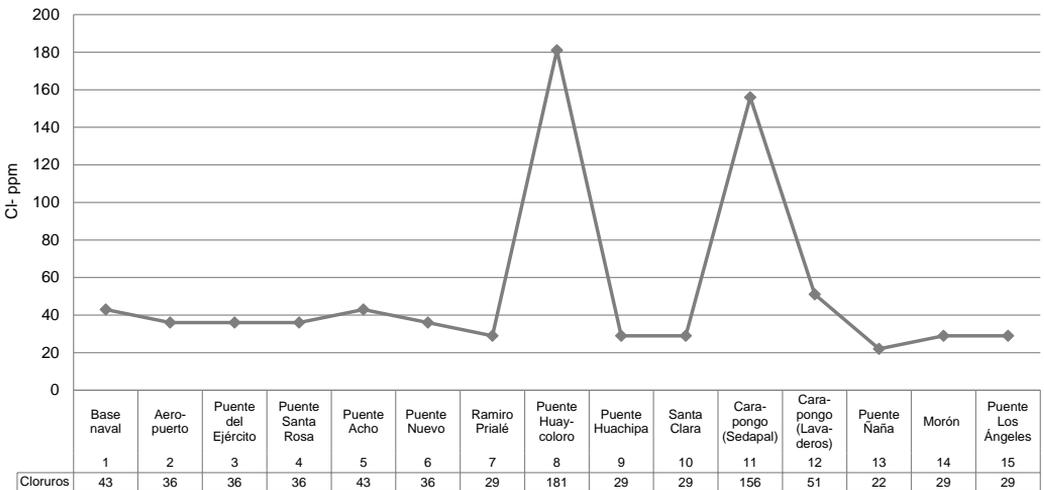


Figura 6. Concentración de cloruros en el agua del río Rímac  
Elaboración propia

En las figuras mostradas, se puede observar claramente que las muestras 8 y 11 son las más críticas. Aclarando, la muestra 8 (río Huaycoloro) tiene altas concentraciones de sales y por qué no es apto para la construcción, y la muestra 11 fue extraída desde la misma tubería que desemboca en el río Rímac, proveniente de la planta de Sedapal, por lo que su altas concentraciones probablemente provienen del uso de reactivos empleados para el tratamiento de aguas.

Los resultados muestran que en todos los casos la concentración de las sales analizadas ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y alcalinidad) están dentro del límite permisible según las normas técnicas peruana y mexicana.

Tabla 1  
*Resultados del análisis de aguas del río Rímac*

	Lugar	pH	Cl ppm	Sulfatos ppm	Alcalinidad ppm
1	Los Ángeles	7,30	41	1370	147
2	Pte. Ñaña	7,63	49	1730	177
3	Carapongo	7,61	38	1273	149
4	Huachipa	7,75	53	1683	147
5	Huaycoloro	7,63	101	982	325
6	R. Prialé	7,60	39	1526	128
7	Pte. Nuevo	7,10	46	2111	134
8	Acho	7,13	52	2023	140
9	Sta. Rosa	7,08	88	2019	165
10	Pte. Ejército	7,34	49	1967	140
11	Aeropuerto	7,14	55	1740	188
12	Base Naval	7,02	56	1484	180

Elaboración propia

Los resultados mostrados a continuación en las figuras del 7 al 10 resumen los valores hallados en la segunda toma de muestras realizadas en octubre del 2014.

Como se observa en la figura 7, los valores de pH están en el rango de 7,10 hasta 7,70. Los que están dentro de lo requerido para el agua de uso para el concreto.

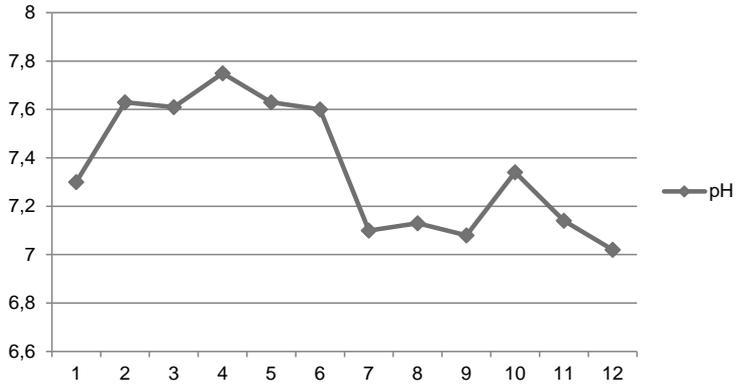


Figura 7. Valores de pH del agua del río Rímac  
Elaboración propia

Respecto del contenido de cloruros, también se pueden observar valores bajos que cumplen con los límites permisibles. Siendo el río Huaycoloro el de mayor concentración de esta sal, seguido del puente Santa Rosa. Este resultado está en concordancia con el obtenido en la fase previa.

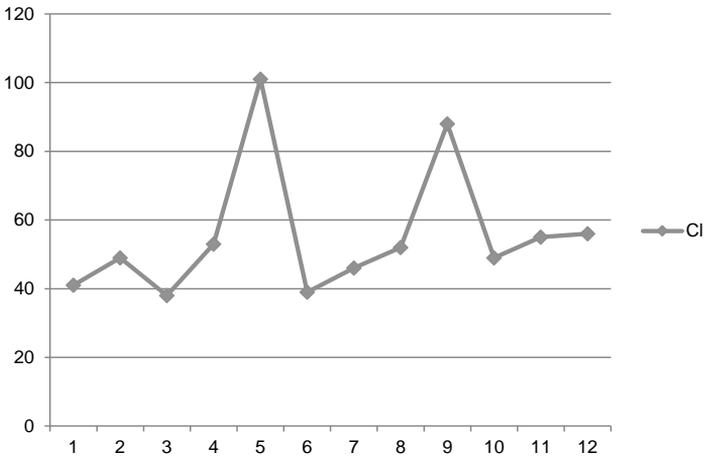


Figura 8. Valores de cloruros  
Elaboración propia

Sobre el contenido de sulfatos, se tienen máximos en los puntos de Puente Nuevo y Puente del Ejército, pero en todos los casos aún se cumple con la norma de calidad (NTP 339.088).

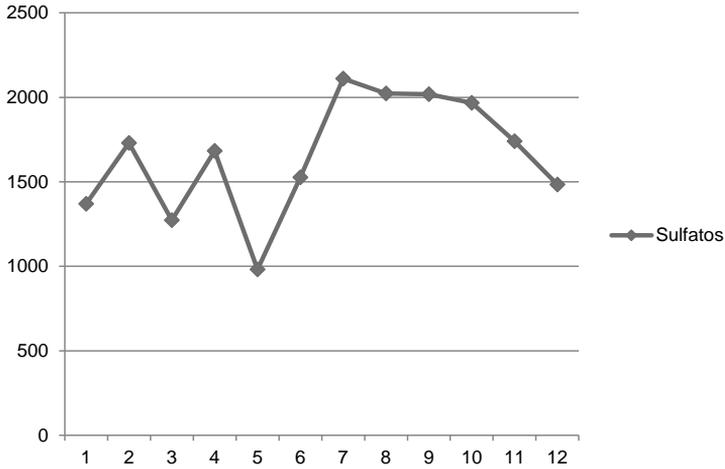


Figura 9. Valores de sulfatos  
Elaboración propia

Finalmente, para la alcalinidad, es en el punto del río Huaycoloro donde se obtiene el máximo valor, siendo aun así inferior a los máximos exigidos en las normas técnicas.

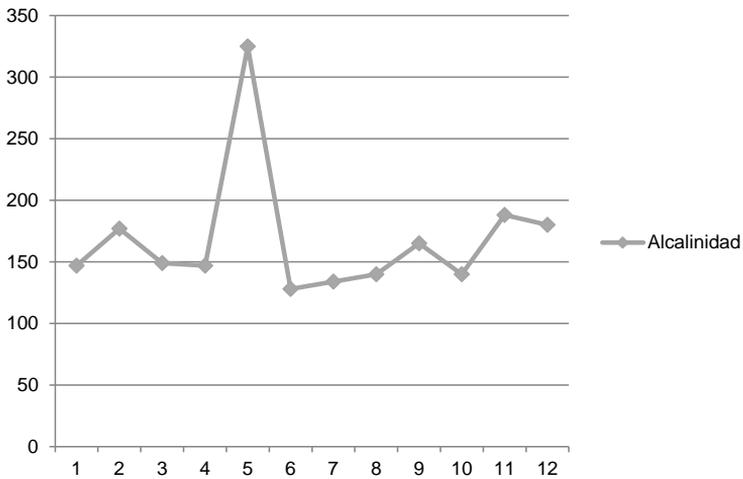


Figura 10. Alcalinidad del agua del río Rímac  
Elaboración propia

## 5. CONCLUSIONES

- Los resultados obtenidos en el análisis referido a sulfatos y cloruros demuestran, que en todos los casos, el nivel de calidad del agua del río Rímac está dentro de los límites establecidos para uso en amasado y curado de concreto.
- Los valores de pH obtenidos (de 7,0 a 7,75) en todos los casos están dentro del rango considerado aceptable (de 5,8 a 8,2) y no muestran una tendencia definida.
- De los resultados del análisis previo, se observa que todos los parámetros del agua alcanzaron su punto máximo en la zona de Huaycoloro. Las altas concentraciones de sales indican que no es apto para amasado y curado de concreto.

## REFERENCIAS

- Aguirre A. y Mejía R. (2013). *Durability of reinforced concrete exposed to aggressive conditions*. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/375202647/1270-1666-1-PB-pdf>
- ASTM C-94. (2010). Norma Técnica Mejicana NOM C-122. Calidad de agua para el concreto.
- Autoridad Nacional del Agua (ANA). (2010). *Protección del agua-Vigilancia y control de vertimientos*. Recuperado de <http://www.ana.gob.pe/media/353227/4-protecci%C3%B3n%20del%20agua%20vigilancia%20y%20control%20de%20vertimientos%20paver.%20%20lic.%20juan%20ocola.pdf>
- Barceló, D., y López de Alda, M. (2010). *Contaminación y calidad química del agua: el problema de los contaminantes emergentes*. Barcelona: Fundación Nueva Cultura del Agua. Recuperado de [https://fnca.eu/phocadownload/P.CIENTIFICO/inf\\_contaminacion.pdf](https://fnca.eu/phocadownload/P.CIENTIFICO/inf_contaminacion.pdf)
- Civil Geeks. (2011). *Agua para amasado y curado de concreto*. Recuperado de <https://civilgeeks.com/2011/12/08/agua-de-amasado-y-curado-para-concreto/>
- Instituto Nacional de Calidad (Inacal). (2014). Norma Técnica Nacional NTP 339.088. Agua de mezcla utilizada en la producción de concreto de cemento Portland. Requisitos.

- Instituto Nacional de Calidad (Inacal). (2016). Norma Técnica Peruana NTP 214.005. Toma de muestra de agua para uso y consumo humano.
- Manco, D. G.; Guerrero, J.; y Ocampo, A. M. (2012). Eficiencia en el Consumo de Agua de Uso Residencial. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 11(21), 23-38. Recuperado de <http://www.redalyc.org/pdf/750/75025842003.pdf>
- Strandberg, L. (2010). *La escasez de agua y la RSC*. Navarra: Universidad de Navarra. Recuperado de [https://www.iese.edu/es/files/Cuaderno%20No%208%20Agua\\_tcm5-53740.pdf](https://www.iese.edu/es/files/Cuaderno%20No%208%20Agua_tcm5-53740.pdf)
- Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento (Sunass). (s. f.). *Parámetros de calidad y límites máximo permisibles*. Recuperado de [http://www.sunass.gob.pe/doc/normas%20legales/legisla%20web\(cambio\)/normas/calidad%20de%20agua/Oficio%20677.pdf](http://www.sunass.gob.pe/doc/normas%20legales/legisla%20web(cambio)/normas/calidad%20de%20agua/Oficio%20677.pdf)
- Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo. (2014). *El agua para construcción*. Recuperado de <http://www.academia.edu/8929938/el-agua-para-construccion>.
- Vásquez, A., González, F., y Rocha, L. (2001). *Elaboración de concretos con aguas tratadas*. Recuperado de <http://www.imcyc.com/revista/2001/abril2001/concretos.htm>.



# Optimización de los costos de muestreo en la manufactura de *shampoo* y acondicionador

**María del Carmen Rosas Guerrero\***

Tecnológico de Monterrey, Querétaro, México

**Emilio Pérez Pacheco\***

Instituto Tecnológico Superior de Calkiní. Campeche, México

Recibido: 14 de mayo del 2018 / Aprobado: 26 de junio del 2018

doi: 10.26439/ing.ind2018.n036.2452

**RESUMEN:** Optimizar los costos en el proceso de muestreo en la producción de shampoo y acondicionador a través del diseño bibliográfico, debido a trabajos previos de investigación en temas de producción, muestreo y calidad en diferentes ramas industriales entre los años 2010-2018, y de campo, por los datos recolectados en una empresa de giro cosmético situada en Bajío, México, y los análisis de las muestras a través de dos fases: financiera y calidad.

*Palabras clave:* costos de producción / muestreo (estadística) / procesos de manufactura / control de costos

## Optimization of sampling costs in shampoo and conditioner manufacturing

**ABSTRACT:** Cost optimization in the sampling process of shampoo and conditioner manufacturing by the bibliographic design, using previous research on production, sampling and quality in different industrial branches between the years 2010 and 2018, and by the field design, using data collected in a beauty product company located in Bajío, Mexico. Sample analysis through the financial and quality phases.

*Keywords:* production costs / sampling (statistics) / manufacturing processes / cost control

---

\* Correos electrónicos: shamul214@hotmail.com, eperez@itescam.edu.mx

## 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, las empresas de manufactura están buscando opciones para reducir costos y que se obtengan mayores ganancias. Se sabe que implementar alternativas requiere de un análisis de los procesos actuales. Por lo tanto, esta investigación se enfoca en mostrar una alternativa viable para optimizar costos, específicamente en la fuente de *scrap* dentro de la industria de cosméticos.

Siguiendo con el análisis de *scrap*, se tienen varias fuentes que generan esta pérdida; una de ellas es el producto que se pierde debido a la toma de muestras por parte del área de calidad para ser analizado y que sirve de fundamento para la liberación de producto terminado. Cuando una botella es tomada para ser analizada por el laboratorio de calidad, es necesario retirar la tapa, por lo que, en ese momento, no se puede vender a cliente, ya que el empaque fue alterado y podría tener partículas extrañas en su contenido, como el polvo. Además que, al extraer producto de granel para ser analizado, el peso de la botella es modificado, es decir, la botella ya no cumpliría con la cantidad que es ofrecida a cliente a través de su etiqueta.

Las empresas del sector industrial mencionado basan el proceso de liberación de producto terminado en muestreos aleatorios de la producción, es decir, utilizan datos estadísticos de acuerdo con el número de unidades producidas por cada lote. Estos datos estadísticos son de acuerdo con las tablas Militar Estándar (MIL-STD) (Vega Rangel, 2016). Se toma la muestra que indican las tablas y se llevan al laboratorio para los análisis químicos y para otras pruebas. Entre mayor cantidad de productos se elaboren por lote, mayor es el número de muestras como lo indican las tablas Militar Estándar, ya que no toma en cuenta la mejoras o la estabilidad en los procesos de producción. Se toman las muestras necesarias y se analizan realizando pruebas destructivas, es decir, que el producto muestreado no se puede recuperar para su posterior venta. Esta situación resulta en una mayor pérdida para las empresas, ya que se están pagando el costo de manufactura y no hay posibilidades de recuperar este costo en esa pieza.

Por tal razón, esta investigación propone una alternativa para la reducción de costos que se incurren al muestrear los lotes de producción en las empresas de manufactura de *shampoo* y acondicionador a través de una validación que consiste en establecer evidencia documentada

que proporcione seguridad de que un proceso cumpla con las especificaciones y características de calidad predeterminadas. Esta validación es el soporte para la liberación de producto terminado y así poder optimizar el número de muestras por cada lote de producción en la industria de *shampoo* y acondicionador. Para explicarlo, es necesario conocer el costo a optimizar y las variables críticas del granel tanto en fabricación como empaçado.

Esta investigación está enfocada en la región geográfica llamada 'Bajío' dentro de territorio mexicano. Esta región está localizada justo en el centro del país, dentro del triángulo industrial de las tres ciudades más grandes de México: Ciudad de México, Guadalajara y Monterrey. La región Bajío comprende un radio de 400 km, y abarca el 70 % del establecimiento industrial, donde cubre los estados de Aguascalientes, Jalisco, Guanajuato, San Luis Potosí y Querétaro (Pilotzi, 2018).

## 2. MÉTODO

### 2.1 Marco teórico

En la actualidad, la industria de cosméticos se encarga de la elaboración de productos tales como *shampoo*, acondicionadores, tintes, jabones para cuerpo, entre otros (Salud, 1995). Dichos productos deben cumplir con estrictas normas de calidad, previo a su comercialización. Las empresas de este sector industrial se basan, principalmente, en muestreos aleatorios de la producción, es decir, utilizan datos estadísticos de acuerdo con el número de unidades producidas por cada lote. Estos datos estadísticos son de acuerdo con las tablas Militar Estándar (MIL-STD) (Vega Rangel, 2016). Se toma una muestra y se lleva al laboratorio para los análisis químicos y para otras pruebas, entre las que se encuentran las pruebas destructivas, es decir, que el producto muestreado no se puede recuperar para su posterior venta. Entre mayor cantidad de productos se elaboren por lote, es mayor el número de muestras, lo que resulta en una pérdida para la empresa.

La presente investigación propone una alternativa para la reducción de costos que se incurren al muestrear los lotes de producción en las empresas de manufactura de *shampoo* y acondicionador en la zona de Bajío.

## 2.2 Crecimiento del sector cosmético en México

El sector del cuidado personal está conformado por diferentes categorías según la Procuraduría Federal del Consumidor (Profeco): 1) productos para el cabello donde se incluye el *shampoo*, acondicionador, enjuague, spray, mousse, fijador, geles, cremas para peinar, tratamiento capilares, tintes; 2) productos para la piel que son los repelentes de insectos; 3) productos para la higiene como las cremas y espumas para rasurar, máquinas de afeitar y repuestos; 4) producto para uñas y aquellos que buscan modificar los olores corporales como desodorantes, fragancias, perfumes y talcos; y 5) maquillaje (Silva, 2012).

El sector de *shampoo* y acondicionador es de los más rentables y de mayor crecimiento desde el 2010. Según la Cámara Nacional de la Industria de Productos Cosméticos (Canipece) de México, los productos para el cuidado del cabello representaron el 19,4 % del valor de ventas de toda la industria del cuidado personal en el 2014 y crecieron un 5 % el 2015 (Moguel, 2014).

El sector industrial de la zona de Bajío se encuentra en crecimiento durante los últimos cinco años, y es el factor importante en el crecimiento del producto bruto interno (PBI) (Martínez, 2015). En esta investigación, el sector industrial de *shampoo* y acondicionador de dicha zona es el actor principal en la investigación, ya que sus finanzas se ven impactadas por la toma de muestras de producto terminado en cada lote de producción.

En la industria de *shampoo*, existen varios tamaños para satisfacer cualquier necesidad o preferencia del consumidor. El *shampoo* puede producirse desde 7,5 ml, que por lo general se ofrece como muestra gratis dentro de revistas, hasta 1200 ml, que es un tamaño familiar. Dentro de este rango, se tienen tamaños para todo tipo de necesidades. El más comprado por los clientes dentro del territorio mexicano es la botella de 400 ml (Sánchez, 2017) debido a:

- i) Todas las empresas fabrican este tamaño y ofrecen una oferta equitativa a los posibles clientes.
- ii) El promedio de cantidad usada por cada baño es de 17 ml para mujeres, con un uso mensual de una botella de 400 ml por mes aproximadamente.
- iii) El promedio de cantidad usada por cada baño es de 8 ml para hombres, que terminan una botella de 400 ml cada dos meses.

Referente a la producción de acondicionador, la tendencia de los clientes es buscar una botella que haga juego con el *shampoo*, es decir, busca la sincronía en tamaños. Por esta razón, también las botellas de 400 ml son las más vendidas.

Para fines de esta investigación, los análisis que se muestran en el documento se basan en una manufactura de tamaños de 400 ml por la razón explicada anteriormente. Con esto, se puede conocer el mayor impacto financiero que tienen las empresas.

### 2.3 Fabricación del granel del *shampoo*

Para la producción de *shampoo* se necesitan varios materiales, pero los que tienen mayor porcentaje dentro de la fórmula total son:

- i) Surfactante
- ii) Agua
- iii) Salmuera
- iv) Ingredientes menores

El surfactante es un elemento que actúa como detergente que permite reducir la tensión superficial que existe en un fluido. También se le conoce como tensioactivo o tensoactivo; se componen por partes hidrófobas, es decir, que rechaza el agua, y por partes hidrófilas, que son solubles en agua. Esta interacción de las dos partes hace que se generen burbujas; sin embargo, las burbujas no son las encargadas de ofrecer limpieza, sino la tensión superficial (Sánchez, 2017). En la fabricación de *shampoo*, el surfactante representa cerca del 60 % del total de ingredientes, y es el componente más importante y mayoritario, tanto en desempeño como en cantidad.

El agua sirve para darle consistencia al surfactante y para tener el volumen que se requiere: la mezcla entre el agua y el surfactante es vital para lograr la red cristalina. La formación de esta red cristalina es el principal proceso en la fabricación de *shampoo*, ya que su función principal es asegurar la mezcla homogénea entre las fases que conforman el producto y que no se visualicen dos fases en la botella debido a las partes hidrófobas y las hidrófilas. Para lograr esta red se tiene dos variables muy importantes: el tiempo en el proceso y la temperatura. En la fabricación de *shampoo* el surfactante representa cerca del 25 % del total de ingredientes. La salmuera es una concentración de agua

con sal con la finalidad de mantener la conservación del *shampoo* y que se cumpla con la fecha de caducidad. La salmuera representa un 10 % del total de los ingredientes. Los ingredientes menores representan los ingredientes que están por debajo del 5 % del total.

La fabricación del *shampoo* se basa en tres procesos:

- i) Proceso caliente
- ii) *Freezeout*
- iii) Proceso frío

El proceso caliente es un tanque de 12 toneladas que hace la mezcla del surfactante, del agua y de la salmuera. Este proceso está en continuo movimiento hasta que se tiene una mezcla no homogénea por las propiedades del surfactante. Es difícil conseguir una mezcla homogénea que se mantenga a lo largo de la fecha de caducidad.

Cuando se logran mezclar los ingredientes mencionados y el tiempo establecido, se pasa al proceso de *freezeout*. En este proceso se genera la red cristalina. Esta red se logra al pasar el granel almacenado en el proceso caliente por una tubería en un determinado tiempo para que llegue al segundo tanque de almacenamiento a una temperatura más baja. El *freezeout* no puede variar su tiempo, es decir, el tiempo que quedó estipulado en la validación; siempre será el mismo: no puede variar porque podría impactar en la fecha de caducidad y no mantener el mismo desempeño o apariencia en el momento de la manufactura. Para lograr bajar la temperatura entre los dos tanques, es necesario contar con una tubería adecuada de acero inoxidable que no permita el almacenamiento de producto y genere posibles microorganismos. Este proceso es el más crítico, ya que también asegura que el *shampoo* sea capaz de limpiar las impurezas del cabello y del cuero cabelludo del consumidor. De no contar con el tiempo y la temperatura correctos, podrían verse dos fases en la botella, una del agua con sus ingredientes menores y otra fase con el surfactante, que da como resultado que en la fase de agua no se cumpla con la función de limpiar.

El tercer proceso se lleva a cabo en un tanque de almacenamiento de la misma capacidad que el proceso en caliente, es decir, en el tanque de 12 t. Empieza el proceso cuando se recibe el granel después de pasar por el *freezeout* a una temperatura más baja para que empiece su mezcla con los ingredientes menores, es decir, en esta etapa se adicionan los últimos materiales para completar la fórmula. Normalmente estas

adiciones son las que aseguran la estética del producto. Cuando llega el granel a este tanque es cuando se asegura que el proceso de la creación de la red cristalina ha sido completado correctamente, ya que las adiciones menores se integran para seguir con el granel homogéneo. Este proceso debe asegurar la temperatura constante durante el tiempo que dure el proceso, es decir, debe mantenerse por debajo de los 40 °C para asegurar la mezcla homogénea. La figura 1 muestra el *freezeout* como el enlace entre los dos tanques de proceso para asegurar la red cristalina.

Con el proceso en frío completo, se procede a transferirlo al área de empaque.

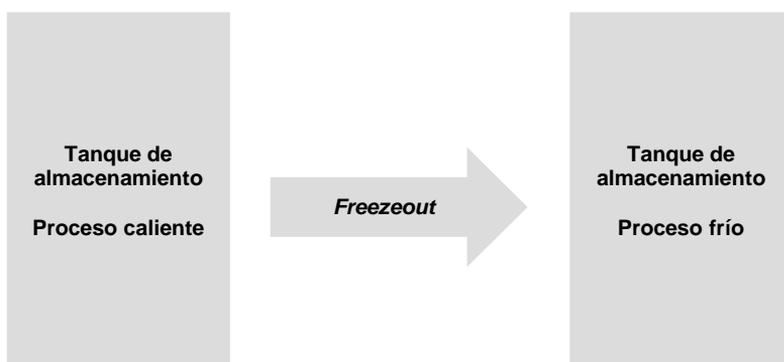


Figura 1. Proceso de fabricación de *shampoo*  
Elaboración propia

## 2.4 Fabricación del granel del acondicionador

Para la producción de acondicionador se necesitan varios materiales, pero los que tienen mayor porcentaje dentro de la fórmula total son:

- i) Agua
- ii) Alcoholes
- iii) Siliconas
- iv) Surfactante
- v) Ingredientes menores

El agua es el ingrediente con mayor porcentaje: un 93 % del total de ingredientes. El agua es primordial para que pueda reaccionar con los alcoholes y la silicona y permitir un cabello suave y sedoso al momento de peinar.

Se tienen adiciones de alcoholes para que hagan una mezcla homogénea con el agua y permitir su conservación. El principal alcohol es el alcohol cetílico, que es un alcohol graso que se utiliza en la industria cosmética para que el cabello reseco pueda recuperar su consistencia habitual de brillo. En la fabricación de acondicionador, el alcohol cetílico representa el 3 % del total de ingredientes.

Las siliconas son un ingrediente importante para la fabricación del acondicionador, ya que son las que recubren el cabello para darle brillo y protegerlo de factores externos como la humedad, luz solar, contaminación, entre otros. Los ingredientes menores representan el 1 % del total de la fórmula.

La fabricación del acondicionador se basa en tres procesos:

- i) Proceso caliente
- ii) Primer *freezeout*
- iii) Segundo *freezeout*

Los tres procesos se llevan a cabo en un solo tanque de almacenamiento. Para fines de esta investigación, se basará el volumen en 12 t, por lo que se adiciona el agua correspondiente a esta cantidad con los alcoholes, siliconas y surfactante necesarios para empezar la mezcla. Este proceso está en continuo movimiento hasta lograr una sola fase en todo el tanque sin identificar los diferentes ingredientes que lo componen. Comúnmente se asegura una temperatura constante en todo el tanque mayor a 70 °C.

Cuando se logra la mezcla homogénea, se empieza el proceso del primer *freezeout* en donde se baja la temperatura de todo el contenido del tanque a 50 °C para que se siga mezclando y se conserven las propiedades del proceso en caliente. Esta disminución de la temperatura se logra a través de una recirculación de una tubería en el mismo tanque: no es necesario transferirlo a otro; sin embargo, algunas empresas prefieren contar con dos o tres tanques de almacenamiento para asegurar la temperatura, ya que no cuentan con máquinas con gran exactitud.

Cuando se logra la temperatura requerida, se empieza el segundo *freezeout* en donde se baja nuevamente la temperatura a menos de 40 °C. Se adicionan los ingredientes menores durante este proceso de enfriamiento mezclándolos hasta tener una sola fase en todo el granel del tanque de almacenamiento. Durante este segundo *freezeout* se debe

asegurar la temperatura constante durante el tiempo que dure el proceso, es decir, debe mantenerse por debajo de los 40 °C hasta el momento de la transferencia. Con el proceso completo, es decir, cuando se logra una mezcla homogénea hasta con los ingredientes menores y se tiene la temperatura menor a 40 °C, se procede a transferirlo al área de empaque.

La figura 2 muestra que un solo tanque de almacenamiento es necesario para realizar los cambios de temperatura.

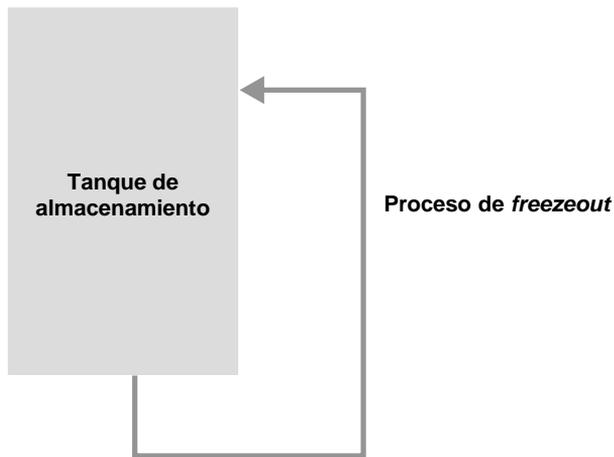


Figura 2. Proceso de fabricación de acondicionador  
Elaboración propia

## 2.5 Proceso de empaque

El área de empaque tiene los siguientes procesos:

- i) Clasificación de materiales
- ii) Llenado
- iii) Tapado
- iv) Etiquetado
- v) Empacado en caja
- vi) Emplayado

La clasificación de materiales empieza cuando las botellas y tapas son introducidas en la banda transportadora de la línea de producción. El proceso de llenado es la transferencia del granel a la llenadora y empieza

a vaciarse a una velocidad que no permite tener esfuerzos mecánicos adicionales. Este proceso es el responsable de que el volumen o peso se cumpla con lo que está mostrado en la etiqueta; la llenadora tiene boquillas que entran al cuello de la botella e introducen el granel necesario sin derrames. Después de que la botella se llene, se tapa y es posicionada para cerrar con un torque en específico y no pueda derramarse el granel con el empaque y el transporte. La tapa tiene que embonar con el cuello de botella para poder cerrarse. Este proceso pasa sobre la línea para que pueda ser un proceso continuo. Una vez que se tiene la botella cerrada para evitar una posible contaminación de partículas extrañas, sigue su transporte sobre la banda transportadora para llegar a la etiquetadora, donde las dos etiquetas son pegadas. La etiqueta frontal es la que muestra el nombre del producto, si es *shampoo* o acondicionador, el *claim*, el arte y la cantidad ofrecida al consumidor. La etiqueta trasera muestra los ingredientes, la forma de uso, los registros sanitarios, código de barras y dónde fue fabricado el producto. El proceso de empaque puede ser manual o automático; si es manual, se tiene que capacitar a los empleados a acomodar las botellas para que no se golpeen entre ellas y que las tapas no se abran durante el transporte a los centros de distribución; si es automático, se programa el robot para que contabilice el número de botellas correctas y las posicione dentro del corrugado. Al tener el formado de la caja completa, se espera al final de la banda transportadora que lleguen más cajas y así poder envolver la tarima completa con una película de plástico para evitar que el producto se caiga.

## 2.6 Muestreo en la línea de producción

En el proceso de toma de muestras, los operadores están capacitados para decidir cuántas botellas tomar durante el lote de producción. Este número se basa en las tablas MIL-STD en un muestreo por atributos, ya que las botellas se dividen en defectuosas y en no defectuosas. Se toma un Nivel General de Inspección II como política de la empresa; no se elige como I porque la discriminación de defectos no se acepta como baja y no se elige como nivel III debido a que el costo de la muestra es muy alto porque algunas de las pruebas son destructivas en el laboratorio. Como ya son productos vendibles al consumidor y se tienen más de cinco lotes consecutivos liberados a cliente por cada versión, se puede establecer una inspección normal con un nivel de calidad aceptable (NCA) de 0 % para defectos críticos y 1,5 % para defectos encontrados en las

botellas debido a lo permitido por el gobierno mexicano referente al llenado de granel estipulado en la etiqueta. Tomando el ejemplo de una botella de *shampoo* y acondicionador de 400 ml y con un lote de producción de 12 t y una densidad de 0,98 del granel de *shampoo* más vendido, el peso mínimo de la botella es de 392 g, que equivale a los 400 ml que aparece en la etiqueta. Con estos datos, se tiene un lote de producción de 30 612 botellas llenas. Este número de botellas representa 315 unidades en un nivel de inspección II. Este número de piezas se tienen que tomar de la producción para su análisis. Para llevar a cabo las pruebas físicas y químicas, se abre la tapa y, en ese instante, la botella no puede ser vendida a cliente porque se les realizan pruebas destructivas, ya que se abre la botella y el granel queda expuesto a una contaminación. Estos análisis son: pH, alcohol cetílico, siloxano, viscosidad, gravedad específica y tamaño de partícula.

Basado en el tamaño y la versión más vendida en el mercado mexicano, es decir, 400 ml, se tiene un costo de manufactura en la empresa de este sector industrial de \$ 6,30 sin tomar en cuenta los gastos logísticos. Cada vez que se produce un lote de producción de 400 ml, se muestrean 315 piezas aleatoriamente durante su manufactura. Como promedio se producen 60 lotes diarios de todos los tamaños, de los cuales 18 lotes son de 400 ml. Es decir, se tiene un *scrap* de 28 350 botellas a la semana, que representan \$178,605 MXN por cada lote de producción como pérdida semanal para la empresa. Este monto es la pérdida que representa a la empresa, ya que las unidades son destinadas a *scrap* por ser abiertas.

## 2.7 Validación

El proceso de validación es importante cuando existe alguna modificación, cambio o nuevo producto en una planta manufacturera a través de estudios R&R (repetitividad y reproducibilidad). Los estudios R&R analizan la variación entre el método de medición y las distintas personas e instrumentos de medición que pueden realizar dichas mediciones. El objetivo principal es reducir o controlar la variabilidad de la medición de un proceso o máquina mediante el estudio de los posibles motivos de variabilidad para conseguir la mayor exactitud de medición en el proceso al disminuir producto fuera de especificación. Cada empresa tiene su propio proceso de validación; sin embargo, se recomienda contar con al menos tres corridas de producción con diferentes cuadrillas de operadores.

## 2.8 Diseño de la investigación

La estrategia de esta investigación se basa en un diseño bibliográfico y de campo. Es un diseño bibliográfico por la investigación de trabajos anteriores realizados en el tema de reducción de costos en un ambiente industrial y en los requerimientos necesarios para asegurar el proceso productivo dentro de estándares de calidad a lo largo del tiempo. También es un diseño de campo por la investigación del impacto de las variables en el proceso de costos, al igual que los costos de producción en la industria de *shampoo* y acondicionador.

Se tienen dos etapas:

- i) Financiera
- ii) Calidad

La primera etapa consiste en obtener la información de costos de los lotes de producción con sus respectivas pérdidas debido al proceso de *scrap*; para lograr este resultado, es necesario conocer la gama de productos de mayor volumen de venta con sus costos respectivos para lograr mostrar la optimización de los costos de muestreo en una empresa de *shampoo* y acondicionador. Esto es con la finalidad de que cada empresa pueda proyectar la optimización de sus costos con esta propuesta.

La segunda etapa consiste en, primero, conocer cómo se lleva a cabo el proceso de R&R, cuáles son sus condiciones, sus pasos y sus criterios de éxito para asegurar que el proceso productivo sea repetible y reproducible, además de obtener los resultados de las variables críticas de las muestras elegidas. Estos análisis se harán después de que se compruebe que el proceso esté en control estadístico, es decir, que todo el proceso haya sido validado.

Esta investigación identifica su población finita que delimita a las empresas manufactureras de *shampoo* y acondicionador en la zona Bajío, ya que los costos y variables de calidad están enfocados en este giro industrial. La muestra probabilística es de tipo estratificada, ya que los productos se clasifican en versiones de producción y en tamaño en mililitros.

La investigación toma la población de una de las grandes empresas que tiene la región Bajío, la cual produce botellas para la venta en México y la muestra es de cinco lotes de producción de las versiones con mayor costo de producción en México de *shampoo* y acondicionador. La

propuesta mostrada en esta investigación es analizar con pruebas de laboratorio solamente tres botellas por lote más la botella que se queda resguardada en las instalaciones de la empresa para futuras investigaciones internas o de gobierno, por lo que se tiene una muestra total de cuarenta botellas (20 de *shampoo* y 20 de acondicionador); sin embargo, solamente se tienen resultados de treinta botellas. Para seleccionar la muestra, es necesario confirmar que el producto haya sido validado en el ambiente real de producción, es decir, que sean de producciones que tuvieron un proceso de R&R para confirmar que el proceso es estable.

### 3. RESULTADOS

Los resultados de esta investigación se lograron basándose en un proceso detallado que involucra el estudio de las variables que conforman la producción de *shampoo* y acondicionador. Para el análisis de datos, se llevó a cabo de manera similar a como lo indica el investigador Lance Coleman en el año 2015, es decir, se aseguró de llevar a cabo las tres fases que él propone: i) leer y entender los tipos de gráficas y tablas que tiene el proceso, ii) identificar posibles tendencias o resultados, y iii) entender la capacidad del proceso instalado (Coleman, 2015).

La primera etapa consiste en la recolección de información de la planta de producción seleccionada en la región Bajío. La información fue dividida en varias fases a través de entrevistas con la gerente de calidad y con la gerente de producción, las que nos compartieron los datos necesarios para el posterior análisis. El resultado está segmentado en:

- i) Productos activos
- ii) Cantidad de producción
- iii) Costo de manufactura
- iv) Unidades a muestrear

Para la etapa de calidad, esta consiste en llevar a cabo el proceso de repetividad y reproducibilidad (R&R) para poder validar el proceso de medición tanto para *shampoo* y acondicionador y ver si cumplen con lo estipulado por el equipo de calidad. El análisis de esta etapa está dividido en:

- i) Variables críticas de proceso
- ii) Estudios R&R

- iii) Muestreo con la reducción de muestras
- iv) Análisis estadístico de variables

Los resultados que se muestran demuestran la factibilidad de optimizar costos por la reducción de muestras que se toma en cada lote de producción. Es decir, se explica la comparación de la situación actual con la propuesta de esta investigación. La situación actual que tiene la empresa de *shampoos* y acondicionadores es tomar el número de muestras según la recomendación de las tablas MIL-STD y la propuesta de esta investigación es tomar solamente tres piezas de producto terminado para confirmar las características críticas que aseguran el desempeño del producto con el consumidor final. Esta reducción en el número de botellas se basa en tomar las botellas como producto terminado una vez que se hayan controlado y registrado las variables críticas durante el proceso de producción. Para la toma de muestra durante el proceso de fabricación, se tiene un NCA de 0 %, ya que, al obtener una muestra fuera de especificación, demuestra que no se manufacturó correctamente y que, al analizar el producto terminado, también estará fuera de especificación en alguna variable. Al revisar los lotes fuera de especificación que ha presentado la planta de manufactura, se comprueba que las 315 botellas presentan el mismo rango, es decir, el total de las muestras analizadas está fuera de especificación en la misma variable. Por esta razón, y que la autoridad mexicana requiere una botella de análisis y una botella para retención, es posible reducir a tres botellas solamente manteniendo el mismo NCA de 0 %, ya que el granel se comporta con características iguales durante el total de las botellas.

Siguiendo con el ejemplo de la fabricación de un lote de 400 ml, se obtienen 30 612 botellas llenas, de las cuales se toman 315 unidades como muestreo según la recomendación de la tabla MIL-STD. Así se puede calcular el costo por muestreo en el año:

costo de manufactura/número de botellas a producir = costo por botella  
costo por botella x unidades muestreadas por lote = costo de *scrap* por lote  
costo de *scrap* por lote x número de lotes anuales = costo total de *scrap*

Con el ejemplo del lote de *shampoo* de 400 ml de la versión con mayor volumen de la empresa manufacturera en la región Bajío, se tiene un costo anual en pesos mexicanos (MXN) de *scrap* de una sola versión de:

$$\text{\$ } 192,856 / 30\ 612 \text{ botellas} = \text{\$ } 6,30$$

$$\text{\$ } 6,30 \times 315 \text{ unidades muestreadas} = \text{\$ } 1984,50$$

$$\text{\$ } 1984,50 \times 1385 \text{ lotes anuales} = \text{\$ } 2\ 748\ 532,50 \text{ MXN total de } \textit{scrap}$$

La proyección financiera anual por una sola versión de *shampoo* de 400 ml es de  $\text{\$ } 2\ 748\ 532,50 \text{ MXN}$  de *scrap*. Es decir, este monto es pagado por la empresa sin obtener un valor agregado en la cadena de suministro, ya que estas unidades (315 botellas llenas de producto) son retiradas del volumen a vender para ser analizadas en el laboratorio y, posteriormente, ser *scrap*.

Con los datos expuestos anteriormente, se puede calcular la optimización de los costos de muestreo en la empresa estudiada. Se sabe, como se expuso en el apartado de costo de muestreo, que se producen 18 lotes de 400 ml diariamente, de los cuales 4 lotes (como promedio) son producidos de la versión analizada, con un costo de *scrap* diario de  $\text{\$ } 7938 \text{ MXN}$ .

Al hacer la optimización de la toma de muestras, se toman solamente tres botellas en cada lote producido. Para el ejemplo de la versión de 400 ml más vendida, se tiene un costo de  $\text{\$ } 18,90$  por cada lote de producción, y al multiplicar por los 1385 lotes anuales, se tiene un total de *scrap* de  $\text{\$ } 26\ 177 \text{ MXN}$ . Si se compara este monto con el costo actual, se tendría una optimización anual de costos de muestreo por  $\text{\$ } 2\ 722\ 356 \text{ MXN}$ .

Siguiendo el mismo ejercicio anterior para *shampoo*, se tiene un ejemplo de un lote de acondicionador de 400 ml de la versión con mayor volumen de la empresa manufacturera en la región Bajío, y se tiene un costo anual en pesos mexicanos (MXN) de *scrap* de una sola versión de:

$$\text{\$ } 178\ 460 / 30\ 769 \text{ botellas} = \text{\$ } 5,80$$

$$\text{\$ } 5,80 \times 315 \text{ unidades muestreadas} = \text{\$ } 1827$$

$$\text{\$ } 1827 \times 620 \text{ lotes anuales} = \text{\$ } 1\ 132\ 740 \text{ MXN total de } \textit{scrap}$$

La proyección financiera anual por una sola versión de acondicionador de tamaño de 400 ml es de  $\text{\$ } 1\ 132\ 740 \text{ MXN}$  de *scrap*. Es decir, este monto es pagado por la empresa sin obtener un valor agregado en la cadena de suministro, ya que estas unidades (315 botellas) son retiradas del volumen a vender para ser analizadas en el laboratorio y, posteriormente, ser *scrap*.

Conociendo los datos expuestos anteriormente, se puede calcular la optimización de los costos de muestreo en la empresa estudiada.

Al hacer la optimización de la toma de muestras, se toman solamente tres botellas en cada lote producido y se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 1  
Resultados de la optimización de la toma de muestras

Tecnología	Costo 3 botellas (MXN)	Número de lotes anuales	Total de scrap (MXN)	Optimización de costos (MXN)
Acondicionador	\$ 17,40	620	\$ 10 788	\$ 1 121 952

Elaboración propia

Esta optimización de costos significa que, por cada lote de producción, se puede tener una ganancia adicional directa, ya que se pueden vender más unidades. Siguiendo el ejemplo de la versión de 400 ml, se tiene la posibilidad de 312 botellas adicionales para venta a cliente.

Basándose en las cantidades expuestas para los ejemplos anteriores, se tiene una optimización anual proyectada de costos de muestreo en dos versiones solamente, una de *shampoo* y otra de acondicionador, de tamaño de 400 ml de \$ 3 844 308 MXN.

El muestreo de 315 botellas representa el 1,03 % del total de lote de *shampoo* y 1,02 % para acondicionador. Con la propuesta de esta investigación se tiene un 0,010 % de *scrap* por cada lote. Es decir, los materiales utilizados se aprovechan de manera más eficiente.

Para lograr la reducción de número de muestra, es necesario llevar a cabo la segunda etapa: calidad. Esta etapa es la que requiere más tiempo en campo, ya que la validación y los resultados de laboratorio se realizan dentro de las instalaciones de la empresa. Teniendo la factibilidad de producción confirmada, se planean los tres lotes de producto terminado. Estos lotes deben ser de la misma versión y consecutivos. Si se tiene un lote con una variable fuera de especificación, se debe repetir la producción de tres lotes nuevamente.

Los resultados del *shampoo* de una versión en específica se muestran en la figura 3.

Los resultados del acondicionador de una versión en específico se muestran en la figura 4.

Proceso	Variable	Criterio	Lote 1	Lote 2	Lote 3
Proceso caliente	Temperatura	> 70 grados	72 grados	73 grados	73 grados
	Tiempo	45 min	45 min	45 min	45 min
	Apariencia	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
Freezeout	Adiciones	+/- 1 %	0,60%	0,60%	0,60%
	Temperatura	38 grados	38 grados	38 grados	38 grados
Proceso frío	Tiempo	6 min	6 min	6 min	6 min
	Temperatura	38 - 40 grados	40 grados	40 grados	40 grados
	Tiempo	35 min	35 min	35 min	35 min
	Adiciones	+/- 1 %	0,70%	0,70%	0,65%
	pH	5.00 - 6.50	6,30	6,20	6,10
	Apariencia	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
Llenado	Límites de llenado	393.96 - 396.00 g	Dentro de especificación	Dentro de especificación	Dentro de especificación
Etiquetado	Centrado	+/- 2 mm	Dentro de especificación	Dentro de especificación	Dentro de especificación
Empacado	Materiales completos	0 faltas de material de empaque	0 faltas	0 faltas	0 faltas

Figura 3. Resultados de validación *shampoo*  
Elaboración propia

Proceso	Variable	Criterio	Lote 1	Lote 2	Lote 3
Proceso caliente	Temperatura	> 70 grados	71 grados	71 grados	72 grados
	Tiempo	45 min	45 min	45 min	45 min
	Adiciones	+/- 1 %	0,60%	0,65%	0,65%
Primer Freezeout	Temperatura	50 grados	50 grados	50 grados	50 grados
	Tiempo	15 min	15 min	15 min	15 min
Segundo Freezeout	Temperatura	38 grados	38 grados	38 grados	38 grados
	Tiempo	15 min	15 min	15 min	15 min
	pH	4.00 - 5.50	4,30	4,20	4,30
	Alcohol cetílico	2.50 - 4.50	3,50	3,40	3,50
	Apariencia	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
Llenado	Límites de llenado	391.95 - 394.00 g	Dentro de especificación	Dentro de especificación	Dentro de especificación
Etiquetado	Centrado	+/- 2 mm	Dentro de especificación	Dentro de especificación	Dentro de especificación
Empacado	Materiales completos	0 faltas de material de empaque	0 faltas	0 faltas	0 faltas

Figura 4. Resultados de validación acondicionador rizos definidos  
Elaboración propia

Se realizó el estudio de los lotes producidos durante un año con resultados fuera de especificación en el muestreo de las 315 botellas. De los lotes producidos durante un año de las versiones elegidas, cinco de *shampoo* y cinco de acondicionador, se identifican 12 lotes de *shampoo* y 10 lotes de acondicionador que han tenido resultados fuera de objetivo, por lo que su destino final ha sido *scrap*. El consolidado de los resultados se muestra en la figura 5. Se puede observar que cada variable fuera de especificación representa un proceso que no se llevó a cabo en las condiciones óptimas. Estos datos se tomaron de una investigación de los lotes producidos en el año 2017.

Tecnología	Lotes	Variable de producto terminado fuera de objetivo	Límites	Resultado	Proceso fuera de especificación
<i>Shampoo</i>	Lote 1	Viscosidad	5,000 - 8,000	8 300	<i>Freezout</i>
	Lote 2	pH	5.00 - 6.50	6,80	Proceso frío
	Lote 3	Gravedad específica	> 0.96	0,95	Proceso frío
	Lote 4	Viscosidad	5,000 - 8,000	8 250	<i>Freezout</i>
	Lote 5	pH	5.00 - 6.50	6,60	Proceso frío
	Lote 6	Viscosidad	5,000 - 8,000	8 150	<i>Freezout</i>
	Lote 7	Viscosidad	5,000 - 8,000	8 100	<i>Freezout</i>
	Lote 8	Viscosidad	5,000 - 8,000	8 100	<i>Freezout</i>
	Lote 9	pH	5.00 - 6.50	6,6	Proceso frío
	Lote 10	Límite de llenado	393.96 - 396.00 g	391,50	Llenado
	Lote 11	Viscosidad	5,000 - 8,000	8 200	<i>Freezout</i>
	Lote 12	Gravedad específica	> 0.96	0,95	Proceso frío
Acondicionador	Lote 1	Siloxano	3.00 - 3.60	3,90	Proceso caliente
	Lote 2	Siloxano	3.00 - 3.60	3,90	Proceso caliente
	Lote 3	Siloxano	3.00 - 3.60	3,85	Proceso caliente
	Lote 4	Alcohol cetílico	2.50 - 4.50	4,60	Segundo <i>freezout</i>
	Lote 5	Alcohol cetílico	2.50 - 4.50	4,65	Segundo <i>freezout</i>
	Lote 6	Viscosidad	7,500 - 13,000	7 300	Primer <i>freezout</i>
	Lote 7	Alcohol cetílico	2.50 - 4.50	4,70	Segundo <i>freezout</i>
	Lote 8	Alcohol cetílico	2.50 - 4.50	4,75	Segundo <i>freezout</i>
	Lote 9	Alcohol cetílico	2.50 - 4.50	4,60	Segundo <i>freezout</i>
	Lote 10	Alcohol cetílico	2.50 - 4.50	4,75	Segundo <i>freezout</i>

Figura 5. Lotes fuera de especificación durante el 2017

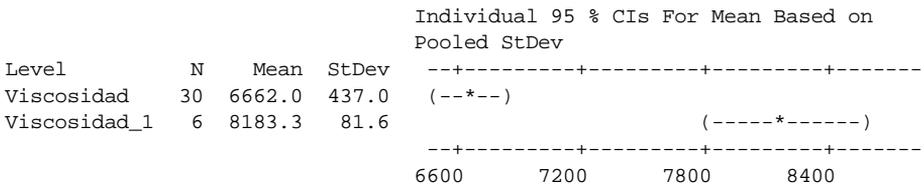
Elaboración propia

Al tener estos datos, se hizo un estudio de Análisis de Varianza (Anova) para confirmar que los lotes de producción se compartan de la misma manera estadísticamente, por lo que se demuestra que existe una diferencia entre las medias de los lotes de producción que se encuentran dentro de la especificación y las medias de los que se encuentran fuera de especificación en la variable de viscosidad (figura 6).

**One-way Anova: Viscosidad, Viscosidad\_1**

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	11572276	11572276	70.62	0.000
Error	34	5571613	163871		
Total	35	17143889			

S = 404.8    R-Sq = 67.50%    R-Sq(adj) = 66,55 %



Pooled StDev = 404.8

*Figura 6.* Anova lotes de viscosidad dentro y fuera de especificación  
Elaboración propia

También se corrió un Anova de los lotes dentro de especificación, y se contabilizaron 30 lotes del mismo producto con sus respectivos resultados de viscosidad. Para hacer esto, el total se dividió en dos grupos para que pudieran ser comparados. La figura 7 muestra que no existe una diferencia estadística entre los lotes dentro de especificación de viscosidad, ya que p-value es mayor a 0,05. Esto significa que los lotes se comportan de la misma manera en su producción.

Se corrió un Anova de los lotes fuera de especificación, aunque se tienen 6 datos solamente. Se dividió el total en dos grupos para poder analizar las diferencias. La figura 8 muestra que no existe una diferencia estadística entre los lotes fuera de especificación de viscosidad, ya que p-value es mayor a 0,05. Esto significa que los lotes se comportan de la misma manera en su producción.

**One-way Anova: Viscosidad Dentro, Viscosidad Dentro\_1**

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	5880	5880	0.03	0.864
Error	28	5532400	197586		
Total	29	5538280			

S = 444.5 R-Sq = 0,11 % R-Sq(adj) = 0,00 %

Level	N	Mean	StDev	Individual 95 % CIs For Mean Based on Pooled StDev
Viscosidad Dentro	15	6676.0	497.2	(-----*-----)
Viscosidad Dentro_1	15	6648.0	384.7	(-----*-----)

-----+-----+-----+-----+-----  
6450          6600          6750          6900

Pooled StDev = 444.5

**Figura 7.** Anova lotes de viscosidad dentro de especificación

Elaboración propia

**One-way Anova: Viscosidad fuera, Viscosidad fuera\_1**

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	15000	15000	3.27	0.145
Error	4	18333	4583		
Total	5	33333			

S = 67.70 R-Sq = 45,00 % R-Sq(adj) = 31,25 %

Level	N	Mean	StDev	Individual 95 % CIs For Mean Based on Pooled StDev
Viscosidad fuera	3	8233.3	76.4	(-----*-----)
Viscosidad fuera_1	3	8133.3	57.7	(-----*-----)

-----+-----+-----+-----+-----  
8080          8160          8240          8320

Pooled StDev = 67.7

**Figura 8.** Anova lotes de viscosidad fuera de especificación

Elaboración propia

El mismo ejercicio de Anova se corrió para lotes de acondicionador que se encuentran fuera de especificación en la variable de alcohol cetílico. Se analizaron 30 lotes dentro de especificación y 6 lotes fuera de especificación de la misma variable. Se tiene un análisis de Anova comparando la variabilidad de las medias que hay entre los dos grupos. La figura 9 demuestra que existe una diferencia entre las medias de los lotes de producción que se encuentran dentro de especificación y las medias de los que se encuentran fuera de especificación en la variable de alcohol cetílico.

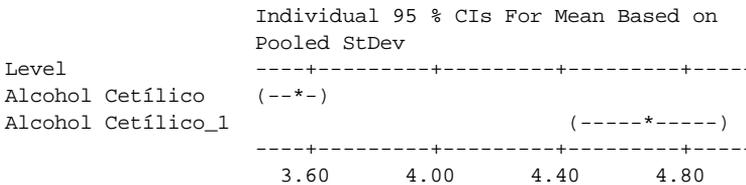
---

**One-way Anova: Alcohol Cetílico, Alcohol Cetílico\_1**

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	6.3469	6.3469	71.90	0.000
Error	34	3.0012	0.0883		
Total	35	9.3481			

S = 0.2971    R-Sq = 67,90 %    R-Sq(adj) = 66,95 %

Level	N	Mean	StDev
Alcohol Cetílico	30	3.5483	0.3204
Alcohol Cetílico_1	6	4.6750	0.0689



Pooled StDev = 0.2971

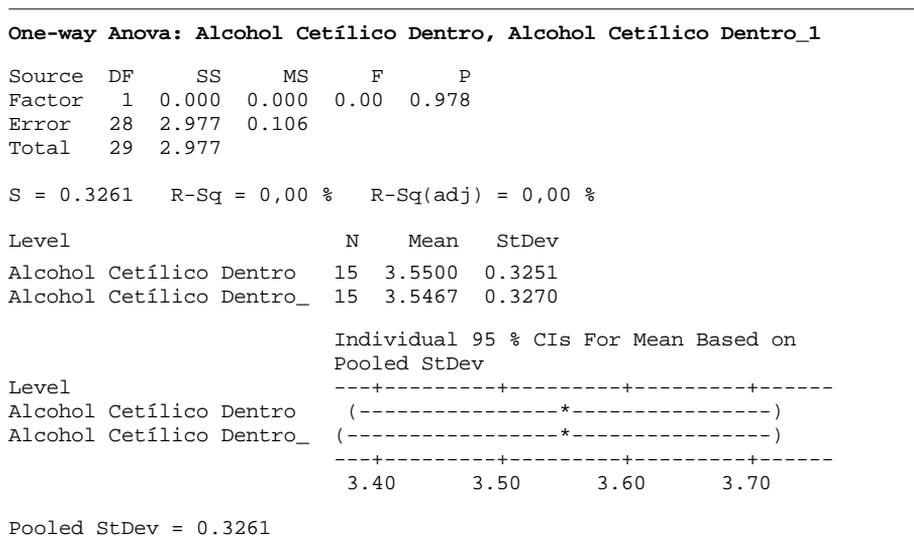
---

**Figura 9.** Anova lotes de alcohol cetílico dentro y fuera de especificación  
Elaboración propia

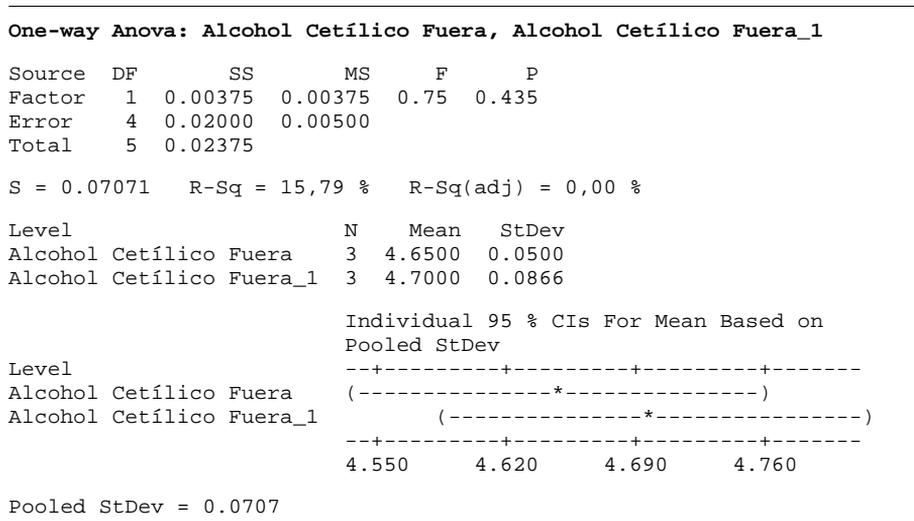
También se corrió un Anova de los lotes dentro de especificación, y se contabilizaron 30 lotes del mismo producto con sus respectivos resultados de alcohol cetílico. La figura 10 muestra el resultado de la corrida de Anova, lo que demuestra que no existe una diferencia estadística entre los lotes dentro de especificación de alcohol cetílico, ya que p-value es mayor a 0,05. Esto significa que los lotes se comportan de la misma manera en su producción.

A su vez se corrió un Anova de los lotes fuera de especificación; aunque se tienen seis datos solamente, se dividió el total en dos grupos para poder analizar las diferencias. La figura 11 muestra que no existe

una diferencia estadística entre los lotes fuera de especificación de alcohol cetílico, ya que p-value es mayor a 0,05. Esto significa que los lotes se comportan de la misma manera en su producción.



**Figura 10.** Anova lotes de alcohol cetílico dentro de especificación  
Elaboración propia



**Figura 11.** Anova lotes de alcohol cetílico fuera de especificación  
Elaboración propia

Con estos análisis se demuestra que los lotes se comportan estadísticamente similares en cuanto a las variables seleccionadas y que, al tener una botella dentro de especificación, se tiene todo el lote de producción en las condiciones deseadas.

Conociendo los resultados mostrados en este trabajo, las variables críticas a evaluar para evitar un lote defectuoso se muestran en la figura 12 para la fabricación de *shampoo* y la figura 13 para el acondicionador. Estas variables tienen que ser monitoreadas en cada lote para asegurar que el desempeño del producto final se conserve.

Proceso	Variable	Criterio	Momento
Proceso caliente	Temperatura	> 70 grados	Después del minuto 5, asegurar la temperatura
	Tiempo	45 min	Al minuto 45, antes de pasar al proceso de <i>freezeout</i>
	Apariencia	Homogénea	
	Adiciones	+/- 1 %	
<i>Freezeout</i>	Temperatura	38 grados	Al minuto 6, antes de pasar al segundo tanque de almacenamiento
	Tiempo	6 min	
Proceso frío	Temperatura	38 - 40 grados	Durante los 35 minutos del proceso frío
	Tiempo	35 min	Al minuto 35, antes de la transferencia a empaque
	Adiciones	+/- 1 %	
	pH	5,00 - 6,50	
	Apariencia	Homogénea	
Llenado	Límites de llenado	393,96 - 396,00 g	Al 100 % de la producción
Etiquetado	Centrado	+/- 2 mm	Muestreo aleatorio
Empacado	Materiales completos	0 faltas de material de empaque	Al 100 % de la producción

Figura 12. Parámetros críticos en la fabricación de *shampoo*  
Elaboración propia

Proceso	Variable	Criterio	Momento
Proceso caliente	Temperatura	> 70 grados	Después del minuto 5, asegurar la temperatura
	Tiempo	45 min	Al minuto 45, antes de pasar al proceso del primer <i>freezeout</i>
	Adiciones	+/-1 %	
Primer <i>freezeout</i>	Temperatura	50 grados	Al minuto 15, antes de pasar al segundo <i>freezeout</i>
	Tiempo	15 min	
Segundo <i>freezeout</i>	Temperatura	38 grados	Al minuto 5 se asegura la temperatura
	Tiempo	15 min	Al minuto 15, antes de la transferencia a empaque
	pH	4.00 - 5.50	
	Alcohol cetílico	2.50 - 4.50	
	Apariencia	Homogénea	
Llenado	Límites de llenado	391,95 - 394,00 g	Al 100 % de la producción
Etiquetado	Centrado	+/- 2 mm	Muestreo aleatorio
Empacado	Materiales completos	0 Faltas de material de empaque	Al 100 % de la producción

Figura 13. Parámetros críticos en la fabricación de acondicionador  
Elaboración propia

#### 4. CONCLUSIONES

Al terminar esta investigación y con los resultados obtenidos, se pudo concluir que el objetivo principal de este trabajo se ha cumplido. La propuesta presenta fundamentos estadísticos y de campo factibles, es decir, las empresas manufactureras de *shampoo* y acondicionador pueden reducir el número de muestras a fin de reducir el impacto financiero manteniendo la rastreabilidad y la estabilidad de las variables críticas de producción, siendo esto último la base de la discusión de este trabajo.

Esta conclusión se basa en los resultados descritos en la etapa financiera y en la etapa de calidad. En la etapa financiera, se comprobó tener un diferencia en el número de botellas tomadas de la línea de producción para su muestreo, de 315 botellas a 3 botellas, representando una reducción de 1,02 % en un lote de *shampoo* y un 1,01 % en un lote de acondicionador. Esta optimización representa tener 312 botellas adicionales en la situación actual para venta directa a cliente.

Adicional al costo obtenido de reducción de muestreos, se sugiere obtener la ganancia que se tendría con estas piezas que en la situación actual forman parte del *scrap*. Es decir, un costo de manufactura de la botella de *shampoo* de cuidado clásico de 400 ml es de \$ 6,30 MXN y de \$ 5,80 MXN de una botella de acondicionador de 400 ml de la versión de rizos definidos, siendo estos productos los más vendidos en el mercado mexicano, por lo que se recomienda agregar el costo de venta a cliente como ganancia adicional. Es importante mencionar que este costo de manufactura no incluye el costo logístico de transportación de la planta de producción a instalaciones del cliente, por lo que este monto se tiene que agregar al costo de manufactura para proyectar la ganancia adicional por pieza de venta.

En la etapa financiera, es posible concluir que tomando en cuenta 18 lotes diarios de producción de *shampoo* y 8 lotes diarios de acondicionador, se puede lograr una optimización de costos anual de muestreo por la cantidad de \$ 9 691 968 MXN para *shampoo* y \$ 4 600 284 MXN para acondicionador teniendo un total de ahorro de \$ 14 292 252 MXN en toma de muestra. Esta cantidad anual es confirmada si el número de lotes se mantiene y el costo de manufactura es el mismo. Se sabe que este último costo puede variar según los insumos de proveedores y las negociaciones que se tengan.

Para sustentar la reducción de unidades para el muestreo, fue necesario explicar ampliamente la etapa de calidad donde la validación de un producto es el paso básico para soportar esta recomendación. La validación se debe realizar cuando existe alguna modificación, cambio o nuevo producto en la planta a través de estudios de R&R. Esta investigación mostró la validación del proceso de ambos productos asegurando que los parámetros de las variables críticas de proceso se cumplen y se mantienen en el tiempo, tomando en cuenta el proceso de granel y el proceso de empaque de tres lotes de producto terminando consecutivos manufacturándolos en diferentes turnos con la finalidad de que los operadores supieran controlar las variables elegidas según la tecnología.

También se revisaron los resultados de las muestras tomadas en lotes de producción fuera en alguna variable. Se comprobó que las 315 botellas mostraron la misma variable fuera de especificación, es decir, analizar en el laboratorio 3 o 315 botellas da el mismo resultado, en este caso, que el lote se encuentra fuera de especificación y no puede ser vendido a cliente.

Adicional a los costos extras que se han mencionado en este apartado, también se recomienda proyectar los ahorros de insumos de los reactivos de laboratorio y la productividad en horas hombre de los analistas y de las personas de producción que toman las muestras en la línea de producción.

Como se ha mostrado en todo el trabajo, pensar en diferentes opciones de los métodos tradicionales permite establecer nuevos procesos de liberación de producto final sin poner en riesgos el desempeño del producto al asegurar que las características que busca el consumidor en el producto se mantienen a lo largo de la vida útil del producto.

## REFERENCIAS

- Canipec. (2017). ¿Quiénes somos? Recuperado de <http://canipec.org.mx>
- Coleman, L. (2015). *Advanced Quality Auditing: an auditor's review of risk management, lean improvement, and data analysis* A. S. f. Quality (Ed.) Recuperado de <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00ULZ1PA/advanced-quality-auditing/process-capability-cp>
- Martínez, T. (4 de diciembre de 2015). PIB de estados del Bajío, con el mayor crecimiento en una década. *El Financiero*.
- Moguel, E. L. (2014). *Memoria Estadística 2014*. Recuperado de [http://www.canipec.org.mx/wooxtras/Presentaci%C3%B3n%20ejecutiva\\_anuario%202014.pdf](http://www.canipec.org.mx/wooxtras/Presentaci%C3%B3n%20ejecutiva_anuario%202014.pdf)
- Montgomery, D. (2004). *Control estadístico de la calidad* (2004 ed. Vol. XXI). México: Limusa.
- Pilotzi, J. (2018). *Pese a la inseguridad, la región de El Bajío crece*. Recuperado de <https://www.forbes.com.mx/pese-a-inseguridad-la-region-de-el-bajio-crece/>
- Salud, S. d. (1995). Norma Oficial Mexicana NOM-141-SSA1-1995 Bienes y servicio. Etiquetado para productos de perfumería y belleza preenvasados. Recuperado de [http://www.cofepris.gob.mx/Marco Juridico/noms/141ssa1.pdf](http://www.cofepris.gob.mx/Marco%20Juridico/noms/141ssa1.pdf)
- Sánchez Pantoja, S. E. (5 de julio del 2017). *Proceso de shampoo y acondicionador/Interviewer: M. d. C. R. Guerrero*.

Silva, S. I. A. (2012). *Cuánto cuestan los productos para el cuidado personal*. Recuperado de [http://www.profeco.gob.mx/encuesta/brujula/bruj\\_2012/bol218\\_pcuidpers.asp](http://www.profeco.gob.mx/encuesta/brujula/bruj_2012/bol218_pcuidpers.asp)

Vega Rangel, R. (1 de abril de 2016) Auditoría de Cosméticos/  
Interviewer: *M. d. C. R. Guerrero*.

Vega Rangel, R. (18 de mayo de 2016) Producción en Procter & Gamble/  
Interviewer: *M. d. C. R. Guerrero*.

Ingeniería de negocios

---

Business Engineering



# Propuesta teórica: degradación de energía en los niveles jerárquicos de toda organización

Salvatore Tarantino-Curseri\*

Investigador independiente. Venezuela

Recibido: 5 de diciembre del 2017 / Aprobado: 22 de marzo del 2018

doi: 10.26439/ing.ind2018.n036.2453

**RESUMEN:** Este opúsculo, al resaltar la importancia de la interdisciplinariedad, se apoya en la termodinámica a fin de destacar la similitud conductual entre la estructura disipativa de Prigogine y la gerencia en la estructura organizativa de toda organización. Con esto presente, y en el marco de la segunda ley de la termodinámica, se desarrolla una propuesta teórica (hipótesis protocientífica) para determinar “la degradación de energía en los niveles jerárquicos de toda organización”.

*Palabras clave:* termodinámica / teoría de sistemas / gerencia / comportamiento caótico en sistemas / interdisciplinariedad de las ciencias

## Theoretical proposal: Degradation of energy in the hierarchical levels of any organization

**ABSTRACT:** This brief work emphasizes the importance of interdisciplinarity, and is supported by thermodynamics in order to highlight the behavioral similarity between Prigogine’s dissipative structure and the management of any company’s organizational structure. Bearing this in mind and in the framework of the second law of thermodynamics, a theoretical proposal (proto-scientific hypothesis) is developed to determine “the degradation of energy in the hierarchical levels of any organization.”

*Keywords:* thermodynamics / system theory / management / chaotic behavior in systems / interdisciplinarity of sciences

---

\* Correo electrónico: sig.staran@yahoo.com

## 1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de esta propuesta es propiciar una reflexión holística-hermenéutica-heurística alrededor de la necesaria interdisciplinariedad entre las ciencias naturales y las ciencias sociales, ambas separadas por un abismo cultural milenario que ha impedido mayores avances de los que hemos tenido. Hoy, las ciencias administrativas necesariamente deben romper el cordón umbilical (Taylor, Fayol, Ford, Mayo, Herzberg, McGregor, Simon, Weber, *et al.*) y transitar por la inter y la transdisciplinariedad que le exige la nueva sociedad del siglo XXI.

Con la interdisciplinariedad, lo que se quiere no es un diálogo entre sujetos (especialistas, representantes de cada disciplina involucrada). No es la simple suma de monólogos, no es una yuxtaposición de conocimientos parcelarios, es más bien una relación recíproca de intercambio y cooperación cognitiva fluida, teórico-práctica, entre varias disciplinas (Rozo Gauta, 1999).

Ahora bien, como hablar de sistemas alejados del equilibrio, estructuras disipativas, entropía y degradación de energía sin incursionar en la episteme propia de la termodinámica, este manuscrito se dividió en dos bloques: el primero (marco teórico) nos permitirá realizar un vuelo rasante, un tanto simplista sobre los conceptos de la termodinámica que nos dará la visión y el piso epistemológico, necesario, para entrar en el segundo bloque (disertación), donde se plantea una propuesta teórica para determinar la degradación de la energía en los niveles jerárquicos de toda organización, y hablaremos del legado de Prigogine, que explica el comportamiento de ese órgano con vida propia que llamamos gerencia como una estructura disipativa, como un sistema abierto alejado del equilibrio, como una isla autoorganizada, forjada de las entrañas del caos, dentro de un archipiélago de desorden como lo es la empresa.

Antes de entrar en tema, se consideró necesario enfatizar que la idea no es trasladar textualmente conceptos de termodinámica o mecánica estadística al mundo gerencial. Evidentemente no son sinónimos, de modo que no podemos comparar un objeto (átomo, molécula, etc.) con el *Homo sapiens* (intelecto, hermenéutica, libre albedrío, emociones, motivaciones, actitudes, aptitudes, etc.), pero sí podemos resaltar la similitud conductual entre la estructura disipativa de Prigogine y la gerencia en la estructura organizativa de toda empresa.

Este opúsculo, cual proposición apodíctica aristotélica, es una invitación a implantar experimentos que permitan contrastar, empíricamente, la veracidad o no de la propuesta teórica aquí desarrollada.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Sistema

El término “sistema”, como se emplea en termodinámica, se refiere a una cantidad de materia definida y limitada por alguna superficie cerrada (Sears, 1976). Un sistema puede ser cualquier objeto, cualquier cantidad de materia, cualquier región del espacio, etc., seleccionado para estudiarlo y aislarlo de todo lo demás, lo cual se convierte entonces en el entorno del sistema (Abbott y Van Ness, 1991). De esta forma, podemos inferir que todo sistema queda limitado por un contorno, envoltura o límites propios del sistema, que pueden ser reales o imaginarios, y el medio que lo rodea o su entorno (medio ambiente) es la parte del universo próxima al sistema y que se ve directamente afectada en alguna medida por los procesos que le ocurren en él, y esta a su vez afecta al universo que la rodea. Un sistema puede ser un subsistema de un sistema mayor o, incluso, pudiera ser el resultado de la suma de subsistemas.

Ahora bien, de acuerdo con las características de su contorno, paredes o envoltura, el sistema termodinámico puede ser de tres tipos: sistema abierto, cerrado o aislado (figura 1). Para este artículo, tomaremos solo el sistema abierto.

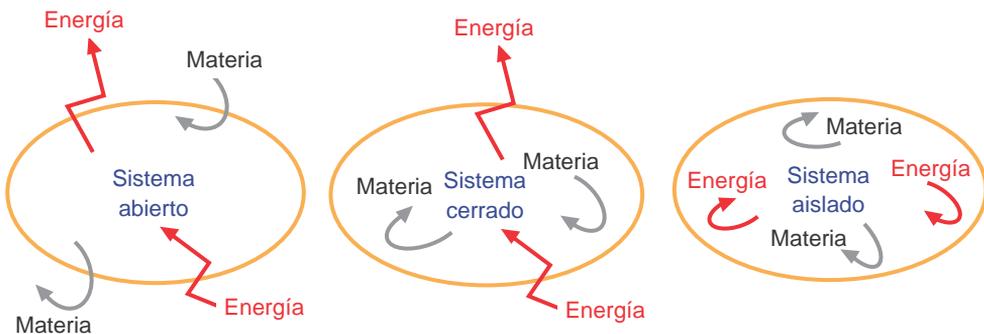


Figura 1. Tipos de sistemas termodinámicos  
Elaboración propia

### 2.1.1 Sistema abierto (comportamiento similar a la gerencia)

Este sistema se caracteriza por poseer una envoltura permeable o imaginaria, ya que permite el intercambio de materia (correos electrónicos, informes, resultados, acuerdos) y energía (lineamientos, directrices, p. ej.: visión, misión, objetivos, normas) con su entorno. Debido a dicho intercambio, tanto la materia como su energía son variables, ya que están en función del flujo (intercambio) de estas (materia y energía), desde el sistema hasta el entorno y viceversa.

## 2.2 El estado termodinámico

El estado termodinámico de un sistema es una condición que está definida por un conjunto de parámetros macroscópicos linealmente independientes (presión  $p$ , volumen  $V$ , temperatura  $T$ , composición química  $N$ , etc.) que lo describe y caracteriza.

### 2.2.1 Equilibrio termodinámico

Un sistema se dice que está en equilibrio termodinámico si y solo si se cumplen simultáneamente los equilibrios mecánico (cuando la suma de fuerzas y momentos sobre cada partícula del sistema es cero), térmico (porque no hay intercambio de calor con el medio externo), electrostático (no hay flujo de carga eléctrica a través de sus paredes y su carga interna es constante) y químico (porque no hay cambio de composición, el número de moles permanece invariable), tanto externos como internos, es decir, cuando no se observa ningún cambio en sus propiedades termodinámicas a lo largo del tiempo y dicha invariabilidad se mantiene aun cuando este se aisle (Medina Domínguez y Ovejero Sánchez, 2010/11).

### 2.2.2 Trabajo termodinámico (este también se cumple en la interacción intergerencias)

No deberíamos hablar de trabajo termodinámico sin antes dedicarle unas pocas líneas a su predecesor, al trabajo mecánico. Y así, de acuerdo con la mecánica, el trabajo ( $W$ ) es el producto escalar de una fuerza  $\vec{f}$  por el desplazamiento de una partícula en un trayecto  $\vec{dx}$ . De esta forma tenemos:

$$\delta W = (\text{signo} + \text{ó} -) \vec{f} \cdot \vec{dx} \quad (1)$$

En términos termodinámicos, diríamos que, cuando un sistema ejerce una fuerza  $\overline{f}$  sobre su entorno, genera un desplazamiento  $\overline{dx}$  de su envoltura y, así, al producto escalar de dicha fuerza por el desplazamiento de la envoltura lo llamamos trabajo termodinámico del sistema (Gómez-Acebedo, 2009). Como se habrá notado, decimos  $\delta W$  ya que el trabajo realizado dependerá no solo del estado inicial y final del sistema, sino también dependerá de la trayectoria que se elija. De esta forma, podemos concluir que el trabajo total ( $W$ ) para que la envoltura se desplace del punto A ( $x_a$ ) al punto B ( $x_b$ ) será:

$$W = (\text{signo } + \text{ ó } -) \int_{x_a}^{x_b} \overline{f} \cdot \overline{dx} \quad (2)$$

(signo  $+ \text{ ó } -$ ) porque dependerá de la dirección vectorial del desplazamiento  $\overline{dx}$  y, así, siguiendo las recomendaciones de la Iupac (acrónimo en inglés de la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada) en cuanto a la convención de signo (direcciones de calor y trabajo), formulada en el 1969 (McGlashan, 1969), se propone que se considere el mismo criterio que en mecánica para el tratamiento de las interrelaciones sistema-entorno. De esta forma, si el desplazamiento de la envoltura es al interior del sistema, y se indica que la fuerza la realiza el entorno hacia el sistema, los diferenciales de calor y trabajo serán positivos  $\delta Q > 0$  y  $\delta W > 0$ , pero, si el desplazamiento es hacia el entorno, producto de una fuerza ejercida por el sistema hacia el entorno, los diferenciales de calor y trabajo serán negativos  $\delta Q < 0$  y  $\delta W < 0$ .

### 2.3 Energía

Su definición ha retado a científicos y filósofos de todos los tiempos. Quizá con ayuda de la etimología podamos aclarar el terreno y, así, encontramos que la palabra “energía” nos viene del latín *energĭa* tomada del griego *enérgeia* (“capacidad de acción”). Su semántica nos señala que energía hace referencia a la capacidad de trabajo. Desde el punto de vista termodinámico, podemos decir que es la capacidad de producir un efecto, un cambio; en otras palabras, es la capacidad que tiene un cuerpo de producir trabajo o transferir calor.

Análogamente, visto desde la perspectiva de la gerencia, es la capacidad que tiene un directivo, gerente o supervisor de producir trabajo, y se manifiesta a través del lineamiento, la directriz y el mandato en la interrelación supervisor-supervisado.

### 2.3.1 Energía interna (interacción intersupervisados)

Estrechamente relacionada con la temperatura, la estructura molecular y su grado de actividad no es más que la suma de todas las formas microscópicas de energía que poseen las moléculas, los átomos y las partículas subatómicas que componen el sistema, y se denota mediante  $U$  (Çengel y Boles, 2011).

Dicho en otras palabras, la energía interna ( $U$ ) es básicamente la suma de la energía cinética interna ( $E_{cint}$ ) y la energía potencial interna ( $E_{pint}$ ) presentes en el sistema.

$$U = E_{cint} + E_{pint} \quad (3)$$

Por analogía:

- *Energía interna*: es básicamente la interrelación entre los integrantes de una gerencia, interacción que puede ser medida a través del clima organizacional, clima social y clima psicológico de la gerencia.
- *Energía cinética*: es la interrelación profesional supervisor-supervisado, que usa los valores morales y éticos (axiología) y el correcto manejo de la identidad (ontología) junto con las emociones y los sentimientos como hilo conductor. Está representada principalmente por la calidad de la motivación y, con ella, el respeto junto con la correcta asignación de responsabilidades acordes con el perfil.
- *Energía potencial*: está representada por el nivel epistémico (entrenamiento, capacitación) y, con él, la definición clara de las normas, los procesos y los procedimientos necesarios para el cumplimiento de las funciones diarias.

## 2.4 Termodinámica

La termodinámica (del griego *termo*, que significa “calor”, y *dínamis*, que significa “fuerza”) es la ciencia macroscópica que se ocupa del estudio de los procesos que implican transformaciones e interacciones de la energía en forma de calor ( $Q$ ) y trabajo ( $W$ ). En otras palabras, estudia la conversión de unas formas de energía en otras, y su análisis se basa en el balance (equilibrio) de masa y energía del sistema analizado. La termodinámica se desarrolla a partir de cuatro leyes, pero, para este artículo, solo tomaremos la segunda ley.

### 2.4.1 Segunda ley (tenga presente el comportamiento de la gerencia)

Su descubrimiento y la base conceptual empezó con el trabajo del joven ingeniero francés Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796-1832), a quien le podemos atribuir la paternidad de la segunda ley de la termodinámica con su obra *Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego y sobre las máquinas diseñadas para desarrollar dicha potencia*, publicada en 1824.

Treinta años después, el trabajo iniciado por Carnot fue reformulado por el físico y matemático alemán Rudolf Julius Emmanuel Clausius (1822-1888) en 1854 en su obra *Über eine veränderte Form des zweiten Hauptsatzes der mechanischen Wärmetheorie (Sobre una forma diferente de la segunda ley fundamental de la teoría mecánica del calor)* (Solbes y Tarín, 2008) y, en 1865, dio a conocer una nueva función de estado con el nombre de entropía (Çengel y Boles, 2011), cuya etimología viene del griego *entropēin*, que significa “contenido transformador” o “transformación de contenidos”.

Con la segunda ley de la termodinámica sucedió algo interesante. La condición de ingeniero de Carnot indignó a algunos físicos de la época y sus trabajos fueron despreciados por la comunidad científica (Jaramillo Salgado, 2008). A pesar que su contribución fue teórica, tuvo una fuerte influencia en el desarrollo industrial del siglo XIX.

Con el transcurrir del tiempo, se han formulado varios postulados de la segunda ley de la termodinámica. Entre ellos:

Carnot (1824): la eficiencia de una máquina térmica irreversible es siempre menor que la eficiencia de una máquina reversible que opera entre los mismos dos depósitos. Las eficiencias de las máquinas térmicas reversibles que operan entre los mismos dos depósitos son las mismas (Çengel y Boles, 2011). Dicho en otras palabras, el rendimiento de una máquina de Carnot es independiente de la sustancia de trabajo, pues depende solo de las temperaturas extremas  $T_1$  y  $T_2$  de las fuentes entre las cuales opera, y no puede ser superado por el de otras máquinas que funcionen según ciclos diferentes entre las mismas temperaturas (Rodríguez, 2009).

Clausius (1850): no es posible la operación de un proceso que, funcionando cíclicamente, no haga otra cosa que tomar calor de una fuente fría y transferirlo íntegramente a una fuente cálida (Rodríguez, 2009). Es imposible que una máquina que actúa por sí misma, sin ayuda de un agente exterior, haga pasar calor desde un cuerpo a cierta temperatura

hasta otro a una temperatura superior (Faires y Simmang, 1983). Es imposible construir un dispositivo que opere en un ciclo sin que produzca ningún otro efecto que la transferencia de calor de un cuerpo de menor temperatura a otro de mayor temperatura (Çengel y Boles, 2011).

Kelvin-Planck (1897): es imposible que un sistema realice un proceso cíclico cuyos únicos efectos sean el flujo de calor desde una fuente de calor al sistema, y la realización por el sistema de una cantidad de trabajo equivalente sobre el entorno (Levine, 2004). No es posible la operación de un proceso que, funcionando cíclicamente, no haga otra cosa que tomar calor de una sola fuente y convertirlo íntegramente en trabajo mecánico (Rodríguez, 2009). Es imposible construir una máquina termodinámica que, cuando opere según cierto ciclo, no produzca más efectos que efectuar trabajo e intercambiar calor con un solo depósito térmico (Faires y Simmang, 1983). Es imposible construir un dispositivo que opere en un ciclo sin que produzca ningún otro efecto que la transferencia de calor de un cuerpo de menor temperatura a otro de mayor temperatura (Çengel y Boles, 2011). Efectivamente, la máquina térmica no puede convertir el 100 % de la energía recibida en trabajo, ya que parte de esta se disipa a su exterior, comportamiento muy similar a la gerencia.

En esta segunda ley tenemos dos actores importantes: el proceso irreversible y la entropía.

#### *2.4.2 Proceso irreversibles (¿no hay degradación de la energía y generación de entropía en la gerencia?)*

Todo proceso irreversible se caracteriza por la imposibilidad de deshacer un cambio sin dejar rastros de lo ocurrido y presenta, irremediadamente, dos efectos secundarios: degradación de la energía y generación de entropía. El porqué de la irreversibilidad lo encontramos en la transmisión de calor, los procesos disipativos, la fricción, la resistencia eléctrica, la expansión libre, la mezcla de dos fluidos, etc.

#### *2.4.3 Entropía (en la gerencia y, sobre todo, en la empresa, ¿no hay entropía?)*

En términos simplistas, podemos decir que la entropía (S) (del griego  $\epsilon\nu\tau\rho\omicron\pi\acute{\alpha}$ , “tropos”, y que significa “evolución o transformación”) es una

medida cuantitativa del desorden. Fue Rudolf Clausius quien le dio nombre y la desarrolló durante la década de 1865.

De acuerdo con la segunda ley de la termodinámica, el cambio de entropía de cualquier sistema y su ambiente siempre es positivo.

$$\Delta S_{total} \geq 0 \quad (4)$$

A una temperatura dada, el valor cuantitativo de la entropía es directamente proporcional a la cantidad de energía térmica absorbida por el sistema. Es decir, a una temperatura dada, el sistema gana energía térmica y se incrementa su entropía; si dicho sistema pierde energía térmica, su entropía disminuirá.

$$dS = S_2 - S_1 = \frac{Q_{1 \rightarrow 2}}{T} = \frac{\delta Q_{reversible}}{T} \quad (5)$$

$$dS > \frac{\delta Q_{irreversible}}{T} \quad (6)$$

Para un proceso en general (reversible o irreversible):

$$dS \geq \frac{\delta Q}{T} \quad (7)$$

#### 2.4.4 Estructuras disipativas

La teoría de las estructuras disipativas tienen su paternidad bien definida. De hecho, en 1977 se le otorgó a su progenitor el Premio Nobel de Química. Estamos hablando del físico, químico, sistémico y profesor universitario belga de origen ruso Ilya Prigogine, quien de forma magistral estudió, analizó y descifró la otra cara de la termodinámica.

Este ilustre hombre de ciencias, dijo y demostró que el caos es artífice del orden, que el no equilibrio y la no linealidad son creadores del orden.

La disipación de energía y de materia –generalmente asociada a los conceptos de pérdida y rendimiento y evolución hacia el desorden– se convierte, lejos del equilibrio, en fuente de orden; la disipación se encuentra en el origen de lo que podemos llamar los nuevos estados de la materia. Las estructuras disipativas corresponden en realidad a una forma de organización supramolecular (Prigogine y Stengers, 2004, p. 181).

En términos físicos y desde el punto de vista de la termodinámica clásica, el único estado final de un sistema era el equilibrio, y este se lograba a través de un proceso lineal predecible de permanente degradación. Sin embargo, como una reinterpretación de la segunda ley de la termodinámica, hoy sabemos, gracias a la no linealidad de los procesos irreversibles de Prigogine, que los sistemas alejados del equilibrio protagonizan un caos progresivo hasta llegar a un punto que él denominó el “punto de bifurcación” (Prigogine y Stengers, 2004, pág. 192), punto donde el sistema tiene solo dos opciones: regresar al estado de equilibrio original o autoorganizarse hasta constituir una nueva estructura denominada estructura disipativa (un nuevo sistema que sustituirá el sistema original), un nuevo orden que surgirá del desorden (figura 2). La gerencia surge así como producto del desorden que arroja el archipiélago llamado empresa.

Toda empresa está conformada por gerencias. Estas surgen ante la necesidad de agrupar una serie de funciones especializadas a fin de satisfacer los requerimientos estratégicos, administrativos y/o técnicos que coadyuven al bienestar del *core business*. Esta, cual estructura disipativa, producto de agentes desequilibrantes tanto internos (mal manejo de su energía interna) como externos (proveniente de otra gerencia), disipa energía al exterior impactando el equilibrio general de la empresa y, al final, se tiene una sumatoria de gerencias (islas) que, gracias a los agentes desequilibrantes (de todas las gerencias) y el caos progresivo, ambos producto de muchos factores, entre ellos la degradación de la energía en los diferentes niveles jerárquicos, por instinto de sobrevivencia, se acorazan en su especialidad y se manejan como “minifundios” dedicados a sus “monocultivos” y, al final, se tienen relaciones diplomáticas entre islas que conforman un archipiélago llamado empresa.

En este orden de ideas, vemos en el diagrama de la figura 2 un ejemplo en el que conviven dos sistemas, abierto y cerrado, en una empresa. En él se observa, grosso modo, la justificación de las constantes reestructuraciones que sufren las empresas a lo largo de su ciclo de vida. Como producto de la gestión del cambio, inmerso en el perenne proceso de mejora continua, la empresa busca constantemente mejorar y optimizar sus procesos a fin de mejorar la relación: gasto-inversión-retorno de capital-ganancias. Una de las estrategias para lograr dicho fin es la reestructuración. El alcance de esta lo estipula el número de gerencias que están alejadas del equilibrio, es decir, aquellas gerencias que no cumplen con la efectividad (equilibrio entre la eficacia y la eficiencia) requerida, y activan la necesidad del proyecto de reestructuración.

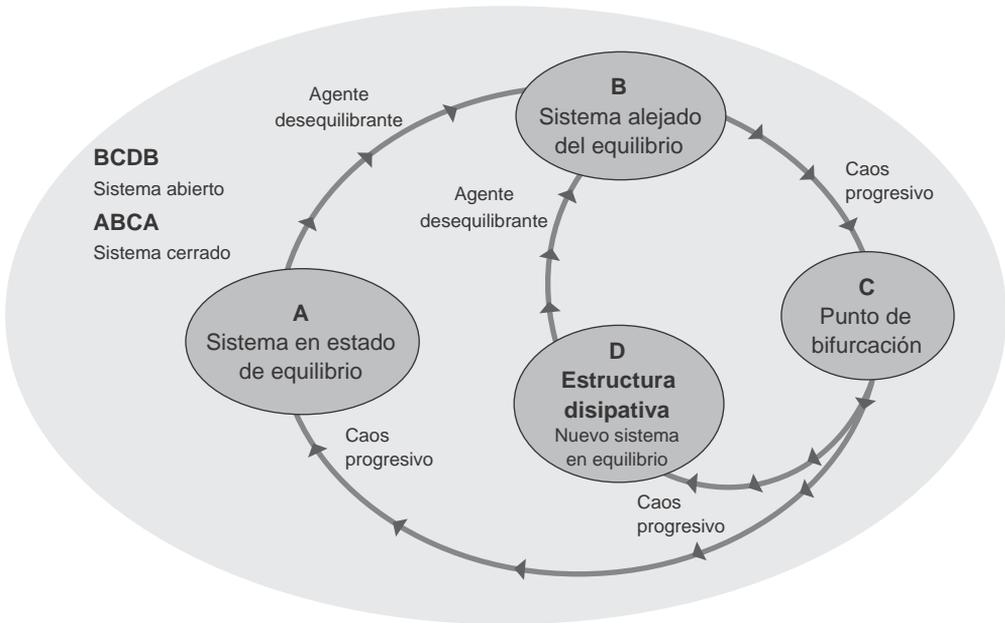


Figura 2. Estructura disipativa

Fuente: (Cazau, s. f.)

Elaboración propia

- **BCDB**

Este bucle cumple con las características de un sistema abierto. En él se dan procesos irreversibles que llevan irremediamente a la gerencia (**D**) a un estado alejado del equilibrio (**B**). Estando en el estado **B**, gracias al caos progresivo (donde la estructura organizativa informal más los infaltables rumores de pasillo y el proceso de reestructuración como tal juegan un rol protagónico en dicho caos), pasa al punto de bifurcación (**C**). El pasar al punto **D** o **A** se verá después de la implantación de la nueva gerencia y lo definirá el nivel de adaptabilidad y sincronización de ella con el resto de las unidades organizativas de la empresa. Si se ubica en el punto **D** es porque hubo un error en el análisis propio del proceso de reestructuración, por lo que veremos un equilibrio temporal (producto de lo nuevo) que pasará (pueden pasar años) al estado **B**, y se repite nuevamente el bucle. Si se ubica en el punto **A** es porque se acertó en buena medida el análisis y se justifica la reestructuración.

- **ABCA**

Este bucle, a diferencia del anterior, cumple con las características de un sistema cerrado. En él se dan procesos reversibles con tendencia a permanecer en el estado original y no pasar a un estado alejado del equilibrio. En nuestro caso en particular, la gerencia como parte de la empresa, muy difícilmente cumple con las características de un sistema cerrado. De hecho, estos sistemas se dan en ambientes controlados en un laboratorio. En la naturaleza, tarde o temprano dicho sistema disipará energía y pasará a un estado alejado del equilibrio. Evidentemente, la gerencia que se encuentre en el punto **A** tardará mucho más tiempo en alcanzar el punto **B**, mientras que de la gerencia que se encuentre en el punto **D** su conversión al punto **B** es inevitable y relativamente más rápida que **A**. El tiempo de permanencia en el punto **A** lo establece, entre otros factores, el adecuado manejo profesional de la energía circunscrita en toda la empresa; sin embargo, aun manejando lo más adecuadamente dicha energía, inevitablemente nos topamos con la degradación de la energía en los diferentes niveles jerárquicos de la organización, que da como resultado que tanto **D** como **A** pasarán por el proceso de reestructuración y llegarán al punto de bifurcación (**C**).

### 3. DISERTACIÓN

El manejo de los conceptos propios de la termodinámica nos permite entender la necesaria interdisciplinariedad entre lo que tradicionalmente se ha manejado de forma monológica, unidisciplinar, como disciplinas aisladas e inmiscibles entre las ciencias naturales, como la física y la química, con las ciencias sociales y la cultura.

En cuanto a la unidisciplinariedad, José Rozo Gauta (1999) nos comenta:

Las escuelas, universidades e instituciones de investigación fueron organizadas desde el mundo multidisciplinar, con muchas disciplinas en vecindad pero sin relación unas con otras, aspecto que no solo ha separado el conocimiento, sino a unos sujetos de otros, a tal punto que físicos y biólogos son para los sociólogos y humanistas seres extraños y viceversa. [...] Si hemos heredado y reproducido la visión de un mundo ordenado, determinista, cierto y verdadero pero fragmentado, es hora de optar por cambios epistemológicos, lógicos y pedagógicos que permitan que afloren

los movimientos de orden-desorden-organización, el indeterminismo, la incertidumbre, el reconocimiento del sujeto, el conocimiento del conocimiento, la unidad de lo diverso, la diversidad de la unidad, el aprender a aprender y a desaprender, y con estos elementos reconstituir nuestra identidad, nuestro saber, nuestra subjetividad, nuestro saber-hacer en el proceso educativo, en la vida cotidiana y en el quehacer político-económico. (p. 12)

La pieza fundamental de la termodinámica es la segunda ley y en ella encontramos la piedra angular para entender la historia de la humanidad en términos científicos, filosóficos y culturales. De hecho, el tipo de proceso termodinámico irreversible, la entropía y las estructuras disipativas nos explican la dinámica social, el comportamiento organizacional e, incluso, cumplen un rol protagónico en el proceso mismo de la evolución de la sociedad, de la organización y de la vida misma. Tanto la irreversibilidad, la entropía y las estructuras disipativas encarnan el núcleo mismo de la nueva termodinámica.

Si colocamos una lupa en el episteme teórico de la termodinámica, encontraremos tres grandes bloques que la conforman:

- El estado de equilibrio: caracterizado por la perfección; entropía cero, sin presencias de fuerzas ni flujos de energía.
- El estado cercano al equilibrio: donde prevalece la física newtoniana; los flujos de energía son lineales, predecibles y fáciles de medir.
- El estado alejado del equilibrio: básicamente es el área de estudio de la termodinámica “no lineal”, donde el flujo de energía es manejado por el mundo del caos (no necesariamente desorden y confusión) y la complejidad (la no proporcionalidad causa-efecto), donde, producto del constante cambio, reinan las fluctuaciones y turbulencias organizacionales; la interacción entre pocos elementos del sistema puede desencadenar comportamientos muy complejos donde pequeñas perturbaciones pueden dar lugar a grandes cambios y viceversa (el efecto mariposa). Tal es el caso del mundo gerencial.

Esta no linealidad nos exige cambios de paradigmas; requerimos metodologías hermenéuticas no lineales que permitan maximizar nuestros recursos intelectuales a fin de manejar, epistemológica y axiológicamente, el caos, la complejidad, las fluctuaciones y las turbulencias, no como errores a evitar, sino, por el contrario, como elementos que hay que estudiar, analizar, organizar y gestionar (Pastor & García-Izquierdo, 2007), como

elementos que forman parte de nuestra realidad y que no son otra cosa que piezas fundamentales en nuestro diario gerenciar.

Bien, tras haber realizado un vuelo rasante a través de algunos conceptos de la termodinámica, ahora nos toca analizar sus similitudes y su posible aplicabilidad en el mundo de la gestión gerencial.

### 3.1 Sistema

El sistema termodinámico que nos compete en este artículo es la gerencia (figura 3), el órgano viviente que, junto con otros, conforma la estructura organizativa de la empresa en la que laboramos.



Figura 3. La gerencia como sistema termodinámico  
Elaboración propia

Microscópicamente, este sistema termodinámico (gerencia) está conformado por átomos (trabajadores del conocimiento) que están agrupados y organizados estratégicamente en moléculas (coordinaciones y/o supervisiones) –subsistemas que conforman el sistema mayor, la gerencia– cuyas energías cinética y potencial están dirigidas y controladas por la visión, la misión, los objetivos y las responsabilidades de la gerencia que las circunscriben.

El conjunto visión, misión, objetivos y responsabilidades cumple un doble rol, pues personifica la energía que entra al sistema y, a su vez, le da forma, color y textura a su envoltura.

Este sistema es un sistema termodinámico abierto (figura 4), cuya envoltura permeable permite la entrada de lineamientos (energía) y materia prima para sus diferentes procesos internos y, a su vez, genera lineamientos y materia prima que entregará al entorno organizacional.

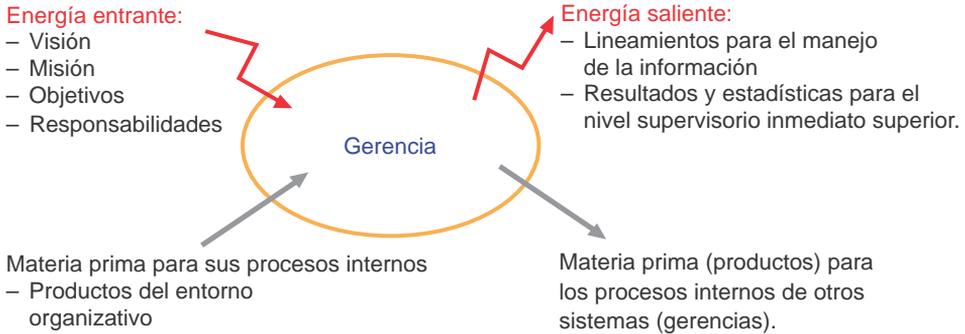


Figura 4. La gerencia como sistema termodinámico abierto  
Elaboración propia

### 3.2 El estado termodinámico

Tal como se señaló anteriormente, el estado termodinámico está definido por un conjunto de parámetros macroscópicos linealmente independientes (presión  $p$ , volumen  $V$ , temperatura  $T$ , composición química  $N$ , etc.) que lo describen y caracterizan.

Hagamos un paréntesis y hablemos un poco de álgebra lineal.

Teorema:

Cualquier conjunto formado por dos vectores diferentes de cero;

$$Z = \{\vec{v}_1, \vec{v}_2\} \text{ donde } \vec{v}_1 \neq 0 \text{ y } \vec{v}_2 \neq 0 \quad (8)$$

Es linealmente dependiente si, y solo si, uno de los vectores es múltiplo escalar del otro, es decir, si multiplicamos uno de ellos por un número real, obtendremos el otro.

Dicho en otras palabras:

$$\vec{v}_1 = k \vec{v}_2 \rightarrow (v_{11}, v_{12}) = k(v_{21}, v_{22}) \quad (9)$$

$$\frac{v_{11}}{v_{21}} = \frac{v_{12}}{v_{22}} = k \quad (10)$$

Si no es posible encontrar un valor  $k$  que satisfaga esto, tendremos dos vectores linealmente independientes.

A manera de ejemplo, para el sistema (gerencia), la inteligencia de la persona es una variable independiente (solo depende de la persona), mientras que la productividad es una variable dependiente (depende de metodología, experiencia, información, proceso, procedimiento, capacitación, etc.).

Y, así, los parámetros macroscópicos linealmente dependientes e independientes que describen y caracterizan el estado termodinámico de nuestro sistema (gerencia) son:

- Dependientes: productividad, ausentismo, rotación, satisfacción laboral, procesos internos, políticas y manejo del personal por parte de la gerencia de gestión humana, compromiso con la organización, actitud, manifestaciones fisiológicas, comportamiento afectivo, estrategias, calidad y servicio al cliente, innovación, salud general, salud mental, cansancio emocional, despersonalización, realización personal, oportunidades de promoción.
- Independientes: edad biológica, sexo, lugar de nacimiento, antigüedad, inteligencia, personalidad, aptitud, experiencia, estilo de liderazgo, estilo de gestión.

Ahora bien, en termodinámica usamos un termómetro para medir la temperatura, usamos un manómetro para medir la presión, pero para poder medir los parámetros macroscópicos linealmente dependientes e independientes de nuestro sistema (gerencia) por lo general se usa el clima organizacional y rara vez el clima psicológico.

Tal como se señaló, el ser humano usa el termómetro para medir su temperatura corporal, y esta es un indicativo esencial del estado de salud de un individuo. Al ser animales “homeotermos”, nuestro cuerpo dispone de procesos que permiten regular la temperatura corporal dentro de unos límites, pero, de existir una anomalía en la actividad metabólica o una agresión al organismo, se genera un aumento o una disminución de la temperatura con la indicación de que algo malo está sucediendo. Dicho cambio de temperatura es fácilmente detectado por el termómetro. Por otro lado, disponemos de otros instrumentos para medir, a manera de ejemplo: la presión arterial, como es el caso del esfigmomanómetro o tensiómetro, comúnmente llamado manómetro, que nos permite conocer, grosso modo, el estado físico de nuestro sistema circulatorio; disponemos

del tonómetro, que nos permite medir la tensión ocular (presión intraocular) y así tener una idea del estado físico del ojo.

Por otro lado, desde la perspectiva organizacional de la empresa, disponemos del “clima organizacional” (metafóricamente similar al termómetro para medir la temperatura del cuerpo como un todo). La serie de causalidades que dieron su origen comenzó en 1927 con los estudios de Hawthorne (Mayo, 1975; Teja Gutiérrez, Trueba Espinosa, López Lira, y Aguilar, 2017) (estudio psicológico y sociológico para conocer la influencia que tienen ciertos factores como la iluminación, la higiene, el ruido, la reducción de la jornada, etc., en el aspecto productivo de la empresa) dirigidos por el sociólogo y psicólogo industrial australiano Elton Mayo (profesor de investigación industrial de la Harvard Business School). Más adelante encontramos los estudios de Kurt Lewin y su famosa ecuación  $C = f(P \times E)$ , donde estipula que el comportamiento es función de la persona implicada y de su entorno (Brunet, 1987), y fue en 1960 cuando Saul W. Gellerman mencionó por primera vez, en psicología industrial/organizacional, el término “clima organizacional” (Gellerman, 1960). Su concepto navega principalmente entre dos aguas, entre las escuelas Gestalt y funcionalista. Sin entrar en detalles técnicos-comparativos, ambas escuelas coinciden en asegurar que el comportamiento de la persona está influenciado por el entorno en el que se desenvuelve, y es precisamente este el objetivo del clima organizacional: determinar la percepción que tienen los trabajadores de su entorno, es decir, a través de esta herramienta, la alta dirección tendrá una idea, grosso modo, de la atmósfera de trabajo que circunscribe la praxis cotidiana en la ejecución de las actividades de gestión.

En el análisis del clima organizacional, tenemos un número importante de variables a contemplar: condiciones ambientales de la empresa, estructura organizativa, normas, políticas y reglas, tipos de liderazgo, comunicación, motivación y recompensas, complejidad de los sistemas, las direcciones y desafío en los objetivos y las metas, responsabilidad y autonomía en la toma de decisiones, estándares de productividad, manejo de conflictos y el sentido de pertenencia, valores, actitudes y creencias de los miembros, planificación de las tareas y la distribución del trabajo, la eficiencia de la administración y el rendimiento de los recursos.

Al respecto, Campbell (citado en Olaz Capitán y Ortiz García, 2014, p. 99) señala que:

el clima organizacional es variable dependiente e independiente de la estructura organizativa y de todos aquellos diferentes procesos generados en la organización que, a la postre, terminan redefiniendo y dibujando los comportamientos de los trabajadores.

Desde la perspectiva individual, disponemos del “clima psicológico”. Este es un concepto posterior al “clima organizacional”. Entre los expertos y las autoridades en el tema, se tiene consenso en señalar que sus principales exponentes son James y Jones (1974) y Schneider (1975). Esta herramienta, básicamente consiste en determinar, usando como hilo conductor los valores personales del psicólogo y profesor estadounidense Locke (1976) (claridad en cuanto a la misión, visión, objetivos y asignaciones, responsabilidad, apoyo y relaciones sociales), las percepciones individuales del entorno laboral. En palabras simples, el clima psicológico nos muestra cómo se percibe a sí mismo el empleado, que tan beneficiado o perjudicado se siente en su entorno laboral.

En pocas palabras, las personas responden a los entornos de trabajo en términos de cómo perciben estos entornos, y una preocupación sustantiva clave en la percepción es el grado en que los individuos se perciben a sí mismos como beneficiados personalmente, en lugar de ser personalmente perjudicados por su entorno (James y James, 1989, p. 748)

### 3.3 Energía

Para el análisis, se tomará la que se señaló anteriormente como la más importante desde el punto de vista termodinámico (energía interna ( $U$ )), ya que está estrechamente relacionada con la estructura molecular y su grado de actividad. Esta no es más que la suma de todas las formas microscópicas de energía que poseen las moléculas (coordinaciones y/o supervisiones), átomos (trabajadores del conocimiento) que componen el sistema y se denota mediante  $U$ .

Dicho en otras palabras, la energía interna ( $U$ ) es básicamente la suma de la energía cinética interna ( $E_{c\ int}$ ) y la energía potencial interna ( $E_{p\ int}$ ), presentes en el sistema. Para simplificar un poco, se tomará tan solo la energía cinética y la energía potencial de las moléculas (coordinaciones y/o supervisiones) que conforman el sistema (gerencia), y así

$$U^{super} = [E_{c\ int} + E_{p\ int}]^{super} \quad (11)$$

$$U_{gerencia} = U_1^{super} + U_2^{super} + U_3^{super} + \dots + U_n^{super} \quad (12)$$

$$U_{gerencia} = \sum_{i=1}^n U_i^{super} \quad (13)$$

Cada molécula (coordinaciones y/o supervisiones) tiene su energía cinética y su energía potencial propia que la caracteriza: no existen dos moléculas iguales (estaríamos incurriendo en la duplicación de funciones). Su diferencia está descrita en el manual de competencias y funciones de cada una de ellas. Estas reaccionan de forma distinta según la energía (lineamientos externos) y la materia (productos provenientes del entorno organizacional) que entran en el sistema.

### 3.4 Proceso irreversible (degradación de la energía)

Este es el típico proceso termodinámico que encontramos en el interior de nuestro sistema (gerencia). La degradación de la energía (lineamientos) y la generación de entropía son los testigos claves de esta afirmación.



Figura 5. Degradación de la energía en la gerencia como sistema termodinámico abierto  
Elaboración propia

Queriendo ser estrictos en el análisis hermenéutico de la degradación de la energía, necesitaríamos escribir otro artículo para contemplar las diferentes aristas organizacionales (nivel de madurez organizacional, planificación, gestión del cambio, liderazgo, delegación, axiología del poder, capacitación, sentido de pertenencia, comunicación, eficacia, eficiencia, procesos, sistema de calidad, responsabilidad, manejo de conflictos, estrés, etc.) que se confabulan para hacer realidad dicha degradación. Por lo pronto, con la idea de construir una hipótesis de carácter protocientífico (en espera de su verificación experimental), usando como hilo conductor la interdisciplinariedad y con bases epistemológicas proveniente de la termodinámica y las ciencias gerenciales, se esboza la siguiente formulación teórica a partir del siguiente teorema:

El nivel de pérdida (degradación) de energía total ( $de_{total}$ ) es directamente proporcional al número total de niveles jerárquicos de la pirámide (estructura organizativa) organizacional e inversamente proporcional a la suma vectorial ( $b$ ) de los componentes del conjunto finito de aristas organizacionales  $\{\vec{v}_1, \vec{v}_2, \vec{v}_3, \dots, \vec{v}_n\}$

$$a = \text{número total de niveles} - 1 \quad (14)$$

$$b = \overrightarrow{S_{total}} = \vec{v}_1 + \vec{v}_2 + \vec{v}_3 + \dots + \vec{v}_n \quad (15)$$

Esta degradación aumenta exponencialmente hasta el elemento  $a$  (los niveles inician en cero "0" (ver figura 5))

$$f_{(i)} = \left(\frac{i}{a}\right)^b = \Delta de_i \quad (16)$$

Donde:

- $f_{(i)}$  = la función que describe el flujo de degradación de la energía
- $a$  = número total de niveles jerárquicos - 1
- $b$  = es la suma vectorial de los componentes del conjunto finito de aristas organizacionales (nivel de madurez organizacional, liderazgo, comunicación, responsabilidad, manejo de conflictos, estrés, etc.). Si la suma es  $\leq 0$ ,  $b$  toma el valor 1.
- $i$  = es el nivel jerárquico en la estructura organizativa de la empresa (ver figura 5), toma los valores  $1 \leq i \leq a$
- $\Delta de_i$  = es la energía degradada del nivel  $i$

En la figura 6 se muestra el caso más pesimista ( $b=1$ ), donde las aristas organizacionales contribuyen al máximo desequilibrio del sistema (gerencia).

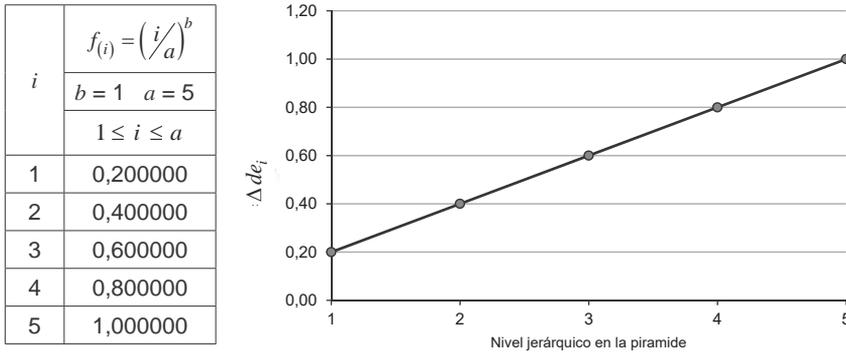


Figura 6. Gráfica de la degradación de la energía  
Elaboración propia

En este ejemplo, la semilla que inicia y cataliza la degradación es la que se muestra en la figura 7. La energía (lineamiento) inicial  $n$ , con una degradación  $\Delta de_0 = 0$ , es dividida y subdividida, de acuerdo con las aristas organizacionales ya mencionadas, en cinco niveles jerárquicos ( $6 - 1 = 5$ ), y se llega a la supervisión en forma de  $n3.3.3.3.3$ , con una degradación  $\Delta de_5 = 1,0000$  (ver figura 6).

Ahora bien, para determinar la magnitud vectorial de cada arista organizacional, se aconseja usar, por ejemplo, clima organizacional, clima psicológico, clima social, encuestas de satisfacción, etc.

En cada salto de nivel jerárquico, hay una toma de decisión en cuanto al porcentaje de participación de cada unidad organizativa adscrita a la misma unidad organizativa del nivel supervisorio inmediato superior. Como se ve en la figura 7, el nivel “gerencias general” consta de cuatro unidades organizativas. Ellas, junto con su vicepresidente, deciden el porcentaje de participación de cada una y, así, la energía  $n3$  de la vicepresidencia se subdivide en sus cuatro gerencias generales:  $n3.1$ ,  $n3.2$ ,  $n3.3$  y  $n3.4$ . Este procedimiento se repite hasta llegar al nivel “supervisiones”.



Figura 7. Degradación de la energía en la estructura jerárquica de la organización  
Elaboración propia

La toma de decisión que precede a la distribución de energía es el resultado de una hermenéutica epistémica de la energía recibida de su supervisor. Dicha hermenéutica está circunscrita por una serie de aristas (nivel de madurez organizacional, planificación, gestión del cambio, liderazgo, comunicación, responsabilidad, manejo de conflictos, estrés, etc.) que se entrecruzan y entrelazan (algunas pierden fuerza, otras se anulan y otras se refuerzan (suma vectorial), y dan como resultado final la decisión de la distribución (influenciada por intereses y deseos particulares, por la axiología del poder, el nivel cognitivo y su nivel de experiencia, junto con las diferentes aristas organizacionales).

En definitiva, la gerencia (sistema termodinámico abierto) es, de por sí, un fenómeno irreversible, donde, gracias a las aristas organizacionales, confluyen la impredecibilidad, el azar, la complejidad y el caos. Todos al entrecruzarse le dan forma, color y vida a la dinámica diaria de la gestión gerencial.

### 3.5 Entropía, estructura disipativa, caos, complejidad y azar

Entropía es un término que está estrechamente relacionado (directamente proporcional) con la degradación de la energía presente en los procesos irreversibles. De acuerdo con la termodinámica clásica, es una magnitud que mide la cantidad de energía de un sistema físico que no

puede utilizarse para realizar trabajo mecánico. Dicho en otras palabras y de manera simplista, es la cantidad de horas hombre malgastadas, sí utilizadas en labores irrelevantes, en tareas no alineadas con la misión y la visión de la empresa y, por ende, es pérdida de esfuerzos, de tiempo y de dinero.

Por otro lado, encontramos la propuesta teórica, presentada por Shannon a finales de la década de los 40 del siglo pasado. En julio de 1948, Claude Elwood Shannon publicó un artículo en la revista *Bell System Technical Journal*, bajo el título de “A Mathematical Theory of Communication” (Shannon, 1948a; 1948b), donde, con un tratamiento matemático, maneja la información (sin importar su contenido) como una variable cuantificable y alude a la comunicación como un proceso de transferencia de esta. En dicho artículo, en el punto “6. Choice, Uncertainty and Entropy” (Elección, incertidumbre y entropía), muestra una nueva interpretación del término “entropía” (número que mide la incertidumbre de un mensaje), donde este es inversamente proporcional a la veracidad de la información transmitida, es decir, la entropía es nula cuando la certeza de la información es absoluta. Este planteamiento refuerza lo señalado anteriormente en el punto “3.4 Proceso Irreversible (degradación de la energía)”.

Ahora bien, al hablar de sistemas abiertos, de procesos irreversibles, de degradación de la energía y, especialmente, al hablar de entropía, necesariamente debemos invitar al diálogo al profesor Prigogine y colocar sobre la mesa su reciente y novedosa teoría de las estructuras disipativas. Teoría que está en clara disonancia con la termodinámica clásica del pasado, donde se afirmaba que todo sistema tiende a evolucionar (irremediamente) hacia un solo fin: el equilibrio, y esto lo logra cuando alcanza una configuración de máxima entropía (máximo desorden molecular).

Prigogine es quien, de forma clara y contundente con su irreversibilidad y sus estructuras disipativas, logra reconciliar la biología y las ciencias sociales con la termodinámica. Hoy sabemos que, en el recorrido del caos progresivo, se encuentra una bifurcación que, de acuerdo con Prigogine y Stengers (2004), es el punto crítico a partir del cual se hace posible un nuevo estado. Son básicamente puntos de inestabilidad alrededor de los cuales una perturbación infinitesimal es suficiente para determinar el destino macroscópico de un sistema (esto me recuerda el efecto mariposa), es decir, es el azar de las fluctuaciones quien decide hacia qué estado se dirigirá efectivamente el sistema. Bien retor-

na al estado de equilibrio original, o bien deja de caotizarse y empieza a autoorganizarse hasta constituir una nueva estructura, la que Prigogine denominó estructura disipativa. De acuerdo con Prigogine y Stengers (2004), esta representa la asociación entre la idea de orden y la de desperdicio, y se escogió dicho nombre, a propósito, para expresar un nuevo hecho fundamental: la disipación de energía y de materia –generalmente asociada a los conceptos de pérdida y rendimiento y evolución hacia el desorden– se convierte, lejos del equilibrio, en fuente de orden; la disipación se encuentra en el origen de lo que podemos llamar los nuevos estados de la materia. De esta forma, el desorden, el caos, es visto como generador de orden y es precisamente esto, uno de los principios de las leyes del caos, que encuentra en el no-equilibrio una fuente de orden (estructura disipativa), de coherencia y de correlaciones entre sus partes. Esto nos lleva a distinguir entre los estados del sistema en los que toda iniciativa individual está condenada a la insignificancia y las zonas de bifurcación en las que un individuo, una idea o un comportamiento nuevo pueden trastornar el *statu quo*, lo que en un momento dado es una desviación insignificante con respecto a un comportamiento normal. Puede, en otras circunstancias, ser fuente de crisis y renovación (Prigogine y Stengers, 2004).

Entendiendo el orden como todo aquello que es repetición, constancia e invariabilidad, y el desorden como todo aquello que es irregularidad, aleatoriedad e imprevisibilidad, Edgar Morin (1996) nos dice que en un universo de orden puro no habría innovación, creación, evolución. No podría existir ningún ser viviente ni humano. Del mismo modo, ninguna existencia sería posible en el puro desorden, ya que no habría ningún elemento de estabilidad sobre el cual fundar organización alguna. Es natural que toda organización, como todo fenómeno físico, organizacional y, por cierto, con vida propia, tienda a degradar y a degenerarse. El fenómeno de la desintegración y de la decadencia es un fenómeno normal. Dicho de otro modo, lo normal no es que las cosas duren, como tales. Eso sería, por el contrario, inquietante y preocupante. No hay ninguna receta de equilibrio. La única manera de luchar contra la degeneración está en la regeneración permanente. Dicho de otro modo, en la aptitud del conjunto de la organización de regenerarse y reorganizarse haciendo frente a todos los procesos de desintegración (Morin, 1996). Y, así, toda organización (gerencia), como ser vivo e ininteligible, con un constante intercambio de flujo y reflujo de entropía con el entorno, cumple con todas las características de una estructura disipativa (no

mantienen relaciones lineales y, para compensar la disipación, necesitan de un aporte continuo importante de energía y/o materia desde el entorno), cuya génesis implica la asociación indisoluble del azar y la necesidad (Prigogine y Stengers, 2004), donde el orden y el desorden conviven armoniosamente dándole forma, color y textura a la organización (empresa). Estas estructuras disipativas (gerencia), entes organizativos que emergen de las entrañas del desorden organizacional, no son más que islas de un determinado orden, dentro de un mar de desorden (empresa), orden que se alimenta y mantiene a expensas de una entropía mayor del entorno (otras gerencias). Su estabilidad es controlada por el intercambio entrópico entre el entorno (empresa) y el sistema (gerencia), es decir, la gerencia se autoorganiza y mantiene su orden gracias a la entropía proveniente del entorno y, a su vez, produce entropía con la que alimenta: la entropía del entorno.

Hablamos de organización y le hemos otorgado, cual categoría taxonómica, el caos, la complejidad y el azar, términos que denotan nuestro nivel de desconocimiento sobre el fenómeno que estamos estudiando. Todo aquello que escapa de nuestro nivel cognoscitivo lo etiquetamos como algo que está dentro de las ciencias del caos o la complejidad. Incluso nos atrevemos a adjudicarle cualquier comportamiento extraño e impredecible al azar. Como si la metafísica de Aristóteles se adueñara del fenómeno y con una fuerza etérea, va tejiendo y moviendo los hilos del devenir de una realidad desconocida por nosotros, para generar uno u otro comportamiento del ser de ese ente que estamos estudiando. Lamentablemente nuestro ego, apadrinado por nuestro analfabetismo, no nos permite reconocer que el fenómeno caótico y complejo al que le adjudicamos el comodín “el azar” está reflejando una imagen formateada por nuestra ignorancia sobre el fenómeno que tenemos ante nuestros ojos. Dicho en otras palabras, el cuerpo de conocimiento que circunscribe el fenómeno, las herramientas y nuestro nivel epistémico no está lo suficientemente desarrollado como para darle una explicación científica a este.

Para concluir este humilde opúsculo, producto de una hermenéutica reflexiva, se invita a investigadores y tesisistas de posgrado a implantar experimentos interdisciplinarios que permitan contrastar empíricamente la veracidad o no de la hipótesis protocientífica aquí desarrollada. Básicamente se insta a construir un “más allá” de la milenaria cultura heredada; se invita a dejar en el pasado la histórica fragmentación del conocimiento y cultivar una nueva cultura científica que nos permita construir un nuevo piso epistemológico para dar respuestas a las exigen-

cias de la realidad del hoy. Esta una humilde propuesta es un exhorto a tomar conciencia de que no estamos manejando como es debido al actor principal de la trama. Desde hace un buen tiempo, convertimos a los seres humanos en “recursos” humanos, y los manejamos como “capital” humano, y ¿qué pasó, dónde están las neuronas, el intelecto, la cognición, los sentimientos, la inteligencia emocional, el estrés, etc.? Este mal manejo del centro de masa, del pivote de cualquier organización, del “trabajador del conocimiento” (Drucker, 2011) se hace evidente y aflora al determinar “*la degradación de energía en los niveles jerárquicos*”. Desde la formulación de la planificación estratégica y con ella la formulación de los objetivos estratégicos en la cúspide de la pirámide organizacional, hasta llegar a las tareas básicas ubicadas en la base de dicha pirámide, la energía (lineamientos, directrices, por ej.: visión, misión, objetivos, normas) se va degradando por el efecto del mal manejo de quien realmente cumple con todas las características para ser calificado como el único y real *core business*, el empleado, el trabajador del conocimiento. Sin importar qué tan bien está implantada cualquier metodología o combinación de metodologías de gestión, como gerencia por objetivos (Drucker, 1954), calidad total (Deming, 1989), control integrado de gestión (Blanco Illescas, 1970a; 1970b) y las 7s McKinsey (Waterman, Peters y Phillips, 1980), todas ellas acorazadas con un *balanced scorecard* (Kaplan y Norton, 2002), siempre encontraremos una “degradación de energía en los niveles jerárquicos”, no por errores de implementación o errores teóricos conceptuales de la herramienta o metodología de gestión, sino simplemente por la acción del ser humano, y es precisamente esto lo que trata de demostrar la degradación de energía propuesta en este manuscrito.

## REFERENCIAS

- Abbott, M., y Van Ness, H. (1991). *Termodinámica, teoría y 225 problemas resueltos*. México: McGraw-Hill.
- Blanco Illescas, F. (1970a). Control integrado de gestión (I): la pirámide de cuadros de mando. *Alta dirección*(34), 13-22. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4593511>
- Blanco Illescas, F. (1970b). Control integrado de gestión (y II): características, diseño y condiciones de un sistema eficaz. *Alta dirección*(36), 11-20. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4593547>

- Brunet, L. (1987). *El clima de trabajo en las organizaciones Definición, diagnóstico y consecuencias*. (L. Paéz de Villalpando, Trad.) México: Trillas.
- Cazau, P. (s. f.). *La Teoría del Caos*. San Salvador, El Salvador: Universidad Centroamericana “José Simeón Cañas” (UCA). Recuperado de <http://www.uca.edu.sv/facultad/chn/c1170/Teoria%20del%20caos.pdf>
- Çengel, Y., y Boles, M. (2011). *Termodinámica* (7.<sup>a</sup> ed.). Nueva York: McGraw-Hill.
- Deming, W. E. (1989). *Calidad, productividad y competitividad. La salida de la crisis*. (J. N. Medina, & M. Gozalbes Ballester, Trads.) Madrid: Díaz de Santos.
- Drucker, P. F. (1954). *The practice of Management*. Nueva York: Harper & Row.
- Drucker, P. F. (2011). *Management: Tasks, Responsibilities, Practices*. Nueva York: Roudedge.
- Faires, V., y Simmang, C. (1983). *Termodinámica* (6.<sup>a</sup> ed.). (J. C. Escobar Hernández, & M. D. Garcia Diaz, Trads.) México: Unión Tipográfica Editorial Hispano Americana, S.A.
- Gellerman, S. W. (1960). *People, Problem and Profits*. Nueva York: McGraw-Hill.
- Gómez-Acebo, T. (2009). *Termodinámica. Notas de clase (Material docente)*. Pamplona: Tecnun Escuela de Ingenieros de la Universidad de Navarra. Recuperado de <http://dadun.unav.edu/handle/10171/5185>
- James, L. A., y James, L. R. (1989). Integrating Work Environment Perceptions: Explorations into the Measurement of Meaning. *Journal of Applied Psychology*, 74(5), 739-751. doi:<http://dx.doi.org/10.1037/0021-9010.74.5.739>
- James, L. R., y Jones, A. P. (1974). Organizational climate: A review of theory and research. *Psychological Bulletin*, 81(12), 1096-1112. doi:<http://dx.doi.org/10.1037/h0037511>
- Jaramillo Salgado, O. A. (2008). *Notas del curso Termodinámica para Ingeniería*. Temixco, Morelos: Centro de Investigación en

- Energía. Departamento de Sistemas Energéticos. Coordinación de Concentración Solar. Universidad Nacional Autónoma de México. Recuperado de <http://www.cie.unam.mx/~ojs/pub/Termodinamica/Termo.pdf>
- Kaplan, R. S., y Norton, D. P. (2002). *El cuadro de mando integral: The Balanced Scorecard* (2a ed.). (A. Santapau, Trad.) Barcelona: Gestión 2000 - Grupo Planeta.
- Levine, I. (2004). *Fisicoquímica* (5.ª ed.). Madrid: McGraw-Hill.
- Locke, E. A. (1976). The nature and causes of job satisfaction. En M. D. Dunnette, y L. M. Hough, *Handbook of industrial and organizational psychology* (págs. 1319-1328). Palo Alto, California, Estados Unidos: Consulting Psychologists Press.
- Mayo, E. (1975). *The Social Problems of an Industrial Civilization* (5.ª reimpresión de la primera edición de 1949 ed.). Londres: Routledge & Kegan Paul.
- McGlashan, M. L. (1969). *Manual of symbols and terminology for physicochemical quantities and units*. Londres: Butterworths.
- Medina Domínguez, A., y Ovejero Sánchez, J. (2010/11). *Tema 8. Termodinámica*. Salamanca: Departamento de Física Aplicada. ETSII de Béjar. Universidad de Salamanca. Recuperado de [http://ocw.usal.es/enseñanzas-tecnicas/fisica-i/contenidos/temas\\_por\\_separado/8\\_ap\\_termo1011.pdf](http://ocw.usal.es/enseñanzas-tecnicas/fisica-i/contenidos/temas_por_separado/8_ap_termo1011.pdf)
- Morin, E. (1996). *Introducción al pensamiento complejo*. (M. Pakman, Trad.) Barcelona: Gedisa.
- Olaz Capitán, Á., y Ortiz García, P. (2014). El clima laboral en la empresa familiar: Un estudio empírico. *Lan harremanak: Revista de relaciones laborales*(30), 94-119. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5029806>
- Pastor, J., y García-Izquierdo, L. (2007). Complejidad y psicología social de las organizaciones. *Psicothema*, 19(2), 212-217. Recuperado de <http://www.psicothema.com/psicothema.asp?id=3350>
- Prigogine, I., y Stengers, I. (2004). *La nueva alianza. Metamorfosis de la ciencia*. (M. C. Martín Sanz, Trad.) Madrid: Alianza Editorial.
- Rodríguez, J. A. (2009). *Introducción a la termodinámica. Con algunas aplicaciones de ingeniería*. Buenos Aires: Universidad Tecnológica

- Nacional. Recuperado de <http://atlas.umss.edu.bo:8080/xmlui/handle/123456789/756>
- Rozo Gauta, J. (1999). La inter-trans-multi-disciplinariedad: Una alternativa al pensamiento fragmentado y a la enseñanza dictatorial. *Hojas Universitarias. Universidad Central*(47), 11-22. Recuperado de <https://aprendeenlinea.udea.edu.co/revistas/index.php/unip/article/viewFile/13162>
- Schneider, B. (1975). Organizational climates: An essay. *Personnel Psychology*, 28(4), 447-479. doi:<https://doi.org/10.1111/j.1744-6570.1975.tb01386.x>
- Sears, F. (1976). *Termodinámica*. Barcelona: Reverté.
- Shannon, C. (1948a). A Mathematical Theory of Communication. *Bell System Technical Journal*, 27(3), 379-423. doi:10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x
- Shannon, C. (1948b). A Mathematical Theory of Communication. *Bell System Technical Journal*, 27(4), 623-656. doi:10.1002/j.1538-7305.1948.tb00917.x
- Solbes, J., y Tarín, F. (2008). Generalizando el concepto de energía y su conservación. *Didáctica de las Ciencias Experimentales y Sociales*(22), 155-180. Recuperado de <https://ojs.uv.es/index.php/dces/article/view/2415>
- Teja Gutiérrez, R., Trueba Espinosa, A., López Lira, N., y Aguilar, R. (2017). El análisis de redes sociales como una posible herramienta teórica y metodológica para el estudio del comportamiento organizacional. *Rvista del Congreso Ibero-Americano<s de Investigación Cualitativa (CIAIQ)*, 3, 250-259. Recuperado el 15 de May de 2017, de <http://www.proceedings.ciaiq.org/index.php/ciaiq2017/article/view/1162/1127>
- Waterman, R. H., Peters, T. J., y Phillips, J. R. (1980). Structure is not organization. (I. U. Kelley School of Business, Ed.) *Business Horizons*, 23(3), 14-26. doi:[https://doi.org/10.1016/0007-6813\(80\)90027-0](https://doi.org/10.1016/0007-6813(80)90027-0)



# Efecto de la inversión pública en la infraestructura vial sobre el crecimiento de la economía peruana entre los años 2000-2016

Carlos Arturo Palacios Tovar\*  
Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Recibido: 11 de abril del 2018 / Aprobado: 23 de mayo del 2018

doi: 10.26439/ing.ind2018.n036.2454

**RESUMEN:** En la presente investigación, se apreciará cómo el efecto de la inversión pública en infraestructura vial influye en el crecimiento del PBI en el Perú durante el periodo 2000-2016; asimismo, se determinará cuál es el elemento generador de competitividad entre las regiones del país.

*Palabras clave: desarrollo económico / inversiones públicas / gasto público / producto bruto interno*

## The effect of public investment in road infrastructure on the Peruvian economic growth between the years 2000 and 2016

**ABSTRACT:** The present research will show how public investment in road infrastructure influenced the gross domestic product (GDP) growth in Peru between the years 2000 and 2016. Likewise, it will determine which element generates competitiveness among the regions of the country.

*Keywords: economic development / public investments / public expenditure / gross domestic product*

---

\* Correo electrónico: cpalaciostovar@gmail.com

## 1. INTRODUCCIÓN

Durante la ejecución del trabajo de investigación, se comenzó analizando la problemática vial y su incidencia en el crecimiento económico del país en el periodo 2000-2016, y se evidenció que hubo un impacto positivo en la productividad de los diversos factores de manera eficiente.

En efecto, la existencia de más y mejor infraestructura, vinculada a la prestación de servicios de forma adecuada se traducirá necesariamente en una disminución de costos para las empresas, y se logrará por ello mejorar su productividad y por lo tanto hacerse extensivo en la competitividad del país (aumento del producto bruto interno), lo que va a estar relacionado directamente con el fomento de atraer nuevas inversiones a los diversos sectores productores del país.

Por ello la importancia del estudio de la inversión pública en infraestructura vial y cómo ella viene contribuyendo significativamente al crecimiento de la economía peruana en los diversos sectores productivos, los cuales determinan desde ya extensivamente una relación directamente positiva entre la inversión pública y el crecimiento del producto bruto interno del país.

## 2. MARCO TEÓRICO

La provisión deficiente de los servicios de infraestructura vial es uno de los aspectos más importantes de las políticas de desarrollo, especialmente en aquellos países que han orientado su crecimiento hacia el exterior. Para la gran mayoría de los especialistas, la ineficiencia de los servicios de infraestructura constituye un obstáculo de primer orden para la implementación eficaz de políticas de desarrollo y la obtención de tasas de crecimiento económico que superen los promedios internacionales. Por diversas razones de inclusión, los países requieren ampliar y modernizar su infraestructura básica de acuerdo con estándares tecnológicos internacionales, lograr niveles máximos de cobertura del territorio nacional y satisfacer con eficacia las necesidades de servicios de infraestructura de los agentes económicos y las personas.

Por otro lado, la adecuada disponibilidad de obras de infraestructura, sobre todo en el aspecto vial, así como la prestación eficiente de servicios generales, contribuirán a que un país o una región pueda desarrollar ventajas competitivas y alcanzar un mayor grado de especialización productiva. Asimismo, las redes de infraestructura también constituyen

un elemento central de la integración del sistema económico y territorial de un país, y hacen posible las transacciones dentro de un espacio geográfico económico determinado y en el exterior. Por tal razón, tales redes constituyen un elemento vertebrador de la estructura económica de los países y de sus mercados, así como de los mecanismos concretos de articulación de las economías nacionales con la economía mundial.

Según la evidencia internacional, la infraestructura de servicios públicos constituye el soporte de toda actividad económica. De acuerdo con el Banco Mundial (1994), las tablas de insumo-producto de diversos países en vías de desarrollo muestran que, por ejemplo, la infraestructura de telecomunicaciones y de energía eléctrica es empleada en los procesos de producción de casi todos los sectores y que el transporte es un insumo esencial para la comercialización de los productos. El sector privado en estos países exige servicios de infraestructura vial no solo para su consumo directo, sino también para aumentar su productividad mediante la reducción del esfuerzo y del tiempo que son necesarios para la producción y para la distribución de sus bienes y servicios dentro del circuito económico.

Por tal razón, la existencia de infraestructura vial en una economía genera una serie de externalidades para el desarrollo de las actividades privadas, dado que se constituye en un conjunto de activo público que generalmente afecta las decisiones de producción y de consumo de las empresas y de los hogares sin que medien para ello mecanismos de mercado. Por ejemplo, los negocios privados requieren de una red de carreteras y caminos en buen estado para desarrollarse satisfactoriamente. Las actividades privadas no se llevarían a cabo adecuadamente si es que la infraestructura vial no fuera provista, ya sea por el sector público y/o por el sector privado de manera eficiente, lo que evita el desperdicio de los recursos escasos.

En teoría, el incremento de la capacidad productiva potencial de una economía puede ocurrir a través del suministro de una mayor cantidad de infraestructura vial, lo que provoca que la estructura de costos de las empresas se vean afectados a consecuencia de las externalidades generadas por la aglomeración y la concentración de la infraestructura existente en zonas donde la demanda efectiva por servicios de transporte terrestre es importante (Albala-Bertrand y Mamatzakis, 2001; Fujita y Krugman, 1999). Es así que cuando una empresa privada utiliza la infraestructura vial, la productividad de dicha forma crece porque esta combinación provoca la reducción de sus costos unitarios.

Por esta razón, la expansión de la infraestructura vial puede elevar el rendimiento interno de los proyectos que las empresas privadas llevan a cabo, lo que indudablemente incrementa la rentabilidad de las inversiones del sector privado (Reinikka y Svensson, 1999). Esta situación genera mayores incentivos para que el sector privado realice inversiones, lo que llevará a un incremento en el crecimiento económico.

Por otro lado, puede existir un vínculo positivo entre la inversión en infraestructura vial y el crecimiento debido a que la expansión de la infraestructura puede estimular la inversión privada en capital, sea nacional o extranjera, al generar las condiciones apropiadas de mercado para el desarrollo de los negocios y de las empresas privadas en un país. De acuerdo con Vásquez (2003), existen principalmente dos canales por los que se establecen vínculos entre el crecimiento y la infraestructura.

- *Canal 1:* La expansión de la infraestructura vial genera aumentos en la capacidad productiva potencial de una economía.
- *Canal 2:* El incremento de la infraestructura vial genera cambios favorables en los precios relativos, ya que genera condiciones para el funcionamiento de los mercados de manera más eficiente.

Sin embargo, si tanto el sector privado como el sector que provee la infraestructura vial (que puede estar bajo la administración estatal o bajo régimen privado, vía una concesión administrativa o una privatización) compiten por un mismo conjunto de recursos, un incremento en el gasto en infraestructura podría generar un efecto negativo en el corto o en el largo plazo vía la reducción de los niveles de inversión privada al provocar un efecto conocido como *crowding out* (es decir, la inversión en infraestructura agota los recursos disponibles y desplaza a la inversión en capital privado). Por el contrario, si la competencia por el conjunto de recursos no es intensiva, entonces el efecto *crowding in* (es decir, existen incentivos para la inversión privada ante las mejoras en eficiencia) de la expansión de la infraestructura vial es superior al efecto *crowding out*.

La posibilidad de ocurrencia de estos efectos sugiere la idea de que la relación entre la expansión de la infraestructura vial y el crecimiento es una de tipo no lineal. Ello implica que, para determinado valor del umbral de la razón capital en infraestructura y capital privado, la relación entre infraestructura y crecimiento se revierte. De esta forma, para niveles bajos de dotación de infraestructura vial en relación con el capital privado, la relación entre el incremento de la infraestructura vial y el crecimiento es positivo (efecto *crowding in*), mientras que, para nive-

les de infraestructura en relación con el capital privado por encima del umbral, la relación se revierte a un tipo negativo (efecto *crowding out*).

La evidencia internacional muestra que existe una fuerte asociación entre la disponibilidad de cierta infraestructura (como las instalaciones de telecomunicaciones, la capacidad de generación eléctrica, las carreteras pavimentadas, los ferrocarriles, etc.) y el producto bruto interno per cápita en los países en desarrollo. Datos correspondientes a 1990 indican que, mientras que el capital total de infraestructura aumenta en 1 % con cada incremento de 1 % del PBI per cápita, el acceso de las familias y de las empresas a las carreteras pavimentadas, a la energía eléctrica y a las telecomunicaciones aumentan en 0,8 %, 1,5 % y 1,7 %, respectivamente (Banco Mundial, 1994). Entonces, puede decirse que las inversiones en infraestructura vial en los países en desarrollo son necesarias para generar aumentos sostenibles del crecimiento económico a través de la expansión de la capacidad productiva de un país, la mejora de la eficiencia económica y la transparencia de los precios relativos.

Barro (1990), basado en el trabajo de Romer (1986), utiliza un modelo de crecimiento endógeno para sostener que el gasto público en infraestructura tiene un efecto causal positivo directo sobre el crecimiento económico y el bienestar. Luego de estas investigaciones iniciales, numerosos estudios, con información de países a nivel nacional e internacional, han encontrado evidencia sobre lo importante que es la infraestructura para estimular el crecimiento económico. Por ejemplo, al utilizar datos de Servicios Cruzados, Eastert y Rebelo (1993) y Yamarik (2000), encontraron un efecto positivo de la inversión en transporte sobre el crecimiento. Canning Fay y Perotti (1994) hallaron un impacto positivo de la infraestructura telefónica sobre el crecimiento económico para diversos países de Latinoamérica, y Sánchez Robles (1998) encontró efectos positivos significativos de la infraestructura de generación eléctrica y de teléfonos sobre el crecimiento.

Canning (1999), mediante el uso de datos de panel para varios países, encontró que existen indicios para sostener que la infraestructura tiene repercusiones considerables sobre el crecimiento. Bernand y García (1997) realizaron una evaluación de los impactos de la infraestructura sobre el crecimiento económico para el caso de algunos países desarrollados y del tercer mundo.

Mediante un simple modelo de crecimiento endógeno, los autores hallaron que la infraestructura tiene repercusiones considerables sobre

el crecimiento siempre y cuando existan procesos de financiamiento adecuado para tales inversiones. En contraste, Holtz-Eaking y Schwartz (1994), y Garcia-Mila, McGuire y Porter (1996) sugieren que hay poca evidencia de un efecto significativo de la infraestructura sobre el crecimiento del producto. Para llevar a cabo su estado, los autores emplearon datos de panel a nivel de Estados Federales para el caso estadounidense y un modelo econométrico de datos de panel que incorporan efectos fijos.

Para el caso de Latinoamérica, existen aún pocos estudios a nivel agregado relacionados con el tema de infraestructura y de crecimiento. Puede mencionarse un estado realizado por Albaba-Bertrand y Mamatzakis (2001) para el caso chileno que evalúa el efecto de la infraestructura de servicios públicos sobre la estructura de costos y la productividad de la economía chilena antes y después de las reformas neoliberales. A través de una estimación de una función de costos translogarítmica, ambos encontraron que la infraestructura ha provocado incrementos en la productividad significativa durante el periodo ex post a las reformas.

En el caso peruano, Uranga y Aparicio (2012) resaltan en su estudio la importancia de la infraestructura para el crecimiento económico al efectuar una estimación econométrica a fin de recoger la relación entre ambas variables en el caso peruano, y utilizar un panel de datos con información para las 24 regiones del Perú correspondiente al periodo 1980-2009 bajo distintos estimadores. Los resultados econométricos obtenidos confirman que la infraestructura de servicios públicos (carreteras, electricidad y telecomunicaciones) resulta relevantes para las diferencias transitorias en el producto regional, de acuerdo con las teorías neoclásicas de crecimiento exógeno. Por otra parte, se encuentra evidencia que respalda la presencia de diferencias significativas en las repercusiones de las infraestructuras en el producto per cápita de cada región.

### 3. METODOLOGÍA

El presente artículo corresponde a una investigación aplicada que junta los conocimientos sobre teoría económica e inversiones públicas.

La investigación aplicada, llamada también constructiva o utilitaria, se caracteriza por su interés en la aplicación de los conocimientos teóricos a determinada situación concreta y las consecuencias prácticas que de ella se deriven. Busca conocer para hacer, para actuar para construir, para modificar: le preocupa la aplicación inmediata sobre una

realidad circunstancial antes que el desarrollo de un conocimiento de valor universal.

La unidad de análisis en el presente estudio es un dato anual del país y la muestra del periodo 2000-2016 con datos anuales por departamentos.

### 3.1 Técnicas de recolección de datos

Se utilizará información secundaria proporcionada por el Ministerio de Economía y Finanzas, Transparencia Económica, el Instituto Nacional de Estadística e Informática y documentos relacionados con el tema de investigación.

Los datos fueron recolectados de las bases de:

- Instituto Nacional de Estadística e Informática del Perú.
- Banco Central de Reserva del Perú.
- Empresa Cuanto.
- Informes Gubernamentales.
- Investigaciones relacionadas con el tema.

## 4. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LA INFORMACIÓN

La metodología de análisis e investigación

El método a utilizarse en la presente investigación será el MÉTODO CIENTÍFICO con los procedimientos DEDUCTIVO E INDUCTIVO y el método histórico. El primero consiste en analizar de manera general la inversión pública en infraestructura vial. Asimismo, este procedimiento nos permite partir de un contexto general a algo particular y luego centrarnos en el tema de los impactos del crecimiento económico sobre la inversión pública en infraestructura. El segundo procedimiento nos permite arribar a conclusiones generales al partir de hechos particulares. En esta última parte entra el método histórico, porque el procedimiento es esencialmente inductivo.

Para nuestro estudio, utilizaremos un modelo econométrico, el cual se trabajó en el Microsoft Excel para la base de datos, y el programa Eviews-6 para el modelo econométrico propiamente.

Modelo por establecerse:

$$TC = \beta_0 + \beta_1.IPT + \beta_2.GPT + \beta_3.PES + \beta_4.PAE + e$$

Dónde:

TC: Tasa de crecimiento económico.

IPT: Inversión pública en transportes.

GPT: Gasto público total.

PES: Población con educación superior.

PAE: Población adecuadamente empleada.

#### 4. RESULTADOS

De los resultados y las pruebas de hipótesis, podemos afirmar que las variables que aportan a la explicación de la variable crecimiento económico.

##### **Para la variable GPT: gasto público total**

Se pudo probar el grado de influencia que tiene la variable independiente (gasto público total) sobre la variable dependiente (tasa de crecimiento económico). Por lo tanto, esta variable aporta significativamente al modelo con un nivel de confianza del 95 %.

##### **Para la variable IPT: inversión pública en transportes**

Se pudo probar el grado de influencia que tiene la variable independiente (inversión pública en transportes) sobre la variable dependiente (tasa de crecimiento económico). Por lo tanto, esta variable aporta significativamente al modelo con un nivel de confianza del 95 %.

##### **Para la variable PAE: población adecuadamente empleada**

Se pudo probar el grado de influencia que tiene la variable independiente (población adecuadamente empleada) sobre la variable dependiente (tasa de crecimiento económico). Por lo tanto, esta variable aporta significativamente al modelo con un nivel de confianza del 95 %.

##### **Para la variable PES: población con educación superior**

No se pudo probar el grado de influencia que tiene la variable independiente (población con educación superior), sobre la variable dependiente (tasa de crecimiento económico). Por lo tanto, esta variable no aporta significativamente al modelo con un nivel de confianza del 95 %.

Tomando en cuenta los valores beta ( $\beta_i$ ) que tiene el modelo de regresión final estimada, se presenta de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \text{TC} = & -20.32845 - 0.698905 \text{ TC} (-1) + 8.17\text{E-}06 \text{ GPT} + 6.36\text{E-}13 \text{ GPT}^2 \\ & - 7.97\text{E-}05 \text{ IPT} + 7.88\text{E-}11 \text{ IPT}^2 + 6.87\text{E-}08 \text{ PAE} + 2.08\text{E-}12 \text{ PAE}^2 + 1.07\text{E-}07 \text{ PES} \\ & - 3.38\text{E-}16 \text{ PES}^2 \end{aligned}$$

Tabla 1  
*Prueba de residuales del modelo*

obs	Actual	Fitted	Residual	Residual Plot
2000	0,27	0,1027452	0.1672547	.   * .
2001	0,06	0,267166	-0.2071669	. *   .
2002	0,55	0,691852	-0.1418520	. *   .
2003	0,42	0,599530	-0.1795308	. *   .
2004	0,5	0,602897	-0.1028973	. *   .
2005	0,63	0,5618567	0.0681432	.   * .
2006	0,75	0,5824081	0.1675918	.   * .
2007	0,85	0,6360614	0.2139385	.   * .
2008	0,91	0,6967938	0.2132061	.   * .
2009	0,1	0,5721096	-0.4721096	* .   .
2010	0,85	0,5017930	0.3482069	.   . *
2011	0,65	0,4721531	0.1778468	.   * .
2012	0,6	0,5900705	0.0099294	. * .
2013	0,58	0,5827785	-0.0027785	. * .
2014	0,24	0,4204846	-0.1804846	. *   .
2015	0,33	0,3731340	-0.0431340	. *   .

Elaboración propia

Mediante la prueba de residuales, el modelo no presenta rezagos y se puede afirmar que el modelo es estable para predecir el comportamiento de la variable tasa de crecimiento.

Autocorrelation		Partial Correlation		AC	PAC	Q-Stat	Prob	
				1	-0,100	-0,100	0,2021	0,653
				2	-0,081	-0,092	0,3423	0,843
				3	-0,091	-0,111	0,5323	0,912
				4	-0,177	-0,214	1,3130	0,859
				5	0,113	0,047	1,6550	0,895
				6	-0,023	-0,057	1,6700	0,947
				7	-0,079	-0,123	1,8706	0,967
				8	0,006	-0,051	1,8717	0,985
				9	-0,306	-0,346	5,6615	0,773
				10	0,045	-0,124	5,7546	0,835
				11	0,093	-0,058	6,2232	0,858
				12	0,059	-0,051	6,4459	0,892

Figura 1. Prueba de correlograma de residuales del modelo  
Elaboración propia

Mediante la prueba de residuales, el modelo no presenta rezagos y se puede afirmar que el modelo es estable para predecir el comportamiento de la variable tasa de crecimiento.

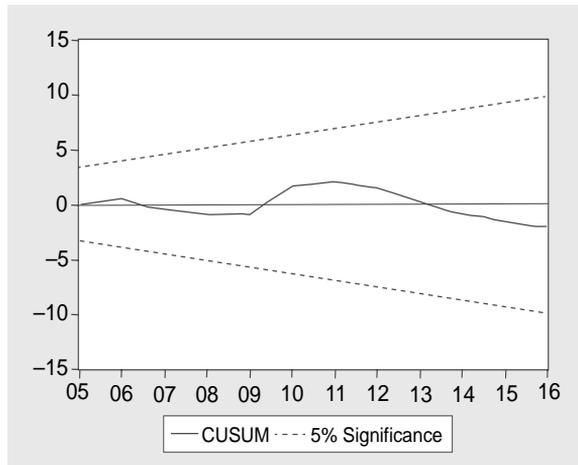


Figura 2. Prueba de estabilidad del modelo Cusum  
Elaboración propia

Mediante la prueba de Cusum, podemos afirmar que el modelo es estable para predecir el comportamiento de la variable tasa de crecimiento.

## 5. CONCLUSIONES

Se puede afirmar que en la presente investigación se ha podido obtener lo siguiente:

1. Estadísticamente se ha podido probar que la inversión pública en infraestructura vial ha contribuido positiva y significativamente sobre el crecimiento de la economía peruana.
2. El sistema de transporte vial es un generador inmediato de movimiento económico, lo que origina casi siempre índices positivos de crecimiento económico sostenido en el país, con lo que se reflejan mejoras directas en la reducción de tiempos de transporte para el trabajo, comercio cualquiera fuese su naturaleza, al reducir los costos de los productos que se comercializan y abrir además nuevas opciones de mercado, con el objeto de integrar exitosamente al Perú en la economía global del siglo XXI.
3. Estadísticamente, se ha podido probar además que el crecimiento de la infraestructura vial ha contribuido positiva y significativamente sobre la actividad económica de los sectores productivos.
4. Nuestro país tiene mucho por construir en materia de carreteras, siquiera para intentar asemejarse a Brasil, cuya densidad vial es 66,4 % mayor que la de nuestro país, o para contar con el porcentaje de carreteras asfaltadas respecto del total de kilómetros de carreteras de Chile, que es 2,6 veces mayor que la de nuestro país.
5. Estadísticamente, se ha podido probar que la infraestructura vial ha contribuido positiva y significativamente en el proceso de crecimiento regional en el Perú.
6. Estadísticamente, se ha podido probar que la infraestructura vial es un elemento generador de igualdad económica a nivel regional que contribuye positiva y significativamente.
7. Es importante converger hacia una agenda que comprenda un conjunto de políticas integrales y articuladas que apunten en una misma dirección y que se constituyan en eslabones de un crecimiento sostenido al disponer la agenda de proyectos junto con los cronogramas de ejecución a mediano y largo plazo, responsables de la ejecución y el monitoreo permanente.
8. El crecimiento económico se da al favorecer la incorporación de nuevos sectores públicos al incrementar y multiplicar un crecimiento y un desarrollo económico sostenibles, debido a la inversión pública en infraestructura vial. Por lo tanto, extensivamente se considera que

existe una relación directa entre inversión pública y crecimiento del producto bruto interno.

9. El déficit de infraestructura vial puede ser visto como una oportunidad estratégica para la inversión privada al contar con la debida estabilidad jurídica en el marco de la normatividad vial vigente.

## 6. RECOMENDACIONES

1. Al probar que existe una relación directa entre inversión, competitividad y crecimiento del producto bruto interno en el país, se recomienda probarlo en las regiones del país, con mayores niveles de inversión, para medir si realmente son los más competitivos y, por ello, tienen tendencias de mayores niveles de inversión, lo cual consecuentemente se espera que genere un mayor crecimiento económico.
2. Asimismo, se recomienda probarlo en las regiones del país, con menores niveles de inversión, para medir si realmente son los menos competitivos y, por ello, tienen tendencias de menores niveles de inversión, lo cual consecuentemente se esperará que genere un menor crecimiento económico en la región dada.
3. Es de importancia estratégica la integración regional y territorial de nuestra economía, ya que se ha mencionado que las redes viales son importantes para unir las zonas productivas con los mercados locales, regionales, nacionales e internacionales, además de una red vial adecuada que permitirá fomentar la industria sin chimenea en el país.
4. Reformular el canon minero de tal modo que se redistribuya homogéneamente en todo el país, y no en exceso en pueblos que derrocharon indebidamente en proyectos innecesarios dichos recursos financieros.
5. Se recomendaría que se realice un estudio similar para encontrar un efecto positivo de la población con estudios superiores y la población adecuadamente ocupada sobre el crecimiento económico de una región, en un periodo largo a periodos mayores a 20 años de estudio.
6. La gestión de conservación de carreteras de la red vial nacional deberá reimpulsarse con la previsión de llegar a niveles altos de deterioro que generen elevados costos de rehabilitación y/o reconstrucción.
7. Los proyectos viales deben ser considerados de interés nacional, y su aprobación debe ser acelerada a fin de dinamizar el desarrollo territorial de los corredores económicos.
8. La inversión pública en el desarrollo vial del Perú generará un impacto de costo-beneficio favorable a la población peruana.

## REFERENCIAS

- Banco Central de Reserva del Perú (2011). *Memoria 2010*. Lima: Autor.
- Banco Mundial. (2011). *Perspectivas de la Economía Mundial*.
- Desarrollo económico. (2017). En *Enciclopedia de características* (revisado en el 2017). Recuperado de <http://www.caracteristicas.co/desarrollo-economico/#ixzz4duEV4iiV>Desde
- Esfahani, H. S. y Ramírez, M. T. (2003). Institutions, Infrastructure, And Economic Growth. *Journal of development Economics*, 35(1), 443-477.
- Garay. C. (2012). *Crecimiento Con Inclusión-Ruta Al Primer Mundo: Cuatro Desafíos Del Quinquenio 2011-2016*. Lima: Instituto Economía Desarrollo Empresarial de la Cámara de Comercio de Lima.
- Hernández, J. (2010). *Inversión pública y crecimiento económico: Hacia una nueva perspectiva de la función del gobierno* (tesis doctoral). Universidad Autónoma Metropolitana de México.
- Instituto Peruano de Economía [IPE]. (2017). Lima. Información Económica. Indicador Compuesto de Actividad Económica ICAE Consolidado 2016.
- Loayza N. (2008). Causas y Consecuencias de la Informalidad en el Perú. *Revista de Estudios Económicos. Estudios Económicos. BCRP*, (15), 45-64.
- Lucas R. (1988). In The Mechanics Of Economic Development Government Spending in a Simple Model Endogenous Growth. *The Journal Of Political Economy*, 98(5), 103-125.
- Martínez, M. (2010). *Ciencia y arte en la Metodología Cualitativa*. Caracas: Editorial Trillas.
- Ramírez, T. (2007). *Cómo hacer un Proyecto de Investigación*. Caracas: Editorial Panapo.
- Rozas, P. y Sánchez, R. (2004). Desarrollo de Infraestructura y Crecimiento Económico: Revisión Conceptual. *Recursos Naturales e Infraestructura. CEPAL*. Santiago: Editorial Naciones Unidas.
- Servén, L. y Calderon, C. (2004). *The Effects Of Infrastructure Development on Growth and Income Distribution Dataset*.

Recuperado de <https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/14136/WPS3400.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Zegarra, L. F. (2010). Competitividad Infraestructura y Desarrollo Regional. En *Opciones de Política Económica en el Perú: 2011-2015*. Lima: Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú.

Proyectos empresariales  
industriales

---

Industrial Business Projects



# Factores para el procesamiento de la manzanilla común en la industria peruana de infusiones

Elio Luis Aliaga Paredes\*, José Antonio Acevedo Jara\*  
Universidad de Lima

Recibido: 22 de marzo del 2018 / Aprobado: 4 de julio del 2018

doi: 10.26439/ing.ind2018.n036.2455

**RESUMEN:** El presente artículo sintetiza los principales factores para la producción de manzanilla común en bolsas filtrantes, tales como mercado, materia prima, industria, regulaciones y proceso de producción. Dentro de este último, también se detallan otros factores de acuerdo con la realidad peruana, referidos a equipamiento, evaluación energética, normas sanitarias, especificaciones técnicas del producto, sistema de mantenimiento, costo de mano de obra y materiales, áreas requeridas y seguridad y salud en el trabajo.

*Palabras clave: manzanilla / té filtrante / alimentos deshidratados / gas natural*

## Factors for true chamomile processing in the tea industry

**ABSTRACT:** This article summarizes the main factors for the production of true chamomile tea bags: market, raw material, industry, regulations and production process. In addition, other factors are considered in the production process according to the reality of life in Peru: equipment, energy evaluation, health standards, technical specifications of the product, maintenance system, labor and materials cost, required areas, and occupational health and safety.

*Keywords: chamomile / tea bag / dried food / natural gas*

---

\* Correos electrónicos: aliaga.elio@gmail.com, joseantonioacevedojara@gmail.com

## 1. INTRODUCCIÓN

Según Euromonitor (2018), los consumidores de infusiones en el Perú buscan nuevos productos que impacten en su salud de manera positiva. También estima que entre el 2017 y el 2022 el volumen de ventas de la categoría té frutal/té herbal crecerá 4,20 %, y superará a las categorías de té negro (2,10 %) y té verde (3,90 %), como muestra la figura 1. La denominación “té herbal” incluye a la manzanilla común, la segunda infusión filtrante más vendida en el Perú, superada solo por el té negro, según observaciones de campo en supermercados de Lima Metropolitana. Asimismo, de acuerdo con estudios comparativos en personas, esta planta tiene propiedades como antiinflamatorio, antiespasmódico y cicatrizante de heridas (Franke y Schilcher, 2005), a diferencia del té, cuyo consumo inhibiría la absorción de hierro (Zijp, Korver y Tijburg, 2010).

Por otro lado, las infusiones filtrantes poseen el nivel de penetración más alto en la categoría de bebidas (Ipsos Perú, 2015), por encima del agua sin gas<sup>1</sup>, café instantáneo, gaseosa regular, café para pasar, jugos envasados, bebidas rehidratantes y refrescos en sobre. Además, su frecuencia de consumo, en un intervalo diario o varias veces por semana, llega a un 74 %, por encima del café instantáneo (45 %) y el agua sin gas (47 %).

De igual modo, alrededor del 70 % de ventas de infusiones se concentra en Lima Metropolitana (CCR, 2003) y cerca del 73 % se comercializa en presentación de filtrantes (Euromonitor, 2017). Es más, al cerrar el año 2017, se vendieron entre todas las categorías de infusiones unas 2409,50 toneladas, de las cuales 2391,50 t fueron a través de canales *off-trade*<sup>2</sup> y 18 t mediante canales *on-trade* (Euromonitor, 2018).

Por último, el uso de bolsas filtrantes presenta ventajas al preparar una infusión, ya que el producto está dosificado para rendir una taza con una capacidad aproximada de 250 ml, además de impedir el consumo de partes de la planta y facilitar su desecho después de tomar la infusión.

---

1 En contenido de más de 1 litro o en paquete.

2 Canal de ventas en el que se consume en un lugar diferente a donde se compra, como supermercados y bodegas. Opuesto a *on-trade*, como restaurantes o establecimiento de autoservicio.

## 1.1 Breve historia de las infusiones filtrantes

Según Saberi (2010), una leyenda popular china relata que hace aproximadamente 2700 años a.C. el emperador chino Shen Nong dispuso que toda agua para consumo humano debía ser hervida como medida de salubridad. Un día este monarca, estando al pie de una planta de té, observó caer sus hojas dentro de agua hirviendo y percibió el aroma que expedía; luego probó esta infusión y le agradó. En adelante, su consumo se extendió rápidamente; primero por Asia, luego por Oriente Medio, después por África, más tarde pasó a Europa (especialmente a Inglaterra) y, finalmente, a América. La presentación del producto sufrió un cambio en 1908, cuando Thomas Sullivan, comerciante estadounidense de té y café, envió muestras de productos dentro de bolsas de seda a sus clientes, quienes descubrieron la facilidad de preparar infusiones al sumergir directamente dichas bolsas en agua hirviendo. A partir de entonces, esta forma de preparar infusiones prevaleció y se atribuyó su descubrimiento a Sullivan, aunque ya en 1903 las estadounidenses Roberta C. Lawson y Mary Molaren habían patentado una bolsa de tela para preparar infusiones. En 1920, el comerciante inglés Thomas Lipton fue el primero en utilizar la publicidad en las etiquetas de bolsas filtrantes. En los siguientes años, estas bolsas sufrieron cambios en su material y diseño, como se ve en la figura 2. En 1930, el estadounidense William Hermanson patentó la bolsa filtrante sellada a calor y, en 1953, el inglés Joseph Tetley comenzó la producción en serie de bolsas filtrantes.

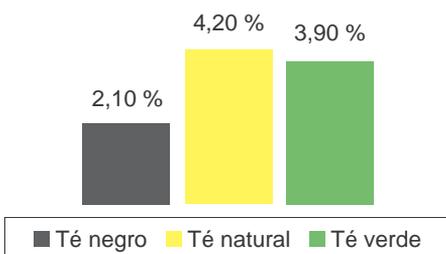


Figura 1. Proyección de ventas (2017-2022).  
Fuente: Euromonitor International (2018)



Figura 2. Bolsas filtrantes a lo largo del tiempo  
Fotografía: Elio Aliaga

## 2. LA INDUSTRIA DE INFUSIONES FILTRANTES DE MANZANILLA COMÚN EN EL PERÚ

### 2.1 Materia prima

La manzanilla común (*Chamomilla recutita* [L.] Rauschert) es una planta anual conformada por partes verdes (hojas y tallos) y flores. Estas últimas, a su vez, se componen de flores tubulares (amarillas) y liguladas (blancas), según se muestra en la figura 3. Esta planta tiene altos rendimientos y se desarrolla mejor sobre los 3.000 m.s.n.m. (Cender, 2013). Las regiones donde más se siembra son Junín (Tarma), Lambayeque (Ferreñafe) y Apurímac (Andahuaylas), según Sierra Exportadora (2014) y la Agencia Agraria de Tarma (2008). Asimismo, esta agencia estima que en la provincia de Tarma se siembra un promedio de 100 ha por año, con un rendimiento aproximado de 40 t/ha al año con dos cortes de planta entera. Por dicha razón, esta provincia ostenta la mayor producción de manzanilla común en el Perú.

### 2.2 Industria

Actualmente la industria de infusiones filtrantes en el Perú no está suficientemente desarrollada, debido a sus métodos de elaboración (Aliaga y Acevedo, 2017) y al escaso uso de tecnología en sus procesos (Gupta, Handa, Longo y Rakesh, 2013). La manzanilla común por lo general es secada al sol en el mismo lugar de la cosecha (Aliaga y Acevedo, 2017). Este método limita el control de salubridad e higiene al exponer la cosecha a la intemperie por varios días y, además, afecta las propiedades de la planta (Barbosa-Cánovas, Vega-Mercado e Ibarz, 2000). La figura 4 muestra la materia prima secada al sol que será procesada como infusión filtrante.

Según Franke y Schilcher (2005), las flores de manzanilla común tienen mayor cantidad de aceite esencial y, por ende, mejores principios activos. La Norma Técnica Peruana (NTP) 209.228:1984 “Manzanilla en bolsas filtrantes, requisitos” señala que se deben usar solo flores en su envasado, pero al no ser una norma obligatoria y por rentabilidad, se usa la planta entera.



*Figura 3.* Inflorescencia de manzanilla común.  
Elaboración propia  
Fotografía: Elio Aliaga



*Figura 4.* Secado de manzanilla común en Tarma  
Elaboración propia  
Fotografía: Elio Aliaga

### 2.3 Regulaciones

Las bolsas filtrantes de manzanilla común poseen la partida arancelaria 1211.90.90.99, según la nomenclatura común de los países miembros de la comunidad andina (NANDINA) y, de acuerdo con la clasificación industrial internacional uniforme (CIU), tienen el código C1079.

Por otro lado, el artículo 91 de la Ley 26842, Ley General de Salud, dispuso que todo alimento o bebida industrializada debe contar con registro sanitario, pero el D. L. 1222, que fortalece el control sanitario y la inocuidad, publicado el 25 de setiembre de 2015 y cuyo reglamento no se promulgó, estableció que para fabricar, importar, fraccionar, almacenar o comercializar cualquier producto alimenticio industrial<sup>3</sup> se debe contar con un certificado de Principios Generales de Higiene (PGH) y/o con la validación técnica oficial del plan HACCP<sup>4</sup> según la categoría de riesgo del producto. Es decir, ya no se requiere de un registro sanitario por cada producto, sino del control del establecimiento donde este se procesa. Dicho establecimiento deberá contar con un código sanitario de alimento nacional (CSAN). En el caso de las bolsas filtrantes de manzanilla común, la nueva norma la clasifica como un alimento con categoría de riesgo N.º 1, para la cual es obligatorio contar con un certificado de Principios Generales de Higiene (PGH), que a su vez consta de dos programas: el primero referido a las buenas prácticas de manufactura (BPM) o a las buenas

---

3 Incluye todos los productos alimenticios industriales a excepción de los pesqueros y acuícolas.

4 HACCP (por sus siglas en inglés), Plan de Análisis de Peligros y Puntos Críticos de Control.

prácticas de almacenamiento (BPAL) y el segundo referente a la higiene y saneamiento (PHS). Este certificado tiene una vigencia de cuatro años y aplica también a micro y pequeñas empresas. Respecto al certificado de HACCP, es obligatorio para alimentos de categorías N.º 2 y 3, y también aplica a micro y pequeñas empresas. La Dirección General de Salud Ambiental (Digesa) es la que entrega certificados de PGH y HACCP. No obstante todo lo anterior, el 28 de diciembre de 2016 se derogó el D. L. 1222 mediante el D. L. 1290, aún sin reglamento.

Igualmente, se derogó la Ley 28405, de rotulado de productos industriales manufacturados, por D. L. 1304, ley de etiquetado y verificación de los reglamentos técnicos de productos industriales manufacturados. El ente que regula la información que deben mostrar las etiquetas de alimentos y bebidas envasados es Indecopi.

Asimismo, la Ley 29482 (vigente hasta fines del 2019), de promoción para el desarrollo de actividades productivas en zonas altoandinas, exonera de impuesto a la renta de tercera categoría, tasas arancelarias e IGV a la importación de bienes de capital para personas naturales y empresas en general que se instalen a partir de los 2500 m.s.n.m., siempre que no excedan topes máximos de ventas por trabajador como indica el D. S. 011-2016-EF.

### 3. PROCESAMIENTO DE MANZANILLA COMÚN EN LA INDUSTRIA DE INFUSIONES

#### 3.1 Seguimiento de sembríos

La materia prima es inocua si se cumplen los límites máximos microbiológicos (NTS N°071-MINSA/DIGESA-V.01), de residuos plaguicidas y metales pesados (Codex Alimentarius). Incluso se puede llegar a certificar como producto orgánico<sup>5</sup> (D. S. N.º 044-2006-AG).

#### 3.2 Proceso de producción

Se inicia con la recepción y el pesado de la manzanilla común entera fresca, luego se separan las flores de las partes verdes y también se retiran las partes dañadas u otros elementos extraños. A continuación, las flores son lavadas por inmersión en pozas con agua potable y un

---

5 Denominado así por un certificado que garantiza un mínimo riesgo de contaminación por químicos u otros.

desinfectante de uso alimentario que no afecte su composición; después son centrifugadas y colocadas en un deshidratador que controle parámetros como velocidad de aire, tiempo y temperatura de secado. Luego del deshidratado, se procede a la molienda y el tamizado hasta una granulometría determinada. Después, el producto molido se carga en la tolva de la envasadora automática de bolsas filtrantes. Por último, se colocan manualmente los sobres armados dentro de cajas que luego son agrupadas y embolsadas, listas para ser comercializadas.

Se debe precisar que las partes verdes (tallos y hojas) representan un porcentaje importante de la manzanilla común, por lo que procesarlo es viable desde el punto de vista económico. Sin embargo, el presente artículo se centra solo en el procesamiento de las flores de dicha planta.

### 3.3 Operaciones del proceso en detalle

#### 3.3.1 Recepción y pesado

Se recibe la manzanilla común entera fresca en mantas atadas; estas favorecen la ventilación a diferencia de los costales cerrados. Luego, las mantas se desatan y se hace un control visual de la materia prima; se pesa, registra y verifica el total, para después ser trasladada en coches.

#### 3.3.2 Selección

Se separan las flores de las partes verdes usando un peine de selección, tal y como se muestra en la figura 5. Según Celiz (1991), la merma en esta operación bordea el 6 %. Posteriormente, las flores seleccionadas se llenan en cestos para agilizar las siguientes operaciones.

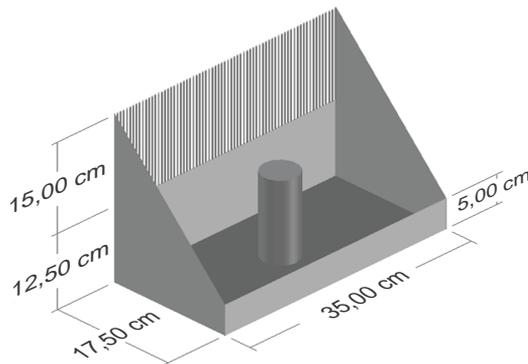


Figura 5. Dimensiones del peine de selección de flores de manzanilla común  
Elaboración propia

### 3.3.3 Lavado y desinfectado

Las flores, dentro de cestos, se sumergen en agua potable, se dejan reposar un máximo de 10 minutos y se les añade un desinfectante de uso alimentario, respetando las proporciones recomendadas por el fabricante: una proporción de 5 ml por cada 10 L de agua. Al final, las flores se lavan y se enjuagan.

### 3.3.4 Centrifugado

Después del lavado y desinfectado, las flores ganan en promedio 38 % de peso (Aliaga y Acevedo, 2017), por ello son centrifugadas usando cestos con malla lateral N.º 14 (ASTM) para que no sean expulsadas. El tiempo aproximado de centrifugado es de 4 min por carga.

### 3.3.5 Deshidratado

Las flores centrifugadas se ponen en bandejas dentro de un deshidratador. Franke y Schilcher (2005) sostienen que las bandejas son de baja inversión, de simple operación y flexibles para pequeñas y medianas escalas de producción. Además, sugieren no deshidratar a más de 45 °C y que las capas de flores en las bandejas no superen los “2 cm” de profundidad. La humedad de las flores frescas bordea el “80 %” según los mismos autores, en coincidencia con estudios de Celiz (1991). Asimismo, Silva (1985) propone deshidratar por 11 horas, a una velocidad de aire de 4,7 m/s, una carga de flores de 4,5 kg/m<sup>2</sup> y hasta una humedad de 6,5 %. (La NTP 209.228 permite deshidratar hasta una humedad máxima de 12 %).

### 3.3.6 Molido y tamizado

Las flores son molidas y después tamizadas hasta una granulometría que retenga como mínimo el 75 % del molido en un tamiz N.º 30 (ASTM). Para Silva (1985), la operación de tamizado está asociada a la molienda y se debe llevar a cabo en una sola operación. La merma es de 2 % aproximadamente. Luego se vacía el producto molido en tinas para su mejor manejo.

### 3.3.7 Envasado y empaçado

Antes de iniciar el envasado automático, se procede a la carga manual de bobinas (etiquetas, papel filtro termosellable y sobres de envoltura), rollo de hilo y adhesivo, así como del producto molido a envasar.

El empaçado es manual y consiste en colocar las bolsas filtrantes envasadas dentro de cajas previamente rotuladas con su respectiva fecha de caducidad y número de lote.

### 3.3.8 Sellado y embolsado

Las cajas se envuelven y sellan en láminas de polipropileno biorientado (BOPP) con ayuda de una selladora con avance manual; luego se colocan manualmente en bolsas de polietileno (de aproximadamente 24 cajas por bolsa).

Resumiendo las operaciones tratadas hasta aquí, en la figura 6 se muestra el esquema del proceso productivo de las flores de manzanilla común; del mismo modo, en la figura 7 se presenta el diagrama de flujo del proceso que requiere de algún equipo o máquina.

Igualmente, en las figuras 8 y 9 se muestra el diagrama de operaciones del proceso (DOP) y el balance de materia, respectivamente.

Finalmente, se recomienda hacer un seguimiento a los sembríos para garantizar que estos no excedan los límites máximos de plaguicidas y/o metales pesados aptos para el consumo humano. La mayoría de marcas del mercado peruano omite el seguimiento tanto a la materia prima como a otras operaciones que garantizan la inocuidad del producto, lo cual obliga a las empresas a irradiar el molido antes de envasarse. En el Perú, a la fecha, Inmune S. A. es el único proveedor de este servicio mediante la radiación gamma.

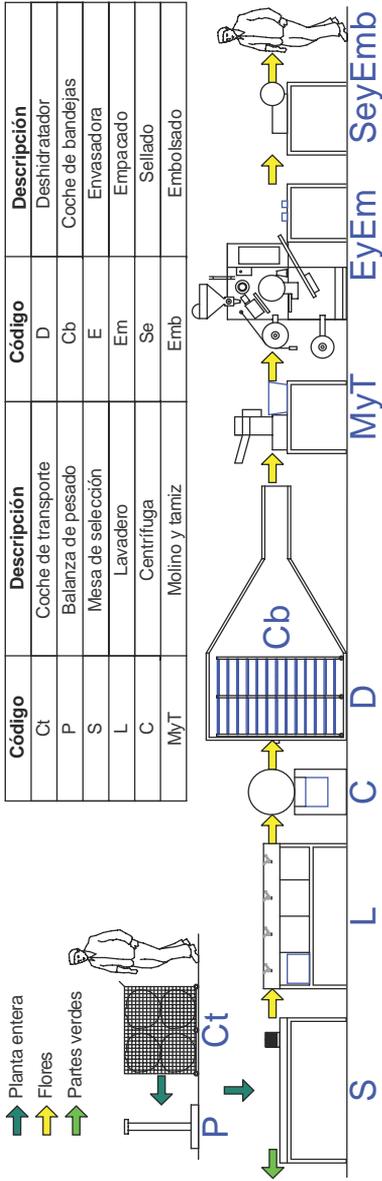


Figura 6. Esquema del proceso productivo de flores de manzanilla común en bolsas filtrantes Elaboración propia

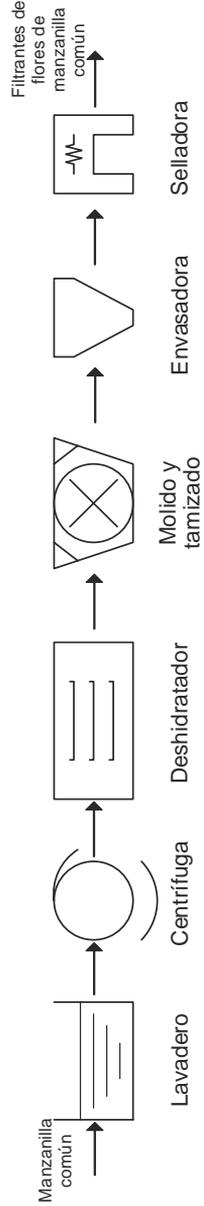


Figura 7. Diagrama de flujo del proceso de manzanilla común en bolsas filtrantes Elaboración propia

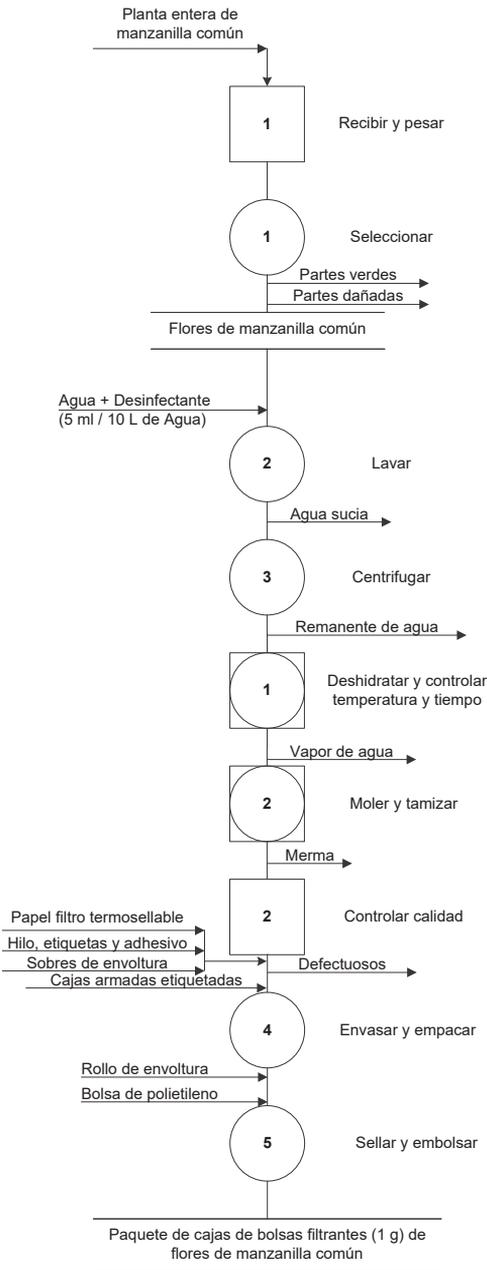


Figura 8. Diagrama de operaciones de proceso  
Elaboración propia

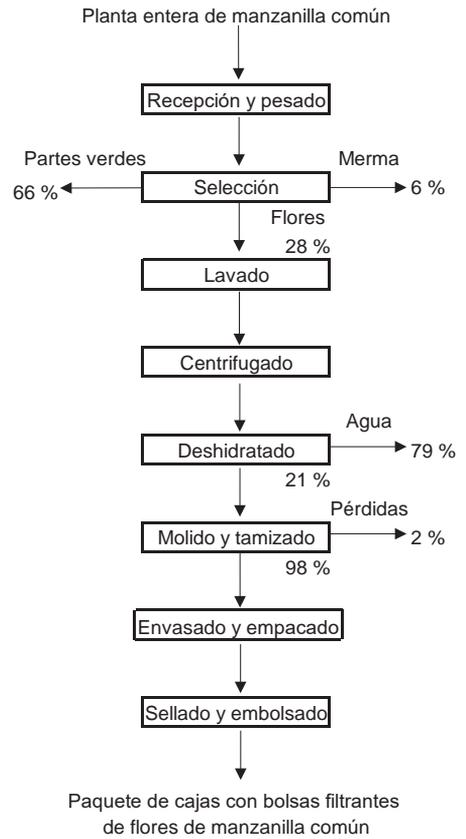
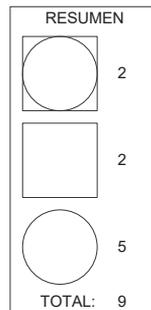


Figura 9. Balance de materia de operaciones  
Elaboración propia



### 3.4 Principales equipos y maquinaria

#### 3.4.1 Centrífuga

Las flores de manzanilla común se componen de flores tubulares y liguladas, y estas últimas son las que se desprenden con mayor facilidad. Por este motivo, los cestos deben tener una malla N.º 14 (ASTM); una mayor generará pérdidas durante la operación. Asimismo, se recomienda que el cesto sea de acero inoxidable (AISI 305). Ver la figura 10.

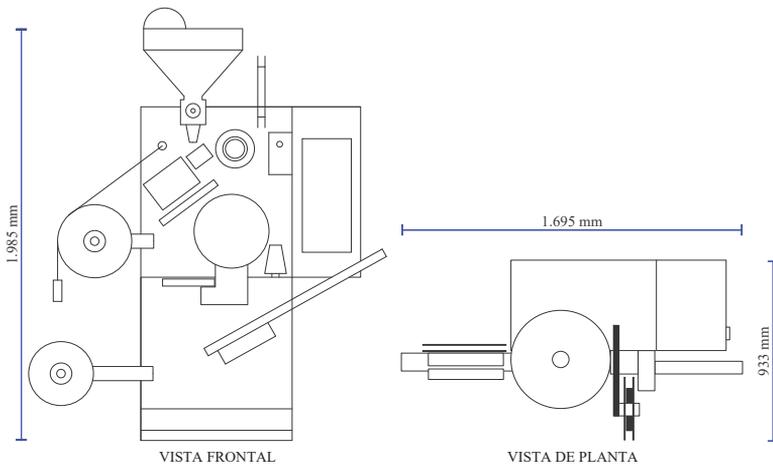


Figura 10. Dimensiones de centrífuga Incalfer CE-400  
Fuente: Incalfer S.R.L. (2016)

#### 3.4.2 Deshidratador

La operación demandará de un deshidratador continuo si la cantidad a secar es grande y se requiere operar continuamente; caso contrario, se optará por un deshidratador por lotes (*batch*), generalmente el más usado. Dentro de esta categoría se encuentran los deshidratadores de bandejas, que son de baja inversión, de simple operación y flexibles para pequeñas y medianas escalas de producción (Franke y Schilcher, 2005). Respecto a la fuente de calor, se prefiere una económica como las reacciones de combustión, preferentemente de gas natural o gas licuado de

petróleo (GLP), en ese orden, siempre y cuando se asegure su disponibilidad. Dicha combustión calienta el aire y, mediante un dispositivo mecánico, ventilador o extractor, se hace circular el fluido caliente, horizontal o verticalmente, a través del producto a deshidratar (ver figura 11). Asimismo, la máxima temperatura en la cámara de secado no debe superar los 45 °C, y de este parámetro dependerán otros como velocidad del aire, carga por bandeja y tiempo de deshidratado. Se recomienda que las bandejas sean de acero inoxidable AISI 304.

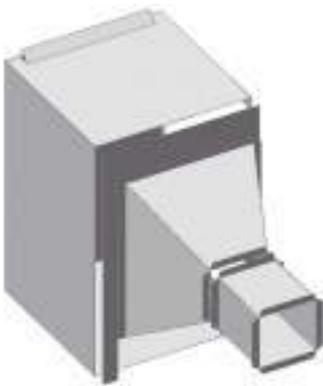


Figura 11. Deshidratador por flujo de aire caliente  
Elaboración propia

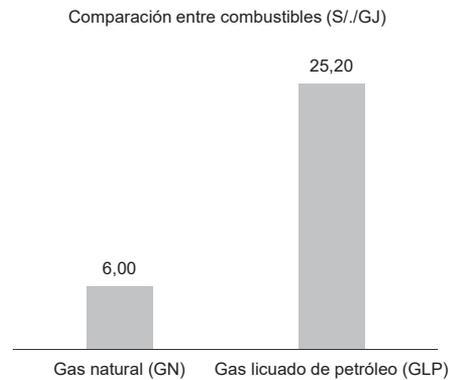


Figura 12. Comparación entre GN y GLP  
Fuente: Osinergmin (2017)

Las dimensiones del deshidratador dependerán de la cantidad de materia prima a secar. Respecto a la fuente de calor, como ya se mencionó, se evalúa entre gas natural y GLP. En cuanto a las ventajas, el gas natural es más económico según muestra la figura 12; sin embargo, este no está disponible en todo el Perú como sí lo está el GLP, que al estar envasado en estado líquido ocupa menos volumen y es más fácil de transportar. En tal sentido, la tabla 1 resume la reglamentación necesaria para ambos tipos de combustible. De igual modo, la tabla 2 compara las propiedades de ambos combustibles.

Tabla 1

*Reglamentación de combustibles y proveedores para deshidratadores*

<b>Reglamentación</b>	<b>Gas licuado de petróleo (GLP)</b>
Norma Técnica Peruana 321.123	Instalaciones de GLP para consumidores directos y redes de distribución.
Norma Técnica Peruana 321.121	Instalaciones internas de GLP para consumidores directos y redes de distribución.
Decreto Supremo N.º 027-94-EM	Reglamento de Seguridad para Instalaciones y Transporte de Gas Licuado de Petróleo.
<b>Reglamentación</b>	<b>Gas natural (GN)</b>
Norma Técnica Peruana 111.010	Sistema de tuberías para instalaciones internas industriales.
Norma Técnica Peruana 111.023	Evacuación de los productos de la combustión generados por los artefactos a gas natural.
Norma Técnica Peruana 111.021	Distribución de gas natural seco por tuberías de polietileno.
Decreto Supremo N.º 042-99-EM	Reglamento de Distribución de Gas Natural por Red de Ductos.

Fuente: Osinergmin (2018)

Tabla 2

*Comparación entre gas natural y gas licuado de petróleo*

<b>Propiedad</b>	<b>GN</b>	<b>GLP</b>
Composición	90 % metano (CH <sub>4</sub> )	60 % propano (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> ) 40 % butano (C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> )
Densidad relativa (aire=1)	0,60	1,56 - 2,05
Poder calorífico	38.518,93 kJ/m <sup>3</sup>	93.132,07 kJ/m <sup>3</sup> 27.612,21 kJ/l
Precio* (kJ/S/.)	24.691,62 kJ/S/.	18.165,93 kJ/S/.
Presión suministro	21 mbar	50 mbar
Estado físico	Gaseoso Líquido a -160 °C y presión atmosférica	Líquido a 20 °C con presión manométrica de 2,50 bar
Color/olor	Incoloro/inodoro	Incoloro/inodoro

Nota: \*Estaciones de GLP y GNV como referencia, incluye IGV

Fuente: Osinergmin (2017).

### 3.4.3 Envasadora

El modelo de la envasadora dependerá de la presentación del producto final. Existen principalmente bolsas filtrantes desnudas, bolsas dentro de sobres de envoltura, bolsas en sobres herméticos y bolsas dentro de bolsas tipo almohada, tal como se muestra en la figura 13.



Bolsas filtrantes desnudas



En sobres de envoltura



En sobres herméticos



En bolsa tipo almohada

Figura 13. Modelo de envolturas para bolsas filtrantes

Fuente: Maisa S. A. (2016)

Fotografías: Elio Aliaga

Igualmente, la figura 14 muestra las medidas estándar, en milímetros, del sobre de envoltura de papel para bolsas filtrantes. Es preciso que al cargar la bobina de envolturas ya estén impresos el rotulo del producto, las marcas de fotocentrado y la publicidad.

Las bolsas filtrantes en sobres de envoltura de papel son las más usadas debido a su facilidad de trasladado y a su bajo costo en comparación con otros materiales. Por tal razón, las envasadoras de bolsas filtrantes en sobres de envoltura de papel son las más extendidas en el mercado peruano. La figura 15 muestra las dimensiones de una envasadora de este tipo.



### 3.5 Normas sanitarias

En la producción de bolsas filtrantes de manzanilla común, se deben considerar las siguientes regulaciones: Ley General de Salud (Ley N.º 26842), Ley de Inocuidad Alimentaria (D. L. N.º 1062) y su reglamento (D. S. N.º 034-2008-AG), Reglamento de Vigilancia y Control Sanitario de Alimentos y Bebidas (D. S. N.º 007-98-SA) y el Decreto Legislativo que fortalece la inocuidad de los alimentos industrializados y productos pesqueros y acuícolas (D. L. N.º 1290).

### 3.6 Especificaciones técnicas del producto

Tabla 3

*Especificaciones técnicas de las flores de manzanilla común en bolsas filtrantes*

<b>Nombre del producto:</b>	Bolsa filtrante de flores* de manzanilla común			
<b>Función:</b>	Bebida			
<b>Composición:</b>	Flores tubulares y liguladas de manzanilla común			
<b>Características:</b>	Clase	Valor Neto +- total	Medio de control	Técnica
<b>-Organolépticas</b>				
Color	Crítico	Amarillo pardusco	Sensorial	Muestreo
Olor	Crítico	Manzanilla común	Sensorial	Muestreo
Sabor	Crítico	Amargo	Sensorial	Muestreo
Aroma	Crítico	Manzanilla común	Sensorial	Muestreo
<b>-Fisicoquímicas</b>				
Humedad	Crítico	Máximo 6,50 %	Análisis	Muestreo
Cenizas totales	Crítico	Máximo 10 %	Análisis	Muestreo
Granulometría	Crítico	Mínimo 75 % Malla N.º 30**	Análisis	Muestreo
<b>-Microbiológicas***</b>				
Entero bacterias	Crítico	Máximo 10 <sup>2</sup> ufc****/g	Análisis	Muestreo
Mohos	Crítico	Máximo 10 <sup>2</sup> ufc/g	Análisis	Muestreo

Nota: \*Las flores tubulares (amarillas) contienen a su vez subproductos como polen y semillas; \*\*se debe retener como mínimo un 75 % del material a través de una malla N.º 30 ASTM (equivalente a 0,6 mm). Asimismo, para no dificultar el envasado, se recomienda no superar los 2,00 mm; \*\*\*según la NTS N.º 071-MINSA/DIGESA-V.01; \*\*\*\*Unidades formadoras de colonias por gramo.

Fuente: Ministerio de Salud-MINSA (2015)

### 3.7 Sistema de mantenimiento

Una planta de producción de bolsas filtrantes requiere de un plan de mantenimiento preventivo, ya que no utiliza maquinaria o equipo muy especializado; tampoco demanda de entrenamiento o capacitación intensiva para su operación. La tabla 4 resume el plan de mantenimiento de la maquinaria o equipos más importantes.

Tabla 4  
*Plan de mantenimiento preventivo*

Máquina	Actividad	Descripción	Frecuencia	Encargado
Centrífuga	Limpieza de cestos y superficie externa	Limpiar con una tela suave con un poco de detergente. Los cestos, además, pueden lavarse con una escobilla o cerda	Diaria	Operario
	Verificación del nivel y existencia de vibración	Nivelar las patas de la máquina al menor ruido.	Semanal	Operario
		Si persiste el ruido, revisar la parte interna donde se coloca el cesto.	Semanal	Operario
		Verificar el correcto acoplado y el balance entre del eje del tambor y la estructura.	Trimestral	Operario
	Verificación de caja de transmisión, de faja de transmisión y sello de agua	Balancear la caja de transmisión y el motor, así como verificar el estado de la faja y el sello de agua.	Anual	Técnico externo
Deshidratador	Limpieza y secado de la cámara interna de deshidratador	Verificar que no haya acumulación de agua en el interior de la cámara antes y después de la operación.	Diaria	Operario
		Verificar y localizar ruidos y vibraciones anormales que se puedan presentar.	Diaria	Operario
	Verificar que no haya elementos corrosivos dentro de la estructura	Inspección visual de elementos extraños en el deshidratador y coche de bandejas.	Tres meses	Operario
		Verificar que no exista corrosión.		
		Verificar que no existan defectos en las soldaduras.		
	Mantenimiento al quemador	Limpieza del quemador.	Seis meses	Técnico externo
		Detección que fugas de combustible.		
Limpieza de ductos de admisión y salida de aire del quemador.				

(Continúa)

(continuación)

Máquina	Actividad	Descripción	Frecuencia	Encargado
Deshidratador	Verificar el sistema eléctrico	Verificar que no exista humedad en el tablero de control del deshidratador.	Tres meses	Operario
		Verificar que los sensores de control estén bien ubicados y en funcionamiento.		
		Aislar correctamente las conexiones eléctricas.		
		Verificar el funcionamiento de los controladores de temperatura.		
Envasadora	Limpieza, lubricación y ajuste de mecanismos	Verificar el avance alineado del papel filtro termosellable así como su limpieza.	Diario	Operario
		Verificar que se encuentre bien colocado el separador de hilo, así como las horquillas y los pines de hilo.		
		Verificar que el dosificado de adhesivo para las etiquetas sea el correcto.		
		Verificar la sujeción y el buen estado de las cuchillas de corte.		
		Verificar que los rodillos termoselladores cierren correctamente las bolsas y los sobres de envoltura.		
		Verificar que el sistema de fotocentrado funcione bien y que se corten y doblen correctamente los sobres de envoltura.		
		Verificar que la guía de la pinza plegadora se encuentre lubricada.		
	Verificar el correcto dosificado en la tolva de envasado. Se usa un removedor de hierbas de acuerdo con la densidad del molido.			
Verificación del sistema de lubricación	Verificar la cantidad de aceite de la envasadora y cambiar o reponer si es necesario.	Anual	Técnico externo	

Fuente: Incalfer S.R.L. (2016); Maisa S.A. (2016)

Tabla 5  
Tabla comparativa de regímenes laborales en el Perú

Régimen laboral	Ventas (UIT)*	Asignación familiar	RMV (S/)	SCTR	Seguro de vida	CTS	Gratificación	Vacaciones	EsSalud
General	-	10,00 %	850,00	Aplica si es de riesgo	4,00 %	11,10 %	16,66 %	8,34 %	9,00 %
Pequeña empresa	Más de 150 hasta 1700	No	850,00	No es de riesgo**	4,00 %	5,55 %	8,33 %	4,17 %	9,00 %
Microempresa	Hasta 150	No	850,00	No	No	No	No	4,17 %	9,00 %

Nota: \*1 UIT equivale a S/. 4050,00; \*\*una instalación de bolsas filtrantes de manzanilla no está comprendida dentro del Anexo 5 del D. S. N.º 043-16-SA para aplicar un SCTR; RMV: Remuneración Mínima Vital, SCTR: seguro contra trabajos de riesgo, CTS: compensación por tiempo de trabajo.

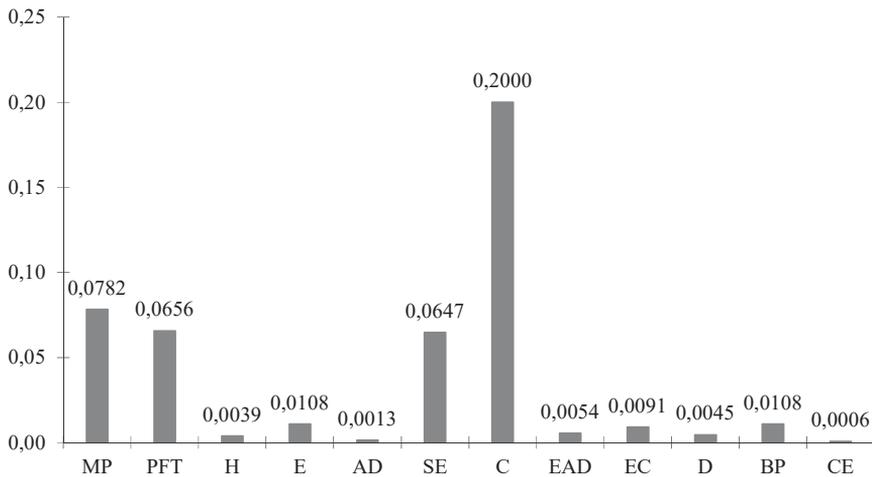
Fuente: Ministerio de Trabajo y Promoción del Empleo del Perú (2017).

### 3.8 Consideraciones del costo de la mano de obra

El Perú cuenta actualmente con el régimen laboral general y otros regímenes especiales. De acuerdo con el tipo de sociedad, número de trabajadores y nivel de ventas, se podrá optar por el régimen laboral correspondiente. La tabla 5 muestra una comparación entre el régimen general y los regímenes especiales de microempresa y pequeña empresa.

### 3.9 Requerimiento y costo estimado de los principales materiales

Las figuras 16 y 17 señalan el costo de los materiales necesarios para la producción de bolsas filtrantes de manzanilla común. La tabla 6 muestra los contactos para su adquisición.



Nota: \*Incluye IGV; \*\*caja de 15 bolsas filtrantes de flores de manzanilla común

Figura 16. Costo de materiales (S\*/caja\*\*)

Elaboración propia

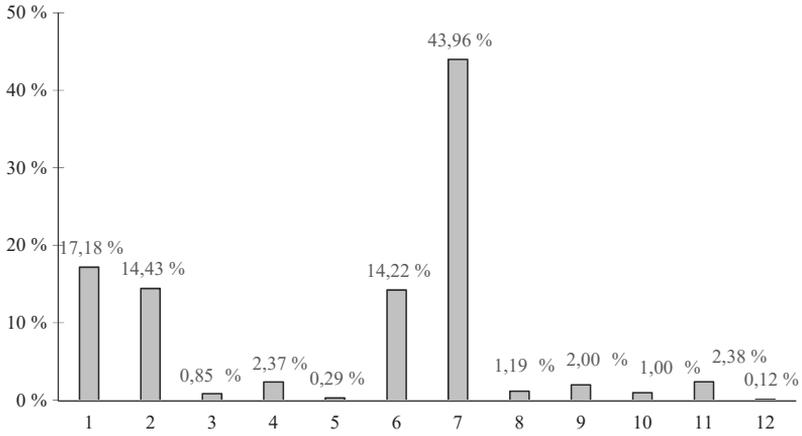


Figura 17. Costo de materiales (%)  
Elaboración propia

Tabla 6  
Principales proveedores de materiales

Código	Empresa
PFT	Iprex Corporación S.A.C.
SE y E	Etiquetas y Envolturas S.A.C. Impresiones Multiflex S.A.C. Dinamika Business S.A.C. Polimpresiones S.A.C. Stickers S.A.C.
EC	Emusa Perú S.A.C. Opp film S.A.
C	TS impresiones S.A.C. Stickers S.A.C.
H	La Colonial fábrica de hilos S.A. Imesa S.A.C.
EAD	Label Peru S.A.C.
AD	Química Industrial Amec E.I.R.L. Cppq S.A.

Elaboración propia

Tabla 7  
 Leyenda de figuras 16 y 17

Descripción	Código
Materia prima	MP
Papel filtro termosellable	PFT
Hilo	H
Etiquetas	E
Adhesivo	AD
Sobres de envoltura	SE
Cajas	C
Etiquetas adhesivas	EAD
Envoltura de cajas	EC
Desinfectante	D
Bolsas de polietileno	BP
Cinta de embalaje	CE

Elaboración propia

### 3.10 Determinación de áreas requeridas

Las principales áreas son de materia prima, producción, materiales, producto terminado, control de calidad, oficinas administrativas, vigilancia, comedor, patio de vehículos y servicios higiénicos. El área de producción se calcula por el método de Guerchet. Para las demás áreas se considera el D. S. N.º 007-98-SA, el reglamento nacional de edificaciones (RNE), la cantidad de materia prima a procesar, el tiempo de almacenamiento de productos terminados, así como la regulación sanitaria aplicable. La figura 18 muestra el plano de disposición de la planta.

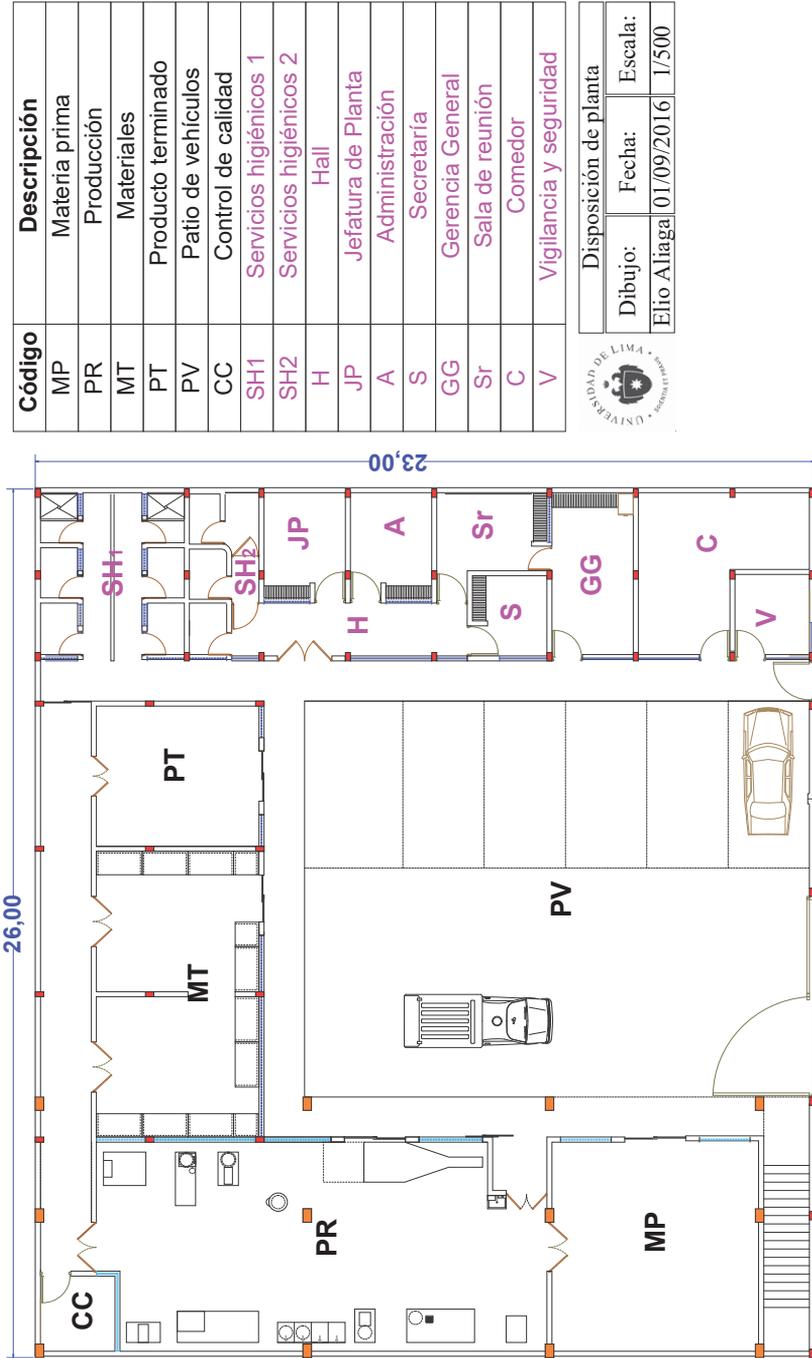


Figura 18. Plano de disposición  
Elaboración propia

### 3.11 Consideraciones de seguridad laboral

En la planta de producción, se debe asegurar un clima laboral adecuado en concordancia con el Reglamento de Seguridad y Salud en el Trabajo (D. S. N.° 009-2005-TR), la Ley de Seguridad y Salud en el Trabajo (Ley N.° 29783). Asimismo, se deben tener en cuenta normas internacionales como la ISO 45001, que ayuda a implementar un Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo, y la NFPA 10, norma para extintores portátiles contra incendios, entre las principales.

## 4. COMPARACIÓN ENTRE PRODUCTOS DE MANZANILLA COMÚN DE DIFERENTES MARCAS

La figura 19 muestra los molidos de manzanilla común de diferentes marcas en el mercado peruano. Los molidos de flores (F) de manzanilla común son más homogéneos que los que usan la planta entera (PE). También se observa que los primeros se venden a mayor precio.

 0,05/PE/N	 0,07/PE/N	 0,08/PE/N	 0,08/PE/N	 0,08/PE/N
 0,09/PE/N	 0,09/PE/N	 0,10/PE/N	 0,10/PE/N	 0,11/PE/N
 0,16/PE/N	 0,18/PE/E	 0,30/PE/E	 0,35/PE/E	 0,40/F/E
 0,44/PE/N	 0,52/F/E	 0,85/F/E	 1,09/F/E	 0,25/F/N*

Nota: Precio incluido IGV (S/gr) / PE: planta entera, F: flores/ N: nacional, E: extranjero.

\*Molido con materia prima de la provincia de Tarma.

Figura 19. Molidos de manzanilla común de diferentes marcas

Elaboración propia

## REFERENCIAS

- Agencia Agraria de Tarma. (2008). *Estudio de mercado de manzanilla en la provincia de Tarma*. Tarma: Autor.
- Aliaga Paredes, E. L. y Acevedo Jara, J. A. (2017). *Estudio de prefactibilidad para la instalación de una planta de producción de bolsas filtrantes de manzanilla común (Chamomilla recutita (L.) Rauschert)* (tesis para optar el título de Ingeniero Industrial). Universidad de Lima.
- Barbosa-Cánovas, G. V., Vega-Mercado, H. e Ibarz, R. A. (200). *Deshidratación de alimentos*. Zaragoza: Acribia.
- Celiz Castillo, H. (1991). *Estudio de Factibilidad para la instalación de una fábrica de bolsistas filtrantes de Plantas Medicinales* (tesis para optar el título de Ingeniero Industrial). Universidad de Lima.
- Centro de Innovación y Desarrollo Rural (Cender). (2013). *Cultivo de Manzanilla con apoyo de PROFONANPE*. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=IGezLwqLUBw>.
- Compañía de Investigación de Mercado CCR. (2003). El mercado de bebidas filtrantes: En franco crecimiento. *Medio Empresarial*, (50), 34.
- Euromonitor International. (2017). *Tea in Peru-Country Report*. Recuperado de Euromonitor Passport database.
- Euromonitor International. (2018). *Tea in Peru-Country Report*. Recuperado de Euromonitor Passport database.
- Franke, R. y Schilcher, H. (ed.). (2005). *Chamomile: Industrial Profiles. Medicinal and Aromatic Plants-Industrial Profiles*. Florida: Taylor & Francis Group.
- Gupta, M. P., Handa, S. S., Longo, G. y Rakesh, D. D. (ed.). (2013). *Compendium of Medicinal and Aromatic Plants: The Americas*.
- Ipsos Perú. (2015). *Liderazgo de productos comestibles*. Lima Metropolitana.
- Saberi, H. (2010). *Tea: A Global History*. London: Reaktion Books.
- Sierra Exportadora. (2014). *35 proyectos de inversión productiva en las regiones andinas*. Lima: Autor.

- Silva Jaimes, M. I. (1985). *Determinación de los parámetros de procesamiento para la obtención de la manzanilla Común (Matricaria chamomilla L.) deshidratada por el método del Aire Caliente* (tesis para optar el título de Ingeniero en Industrias Alimentarias). Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Zijp, I. M., Korver, O. y Tijburg, L. B. M. (2010). Effect of Tea and Other Dietary Factors on Iron Absorption. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 40(5), 371-398.



Ciencia y tecnología

---

Science and Technology



# Sistema de locomoción para discapacitados, automatizado con un procesador myRIO acoplado en una silla de ruedas

Fabrizio Paredes Larroca\*, Juan Carlos Goñi Delión\*  
Universidad de Lima

Recibido: 3 de mayo del 2018 / Aprobado: 4 de julio del 2018

doi: 10.26439/ing.ind2018.n036.2456

**RESUMEN:** La investigación aplicada estudia la posibilidad de desarrollar un sistema de locomoción automatizado para personas con discapacidad. Este sistema permitirá autonomía de desplazamiento a la persona con discapacidad, lo cual mejorará su calidad de vida y le permitirá incluirse con mayor facilidad en la sociedad.

*Palabras clave:* personas con discapacidad / robótica / control automático / silla de ruedas / dispositivos de ayuda para personas con discapacidad / LabVIEW / FPGA / myRIO

## Locomotion system for people with disabilities automated with a myRIO processor coupled to a wheelchair

**ABSTRACT:** This applied research studies the possibility of developing an automated locomotion system for people with disabilities. This system will enable said people to have freedom of movement, which will improve their quality of life, and will allow them to be included in society in an easier way.

*Keywords:* people with disabilities / robotics / automatic control / wheelchairs / self-help devices for people with disabilities / LabVIEW / FPGA / myRIO

---

\* Correos electrónicos: fparedes@ulima.edu.pe, jgoni@ulima.edu.pe

## 1. INTRODUCCIÓN<sup>1</sup>

La población que presenta en el Perú algún tipo de discapacidad es de un millón seiscientas mil personas aproximadamente (INEI, 2012). De este grupo, el 59 % tiene discapacidad motora o problemas en brazos y piernas, lo que le inhabilita parcial o completamente el caminar.

Asimismo, de este millón seiscientas mil personas, el 51 % tiene problemas visuales o no pueden ver. Y, clasificándolos según su nivel socioeconómico, el 23 % del grupo de discapacitados es de condición pobre o muy pobre. Solo un 20 % de los discapacitados tiene un trabajo, y en casi todos los casos se trata de un trabajo independiente (INEI, 2014). Toda esta información indica las necesidades de ayuda que tienen los peruanos con discapacidad. Ellos necesitan poder ser más independientes que los demás.

## 2. PROPUESTA DE SISTEMA DE LOCOMOCIÓN PARA DISCAPACITADOS

Las personas discapacitadas no tienen libertad para desplazarse de forma segura, y se plantea diseñar un sistema de locomoción que les dé autonomía de movimiento. Para esto se ha planteado la elaboración de un mecanismo mecánico, un sistema eléctrico y un sistema electrónico de control. Todos estos sistemas serán modelados y probados con el uso de *software* de modelamiento 3D, modelamiento asistido por computadoras (CAD) y simulación de control.

Para cumplir con los objetivos planteados, se ha previsto cumplir con las siguientes características: el peso de una persona promedio de 80 kilogramos, un sistema mecánico de montaje adaptable a sillas de ruedas convencionales, mandos de control de fácil uso, con motores eléctricos de 9 amperios como consumo máximo para 24 voltios; que acceda a rampas de hasta 10 grados de inclinación, con baterías recargables de corriente continua.

### 2.1 Análisis del sistema mecánico

Se ha diseñado el mecanismo de un sistema de placas metálicas adheridas a una silla de ruedas convencional. Estas placas permiten fijar con

---

1 Este trabajo es auspiciado por el Instituto de Investigación Científica IDIC, de la Universidad de Lima, que busca diseñar e implementar proyectos de gran impacto tecnológico y de ayuda social.

seguridad un motor eléctrico a cada lado y usar a cambio una rueda de 10 pulgadas de diámetro (con una brida de acoplamiento). Es decir, se deben retirar las ruedas originales de medida promedio de 24 pulgadas para adaptar en un nuevo punto las ruedas pequeñas.

El acoplamiento entre las placas y los motores cuenta con tres pernos de sujeción para garantizar la seguridad y la estabilidad del conjunto.

El diseño del sistema mecánico se ha basado en la herramienta de dibujo “Diseño Asistido por Computadora” SolidWorks, de la cual se ha establecido la geometría de las placas al ubicar los puntos de apoyo, el equilibrio del peso de la persona, los motores y las baterías. Considerar el centro de gravedad del mecanismo permite el desplazamiento seguro de la silla en superficies horizontales e inclinadas. Asimismo, se han diseñado las plataformas y los soportes para las baterías y los sistemas de control.

La figura 1 muestra la placa de uno de los lados, y en total son dos placas por cada rueda posterior, las cuales serán acopladas a una silla de ruedas convencional que por lo general cuentan con dos ruedas posteriores.

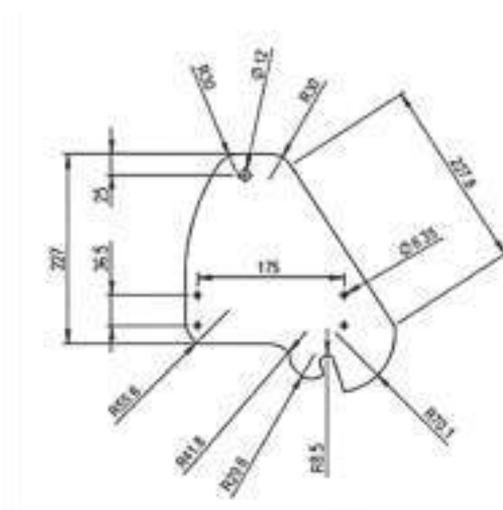


Figura 1. Placa fija de montaje  
Elaboración propia

El modelo de locomoción mecánico, además, consta de un sistema adicional de ruedas configurado en estrella que funciona como acoplamiento mecánico capaz de adaptarse a una silla de ruedas estándar para discapacitados, con el objeto de poder subir escaleras con ayuda de dos personas.

Este mecanismo mecánico ha sido concebido, diseñado y fabricado en las instalaciones del laboratorio de Máquinas e Instrumentos de la Universidad de Lima. Para este objetivo, se han utilizado dos conjuntos de ruedas dispuestas en estrella de tres unidades cada uno, unas placas en estrella que sirven para la unión de cada conjunto de ruedas dispuestas en estrella, con bulones de acople para cada una de las seis ruedas y un eje principal extenso para el ensamble a los extremos de los dos conjuntos de ruedas dispuestas en estrella.

La figura 2 muestra el detalle de la placa estrella que funcionará como estructura principal del sistema de acoplamiento de ruedas dispuestas en triángulo.

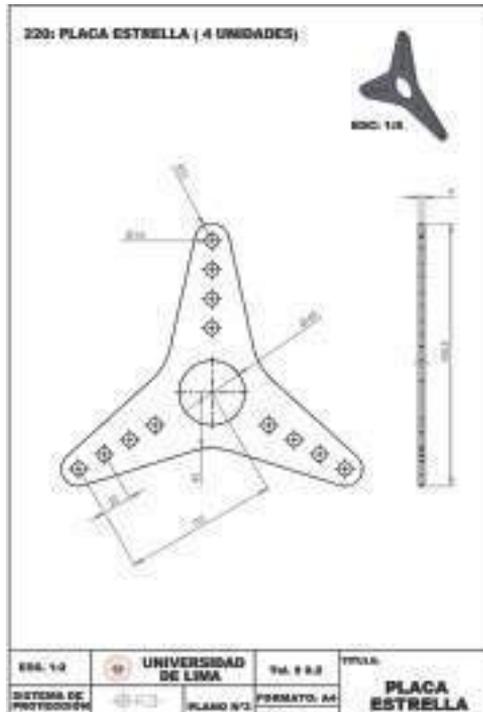


Figura 2. Placa en estrella  
Elaboración propia

## 2.2 Prototipado y construcción

El diseño del sistema mecánico de locomoción se ha elaborado con la herramienta de dibujo CAD “Diseño Asistido por Computadora” en SolidWorks hasta obtener el prototipo final. La figura 3 muestra un modelo del conjunto de ruedas dispuesto en estrella.



*Figura 3.* Modelo del sistema de ruedas dispuestas en triángulo  
Elaboración propia

Se hizo uso de herramientas CAD y CAM (fabricación asistida por computadoras) para el diseño y la fabricación de las piezas que integran el sistema de acople. Las técnicas de manufactura utilizadas fueron: soldadura TIG (del inglés *tungsten inert gas*), fresado y torneado CNC (torno de control numérico) e impresión 3D.



*Figura 4.* Simulación del acople tipo estrella  
Elaboración propia

### 2.3 Ensamble y acoplamiento

Mediante pruebas realizadas con el sistema acoplado a un cargador, se comprobó la efectividad del acople en la superación de obstáculos, y se procedió a realizar el ensamblaje en la silla de ruedas, el cual puede ser retirado e insertado con accionamiento manual. Posteriormente, se realizaron pruebas de campo del prototipo del sistema mecánico en las instalaciones de la Universidad de Lima.

Se acopla el sistema de placa de aluminio según la figura 6 en los lados laterales de la silla de ruedas convencional, de tal forma que funcione como soporte del conjunto de ruedas dispuesto en estrella y optimice la repartición de peso como se demuestra mediante cálculos matemáticos.

La estabilidad se consigue mediante tres puntos de apoyo y sujeción de la placa con el chasis de la estructura de la silla de ruedas, como se observa nuevamente en la figura 6.



*Figura 5.* Pruebas del prototipo del sistema mecánico  
Elaboración propia



*Figura 6:* Silla de ruedas convencional, con las ruedas traseras desensambladas  
Elaboración propia

### 2.4 Sistema eléctrico

Para lograr el desplazamiento motriz de la silla, se han previsto dos motores eléctricos de corriente continua con reductor de velocidad de 10 a 1 y eje de salida perpendicular a cada motor. Se monta un motor eléctrico en cada rueda de tracción, que va sobre cada placa metálica

del sistema mecánico diseñado. Cada motor tiene una potencia de 450 watts, 17,5 amperios, 24 voltios DC y 2000 rpm.

Asimismo, se han instalado dos baterías de 12 voltios de plomo-ácido sulfúrico conectadas en serie como fuente de energía eléctrica para alimentar los motores eléctricos. Cada batería entrega una corriente máxima de 518 amperios, y tiene una capacidad de carga de 75 amperios por hora. Cada batería a máximo consumo dura aproximadamente 4 horas.

El driver de potencia cuenta con una capacidad de 50 amperios. Esto se debe a que, cuando la silla se encuentra funcionando, es posible que la persona discapacitada pueda chocar contra una pared o una puerta; entonces, la corriente de trabajo se eleva de forma drástica. Este sistema de locomoción cuenta con sensores que permiten controlar de manera adecuada la velocidad en una pendiente, tanto de bajada como de subida.

El FPGA myRIO cuenta con un *software* que asiste al sistema en todo momento de su traslación.

En la figura 7 se presenta el mecanismo ya montado, con los motores eléctricos y el acoplamiento.

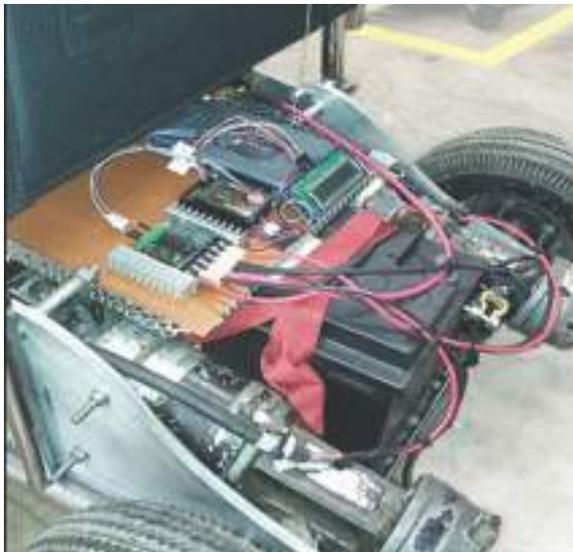


Figura 7. Mecanismo electrónico de la silla de ruedas  
Elaboración propia

## 2.5 Sistema electrónico y de control

El sistema de control automatizado está basado en un *software* de desarrollo de sistemas, conocido como LabVIEW, con las herramientas propias del procesador myRIO de National Instruments. El FPGA (Field-Programmable Gate Array) es un dispositivo programable que permite emular cualquier circuito integrado para traducir circuitos que ya no se fabrican en la actualidad. La arquitectura de myRIO está basada en un FPGA.

El sensor Myo se encarga de mandar la señal al controlador mediante los pulsos musculares del usuario. Este sensor es utilizado como un brazalete en el antebrazo y, mediante la detección de ciertos patrones de movimientos musculares, envía distintas señales encargadas de la locomoción del sistema, ya sea hacia adelante, voltear a la derecha, izquierda o en reversa.

La programación se desarrolló de tal manera que el sensor grabara en su memoria determinados patrones de movimiento muscular y los tradujera en señales que el controlador interpreta como distintos tipos de movimiento de la silla. Todo esto se logró gracias al programa en LabView.

El sensor que permite la locomoción automática de la silla de ruedas es el sensor Myo, el cual permite la interpretación de un patrón muscular para que el controlador mande la señal de movimiento.



Figura 8. Sensor Myo  
Elaboración propia

La siguiente serie de figuras indica el funcionamiento del sistema de control del sistema de locomoción:



*Figura 9.* Patrón de movimiento de activación del sensor de pulsos  
Elaboración propia



*Figura 10.* Patrón de movimiento de desplazamiento lineal  
Elaboración propia



*Figura 11.* Patrón de movimiento de giro a la izquierda  
Elaboración propia



*Figura 12.* Patrón de movimiento de giro a la derecha  
Elaboración propia



*Figura 13.* Patrón de movimiento de reversa  
Elaboración propia

Actualmente se cuenta con sensores que detectan el consumo de corriente de los motores eléctricos, hasta un máximo de 25 amperios, con corrientes pico de hasta 50 amperios en el mando de potencia. Este driver o mando de potencia recibe el tren de pulsos PWM (Pulse-Width Modulation) del controlador myRIO.

La comunicación entre el sensor Myo y la computadora a bordo de la silla es por señal inalámbrica Bluetooth; el computador se comunica a través de un cable USB con la plataforma Arduino. Este controlador tiene conexión digital con la plataforma de control MyRIO donde se ejecuta el programa principal de control, que da lugar a las señales PWM, de control de los motores DC que mueven la silla de ruedas.

El diagrama de la figura 14 detalla el flujo de comunicación de datos entre el sensor, el controlador y los periféricos, así como el tipo de señal que se envía y recibe y el orden en que estas señales son decodificadas hasta llegar a controlar el sistema integral y ofrecer el sistema de adquisición de datos.

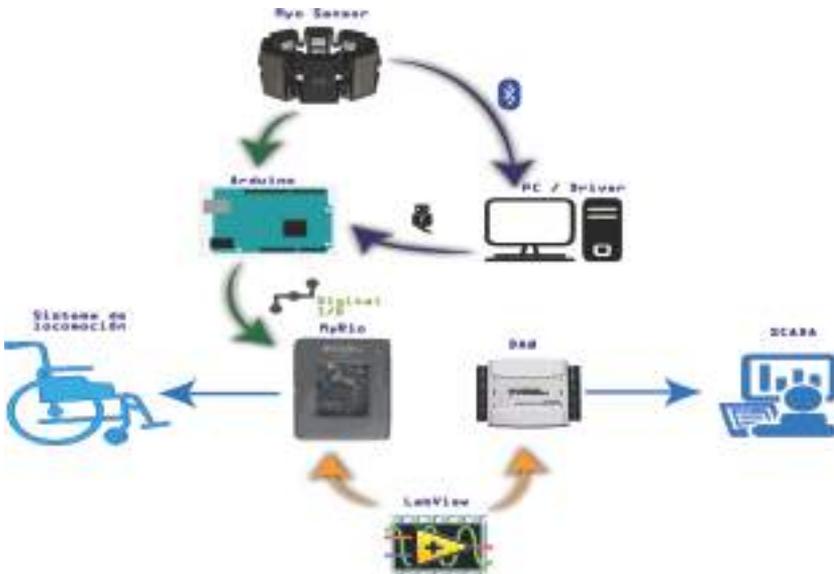


Figura 14. Patrón de movimiento de giro a la derecha  
Elaboración propia

El computador a bordo ejecuta una rutina en el *software* de desarrollo gráfico LabView para generar el programa de supervisión, control y adquisición de datos Scada. Los sensores de corriente miden el amperaje de consumo de cada motor de las ruedas.

Además, el sistema posee dos sensores de voltaje para cada una de las dos baterías y un sensor para el voltaje total, pues no necesariamente funcionan las dos baterías al mismo voltaje.



Figura 15. Hardware de control acoplado a la silla de ruedas  
Elaboración propia

El sistema Scada almacena la data histórica de los sensores en una hoja de cálculo.

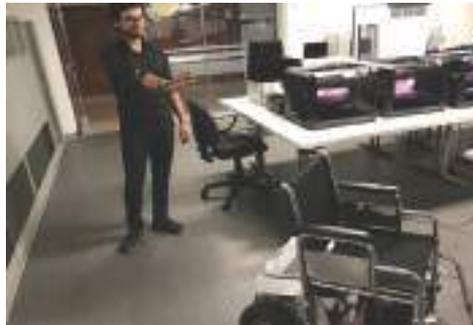


Figura 16. Control de un servomotor por medio de PWM con FPGA myRIO  
Elaboración propia

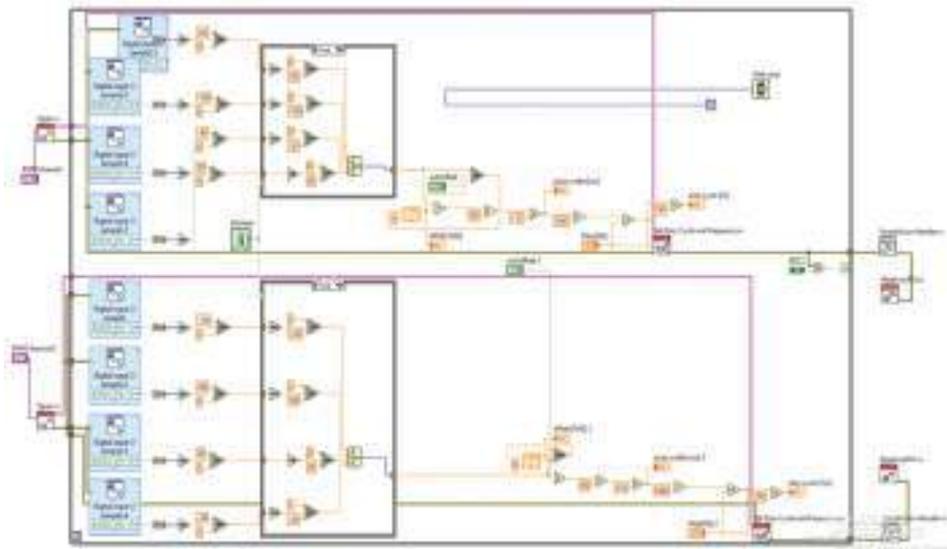
## 2.6 Programación

La facilidad de conexión y de comunicación con el *software* LabVIEW y el procesador myRIO permite reducir las horas de programación, con lo cual logra obtener un código más limpio, más sencillo de comprender y de resultados óptimos.

El algoritmo de control se desarrolla inicialmente en un sistema de lazo abierto que, con los encoder, se convertirá en un lazo de control cerrado. A continuación, se presenta el algoritmo de control.



*Figura 17.* El patrón de movimiento con el antebrazo permite a la silla de ruedas moverse en reversa  
Elaboración propia



*Figura 18.* Algoritmo de control  
Elaboración propia

El control consiste en determinar un patrón de movimientos musculares con el antebrazo. El controlador detectará los pulsos musculares y los asociará con un tipo de movimiento (adelante, reversa, izquierda, derecha) y enviará la señal a los motores, los cuales realizarán los movimientos correspondientes.



*Figura 19.* Asimismo, otro patrón de movimiento permite a la silla de ruedas ir en línea recta  
Elaboración propia

### 3. CONCLUSIONES

#### 3.1 Logros alcanzados en el proyecto

El sistema mecánico diseñado es de fácil montaje y desmontaje para una silla de ruedas convencional.

El *software* programado myRIO nos permite actualmente desplazar la silla convencional en sus cuatro direcciones: adelante, atrás, izquierda, y derecha. Además, puede superar pendientes de hasta diez grados de inclinación.

El uso de las herramientas tecnológicas LabVIEW / myRIO nos permite resolver problemas serios y de importancia social, como el tema sensible de la discapacidad en el país.

## REFERENCIAS

- Doering, E. (2014). *National Instruments myRIO: Project Essentials Guide*. Texas: National Technology and Science Press.
- Goñi, J. C. (2011). *Máquinas, instrumentos y procesos de manufactura*. Lima: Universidad de Lima, Fondo Editorial.
- Instituto Nacional de Estadística e Informática (2015). *Perú: Características de la población con discapacidad*. Lima: INEI.
- Torres Román, M. J. (2012). *Diseño de adaptación y elaboración de un manual de procedimientos para transformar sillas de ruedas convencionales en sillas para pacientes con problemas neurológicos y escasos recursos económicos*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.

# Modelamiento y control de un sistema de tráiler autónomo

Wilder Medina Medina\*

Universidad Nacional de Ingeniería

Recibido: 5 de abril del 2018 / Aprobado: 15 de junio del 2018

doi: 10.26439/ing.ind2018.n036.2457

**RESUMEN:** Se propone una solución mediante un sistema de control de robot móvil tipo tráiler aplicado a una empresa que se encarga del transporte de material, y se demuestra que es una solución aplicable y viable. Se definió un modelo matemático que consiste en integrar dos técnicas de control: lineal LQR y lógica difusa. Se muestran resultados favorables del sistema de control y seguimiento de trayectoria, y se señalan las mejoras que se tienen al integrar ambas técnicas de control y que el sistema es capaz de responder correctamente a fin de guiar al robot por cualquier tipo de trayectoria.

*Palabras clave:* lógica difusa / control LQR / robots móviles / sistemas dinámicos no holonómicos

## Modeling and control of a self-contained trailer system

**ABSTRACT:** A solution is proposed by means of a trailer-type mobile robot control system applied to a company in charge of transporting material, demonstrating that it is an applicable and viable solution. A mathematical model was defined, involving the integration of two control techniques: linear quadratic regulator (LQR) and fuzzy logic. Favorable results of the trajectory control and tracking system are shown, pointing out the improvements achieved when integrating both control techniques and the ability of the system to respond correctly to guide the robot by any type of trajectory.

*Keywords:* fuzzy logic / LQR control / mobile robots / non-holonomic dynamical systems

---

\* Correo electrónico: wmedinam@gmail.com

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Robots móviles

Con el paso de los años, se ha ido observando un gran crecimiento en el uso de robots móviles tanto aéreos, terrestres y acuáticos en muchos ámbitos y áreas de investigación, con el fin de facilitar el acceso a lugares que resultan difíciles para un ser humano como transportar materiales en entornos complejos, analizar grandes áreas de manera autónoma, entre otras actividades.

El área de investigación, en el desarrollo de estos sistemas robóticos, se ha basado en el desarrollo de la estructura del robot de acuerdo con la aplicación que se le dará, la electrónica para controlar las partes y sensar el entorno en el cual se encuentra el robot y el aspecto más importante y de mayor desarrollo investigativo: la técnica de control. Esta última es la que permite al robot tener un comportamiento autónomo conociendo su entorno y logrando su objetivo de seguimiento de trayectoria. De esta manera no requiere el control manual de una persona que lo esté guiando a lo largo de su trayecto.

Dentro de los distintos modelos de vehículos móviles que existen, se encuentra el tipo tráiler, el cual viene siendo usado en diferentes campos de la industria, lo cual enfatiza su uso en el tema de entrega o transporte de material. La gran ventaja que tiene es que puede realizar labores de transporte de grandes cargas, lo cual incrementa su eficiencia de acuerdo con la cantidad de remolques conectados guiados por la parte de tracción. Sin embargo, los robots tipo tráiler tienen un muy complejo sistema de funcionamiento a controlar debido a su modelo no lineal, inestabilidad y no-holonómico, más aún en movimiento de retroceso, lo cual conlleva a que exista mucha investigación sobre cómo controlarlo mediante el análisis de movimiento que realiza. En la mayoría de investigaciones, el modelo cinemático utilizado es el que se considera un movimiento a baja velocidad y en el cual no hay deslizamiento de ruedas, con lo que el modelo es más práctico, por lo que, para esta investigación, se realiza el modelamiento sobre la base de un análisis geométrico.

Entre las diferentes técnicas de control utilizadas, la consideración se encuentra en la intención de querer controlar al robot en toda su región de funcionamiento o únicamente en una región local. Es así como este trabajo de investigación busca desarrollar una estrategia de control de un tráiler de dos cuerpos basado en un control lineal integrado con la

lógica difusa, para así llevar al tráiler a la posición deseada o que llegue a seguir trayectorias lineales, circulares o sinusoidales y que limite el ángulo formado por ambos cuerpos para evitar que colapsen. De esta manera, poder aplicarlo al sistema autónomo de empresas como puertos o terminales de almacenamiento, que utilizan estos vehículos para realizar la carga y descarga de mercadería transportada y así automatizar el proceso, para que los tráilers funcionen automáticamente y sepan qué ruta tomar para llegar a los puntos de carga o descarga y así reducir el uso de personal únicamente para este proceso, que puede ser utilizado para otras actividades en paralelo, así como también reducir los riesgos que se pueden generar en una conducción manual, y brindar a la empresa mayor seguridad, eficacia, tiempo y más mano de obra disponible.

## 2. MODELAMIENTO DEL ROBOT MÓVIL TIPO TRÁILER

El desarrollo del modelamiento del tráiler se realiza a partir de un análisis geométrico, realizando un procedimiento de movimiento de retroceso en un pequeño intervalo de tiempo, generando así las condiciones de posición en un instante  $t$  y en un instante  $t + \Delta t$ . En la figura 1 se muestra como está compuesto el tráiler, que tiene en la parte frontal las ruedas de dirección y las ruedas de tracción, mientras que en la parte de la carga consiste únicamente de ruedas de giro libre.

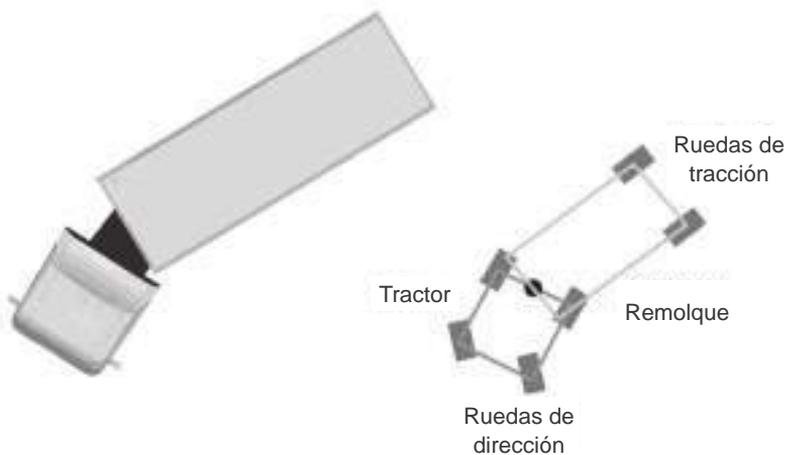


Figura 1. Robot móvil tipo tráiler  
Elaboración propia

Considerando que las ruedas del lado derecho e izquierdo se mueven de igual manera, se realiza el análisis como si fueran dos barras, basado en el análisis del robot móvil tipo bicicleta como se muestra en la figura 2.

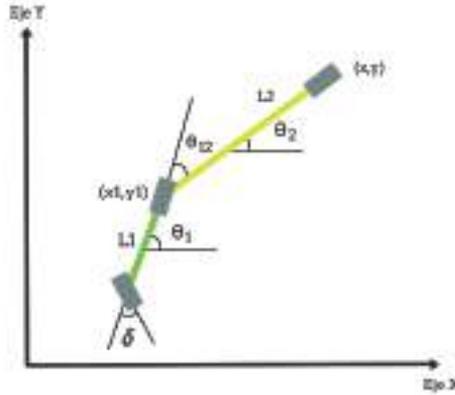


Figura 2. Análisis mediante el modelo tipo bicicleta  
Elaboración propia

Primero se pasa a realizar el cálculo de las ecuaciones de las variables de posición; para esto, se analiza la figura 2.3 y se describe su posición luego de un instante de tiempo  $\Delta t$  de retroceso como en la siguiente figura 3:

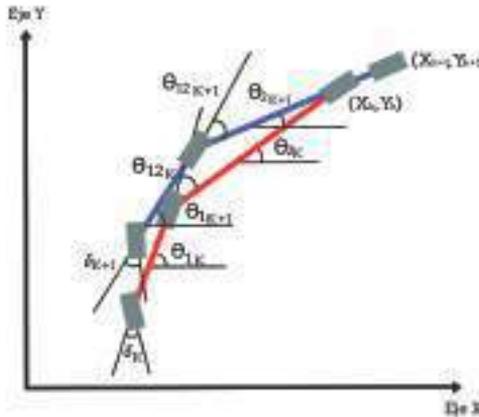


Figura 3. Análisis con movimiento en retroceso en un instante de tiempo  
Elaboración propia

Para obtener las ecuaciones del modelo del sistema, se realiza un análisis geométrico según los triángulos que se forman entre el cuerpo del tráiler en cada instante de tiempo, de tal manera que se analiza el triángulo formado por las ruedas de tracción en los puntos A y B y se traza un triángulo como en la figura 4:

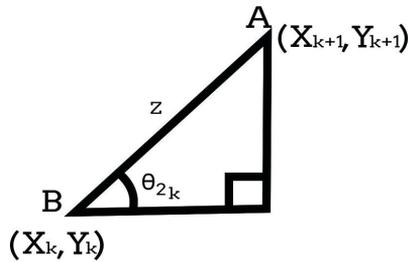


Figura 4. Primer triángulo para análisis del modelo matemático del tráiler  
Elaboración propia

Donde  $z$  viene a ser la distancia recorrida en un instante de tiempo  $\Delta t$ , con lo que se pueden generar las siguientes ecuaciones

$$x_{k+1} - x_k = z \cos(\theta_k) \tag{2.1}$$

$$y_{k+1} - y_k = z \sin(\theta_k) \tag{2.2}$$

Mediante este procedimiento, se logra obtener las ecuaciones del sistema en tiempo discreto:

$$x_{k+1} = x_k + r \cos(\theta_{12k}) \cos(\theta_{2k}) \tag{2.3}$$

$$y_{k+1} = y_k + r \cos(\theta_{12k}) \sin(\theta_{2k}) \tag{2.4}$$

$$\theta_{2k+1} = \theta_{2k} - \frac{r}{L_1} \sin(\theta_{12k}) \tag{2.5}$$

$$\theta_{1k+1} = \theta_{1k} - \frac{r}{L_1} \tan(\delta_k) \tag{2.6}$$

$$\theta_{12k+1} = \theta_{12k} + \frac{r}{L_2} \sin(\theta_{12k}) - \frac{r}{L_1} \tan(\delta_k) \tag{2.7}$$

Pasando las ecuaciones del sistema de tiempo discreto a tiempo continuo:

$$\dot{x} = v \cos(\theta_{12}) \cos(\theta_2) \quad (2.8)$$

$$\dot{y} = v \cos(\theta_{12}) \sin(\theta_2) \quad (2.9)$$

$$\dot{\theta}_2 = -\frac{v}{L_2} \sin(\theta_{12}) \quad (2.10)$$

$$\dot{\theta}_1 = -\frac{v}{L_1} \tan(\delta) \quad (2.11)$$

$$\dot{\theta}_{12} = \frac{v}{L_2} \sin(\theta_{12}) - \frac{v}{L_1} \tan(\delta) \quad (2.12)$$

### 3. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL AUTÓNOMO

#### 3.1 Estrategia de control lineal

Teniendo definidas las ecuaciones de modelado del robot tipo tráiler, se debe pasar a definir las variables de estado a utilizar en el sistema de control. Considerando que el vehículo realiza un movimiento en retroceso a una velocidad  $c$  onstante ( $v = const.$ ), se define el vector de estado  $q$  y la señal de control  $u$ :

$$x = [y \quad \theta_2 \quad \theta_{12}]$$

$$u = \tan(\delta)$$

##### 3.1.1 Linealización y Ley de Control

El problema a resolver es el hacer que el robot móvil tenga un control autónomo de su posición y siga una trayectoria deseada de tal manera que converja a un valor deseado, por lo que se propone una estrategia de control, en la cual se busca que el vehículo converja a un valor deseado en la posición  $y^* = 0$  con una orientación horizontal  $\theta_2^* = 0^\circ$ ,  $\theta_{12}^* = 0^\circ$  y luego simplemente moverlo de manera recta hacia una posición  $x^*$  y detenerlo, lo cual permite que no se requiera el control autónomo del vehículo mediante la variable  $x$ .

De esta manera, para realizar el diseño de la ley de control lineal del sistema, se considera linealizar el modelo para que trabaje en una

pequeña vecindad de funcionamiento alrededor de los valores de orientación  $\theta_2^* = 0^\circ$ ,  $\theta_{12}^* = 0^\circ$ . Aplicando los valores deseados para la linealización, se obtienen las siguientes ecuaciones del modelo linealizado:

$$\dot{y} = v\theta_2 \tag{3.1}$$

$$\dot{\theta}_2 = -\frac{v}{L_2}\theta_{12} \tag{3.2}$$

$$\dot{\theta}_{12} = \frac{v}{L_2}\theta_{12} - \frac{v}{L_1}\tan(\delta) \tag{3.3}$$

Llevando dichas ecuaciones a un diagrama espacio-estado de la forma:

$$\dot{x} = Ax + Bu \tag{3.4}$$

Se tiene el siguiente modelo espacio-estado basado en la forma linealizada:

$$\begin{bmatrix} \dot{y} \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & v & 0 \\ 0 & 0 & -v/L_2 \\ 0 & 0 & v/L_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ \theta_2 \\ \theta_{12} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -v/L_1 \end{bmatrix} \tan(\delta) \tag{3.5}$$

Donde:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & v & 0 \\ 0 & 0 & -v/L_2 \\ 0 & 0 & v/L_2 \end{bmatrix} \quad y \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -v/L_1 \end{bmatrix}$$

Teniendo el modelo linealizado, se procede a definir la ley de control que permita generar la señal de control adecuada para estabilizar el sistema a su valor deseado, el cual se busca que tenga la siguiente forma.

$$\tan(\delta) = -k_1y - k_2\theta_2 - k_3\theta_{12} \tag{3.6}$$

Donde  $k_1, k_2, k_3$  son las ganancias del controlador y sus valores deben ser calculados adecuadamente para garantizar una buena estabilización del sistema en lazo cerrado.

Antes de definir la técnica para el diseño del controlador, se debe verificar que el sistema es controlable, por lo que se debe analizar que la matriz de controlabilidad sea de rango completo ( $n = 3$ ), igual a la canti-

dad de variables de estado del sistema. En caso contrario, el sistema no puede ser controlado.

Siendo la matriz de controlabilidad definida por:

$$Co = [B \quad AB \quad A^2B] \quad (3.7)$$

Para realizar el cálculo de la matriz de controlabilidad, se reemplazan los valores constantes del modelo lineal:  $v = 3m/seg$ ,  $L_1 = 2m$ ,  $L_2 = 4m$ , teniendo el siguiente sistema espacio-estado:

$$\begin{bmatrix} \dot{y} \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & -0.75 \\ 0 & 0 & 0.75 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ \theta_2 \\ \theta_{12} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1.5 \end{bmatrix} \tan(\delta) \quad (3.8)$$

Siendo:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & -0.75 \\ 0 & 0 & 0.75 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1.5 \end{bmatrix}$$

La matriz de controlabilidad queda definida por:

$$Co = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.3375 \\ 0 & 0.1125 & 0.0844 \\ -1.5 & -0.1125 & -0.0844 \end{bmatrix}$$

Y calculando el rango de la matriz:

$$\text{rank}(Co) = 3$$

Y, siendo coincidente con la cantidad de variables de estado, se concluye que el sistema es controlable en lazo cerrado.

### 3.2 Diseño de la lógica difusa

Se utiliza un controlador difuso aplicado al rango de variación del ángulo  $\theta_{12}$ , el cual es particionado en tres particiones, con lo que se busca poder tener un control indirecto del ángulo de acuerdo con la señal de control.

La forma con la cual se utilizará el controlador difuso es que, cuando el ángulo  $\theta_{12}$  esté cercano a su punto de operación  $\theta_{12}^* = 0$ , funcione de

manera normal el controlador LQR, pero, cuando el ángulo se esté disparando hacia sus extremos, forzar la señal de control de tal manera que lleve al ángulo  $\theta_{12}$  de vuelta dentro del rango de su punto de operación.

La función de pertenencia propuesta es la que se muestra en la figura 5:

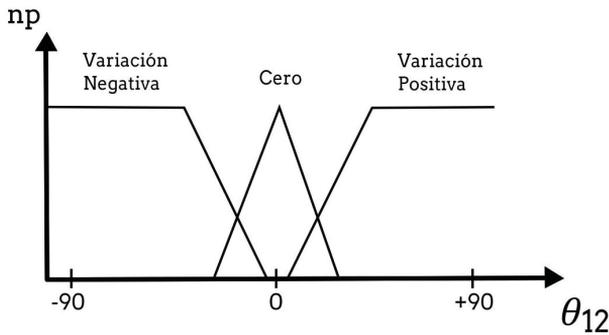


Figura 5. Función de pertenencia para el ángulo  $\theta_{12}$   
Elaboración propia

La cual es diseñada sobre la base de analizar cómo varía el ángulo  $\theta_{12}$  y qué efecto tendría la señal de control para cambiar su variación, y esto se puede apreciar en la figura 3.1, que al analizar se observa que, para que exista una variación positiva de  $\theta_{12}$ , la señal de control debe ser positiva y, de igual manera, si se desea que la variación sea negativa, se requiere una señal de control negativa.

Entonces cuando el ángulo  $\theta_{12}$  este variando positivamente, se requerirá generarle una variación negativa para que vuelva a su punto de operación, con lo que se tendría que aplicar una señal de control negativa, que significa aplicarle el máximo ángulo posible de giro de dirección en el sentido negativo y regresarlo cercano a cero; y lo mismo cuando ocurra una variación negativa, se requerirá generarle una variación positiva, con lo que se tendría que aplicar una señal de control positiva. Y se expresaría en la forma *SI-ENTONCES*:

SI  $\theta_{12} = \text{Variación Negativa}$ , ENTONCES  $\delta = \delta_{max}$  (*positivo*)

SI  $\theta_{12} = \text{Cero}$ , ENTONCES  $\delta = \text{Ley de Control}$

SI  $\theta_{12} = \text{Variación Positiva}$ , ENTONCES  $\delta = -\delta_{max}$  (*negativo*)

De esta manera se estaría corrigiendo el problema del ángulo entre los dos cuerpos, que, para garantizar la mejor respuesta, simplemente se debe jugar con el rango de variación de las particiones, de acuerdo con el máximo ángulo que se desea que llegue  $\theta_{12}$ .

### 3.3 Pruebas de convergencia con el sistema de control híbrido

Para el control del tráiler se han integrado dos técnicas de control: una ley de control lineal alrededor de un punto de operación y la lógica difusa para controlar el ángulo de unión de los dos cuerpos del tráiler y evitar que supere un máximo y lo lleve hacia el punto de operación a trabajar.

A continuación, se realizan pruebas para analizar la respuesta del sistema de control utilizando LQR con lógica difusa. Para esto se define la siguiente función de pertenencia para el control del ángulo  $\theta_{12}$  que se muestra en la figura 6.

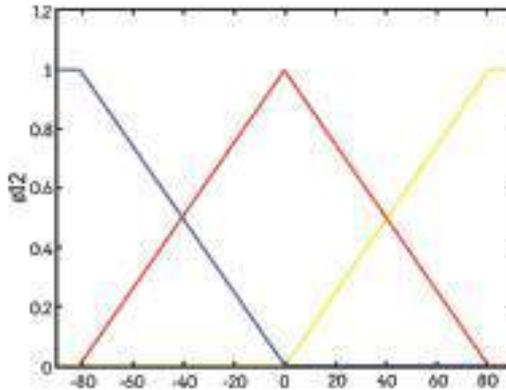


Figura 6. Función de pertenencia utilizada en el algoritmo de Matlab  
Elaboración propia

### 3.4 Diseño de la función de pertenencia para la variable de posición

Debido a que los valores de las ganancias del controlador fueron calculados de acuerdo con su modelo lineal bajo un punto de operación  $y^* = 0$ , ocurre que estas ganancias no funcionarán correctamente cuando la posición se encuentre alejada de dicho punto de operación, lo cual generará que no se tenga una respuesta óptima o se desestabilice el robot.

Para eso se propone el uso de particiones para la variable de posición del robot, de tal manera que para cada cierto rango de la posición  $y$  se le asignen unos valores de ganancia de controlador, y así funcionen correctamente para la posición del robot dentro del rango de la partición. El análisis parte de revisar el valor de la variable  $y$ , revisar la función de pertenencia y ver qué parámetros de ganancia corresponden de acuerdo con la partición correspondiente.

De esta manera se tendrían distintos valores de ganancia del controlador según la posición, los cuales deben ser calculados y probados para cada rango de la partición y así se solucionaría el problema.

Se propone una función de pertenencia de 7 particiones, como se muestra en la figura 7, donde cada partición contará con un grupo de parámetros de ganancias del controlador que serán simétricos de acuerdo con el punto de operación, los cuales deben ser generados variando los pesos hasta obtener una buena respuesta para cada partición.

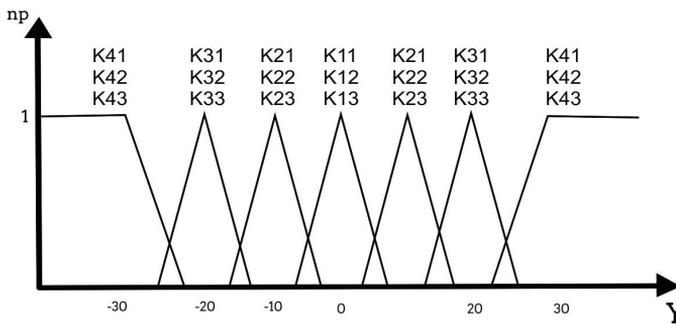


Figura 7. Modelo de la función de pertenencia para la variable de posición  
Elaboración propia

En la figura 7, correspondiente a la función de pertenencia de la posición para corregir el problema de alejamiento del punto de operación, se observa que se definen las ganancias de controlador para cada partición, pero que son simétricas con su contraparte al otro lado del punto de operación.

El análisis de selección de las ganancias del controlador se da de acuerdo con qué partición corresponde la ubicación actual de  $Y$ , en la cual se utilizarían los niveles de pertenencia y el método de la media ponderada para así poder asignarle el valor adecuado.

#### 4. CONTROL DEL ROBOT MÓVIL PARA SEGUIMIENTO DE TRAYECTORIAS

En el apartado anterior se vio cómo llevar al robot móvil a una convergencia con respecto a un valor deseado de valor constante. Ahora se propone el tema de seguimiento de trayectoria, en donde se definen dos tipos de trayectorias básicas: lineal y circular, y cuando se tiene una trayectoria diseñada como una función general, partiendo del análisis de una señal sinusoidal.

El objetivo para el seguimiento de trayectoria es poder definir correctamente los valores deseados para cada caso, de tal manera que permitan llevar al tráiler por dicha trayectoria, de modo que se deberán definir las ecuaciones correspondientes para cada valor deseado en cada tipo de trayectoria de acuerdo con un análisis geométrico que se realiza al conocer cómo debería ser el movimiento y qué parámetros están involucrados.

##### 4.1 Trayectoria deseada lineal

En la figura 8 se puede observar cómo es la trayectoria lineal a seguir por el robot móvil y los parámetros a contemplar para el análisis de las variables deseadas requeridas.

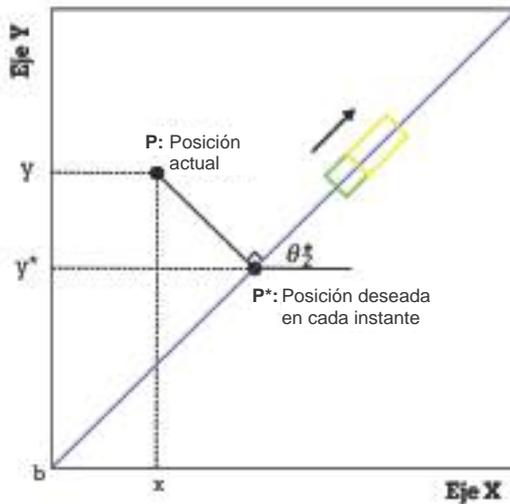


Figura 8. Trayectoria lineal y sus parámetros  
Elaboración propia

Realizando el análisis geométrico, cogemos el triángulo en la figura 9 obtenido de la figura 9:

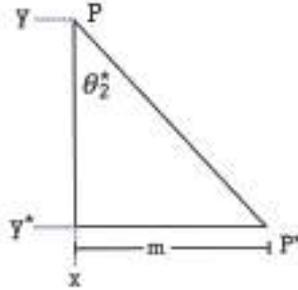


Figura 9. Primer triángulo para análisis de la trayectoria lineal  
Elaboración propia

Se pueden obtener la siguiente ecuación:

$$m = (y - y^*) \tan \theta_2^* \tag{4.1}$$

Y analizando el siguiente triángulo de la figura 8:

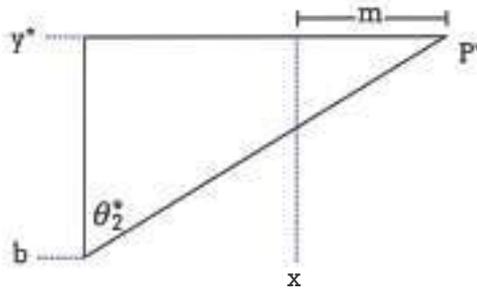


Figura 10. Segundo triángulo para análisis de la trayectoria lineal  
Elaboración propia

Se puede generar la siguiente ecuación:

$$\tan \theta_2^* = \frac{y^* - b}{x + m} \tag{4.2}$$

Reemplazando (4.1) en (4.2) y despejando:

$$(x + (y - y^*) \tan \theta_2^*) \tan \theta_2^* = y^* - b \tag{4.3}$$

$$x \tan \theta_2^* + y \tan^2 \theta_2^* + b = y^* + y^* \tan^2 \theta_2^* \tag{4.4}$$

Despejando con respecto a  $y^*$

$$y^* = \frac{x \tan \theta_2^* + y \tan^2 \theta_2^* + b}{1 + \tan^2 \theta_2^*} \tag{4.5}$$

Obteniendo el valor deseado de  $y^*$  para una línea recta con pendiente igual a  $\theta_2^*$ .

#### 4.2 Trayectoria deseada circular

En la figura 11, se puede observar cómo es la trayectoria circular a seguir por el robot móvil y los parámetros a contemplar para el análisis de las variables deseadas requeridas.

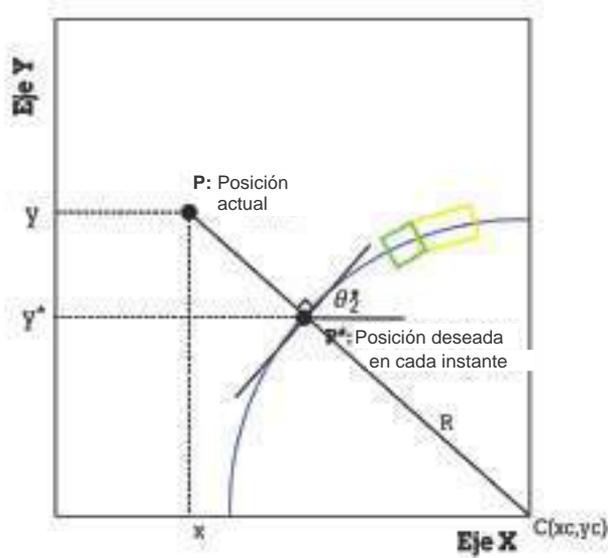


Figura 11. Trayectoria circular y sus parámetros  
Elaboración propia

Realizando el análisis geométrico para la trayectoria circular, se toma en cuenta el triángulo indicado en la figura 11:

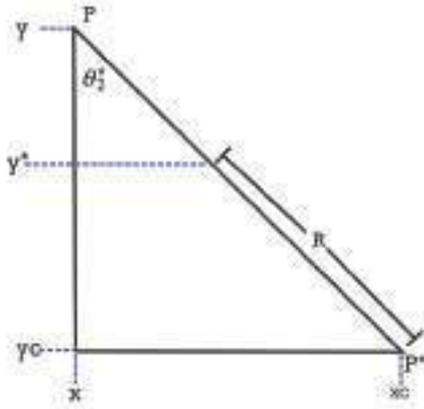


Figura 12. Triángulo para el análisis de la trayectoria circular  
Elaboración propia

Del cual se pueden obtener las siguientes relaciones:

$$\frac{y^* - y_c}{y - y_c} = \frac{R}{\sqrt{(y - y_c)^2 + (x_c - x)^2}} \quad (4.6)$$

Despejando la variable de posición deseada:

$$y^* = \frac{R(y - y_c)}{\sqrt{(y - y_c)^2 + (x_c - x)^2}} + y_c \quad (4.7)$$

También se obtiene:

$$\tan \theta_2^* = \frac{x_c - x}{y - y_c} \quad (4.8)$$

Obteniendo los ángulos deseados:

$$\theta_2^* = \tan^{-1} \left( \frac{x_c - x}{y - y_c} \right) \quad (4.9)$$

$$\theta_{12}^* = \tan^{-1} \left( \frac{L_2}{R} \right) \quad (4.10)$$

$$\delta^* = \tan^{-1} \left( \frac{L_1}{\sqrt{L_2^2 + R^2}} \right) \quad (4.11)$$

En este caso es necesario obtener los valores deseados del ángulo  $\theta_{12}^*$  y  $\delta^*$ , ya que debido al movimiento circular que se daría por la trayectoria, estas variables, pese a ser constantes, requieren de un valor numérico específico de acuerdo con el tipo de movimiento circular dado.

### 4.3 Trayectoria general

En este caso, se busca definir los valores deseados de las variables del sistema para que cumplan frente a cualquier tipo de trayectoria definida por una función matemática. Para poder encontrar las ecuaciones que cumplan con una función general, se realiza el análisis utilizando una función sinusoidal, con el objetivo que al final se reemplazase la función sinusoidal por una función general.

Utilizando la trayectoria sinusoidal de la figura 13:

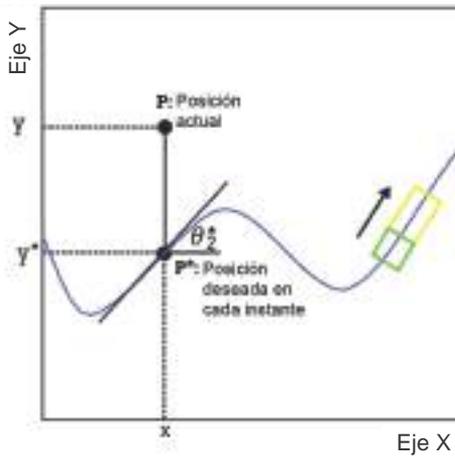


Figura 13. Trayectoria sinusoidal y sus parámetros  
Elaboración propia

En este tipo de trayecto se define la trayectoria  $f(x)$ , que sería una señal sinusoidal.

$$y = f(x) \tag{4.12}$$

$$f(x) = A \sin(f_s x) \tag{4.13}$$

$$y^* = A \sin(f_s x) \tag{4.14}$$

Dividiendo las ecuaciones (3.32) y (3.33), se obtiene:

$$\frac{\dot{y}}{\dot{x}} = \frac{v \cos(\theta_{12}) \cos(\theta_2)}{v \cos(\theta_{12}) \sin(\theta_2)} \quad (4.15)$$

$$\frac{\dot{y}}{\dot{x}} = \tan(\theta_2) \quad (4.16)$$

Observando que se puede calcular el ángulo  $\theta_2$  sobre la base de dividir las derivadas de las posiciones, pero utilizando el criterio:

$$\frac{dy/dt}{dx/dt} = \frac{dy}{dx}$$

Se deriva (4.14) con respecto a  $x$ , resultando:

$$\frac{dy}{dx} = Af_s \cos(f_s x) \quad (4.17)$$

Reemplazando (4.17) en (4.16):

$$\tan(\theta_2) = Af_s \cos(f_s x) \quad (4.18)$$

Despejando se obtiene la ecuación para el valor deseado de  $\theta_2$ :

$$\theta_2^* = \tan^{-1}(Af_s \cos(f_s x)) \quad (4.19)$$

Derivando (4.19) con respecto al tiempo:

$$\frac{d\theta_2^*}{dt} = \frac{-Af_s^2 \sin(f_s x) \dot{x}}{1 + (Af_s \cos(f_s x))^2} \quad (4.20)$$

Reemplazando (3.32) en (4.20);

$$\dot{\theta}_2 = \frac{-Af_s^2 \sin(f_s x) (v \cos(\theta_{12}) \cos(\theta_2))}{1 + \tan^2(\theta_2)} \quad (4.21)$$

Reemplazando (3.34) en (4.21):

$$-\frac{v}{L_2} \sin(\theta_{12}) = \frac{-Af_s^2 \sin(f_s x) (v \cos(\theta_{12}) \cos(\theta_2))}{\frac{1}{\cos^2(\theta_2)}} \quad (4.21)$$

Acomodando para despejar  $\theta_{12}$  :

$$\frac{1}{L_2} \sin(\theta_{12}) = Af_s^2 \sin(f_s x) \cos(\theta_{12}) \cos^3(\theta_2) \quad (4.22)$$

$$\frac{\sin(\theta_{12})}{\cos(\theta_{12})} = L_2 Af_s^2 \sin(f_s x) \cos^3(\theta_2) \quad (4.23)$$

$$\tan(\theta_{12}) = L_2 Af_s^2 \sin(f_s x) \cos^3(\theta_2) \quad (4.24)$$

Se obtiene la ecuación para el valor deseado de  $\theta_{12}$  :

$$\theta_{12}^* = \tan^{-1} \left( L_2 Af_s^2 \sin(f_s x) \cos^3(\theta_2) \right) \quad (4.25)$$

Derivando (4.25) con respecto al tiempo:

$$\frac{d\theta_{12}^*}{dt} = \frac{\left( L_2 Af_s^2 \right) \left( \left( f_s \cos(f_s x) \dot{x} \right) \cos^3(\theta_2) + \sin(f_s x) \left( -3 \cos^2(\theta_2) \sin(\theta_2) \dot{\theta}_2 \right) \right)}{1 + \left( L_2 Af_s^2 \sin(f_s x) \cos^3(\theta_2) \right)^2} \quad (4.26)$$

Reemplazando (3.32) y (3.34) en (4.26), se tiene:

$$\dot{\theta}_{12} = \frac{\left( L_2 Af_s^2 \right) \left( \left( f_s \cos(f_s x) \cos^3(\theta_2) \right) \left( v \cos(\theta_{12}) \cos(\theta_2) \right) - \left( 3 \sin(f_s x) \cos^2(\theta_2) \sin(\theta_2) \right) \left( -\frac{v}{L_2} \sin(\theta_{12}) \right) \right)}{1 + \tan^2(\theta_{12})} \quad (4.27)$$

Acomodando y despejando para obtener  $\delta$  :

$$\frac{v}{L_2} \sin(\theta_{12}) - \frac{v}{L_1} \tan(\delta) = \frac{\left( v L_2 Af_s^2 \right) \left( \left( f_s \cos(f_s x) \cos^3(\theta_2) \cos(\theta_{12}) \cos(\theta_2) \right) + \frac{3}{L_2} \sin(f_s x) \cos^2(\theta_2) \sin(\theta_2) \sin(\theta_{12}) \right)}{\frac{1}{\cos^2(\theta_{12})}} \quad (4.28)$$

$$\frac{v}{L_2} \sin(\theta_{12}) - \frac{v}{L_1} \tan(\delta) = \left( v L_2 Af_s^2 \right) \left( f_s \cos(f_s x) \cos^4(\theta_2) \cos^3(\theta_{12}) + \frac{3}{L_2} \sin(f_s x) \cos^2(\theta_2) \sin(\theta_2) \sin(\theta_{12}) \cos^2(\theta_{12}) \right) \quad (4.29)$$

$$-\frac{1}{L_1} \tan(\delta) = \left( L_2 A f_s^2 \right) \left( f_s \cos(f_s x) \cos^4(\theta_2) \cos^3(\theta_{12}) + \frac{3}{L_2} \sin(f_s x) \cos^2(\theta_2) \sin(\theta_2) \sin(\theta_{12}) \cos^2(\theta_{12}) \right) - \frac{1}{L_2} \sin(\theta_{12}) \quad (4.30)$$

$$\frac{1}{L_1} \tan(\delta) = -L_2 A f_s^3 \cos(f_s x) \cos^4(\theta_2) \cos^3(\theta_{12}) - \frac{3L_2 A f_s^2}{L_2} \sin(f_s x) \cos^2(\theta_2) \sin(\theta_2) \sin(\theta_{12}) \cos^2(\theta_{12}) + \frac{1}{L_2} \sin(\theta_{12}) \quad (4.31)$$

$$\frac{1}{L_1} \tan(\delta) = -L_2 A f_s^3 \cos(f_s x) \cos^4(\theta_2) \cos^3(\theta_{12}) + \frac{1}{L_2} \sin(\theta_{12}) (1 - 3L_2 A f_s^2 \sin(f_s x) \cos^2(\theta_2) \sin(\theta_2) \cos^2(\theta_{12})) \quad (4.32)$$

$$\frac{1}{L_1} \tan(\delta) = -L_2 A f_s^3 \cos(f_s x) \cos^4(\theta_2) \cos^3(\theta_{12}) + \frac{1}{L_2} \sin(\theta_{12}) (1 - 3L_2 A f_s^2 \sin(f_s x) \cos^3(\theta_2) \frac{\sin(\theta_2) \cos^2(\theta_{12})}{\cos(\theta_2)}) \quad (4.33)$$

$$\frac{1}{L_1} \tan(\delta) = -L_2 A f_s^3 \cos(f_s x) \cos^4(\theta_2) \cos^3(\theta_{12}) + \frac{1}{L_2} \sin(\theta_{12}) (1 - 3 \tan(\theta_{12}) \frac{\sin(\theta_2) \cos^2(\theta_{12})}{\cos(\theta_2)}) \quad (4.34)$$

$$\frac{1}{L_1} \tan(\delta) = -L_2 A f_s^3 \cos(f_s x) \cos^4(\theta_2) \cos^3(\theta_{12}) + \frac{1}{L_2} \sin(\theta_{12}) (1 - 3 \tan(\theta_2) \sin(\theta_{12}) \cos(\theta_{12})) \quad (4.35)$$

$$\frac{1}{L_1} \tan(\delta) = -L_2 A f_s^3 \cos(f_s x) \cos^4(\theta_2) \cos^3(\theta_{12}) + \frac{1}{L_2} \sin(\theta_{12}) (1 - 1.5 \tan(\theta_2) \sin(2\theta_{12})) \quad (4.36)$$

$$\tan(\delta) = -L_1 L_2 A f_s^3 \cos(f_s x) \cos^4(\theta_2) \cos^3(\theta_{12}) + \frac{L_1}{L_2} \sin(\theta_{12}) (1 - 1.5 \tan(\theta_2) \sin(2\theta_{12})) \quad (4.37)$$

$$\delta^* = \text{atan}(-L_1 L_2 A f_s^3 \cos(f_s x) \cos^4(\theta_2) \cos^3(\theta_{12}) + \frac{L_1}{L_2} \sin(\theta_{12}) (1 - 1.5 \tan(\theta_2) \sin(2\theta_{12}))) \quad (4.38)$$

Sabiendo que:

$$y^* = f(x) = A \sin(f_s x) \tag{4.39}$$

Derivando con respecto a  $x$  se tiene que:

$$f'(x) = Af_s \cos(f_s x) \tag{4.40}$$

$$f''(x) = -Af_s^2 \sin(f_s x) \tag{4.41}$$

$$f'''(x) = -Af_s^3 \cos(f_s x) \tag{4.42}$$

Por lo que se puede expresar las ecuaciones (4.19), (4.25), (4.38), de acuerdo con cualquier función dependiente de  $x$ , de tal manera que se tiene cuatro ecuaciones de referencia para las variables de estado y de control en función de cualquier tipo de trayectoria que pueda ser expresada en una función.

$$y^* = f(x) \tag{4.43}$$

$$\theta_2^* = \tan^{-1}(f'(x)) \tag{4.44}$$

$$\theta_{12}^* = \tan^{-1}\left(-L_2 f''(x) \cos^3(\theta_2)\right) \tag{4.45}$$

$$\delta^* = \text{atan}\left(L_1 L_2 f'''(x) \cos^4(\theta_2) \cos^3(\theta_{12}) + \frac{L_1}{L_2} \sin(\theta_{12})(1 - 1.5 \tan(\theta_2) \sin(2\theta_{12}))\right) \tag{4.46}$$

## 5. PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA AUTÓNOMO

Debido a que se busca darle una aplicación industrial al sistema autónomo mediante robots móviles tipo tráiler, se propone la implementación en una empresa enfocada en el transporte de carga, para lo cual se deben tener los siguientes conocimientos previos del lugar a ser aplicado:

- Área de funcionamiento.
- Posiciones iniciales y finales donde se ubicarán los robots tipo tráiler.
- La trayectoria a seguir.
- Panel remoto de control para iniciar el proceso.

Con estas consideraciones, se debe realizar el análisis de implementación para obtener el funcionamiento esperado.

### 5.1 Simulación del proceso de la propuesta de implementación

Luego de tener definidas las etapas de funcionamiento, las coordenadas y trayectorias, se procede a realizar la simulación del proceso, de tal manera que se corrobore que es posible realizar el proceso de carga de inicio a fin permitiendo un correcto seguimiento de trayectoria del robot móvil tipo tráiler. Se realizan las siguientes pruebas, utilizando el algoritmo en Matlab, donde se varían las posiciones iniciales, posición de puerta de carga y posiciones finales para el recorrido del robot tipo tráiler.

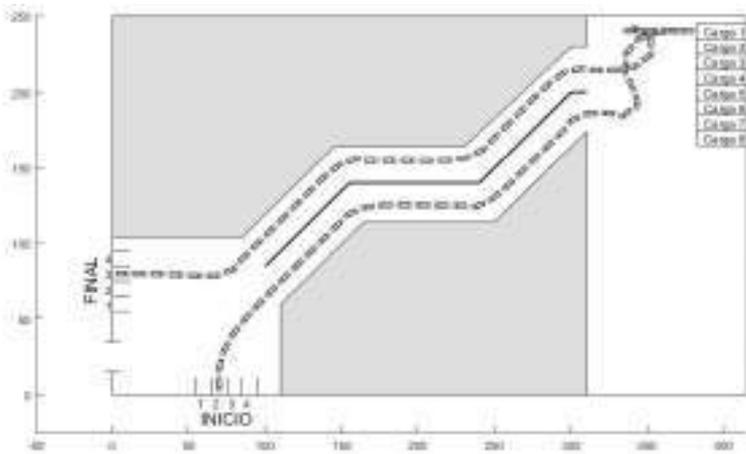


Figura 14. Prueba 1 – Recorrido total del robot tipo tráiler dentro de un almacén  
Elaboración propia

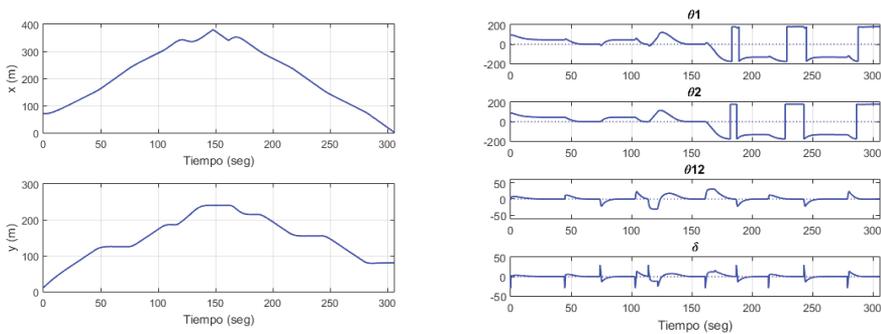


Figura 15. Prueba 1 - Variables del robot tipo tráiler durante el recorrido  
Elaboración propia

**Prueba 2:**

Posición de estacionamiento inicial: 4

Puerta de carga: 5

Posición de estacionamiento final: 1

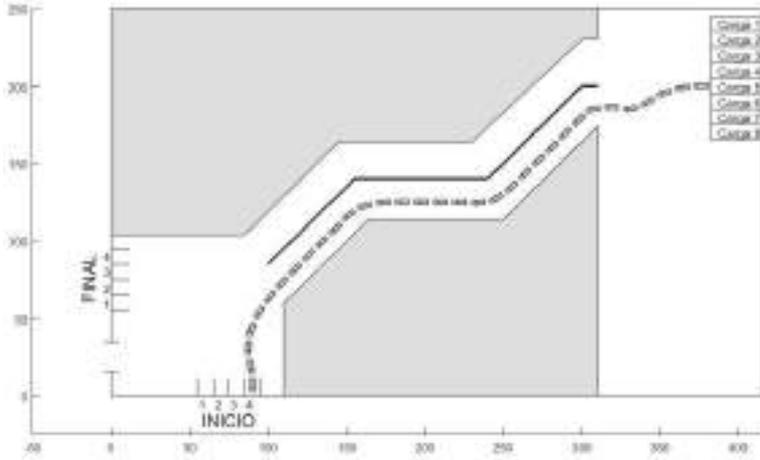


Figura 16. Prueba 2 - Recorrido de ida del robot tipo tráiler dentro de un almacén  
Elaboración propia

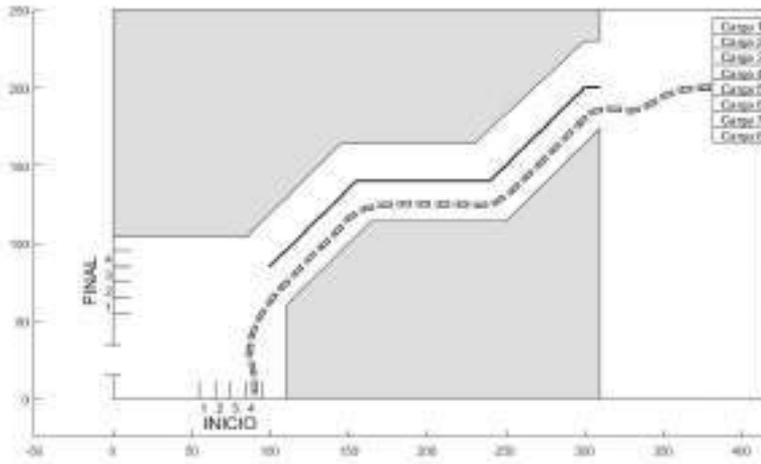


Figura 17. Prueba 2 - Recorrido de vuelta del robot tipo tráiler dentro de un almacén  
Elaboración propia

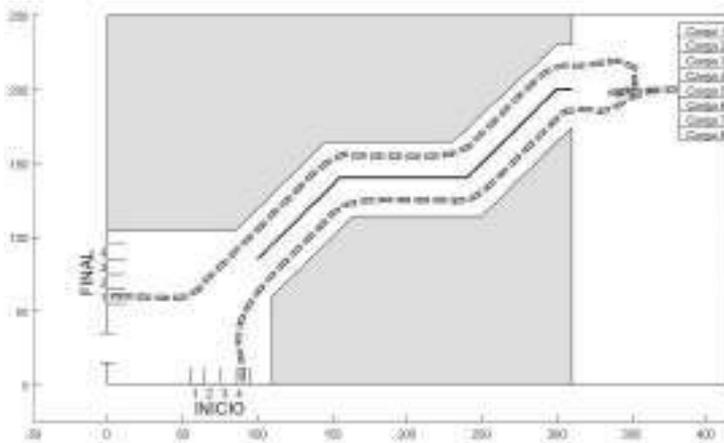


Figura 18. Prueba 2 – Recorrido total del robot tipo tráiler dentro de un almacén  
Elaboración propia

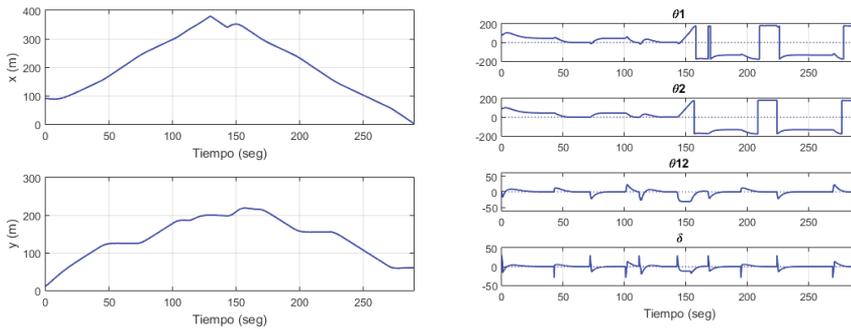


Figura 19. Prueba 2 - Variables del robot tipo tráiler durante el recorrido  
Elaboración propia

En las pruebas se ha demostrado que es posible realizar la implementación del sistema autónomo utilizando robots tipo tráiler, de tal manera que puedan cumplir con el trabajo básico de realizar el proceso de carga o descarga de los contenedores, ya que, al utilizar el control para seguimiento de trayectoria, se puede guiar al robot móvil por cualquier tipo de ruta que pueda ser definida como función matemática, y que normalmente suelen ser rutas rectas o circulares.

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Se diseñó de manera satisfactoria un sistema autónomo para el control y seguimiento de trayectoria de un robot tipo tráiler basado en controlador lineal y lógica difusa.
- Se logró realizar el modelamiento de un robot móvil tipo tráiler de acuerdo con un análisis de movimiento en retroceso en un instante de tiempo, y se obtuvieron así las ecuaciones de modelado del robot.
- Se diseñó un control lineal LQR basado en el modelo linealizado del robot móvil, el cual se realizó para puntos de operación cercanos a cero, y se permitió tener un buen control del robot móvil y poder llevarlo a sus valores deseados.
- Se integró la lógica difusa aplicada al ángulo formado por los dos cuerpos del tráiler, de tal manera que solucione el problema de que dicho ángulo supere los límites permitidos, ya que el controlador lineal por sí solo no tenía un control directo.
- De igual manera, se integró la lógica difusa aplicada a la variable de posición, de tal manera que, pese a haberse diseñado el controlador lineal para un punto de operación, el sistema sea capaz de trabajar correctamente para mayores rangos de la variable de posición, lográndolo gracias a que se definieron particiones por sectores de trabajo de la variable de posición y asignando a cada partición las ganancias del controlador adecuadas para un buen funcionamiento.
- Se propusieron métodos para definir los valores de referencia para casos de trayectoria lineal o circular, definiendo las ecuaciones respectivas para cada variable de estado y de control, de tal manera que permita al controlador llevar al robot por dicha trayectoria.
- Mediante la aplicación de una trayectoria tipo sinusoidal, se propuso un procedimiento para poder definir las referencias de cada variable del sistema de acuerdo con una función general, de tal manera que cualquier tipo de trayectoria, capaz de definirse según una función matemática, pueda integrarse como trayectoria deseada al sistema.
- Se propuso una aplicación a la industria, de tal manera que este trabajo de investigación pueda brindar una solución viable para la problemática dada en una empresa, y así promover el desarrollo tecnológico aplicable a la sociedad.

- Se demostró, sobre la base de simulación, que la implementación del sistema autónomo utilizando robot móvil tipo tráiler es posible aplicarlo a nivel industrial en el área de carga/descarga, permitiendo un proceso preciso y automático.
- Se sugiere realizar el sistema de control que integra un controlador lineal y lógica difusa, aplicado a un tráiler con N cuerpos, incrementando los criterios en cada controlador de acuerdo con la cantidad de cuerpos del tráiler.

## BIBLIOGRAFÍA

- Cárdenas, A. M. (2004). Intelligent car parking using fuzzy-neural networks. In *Proceedings of the 2nd LACCEI International Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology* (pp. 2-4). Florida: LACCEI.
- Cheng, J., Zhang, Y. y Wang, Z. (febrero, 2015). Orientation tracking control of mobile robot with three trailers. In *2015 IEEE International Conference on Robotics and Biometrics (ROBIO)* (pp. 739-744). Zhuhai: IEEE.
- Cheng, J., Zhang, Y. y Wang, Z. (julio, 2015). A direct Lyapunov approach for tracking control of mobile robot with two on-axle hitching trailers. In *2015 27th Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*. (pp. 3429-3432). Singapore: IEEE Industrial Electronics.
- Elhassan, A. (2015). *Autonomous driving system for reversing an articulated vehicle*. Stockholm: KTH Royal Institute of Technology.
- Evestedt, N., Ljungqvist, O. y Axehill, D. (agosto, 2016). Path tracking and stabilization for a reversing general 2-trailer configuration using a cascaded control approach. In *Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2016 IEEE* (pp. 1156-1161). Gothenburg: IEEE.
- Evestedt, N., Ljungqvist, O. y Axehill, D. (diciembre, 2016). Motion planning for a reversing general 2-trailer configuration using Closed-Loop RRT. In *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, (pp. 3690-3697). Daejeon: IEEE.

- Kayacan, E., Kayacan, E., Ramon, H. y Saeys, W. (2015). Learning in centralized nonlinear model predictive control: Application to an autonomous tractor-trailer system. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 23(1), 197-205.
- Kural, K., Hatzidimitris, P., van de Wouw, N., Besselink, I. y Nijmeijer, H. (2017). Active Trailer Steering Control for High Capacity Vehicle Combinations. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2(4), 251-265.
- Leng, Z. y Minor, M. A. (2017). Curvature-Based Ground Vehicle Control of Trailer Path Following Considering Sideslip and Limited Steering Actuation. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 18(2), 332-348.
- Li, B., Wang, K. y Shao, Z. (diciembre, 2015). Time-optimal trajectory planning for tractor-trailer vehicles via simultaneous dynamic optimization. In *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (pp. 3844-3849). Hamburg: IEEE.
- Liao, Y., Ou, Y. y Meng, S. (julio, 2017). Wheeled mobile robot based on Adaptive Linear Quadratic Gaussian control. In *2017 29th Chinese Control And Decision Conference (CCDC)* (pp. 5768-5775). Chongqing: IEEE.
- Lin, F., Lin, Z. y Qiu, X. (agosto, 2016). LQR controller for car-like robot. In *2016 35th Chinese Control Conference (CCC)* (pp. 2515-2518). Chengdu: IEEE.
- Michalek, M. M. (2017). Cascade-Like Modular Tracking Controller for non-Standard N-Trailers. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 25(2), 619-627.
- Moran, A. y Hayase, H. (agosto, 1995). Shortest-trajectory control of autonomous mobile robots using nonlinear observers. In *SICE'95. Proceedings of the 34th SICE Annual Conference. International Session Papers* (pp. 1415-1418). Hokkaido: IEEE.
- Prasad, A., Sharma, B. y Vanualailai, J. (junio, 2016). A Geometric Approach to Motion Control of a Standard Tractor-Trailer Robot. In *2016 3rd Asia-Pacific World Congress on Computer Science and Engineering (APWC on CSE)* (pp. 53-59). Nadi: IEEE.

- Rigatos, G., Siano, P., Wira, P., Busawon, K. y Binns, R. (agosto, 2017). Nonlinear optimal control for autonomous navigation of a truck and trailer system. In *2017 18th International Conference on Advanced Robotics (ICAR)* (pp. 505-510). Hong Kong: IEEE.
- Ritzen, P., Roebroek, E., van de Wouw, N., Jiang, Z. P. y Nijmeijer, H. (2016). Trailer Steering Control of a Tractor–Trailer Robot. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 24(4), 1240-1252.
- Tan, P. y Cai, Z. (diciembre, 2015). Modelling and Planning of Mobile Robot Navigation Control in Unknown Environment. In *2015 International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks (CICN)* (pp. 1532-1536). Jabalpur: IEEE.
- Van Hau, P., Nam, D. P., Ha, N. T., Thanh, P. T., Hai, H. T. y Hanh, H. D. (julio, 2017). Asymptotic stability of the whole tractor-trailer control system. In *System Science and Engineering (ICSSE), 2017 International Conference on* (pp. 423-427). IEEE.
- VR, D. A. S. T. (2017). Non-model-based control of a wheeled vehicle pulling two trailers to provide early powered mobility and driving experiences. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*.
- Wu, T. y Hung, J. Y. (junio, 2017). Lateral position control for a tractor-trailer system using steering rate input. In *2017 IEEE 26th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)* (pp. 503-507). Edinburgh: IEEE.
- Wu, T. y Hung, J. Y. (marzo, 2017). Lateral position control for a tractor-trailer system using coordinate transformation and hybrid controllers. In *2017 SoutheastCon* (pp. 1-6). North Carolina: IEEE.
- Wu, T. y Hung, J. Y. (marzo, 2017). Path following for a tractor-trailer system using model predictive control. In *SoutheastCon, 2017* (pp. 1-5). North Carolina: IEEE.
- Yuan, J., Sun, F. y Huang, Y. (2015). Trajectory generation and tracking control for double-steering tractor–trailer mobile robots with on-axle hitching. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(12), 7665-7677.

Yue, M., Hou, X. y Yang, L. (julio, 2017). An efficient trajectory tracking control for tractor-trailer vehicle system. In *2017 36th Chinese Control Conference (CCC)* (pp. 546-551). Dalian: IEEE.

Zheltoukhov, A. A. y Stankevich, L. A. (febrero, 2017). A survey of control architectures for autonomous mobile robots. In *2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)* (pp. 1094-1099). St. Petersburg: IEEE.

# Autores

---



### MARCO ANTONIO DÍAZ-MARTÍNEZ

Doctor en proyectos por la Universidad Internacional Iberoamericana en México. Actualmente labora como investigador en el Instituto Tecnológico Superior de Pánuco, Veracruz. Cuenta con experiencia en áreas de consultoría y desarrollo de proyectos. También fungió como jefe de carrera de Ingeniería Industrial en la Universidad del Valle de México. Es certificador avanzado en SolidWorks en el desarrollo de nuevos productos y simulaciones por la empresa Desarrollo de Manufactura Digital DMD.

### JESÚS GÓMEZ-CASTELLANOS

Magíster en Administración de los Sistemas de Calidad por la Universidad Valle de México. Analista de Métodos en Mg Consultoría y Mexichem; ingeniero de Procesos en Cardinal Brands Fabricación S.A. de C.V.; ingeniero industrial y supervisor de producción en Ensamblajes Universales S.A. de C.V.; ingeniero de procesos en Breed Mexicana Planta 2 y Pebac S. de R.L. de C.V.; supervisor de Producción en Kemet de México S.A. de C.V.; Jefe de División de la Carrera de Ingeniería Industrial en el Tecnológico de Pánuco.

### ARGIA LILI PAZ MOLINA

Magíster en Ciencias en Ingeniería Administrativa por el Instituto Tecnológico de Ciudad Madero. Licenciada en Ingeniería Industrial por el Instituto Tecnológico de Ciudad Madero. Se encuentra realizando proyectos de mejora en la industria (Cía. Minera Autlán, S. A. B. de C.V., ahora Autlán, S.A de C.V.). Ejerce como auditor interno del Sistema de Gestión de Calidad, auditor líder del Sistema de Gestión Ambiental y par evaluador por el Consejo de Acreditación de la Enseñanza de la Ingeniería (Cacei, A.C.).

### EDGAR JEARVAVI VÁSQUEZ MORENO

Magíster en Ingeniería Industrial por el Instituto Tecnológico Superior de Tantoyuca; ingeniero industrial por el Instituto Tecnológico de Ciudad Madero. Se desempeña como supervisor de Control y Aseguramiento de la Calidad (Obra Mecánica), Águila Protección Anticorrosiva S.A. de C.V.; auxiliar en ingeniería de proceso en Aequitas en negocios S.A. de C.V.

### ALMA LETICIA CRUZ MÉNDEZ

Magíster en Gestión de la Calidad por el Centro de Excelencia de la Universidad Autónoma de Tamaulipas; ingeniería industrial en Producción por el Instituto Tecnológico de Ciudad Madero. Se desempeña como jefe de aseguramiento de la calidad de Construcciones Mecánicas Monclova S.A. de C.V. en Proyectos de Pemex Exploración y Producción, además de como coordinador de capacitación de Swecomex S.A. de C.V. en proyectos de Pemex Exploración y Producción, y como ingeniero de calidad de Ricsa para proyectos de Dupont e ingeniero de calidad de Bustech para proyectos de Refinería Francisco I. Madero.

### JHOSSSELYN HERRERA

Ingeniera industrial por la Universidad de Lima y auditora ISO 9001 por el Instituto para la Calidad – Pontificia Universidad Católica del Perú. Especializada en auditoría de negocios, gestión comercial, manufactura industrial y gestión de proyectos. Se desempeña como analista de auditoría en NG Restaurants - Intercorp. Ha sido ejecutiva comercial y analista de ingeniería en Texgroup – Corporación Cervesur.

### NICOLÁS FRANCISCO SALAZAR MEDINA

Ingeniero industrial por la Universidad de Lima y máster de Sistemas Gerenciales con mención en Manufactura por la Universidad de Puerto Rico. Asimismo, es máster en Higiene Industrial y Ph.D. en Ingeniería Industrial, con mención en Ergonomía, por la Universidad de Virginia Occidental. Es docente en la Facultad de Ingeniería Industrial de la Universidad de Lima y en otros centros de estudios superiores del país. Consultor en las áreas de ergonomía, higiene industrial y manufactura.

**ROSA PATRICIA LARIOS FRANCIA**

Ingeniera industrial por la Universidad de Lima, con Maestría en Ingeniería Industrial con mención en Planeamiento y Gestión Estratégica por la Universidad Ricardo Palma, candidata a doctora en Gestión Estratégica en el Consorcio de Universidades del Perú. Con más de 24 años de experiencia en puestos ejecutivos en empresas de manufactura, 17 años de experiencia en el sector textil. Miembro de los Comités Técnicos de Normalización CTN de Textiles y Confecciones, de Gestión y Aseguramiento de Calidad, de Gestión de la Investigación, Desarrollo Tecnológico e Innovación y de Gestión de la Mypime.

**ABEL ANTONIO MARTÍN REAÑO VERA**

Ingeniero industrial por la Universidad Inca Garcilaso de la Vega, magíster en Administración de Empresas por la Universidad del Pacífico. Profesor investigador y coordinador de innovación del Centro de Estudio de Innovación Textil (Ceitex) de la Universidad de Lima. Tiene 32 años de experiencia profesional en la industria textil. Actualmente, es gerente del Comité Textil Confección de la Sociedad Nacional de Industrias. Como tal es representante de la Cadena Textil Confección peruana ante las diversas negociaciones de acuerdos y tratados de libre comercio desarrollados por el Perú. Reconocido en el año 2000 con la Medalla al Mérito Institucional que la Sociedad Nacional de Industria otorga todos los años con motivo del Día de la Industria.

**MARCO HENRICH SAAVEDRA**

Profesor asociado y coordinador del Área de Producción de la Carrera de Ingeniería Industrial y de Arquitectura de la Universidad de Lima. Ingeniero industrial por la Universidad de Lima y máster en Ingeniería de Sistemas Gerenciales con especialidad en Sistemas de Manufactura por la Universidad de Puerto Rico, Mayagüez Campus (Estados Unidos). Egresado del Programa de Doctorado en Ingeniería Industrial de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Ha sido director de Planificación y de la Maestría en Ingeniería Industrial de la Universidad de Lima, así como secretario académico del Programa de Estudios Generales y de la Escuela de Posgrado en la misma Universidad.

### GEORGE RONALD SCHOFIELD BONELLO

Ingeniero industrial por la Universidad Nacional de Ingeniería, licenciado en Ciencias Textiles por el Colegio del Estado de Carolina del Norte. Actualmente, se desempeña como director en G&G Consultores Asociados y está desarrollando la investigación titulada *Hilatura de Lana y Pelos Finos de Alpaca en el Sistema Algodonero*.

### EDUARDO REDONDO

Ingeniero industrial por la Universidad Nacional de Asunción (Fiuna) Paraguay, máster en Ciencias en Optimización de Sistemas Industriales y Logísticos por la École Centrale Paris (ECP) – Francia, y docente investigador del Laboratorio de Mecánica y Energía de la Fiuna. Realizó esta investigación en la ECP y en la Fiuna.

### JULIO CÉSAR CANCHUCAJA ROJAS

Profesor principal de la Universidad Nacional Agraria La Molina, Mg. Sc. en la especialidad de Industrias Forestales. Actualmente cursa estudios de doctorado en la especialidad de Tecnología y Utilización de Productos Forestales en la Universidad Federal de Paraná-Brasil. Es especialista en el campo de control de calidad y optimización de procesos de manufactura de productos forestales maderables. Actualmente, realiza trabajos de investigación sobre la viabilidad técnica y la manufactura de productos de madera reconstituida.

### LEÓNIDAS MIGUEL CASTRO

Profesor principal de la Universidad Nacional Agraria La Molina, Mg. Sc. en la especialidad de Industrias Forestales. Actualmente cursa estudios de doctorado en la especialidad de Tecnología y Utilización de Productos Forestales en la Universidad Federal de Paraná-Brasil. Es especialista en el procesamiento de la madera en sus diferentes productos de transformación mecánica, así como en tecnologías de fabricación, valoración y rendimientos de materias primas para productos de valor agregado.

**FRANCISCO GARCÍA FERNÁNDEZ**

Doctor por la Universidad Politécnica de Madrid y profesor visitante de la Universidad Nacional Agraria La Molina. Es especialista en el campo de la Tecnología de la Madera: abarca tanto las propiedades físico-mecánicas de productos derivados de la madera, como su control de calidad y optimización de sus líneas de fabricación. Asimismo, se especializa en el análisis y la modelización de datos, tanto mediante técnicas estadísticas tradicionales, como mediante el uso de simulaciones de Monte Carlo, Bootstrap y redes neuronales artificiales. Ha escrito más de 50 artículos científico-técnicos, 35 de ellos indexados en revistas JCR.

**ROSA VICTORIA ALTAMIRANO MEDINA**

Ingeniera química por la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Magíster en Gestión Tecnológica Empresarial por la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI). Título de Especialista en Gestión y Protección Medio Ambiental en Recursos Minerales del Programa Internacional de Post Grado de la Universidad Politécnica de Madrid. Docente universitaria con amplia experiencia en el dictado del curso de Química y Gestión Ambiental. Jefa del Laboratorio de Química de la UNI, 2011-2017, Facultad de Ingeniería Civil. Asesora en estudios de impacto ambiental para proyectos. Asesora en ciencias de los materiales: calidad de agua y suelos para construcción.

**RICARDO TERREROS LAZO**

Ingeniero químico por la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI). Maestría en Gestión Ambiental por la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI). Docente universitario con amplia experiencia en el dictado del curso de Química. Jefe del Laboratorio de Química de la UNI, 2005-2011, Facultad de Ingeniería Civil. Analista de Laboratorio Químico en agregados y agua usados en construcción, 2005-2018. Especialista en manejo de residuos de laboratorio químico.

**MARÍA DEL CARMEN ROSAS GUERRERO**

Posee formación en ingeniería industrial y de sistemas. Realizó su maestría en Ciencias con especialidad en Sistemas de Calidad y Pro-

ductividad. Actualmente, forma parte del cuerpo académico del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, además de tener experiencia en las empresas de manufactura en el área de calidad de procesos, materia prima y producto terminado.

#### EMILIO PÉREZ PACHECO

Con formación en Ingeniería Civil. Realizó su maestría y su doctorado en Ciencia de los Materiales Poliméricos en el Centro de Investigación Científica de Yucatán. Actualmente, forma parte del cuerpo académico de Bioprocesos, donde realiza investigaciones, las cuales se centran en estudios sobre las interacciones de distintos biopolímeros para evaluar su funcionalidad en el desarrollo de biomateriales con aplicación en áreas tales como alimentos, fármacos, ambiental y agroindustrial. Tiene el reconocimiento por la SEP como perfil Prodep y es miembro del Sistema Nacional de Investigadores Nivel I.

#### SALVATORE TARANTINO CURSERI

Licenciado en Química por la Universidad de Oriente de Venezuela. Se desempeña como asesor e investigador independiente en ciencias generales. Autor de dos libros: *El ciclo de vida de un proyecto y su aliado de siempre*; *Gestión humana y gestión científica de proyectos de incubación empresarial*.

#### CARLOS ARTURO PALACIOS TOVAR

Ingeniero civil por la Universidad Nacional de Ingeniería. Mg.Sc. en Ingeniería de Recursos Hídricos por la Universidad Nacional Agraria La Molina. Magíster en Economía con mención en Gestión y Políticas Públicas por la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Especialización en Dispute Boars por la Pontificia Universidad Católica del Perú. Planeamiento Estratégico por la Universidad del Pacífico. Diplomaturas en Arbitraje, en Análisis y Diseño de Puente, en Contratación Pública, en Procedimiento Administrativo. Trabaja en Provías Nacional del MTC. Project Manager.

**ELIO LUIS ALIAGA PAREDES**

Ingeniero industrial por la Universidad de Lima. Primer puesto en el Diplomado de Especialización de Gestión de Gas Natural por la Universidad ESAN. Diplomado en Instalaciones de Gas Natural en Residencias, Comercios e Industrias para acceder a la Certificación IG-3 por Ipega-UNI. Experiencia en el sector de la energía. Actualmente, se desempeña en el área de Operación y Mantenimiento en la Central Termoeléctrica a Gas Natural de Aguaytía.

**JOSÉ ANTONIO ACEVEDO JARA**

Ingeniero industrial por la Universidad de Lima. Con conocimiento en gerencia de compras y abastecimiento, administración de la demanda y planificación de compras y negociación con proveedores. Con cuatro años de experiencia general en compras y abastecimiento de bienes y servicios en el área de logística en los sectores industrial (Andral S.A.C.) y gubernamental (Autoridad Nacional del Agua); y un año de experiencia como supervisor de planta, controlando la calidad y la cantidad de la producción, evaluando los presupuestos y rendimientos de producción (Plasticueros del Perú S.A.C.).

**FABRICIO PAREDES LARROCA**

Ingeniero industrial por la Universidad de Lima, M.Sc. con Mención en Automática e Instrumentación por la Universidad Nacional de Ingeniería. Se desempeña como docente e investigador en la Universidad de Lima. Realizó varios trabajos de investigación, como por ejemplo, *Dosificador de solución de iones ferrato por bomba peristáltica* (2015). Actualmente es el director de Centro de Innovación Tecnológica (CIT) de la Universidad de Lima.

**JUAN CARLOS GOÑI DELIÓN**

Ingeniero mecánico por la Universidad Nacional de Ingeniería y Ph.D. en Ingeniería de las Ciencias en la ETH-Zürich-Suiza. Se desempeñó como director del Centro Experimental Tecnológico. Profesor principal de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de Lima y responsable del laboratorio de Máquinas e Instrumentos de esta casa

de estudios. Autor de tres libros: *Máquinas, instrumentos y procesos de manufactura*; *Máquinas hidráulicas y térmicas*; y *Manual de combustibles alternativos y tecnología automotriz*. Además, ha publicado artículos en diversos documentos y revistas. Se encuentra en proceso la obtención de dos solicitudes de registro de patentes ante el Indecopi.

#### WILDER MEDINA MEDINA

Doctorando en Ingeniería Industrial por la Universidad Nacional de Ingeniería; magíster en Dirección de Marketing doble grado por la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) y EADA (España); magíster en Ingeniería con especialidad en Calidad y Productividad por la Universidad Tecnológica de Monterrey (México); magíster en Administración de Negocios por la Universidad del Pacífico; posgrado especialista en Comercio Internacional por la PUCP; posgrado especialista en Aduanas por la Escuela Nacional de Aduanas; ingeniero industrial por la Universidad de Lima.

Información  
para los colaboradores  
y normas para la presentación  
de trabajos

---



Desde 1992, la revista *Ingeniería Industrial* de la Universidad de Lima tiene como objetivo central difundir los resultados de las investigaciones, así como brindar información técnica y científica relativa a dicha rama de la ingeniería. Está dirigida a empresarios de todos los sectores productivos, a docentes y a estudiantes de la especialidad.

Esta se encuentra indexada en Latindex (<[www.latindex.org](http://www.latindex.org)>), en Redalyc (<[www.redalyc.org](http://www.redalyc.org)>), así como en las bases de datos de Dialnet (<<http://dialnet.unirioja.es/>>) y el Centro de Información Tecnológica (<<http://www.citrevistas.cl/>>).

## 1. Generalidades

Esta revista publica tanto trabajos de investigación como de divulgación, que se incluyen en una de las cinco secciones que le dan forma: Gestión de la Producción, Calidad y Medioambiente, Ingeniería de Negocios, Proyectos Empresariales Industriales y Ciencia y Tecnología.

Los trabajos a presentar deben ser inéditos, de indudable aporte científico y no haber sido propuestos para su publicación simultánea en otro medio. Por ello, se acepta la colaboración de investigadores y profesionales de la ingeniería y de los negocios que deseen participar en sus páginas. Para ello, pueden enviar por vía electrónica sus avances de investigación, artículos, estudio o ensayos acompañados de una carta simple en la cual se haga explícita la cesión de derechos a favor del Fondo Editorial de la Universidad de Lima, para que los publique en soporte impreso o digital.

Las colaboraciones deben estar redactadas con claridad y coherencia, respetando las normas básicas de la ortografía española. Estas deben cumplir con las siguientes características:

- Se procesarán en Microsoft Word, en formato simple (una columna), tipografía Times New Roman, en 12 puntos, con espacio y medio de interlínea, el texto justificado y con el margen superior 3 cm, el inferior de 2.5 cm, el izquierdo de 3 cm y el derecho de 2 cm.
- En caso de usar tablas o figuras, estas deben presentarse en orden correlativo, con un título que los describa y la mención de la fuente. Su presentación debe corresponder al estilo APA. Para facilitar su diagramación se deben entregar de la siguiente manera:
  - Fotos: en formato .jpg o .tiff con una resolución de 300 píxeles.
  - Figuras: enviar el archivo original en el cual fueron elaboradas.
  - Tablas: de ser colocadas como imagen en el documento, enviar archivo original en Microsoft Excel.
- Los envíos se realizarán a nombre de María Teresa Noriega Araníbar, editora de la revista, al correo electrónico <manorieg@ulima.edu.pe>. De existir algún inconveniente, se pueden enviar por correo ordinario, en versiones impresa y digital, a la siguiente dirección: Revista *Ingeniería Industrial*. Facultad de Ingeniería Industrial, Universidad de Lima, Av. Javier Prado Este 4600, Urb. Fundo Monterrico Chico, Lima 33, Perú, o al Apartado postal 852, Lima 100, Perú.

## 2. Características de la colaboración para el envío

- **Título** (en español e inglés): el título debe reflejar el contenido del trabajo. Debe ser conciso y solo se escribirá con mayúscula la inicial de la primera palabra y los nombres propios.
- **Resumen** (en español e inglés): los resultados de investigaciones deben presentar resúmenes que contengan el objetivo, la metodología y las conclusiones, en una extensión de entre 50 y 70 palabras. Si se trata de artículos de divulgación, deben proporcionar una reseña de trabajo.
- **Palabras clave** (en español e inglés): se debe proporcionar una relación de entre 4 y 7 palabras o frases claves, para facilitar la búsqueda en los bancos de información.
- **Contenido**: las colaboraciones tendrán una extensión de 10 páginas como mínimo y 25 como máximo. Cada inciso (subtítulo) debe diferenciarse claramente mediante dígitos.

Para incluir citas, se usará la forma autor – año, siguiendo el estilo APA.

- **Referencias bibliográficas:** deben aparecer al final del artículo en orden alfabético y siguiendo el estilo APA.

### 3. Hoja de vida (resumen)

En no más de 6 líneas, el colaborador debe indicar sus grados o títulos académicos, el nombre de la institución de afiliación y el país, el cargo que ocupa o la función que desempeña; sus publicaciones, si las tuviera, y su dirección electrónica, con el fin de incluir estos datos donde corresponda.

### 4. Proceso de arbitraje y evaluación externa

El editor de la revista revisa el artículo y, si cumple con las pautas básicas editoriales, lo envía a un árbitro (evaluador externo experto en el tema del artículo) bajo la modalidad de doble ciego, quien revisará el contenido del artículo, lo evaluará y determinará si se publica sin ningún cambio, con cambios sustanciales pero aprobado en una segunda edición o si no se publica.

El Comité Evaluador tendrá un plazo de 15 días hábiles para presentar su informe de evaluación. En el caso de que los artículos se devuelvan al autor con cambios sugeridos o sustanciales, se requerirá una segunda revisión; para ello el árbitro contará con un plazo de 10 días hábiles para emitir su opinión.

Finalizado su trabajo, el Comité Editorial de la revista se reserva el derecho de recomendar o no su publicación, dando aviso a los autores sobre su decisión.



# Editorial Guidelines

Since 1992, the main objective of the *Ingeniería Industrial* Journal (Industrial Engineering Journal) of the University of Lima has been to disseminate research results, as well as to provide technical and scientific information related to said field of engineering. This journal is aimed at entrepreneurs of all production sectors, industrial engineering professors and students.

This journal is indexed in Latindex (<[www.latindex.org](http://www.latindex.org)>), in Redalyc, as well as in the databases of Dialnet (<<http://dialnet.unirioja.es/>>) and in the Technological Information Center (<<http://www.citrevistas.cl>>).

## 1. Overview

This journal publishes both research and outreach works, which are included in one of the five areas of specialization: Production Management, Quality and Environment, Business Engineering, Industrial Business Projects, and Science and Technology.

Works should contain unquestionable scientific contribution, should not have been published elsewhere or submitted simultaneously for publication elsewhere. Hence, collaboration of engineering and business researchers and professionals who wish to participate is accepted. To this end, they may send via e-mail their research, article, study or trial advances accompanied by an uncertified letter in which they explicitly assign their rights to the Editorial Fund of the University of Lima for publication purposes in hard copy and digital form.

Collaborative papers should be clearly and consistently drafted, and should respect the basic rules of Spanish spelling. Said papers should fulfill the following requirements:

- Papers should be in Microsoft Word document format. Texts should be in one column, in 12-point Times New Roman font, 1.5 line spaced, justified, with margins: top 3 cm, bottom 2.5 cm, left 3 cm and right 2 cm.
- Tables or figures should be numbered sequentially, the table title should concisely describe what is contained in the table, and the source should be mentioned. Tables or figures should be presented according to the APA style. Moreover, consider the following:
  - Photograph: 300 dpi .jpg or .tiff format
  - Figures: please send the original file in which they were prepared
  - Tables: if inserted as images in the document, please send the original file in Microsoft Excel
- The foregoing should be sent to María Teresa Noriega Aranibar, journal editor, via e-mail <manorieg@ulima.edu.pe>. If there is any problem, they may be sent by regular mail, in hard copy and digital form, to the following address: Revista *Ingeniería Industrial*. Facultad de Ingeniería Industrial, Universidad de Lima, Avenida Javier Prado Este 4600, Urb. Monterrico Chico, Lima 33, Perú, or to Apartado postal 852, Lima 100, Perú.

## 2. Collaborative Paper Structure

- **Title** (in Spanish and English). The title should concisely describe the contents of the work. The first letter of the first word and proper names should be capitalized.
- **Abstract** (in Spanish and English). It presents the objective, methodology and conclusion of research results. Abstracts should be between 50 to 70 words in length. For outreach articles, a work brief description should be included.
- **Keywords** (in Spanish and English). The number of keywords should be between 4-7 words in order to facilitate search in data banks.
- **Content**. Collaborative papers should be between 10-25 pages. Each subheading should be clearly distinguished by numbers. For in-text citations, author's last name and year of publication format, according to the APA style, should be used.
- **Bibliographical References**: These should be included as an alphabetical list at the end of the article according to the APA style.

### 3. Curriculum Vitae (summary)

In 6 lines, collaborative authors should mention their academic degrees or titles, name of the affiliation institution and country, position and function, publications, if any, and e-mail in order to include said information where applicable.

### 4. Referee

The journal editor reviews the articles and, if basic editorial guidelines are met, said articles are sent to a referee (external evaluator: expert in the specific topic of the article) who, under double blind peer review system, will review articles content, evaluate them and determine whether articles are published unaltered, accepted with substantial amendments but to be approved in a second edition, or declined.

Reviewers will have a period of 15 business days to submit an evaluation report. If articles are sent back to authors for proposed or substantial corrections, a second review should be required. To this end, the referee will have a period of 10 business days to render an opinion.

Upon completion of work, the editorial board reserves their right to recommend or not the publication, informing the authors on their decision.

---

Esta revista se terminó de imprimir en noviembre del 2018,  
en Comunica2 SAC  
Calle Omicron 218, Urb. Parque Internacional de Industria y Comercio  
Callao-Perú  
Teléfono 610-4242  
Correo electrónico: [informes@comunica2sac.com](mailto:informes@comunica2sac.com)





# Ingeniería Industrial

## Gestión de la producción

Análisis de desempeño del proceso de cucharas en un proceso de sinterizado mediante el *software* SPSS para identificar su eficiencia dentro de una planta de sinterizado de polvos metálicos

*Marco Antonio Díaz Martínez,*

*Jesús Gómez Castellanos, Argia Lili Paz Molina,*

*Edgar Jearvavi Vázquez Moreno,*

*Alma Leticia Cruz Méndez*

Mejora en la eficiencia y en el ambiente de trabajo en Texgroup S. A.

*Jhoselyn Herrera*

Diseño de un método para la determinación de las medidas antropométricas para ser usadas en el tallaje de la población peruana

*Nicolás Salazar Medina, Marco Henrich Saavedra,*

*Patricia Larios Francia,*

*Martín Reaño Vera, George Schofield*

## Calidad y medioambiente

Una evaluación de calidad para soluciones obtenidas a partir de variaciones algorítmicas del método Multi-Start

*Eduardo Redondo*

Estudio de la conicidad de postes de madera de eucalipto (*Eucalyptus globulus* Labill) y pino amarillo (*Pinus sp.*) utilizados en el Perú para la electrificación rural

*Julio César Canchucaja Rojas,*

*Leonidas Miguel Castro,*

*Francisco García Fernández*

Metodología para determinar la calidad de agua del río Rímac para uso en amasado y curado de concreto

*Rosa Victoria Altamirano Medina,*

*Ricardo Terreros Lazo*

Optimización de los costos de muestreo en la manufactura de *shampoo* y acondicionador

*Marta del Carmen Rosas Guerrero, Emilio Pérez Pacheco*

## Ingeniería de negocios

Propuesta teórica: degradación de energía en los niveles jerárquicos de toda organización

*Salvatore Tarantino-Curseri*

Efecto de la inversión pública en la infraestructura vial sobre el crecimiento de la economía peruana entre los años 2000-2016

*Carlos Arturo Palacios Tovar*

## Proyectos empresariales industriales

Factores para el procesamiento de la manzanilla común en la industria peruana de infusiones

*Elio Luis Aliaga Paredes, José Antonio Acevedo Jara*

## Ciencia y tecnología

Sistema de locomoción para discapacitados, automatizado con un procesador myRIO acoplado en una silla de ruedas

*Fabrizio Paredes Larroca, Juan Carlos Goñi Delión*

Modelamiento y control de un sistema de tráiler autónomo

*Wilder Medina Medina*



FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

ISSN 1025-9929

