



# Investigación aplicada e innovación

Volumen 13, 2019 Lima, Perú • ISSN 1996-7551

José Lazarte, Miguel Chávez,  
Manuel Alvarado

## Estrategias de aplicación de Industria 4.0 en las empresas peruanas

Pág. 5

Kevin Camayo, Carlos Anccasi,  
César Quispe, Nabil Moggiano

## Diseño de una turbina hidráulica con tecnología biomimética

Pág. 15

 **TECSUP**  
Pasión por la Tecnología

[www.tecsup.edu.pe](http://www.tecsup.edu.pe)





# Investigación aplicada e innovación



# REVISTA I+I

Estrategias de aplicación de Industria 4.0 en las empresas peruanas

..... José Jacob Lazarte Rivera,  
..... Miguel Ángel Chávez Luna,  
..... Manuel Martín Alvarado Andrade

**5**

Diseño de una turbina hidráulica con tecnología biomimética

..... Kevin Jhonatan Camayo Huamanculi,  
..... Carlos Quispe Ancasí,  
..... César Quispe López,  
..... Nabil Moggianno Aburto

**15**

Optimización del rendimiento del combustible de vehículos a través de la gestión digital de rutas

..... Juan Carlos Latorre Boza

**27**

Cinética de lixiviación y recuperación de oro, de finos en la lixiviación por percolación con y sin aglomeración

..... Luis Huere Anaya

**37**

Desarrollo de un prototipo de mano robot para prótesis de bajo costo

..... José Machuca Mines,  
..... Juan Carlos Suárez Quispe,  
..... Ernesto Juan Godínez De La Cruz,  
..... Wilson Marín Quevedo

**47**

Modelo matemático para la gestión de la vida útil de neumáticos OTR en minería

..... Roberto Delgado Alemán

**59**

Evaluación experimental del tratamiento de efluentes cianurados de una minera aurífera por el método de Taguchi

..... Enrique Eduardo Cáceres Aguinaga,  
..... Huguez Enrique Ames Ramírez

**75**

Dependencia del material particulado en aire respecto a parámetros meteorológicos en la localidad de Zárate (S JL)

..... Carmen Goicochea,  
..... Rita Cabello, Patricia Reynoso,  
..... Lorgio Valdiviezo

**83**

Métodos de aprendizaje automático para el pronóstico del consumo eléctrico de prosumidores

..... Javier Castillo Peña

**91**

Guía de autoevaluación empresarial: un aporte para las mypes

..... José Rojas Gómez,  
..... Carolina Guerra Ortiz

**101**

Taller de reforzamiento para mejorar el rendimiento académico en el curso de Química de un ciclo de preparación para ingresar a un instituto superior

..... Iván Gonzáles Zaavedra

**117**

**Director:** Antonio Lazo de la Vega, *Tecsup*.

**Editor en jefe:** Jorge Bastante Pazos, *Tecsup*.

**Comité editorial:** Aurelio Arbildo, *Inducontrol*; Carlos Hernández, *Alicorp*; Elena Flores, *UTEQ*; Jack Vainstein, *Vainstein Ingenieros*.

**Coordinadora Editorial:** Celene Alata Carhuavilca, *Tecsup*.

**Colaboradores:** Alejandro Bermúdez, Arturo Rojas, Cristian Rojas, Elmer Ramírez, Henry Gómez, Hernando Prada, Iván Díaz, José De Los Ríos, Juan Roldán, Luisa Turkowsky, Milton Chuquiruna, Nonie Salazar, Pablo Padilla, Paul Ramos, Ramon Robalino, Rocío Balbín, Samuel Charcas.

**Correctora de estilo:** Laura Gómez Rojas.

**Diagramación:** Tarea Asociación Gráfica Educativa.

**Impresión:** Tarea Asociación Gráfica Educativa, Pasaje María Auxiliadora 156-164, Lima 5, Perú. Hecho el depósito legal en la Biblioteca Nacional del Perú: 2007-04706.

Tiraje: 2000 ejemplares.

Publicado en noviembre de 2019

**Tecsup:**

**Sede Norte:**

Vía de Evitamiento s/n Víctor Larco Herrera. Trujillo, Perú.

**Sede Centro:**

Av. Cascanueces 2221 Santa Anita. Lima, Perú.

**Sede Sur:**

Urb. Monterrey Lote D-8 José Luis Bustamante y Rivero. Arequipa, Perú.

**Publicación Anual:**

Tecsup se reserva todos los derechos legales de reproducción del contenido, sin embargo, autoriza la reproducción total o parcial para fines didácticos, siempre y cuando se cite la fuente.

**Publicación Indexada en Latindex**



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.

**Suscripciones:**

investigacioneinovacion@tecsup.edu.pe

**Nota:**

Las ideas y opiniones contenidas en los artículos son de responsabilidad de sus autores y no refleja necesariamente el pensamiento de nuestra institución.



Revisa todas las ediciones de la Revista I+i en versión digital.

# EDITORIAL

Apreciados lectores:

Es un gran honor presentarles la edición número trece de nuestra revista, la cual contiene artículos relacionados con la industria 4.0, la tecnología biométrica, la gestión digital de rutas, las prótesis de bajo costo, los métodos de aprendizaje automático, entre otros temas relevantes a nuestra realidad. Los textos aquí mostrados son el resultado de investigaciones realizadas por colaboradores tanto de nuestra institución como externos.

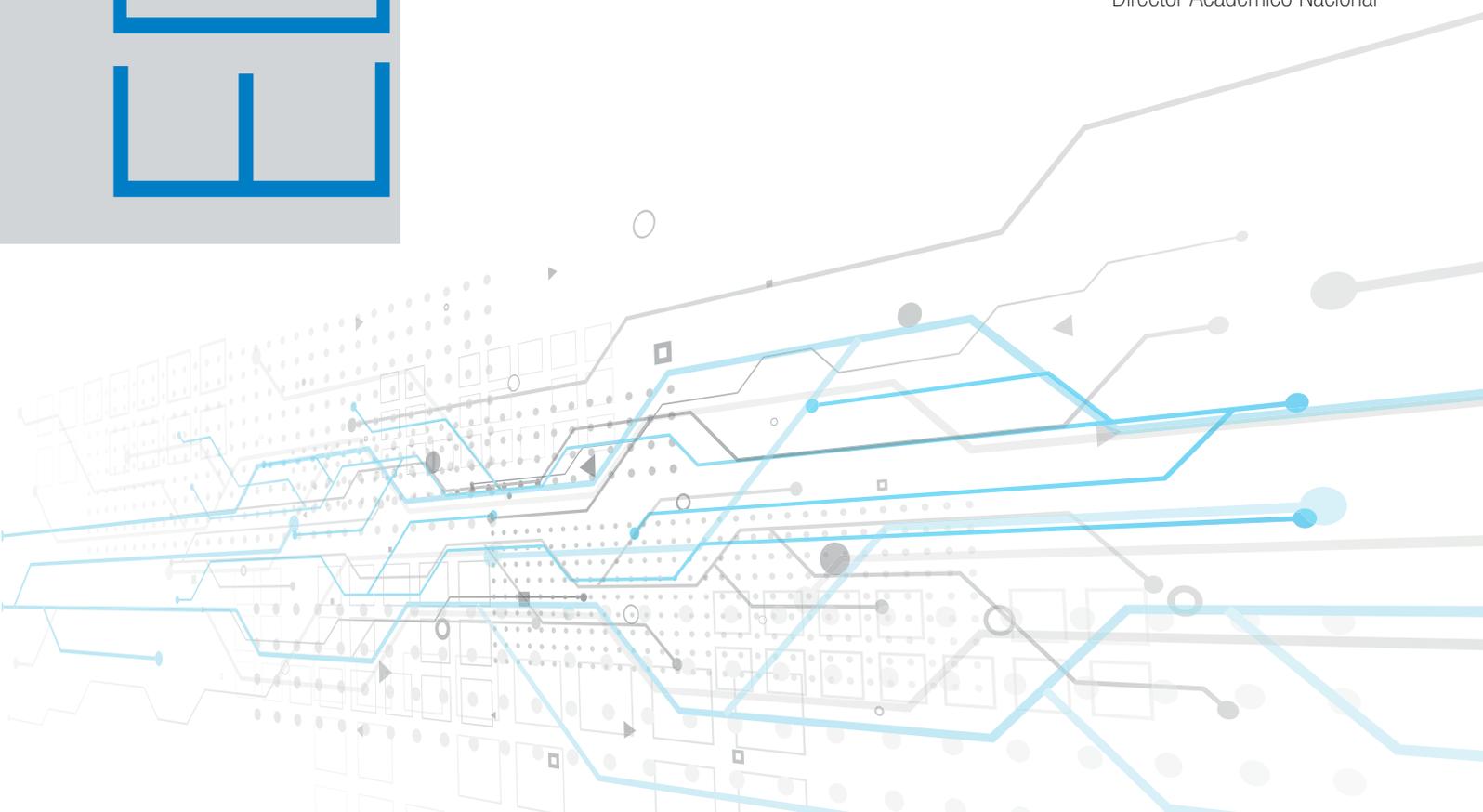
Es de destacar el rol de la tecnología, ya sea en el desarrollo de estos temas, así como en la medición, las pruebas y la validación de resultados; en especial, tomando en cuenta que hoy contamos con millones de dispositivos, equipos y sistemas interconectados que proveen mucha información a la nube. El análisis de estos simplificará cada vez más el proceso de toma de decisiones y generación de valor para las empresas.

Consideramos de gran importancia la dedicación de los autores para la elaboración de los artículos, así como el trabajo del equipo de producción y edición que permite lograr una revista que refleja calidad, innovación y trabajo colaborativo, todos ellos principios declarados por nuestra institución.

Tengo la convicción de que esta edición satisfará en gran medida las expectativas de los lectores y que, a su vez, dará pie al siguiente número a publicarse en 2020. Si usted tiene interés especial en alguno de los artículos exhibidos, puede ponerse en contacto con los autores. De la misma manera, si está interesado en colaborar en futuras ediciones, siéntase en libertad de comunicarse con nuestra coordinadora editorial.

Antonio Lazo de la Vega Velarde

Director Académico Nacional



Una fábrica que produce en un entorno de Industria 4.0 realiza una reingeniería de adaptación y un manejo de recursos que minimizan gastos, potencian capacidades no usadas y genera **sinergia económica** que se evidencia en mejoras cuantitativas y cualitativas en la producción.



## Estrategias de aplicación de Industria 4.0 en las empresas peruanas

### Industry 4.0 Application Strategies in Peruvian Companies

#### RESUMEN

El presente trabajo muestra una visión de la transformación del sector industrial en Perú y se realiza una confrontación con la cuarta revolución industrial. Basándose en ello, se identifican tres niveles tecnológicos típicos presentes en nuestra realidad y se plantean las necesidades más trascendentes, así como las estrategias a aplicar en cada uno de los niveles tecnológicos existentes. Estas estrategias se asocian con la tecnología actual, la automatización, el *big data*, el IoT, la realidad aumentada, y la integración horizontal y vertical de procesos de producción. Se determinan los procedimientos a seguir para la implementación de la Industria 4.0 como solución a las necesidades planteadas. Se evalúan los resultados a partir de casos reales que nos permiten evidenciar la importancia y la aplicabilidad de esta revolución tecnológica en Perú. La validación de las estrategias nos demostrará la necesidad de aplicar Industria 4.0 para obtener incrementos sustanciales en calidad, reducción de tiempos de producción, mejorar precios del producto y productividad; es decir, lograr la optimización en los procesos productivos, sin necesariamente incurrir en gastos excesivos para su implementación. El resultado de la aplicación permitió realizar una integración de la información a nivel de campo en primera instancia, y a nivel de gestión y análisis de datos en una segunda instancia; eliminar y reducir en casi un 93 % el problema de merma, en un 95 % el problema de reportes de parada y, de parte del cliente, una aceptación de un 80 %, lo que supera en un casi 60 % lo que se tenía antes; y, finalmente, mediante la data recopilada, obtener un récord casi en tiempo real de los niveles de producción de cada máquina.

#### ABSTRACT

The present work shows a vision of the transformation of the industrial sector in Peru and a confrontation with the fourth industrial revolution. Based on this, there have been identified three typical technological levels present in our reality and there have raised the most transcendental needs, as well as the strategies to be applied in each of the existing technological levels. These strategies are associated with current technology, automation, Big Data, IoT, Augmented Reality, and the horizontal and vertical integration of production processes. There are identified the necessary procedures for the implementation of Industry 4.0 as a solution to the needs already raised. Results are evaluated based on real cases that allow us to demonstrate the importance and applicability of this technological revolution in Peru. The validation of the strategies will show us the need to apply Industry 4.0 to obtain substantial increases in quality, reduction of production times, improve product prices and productivity; that is, achieve optimization in production processes, without necessarily incurring in excessive costs for its implementation. Results of the application allowed us to integrate the information at the field level in the first instance and at the level of management and data analysis in a second instance; eliminate and reduce the problem of shrinkage by almost 93 %, by 95 % the problem of stop reports and an acceptance of 80 % from the client, which exceeds by almost 60 % the previous ones. Finally, the data collected allows for having an almost real-time record of the production levels of each machine.



#### Palabras clave

Automatización, big data, cuarta revolución industrial, Industria 4.0, productividad, realidad aumentada.

#### Key words

Automation, big data, fourth industrial revolution, industry 4.0, productivity, augmented Reality.

## INTRODUCCIÓN

La situación actual de la industria en Perú, en lo referente a la tecnología que se utiliza, la calidad del proceso de producción y el acceso a información o a los datos, es aún bastante precaria en determinados sectores. Por ello, las empresas enfrentan serios problemas para lograr mayor productividad y ser más competitivas en el mercado nacional e internacional [1]. Ante esta situación, existe la necesidad de optimizar los procesos productivos; muchas de las empresas están inmersas en la búsqueda del camino que las conduzca a lograr ese objetivo [2].

En la industria peruana, actualmente, podemos encontrar hasta tres niveles tecnológicos presentes en nuestra realidad:

**1.º nivel.** Conformado por las empresas industriales que realizan sus procesos de producción mediante máquinas completamente mecánicas, generalmente reemplazando al hombre solo en el uso de la fuerza; es decir, sin mayor aplicación de nuevas tecnologías.

**2.º nivel.** Compuesto por las empresas industriales que utilizan sistemas eléctricos en su proceso productivo para realizar el comando de algunas acciones. Así, logran un cierto grado de automatización con el uso de relés y contactores, de mecanismos y máquinas eléctricas para una producción en masa.

**3.º nivel.** Constituido por las empresas industriales que incorporan las computadoras, la electrónica y el internet en sus procesos productivos, y obtienen procesos planificados, máquinas con sistemas electrónicos de control, comunicación y mando a distancia; es decir, procesos con alto grado de automatización con los que se consiguen productos de alta calidad, se reducen tiempos de producción y costos, y se mejora la productividad [3].

El objetivo del estudio es plantear una estrategia coherente para el proceso de migración a la Industria 4.0. La metodología usada presenta tres etapas: la primera identifica el nivel tecnológico del sistema; la segunda, la problemática específica a superar; y la tercera, el planteamiento a implementar [4].

## FUNDAMENTOS

### Identificación de las tecnologías en la industria peruana

Durante el último siglo, en el planeta se han desarrollado cambios que han definido el estado y nivel tecnológico en el que nos encontramos. Estos eventos históricos se han identificado como las llamadas revoluciones industriales, las cuales, con el transcurso del tiempo, han ido formando la realidad tecnológica de nuestro país. Este es un espacio que no se enmarca por completo en ninguna de ellas y, a la vez, presenta características de cada una; situación especial y distinta que complejiza el trabajo de identificación de las tecnologías usadas en industrias dentro del país. Comenzaremos mencionando, de manera sucinta, los focos que promueven la industria, es decir, las

líneas de actividades industriales; esto nos permitirá tener una visión panorámica de cómo estamos y qué tenemos. Dentro de ello, reconoceremos y categorizaremos los impactos de las revoluciones industriales y cuáles están presentes. Además, identificaremos las tecnologías traídas por las revoluciones industriales como I1, Industria 1.0; I2, Industria 2.0; e I3, Industria 3.0. Se entiende I1 como tecnologías basadas en sistemas mecánicos con motores a vapor y trabajo manual intensivo; I2, como cadenas de montaje accionadas por motores eléctricos con trabajo manual intensivo; I3, como proceso de producción basado en automatización, electrónica y TI.

Tabla 1  
Identificación de tecnologías

Líneas de actividades industriales	I1	I2	I3
Productos alimenticios y bebidas	x	x	x
Productos de tabaco		x	x
Productos textiles		x	x
Prendas de vestir, adobo y teñido de piel	x	x	x
Procesamiento de artículos de cuero	x	x	x
Procesamiento de madera y derivados	x	x	
Edición, impresión y reproducción de grabaciones		x	x
Productos de la refinación del petróleo y combustible nuclear		x	x
Sustancias y productos químicos		x	x
Productos de caucho y plásticos		x	x
Productos minerales no metálicos		x	x
Procesamiento de metales comunes		x	x
Maquinarias y equipos eléctricos		x	x
Instrumentos médicos, ópticos, de precisión y fabricación de relojes		x	x
Medios de transporte y partes de vehículos		x	x

Fuente: Elaboración propia. Adaptado de la encuesta de opinión gerencial en el sector industrial realizada por el INEI (2002).

Según la encuesta del INEI sobre la opinión gerencial en el sector industrial (2002), se abstrae la tabla 1, la cual nos muestra una marcada tendencia a la existencia de tecnologías del tipo I2 e I3; sin embargo, hay líneas de producción en donde aún coexisten los tres tipos. Esto se contrasta con un porcentaje marcadamente mayor de empresas en las líneas productivas mostradas con un nivel tecnológico del tipo I2 [5]. Estos resultados delinean una realidad que nos permite pensar en las estrategias a usar para obtener mejores condiciones de productividad y eficiencia. Sin embargo, cabe mencionar que también hay una realidad mental que acompaña a este estado tecnológico, el cual se suele fundamentar en preguntas e ideas como las siguientes:

- ¿Por qué tengo que cambiar mi forma de trabajar?
- ¿Por qué cambiar mis equipos si con los que tengo puedo producir?
- La tecnología es muy costosa y los equipos nuevos tienen precios que no puedo pagar.
- Me sale más barato hacerlo a mano que con maquinarias.

Romper con estos paradigmas es parte de la evolución que necesitamos. Estos son, probablemente, válidos en entornos

muy pequeños; pero ya no se aplican a realidades como en las que vivimos con los conceptos de globalización, no solamente de información, sino también de tecnologías. Aquí es donde la necesidad de plantear estrategias de aplicación de la Industria 4.0 cobra especial relevancia, pues permite romper dichos paradigmas y demostrar que los saltos tecnológicos son los pilares de un crecimiento sostenido en una economía que debe crecer y adaptarse constantemente a los cambios económicos mundiales.



Figura 1. Tecnologías existentes.

Tabla 2  
Identificación de tecnologías de I4

Tecnologías I4	Pasos a seguir en el proceso hacia la I4			
	1.º	2.º	3.º	4.º
Big data y analytics			X	
Robots autónomos				X
Simulación			X	
Integración horizontal (H) y vertical (V) de procesos	X			
Internet industrial de las cosas		X		
Ciberseguridad				X
La nube				X
Fabricación aditiva		X		
Realidad aumentada				X

Fuente: Elaboración propia.

Esta información marcará los pasos a seguir en las estrategias que se plantean para los tres escenarios que se estudiarán.

Como lo han demostrado muchas empresas líderes en aplicación de Industria 4.0, la conectividad es la piedra angular que une todo. A partir de eso, se han planteado, en la tabla 2, los pasos a seguir en el proceso para dar el salto hacia I4.

A continuación, plantearemos tres escenarios que nos permitan identificar las necesidades y, así, plantear las estrategias a seguir.

**Escenario 1.** Industria con actividades basadas en mano de obra directa y el manejo de maquinarias de accionamiento manual. Solo se trabaja en turnos de día, pues no se pueden controlar las actividades en turnos nocturnos.

## METODOLOGÍA

### Estrategias

Passar de una tecnologia do tipo I3 a Industria 4.0 é um salto que aplica, principalmente, ao manejo da informação com propósitos de eficiência e competitividade. Sem embargo, esta não é a realidade no Peru; em consequência, a grande maioria de empresários (donos de fábricas e empresas de produção) percebe esta quarta revolução como algo mais parecido a uma moda que a uma alternativa de melhoria e eficiência. Esta é uma visão equivocada. Para reverter esta falsa visão, é necessário mostrar que existem formas para que não seja apenas uma moda tecnológica, mas a ferramenta que permitirá alcançar objetivos tão comuns nas indústrias como a redução de desperdício na produção; o aumento do volume da produção; o aumento do valor agregado ao produto e, portanto, sua qualidade; a redução de custos de produção; e o aumento das lucratividades [6].

Para identificar os níveis de escalonamento da migração para a Indústria 4.0, partiremos da tabela 2, que prioriza as tecnologias que são os pilares da aplicação de Indústria 4.0.

**Escenario 2.** Industria con maquinaria electromecánica y mano de obra no intensiva. Solo se trabaja en turnos de día y de noche, pero el control de las actividades en turnos nocturnos es deficiente.

**Escenario 3.** Industria con maquinaria semiautomatizada o completamente automatizada, con turnos diurnos y nocturnos, con problemas de merma de producción y constantes paradas por fallas de equipos.

Estos tres escenarios son, probablemente, los más representativos en nuestro entorno, caracterizan las situaciones que se presentan en el mayor porcentaje industrial. Comenzaremos identificando los puntos críticos de la producción. En los casos planteados, estos se pueden resumir en los siguientes:

- Información y datos del proceso de fabricación (IyD)
- Interacción de la mano de obra en la fabricación (MdO)
- Nivel de automatización (NA)

Si desarrollamos una matriz de identificación, podemos percatarnos de los pasos o estrategias a seguir para mejorar los indicadores de producción.

Tabla 3  
Matriz de identificación de estrategias

Escenarios	Puntos críticos de producción		
	IyD	MdO	NA
Escenario 1		X	
Escenario 2		X	
Escenario 3		X	X

Fuente: Elaboración propia.

Como resultado de esto, podemos plantear los siguientes pasos:

### Escenario 1

Se planteará una estrategia basada en tres etapas que permita escalar paulatinamente el nivel de tecnología hacia I4. En cada etapa, se realizará un proceso de sinergia que motive a la siguiente.

Tabla 4  
Etapa 1. Escenario 1

Etapa 1	Escenario 1		
	Puntos críticos de producción		
Tecnologías I4	IyD	MdO	NA
Big data y analytics			
Robots autónomos			
Simulación			
Integración H y V del proceso			
Internet industrial de las cosas	X		
Ciberseguridad			
La nube			
Fabricación aditiva		X	
Realidad aumentada			

Fuente: Elaboración propia.

Esta primera etapa introduce la capacidad de recabar información de los procesos productivos sin una inversión excesiva, pues el uso de sensores con capacidad de comunicación permite conocer y almacenar información para la toma de decisiones basada en datos reales y de primera mano. Por otro lado, es en la medida de lo posible, pues la actividad de mano de obra es muy diversa y, en algunos casos, repetitiva. Este entorno es favorable para lo que se denomina como fabricación aditiva, la cual no busca reemplazar la mano de obra, sino mejorar su efectividad y, por ende, la calidad en el producto [7].

**Resultados directos.** La mano de obra toma menos tiempo para realizar los mismos trabajos, lo cual implica que se

incrementa la producción debido a la información recabada; el control de mermas es más efectivo, lo que se traduce en una extensión de los turnos de trabajo que ahora pueden ser de dos turnos (diurno y nocturno) o, inclusive, de tres turnos (diurno, vespertino y nocturno); la implicancia es que se duplica o triplica la producción. Esto es saltar de I1 a I2.

Tabla 5  
Etapa 2. Escenario 1

Etapa 2	Escenario 1		
	Puntos críticos de producción		
Tecnologías I4	IyD	MdO	NA
Big data y analytics	X		
Robots autónomos			
Simulación			
Integración H y V del proceso			X
Internet industrial de las cosas			
Ciberseguridad			
La nube			
Fabricación aditiva			
Realidad aumentada			

Fuente: Elaboración propia.

Luego de la segunda etapa, integramos la potencialidad del manejo de la información en el contexto de I4. El análisis de datos permitirá una eficiente interrelación entre producción (fábrica), demanda (clientes) y recursos (proveedores), lo cual permite una toma de decisiones en tiempo real. En esta etapa, la reinversión de los recursos favorables, resultados de la primera etapa, permitirá afrontar los gastos en la integración H y V del proceso, y los softwares y las plataformas que soporten el manejo y análisis de datos.

**Beneficios inmediatos.** No detener la producción por altas demandas y falta de recursos, no generar excedentes de producción y facilitar cadenas de valor automatizadas.

Tabla 6  
Etapa 3. Escenario 1

Etapa 3	Escenario 1		
	Puntos críticos de producción		
Tecnologías I4	IyD	MdO	NA
Big data y analytics			
Robots autónomos		X	
Simulación			
Integración H y V del proceso			
Internet industrial de las cosas			
Ciberseguridad			
La nube			
Fabricación aditiva			
Realidad aumentada			

Fuente: Elaboración propia.

Esta tercera etapa empuja más a todo el sistema de producción a un proceso simbiótico hombre-máquina, pues la mano de obra se optimiza con la integración de robots ayudantes y colaborativos.

**Resultado directo.** La mano de obra genera productos de alta calidad y a mayor velocidad, los cuales se adaptan a diferentes patrones de producción según la necesidad de la demanda.

Tabla 7  
Resumen de logros. Escenario 1

Tecnologías I4	Escenario 1
Big data y analytics	X
Robots autónomos	X
Simulación	
Integración H y V del proceso	X
Internet industrial de las cosas	X
Ciberseguridad	
La nube	
Fabricación aditiva	X
Realidad aumentada	

Fuente: Elaboración propia.

El resultado final de esta estrategia planteada es que la fábrica ha pasado de una tecnología I1 a I4, sin la necesidad de invertir en nuevas maquinarias ni pensar en recorte de personal.

### Escenario 2

En el segundo escenario, planteamos dos etapas necesarias en nuestra estrategia, las cuales se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 8  
Etapa 1 y 2. Escenario 2

Etapa 1 Tecnologías I4	Escenario 2 Puntos críticos de producción			Etapa 2 Tecnologías I4	Escenario 2 Puntos críticos de producción		
	IyD	MdO	NA		IyD	MdO	NA
Big data y analytics	X			Big data y analytics			
Robots autónomos				Robots autónomos			X
Simulación				Simulación			
Integración H y V del proceso				Integración H y V del proceso			X
Internet industrial de las cosas	X			Internet industrial de las cosas			
Ciberseguridad				Ciberseguridad			X
La nube				La nube			
Fabricación aditiva				Fabricación aditiva			
Realidad aumentada				Realidad aumentada			

Fuente: Elaboración propia.

El uso de maquinaria en mayor proporción que la mano de obra es en un pedestal alto que permite reducir las etapas; así, en solo dos etapas, se logra tener las herramientas necesarias para dar el salto de I1 e I2 a I4.

**Resultados directos.** Se maneja la información generando una cadena de valor en la producción, que involucra a la fábrica, al cliente y a los proveedores; y se incrementa la eficiencia, al no tener tiempos de parada y al poseer un mejor control de la producción (especialmente, qué se produce y cuándo), lo cual acarrea un retorno monetario que permite competir con productos no solo de competencias nacionales, sino que se integran al mercado internacional.

Tabla 9  
Resumen de logros. Escenario 2

Tecnologías I4	Escenario 2
Big data y analytics	X
Robots autónomos	X
Simulación	
Integración H y V del proceso	X
Internet industrial de las cosas	X
Ciberseguridad	X
La nube	
Fabricación aditiva	
Realidad aumentada	

Fuente: Elaboración propia.

Nuevamente, no se plantea como necesidad comprar nueva maquinaria o planes complejos de manejo de personal.

### Escenario 3

El tercer escenario está más cerca de lo necesario para implementar I4. Debido a ello, lo planteado busca optimizar su índice de producción, así como integrarlo a la cadena de valor (fábrica, cliente y proveedor) de manera automatizada con la plataforma correspondiente de sostenibilidad y trazabilidad en la producción y la posventa.

Tabla 10  
Etapa 1. Escenario 3

Etapa 1 Tecnologías I4	Escenario 3 Puntos críticos de producción		
	IyD	MdO	NA
Big data y analytics	X		
Robots autónomos		X	
Simulación			
Integración H y V del proceso			X
Internet industrial de las cosas	X		
Ciberseguridad	X		
La nube			
Fabricación aditiva		X	
Realidad aumentada			

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa, este escenario convierte a la fábrica en un sistema completamente integrado, con capacidad de predecir cambios y adaptarse a ellos, y abierto a la integración de nuevas tecnologías como el uso de la nube, simulaciones y realidad aumentada. Esto potencia no solo sus índices de producción, sino también su visión de futuro.

### Claves de Industria 4.0

Si bien las ideas erróneas de aplicar tecnología a los sistemas de producción plantean que provocará consecuencias inmediatas como el despido masivo y los trastornos sociales de pobreza y desocupación, la realidad de Industria 4.0 es distinta. Esta plantea necesidades para los jóvenes nacidos en la era digital y que viven con capacidades que hace 30 o 40 años no se tenían. Ahora bien, esto permite involucrar de manera activa a las nuevas generaciones en actividades de soporte requerido; estas son las llamadas claves de Industria 4.0 [8].

A continuación, se muestran los ejes de una industria y lo que permitirá que se denomine inteligente.

- **Diseño.** Uso de métodos colaborativos, diseño masivo de productos personalizados, diseño que garantiza la sostenibilidad del producto y la evolución digital del portafolio de productos.
- **Fabricación.** Medios productivos flexibles y eficientes, flexibilidad de la producción, tareas automatizadas, impacto ambiental reducido del proceso productivo, procesos de fabricación autorregulables y reducción de costos.
- **Logística.** Modelos logísticos inteligentes, automatización de procesos, reducción de *stock*, impacto ambiental reducido del proceso y más referencias para menos tiradas.
- **Distribución y venta.** Digitalización de canales y gestión omnicanal; conexión en tiempo real entre empresa, producto y cliente; distribución eficaz y personalizada; predicción de hábitos de consumo; y relación posventa con el cliente.

### Caso de aplicación

Abordaremos un caso que se centra en el escenario 2, cuya problemática se presenta a continuación:

#### Fase 1. Problemática

Una empresa textil presentaba el problema de merma (40 % de la producción por turno) y de eficiencia de producción. En el primer caso, había demasiada merma de tela y, en el caso de producción, las paradas que sufrían las máquinas durante las 24 horas del día también eran demasiadas (por semana se registraban 40). Es decir, no se controlaba la merma y tampoco la producción; además, los registros eran mediante formatos escritos en hojas y llenados manualmente para ambos casos, por lo que el supervisor recibía la información al final del día.



Figura 2. Tecnología usada en la planta textil.  
Fuente: <https://bit.ly/2otYCF8>

#### Fase 1. Solución planteada

Para la solución en esta primera fase, se atacó el problema usando la estrategia descrita anteriormente (escenario 2); es decir, IoT, para recolectar información, y la recopilación y uso de esa información mediante *big data* y *analytics*. Para ello, se tuvo en cuenta que la máquina tejedora gira cuando está en funcionamiento, es decir, cuando está produciendo, y deja de girar cuando se dan eventos como rotura de hilo, cambio de fardo y fallas en el sistema. Luego de determinar el modo de funcionamiento de la máquina, se procedió a planificar la solución técnica, la cual incluía la instalación de un sistema que determine si la máquina giraba o no. Para ello, se instaló un detector inductivo, el cual producía un pulso cada vez que la máquina completaba una vuelta.

Mientras se producen estos pulsos, se puede tener la certeza de que la máquina está funcionando y, por lo tanto, está produciendo; por el contrario, si estos pulsos no se producen, es porque la máquina está parada y no está en producción. Es decir, se empezó a recabar información mediante la implantación de un sensor del tipo inductivo. Los pulsos del detector se envían al computador industrial, el cual almacena la data y la analiza para determinar, mediante un algoritmo, el tiempo entre pulsos, esto es, el periodo. Si este periodo crece, es porque la máquina ha parado.

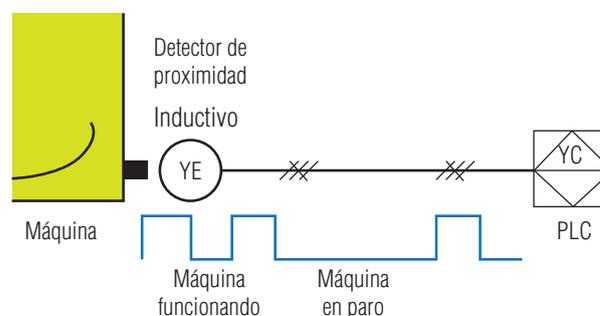


Figura 3. Fase 1. Solución.  
Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con el tiempo de parada, se determina el tipo de evento que produce la parada, lo cual se identifica mediante una codificación como la siguiente:

- 1 parada por rotura de hilo
- 2 paradas por cambio de fardo
- 3 paradas por fallas en la máquina

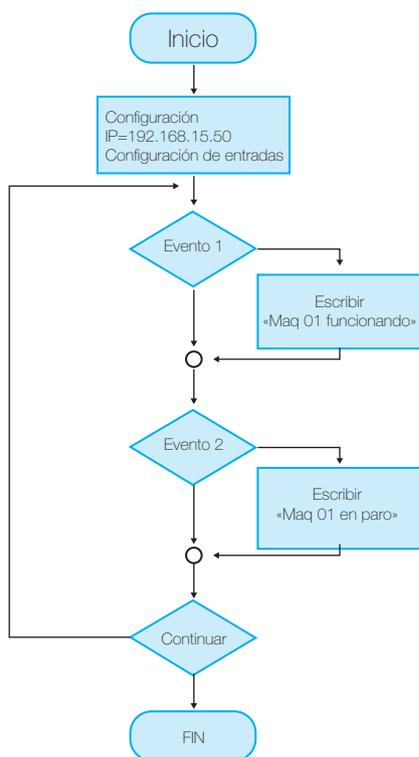


Figura 4. Diagrama de flujo del programa.  
Fuente: Elaboración propia.

La información se envía al servidor para su procesamiento, donde se puede determinar cuántas paradas por día ha tenido la máquina y cuál ha sido el tipo de parada; con esto se calcula la eficiencia de la máquina y la producción diaria.

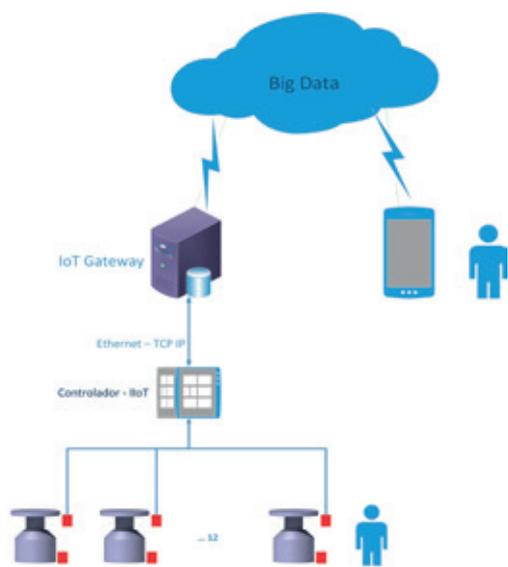


Figura 5. Arquitectura de comunicación.  
Fuente: Elaboración propia.

## Fase 2. Problemática

No se disponía de un control de la cantidad de hilo que ingresaba por área de tela tejida y, por lo tanto, del consumo de hilo y de la calidad de la tela. Por ejemplo, en un caso, un m<sup>2</sup> podía tener una cantidad de hilo distinta al siguiente m<sup>2</sup>, el cual podría tener otra cantidad de hilo. Esto conllevaba como problema la mala calidad de la tela al no tener la misma cantidad de producto en toda su extensión (las encuestas de satisfacción por el producto por parte del cliente llegaban a un 22 %).

## Fase 2. Solución planteada

Se obtuvo la solución aplicando, en este caso, un proceso de integración que permitió, con la ayuda de un segundo sensor (sensor óptico), contar la extensión del hilo usado en un lapso de producción. Esto permitiría identificar si las piezas de tela contenían la misma cantidad de producto. Para ello, se integró la información combinada de las fases 1 y 2 para el cálculo de lo que se denominó la densidad de la tela, índice que determinaba su calidad.

Esto se calculaba cada cierto tiempo de tal forma que determinaba si la tela contenía o no la misma cantidad de material en toda su extensión.

El valor de la inversión realizada por máquina se estimó en, aproximadamente, 270 dólares americanos. Considerando el *hardware* instalado para un total de 50 máquinas (valor promedio de una fábrica mediana), resulta en una inversión total de 13 500 dólares americanos.

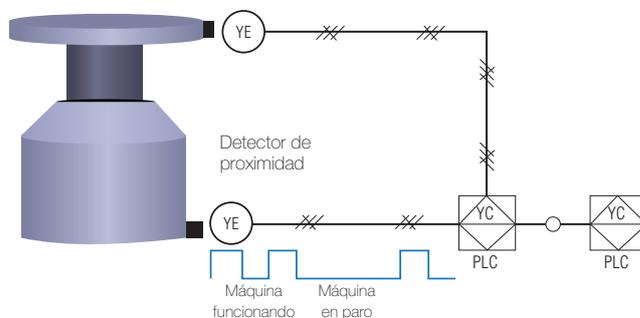


Figura 6. P&ID de fases 1 y 2 de instrumentación.  
Fuente: Elaboración propia.

## CONCLUSIONES

Luego de tener una visión de la realidad tecnológica en nuestro país, de realizar un estudio de la aplicabilidad de Industria 4.0 y de presentar un caso práctico de aplicación, podemos concluir lo siguiente:

- La inversión económica a gran escala no es un factor indispensable en la aplicación de I4 a nuestra realidad tecnológica.
- La aplicación parte de identificar los puntos clave del escenario a tratar para plantear la estrategia adecuada, que no solo muestre el cambio, sino que en el proceso se agregue valor a la actividad del cambio planteando

una estrategia que genere sinergia y que motive a la fábrica a ir a la etapa siguiente, integrándose cada vez más al concepto de I4.

- Las etapas a seguir se diseñarán a medida y según los alcances que la fábrica plantee, priorizando la recolección de información y el concepto de análisis de datos a través de un proceso de integración H y V de los procesos productivos.
- La estrategia planteada no solo se debe enfocar en la parte técnica del proceso productivo, sino que, además, debe involucrar a los elementos fundamentales de la cadena de valor en la producción (el cliente, la fábrica y los proveedores).
- Con el caso práctico presentado, se muestra cómo integrar esto en un proceso de producción que tiene problemas en diversos aspectos, tales como la calidad del producto, las pérdidas por merma, y la falta de control y de información actualizada. La instalación de sensores de bajo costo, y la realización de una integración de la información a nivel de campo en primera instancia y a nivel de gestión y análisis de datos en una segunda instancia permitió eliminar y reducir en casi un 93 % el problema de merma y en un 95 % el problema de control en los diferentes turnos de trabajo (reportes de parada). En consecuencia, se obtuvo la mejora de la calidad del producto, la cual generó un 80 % de aceptación del cliente, que supera en casi un 60 % lo que se tenía antes. Finalmente, la data recopilada permite tener un récord casi en tiempo real de los niveles de producción de cada máquina.
- Los procesos de actualización hacia la tecnología I4 no implican cambiar equipos y maquinarias. Llevar una fábrica a producir en un entorno I4 es realizar una reingeniería de adaptación y un manejo de recursos que minimizan gastos, potencian capacidades no usadas y, sobre todo, generan sinergia económica que se evidencia en mejoras cuantitativas y cualitativas en la producción. Muestras de esto ya se encuentran en marcha, tal como ocurre, por mencionar solo una, con la planta de Bosch en Blaichach, Alemania.

### Proyectos en ejecución

A partir de los conceptos planteados en este estudio, en la actualidad, los autores se encuentran trabajando en dos proyectos en los que se están aplicando los principios de Industria 4.0. Estos son los siguientes:

- **Módulo de control en cascada.** Proceso de reingeniería para actualizar y poner en vigencia un módulo de control industrial, al cual se le aplicará la estrategia de control en cascada en un proceso industrial, pero con las capacidades de integrarse a un entorno automatizado; esto permitirá la recopilación de datos en tiempo real del proceso controlado.

- **Planta piloto Tecsup.** Proyecto para aplicar las tecnologías de IoT industrial, integración H y V del proceso, *big data* y *analytics*, además de realidad aumentada para adaptar el proceso de molienda de minerales a un entorno educativo en Industria 4.0.

### REFERENCIAS

- [1] Computerworld from IDG. (2018). *La nueva unidad Industria 4.0 de Bosch alcanza los 500 empleados*. Computerworld from IDG. Recuperado de <http://www.computerworld.es/tecnologia/la-nueva-unidad-industria-40-de-bosch-alcanza-los-500-empleados>
- [2] Federación regional de Empresarios del Metal Murcia. (2018). *Bosch lidera la Industria 4.0 con productos innovadores*. FREMM. Recuperado de <http://www.fremm.es/portal/category/1941-Bosch-lidera-la-Industria-4.0-con-productos-innovadores.html>
- [3] Fierro Santillán, C. (2017). *La cuarta revolución industrial en la educación*. Iberoamérica divulga. Recuperado de <http://www.oei.es/historico/divulgacioncientifica/?La-cuarta-revolucion-industrial-en-la-educacion>
- [4] Joyanes, L. (2017). *Industria 4.0*. México: Alfaomega.
- [5] Ranz, R. (2016). *La revolución digital: el impacto de la industria 4.0 en el empleo y la educación*. Roberto Ranz. Recuperado de <https://robertoranz.com/2016/06/06/la-revolucion-digital-el-impacto-de-la-industria-4-0-en-el-empleo-y-la-educacion/>
- [6] Tecnología para los negocios. (2018). *Industria 4.0: las claves de la 'empresa inteligente'*. Tecnología para los negocios. Recuperado de <https://ticnegocios.camaravalencia.com/servicios/tendencias/industria-4-0-las-claves-de-la-empresa-inteligente/>
- [7] Andelfinger, V. y Hänisch, T. (2017). *Industrie 4.0*. Germany: Springer Gabler.
- [8] Roddeck, W. (2013). *Grundprinzipien der Mechatronik*. Deutschland: Springer Vieweg.

### ACERCA DE LOS AUTORES

#### José J. Lazarte Rivera

Ingeniero electrónico por la Universidad Nacional de Ingeniería. Ha participado en programas de entrenamiento en Aplicaciones Industriales de la Electrónica en el Instituto Politécnico de Incheon en Corea del Sur. Graduado del programa Fab Academy en 2014 en Fabricación Digital.

Posee certificación Train the Trainer, otorgada por Bosch Rexroth de Alemania, en Sistemas de Automatización – Industria 4.0. Tiene experiencia en mantenimiento electrónico y desarrollo de soluciones en el campo de la electrónica industrial, y como consultor de empresas locales. Profesor a tiempo completo en Tecsup, dicta cursos relacionados con Electrónica Analógica y Digital. Tiene a su cargo el laboratorio de Electrónica de Potencia en el Departamento de Electricidad y Electrónica de Tecsup. Asimismo, dicta cursos de especialización y diplomados para profesionales de la industria, especialmente, en temas de control electrónico de potencia y control automático de motores eléctricos.

@jlazarte@tecsup.edu.pe

### **Miguel A. Chávez Luna**

Profesional en Electrónica y Sistemas Computarizados por Tecsup. Bachiller en Ingeniería Industrial por la Universidad Antonio Ruiz de Montoya. Candidato a máster en Control y Automatización por la Pontificia Universidad Católica del Perú. Ha participado en programas de especialización en Adquisición de Datos y Control por Computadora en EE. UU., Ingeniería Mecatrónica en México y Brasil, y Sistemas de Automatización en Alemania. Posee certificación Train the Trainer, otorgada por Bosch Rexroth de Alemania, en Sistemas de Automatización – Industria 4.0. Miembro de IEEE en la sección de Robótica y Automatización. Profesor a tiempo completo en Tecsup, dicta cursos relacionados con automatización industrial y sistemas mecatrónicos.

@mchavez@tecsup.edu.pe

### **Manuel M. Alvarado Andrade**

Ingeniero electrónico por la Universidad Ricardo Palma. Ha estudiado una maestría en Administración de Negocios en la Universidad Politécnica de Madrid, un diplomado en Gestión de Proyectos en la Universidad Privada de Piura y una especialización en Electrónica Aplicada en el SENAI de Brasil. Es miembro directivo de ISA Perú. Ha realizado diferentes trabajos para la industria en el área de Automatización. Profesor a tiempo completo en Tecsup, dicta cursos del área de Automatización: Proyectos de Automatización y Proyectos Mecatrónicos. Tiene a su cargo el Laboratorio de Medición y Control. Participa en el dictado de cursos de especialización y diplomados para profesionales de la industria. Actualmente, es coordinador de la carrera de Mecatrónica Industrial.

@malvarado@tecsup.edu.pe

Recibido: 10-04-19

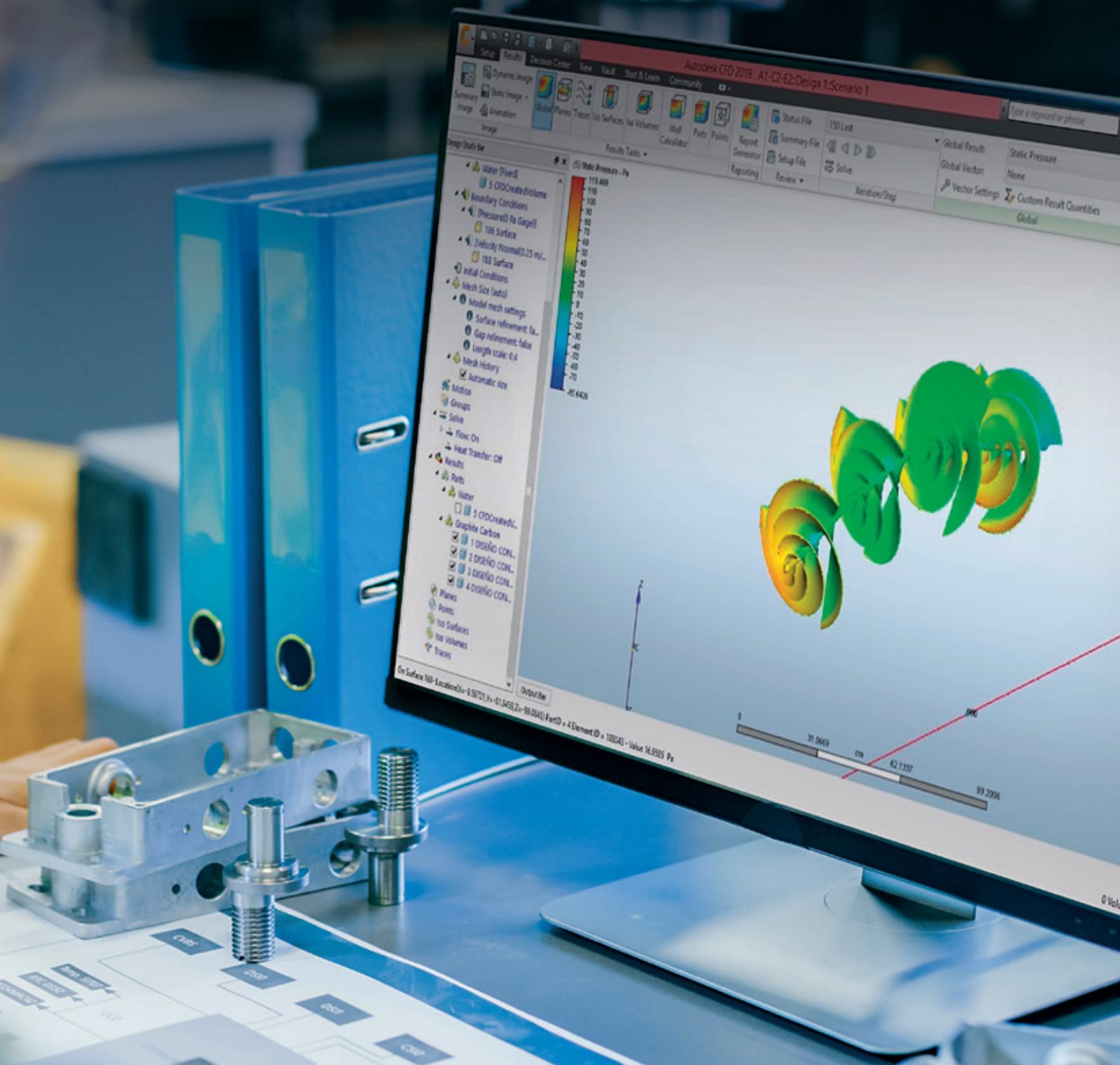
Revisado: 27-06-19

Aceptado: 02-07-19



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-  
NoComercial 4.0 Internacional.

**El diseño está basado en el lirio de agua como unidad natural de imitación**, debido a que esta flor permite que entre sus espadas el agua pueda pasar de una manera más adecuada.



## Diseño de una turbina hidráulica con tecnología biomimética

### *Design of a Hydraulic Turbine with Biomimetic Technology*

#### RESUMEN

En la actualidad, la falta de energía eléctrica en lugares aislados o zonas rurales generan incomodidad en sus habitantes tanto como en el aspecto social, económico y académico; por otra parte, es conocido que la dirección en la que está enmarcada las fuentes generadoras futuras serán las centrales eléctricas del tipo renovable por sus diversas ventajas, es así que los diseñadores de nuevas tecnologías están encaminados en encontrar formas adecuadas de diseño que mejoren la capacidad de los elementos y que puedan ser aprovechados en baja escala, una de estas formas está basado en la ciencia de la biomimética.

Esta investigación tiene como objetivo diseñar y evaluar una propuesta de turbina hidráulica para determinar los factores que influyen en la generación hidroeléctrica en situaciones donde el caudal es, como mínimo,  $4\text{m}^3/\text{s}$ , así como analizar la respuesta del sistema cuando es sometido a un análisis computacional de fluidos.

La metodología del diseño está basada en la tecnología biomimética, cuya ciencia trata de emular elementos naturales como inspiración de diseño, así como la evaluación de la investigación al aplicar el diseño experimental de factorial « $2^3$ », el cual permite elegir una combinación adecuada de los factores encontrados para este tipo de turbina.

De los resultados obtenidos, se propone un método para construir y evaluar diseños virtuales basados en tecnología biomimética, desarrollando un prototipo eficiente, económico y adecuado a las características del lugar. Se logró diseñar el primer tipo de ábabe basado en la flor «lirio de agua», como unidad natural de imitación, cuyo diseño planteado es adecuado para generación eléctrica porque permite a través de la ciencia de la biosimbiosis obtener un diseño extraído de la naturaleza e imitarlo.

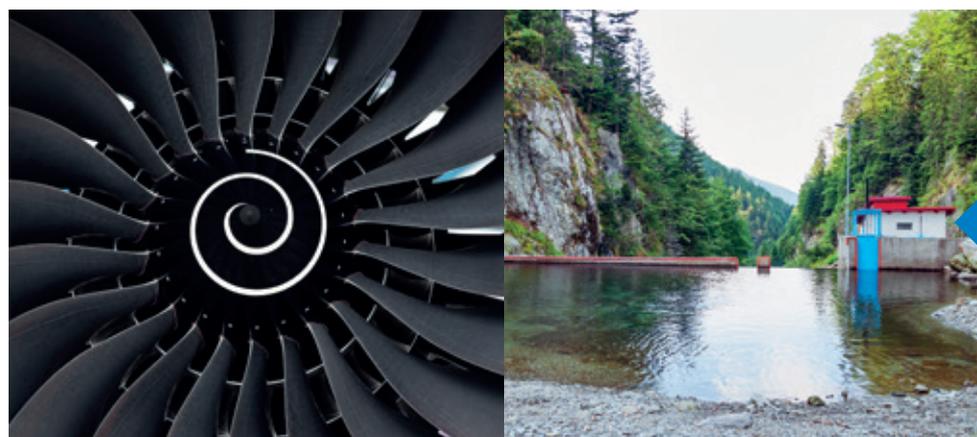
#### ABSTRACT

*Nowadays, the lack of electrical energy in isolated places or rural areas generates discomfort in its inhabitants as much as in the social, economic and academic aspects; by the other hand, it is known that the direction in which the future generating sources are frame will be the renewable type power plants, due to their diverse advantages. It is thus that the designers of new technologies are aimed at finding suitable forms of design that improve the capacity of the elements and that can be used on a small scale; one of these forms is based on the science of biomimetics.*

*The objective of this research is to design and evaluate a proposal for a hydraulic turbine to determine the factors that influence hydroelectric generation in situations where the flow is at least  $4\text{m}^3/\text{s}$ , as well as to analyze the response of the system when subjected to computational analysis of fluids.*

*The design methodology is based on biomimetic technology; this science tries to emulate natural elements as design inspiration, as well as the evaluation of the research by applying the experimental design of factorial “ $2^3$ ”, which allows choosing an adequate combination of the factors found for this type of turbine.*

*From the results obtained, a method is proposed to construct and evaluate virtual designs based on biomimetic technology, developing an efficient prototype, economic and appropriate to the characteristics of the place. It was possible to design the first type of blade based on the flower “water lily”, as a natural imitation unit, whose proposed design is suitable for electricity generation because it allows, through the science of biomimetics, to obtain a design extracted from nature and imitate it.*



#### Palabras claves

Biomimética, turbina, generación hidráulica, energía renovable, análisis computacional fluido-dinámico.

#### Key words

Biomimicry, turbine, hydraulic generation, renewable energy, computational fluid dynamics.

## INTRODUCCIÓN

Los principales motivos para realizar proyectos de generación eléctrica a través de recursos renovables son los siguientes: 1) ambiental, los cuales generan un bajo impacto negativo; 2) económico, cuyas fuentes generadoras clásicas en contraste con las térmicas tienen la ventaja de ser más económicas en construcción, pero al momento de generación, son las que tienen más alto costo por producción, sin olvidar que al quemar combustibles fósiles provocan un alto nivel de contaminación.

De acuerdo con el informe 2013 de *World Wildlife Found* (WWF) citado en Tarabochia, llamado *Mythbusters*, acabando con los mitos sobre energías renovables: «cuadruplicar el consumo actual de energía renovable para el año 2035 (en el mundo) podría evitar hasta el 23 % de la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>» [10].

En la figura 1, se visualiza el consumo de energía para el 2017 en sus diferentes formas: el consumo de gas llegó alrededor de 10 cuatrillones de unidad térmica británica (BTU), el petróleo cerca de los 6 cuatrillones de BTU, la energía eléctrica cerca de 3 cuatrillones de BTU y la energía renovable tiene un consumo de apenas 2 cuatrillones.

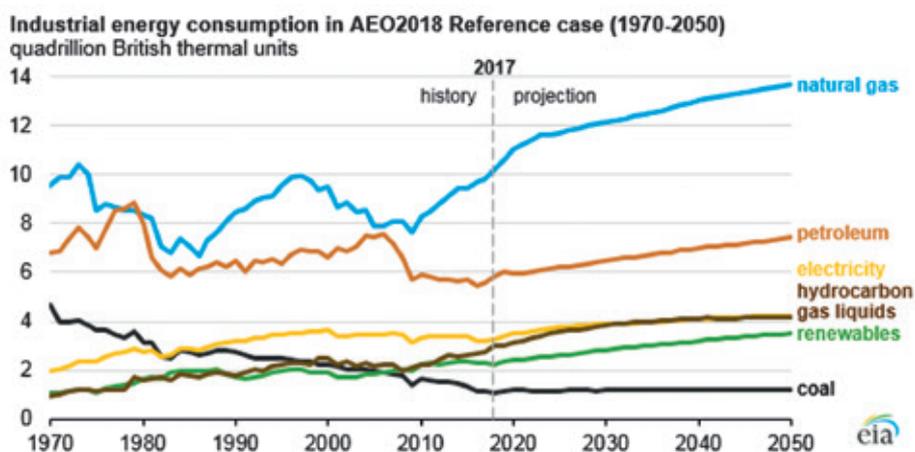


Figura 1. Consumo industrial de energías.  
Fuente: [3] [www.eia.gov](http://www.eia.gov)

El índice de electrificación en América Latina llega a ser bajo, aunque estamos en épocas donde la tecnología es uno de los principales desarrollos que la mayoría de países conocen y poseen. Las zonas rurales de este continente concentran el 78 % de personas que no disponen de electricidad y el 66 % de aquellas que no tienen acceso a la electricidad ni al gas [8].

De esta manera, se puede demostrar que no solo el Perú necesita inversión de electrificación para las zonas rurales, varios países de Latinoamérica también tienen este problema. Se puede juzgar como causa a la falta de este servicio, así como múltiples factores; pero lo más importante es crear soluciones adecuadas, factibles, eficientes y de bajo costo. Entrar en discusiones sobre qué personajes son los responsables de esta carencia estaría por demás, en lo que se deben enfocar los investigadores es encontrar soluciones necesarias que permitan disminuir la brecha y la falta de energía eléctrica.

De acuerdo con la agencia financiera internacional de evaluación de riesgo, *Moody's*, las energías renovables no convencionales serán la clave para impulsar el crecimiento económico en Latinoamérica [6].

La anterior información nos indica que se puede incrementar el nivel económico de los países a través de generación energías renovables. Perú tiene una matriz energética amplia, pero la generación con recursos energéticos renovables (RER) no llega al 5 %. Por otra parte, nuestro país tiene un pequeño porcentaje de plantas de generación en reserva que pueden ser usados

cuando existan problemas de desabastecimiento de energía, pero estas centrales son de tipo térmicas, y se utilizan cuando existen contingencias en la transmisión e incrementa el costo de facturación de los usuarios.

Los países con gran potencial hidráulico obtienen la mayor parte de la electricidad, desde centrales hidráulicas por sus grandes ventajas [2].

Debido a que la central energética para producción de energía se basa en el aprovechamiento de recursos energéticos renovables, por ese motivo, se debe impulsar el desarrollo de centrales de ese tipo.

En esta investigación, se desarrolla un diseño y se evalúa el sistema a través de un análisis computacional fluido dinámico (CFD), lo que ayuda a evaluar las características básicas que debe poseer un diseño adecuado. Para Gaitán, [5] en su investigación de validación del comportamiento de un rotor biomimético mediante un modelo supervisado en CFD, las características necesarias para realizar un diseño adecuado son 1) lograr un mallado adecuado para que el análisis sea el más óptimo, 2) desarrollar un modelo matemático de modelamiento de la turbina, y 3) evaluar ecuaciones hidráulicas para obtener resultados coherentes, los cuales son necesarios para la investigación, ya que la turbina fue elaborada mediante este método, el cual contribuyó a reducir tiempo en el diseño.

**FUNDAMENTOS**

**Biomimética**

Esta ciencia tiene una cualidad general que consiste en realizar un proceso que comienza a remodelar y eliminar el material que es innecesario, para así formular un sistema estructural completamente optimizado. Según Benyus, la biomimética o biosimbiosis (Biomimicry) es una innovación inspirada en la naturaleza, es el proceso de mirar un elemento natural y tratar de diseñar la mejor adaptación de este elemento [1].

**Niveles de biomimética**

**A) Forma**

Es la imitación de los rasgos formales de los seres vivos. Estos rasgos están supeditados a una o varias funciones específicas. Por ejemplo, generar formas que se asemejen a los dientes del tiburón para cortar objetos con el menor esfuerzo posible. Este nivel de materialización es inicial porque puede o no conllevar sostenibilidad [9].

**B) Proceso**

Este nivel involucra todo lo relativo a los procesos naturales y cómo se pueden reproducir en un diseño o tecnología. Por ejemplo, los dientes de tiburón se restituyen de manera sistemática y sincrónica, sin derroche de ningún tipo de elemento o energía. En este nivel, la sostenibilidad es parte integrar el resultado [9].

**C) Sistema**

Esta fase implica la integración de las partes en el todo, representa el cómo nuestros productos son ingredientes de un sistema amplio y complejo, donde se interrelacionan de manera orgánica. El tiburón forma parte de una cadena alimenticia que a su vez se integra en un ecosistema que forma parte de un ambiente, donde se alimenta, respira, reproduce, muere, descompone y da paso a otros procesos dentro de esa misma dinámica. Esto es precisamente lo que define si un producto es parte o no de un sistema. Si un producto, en su ciclo de vida, interrumpe algún proceso dentro del sistema, no se puede considerar sostenible [9].

**Productos de innovación tecnológica**

**A) Reflectores de luz**

El diseño de este invento fue a través del análisis de la función de la característica esencial del ser vivo (el reflejo de la luz cuando se proyecta un poco sobre los ojos de los gatos) y usándolo para sistemas únicos (carreteras oscuras). Desarrollar un proyecto eficiente, a causa de que la instalación de estos sistemas, es esencial en carreteras de tramo largo, y que no tengan una iluminación adecuada.

**B) Ropa termorreguladora**

El diseño termorregulador fue diseñado a través de la observación de los conos de pino, el cual, cuando estos elementos se encuentran cerca de una fuente de calor, los pétalos se abren permitiendo que el calor incida también en la parte interna del cono; y cuando hay una disminución de la temperatura cerca del ambiente del cono de pino, este se cierra, permitiendo que el núcleo del pino no sufra los estragos del ambiente.

**C) Tren bala japonés**

Este diseño fue adaptado por la capacidad que tiene el pájaro martín pescador para entrar en el agua y pescar su comida. Esta forma en la parte frontal del tren bala permite viajar a alta velocidad, evitando que la fricción producida por la alta velocidad dañe el tren y que se desplace sin que se reduzca la velocidad.

**D) Turbina de viento**

La forma ala de la ballena permite a la ballena ir a una velocidad mayor para alimentarse; en cada brazada que da, se desplaza en forma óptima disminuyendo la resistencia y aumentando el flujo dinámico. Adaptar este diseño a tecnología de las hélices de las turbinas eólicas puede funcionar a bajas velocidades.

**METODOLOGÍA**

**Diseño biomimético**

La metodología como diseño biomimético aborda etapas las que se puede diferenciar las características esenciales de cada factor para un diseño adecuado.

**A) Identificar**

Se observaron diferentes elementos naturales, cuyas capacidades funcionales se adapten mejor a un ambiente acuático, y de los cuales se obtuvieron los siguientes datos: el área de contacto de sus elementos, la forma que poseía, la composición y la cantidad de sus partes. Los elementos que poseían estas características eran la rosa y el lirio de agua.

**B) Interpretar**

Se analizaron las partes de los elementos naturales en contacto con el agua, diseñándose esas partes a fin de conseguir la cantidad necesaria de agua para su crecimiento evitando excesos. La característica resaltante fue, que la hoja se extendía muy ancha al comienzo y cónica a la distancia de su eje, teniendo menor área en la parte más baja del pétalo

**C) Descubrir**

Los elementos que poseían estas características eran la rosa y el lirio de agua. Se encontraron algunas diferencias entre estos elementos, la primera era que la forma de los pétalos del lirio de agua es más abierta al principio, en cambio, la rosa los tiene más cerca a sus pistilos, por lo que, comparando en una turbina, no era adecuado usar como emulación esta forma. Y la segunda, la rosa tiene una gran cantidad de pétalos, además de que la forma en que se va desarrollando esta no permite el paso de agua, todo lo contrario sucede en el lirio de agua.

**D) Resumir**

Las partes de los elementos que se identificaron para adaptar, poseen disposiciones geométricas resaltantes; por ejemplo, la disposición de los pétalos de la rosa está determinada por una progresión geométrica descrita como la sucesión de Fibonacci. Se considera que esta característica es una forma interesante de diseño natural, ya que muchos elementos tienen esta cualidad de crecimiento, tal como se aprecia en figura 2.



Figura 2. Ilustración de la disposición en espiral en la naturaleza. Patrón de Fibonacci.  
Fuente: [4] es.123rf.com

### E) Emular

Esta etapa corresponde diferenciar factores para el diseño adecuado de la turbina, por tal motivo, se describió el diseño se estaría basada en la variación de cantidad de alabes, cantidad de campanas y el tipo de eje.

### F) Evaluar

Después de la evaluación de las diferentes turbinas, a través del diseño experimental  $2^3$ , se pudo encontrar cualidades funcionales diferentes en cada tipo de turbina. Los más resaltantes fueron el tipo de eje y de cantidad de alabes. En comparación con la naturaleza del elemento, se adaptó a la capacidad de sus pétalos a recibir la mayor cantidad de fluido. Se considera que este tipo de turbina es óptima para bajos caudales, debido a los resultados obtenidos en la simulación, aunque también se encontró indicios de que este tipo de turbina también es adecuada para altas velocidades de afluentes hídricos.

### Evaluación para el diseño

Para la evaluación del prototipo de turbina diseñado, se utilizó un *software* de simulación CFD Autodesk, que permita configurar características necesarias para la simulación. Las turbinas se desarrollaron mediante el método sistémico, en el cual se consideraron los factores que intervendrían directamente con la capacidad de generación de la turbina. Este método permite configurar elementos del sistema que no se podría dejar de lado en la investigación. Los tres elementos fundamentales de la turbina son: alabe, campana y eje.

Se consideró que los datos de entrada y salida son relevantes para lograr una adecuada investigación. Entonces, en la simulación se tomó en cuenta el material, las condiciones de frontera, la velocidad del fluido, la presión en las fronteras, la forma del fluido y el tipo de mallado, como datos de entrada. Asimismo, los datos de salida considerados fueron los siguientes: la fuerza y la presión en la turbina, los cuales son ingresados en el *software*.

### Diseño factorial $2^3$

Para evaluar el diseño, se realizó al objeto de estudio pruebas experimentales a las combinaciones de los factores para la posible turbina. En un primer instante, se diseñó la hélice que es el elemento principal de cualquier turbina, con base a la metodología biomimética. Después, con el diseño de las ocho turbinas, se pasó a evaluar, mediante el diseño de solución, el mejor diseño de turbina, como se aprecia en la tabla 1. La variable dependiente de la investigación es la energía eléctrica. Esta dimensión se puede hallar encontrando el torque que tiene cada turbina, para el diseño factorial; como variable independiente, las dimensiones de la configuración de la turbina fueron la cantidad de alabes: A1:3 y A2:4, cantidad de campanas: C1:3 y C2:4 y tipo de eje E1: Estático E2: Biomimético.

## RESULTADOS

Basado en el diseño en espiral para una construcción biomimética, el primer paso es identificar. Se encontró que la unidad básica para realizar el diseño será la estructura fisionómica del lirio de agua, cuyo nombre científico es *Zantedeschia aethiopica*. Según el gobierno regional de Junín, las dimensiones que tiene un canal de regadío son 80 cm de ancho por 70 cm de alto; en algunos sectores, alcanza los 80 cm de ancho por 90 cm de alto [7].

Entonces, para desarrollar el diseño, el diámetro máximo que tendrá la turbina será 70 cm, para que exista un pequeño espacio y así los alabes no golpeen las paredes del canal. Como segundo paso, se interpreta el elemento de la flor, en este caso, la espata, para determinar el ángulo correcto que tendrá el alabe. Tomamos como base de diseño una relación de ángulo entre la vertical y el inicio del alabe, una función en proporción del número áureo  $\Phi$ ; siendo:  $\Phi = (1+\sqrt{5})/2$ , y si fuese el caso modificando el ángulo de ataque de la turbina en proporción del número irracional  $\sqrt{5}$ , cuya cantidad permite una sucesión semejante a la naturaleza.

Las dimensiones insertadas en el *software* se desprenden de los siguientes cálculos, en donde:

D: Diámetro de la turbina

d: Diámetro del eje

$$A = \frac{D}{2} - \frac{d}{2}$$

Si:

- D=70cm
- d= 1plg= 2,54cm

En la figura 3, se detalla las distancias A, B, C, considerando el eje como base de diseño.

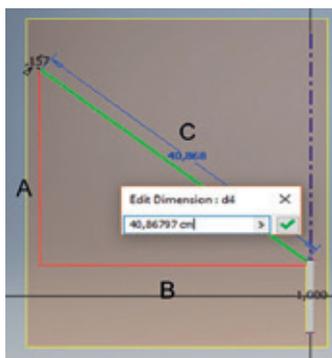


Figura 3. Cálculo de las dimensiones para la unidad básica de estudio.  
Fuente: Elaboración propia.

El ángulo « $\gamma$ » se halla mediante una proporción del número áureo  $\phi = \frac{1+\sqrt{5}}{2}$ ; en este caso, se usa la ecuación:

$$\gamma = \frac{90^\circ}{\frac{1+\sqrt{5}}{2}}$$

$$\gamma \cong 55,62306$$

Para hallar C, se necesita del ángulo « $\gamma$ » que se encuentra entre la vertical y el lado C.

$$C = A \cdot \csc(\gamma)$$

$$C = 40,86797 \text{ cm}$$

El diseño de estos cálculos se muestra en el diseño de la unidad básica. Tal como se muestra en la figura 4.



Figura 4. Resultado final de la unidad básica de estudio vista frontal.  
Fuente: Elaboración propia.

Después de construir, ensamblar y analizar el movimiento de las turbinas, se procedió a desarrollar las pruebas en la simulación; en gran medida, esta etapa es el eje de esta investigación. Porque cuando se desarrolló en la metodología el diseño de 2 factores elevado a la potencia 3, en la figura 6, se realizó el análisis de presión que tiene la unidad básica de estudio. Cuando las iteraciones son menores, pueden tener un efecto de error en la simulación, por lo que se encontró que, por lo menos, para tener un dato fiable de estas turbinas, la cantidad mínima de iteraciones no debía ser menos de 100. En la figura

5, se aprecia que la presión es más en los bordes de la unidad básica de estudio, llegando a los 55 000 dina/cm, demostrando así que en esos lugares la presión es mejor. La presión abarca en toda el área de diseño, dejando solo una baja presión en las partes cercanas a las salidas del agua.

El mallado para la simulación de la unidad básica de estudio mostrada en la figura 5 fue automático, no se utilizó el método manual porque este elemento no tiene complejidad en su diseño.

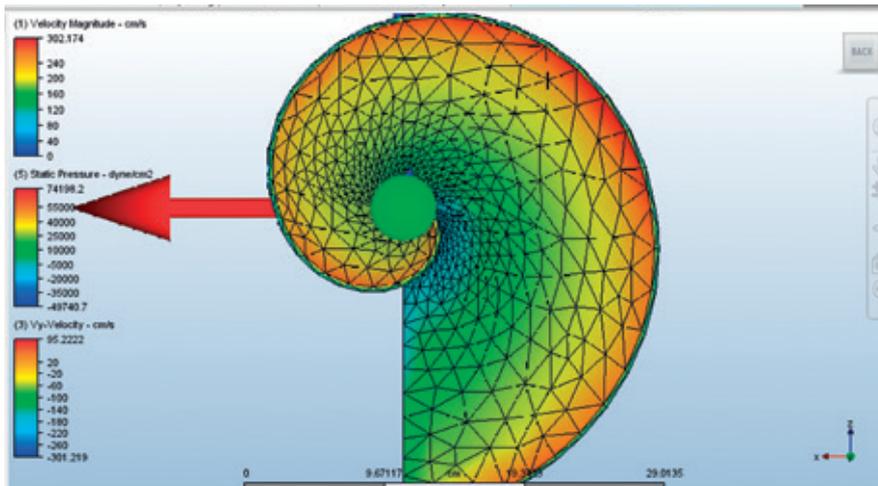


Figura 5. Mallado de la unidad básica de estudio.  
Fuente: Elaboración propia.

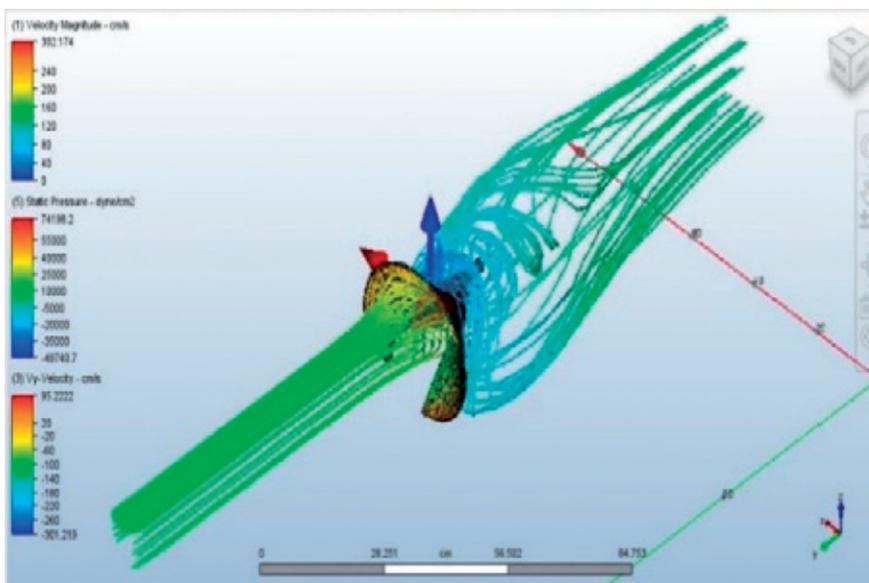


Figura 6. Simulación de la unidad básica de estudio.  
Fuente: Elaboración propia.

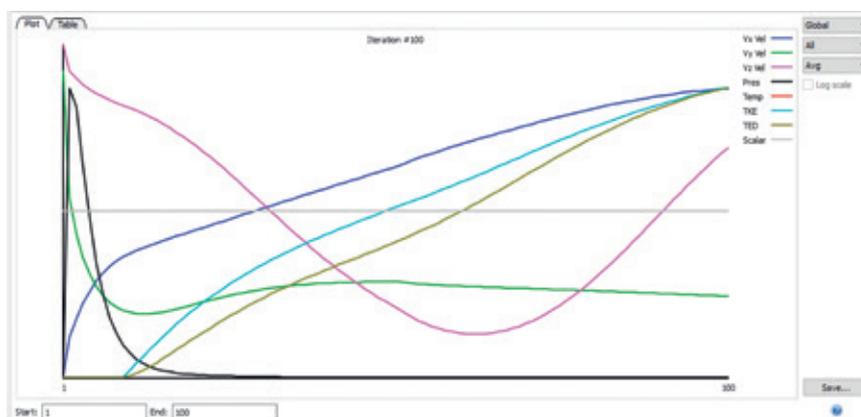


Figura 7. Estudio de convergencia de los resultados.  
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 6, se aprecia la simulación de fluido, la parte que ingresa en la unidad básica de estudio atraviesa toda su área, disminuyendo su velocidad. Por ello, se entiende que poner una campana tras de otra mejora la capacidad de captación de fluido, pero en menor cantidad de fluido, en comparación de la primera campana y la siguiente.

En la figura 7, se muestra que después de 100 iteraciones la respuesta del sistema llega a una convergencia, se decidió, entonces, realizar 150 iteraciones para las 8 turbinas diseñadas a partir de la unidad básica de estudio.

La turbina escogida a través de cuál fue la mejor propuesta de turbina biomimética es la mostrada en la figura 8.

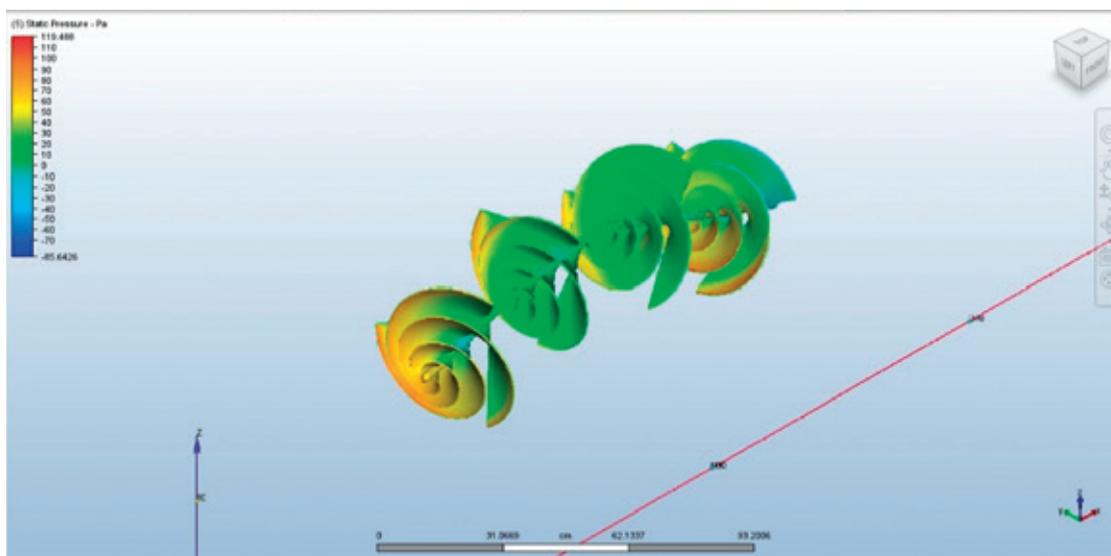


Figura 8. Análisis de la presión de la turbina seleccionada por los datos del diseño experimental.  
Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 1, se aprecia que, en los resultados obtenidos en las simulaciones, la turbina que tuvo un mejor resultado fue la que se usó cuando el eje biomimético alcanzó hasta 12,82N-m de

torque para velocidades de 0,25m/s de fluido en condición de frontera. Estos fueron sometidos en estado estacionario dentro del software CFD.

Tabla 1.  
Rellenado de datos en la tabla de la Metodología para el diseño experimental.

Datos de los resultados con la combinación de las dimensiones incluyendo las réplicas					
Variable independiente			Variable dependiente		Réplicas (1)
Configuración de la turbina			Combinación de tratamientos		
Modelo de observaciones	Cantidad de alabes	Cantidad de campanas	Tipo de eje	Generación de energía eléctrica	
	Unidades	Unidades	Característica	Energía	Torque N-m
	A1	C1	E1	A1-C1-E1	1,3959
A1-C1-E2				6,322141	
C2		E1	A1-C2-E1	0,80503	
			A1-C2-E2	12,82743	
A2	C1	E1	A2-C1-E1	0,577989	
			A2-C1-E2	5,013356	
	C2	E1	A2-C2-E1	0,679113	
			A2-C2-E2	12,09895	

Técnica de recolección de datos:  
 Cantidad de alabes: 02 niveles (A1= 3; A2=4)  
 Cantidad de campanas: 02 niveles (C1= 3; C2=4)  
 Tipo de eje: 02 niveles (E1= Estático; E2=Biomimético)  
 Réplicas: 1  
 Numero de observaciones: 8

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 9 de la gráfica normal de los efectos, se puede apreciar que el factor A (tipo de eje) tiene un efecto sobre el torque en un 90 %; la combinación de los factores AB (tipo de eje y cantidad de campanas) tiene un efecto sobre el torque en un 70 % aproximadamente; el factor B (cantidad de campanas) tiene un efecto sobre el torque en un 60 %; el factor C estuvo por debajo del 5 % en el nivel de efecto, por lo que la cantidad de alabes afecta en menor grado la turbina.

En la figura 10, se observan todos los factores, el mejor resultado se obtuvo cuando el torque fue de 12,8274 N-m, donde la turbina fue de 3 alabes, 4 campanas y donde el tipo de eje fue biomimético. Entonces, se comprueba que la mejor turbina para el nivel factorial propuesto es la turbina «A1-C2-E2».

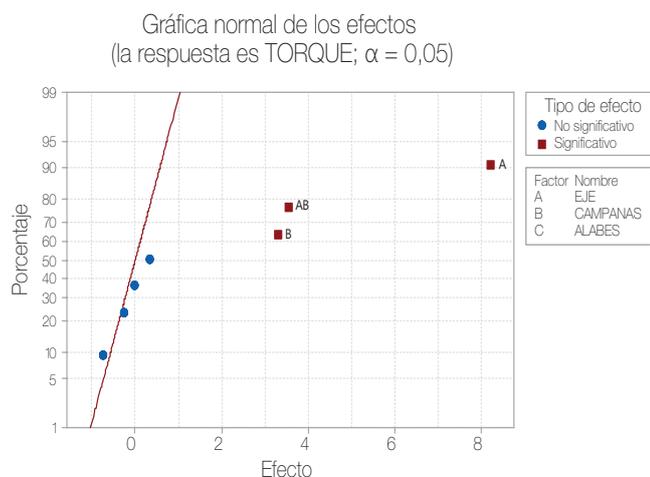


Figura 9. Gráfica normal de efectos.  
Fuente: Elaboración propia.

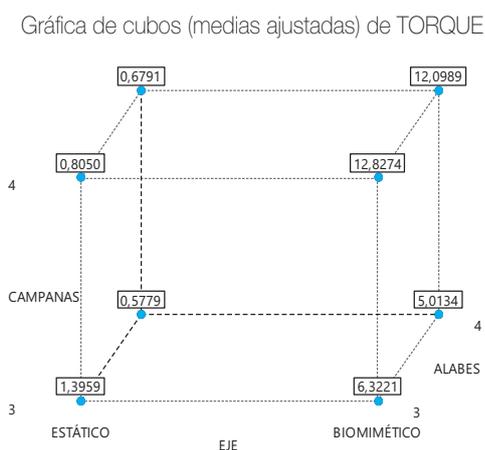


Figura 10. Gráfica de cubos de los 3 factores.  
Fuente: Elaboración propia.

## Análisis de los resultados

Se logró diseñar la unidad básica de diseño, basada en el lirio de agua como unidad natural de imitación, debido a que esta flor permite que entre sus espaldas el agua pueda pasar de una manera más adecuada; entonces, logra que se empape toda la hoja, de esta manera, se establece que fue la mejor opción

para el uso de este diseño y esto se aprecia al demostrar que se encontró que el diseño de la unidad básica de estudio llegó a alcanzar un torque de 10,385 N-m, cuando fue sometido bajo efectos de simulación.

Se configuró una turbina hidráulica con tecnología biomimética para generar con eficiencia energía eléctrica en las zonas con afluentes hídricos de bajo caudal, como primera opción a considerar serían las fuentes hidráulicas del valle del Mantaro. Esta turbina tiene 3 alabes, 4 campanas y es de eje biomimético, el cual fue nombrado como A1-C2-E2 donde el torque que genera es de 12,8274 N-m para 0,25m/s de velocidad del agua, siendo la más adecuada y eficiente frente a los otros 7 diseños desarrollados en esta investigación. Se evaluó 8 diseños de modelos de turbina hidráulica con tecnología biomimética para generar energía eléctrica en las zonas con afluentes hidráulicos del valle del Mantaro, en el cual se realizó 150 iteraciones para cada turbina, teniendo una adecuada simulación de lo que ocurriría cuando la turbina es sometida efectos verdaderos.

Los factores de diseño del modelo de la turbina hidráulica de tecnología biomimética permitirá generar energía eléctrica en las zonas con afluentes hídricos de bajo caudal en el valle del Mantaro de manera eficiente; usando el tipo de eje como efecto en el torque con 90 % de efecto, la combinación tipo de eje y cantidad de campanas en un 70 %, y la cantidad de campanas en un 60 %, en la combinación de cantidad de álabes y de tipo de eje que tiene mejor efecto son de 4 campanas y eje biomimético.

Se determinó la influencia de la modificación de la turbina con tecnología biomimética en la generación de energía eléctrica en las zonas con afluente hídrico de bajo caudal para generar energía eléctrica renovable, demostrando en la gráfica de cubos de los 8 factores el mejor resultado es cuando se tiene 3 álabes, 4 campanas y que sea de eje biomimético.

En la simulación de la distancia mínima de las campanas se consideró 10 cm debido a que se encontró que a esa distancia el torque de la primera pared es de 46,71 N-m, y el par en la segunda pared es de 13,13 N-M, por lo que el par se ha reducido de un 100 % a un 28,11 %. Esto permite que la campana siguiente continúe moviéndose alrededor de su eje.

Se halló la ecuación de regresión lineal del diseño experimental de las turbinas en respuesta al torque, el cual tiene la siguiente forma: «TORQUE= 3,903 - 7,948 EJE + 1,049 CAMPANAS - 2,972 ALABES + 3,716 EJE\*CAMPANAS».

A través de la simulación, se pudo observar que el eje del tipo biomimético solo es aceptable cuando el caudal se encuentra entre 4m<sup>3</sup>s a 7m<sup>3</sup>s, pero, cuando se incrementa más el caudal, este tipo de turbina ya no se considera la más óptima.

Se encontró en los factores que depende mucho de la disposición en que estas están colocadas, por lo que el ángulo, cuando son acopladas, influenciará de manera significativa en el resultado del torque generado y, por ende, la generación desarrollada. En los resultados hallados, se muestra que en las turbinas en donde existe una cantidad menor de torque generado son las que tienen 4 álabes. Esto podría haber ocurrido al momento de ensamblar las piezas y no considerar un ángulo de separación entre cada álabe adecuado.

## CONCLUSIONES

- Se logró diseñar una unidad básica, basada en la flor lirio de agua como unidad natural de imitación. Porque esta flor permite, que, entre sus espatas, el agua pueda pasar de una manera más adecuada. De esta forma, el agua que pasa por sus pétalos humedece toda la hoja, haciendo que esta sea la mejor opción para el diseño, debido a que, cuando se realizó la simulación, las paredes de la turbina llegan a alcanzar un torque de 10,385 N-m. Permitir que los alabes de la turbina se empapen con todo el fluido produce mayor torque en la turbina, por ende, genera más energía eléctrica.
- La configuración de elementos para generar nuevas formas de diseño es una manera adecuada de generar innovación en elementos electromecánicos orientado a investigación tecnológica. Este método para diseñar es muy confundido en investigación aplicada debido a que existe factores para diseños que se pueden configurar y evaluar el comportamiento del sistema; pero en el caso de esta investigación se muestra que es tecnológica, porque esos factores no son conocidos.
- La metodología del diseño de esta turbina se realizó en dos partes, debido a que no existe un método para investigación tecnológica. Este ayuda en trabajos científicos del tipo tecnológico donde se une lo técnico con lo científico, se realiza el diseño basado en cálculos, y de manera experimental, a través de simulación o simulaciones del elemento y con un análisis de datos estadístico se busca la mejor solución. Esta metodología puede ser utilizada por otros investigadores en investigación tecnológica, mejorando los resultados en innovación.
- Se determinó la influencia de la modificación de la turbina con tecnología biomimética en la generación de energía eléctrica demostrando, en la gráfica de cubos de los 8 factores, que el mejor resultado es cuando se tiene 3 alabes, 4 campanas y es de eje biomimético. Se pudo demostrar en la fundamentación del problema que existe mucha necesidad energética, y un sector que necesita cubrir con el horizonte de uso de energía eléctrica. Debido a que las personas más vulnerables con esta necesidad son lugares rurales, se necesita implementar a través de microcentrales hidroeléctricas y que se dedique una especial atención a las investigaciones de este tipo, ya que en gran escala también pueden ser centrales eléctricas de base, entonces, este tipo de turbina propuesta será beneficioso en zonas rurales, por su capacidad de generación y su forma compacta.

## REFERENCIAS

- [1] Benyus, J. [Fast Company]. (2011, octubre 04). What is Biomimicry? [Archivo de video]. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=FBUpnG1G4yQ>
- [2] Ecoticias (8 de febrero de 2012). Energía Hidráulica, la renovable del agua. [Publicación web]. Recuperado de <https://www.ecoticias.com/energias-renovables/61316/Energia-Hidraulica-renovable-agua-energias-renovables>
- [3] EIA, Today in Energy (2018). Natural gas expected to remain most-consumed fuel in the U.S. industrial sector - Today in Energy - U.S. Energy Information Administration (EIA). [Imagen]. Recuperado de <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=35152>
- [4] es.123rf.com. (2015). Ilustración de la disposición en espiral en la naturaleza. Patrón de Fibonacci. [Imagen]. Recuperado de [https://es.123rf.com/photo\\_65153320\\_ilustración-de-la-disposición-en-espiral-en-la-naturaleza-patrón-de-fibonacci.html](https://es.123rf.com/photo_65153320_ilustración-de-la-disposición-en-espiral-en-la-naturaleza-patrón-de-fibonacci.html)
- [5] Gaitán, J. (2017). *Validación del comportamiento de un rotor eólico biomimético mediante un modelo supervisado en CFD*. [Tesis de maestría]. Universidad Nacional de Colombia.
- [6] Gamio, P. (5 de abril de 2018). Ministerio de Energía y Minas: más allá de la minería, también importan las energías renovables. [Publicación web]. Recuperado de <https://pedrogamio.lamula.pe/2018/04/05/los-lobbies-y-la-falta-de-una-clara-voluntad-politica-resisten-a-la-inversion-en-energias-limpias/pedrogamio/>
- [7] Gobierno Regional Junín (5 de mayo de 2016). Gobierno Regional Junín intensifica II Etapa de canales de riego en Chupaca [Noticia web]. Recuperado de [http://www.regionjunin.gob.pe/noticia/id/2016052310\\_gobierno\\_regional\\_junin\\_intensifica\\_ii\\_etapa\\_de\\_canales\\_de\\_riego\\_en\\_chupaca/](http://www.regionjunin.gob.pe/noticia/id/2016052310_gobierno_regional_junin_intensifica_ii_etapa_de_canales_de_riego_en_chupaca/)
- [8] Martin, L. (7 de agosto de 2017). Energía para todos, el nuevo reto de Latinoamérica – Compromiso Empresarial. [Publicación web]. Recuperado de [https://www.compromisoempresarial.com/innovacion\\_social/2017/08/energia-para-todos-el-nuevo-reto-de-latinoamerica/](https://www.compromisoempresarial.com/innovacion_social/2017/08/energia-para-todos-el-nuevo-reto-de-latinoamerica/)
- [9] Sánchez, R. (2015). Biomimética: una metodología de diseño sostenible. *Arquetipo*. (11), 25 – 40. Recuperado de <https://biblioteca.ucp.edu.co/ojs/index.php/arquetipo/article/view/3008/3104>
- [10] Tarabochia, M. (2017). Energías limpias: ¿Por qué es necesario desarrollarlas en el Perú? [Noticia web]. Recuperado de <https://larepublica.pe/sociedad/1136822-energias-limpas-por-que-es-necesario-desarrollarlas-en-el-peru>

## ACERCA DE LOS AUTORES

### Kevin Camayo

Egresado de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Continental, participó en el CADE universitario 2017, en Huancayo, Perú.

@ 47678125@continental.edu.pe

### Carlos Quispe Ancasi

Ingeniero electricista, magíster en Tecnología Energética y doctor en Administración, Maestría en Administración de Empresas, mención en Informática para la Gestión de la Universidad Nacional del Centro del Perú. Consultor y especialista en el sector electricidad, regulación y energía. Es gerente general de la empresa CIRS EIRL, asesor y jefe de proyectos de la empresa CVR Consulting SRL. Docente e investigador de la Universidad Continental, EAP Ingeniería Eléctrica.

@ cquispea@continental.edu.pe

### César Quispe

Director de la Escuela Académica Profesional de Ingeniería Eléctrica y Electrónica y docente de la Universidad Continental. Ingeniero electricista, licenciado en Educación (especialidad Matemática y Física) por la Universidad Nacional del Centro del Perú, magíster en Gestión Educativa y doctor en Ciencias de la Educación por la Universidad Nacional del Centro del Perú.

@ cquispel@continental.edu.pe

### Nabilt Moggiano

Directora de Investigación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Continental, licenciada en Física por la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, máster en Disaster Management (GRIPS, Japón). Exbecaria JICA-Perú.

@ nmoggiano@continental.edu.pe

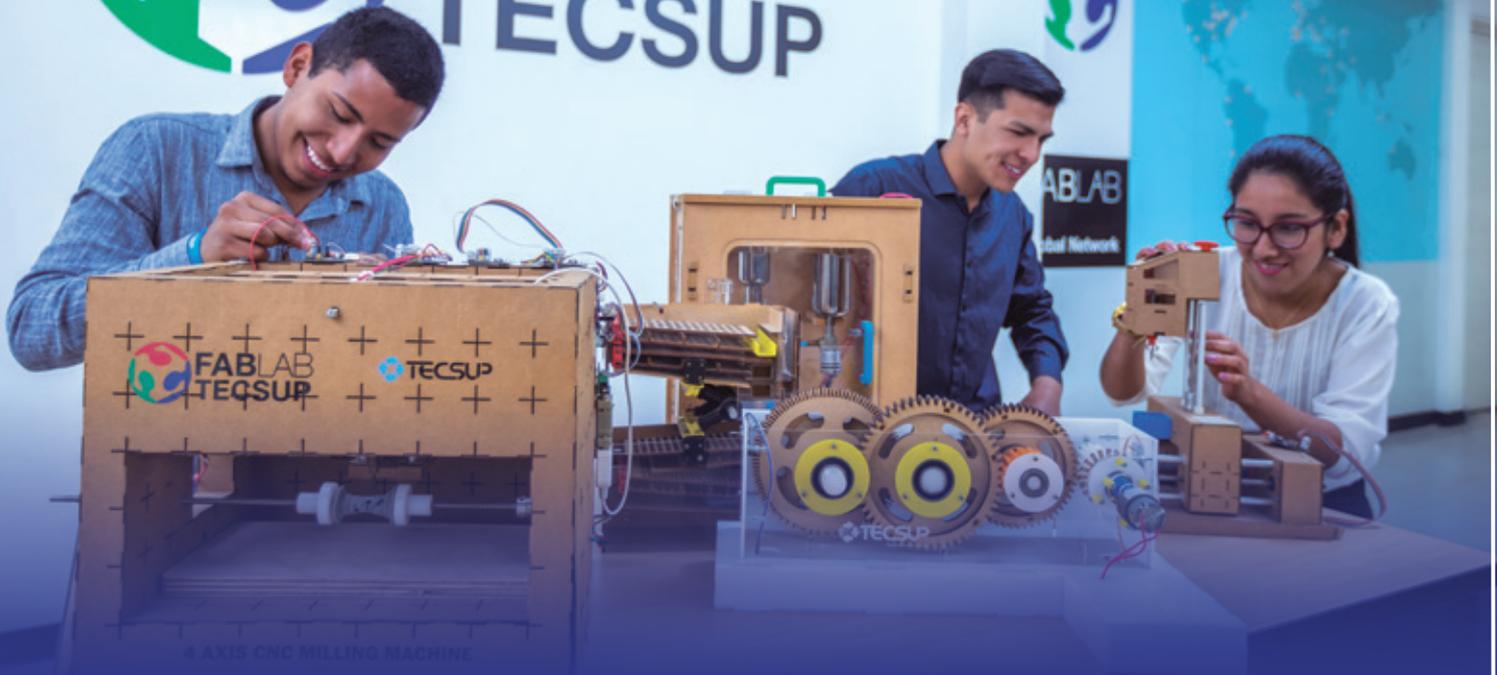
Recibido: 13-05-19

Revisado: 12-07-19

Aceptado: 22-07-19



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-  
NoComercial 4.0 Internacional.



## FabLab TeCSUP

Somos FabLab TeCSUP, el punto de encuentro en el que alumnos, emprendedores y empresas pueden validar y concretar sus iniciativas en diseño de productos, impresión 3D, corte láser, prototipado, fabricación digital; así como entrenarse en metodologías ágiles y de diseño centrado en el usuario para innovar.



### ¿Por qué elegirnos?

**+35**  
AÑOS  
de experiencia  
en el rubro  
industrial

  
1er. FabLab en  
institución educativa  
privada

  
Premios recibidos  
y presencia  
internacional

  
Infraestructura  
tecnológica y  
presencia a  
nivel nacional



### Servicios

- Cursos y programas
- Servicios de diseño y fabricación digital
- Soluciones para empresas y RSE
- Membresía

### Más información

Telf.: (01) 317 3900 A.: 3314  
Cel.: 920 265 351  
informeslima@tecsup.edu.pe



**La gestión digital de rutas de tránsito permite seleccionar una ruta óptima de desplazamiento. Esto permite un ahorro económico importante en consumo de combustible y reduce la emisión de gases contaminantes generados por la combustión interna del motor del vehículo.**



# Optimización del rendimiento del combustible de vehículos a través de la gestión digital de rutas

## *Optimization of Vehicles Fuel Efficiency through Route's Digital Management*

### RESUMEN

El presente artículo tiene como objetivo determinar en cuánto impacta el uso adecuado de aplicativos de tránsito vehicular para disminuir el consumo de combustible, debido a la relación que existe entre el rendimiento de este y el nivel de tráfico en una ruta determinada, el cual condiciona la velocidad promedio de desplazamiento. En el estudio, se ha determinado que a una mayor velocidad promedio de traslado del vehículo se tendrá un mayor rendimiento de la gasolina, diésel u otros combustibles automotrices, por ende, un menor consumo de estos.

El estudio se realizó utilizando datos del tránsito en la ciudad de Lima, que tiene la mayor densidad de tráfico en el Perú. Para este, se utilizó una metodología experimental; se estableció como variable dependiente al rendimiento del combustible, determinando que existe una relación inversa con el tiempo acumulado, que ocurre con los vehículos detenidos por el tráfico denso o la excesiva cantidad de semáforos.

Se ha logrado concluir que hay un impacto directo del nivel de tráfico sobre el mayor consumo de combustible de los vehículos. Se pudo establecer que cada minuto de demora en el tráfico representa reducir el rendimiento del combustible en 66 metros de recorrido por cada litro de combustible consumido; esto tomando como referencia un periodo en el que el nivel de tráfico en un determinado trayecto es el menor registrado.

Es importante destacar que el uso de aplicativos que permitan seleccionar y utilizar rutas con menor densidad de tráfico genera operaciones vehiculares con menor costo del consumo de combustible, teniendo un impacto muy importante sobre el menor desgaste de los motores, así como la menor emisión de gases contaminantes, cuya reducción se establece en un 13 %.

### ABSTRACT

*The purpose of this article is to determine the impact on the proper use of vehicular traffic applications, to reduce fuel consumption, due to the relationship between its performance and traffic level on a given route, which affects the travel average speed. In this study, it has been determined that for higher average speed in the travel of the vehicle, there will be a greater performance of gasoline, diesel or other automotive fuels, and therefore, lower consumption of these.*

*This study was made using traffic data in Lima city, which has the highest traffic density in Peru. For this, it was used an experimental methodology; fuel efficiency was established as a dependent variable, determining that there is an inverse relationship between this and the accumulated time, which occurs in vehicles stopped due to dense traffic or excessive traffic lights.*

*It has been concluded that there is a direct impact of traffic level with higher fuel consumption of vehicles. It was established that every minute of traffic delay represents the reduction of fuel efficiency by 66 meters of travel per liter of consumed fuel; this is by taking as a reference a period in which traffic level on a given route is the lowest registered.*

*It is important to highlight that use of applications that allow selecting and using routes with lower traffic density, generates vehicle operations with lower fuel consumption costs, which has an impact on the lower wear of engines, as well as on lower emission of pollutants gases whose reduction is set at 13 %.*



### Palabras clave

Congestión vehicular, consumo de combustible, rendimiento del combustible, tiempo adicional del viaje, tráfico, trayecto, velocidad promedio, viaje.

### Key words

Vehicular congestion, fuel consumption, fuel efficiency, additional trip time, traffic, journey, average speed, travel.

## INTRODUCCIÓN

Uno de los principales problemas que enfrenta la ciudad de Lima es la congestión vehicular. Según una encuesta del observatorio Lima Cómo Vamos, el 51,3 % de ciudadanos de la capital del Perú consideran que esto es lo que más afecta su calidad de vida. Asimismo, la fundación Transitemos manifestó que en el día la población limeña pierde alrededor de una hora y media en el tráfico de la ciudad.

El nivel de tráfico vehicular sumado a los semáforos en luz roja generan que los vehículos transcurran detenidos mucho tiempo. Durante este periodo, su motor sigue en funcionamiento, es decir, a pesar de que la velocidad de desplazamiento del vehículo es de 0 km/h, hay un consumo de combustible del vehículo y, por ende, generación de gases contaminantes para el medioambiente. Transitemos (2013) indica al respecto: «A pesar de tener una baja tasa de motorización, la metrópoli presenta una velocidad de tráfico muy baja (13 - 14 km/h), generando pérdidas de horas hombre y una emisión de gases muy alta: 39,8 % de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) provienen del transporte terrestre, con consecuencias desastrosas para el ambiente y la salud de las personas» (p. 9).

El día a día de los conductores fomenta la búsqueda de mejores rutas para dirigirse de un lugar a otro, teniendo como objetivo principal evitar el tráfico de nuestra ciudad. Actualmente, existen aplicaciones, como Waze y Google Maps, que tienen opciones para entrega el nivel de tráfico en tiempo real, dado que estas fueron creadas justamente para evitar el tráfico excesivo. Ambas aplicaciones, utilizadas de manera complementaria, una para determinar la ruta óptima y otra para corroborar la densidad del tráfico de esta, permitirían a los conductores minimizar el tiempo del viaje recorriendo rutas con similares distancias en las que el vehículo logre mejores velocidades de desplazamiento, disminuyendo, además, su consumo de combustible.

En ese sentido, el presente artículo, que pone de manifiesto un estudio realizado en la ciudad de Lima, circulando en alrededor de cinco de sus principales distritos, ha considerado los siguientes objetivos:

- Explicar la relación existente entre el rendimiento del combustible de un vehículo y su velocidad promedio de desplazamiento.
- Determinar la relación que existe entre el rendimiento del combustible de un vehículo y el tiempo que este pasa detenido por el nivel de congestión y los semáforos en luz roja.
- Identificar el impacto que tiene el nivel de tráfico sobre el consumo de combustible de los vehículos.
- Definir el porcentaje de incremento del rendimiento del combustible de los vehículos realizando una gestión digital de rutas de tránsito.
- Especificar el porcentaje de reducción de emisión de gases contaminantes generados por la combustión interna, dentro de los motores de los vehículos con una adecuada gestión digital de rutas de tránsito.

## FUNDAMENTOS

Correa, Cogollo y Salazar (2010) indican: «Un vehículo está constituido por cientos de partes que cumplen una función definida, por donde se producen pérdidas energéticas. Tomando en cuenta la termodinámica de la combustión y la fricción, solo un sexto de la energía del combustible se emplea realmente para el accionamiento del vehículo sobre la carretera o mover accesorios útiles. El resto de la energía se pierde en el motor en incapacidades de la línea de transmisión y marcha en vacío» (p.98). En el mismo artículo, citan a Komor y De Vlieger, quienes identifican como factores que influyen en el consumo de combustible a los siguientes:

- Eficiencia energética de los motores
- Forma de operación donde destaca la velocidad
- Ambiente de operación influenciado por la congestión e infraestructura vial
- Mezcla de vehículos
- Carga

Los mismos autores destacan la relación directa que existe entre el consumo de combustible y la velocidad cruceo del vehículo y que el primero se incrementa sustancialmente a medida que se aceleran los vehículos y varía poco durante la desaceleración. Asimismo, dicen que una forma de aminorar el consumo de combustible es reducir el tiempo de parada del vehículo con el motor encendido [4].

El consumo de combustible es un parámetro importante para las operaciones vehiculares, debido a que tiene una fuerte vinculación con la emisión de CO<sub>2</sub> y, también, porque la mayor cantidad de combustibles con los que se cuenta actualmente son aquellos que provienen del petróleo, recurso no renovable que en los últimos años ha sufrido constantes incrementos en su precio.

Se ha estudiado distintos modelos para la generación de rutas en operaciones de flota vehicular, teniendo como principal objetivo resolver el problema de localización de los vehículos e identificar la forma más eficiente para realizar un recorrido alcanzando la mayor parte de entregas de la carga transportada. No se encontraron estudios sobre el uso de aplicativos de generación de rutas para reducir el consumo de combustible.

## METODOLOGÍA

El estudio se basó a una metodología experimental, estableciendo como variable dependiente al rendimiento del combustible, queriendo determinar qué tipo de relación existe entre la velocidad promedio de desplazamiento y el tiempo acumulado de los vehículos detenidos por el tráfico denso o la excesiva cantidad de semáforos. Los datos han sido obtenidos en la ciudad de Lima, que tiene la mayor densidad de tráfico en el Perú.

Para la experimentación se eligieron dos trayectos: el trayecto número 1 que tuvo como origen la zona Cruz de Surco del distrito de Santiago de Surco y como destino

la zona Nuevo Monterrey del distrito de Santa Anita, y el trayecto número 2 tuvo como origen la zona Nuevo Monterrey del distrito de Santa Anita y como destino la zona Cruz de Surco del distrito de Santiago de Surco.

Para el estudio, se trabajó con un vehículo Sedán de cilindrada 2.0 con el que se realizaron 36 viajes en el trayecto número 1 y 32 en el trayecto número 2. Antes de iniciar cada uno de los 68 viajes, se eligió la ruta utilizando las aplicaciones Google Maps y Waze.

Antes de iniciar cada viaje, se reseteaban los datos del recorrido parcial de la computadora del vehículo, registrando al final de cada trayecto el tiempo del viaje, la distancia recorrida, la velocidad promedio de desplazamiento y el rendimiento del combustible.

Todos los datos obtenidos fueron comparados con los datos registrados en un viaje denominado «ideal», realizado para ambos trayectos en un mes en el que el nivel de tráfico es el mínimo desarrollando una velocidad promedio de 30 km/h para el trayecto número 1 y 31 km/h para el trayecto número 2.

## RESULTADOS

Las variables a relacionar son las siguientes:

- Velocidad promedio de tránsito
- Rendimiento del combustible
- Tiempo adicional del viaje

El tiempo adicional del viaje se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$T_{ad} = T_v - T_i$$

Donde:

$T_{ad}$ : Tiempo adicional del viaje (min)

$T_v$ : Tiempo del viaje (min)

$T_i$ : Tiempo del viaje ideal (min)

El tiempo del viaje ideal fue calculado relacionando la distancia recorrida con la velocidad promedio ideal registrada para cada trayecto.

Se registraron los siguientes datos para los 2 trayectos en sus distintos recorridos:

Tabla 1  
Datos extraídos en tramo 1

Viaje	Tiempo de viaje (h - min)	Distancia recorrida (km)	Velocidad promedio (km/h)	Tiempo adicional (min)	Rendimiento del combustible (km/lt)
1	00:44	18,6	25,36	6,80	8,6
2	00:43	16,9	23,58	9,20	7,8
3	00:40	17,3	25,95	5,40	8,1
4	00:45	17,0	22,67	11,00	8,0
5	00:48	17,2	21,50	13,60	7,6
6	00:38	17,0	26,84	4,00	8,4
7	00:38	16,9	26,68	4,20	8,0
8	00:52	16,9	19,50	18,20	7,0
9	00:43	17,2	24,00	8,60	7,6
10	00:41	16,9	24,73	7,20	7,9
11	00:51	16,8	19,76	17,40	7,2
12	00:48	16,8	21,00	14,40	7,7
13	00:39	17,0	26,15	5,00	8,5
14	00:41	16,9	24,73	7,20	8,3
15	00:33	16,1	29,27	0,80	8,5
16	00:41	16,1	23,56	8,80	8,5
17	00:47	16,1	20,55	14,80	8,1
18	00:55	16,7	18,22	21,60	6,9
19	01:00	17,0	17,00	26,00	6,7
20	00:49	16,3	19,96	16,40	7,2
21	00:48	16,1	20,13	15,80	7,8
22	00:47	16,1	20,55	14,80	7,8
23	00:57	15,9	16,74	25,20	7,2
24	01:01	17,9	17,61	25,20	6,4
25	00:49	15,9	19,47	17,20	7,2
26	00:55	18,1	19,75	18,80	6,9
27	00:56	16,8	18,00	22,40	7,3
28	01:02	19,4	18,77	23,20	7,2
29	00:59	18,1	18,41	22,80	7,4
30	00:52	15,9	18,35	20,20	7,1
31	01:00	18,4	18,40	23,20	7,2
32	00:58	15,9	16,45	26,20	6,9
33	00:58	15,9	16,45	26,20	6,8
34	01:07	17,1	15,31	32,80	6,6
35	00:59	18,4	18,71	22,20	7,3
36	00:52	17,7	20,42	16,60	7,9

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2  
Datos extraídos en tramo 2

Viaje	Tiempo de viaje (h - min)	Distancia recorrida (km)	Velocidad promedio (km/h)	Tiempo adicional (min)	Rendimiento del combustible (km/lt)
1	00:57	19,4	20,42	19,45	8,8
2	00:46	17,0	22,17	13,10	9,9
3	00:42	16,8	24,00	9,48	9,4
4	00:38	16,8	26,53	5,48	11,0
5	00:30	15,1	30,20	0,77	13,6
6	00:43	16,6	23,16	10,87	9,1
7	00:36	16,5	27,50	4,06	12,2
8	01:02	19,6	18,97	24,06	9,7
9	00:39	17,2	26,46	5,71	12,6
10	00:34	16,9	29,82	1,29	12,0
11	01:00	19,0	19,00	23,23	8,7
12	00:34	17,2	30,35	0,71	11,4
13	01:00	18,7	18,70	23,81	9,1
14	01:04	18,7	17,53	27,81	9,1
15	00:46	18,9	24,65	9,42	8,9
16	00:44	18,7	25,50	7,81	8,8
17	01:01	18,7	18,39	24,81	8,6
18	00:38	16,5	26,05	6,06	10,8
19	00:34	17,0	30,00	1,10	11,2
20	00:35	16,6	28,46	2,87	11,9
21	00:46	16,7	21,78	13,68	9,0
22	00:35	16,9	28,97	2,29	12,0
23	00:39	17,2	26,46	5,71	12,7
24	00:52	19,0	21,92	15,23	9,6
25	00:55	19,1	20,84	18,03	8,9
26	01:03	19,1	18,19	26,03	8,8
27	00:55	18,7	20,40	18,81	9,6
28	01:01	18,7	18,39	24,81	9,1
29	00:40	16,9	25,35	7,29	12,3
30	01:03	18,4	17,52	27,39	8,6
31	01:15	20,3	16,24	35,71	8,2
32	01:06	18,9	17,18	29,42	8,6

Fuente: Elaboración propia.

Analizando la relación entre la velocidad promedio y el rendimiento del combustible del vehículo:

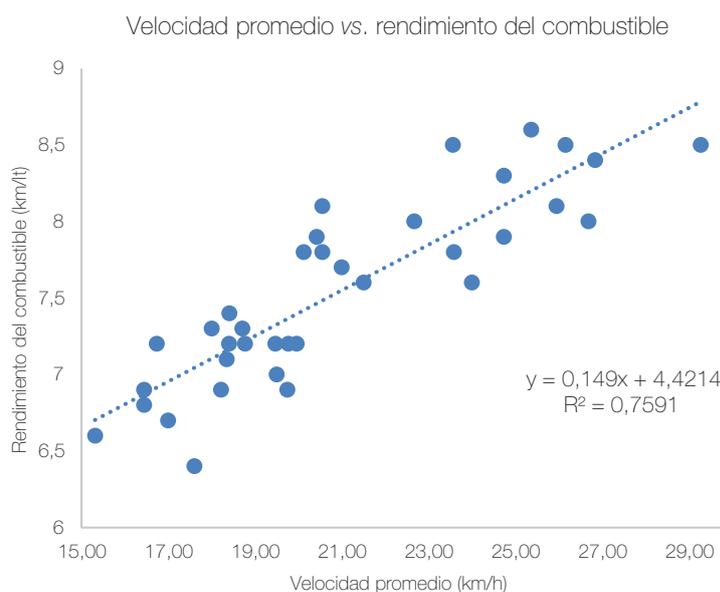


Figura 1. Relación velocidad promedio y rendimiento del combustible trayecto 1.  
Fuente: Elaboración propia.

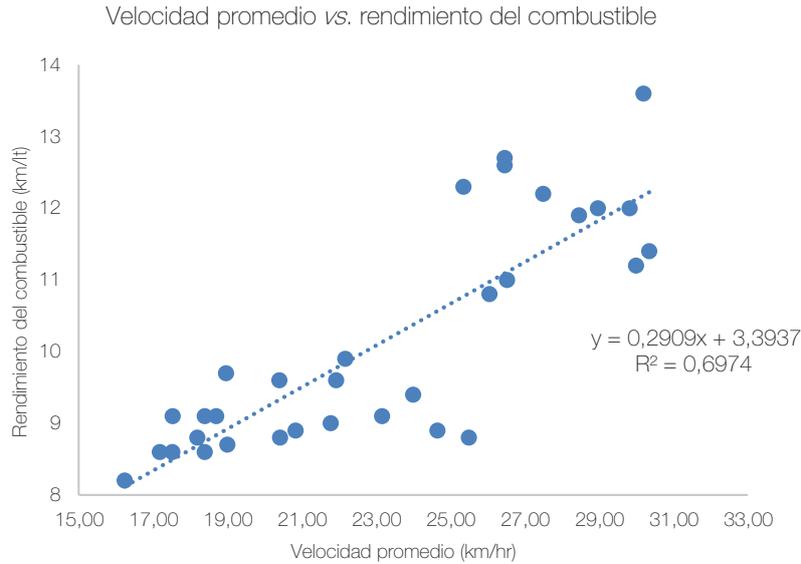


Figura 2. Relación velocidad promedio y rendimiento del combustible trayecto 2.  
Fuente: Elaboración propia.

Se corroboró la relación directa entre la velocidad promedio y el rendimiento del combustible dando resultados satisfactorios a las pruebas T de Student y Fisher.

Entonces, se puede indicar que el rendimiento del combustible respecto a la velocidad promedio está dado por:

Para el trayecto 1:  $R = 4,421 + 0,149V_p \pm 0,3$

Para el trayecto 2:  $R = 3,394 + 0,291V_p \pm 0,874$

Donde:

R: Rendimiento del combustible del vehículo (km/lt)

$V_p$ : Velocidad promedio del vehículo (km/h)

Analizando la relación entre el tiempo adicional que pasa el vehículo detenido en el tráfico o en semáforos con luz roja y el rendimiento del combustible del vehículo:

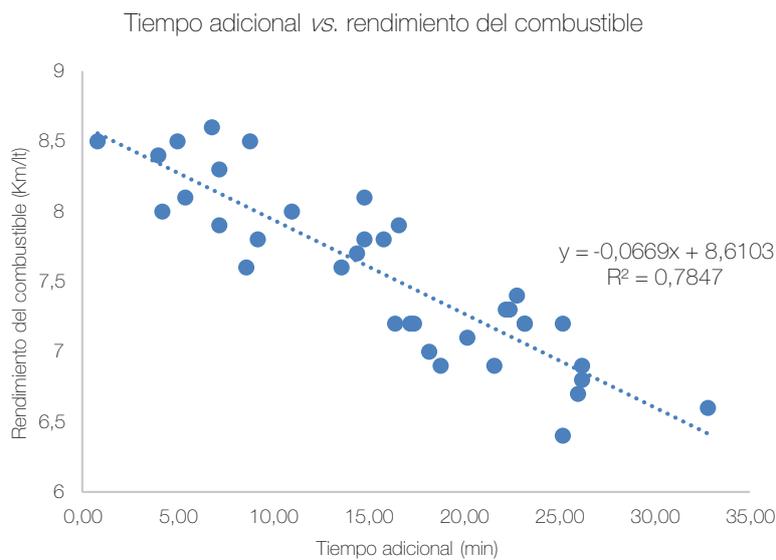


Figura 3. Relación tiempo adicional en tráfico y rendimiento del combustible trayecto 1.  
Fuente: Elaboración propia.

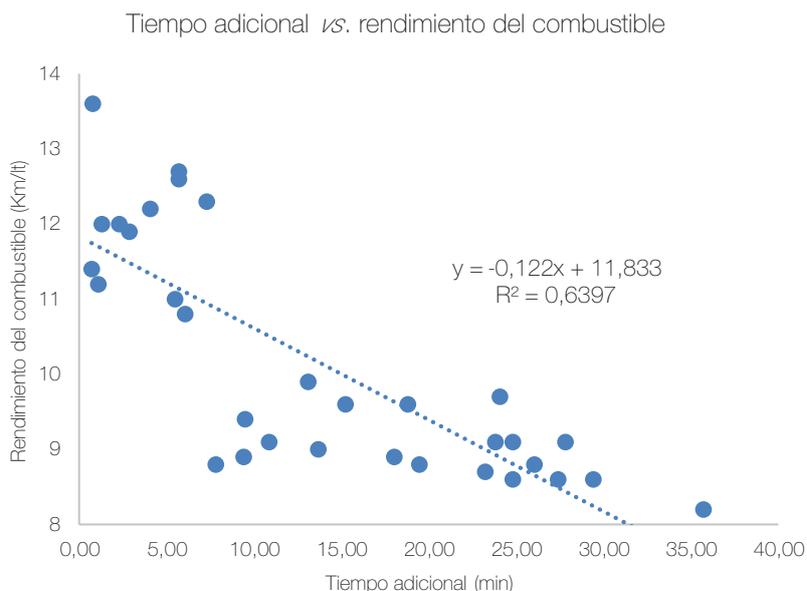


Figura 4. Relación tiempo adicional en tráfico y rendimiento del combustible trayecto 2.  
Fuente: Elaboración propia.

Se corroboró la relación inversa entre el tiempo adicional que pasa el vehículo detenido en el tráfico o en semáforos con luz roja, y el rendimiento del combustible dando resultados satisfactorios a las pruebas T de Student y Fisher.

Entonces, se puede indicar que el rendimiento del combustible respecto al tiempo adicional está dado por:

Para el trayecto 1:

$$R = 8,61 - 0,067T_{ad} \pm 0,284$$

Para el trayecto 2:

$$R = 11,833 - 0,122T_{ad} \pm 0,954$$

Donde:

R: Rendimiento del combustible del vehículo (km/lt)  
 $T_{ad}$ : Tiempo adicional que pasa el vehículo detenido en el tráfico o en semáforos con luz roja (min)

Adicionalmente, se extrajo la mediana del tiempo adicional para cada uno de los trayectos, obteniendo:

Para el trayecto 1:  $Me = 16,5$  minutos

Para el trayecto 2:  $Me = 11,983$  minutos

Entonces, separando los datos de los viajes de cada tramo respecto a los que tienen un tiempo adicional menor a la mediana y a los que están por encima del valor de la mediana, se obtienen los datos promedio de acuerdo a la variación del tiempo adicional a la mediana, tanto para el trayecto 1 y 2 (ver tablas 3 y 4 respectivamente).

Se observa que el rendimiento promedio del combustible se incrementa en 0,956 Km/lt cuando el tiempo adicional del viaje es menor a 16,5 minutos. Asimismo, el combustible consumido se reduce en 0,333 litros.

Según uso particular, si para este trayecto se hicieran 883 viajes en el año, utilizando la combinación del Waze y Google Maps para gestionar y determinar la ruta más óptima de recorrido, se ahorrarían S/ 1089 en consumo de combustible.

Tabla 3  
 Datos promedio de acuerdo a la variación del tiempo adicional respecto a la mediana en el trayecto 1

Datos analizados	Rendimiento (km/lt)	Distancia recorrida (km)	Velocidad media (km/h)	Combustible consumido (lts)
Mayores a la mediana	7,067	17,156	18,184	2,428
Menores a la mediana	8,022	16,806	23,735	2,095

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4  
 Datos promedio de acuerdo a la variación del tiempo adicional respecto a la mediana en el trayecto 2

Datos analizados	Rendimiento (km/lt)	Distancia recorrida (km)	Velocidad media (km/h)	Combustible consumido (lts)
Mayores a la mediana	9,019	18,75	19,229	2,079
Menores a la mediana	11,244	16,989	27,092	1,511

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 4, se observa que el rendimiento promedio del combustible se incrementa en 2,225 Km/lt cuando el tiempo adicional del viaje es menor a 11,983 minutos. Asimismo, el combustible consumido se reduce en 0,568 litros.

Según uso particular, si para este trayecto se hicieran 883 viajes en el año utilizando la combinación del Waze y GoogleMaps para gestionar y determinar la ruta más óptima de recorrido, se ahorrarían S/ 1 857,57 en consumo de combustible.

## CONCLUSIONES

- Se ha determinado que existe una relación directa fuerte entre el rendimiento del combustible de un vehículo y la velocidad promedio a la que se desplaza en una ruta establecida.
- Se ha determinado que existe una relación inversa fuerte entre el rendimiento del combustible de un vehículo y el tiempo que este pasa detenido a causa del nivel de congestión y los semáforos en luz roja.
- El nivel de tráfico tiene un impacto directo sobre el mayor consumo de combustible de los vehículos, pues cada minuto de demora en el tráfico representa reducir el rendimiento del combustible en 66,92 metros de recorrido por cada litro de combustible consumido; esto tomando como referencia un periodo en el que el nivel de tráfico en un determinado trayecto es el menor registrado.
- La gestión digital de rutas de tránsito, antes de iniciar el recorrido de un punto a otro, incrementaría por lo menos en 13,52 % el rendimiento del combustible de los vehículos.
- La gestión digital de rutas de tránsito, antes de iniciar el recorrido de un punto a otro, permite seleccionar una ruta óptima de desplazamiento que proyecta un ahorro económico importante para los conductores por el menor consumo de combustible de sus vehículos.
- La gestión digital de rutas de tránsito, antes de iniciar el recorrido de un punto a otro, reduciría por lo menos en 13,71 % la emisión de gases contaminantes generados por la combustión interna dentro de los motores de los vehículos.

## REFERENCIAS

- [1] Aceña, M. (2016). *Gestión y control de flotas y servicios de transporte por carretera*. Madrid: Publicep.
- [2] Baptista, P., Fernández, C., & Hernández, R. (2008). *Metodología de la investigación*. México D.F.: Ultra.
- [3] Campos, J., De Rus, G., & Nombela, G. (2003). *Economía del transporte*. Barcelona: Antoni Bosch.
- [4] Correa, A., Cogollo, J., & Salazar, J. (2010). Evaluación del efecto de la conducción eficiente en el consumo de combustible en vehículos de transporte de carga pesada usando diseño de experimentos. *Producción + Limpia* [en línea], (5), 95-104. Recuperado de [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S1909-04552010000100007&lng=e&nrm=iso](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1909-04552010000100007&lng=e&nrm=iso)
- [5] Fundación Transitemos (2013). *Propuesta de Hoja de Ruta para una Movilidad y Transporte Sostenible en Lima y Callao al 2025. Hacia una ciudad para las personas*. Recuperado de <https://transitemos.org/wp-content/uploads/2017/09/Hacia-Una-Ciudad-para-las-Personas-Hoja-de-Ruta-al-2025-V-Final1.pdf>
- [6] González, R. (2005). Los ciclos de manejo, una herramienta útil si es dinámica para evaluar el consumo de combustible y las emisiones contaminantes del auto transporte. *Ingeniería Investigación y Tecnología* [en línea], (6), 147-162. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.22201/fi.25940732e.2005.06n3.011>
- [7] Heinz, K., & Klingebiel, M. (2005). *Manual de la técnica del automóvil*. Stuttgart: Bosch.
- [8] Morales, H. (2006). *Ingeniería vial I*. Santo Domingo: Búho.
- [9] Pedraza, L., Hernández, C., & López, D. (2012). Control de tráfico vehicular usando ANFIS. *Ingeniare* [en línea], (20), 79-88. Recuperado de [https://www.ingeniare.cl/index.php?option=com\\_ingeniare&view=d&doc=73/art08.pdf&aid=306&vid=73&lang=es](https://www.ingeniare.cl/index.php?option=com_ingeniare&view=d&doc=73/art08.pdf&aid=306&vid=73&lang=es)

- [9] Posada, J., & González, C. (2013). Consumo de combustible en vehículos para transporte por carretera –modelos predictivos–. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín* [en línea], (12), 35-46. Recuperado de <https://doi.org/10.22395/rium.v12n23a3>
- [10] Rafael, M., & Cervantes, J. (2004). La selección del tren motriz basada en la eficiencia energética para vehículos de servicio pesado. *Ingeniería Investigación y Tecnología* [en línea], (5), 49-58. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.22201/ft.25940732e.2004.05n1.004>
- [11] Toro, E., Franco, J., & Gallego, R. (2016). Modelo matemático para resolver el problema de localización y ruteo con restricciones de capacidad considerando flota propia y subcontratada. *Ingeniería Investigación y Tecnología* [en línea], (17), 357-369. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.riit.2016.07.006>
- [12] Weiers, R. (2006). *Introducción a la Estadística para Negocios*. México D.F.: Thomson.

## ACERCA DEL AUTOR

### Juan Carlos Latorre Boza

Magíster en Administración Estratégica de Empresas, ingeniero mecánico especialista en proyectos de inversión pública, profesional certificado en Mantenimiento y Confiabilidad (CMRP) especialista en Gestión de Activos aplicada a la maquinaria pesada, vehículos pesados y vehículos ligeros. Miembro activo de la Red Confiabilidad de *Reliability Web*. Coordinador Académico de la carrera profesional de Gestión y Mantenimiento de Maquinaria Pesada y docente en el área de Gestión del Equipo Pesado de Tecsup sede Centro.

 [jlatorre@tecsup.edu.pe](mailto:jlatorre@tecsup.edu.pe)

Recibido: 22-05-19    Revisado: 30-06-19    Aceptado: 05-07-2019



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.

# ¿Por qué capacitarse en **Tecsup?**



Las empresas  
Top confían en  
Tecsup

Las empresas Top 500  
del Perú capacitan a sus  
colaboradores en Tecsup.



Talleres y  
laboratorios  
especializados

+80 modernos laboratorios  
con equipos de alta  
tecnología a nivel nacional.



Oferta educativa  
de alta demanda  
laboral

Plan de estudios  
innovador, alineado a  
las necesidades del  
profesional actual.



Docentes  
de alto nivel

Experiencia adquirida  
a nivel nacional e  
internacional.

## Nuestras áreas de especialización

**Electricidad y Electrónica**

**Minería, Procesos Químicos y Metalúrgicos**

**Seguridad y Salud en el Trabajo**

**Tecnología Digital**

**Mecatrónica**

**Gestión y Producción**

**Mecánica y Aviación**

**La investigación demuestra la mejora en la cinética de lixiviación de mineral aurífero con la adición de nitrato de plomo**, tanto en un mineral conteniendo pequeños porcentajes de arsénico y antimonio como en minerales que no contienen estos elementos.



## Cinética de lixiviación y recuperación de oro, de finos en la lixiviación por percolación con y sin aglomeración

### *Leaching and Recovery Kinetics of Gold Fine in Percolation Leaching with and without Agglomeration*

#### RESUMEN

La extracción del oro en PAD de lixiviación es una operación que cada vez se utiliza más para la extracción del metal de sus menas. Esto se realiza, evidentemente, por los bajos costos de procesamiento por este método, entre otros motivos. La recuperación del oro por PAD es siempre baja comparada con la recuperación por lixiviación en tanques de agitación. La lixiviación de finos siempre es un problema por la canalización de la solución lixivante y la formación de charcos o «cochas». Esto genera bajas recuperaciones y, sobre todo, ante la presencia de arcillas en el mineral, perjudican aún más la recuperación de oro de estas menas.

El procesamiento en pilas de lixiviación requiere siempre pruebas de investigación en pro de la mejora en la recuperación de oro en la lixiviación. Para lograrla, se realizan pruebas de optimización de los parámetros. Esta experiencia relaciona el aporte de nitrato plumboso, en la recuperación por lixiviación en PAD de mineral aglomerado comparado, con dicho proceso sin el aporte de esta sal.

Las pruebas metalúrgicas buscan evaluar el aporte de nitrato de plomo añadido en pequeñas cantidades en la mejora de la extracción de oro y plata, muy a parte de su amplio uso en la activación de zinc en el proceso Merrill Crowe.

Las pruebas de aglomeración fueron realizadas con diferentes variantes, tomando en consideración el tamaño del aglomerado formado, así como en la composición de la mezcla y con variación en los curados de la misma comparada con un proceso de lixiviación sin el proceso de aglomeración.

El principal motivo de la experiencia es determinar el porcentaje de mejora en la recuperación de oro en solución con el uso de sales de plomo. Los compuestos probables de plomo son en su mayoría insolubles en soluciones acuosas, el nitrato de plomo y el acetato de plomo son los dos productos que son muy solubles en agua.

El proceso de lixiviación en columna trabajó con ratio de riego de 8 y 10, y mostró mejoras en la recuperación de oro y plata. Se realizaron varias pruebas de lixiviación con diferentes dosificaciones de nitrato de plomo, teniendo como mejor resultado la experiencia en la cual la dosificación de nitrato de plomo fue de 30g/TM de mineral de cabeza.

El aumento porcentual de recuperación con la adición de nitrato de plomo fue de hasta 7,58 % promedio, con respecto al no uso de este reactivo, variante que nos llevó a realizar pruebas adicionales que corroboren dichos resultados.

Los resultados obtenidos muestran la efectividad del nitrato de plomo en la recuperación de oro por lixiviación al atacar a los minerales de antimonio y arsénico, que se encuentran en pequeñas cantidades en los minerales auríferos, manteniendo los mismos parámetros de operación que sin su adición en el proceso de lixiviación.

Las pruebas experimentales se desarrollaron en los laboratorios de procesamiento de minerales e hidrometalurgia de Tecsup, así como parte de los análisis químicos y el resto de los análisis fue derivado a un laboratorio certificado para el contraste de ensayos.



#### Palabras clave

Lixiviación, PAD, recuperación, nitrato de plomo.

#### Key words

Leach, PAD, recovery, lead nitrate.

## ABSTRACT

*The extraction of gold in PAD leaching is an operation that is increasingly used for the extraction of metal from its ores; this is done by the low processing costs using this method, among other reasons. Gold recovery by using PAD is always low compared to recovery by leaching in agitation tanks. Leaching of fines is always a problem due to the channeling of the leaching solution and the formation of puddles; this generates low recoveries and even more, in the presence of clays in the ore, they further damage the recovery of gold from these ores.*

*The processing in leach pads always requires research evidence to improve the recovery of gold in leaching. To achieve this improvement, optimization tests of the parameters are generally carried out. This experience relates the contribution of plumbous nitrate in the recovery by leaching in PAD of agglomerated mineral, compared to this process without the contribution of this salt.*

*The metallurgical tests seek to evaluate the contribution of added nitrate of lead in small quantities in the improvement of the extraction of gold and silver, very apart from its wide use in the activation of zinc in the Merrill Crowe process.*

*The agglomeration tests were carried out with different variants, taking into account the size of the globe formed, as well as the composition of the mixture and with the variation of the curing, thereof compared with a leaching process without the agglomeration process.*

*The main reason for the experience is to determine the percentage of improvement in the recovery of gold in solution with the use of lead salts. Probable lead compounds are mostly insoluble in aqueous solutions; lead nitrate and lead acetate are the two products that are very soluble in water.*

*The column leaching process worked with an irrigation rate of 8 and 10 and shown improvements in the recovery of gold and silver. Several leaching tests were carried out with different dosages of lead nitrate, with the best result being the experience in which the lead nitrate dosage was 30g / MT of head mineral.*

*The percentage increase in recovery with the addition of lead nitrate was 7.58 % compared with the non-use of this reagent, a variant that led us to perform additional tests to corroborate these results.*

*The results obtained show the effectiveness of lead nitrate in the leaching-based recovery of gold by attacking the antimony and arsenic minerals, which are found in small quantities in the gold minerals, maintaining the same operating parameters as without its addition in the leaching process.*

*The experimental tests were carried out in the laboratories of minerals processing and hydrometallurgy of Tecsup, as well as part of the chemical analyzes, and the rest of the analysis was made by a certified laboratory for the test contrast.*

## INTRODUCCIÓN

Las sales de plomo en pequeñas cantidades son utilizadas según la literatura para mejorar la extracción de oro en la lixiviación. Dicha mejora se produce en evitar la reacción de elementos interferentes en el proceso de lixiviación [1], así como la aceleración de la cinética del mismo.

La presencia de sulfuros en la lixiviación de oro genera, por un lado, un alto consumo de cianuro y, por otro, retardan el proceso de obtención de oro en solución en el caso de sulfuro soluble [5].

Entonces, según lo referido, la adición de nitrato de plomo precipita los sulfuros de plomo que serán oxidados posteriormente a tiocianatos.

Los otros productos que podrían formarse con el plomo son ligeramente solubles en soluciones cianuradas, las cuales permitirán la precipitación de sulfuros que aún puedan quedar remanentes en una solución y también descomponer tioarsenitos. Esto indica los beneficios que se obtienen en su uso en el proceso de lixiviación de oro, con minerales que presenten las características indicadas [1].

Los estudios sobre el efecto del plomo en la superficie del oro no es un caso cerrado aún. Asimismo, a través de experiencias electroquímicas, se postuló que el plomo sobre la superficie del oro reacciona de dos maneras distintas, en una de ellas, el plomo catalizaba la disolución del oro y la otra que la formación de hidróxido de plomo retardaba la velocidad de disolución [9].

La experiencia electroquímica determinó que de pequeños cristales de aproximadamente 10 micrones mostraban la presencia del par Au-Pb. Al analizar la forma en la que se encontraba el plomo, se postuló que se depositaba como  $Pb(OH)_3$  y como plomo. Esta afirmación fue descartada por otras experiencias de laboratorio.

Una justificación de los productos formados en la reacción entre el plomo y el oro la realizó CANMET. En este estudio, se introduce el nitrato de plomo en la lixiviación de minerales auríferos, a través del comportamiento electroquímico del mismo, en el proceso de cianuración, a través del estudio de la superficie del oro, así como también en el estudio de la cinética de la cianuración sin y con el uso de este reactivo para determinar su comportamiento en la lixiviación.

Uno de los hallazgos encontrados era que el plomo reaccionaba con el oro formando cristales cúbicos de  $AuPb_2$ , así como tetragonales de aleaciones de  $AuPb_3$  en la superficie del oro. La presencia de estas aleaciones producían la caída en el potencial del electrodo de oro y modificaban la cinética de disolución del oro en soluciones cianuradas [8].

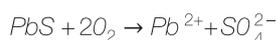
## FUNDAMENTOS

La mejora en la recuperación de oro de soluciones cianuradas es uno de los fines diarios en el proceso de lixiviación en el caso del PAD de lixiviación, como es muy baja la recuperación de oro comparada con el proceso de lixiviación en tanques de

agitación. Resulta importante elevar el nivel de recuperación debido a que la mejora en el porcentaje de recuperación por este se contabiliza en un mayor ingreso económico comparado con el de la mejora en el procesamiento por agitación donde las mejoras, de obtenerse, son del orden menor en porcentaje.

Uno de los inconvenientes que proponen algunos al uso de nitrato de plomo es el alto grado de toxicidad de este reactivo, debido a su alta toxicidad, en las aguas de descarga luego del tratamiento clásico de los efluentes. La presencia de este elemento generaría otro tratamiento adicional al que ya se realiza cotidianamente.

La figura 1 muestra el diagrama de Pourbaix cuando el plomo no forma complejos con el cianuro. Nótese la presencia del ion plumboso a un pH menor a 6,5. Sobre estos valores, como es el caso de la lixiviación donde el pH es mayor de 10, lo más probable, entonces, es la formación de un producto hidroxilado en esta consideración.



Según estas reacciones, la adición de nitrato de plomo promueve la oxidación de azufre. Así, mejora la cinética de disolución del oro y, por lo tanto, reduciría el consumo de cianuro.

Existen diversas investigaciones que presentan resultados positivos en el uso de este reactivo donde la adición de la misma varía desde unos cuantos gramos a kilogramos por tonelada, para el caso de lixiviación en PAD y agitación respectivamente.

Investigaciones realizadas en México en 2012 y publicaciones al respecto realizadas en la mina El Álamo en México, muestran cómo pequeñas adiciones de nitrato de plomo producen una mejora en la disolución y recuperación del oro en el proceso [7].

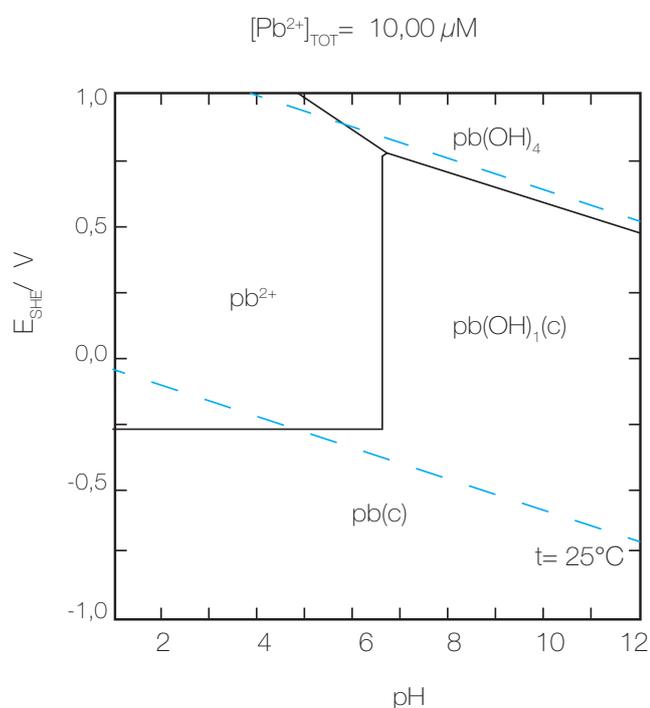


Figura 1. Diagrama de Pourbaix Eh-pH para el plomo en bajas concentraciones. Fuente: Elaboración propia.

### Nitrato de plomo

Uno de los mecanismos que justifican el uso de las sales de plomo en la mejora de la cinética de extracción del oro lo plantean Dalley y Allis [2].

El plomo, según plantean, elimina el ion sulfuro que se deposita sobre la superficie del oro pasivándolo, reaccionando con este para formar  $PbS$ , el cual es insoluble como la mayoría de los compuestos de plomo.

El plomo genera la activación reaccionando con delgadas películas de azufre logrando así su activación. Además, plantea la reacción de oxidación del azufre según lo siguiente:

## METODOLOGÍA

### Procedimiento experimental

Se realizó la aglomeración de mineral para dos tipos de evaluación:

En la primera, se preparó el mineral con una granulometría gruesa, es decir, no se realizó la aglomeración, con una masa aproximada de 254 kg de mineral seco por columna,  $D_{80} = 48\ 350 \mu m$ .

Se prepararon 4 columnas de mineral donde se evaluó la cinética de extracción de la siguiente manera: dos de ellas sin la adición de nitrato y otras dos con adición de nitrato.

En la segunda, se preparó el aglomerado de mineral preparado fino producto de la conminución con una masa aproximada de 10 kg de mineral seco por columna, con un  $D_{80} = 300 \mu m$  preparada con solución cianurada y cemento para una prueba, otras tres muestras fueron preparadas con solución cianurada, cemento y nitrato de plata en diferentes concentraciones para la evaluación de la cinética de extracción de oro en solución por percolación.

La humedad promedio en el proceso de aglomeración fue de 13,2 % para ambas pruebas.

La lixiviación se realizó con ratio de riego de 8 para las pruebas en columnas de gran masa y un ratio de riego de 10 para las columnas de menor masa.

Los tiempos de las pruebas de lixiviación fueron de 10 días para las columnas grandes y de 14, para las columnas pequeñas, que fue el tiempo programado para evaluar la extracción de oro del mineral problema.

Se recogieron muestras de soluciones diariamente para la evaluación de la extracción de oro en solución en función al tiempo de lixiviación; además, se hizo un control del consumo de cal del proceso para cada prueba para encontrar los kg (cal)/TM tratado.

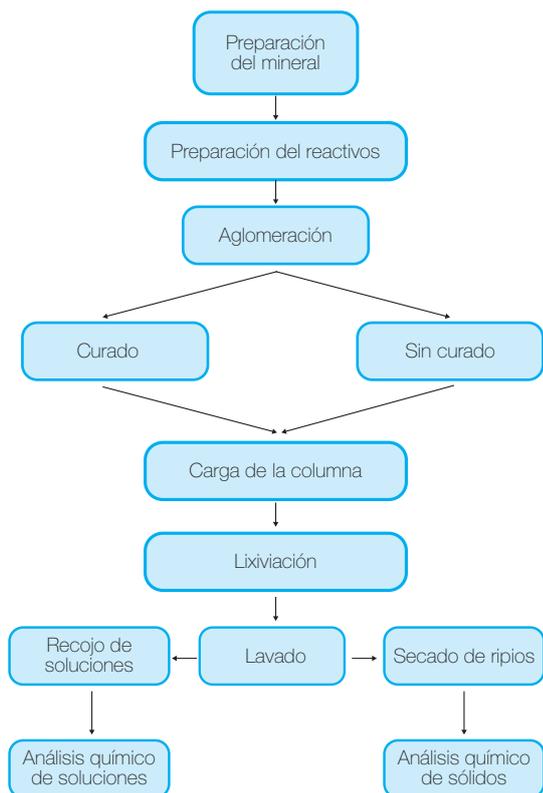


Figura 2. Diagrama de flujo experimental primera prueba.  
Fuente: Elaboración propia.

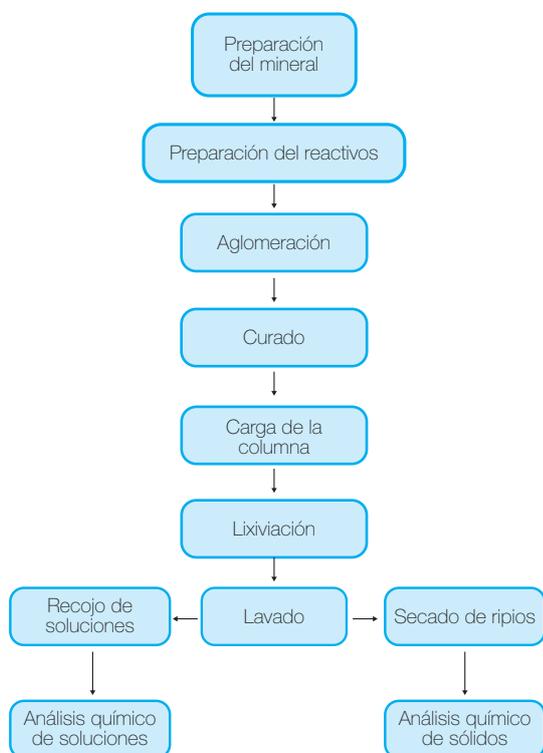


Figura 3. Diagrama de flujo experimental segunda prueba.  
Fuente: Elaboración propia.

### Equipo empleado

Las pruebas de lixiviación se realizaron en los laboratorios de Tecsup y se utilizaron cuatro columnas de 24 de diámetro para la primera prueba y 4 columnas acrílicas de 6 para la segunda. La fuerza de cianuro fue de 500 ppm para las pruebas en columnas grandes y de 400 ppm para las pruebas en columnas acrílicas. La dosificación de solución fue a través de una bomba de recirculación que mantuvo constante el volumen del recipiente que contiene la solución lixivante para mantener la presión constante y no perjudicar el coeficiente de uniformidad del riego.

Las pruebas metalúrgicas se ejecutaron en los laboratorios de Tecsup y las muestras de contraste fueron enviadas a un laboratorio certificado para la validación de los análisis químicos.

### Mineral y reactivos empleados

En las pruebas experimentales, se utilizó un mineral compuesto aurífero concentrado que contiene arcillas, óxido de hierro, óxido de manganeso, sílice, con una ley de oro de 0,85 g/TM. Este compuesto fue preparado con una mezcla de minerales auríferos utilizados en pruebas de lixiviación de la región sur del Perú.

La muestra mineral tiene un pequeño porcentaje de arsénico y antimonio.

Tabla 1  
Composición del mineral en porcentaje

Arcilla	Fe	Mn	As	Sb	Au, g/TM
20,25	11,84	1,56	0,11	0,09	0,80

El contenido de plata es de 48 g/TM.  
Fuente: Elaboración propia.

Los reactivos utilizados en el proceso fueron los siguientes:

En la aglomeración:

Cianuro, cemento, cal y nitrato de plomo.

En la lixiviación:

Cianuro de sodio y cal.

En la preparación de la solución, se utilizó agua destilada y cianuro de sodio al 95 % de pureza. En la valoración, se utilizó Ioduro de potasio como indicador y solución valorante nitrato de plata preparada al 0,1 N.

### Pruebas experimentales

Las pruebas experimentales tuvieron como objetivo principal determinar la mejor dosificación de nitrato de plomo, en el caso de tener resultados favorables en la experimentación en la aglomeración con cemento y en la solución de cianuro de sodio a 500 ppm y 400 ppm respectivamente.

Se trabajó las pruebas de lixiviación utilizando los parámetros mencionados en la tabla 2.

Tabla 2  
Parámetros de lixiviación

Parámetros	
P80	-280 $\mu$
Temperatura, °C	25°C
Masa de mineral en columna	9,5 kg
pH de la pulpa	10,5
Ratio de riego	8 y 10
Coefficiente de uniformidad	92 %
Tiempo, días	30

Fuente: Elaboración propia.

La cantidad de mineral empleado en las pruebas fue variable; para las 4 primeras, fue de entre 268 kg y 281 kg; en las 4 posteriores, 9,5 kg.

El control de la lixiviación en cuanto a la fuerza de cianuro de la solución pasante fue diario con valoraciones del cianuro libre con nitrato de plata. El control del flujo de solución lixivante fue continuo, para evitar un bajo coeficiente de uniformidad por cada columna preparada. El ratio de riego fue 8 para las 4 primeras y de 8 para las 5 últimas pruebas.

Se realizaron 8 pruebas de lixiviación en columna las 4 primeras con mineral conteniendo arcillas y las restantes sin arcillas. En las primeras, dos fueron sin y dos con nitrato de plomo. En las posteriores, se realizó la preparación del mineral de la siguiente manera:

Pruebas:

1. Aglomeración con cemento
2. Aglomeración con cemento + nitrato
3. Aglomeración con cemento
4. Aglomeración con cemento + nitrato

Los tiempos de curado también fueron una variable para la primera prueba. Se mantuvieron constantes en una segunda, donde se busca replicar el mejor examen y variar la dosificación de nitrato. Los resultados que se muestran en las tablas 3, 4, 5 y 6.

Tabla 3  
Prueba 1

Uso de nitrato	No
Curado	36 horas
Peso de muestra húmeda (kg)	276,3
% humedad	8,10
Peso de muestra seca	253,92
Fuerza de cianuro (ppm)	500
pH	10,5
Rate (L/m <sup>2</sup> /h)	8
Flujo (ml/min)	34,00
Altura del mineral (m)	0,80
Diámetro de columna (m)	0,57
Densidad aparente (gr/cc)	1,35
Granulometría	Aglomerado

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4  
Prueba 2

Uso de nitrato	Sí
Curado	36 horas
Peso de muestra húmeda (kg)	269
% humedad	10,32
Peso de muestra seca	241,24
Fuerza de cianuro (ppm)	500
pH	10,5
Rate (L/m <sup>2</sup> /h)	8
Flujo (ml/min)	34,00
Altura del mineral (m)	0,80
Diámetro de columna (m)	0,57
Densidad aparente (gr/cc)	1,32
Granulometría	Aglomerado

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5  
Prueba 3

Uso de nitrato	No
Curado	48 horas
Peso de muestra húmeda (kg)	281
% Humedad	8,65
Peso de muestra seca	256,69
Fuerza de cianuro (ppm)	500
pH	10,5
Rate (L/m <sup>2</sup> /h)	8
Flujo (ml/min)	34,00
Altura del mineral (m)	0,80
Diámetro de columna (m)	0,57
Densidad aparente (gr/cc)	1,38
Granulometría	Aglomerado

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6  
Prueba 4

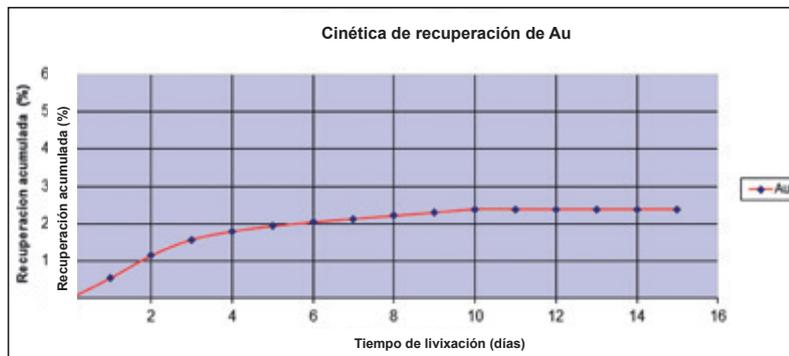
Uso de nitrato	Sí
Curado	48 horas
Peso de muestra húmeda (kg)	268
% Humedad	9,04
Peso de muestra seca	243,77
Fuerza de cianuro (ppm)	500
pH	10,5
Rate (L/m <sup>2</sup> /h)	8
Flujo (ml/min)	34,00
Altura del mineral (m)	0,80
Diámetro de columna (m)	0,57
Densidad aparente (gr/cc)	1,31
Granulometría	Aglomerado

Fuente: Elaboración propia.

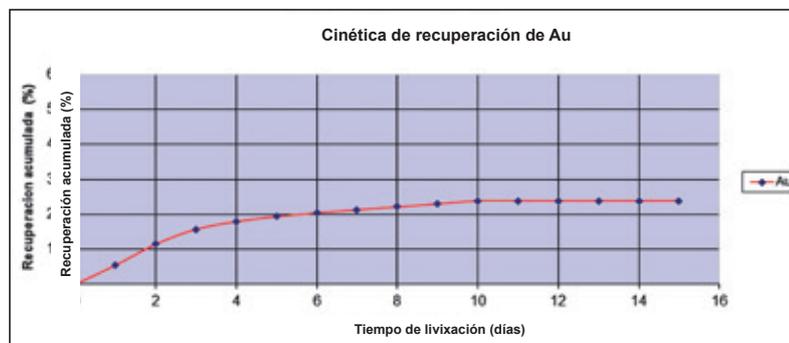
RESULTADOS

Resultados prueba n.º 1

(a) Prueba n.º 1A



(b) Prueba n.º 1B



(c) Prueba n.º 1C



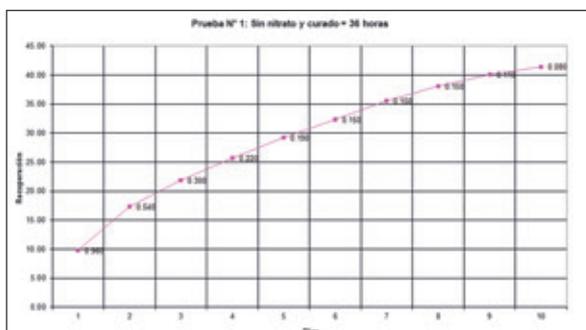
(d) Prueba N° 1D



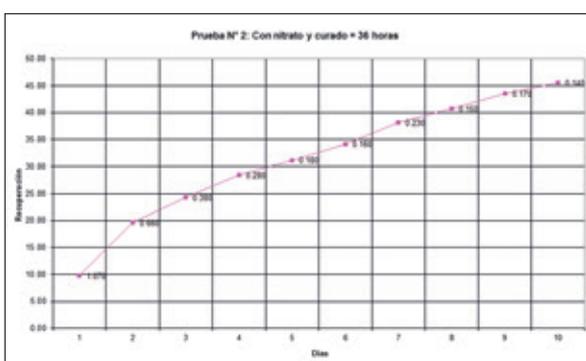
Figura 4. Prueba experimental n.º 1 (a, b, c, d).  
Fuente: Elaboración propia.

**Recuperaciones**

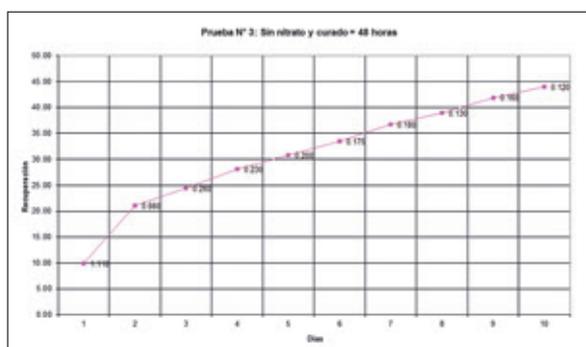
(a) Recuperación n.º 1A



(b) Recuperación n.º 1B



(c) Recuperación n.º 1C



(d) Recuperación n.º 1D

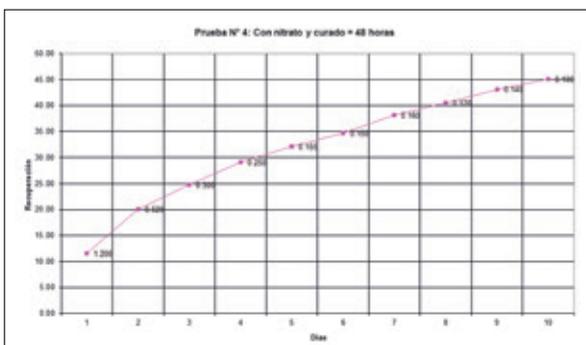


Figura 5. Recuperación n.º1 (a, b, c, d).  
Fuente: Elaboración propia.

**Resultados prueba n.º 2**

Tabla 7  
Resultado prueba 2, recuperación en % (A, B, C, D) de la mejor prueba 1

Recuperación (%)			
2 A	2 B	2 C	2 D
41,20	55,87	34,73	15,07
47,47	62,73	41,53	18,80
57,47	71,53	45,00	22,27
61,13	83,67	48,00	27,80
61,13	83,67	48,00	27,80

Fuente: Elaboración propia.

La prueba 2A se realizó solo con aglomeración de finos; la prueba 2B aglomeración con adición de 20g/TM de nitrato de plomo; la prueba 2C con adición de 30g/TM de nitrato de plomo; y la prueba 2D con adición de 40g/TM de nitrato de plomo. Obsérvese que la mejor extracción de oro se obtuvo en la prueba 2B.

**CONCLUSIONES**

- La investigación demuestra la mejora en la cinética de lixiviación de mineral aurífero con la adición de nitrato de plomo, tanto en un mineral conteniendo pequeños porcentajes de arsénico y antimonio como en minerales que no contienen estos elementos.
- El mineral aglomerado que contiene nitrato de plomo que presenta 36 horas de curado en la primera prueba es el que tuvo la mejor recuperación comparada con el que tuvo 48 de curado, manteniendo los mismos parámetros de operación.
- La recuperación en el tiempo que duró la primera prueba, con experiencia 1 y 3, fue de 42,29 % y de 46,35 %, pruebas sin nitrato; mientras que en las que se utilizó nitrato experiencia 2 y 4 fue de 53,31 % y de 50,49 %. Esto ratifica la hipótesis de la mejora de la extracción con la adición de nitrato de plomo.
- La mejora en la extracción es del orden del 6 % aproximadamente.
- En la segunda prueba de lixiviación, en columnas más pequeñas, se encontró que la mejor extracción se produjo en la segunda prueba con una adición de 20g/TM de nitrato de plomo.
- Los resultados de la experiencia tanto en la primera como en la segunda no nos indica la dosificación en referencia a la ley del mineral, ya que en ambos casos la ley era la misma del mineral de cabeza, pero los resultados difieren al correlacionarlos, pero se acerca bastante al encontrado en la experiencia de 20g/TM de nitrato.

- Las pruebas indican, para el mineral compósito preparado, que el aumento en la adición de nitrato perjudica la cinética de extracción de oro en solución. Aparentemente, el exceso de nitrato reduce la cinética y la extracción final del oro del mineral.
- La mejora en la recuperación aurífera al ser en promedio de las pruebas sin nitrato y con nitrato fue de 7,58 %, si tomamos en consideración que la producción de oro mensual para la mina de donde provienen los finos, que es de 60 kg. Esto indicaría que se elevaría a 70,26 kg, lo cual señala un incremento de 10,26 kg promedio por mes.
- Teniendo en cuenta el costo de la implementación de adición de nitrato en la planta, se genera una mejora en los ingresos de producción del orden de los \$58 500, con nitrato plumboso. Todo ello considerando los finos producidos en el proceso de trituración, así como el porcentaje de mineral arcilloso que se genera en la explotación en mina.

## REFERENCIAS

- [1] Aramburú, V. (2003). *Modelo para la pre-aireación en concentrados de oro pirítico, para la optimización del proceso de cianuración, utilizando el programa estadístico statgraphic plus*. [Tesis] Universidad Mayor de San Marcos.
- [2] Dalley, P., Allis, B. (2006). Treatment of ores containing reactive iron sulfides. Multi Mix Systems.
- [3] Deschene, G., Wallingford, G. (1995). Technical note effect of oxygen and lead nitrate on the cyanidation of a sulfphide bearing gold ore. *Minerals Engeineering*. 8(8) 923 – 931.
- [4] Deschene, G., Prud'homme, P.J.H (1997) Cyanidation of a copper-gold ore. *International Mineral Proccesing*. 50 (3) 127 – 141. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301751697000082>
- [5] Diez-Canseco E., Pía C. (1978). *Metalurgia del oro y plata*. Universidad de Lima.
- [6] Domic E. (2001). *Hidrometalurgia. Fundamentos, procesos y aplicaciones*. Santiago de Chile: Concejo Minero de Chile.
- [7] Gonzales, M. A. (2005) Desafíos en la lixiviación de sulfuros de plata en la Mina El Álamo Dorado. XXXI Convención Internacional de Minería, Acapulco, México. Recuperado de <https://es.slideshare.net/MiguelAngelGonzalez42/trabajo-tecnico-metalurgia-2015-miguel-gonzalez>

- [8] May, O., Jin, S., Ghali, E., y Deschênes, G. (2005) Effects of sulfide and lead nitrate addition to a gold cyanidation circuit using potentiodynamic measurements. *Journal of Applied Electrochemistry*. 35(2) 131 – 137. Recuperado de <https://doi.org/10.1007/s10800-004-4064-z>
- [9] Mussati, D., Mager, J., y Martins, G.P. (1997). Electrochemical aspects of the dissolution of gold cyanide electrolytes containing lead. *Aqueous electrotechnologies: progress in theory and practice*. 245 -265.
- [10] Resource Book. (2010) *Leaching & adsorption*. Recuperado de <https://rsteyn.files.wordpress.com/2010/07/leaching-adsorption-basics-and-example.pdf>
- [11] Yamashiro, A. (2012). *Cianuración de concentrados pirrotíticos auríferos con etapa de pre tratamiento de oxidación con aire*. [Tesis] Universidad Nacional de Ingeniería.

## ACERCA DEL AUTOR

### Luis Huere Anaya

Ingeniero metalurgista colegiado y habilitado. Posee experiencia profesional en plantas concentradoras polimetálicas de plomo, cobre, zinc, plata y oro; así como en la separación de plomo cobre sin el uso de bicromato en la depresión del plomo. Conocedor de los *softwares* de simulación y trabajo en plantas concentradora. Además, domina los temas de flotación de mineral aurífero, cianuración en tanques de agitación, procesamiento de mineral aurífero por los procesos con carbón activado (CIP, CIL y CIC), el tratamiento de relaves de cianuración, y la destrucción de cianuro por los métodos hipoclorito, peróxido, sulfato ferroso. Ha participado en la supervisión y gestión de operaciones en plantas. Especialista en sistemas de gestión de seguridad, salud ocupacional, medioambiente y responsabilidad social. Docente consultor de procesos metalúrgicos en diversas unidades mineras en el país.

@ lhuere@tecsup.edu.pe

Recibido: 28-05-19    Revisado: 05-07-19    Aceptado: 09-07-19



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.

**OBTÉN A DISTANCIA**  
**HABILIDADES**  
**DE ALTA DEMANDA**  
**LABORAL**

**CURSOS Y PROGRAMAS**  
**100 % VIRTUALES**



Electricidad y Electrónica



Mecánica y Aviación



Tecnología Agrícola



Gestión y Producción



Mecatrónica



Tecnología Digital



Seguridad y Salud  
en el Trabajo



Minería, Procesos  
Químicos y Metalúrgicos

**Capacítate donde y cuando quieras**

- Cursos *e-learning*
- Programas integrales virtuales
- MOOC's



**958 684 753**



Tecsup  Virtual

**Se diseñó e implementó un prototipo de una mano robot con un circuito electrónico de control para coger objetos livianos de formas particulares y de uso cotidiano.**



## Desarrollo de un prototipo de mano robot para prótesis de bajo costo

### *Development of a Hand Robot Prototype for Low-Cost Prosthetics*

#### RESUMEN

La presente investigación se orienta al desarrollo de un prototipo de mano robot para prótesis de bajo costo que pueda ser utilizada por aquellas personas que carecen de la mano y les permitan sujetar objetos livianos de uso cotidiano. La construcción del prototipo se realizó con diferentes componentes obtenidos con impresión 3D, los cuales fueron ensamblados para obtener una mano robot. Además, se utilizaron actuadores y un circuito electrónico de control para la generación del movimiento de los dedos.

Este trabajo comenzó con el estudio de las características fisionómicas de la mano humana, se analizó principalmente el movimiento de los dedos y de las articulaciones que estos tienen, con lo cual se determinó los grados de libertad y los rangos de movimiento de cada uno de los dedos. Cada uno de ellos tiene tres grados de libertad, tres articulaciones y tres eslabones. El movimiento de los dedos del prototipo se realizó con un servomotor y dos cuerdas que recorren por los tres eslabones; al girar el servomotor en un sentido, se logró que el dedo se extiende y en otro sentido se flexiona, emulando de esta forma el movimiento del dedo humano, aunque no de forma perfecta. Además, cada dedo es manipulado en forma independiente. Los resultados de las pruebas mostraron que el prototipo es capaz de sujetar satisfactoriamente objetos de bajo peso y volumen por lo que se considera que el prototipo es confiable para sujetar objetos de uso cotidiano similares a los objetos utilizados durante las pruebas. En esta etapa de la investigación, no se han realizado pruebas con pacientes.

La investigación para el desarrollo de este modelo está abierta al perfeccionamiento y la optimización del mismo. El material utilizado para la construcción del prototipo puede ser más liviano, el sistema mecánico y electrónico que produce el movimiento de los dedos puede ser mejorado y las fuentes de energía que alimentan al sistema pueden tener una mayor autonomía.

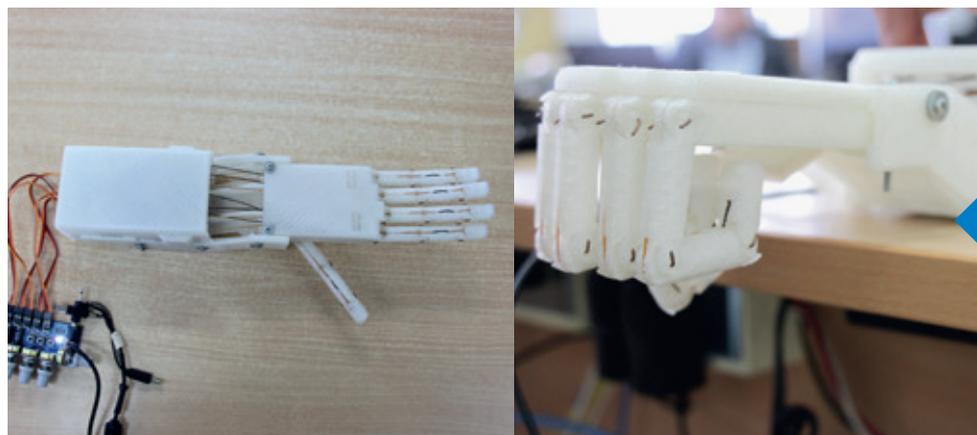
#### ABSTRACT

*This research is aimed at developing a prototype robot hand for low-cost prostheses that can be used by those who lack the hand and allow them to hold light objects for everyday use. The construction of the prototype was carried out with different components obtained with 3D printing, which were assembled to obtain a robot hand. Also, actuators and an electronic control circuit were used for the generation of fingers movement.*

*This investigation began with the study of the physiognomic characteristics of the human hand, mainly the movement of the fingers and their joints were analyzed, with which were determined the degrees of freedom and ranges of movement of each of the fingers. Each of the fingers has three degrees of freedom, three joints, and three links. The movement of each of the fingers of the prototype was performed with a servomotor and two ropes that run through the three links; turning the servomotor in one direction allowed the finger to extend and in another direction flexes, emulating in this way the movement of the human finger, although not perfectly. On the other hand, each finger is manipulated independently.*

*The results of the tests shown that the prototype can successfully hold low weight and volume objects, so the prototype is considered reliable to hold everyday objects similar to those used during the tests. At this stage of the investigation, there have been no tests with patients.*

*Research for the development of this prototype is open to refinement and optimization of the model. The material used for the construction of the prototype can be lighter, the mechanical and electronic system that moves the fingers can be improved and the energy sources that feed the system can have greater autonomy.*



#### Palabras clave

Mano robot, prótesis, sujeción, robótica humanoide, modulación de ancho de pulso.

#### Key words

Robot hand, prosthesis, grasping, humanoid robotics, pulse width modulation.

## INTRODUCCIÓN

Desde tiempo atrás y en la actualidad, existen personas que desafortunadamente carecen de algún miembro de su cuerpo, ya sean trabajadores que por mala manipulación de equipos industriales perdieron alguna extremidad, o personas que por razones médicas requirieron de alguna amputación. Evidentemente, no podrán desarrollar sus actividades en forma normal.

Ante aquel problema, se han propuesto diferentes soluciones que van desde el uso de prótesis cosméticas inertes hasta el uso de prótesis robóticas sofisticadas capaces de generar movimientos complejos, similares a los del miembro faltante, las cuales funcionan utilizando señales eléctricas del cuerpo detectadas por medio de sensores ubicados sobre la piel (métodos no invasivos) [9] o sensores ubicados dentro del cuerpo (métodos invasivos) [5]. Las prótesis más sofisticadas reproducen los movimientos más complejos que puede realizar una mano, pero tienen un costo alto, lo cual no permite que sean accesibles por el público en general. La presente investigación consiste en desarrollar un prototipo de una mano robótica de bajo costo haciendo uso de una impresora 3D y de componentes electromecánicos económicos, con lo cual se podrá emular a los dedos de una mano, generando movimientos básicos de dos grados de libertad para coger objetos livianos

de fácil acceso. En esta fase de la investigación, no se utilizarán sensores ni un sistema automático que permita regular el movimiento de los dedos de la prótesis. Estos movimientos se realizan mediante servomotores comandados por un algoritmo en el cual seleccionamos las opciones que permitan extender o flexionar los dedos en forma secuencial según el objeto que se desea coger. La interfase entre el *software* y el sistema mecánico es una tarjeta Arduino, la cual permite dar las señales de comando a los servomotores para producir el movimiento de los dedos.

## FUNDAMENTOS

### Anatomía de la mano humana

Bart Peerdeman y su equipo, en el año 2010 [2], describieron un modelo mecánico de la mano humana en el que distinguen huesos y articulaciones. Esta descripción muestra en principio que una mano se compone de cinco dedos, cada uno de estos está formado por tres falanges, un hueso metacarpiano y tres articulaciones, excepto el dedo pulgar, el cual únicamente cuenta con dos falanges y carece de articulaciones «interfalángica distal» e «interfalángica proximal» pero en su lugar posee las articulaciones «interfalángica» y «carpometacarpiana», tal como se muestra en la figura 1.

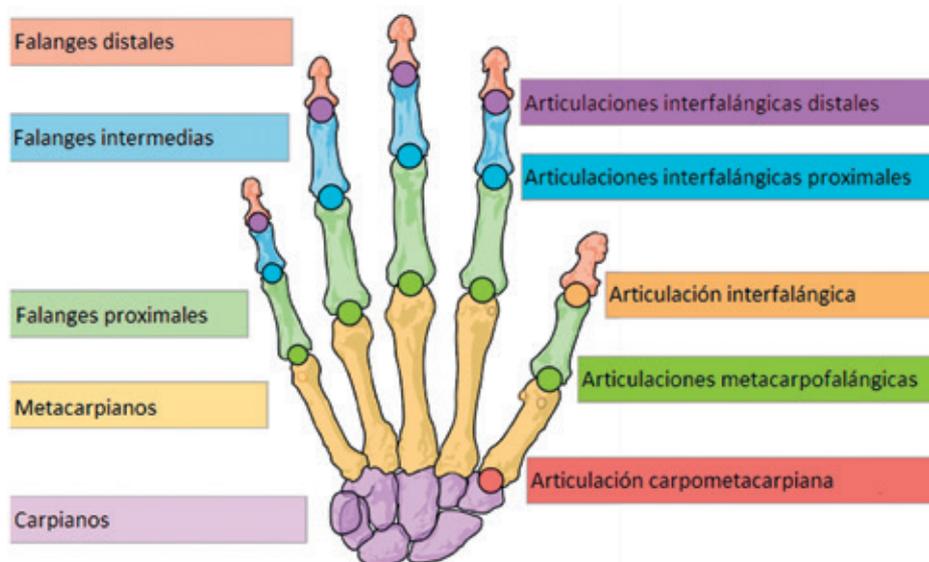


Figura 1. Estructura de huesos y articulaciones de la mano humana  
Fuente: Adaptación de [2].

Con fines prácticos se define la siguiente nomenclatura:

- IDX: Dedo índice
- MDL: Dedo medio
- RNG: Dedo anular
- LTE: Dedo meñique
- TMB: Dedo pulgar
- DSP: Falange distal
- IMP: Falange intermedia
- PXP: Falange proximal
- MTC: Metacarpiano
- MCP: Articulación metacarpofalángica
- PIP: Articulación interfalángica proximal
- DIP: Articulación interfalángica distal
- IP: Articulación interfalángica
- TMC: Articulación carpometacarpiana

Asimismo, Salvador Cobos y su equipo, en 2008 [10], realizaron un trabajo en el que describen los rangos de movimiento (ROM) para cada articulación en donde se muestra que las articulaciones MCP se pueden representar por dos grados de libertad, los cuales son el de «flexión-extensión» y el de «abducción-aducción». El movimiento de «flexión» consiste en contraer los dedos como se hace cuando se forma puño con la mano y «extensión» consiste en estirar los dedos como se hace cuando la mano está en posición de palma. Los movimientos de «abducción-aducción» son hacia los laterales de los dedos y únicamente se cuenta con ellos en las articulaciones MCP de todos los dedos excepto el dedo pulgar y en la articulación TMC del mismo dedo.

Se muestra, también, la presencia de grados de libertad pasivos en la base de los carpianos de los dedos: índice, medio, anular y meñique, además de trapecio escorpioide del dedo pulgar cuyos ROM son bajos, con un máximo de 15°, por lo que se vio oportuno no considerar dichas articulaciones pasivas, solo las articulaciones activas tal como se muestra en [2]. De acuerdo con lo descrito en la tabla 1, los grados de libertad activos correspondientes a los dedos de una mano humana son representados por un total de 20 grados de libertad articulares.

Tabla 1  
*Movimientos activos por cada articulación*

Dedo	Articulación	Movimiento	ROM
<b>IDX</b>	MCP	Flexión	90°
		Extensión	30° - 40°
		Abducción / Aducción	60°
	PIP	Flexión	110°
		Extensión	0°
	DIP	Flexión	80° - 90°
<b>MDL</b>	MCP	Extensión	5°
		Flexión	90°
		Extensión	30° - 40°
	PIP	Abducción / Aducción	45°
		Flexión	110°
	DIP	Extensión	0°
<b>RNG</b>	MCP	Flexión	80° - 90°
		Extensión	5°
		Abducción / Aducción	45°
	PIP	Flexión	90°
		Extensión	30° - 40°
	DIP	Flexión	120°
<b>LTE</b>	MCP	Extensión	0°
		Flexión	80° - 90°
		Abducción / Aducción	5°
	PIP	Flexión	90°
		Extensión	30° - 40°
	DIP	Flexión	50°
<b>TMB</b>	MCP	Flexión	135°
		Extensión	0°
		Abducción / Aducción	90°
	PIP	Flexión	90°
		Extensión	5°
	DIP	Flexión	50° - 90°
<b>TMC</b>	CMC	Extensión	15°
		Abducción / Aducción	45° - 60°
		Flexión	75° - 80°
	MCP	Extensión	0°
		Flexión	75° - 80°
	IP	Extensión	5° - 10°

Fuente: [10]

### Sujeción de objetos de uso cotidiano

Tal como se plantea en el presente estudio, se considera como criterio de verificación de correcto funcionamiento, la capacidad de sujetar objetos livianos de uso cotidiano, para lo cual se requiere determinar qué objetos pueden considerarse dentro de aquella categoría. Para conseguirlo, se revisaron trabajos similares enfocados a manipuladores robóticos en tareas de sujeción de objetos de uso cotidiano, entre los que se encontró el artículo de Alvaro Collet [1] en donde un manipulador robótico sujeta objetos, tales como, una bebida gaseosa, una botella de jugo de frutas y una caja de arroz. También se tiene el artículo de Lerrel P. [6] que muestra a un robot humanoide sujetando diferentes tipos de objetos, tales como, juguetes, cinta adhesiva, un mando a distancia de videojuegos, entre otros.

De forma más precisa, Ben Kehoe [4] experimentó con un conjunto de seis objetos del hogar como se muestra en la figura 2, utilizando un manipulador robótico de dos brazos. Seleccionó estos objetos porque representan formas de objetos comunes y son comprensibles por la pinza de mandíbulas paralelas del robot. Los objetos utilizados fueron los siguientes:

- Una botella de ambientador
- Un frasco de mantequilla de maní
- Una botella de jugo de fruta
- Un frasco de mostaza
- Una barra de dulce
- Una caja de jabón



Figura 2. Conjunto de seis objetos utilizados para la prueba. Fuente: [4]

## METODOLOGÍA

### Componentes de la mano robot humanoide

Tal como se describe en la sección «Anatomía de la mano humana», los movimientos de los dedos de flexión-extensión y abducción-aducción pueden representarse por 20 grados de libertad articulares. Sin embargo, trabajar con la cantidad total de grados de libertad implica aumentar la complejidad del sistema mecánico, al tener que colocar 20 actuadores

independientes y también la complejidad del sistema de control al tener que contar con una plataforma electrónica capaz de controlar los 20 actuadores de forma independiente. Es por eso que, de acuerdo con los objetivos de la investigación de hacer un prototipo de bajo costo, se decidió reducir la cantidad de grados de libertad sin perjudicar la fisionomía de la mano robot y su capacidad de sujetar objetos de uso cotidiano (criterio considerado para verificar el correcto funcionamiento de la mano robot). La tabla 2 muestra los ROM considerados para la mano robot propuesta.

Tabla 2  
ROM de mano robot propuesta

Dedo	Articulación	Movimiento	ROM - Mano robot
<b>IDX</b>	MCP	Flexión	70°
		Extensión	0°
	PIP	Flexión	100°
		Extensión	0°
	DIP	Flexión	70°
		Extensión	0°
<b>MDL</b>	MCP	Flexión	70°
		Extensión	0°
	PIP	Flexión	100°
		Extensión	0°
	DIP	Flexión	70°
		Extensión	0°
<b>RNG</b>	MCP	Flexión	70°
		Extensión	0°
	PIP	Flexión	100°
		Extensión	0°
	DIP	Flexión	70°
		Extensión	0°
<b>LTE</b>	MCP	Flexión	70°
		Extensión	0°
	PIP	Flexión	100°
		Extensión	0°
	DIP	Flexión	70°
		Extensión	0°
<b>TMB</b>	CMC	Flexión	30°
		Extensión	0°
	MCP	Flexión	60°
		Extensión	0°
	IP	Flexión	100°
		Extensión	0°

Fuente: [10]

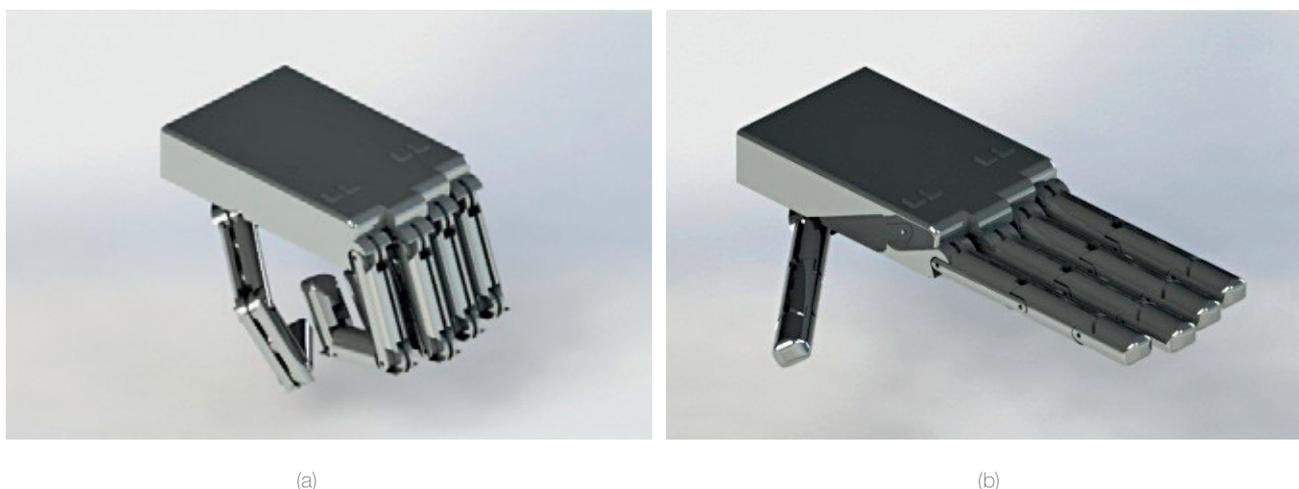
Dado que, para sujetar objetos, es común extender y flexionar los dedos de la mano se consideró oportuno que cada dedo tenga 3 articulaciones, cada una con un solo grado de libertad, de modo que cada dedo tiene 3 grados de libertad y la mano tiene 15 grados de libertad en total (solo se consideran

los movimientos de flexión-extensión y no se consideran los de abducción-aducción, de forma similar a [11] y [7]). Las 3 articulaciones de un dedo son accionadas por un solo actuador que hará extender o flexionar el dedo de forma continua, operacionalmente hablando equivale al manejo de un total de 5 actuadores independientes. Los ROM de la mano robot propuesta han sido elegidos de modo que al estar la mano cerrada tenga aspecto de puño y al estar abierta tenga aspecto de palma, tal como se muestra en la figura 3.

### Generación y transmisión de movimiento para mano robot

Se eligió el uso de servomotores de forma estándar a fin de poder ser reemplazados por otros similares en caso se requiera y de fácil acceso en el mercado, para reducir costos de importación, se encontró oportuno el uso del servomotor

de torque medio (11Kgf-cm) MG996R, el cual cuenta con un motor DC que opera de 4.8V a 6V con un reductor de velocidad y controlador de posición interno, lo que facilita su uso, dado que solo se requiere que el microcontrolador de la plataforma electrónica de control envíe referencias de posición angular para la generación de movimiento. Se ha elegido realizar la transmisión de movimiento mediante un sistema de cuerdas de forma similar a [8], [11] y [3] que atraviesan los dedos de la mano robot de modo de que cada uno de los 5 servomotores, al girar en sentido horario, jalan una cuerda de color marrón que hace que el dedo completo se extienda, mientras que al girar en sentido antihorario, tiran una cuerda de color negro, que hace que el dedo completo se flexione. Los servomotores han sido colocados en una estructura adicional, la cual se asemeja a parte del brazo humano sin contar con la muñeca. En la figura 4, se muestra el sistema mano robot incluyendo los servomotores.



(a)

(b)

Figura 3. Simulación del sistema mecánico utilizando el software de diseño y simulación mecánica SolidWorks. (a) Mano robot propuesta flexionada, (b) Mano robot propuesta extendida.

Fuente: Elaboración propia.

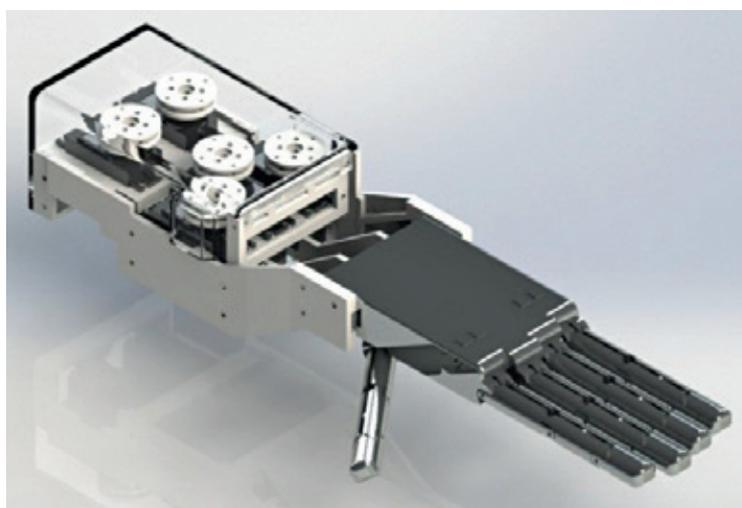


Figura 4. Mano robot simulada en SolidWorks.

Fuente: Elaboración propia.

### Diseño del sistema electrónico para la mano robot

Al contar cada servomotor con un controlador de posición propio, lo único que se requirió diseñar fue un sistema electrónico de control que genere trayectorias en forma de posiciones angulares para cada uno de los 5 servomotores. Dado el bajo costo y fácil acceso, además de la posibilidad de operar 5 señales PWM (señales de pulso de ancho modulado utilizadas para enviar referencias de posición angular a los servomotores), se eligió utilizar como base para el sistema electrónico de control de movimiento al microcontrolador ATmega 328p.

La tarjeta electrónica cuenta con dos fuentes de alimentación separadas, la primera de 5VDC que se utiliza para alimentar

al microcontrolador y dar la señal de referencia analógica de los potenciómetros y la segunda de 6VDC es utilizada para alimentar los servomotores MG996R. Esta tarjeta cuenta con los siguientes controles:

- Potenciómetros IN1, IN2, IN3, IN4 e IN5: permiten al usuario regular de forma directa la posición de los servomotores y con ello la flexión o extensión de cada uno de los 5 dedos por separado.
- Botón B1: Abre (extiende) todos los dedos de la mano.
- Botón B2: Cierra (flexiona) todos los dedos de la mano.
- Botón B3: Permite hacer uso de los potenciómetros para operar de forma manual la flexión o extensión de los dedos de la mano.

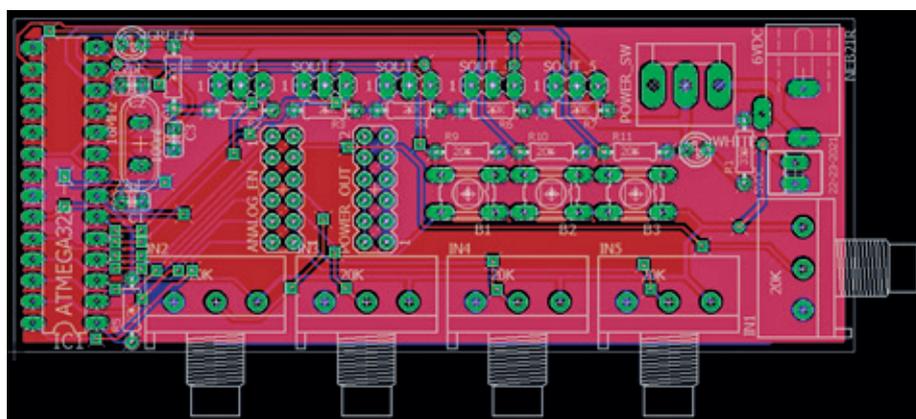


Figura 5. Circuito electrónico de control de movimiento de la mano robot diseñada por computadora. Fuente: Elaboración propia.

### Ensamblaje de la mano robot

Considerando el diseño mecánico realizado en SolidWorks y la inclusión del circuito electrónico de control basado en el microcontrolador ATmega328p además de los cinco servomotores y las cuerdas que permiten la transmisión de movimiento, se fabricó la mano robot que se muestra en las figura 6, 7 y 8.

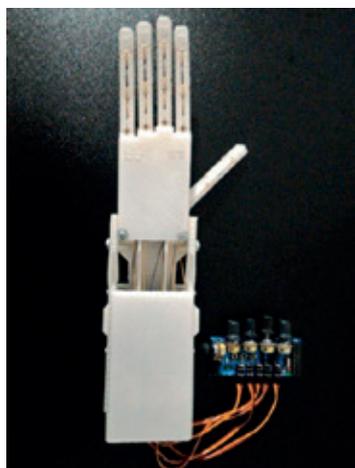


Figura 6. Mano robot ensamblada. Fuente: Elaboración propia.

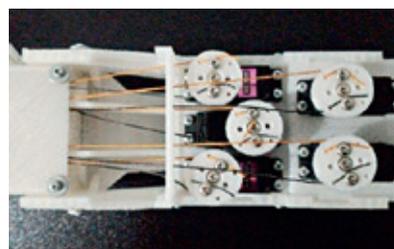


Figura 7. Servomotores con cuerdas para transmisión de movimiento. Fuente: Elaboración propia.



Figura 8. Circuito electrónico de control de movimiento. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 9 se muestra el circuito electrónico de control, el cual se ha dividido en 5 secciones. La sección A tiene como elemento principal al microcontrolador Atmel ATmega 328p, el cual tiene como entradas analógicas (pines 24, 25, 26, 27 y 28) a las señales de voltaje reguladas por los 5 potenciómetros que se utilizan como referencia para las posiciones angulares de los 5 servomotores. La sección B consiste de los terminales para

las fuentes de alimentación de voltaje de 5VDC y 6 VDC. La sección C consiste de los botones pulsadores B1, B2 y B3. La sección D consiste de los cinco potenciómetros IN1, IN2, IN3, IN4 e IN5. La sección E consiste de los terminales SOUT\_1, SOUT\_2, SOUT\_3, SOUT\_4 y SOUT\_5 para conectar a los 5 servomotores.

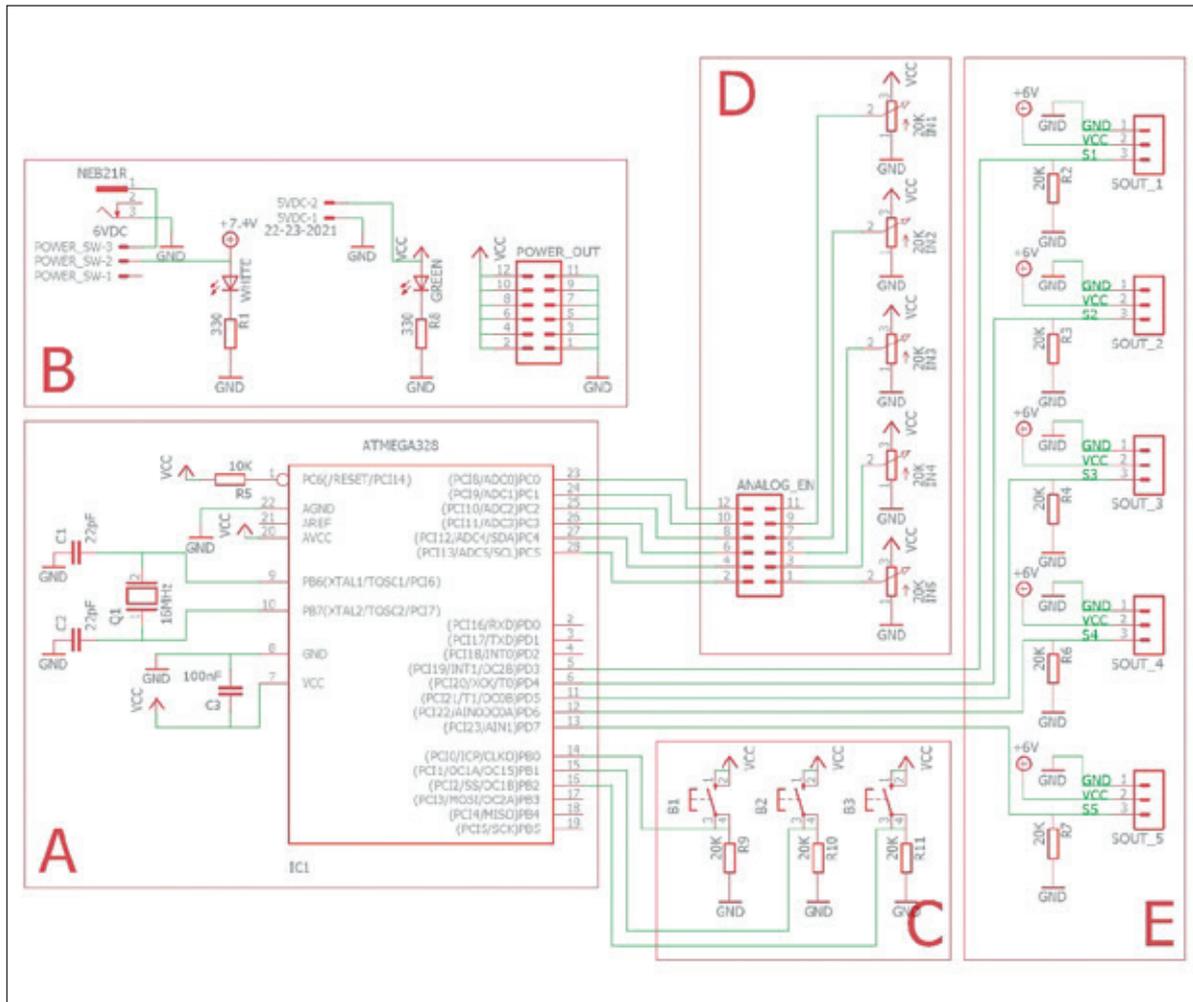


Figura 9. Circuito electrónico de control de movimiento. Fuente: Elaboración propia.

## RESULTADOS

### Pruebas de sujeción de objetos

Considerando que el prototipo ha sido diseñado para sujetar objetos livianos de uso cotidiano y los objetos mostrados en [1], [6] y [4], se han realizado pruebas de sujeción para los siguientes objetos:

- Una caja de bebida de chocolate de 180 ml
- Una botella de limpiador de 470 ml
- Un jabón personal de 150 g

- Un mando a distancia de videojuego
- Una botella de alcohol de 250 ml

Se realizaron las tareas de sujeción regulando manualmente el ancho de pulso para cada servomotor por medio de los 5 potenciómetros instalados en el circuito de control, con el fin de regular adecuadamente los grados de flexión-extensión de cada uno de los dedos para que estos puedan sujetar el objeto de prueba. En la figura 10, se muestra la mano robot sujetando los 5 objetos de uso cotidiano antes nombrados.

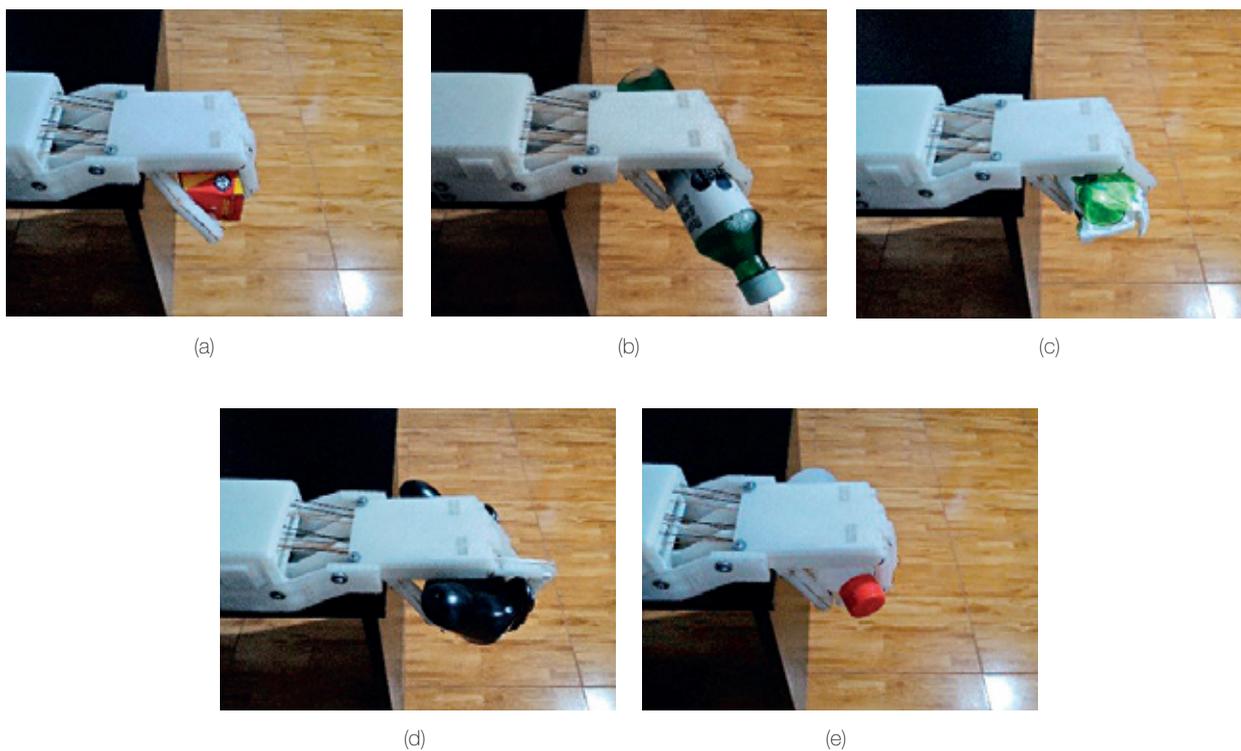
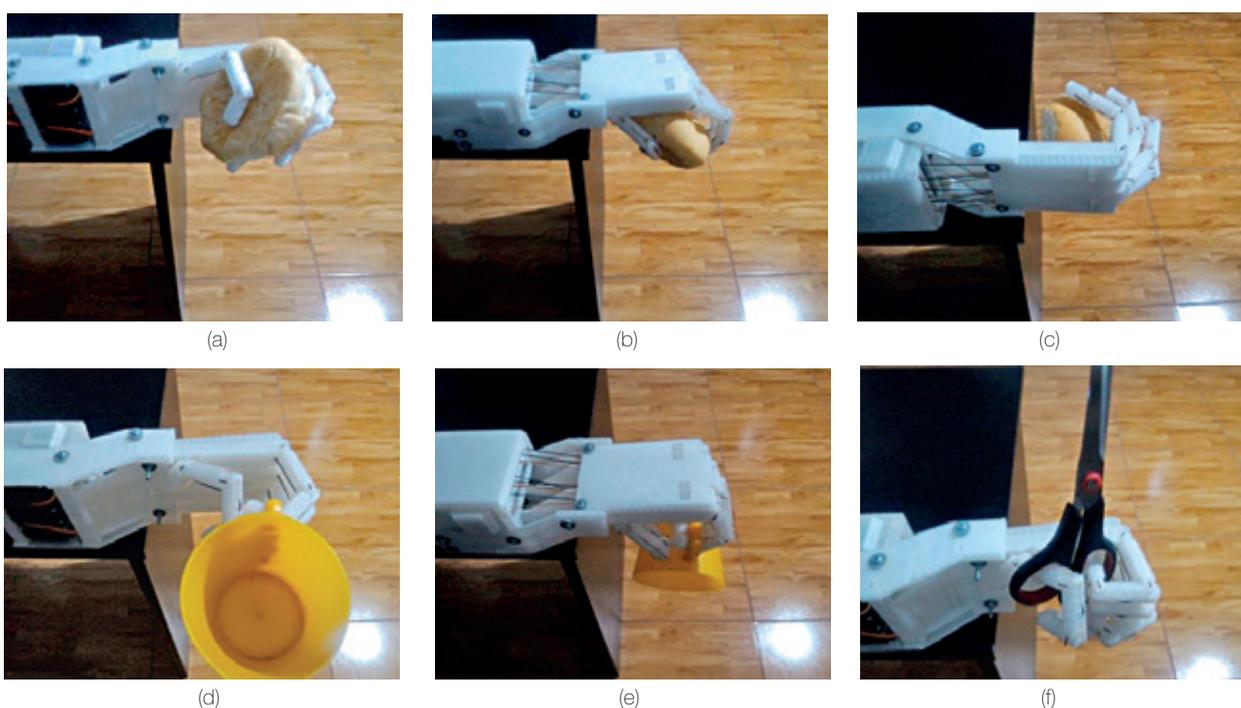


Figura 10. Mano robot sujetando (a) una caja de bebida de chocolate, (b) una botella de limpiador, (c) un jabón personal, (d) un mando a distancia de videojuego y (e) una botella de alcohol.  
Fuente: Elaboración propia.

También se realizaron otras pruebas de sujeción con objetos livianos tales como los siguientes (ver figura 11):

- Un pan
- Una taza
- Una tijera
- Una lata de conservas
- Una paleta



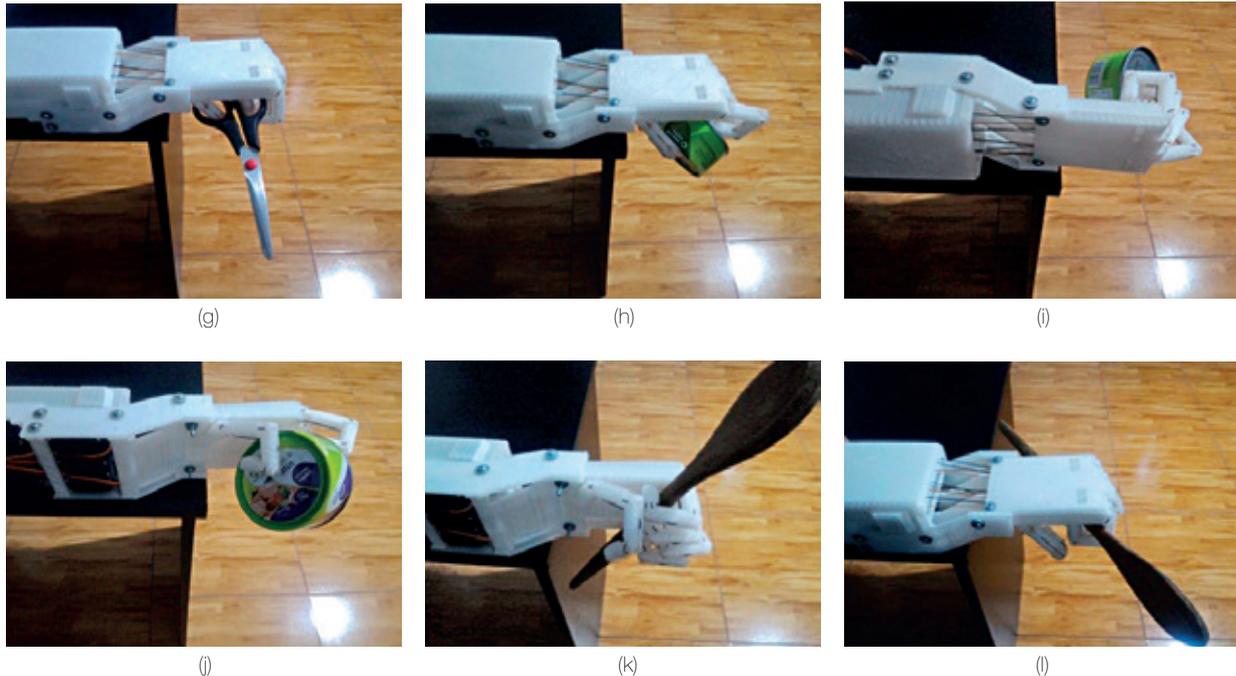


Figura 11. Mano robot sujetando (a), (b) y (c) un pan, (d) y (e) una taza, (f) y (g) una tijera, (h), (i) y (j) una lata de conserva, (k) y (l) una paleta.  
Fuente: Elaboración propia.

## CONCLUSIONES

- Se realizó el estudio de la dinámica de los dedos de la mano de un ser humano, particularmente, se analizó las articulaciones, los grados de libertad y los rangos de movimiento de cada articulación.
- Se diseñó e implementó un prototipo de una mano robot con un circuito electrónico de control para coger objetos livianos de formas particulares y de uso cotidiano, cuyos pesos y volúmenes máximos son de 0,5 kg y 500cm<sup>3</sup> respectivamente.
- Se controló en modo manual los grados de flexión y extensión de los dedos, para que estos se adapten a la forma de los objetos de prueba y los puedan coger adecuadamente.
- Se experimentó con algunos objetos que tienen las formas más comunes, los cuales se presentan en el medio donde se desempeña una persona, obteniéndose los resultados esperados.
- Se validó el prototipo de la mano robot experimentando con otros objetos, lo cual nos permite concluir que este prototipo puede sujetar una gran variedad de objetos, aunque no todos, porque pueden tener una geometría muy irregular.

Puede ver el funcionamiento de la mano robot en el siguiente enlace: <https://youtu.be/Qf4czhHdK0I>

## REFERENCIAS

- [1] Alvaro, C., Dimitry, B., Siddhartha, S., & Dave, F. (2009). Object Recognition and Full Pose Registration from a Single Image for Robotic Manipulation. 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Recuperado de <https://ieeexplore.ieee.org/document/5152739>
- [2] Bart, P., Daphne, B., Laura, K., Stefano, S., & Sarthak, M. (2010). Biomedical Model for the Development of Myoelectric Hand Prosthesis Control Systems. *32nd Annual International Conference of the IEEE EMBS*, 519-523.
- [3] Bart, P., Ugo, F., Gianluca, P., Claudio, M., Stefano, S., & Sarthak, M. (2012). Development of Prosthesis Grasp Control System on a Robotic Testbed. *The Fourth IEEE RAS/EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics*, 1110-1115.
- [4] Ben, K., Akihiro, M., Sal, C., James, K., & Ken, G. (2013). Cloud-Based Robot Grasping with the Google Object Recognition Engine. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Recuperado de <https://ieeexplore.ieee.org/document/6631180>
- [5] Leigh, H., Mijail, S., Gerhard, F., Jon, M., Maryam, S., Abraham, C., Almut, B., David, C., Richard, P., & Jhon, D. (2006) Neuronal ensemble control of prosthetic devices by a human with tetraplegia. *Nature*, 442, 164-171.
- [6] Lerrel, P. & Abhinav, G. (2016) Supersizing Self-supervision: Learning to Grasp from 50K Tries and 700 Robot Hours. 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Recuperado de <https://ieeexplore.ieee.org/document/7487517>

- [7]** Lianjun, W., Monica de A., Lokesh, S., Richard, R., Ray, B. & Yonas, T. (2016) Compact and low-cost human hand powered by nylon artificial muscles. *Bioinspir.Biomin*, 12(2017) 026004.
- [8]** Markus, G., Maxime, C., Gerd, H., & Ronald, S. (2010) Antagonistically Driven Finger Design for the Anthropomorphic DLR Hand Arm System. *2010 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, 609-616.
- [9]** Osamu, F., Toshio, T., Makoto, K., & Akira, O. (2003) A Human-Assisting Manipulator Teleoperated by EMG Signals and Arm Motions. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 19(2), 210-222.
- [10]** Salvador, C., Manuel, F., M.A. S., Javier O., & Cesar P. (2008) Efficient Human Hand Kinematics for Manipulation Tasks. *2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2246-2251.
- [11]** Wenbin, C., Caihua, X., & Shigang, Y. (2015) Mechanical Implementation of Kinematics Synergy for Continual Grasping Generation of Anthropomorphic Hand. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 20(3), 1249-1263.

Ha participado en múltiples eventos de carácter científico-tecnológico nacionales e internacionales tales como talleres, conferencias, cursos y charlas, así como formación constante en temas relacionados con la ingeniería de control e inteligencia artificial. Cuenta con un diplomado en Gestión de Proyectos según los lineamientos del PMI (Project Management Institute), además de estudios concluidos de maestría en Automática e Instrumentación en la Universidad Nacional de Ingeniería.

 jsuarezq@uni.pe

**Ing. Ernesto Juan Godinez De La Cruz**

Ingeniero electrónico de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, bachiller en Ciencias con mención en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Nacional de Ingeniería, estudios concluidos de maestría en Automática e Instrumentación en la Universidad Nacional de Ingeniería y diplomado en Mecatrónica de Tecsup. Con experiencia en diseño y ejecución de proyectos de electrificación, diseño y construcción de tableros eléctricos para centros de control de motores. Ha participado en trabajos de investigación para IIFIEE-UNI en actividades relacionadas al diseño e implementación de Sistemas de Control Digital. Es docente en la especialidad de Electrónica y Automatización industrial de Tecsup en los cursos de Instrumentación Industrial y Estrategias de Control Automático.

 egodinez@tecsup.edu.pe

**ACERCA DE LOS AUTORES**

**Mág. José Machuca Mines**

Ingeniero electrónico, egresado de la Universidad Nacional de Ingeniería, magíster en Automática e Instrumentación egresado de la Universidad Nacional de Ingeniería y docente universitario en la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Profesor de pregrado y posgrado.

 jmachuca@uni.edu.pe

**Bach. Juan Carlos Suárez Quispe**

Bachiller en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica de la Universidad Nacional de Ingeniería con amplia experiencia en participación en trabajos de investigación para INICTEL-UNI y el IIFIEE-UNI en actividades relacionadas con el diseño y la implementación de sistemas de control digital.

**Ing. Wilson Marín Quevedo**

Ingeniero eléctrico de la Universidad Nacional de Ingeniería y con estudios culminados de maestría en Automática e Instrumentación en la misma universidad. Ha participado en trabajos de investigación para IIFIEE-UNI en actividades relacionadas con el diseño y la implementación de sistemas de control digital. Tiene experiencia en instalaciones eléctricas y automatización de embarcaciones pesqueras.

 wilson-quevedo@hotmail.com

Recibido: 17-06-19    Revisado: 26-06-19    Aceptado: 05-07-19



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.

## Desarrolla capacidades tecnológicas de alta demanda laboral con nuestros *bootcamps*.

- Programa de corta duración y 100 % práctico.
- Clases realizadas con metodologías ágiles y dictadas por expertos.
- Aprende desarrollando casos reales de nuestras empresas aliadas.



Desarrollo web  
Python | PHP | .Net



Desarrollo móvil



CodiGo blended



Especialista en  
Marketing Digital



## ALIADOS



**La aplicación de un modelo en la gestión de neumáticos OTR permite hacer visible las oportunidades de mejora,** así como hacer una evaluación cuantitativa y cualitativa.



# Modelo matemático para la gestión de la vida útil de neumáticos OTR en minería

## Mathematical Model for the Management of OTR Tires Useful Life in Mining

### RESUMEN

El presente artículo propone brindar una alternativa de solución para gestionar neumáticos especializados para trabajos de minería (*Off The Road* - OTR). Para ello, el objetivo ha sido desarrollar un modelo matemático que considere la influencia de factores internos y externos de los neumáticos OTR en acarreo mina. Se ha considerado como material de estudio una mina de pórfido de cobre del Perú, explotada bajo el método cielo abierto; tomando como muestra los neumáticos de las marcas «A» Y «B»; medidas estándar OTR de 59/80R63, 53/80R63 Y 40.00R57 de 75 camiones mineros (marcas «U», «V», «X», «Y», «Z» de capacidades nominales de 360, 220, 290, 290 y 220 TM respectivamente).

La metodología empleada ha considerado los siguientes procedimientos: 1) levantamiento de información preliminar (toma de datos) en campo de los principales factores influyentes; 2) procesamiento de información en gabinete en relación con la presión de inflado, la rotación, el gemelado, el indicador de toneladas – kilómetros/hora (TKPH), la superficie de terreno con la escultura, la profundidad de banda de rodamiento, la condición de vías, el diseño de vías, el soporte de equipos auxiliares, el mantenimiento del equipo y la influencia del operador; 3) ajuste y desarrollo del modelo matemático; y 4) evaluación de la aplicación del modelo matemático para la gestión de los neumáticos OTR.

Se ha desarrollado un modelo matemático que considere la influencia de los factores en el consumo de neumáticos OTR, aplicando modelos de regresión lineal y cuadrático. Existen muy pocos modelos que representen los inconvenientes de

la gestión de los neumáticos para acarreo mina. Por eso, la aplicación del modelo propuesto en la gestión de neumáticos OTR, permite visibilizar las oportunidades de mejora, así como realizar una evaluación cuantitativa y cualitativa.

Finalmente, este artículo contribuye a la minería, ya que genera un indicador que sea medible, aplicable y sea antecedente para futuras gestiones del acarreo en mina.

### ABSTRACT

*This article proposes to provide an alternative solution for the management of OTR tires. To this end, the objective has been to develop a mathematical model that considers the influence of internal and external factors of OTR tires during hauling. This study focuses on a copper porphyry mine in Peru, exploited under the open-pit method; using as samples the tires of brands "A" and "B" as shown; standard OTR measures of 59/80 R 63, 53/80 R 63 and 40.00 R 57, 75 mining trucks ("U", "V", "X", "Y", "Z", nominal capabilities of 360, 220, 290, 290 and 220 metric tons respectively).*

*The methodology includes the following procedures: 1) on-site preliminary information collection (data-gathering) of the main influencing factors; 2) in-switchgear information processing concerning: Inflation pressure, rotation, twinning, ton-kilometer per hour, terrain surface with sculpture, bandwidth depth, path condition, path design, auxiliary equipment support, equipment maintenance, and operator influence; 3) adjustment and development of the mathematical model; and 4) assessment of the effects of the application of the mathematical model for the management of OTR tires.*



### Palabras clave

Cocada, costo de remanente, neumáticos para trabajos mina, vida útil de neumáticos, gestión de neumáticos especializados.

### Key words

Tire track, remaining cost, tires for Mine works, off tires road, life used of tires, management of specialized tires.

*A mathematical model has been developed that considers the influence of factors on the consumption of OTR tires, applying linear and quadratic regression models. There are very few models that represent the inconveniences of mine tire handling. Therefore, the application of the proposed model in the management of OTR tires makes it possible to make improvement opportunities visible, as well as to make a quantitative and qualitative evaluation.*

*Finally, this article contributes to mining to generate an indicator that is measurable, applicable and antecedent for future management of mine haulage.*

## INTRODUCCIÓN

Luego de la crisis minera de 2008, la demanda de neumáticos especializados para trabajos de minería (*Off the Road* - OTR) se ha incrementado notoriamente. Situación que se relaciona directamente con el aumento de las flotas de acarreo, la creciente actividad minera y el desarrollo de grandes proyectos mineros en el mundo (como el caso de Perú).

Sin embargo, hay una oferta limitada de esta clase de neumáticos (que deben cumplir con la mayoría de las necesidades del consumidor), debido a que son escasas las empresas especializadas en fabricarlas, la cantidad de materiales empleados en su fabricación y su compleja reutilización luego de ser desechados. Los neumáticos OTR son el factor clave según expertos en el mundo de la minería a tajo abierto, por lo tanto, extender la vida útil es un pilar fundamental dentro de la estrategia de gestión de las compañías mineras.

En la actualidad, no existe algún antecedente sobre un modelo matemático que permita medir la gestión de neumáticos OTR. Sabemos que esto resulta crítico, ya que hemos escuchado constantemente la frase: «Lo que no se define no se puede medir. Lo que no se mide, no se puede mejorar. Lo que no se mejora, se degrada siempre», acuñada por el físico Lord Kelvin (1824 – 1907). Esto nos lleva a pensar que, si los factores influyentes no son cuantitativos, no pueden ser medidos, modelados ni gestionados.

Este trabajo aplica la metodología siguiente:

1. **Diagrama de Ishikawa:** Para la identificación de factores influyentes que afectan al rendimiento de neumáticos OTR.
2. **Informes estadísticos:** Para recopilar la información del caso de estudio.
3. **Modelos de regresión lineal y no lineal:** Para cuantificar el comportamiento de los factores mencionados en 1.
4. **Método de interpolación y extrapolación:** Para brindar valores superiores o inferiores a 1 (constituyendo los factores para el modelo de gestión de neumáticos OTR).

Proponer un modelo matemático sobre los factores influyentes de la vida de neumáticos permitirá identificar la gestión de su vida útil, el consumo de los neumáticos a través del tiempo y, finalmente, optimizar la gestión del neumático OTR.

## FUNDAMENTOS

Existen investigaciones relacionadas con la optimización de la gestión de neumáticos OTR (desde hace 20 años aproximadamente). La mayoría de las investigaciones se han centrado en el factor de rotación de neumáticos para la gestión del acarreo, tales como 1) eficiencia en tiempo de vida de neumáticos con relación a rotación de posiciones 1 y 2 en volquetes Komatsu 930E4 de paredes (2008); 2) factores influyentes en la vida útil de llantas de camiones Komatsu 930E fuera de carretera en la mina a tajo abierto de Mora (2011); y 3) metodología del cambio de posiciones 1 y 6 de neumáticos gigantes 793-D, para incrementar la vida útil y reducir los costos en SM Cerro Verde – Arequipa de Tejada (2014).

Po otro lado, la investigación de Cepillo y Jaime [2] relaciona la gestión de neumáticos OTR con el factor de diseño y cuidado de vías de acarreo. Este estudio ha contribuido significativamente en la presente investigación.

Finalmente, en los últimos años, las empresas fabricantes de neumáticos OTR han redactado manuales, guías e informes de buenas prácticas de cuidado de neumáticos para empresas mineras. Por motivos de confidencialidad, no pueden ser referenciados; sin embargo, algunos ejemplos son *Michelin Informaciones. Manual de Técnicas para Minería y Obra Civil* (2004) y *Data Book OTR – Bridgestone* (2006).

Como se puede observar, no hay antecedentes bibliográficos que contemplen investigaciones con visiones panorámicas de la problemática de gestión de neumáticos, ni del modelamiento matemático del mismo. Esta investigación, puede ser empleada como referencia para otras alternativas de solución para el tema de gestión de neumáticos OTR.

## METODOLOGÍA

La metodología aplicada para la presente investigación contempla, de manera general, lo siguiente:

**Paso 1. Identificación de factores influyentes en la vida útil de neumáticos OTR,** aplicando el diagrama de Ishikawa (1960) o causa y efecto (ver figura 1).

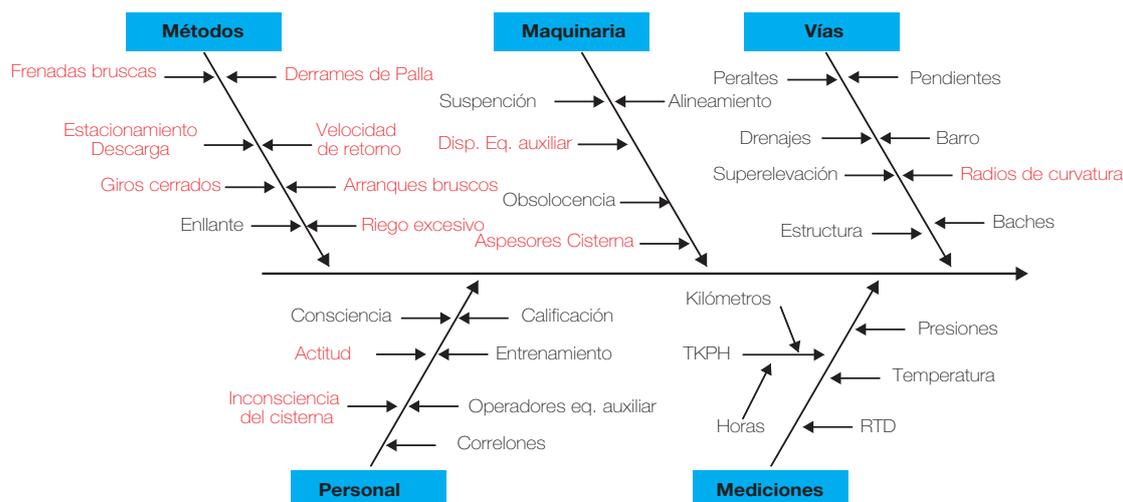


Figura 1. Diagrama de Ishikawa de factores influyentes.  
Fuente: [4]

**Paso 2. Elaboración de informes estadísticos** para recopilar la información del caso de estudio de la mina Toquepala [4].

**Aspectos generales**

Se tomó en consideración los siguientes aspectos:

- Periodo de estudio de 6 meses.
- Neumáticos de medidas 59/80R63, 53/80R3, 40.00R57.
- El número de neumáticos OTR dañados y desechados, así como el tipo de daño, frecuencia de daños en las distintas posiciones, horas de rotación, la influencia de las rutas de acarreo, puntos de carga y descarga que más dañaron a los neumáticos, etc.

El informe estadístico del caso estudio permitió obtener la siguiente información (indispensable para los próximos pasos):

- Verificación del cumplimiento de estándar de presiones de inflado en campo, en colaboración con la empresa que brinda servicios de mantenimiento de neumáticos.
- Revisión de los rendimientos reales de las bandas de rodamiento para los distintos modelos.
- Valores de (TKPH) en el acarreo de mina en campo o mediante sistema de despacho.
- Características de los camiones para evitar cortes y daños de los neumáticos en las zonas de carga y descarga.
- Compatibilidad de equipos auxiliares en relación con las tareas asignadas para el cuidado de neumáticos OTR.
- Condiciones de diseño de las principales vías de acarreo.
- Prácticas operativas del camión que refuercen la gestión del cuidado de neumático, así como la situación cultural del cuidado de neumáticos en la gestión del acarreo.

**Procesamiento de información**

Al procesar la información, se tuvieron evidencias claras que el tipo de daño más común generado al neumático OTR es el daño por corte, (ver figura 2), el cual representa un 90 % del total. Además, los neumáticos que están ubicados en las posiciones traseras (3, 4, 5 y 6) reflejan un 90 % de daños, las posiciones que son «no visibles» como el caso de 5 y 6

requieren de mayor supervisión y cuidado al momento de la operación (ver figura 3).

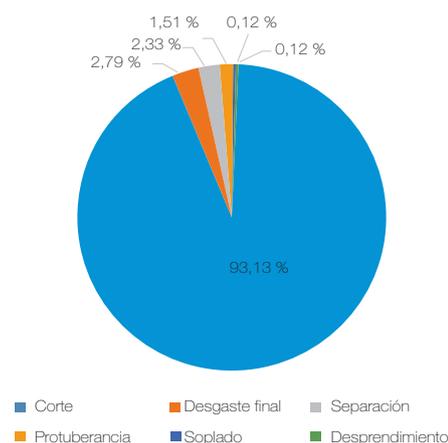


Figura 2. Porcentaje de incidencia en los daños totales por cada modalidad de daño.  
Fuente: Elaboración propia.

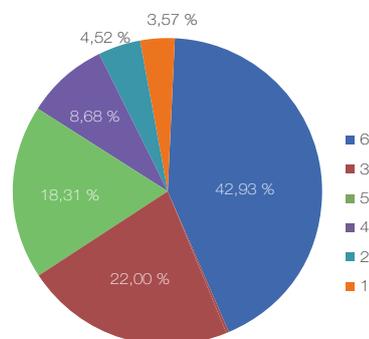


Figura 3. Porcentaje de incidencia en los neumáticos dañados por posición.  
Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, se tienen evidencias de porcentajes altos de cortes en flanco y en banda de rodamiento (ver figura 4). En la mayoría

de los casos, los daños por flanco están relacionados con las inadecuadas prácticas operativas del camión (impactos con bermas), cortes laterales en flancos, diseños no estandarizados de anchos de vías, peraltes inadecuados para determinados diseños de curvas de vías de acarreo. El tipo de daño por banda de rodamiento es común, debido a que es el tipo de desgaste deseado. Idealmente, el deterioro parejo de la banda sería lo óptimo, sin embargo, resulta negativo cuando este se genera por debajo de la vida útil del neumático. Se ha tomado como valor estándar gastar el neumático hasta que la medida de la cocada final llegue a tener de un 15 % de la medida de cocada inicial [3].

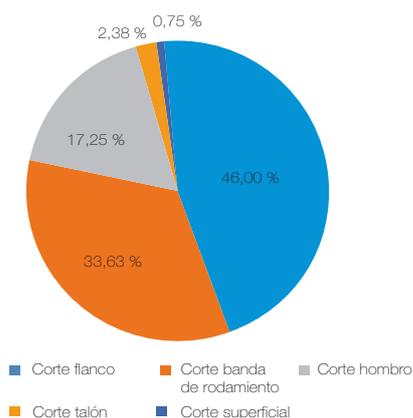


Figura 4. Porcentaje de incidencia en los neumáticos dañados por posición  
Fuente: Elaboración propia.

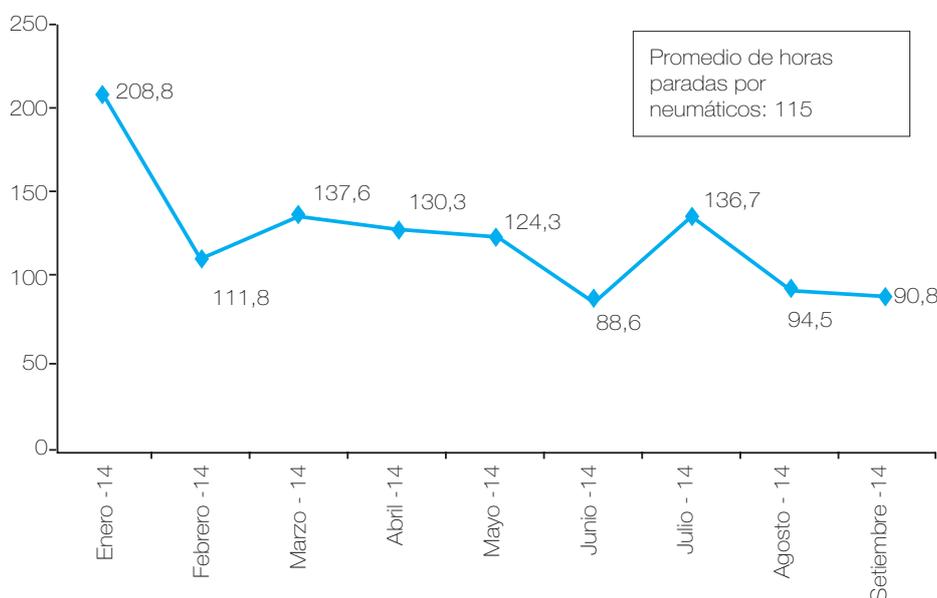


Figura 5. Horas mensuales paradas por neumáticos.  
Fuente: Elaboración propia.

La supervisión de la presión de inflado de neumáticos resulta importante debido a que valores por encima de la presión estándar generan desgaste prematuro en la banda de rodamiento; de igual manera, presiones más bajas del estándar producen un desgaste en los hombros y talones del neumático. Para los modelos señalados, se tienen los siguientes datos que se muestran en la tabla 1.

Tabla 1  
Presiones promedio de los equipos de acarreo

Presión	Presión fría (PSI)	Presión caliente (PSI)
Posiciones	6 posiciones	6 posiciones
40.00R57	105 – 110	125 – 130
53/80R63	100 – 105	115 – 125
59/80R63	105	115 – 125

Fuente: [6].

Es importante señalar para la presente investigación que las horas de paradas por motivo de mantenimiento de neumáticos representan un 15 % de las horas totales. En la siguiente figura, se puede apreciar lo descrito anteriormente.

Otro factor de suma importancia es la temperatura de neumático, que se relaciona, además, con el TKPH. Cuando las temperaturas son elevadas, se puede generar daños por

separación de banda a continuación, se puede apreciar los datos obtenidos:

Tabla 2  
Temperaturas para medir el exterior

Temp.	No Riesgo	Riesgo	Riesgo	Peligro
°C	20 -65	70	75	Mayor a 75

Fuente: [6].

Como se había señalado antes, la gestión de las horas de rotación de los neumáticos es un factor que ha sido priorizado en las últimas investigaciones, debido a que es una alternativa de solución bastante operativa, fácilmente aplicable y medible. Para este factor se debe considerar las horas de rotación y las medidas de las cocadas (mm) en las horas de rotación. Se dispone de las tablas 3 y 4:

Tabla 3  
Rotaciones y vida útil de neumáticos

Medida	h P 1 Y 2	h P 3 Y 4	h P 5 y 6
40.00 R 57	2800	4600	7680
53/80 R 63	1958	3850	5830
59/80 R 63	1328	3500	5080

h: horas - P: posición  
Fuente: [3]

Tabla 4  
Cocadas iniciales de neumáticos (mm)

Dimensión	Cocada inicial	
	Marca A	Marca B
40.00R57	122	124
50/90R57	133	133
53/80R63	132	138
59/80R63	144	144

Fuente: [3]

Para la temperatura interna de estabilización de la llanta, se tiene un equivalente: 40 km/h en 1 h, 20 km/h en 3 h y 25 km/h en 4 h.

El costo total en la situación de mina contempla aproximadamente 7 millones de dólares semestrales de pérdidas por motivo de desechos de neumáticos, de los cuales el 60 % se deben a daños por separación, 30 % por daños por corte y 10 % por desgaste final [4].

Esto refleja claramente que el desgaste deseado (por banda de rodamiento) solo representa 1/10 del costo total de desecho. Si bien es cierto, el desecho por corte es el más común, solo representa el 30 % del costo total por pérdidas de desecho. Esta ligera contradicción se debe al indicador «costo de remanente» que es el remanente de banda de rodamiento (en mm) en el momento del desecho. Esto significa que se puede tener más neumáticos desechados por corte, pero no necesariamente

hacen que el costo por pérdida sea el mayor, depende cuanto de banda de rodamiento se pierde por neumático. Para este caso, se ignora una posible recuperación y/o empleo de banda en un proceso de reencauche (debido a las peculiaridades operativas del caso de estudio).

Del diagrama de Ishikawa también se puede identificar que el diseño de vías influye directamente en el cuidado de neumáticos OTR; para este caso, se han obtenido los siguientes parámetros como referencia para la presente investigación:

- Velocidad de diseño: 40 km/h
- Velocidad operativa: 25 a 40 km/h
- Pendiente: De 8 a 12 %
- Peralte: 17 %
- Anchos de vías: Para el estándar 1, considerar de 20 a 25 m y, para el estándar 2, considerar de 30 a 35 m (la diferencia entre el estándar 1 y 2 depende básicamente de las dimensiones de los camiones a considerar).
- Ancho de curva: 38 m
- Radio de curvatura: 40 m

**Paso 3. Modelamiento de horas y cocadas de rotación.**

Según los procedimientos de buenas prácticas operativas del caso de estudio, se señala que los neumáticos de posición 1 y 2 (delanteros), después de unas determinadas horas de desgaste (objetivo de modelamiento), deben pasar a las posiciones 3 y 4 (traseras) y en las horas finales a las posiciones 5 y 6 (traseras), tomando en cuenta un remanente de banda de al menos el 15 % de medida (mm).

Para el presente artículo, se considera como ejemplo el caso del modelamiento en la etapa final de los neumáticos (posición 5 y 6). Teniendo las siguientes fórmulas:

$$Hx = Td \times (Ci - Cx) \dots (1)$$

$$Hy = Tt \times (Cx - Cy) + Hx \dots (2)$$

$$Cf = Ci - (Ci \times 85\%) \dots (3)$$

$$Hf \approx \frac{1}{Cf} \dots (4)$$

Fuente: Elaboración propia.

Donde:

- Ci: Medida de cocada inicial (posiciones 1 y/o 2) en mm, variable que depende de la medida del neumático.
- Cx: Medida de cocada para cambio a posiciones 3 y/o 4 en mm, variable que depende de la medida del neumático.
- Hx: Horas para cambio a posiciones 3 y/o 4 en h.
- Cy: Medida de cocada para cambio a posiciones 5 y/o 6 en mm, variable que depende de la medida del neumático.
- Hy: Horas para cambio a posiciones 5 y/o 6 en h.
- Cf: Medida de cocada para el desecho en mm.
- Hf: Horas para desecho (h).
- Td: Tasa de desgaste en posiciones delanteras (h/mm).
- Tt: Tasa de desgaste en posiciones traseras (h/mm).

Este caso de modelamiento es muy similar para el modelamiento de las horas en las posiciones 3 y 4. El objetivo es calcular

mediante modelamiento las horas exactas a las que deben de cambiarse los neumáticos en las distintas posiciones.

A continuación, se tiene la tabla 5 que muestra el resultado del modelamiento de horas de rotación, teniendo los parámetros calculados de las horas de rotación, por consiguiente, las horas de duración de los neumáticos según su medida.

Tabla 5  
Horas nominales de rotación en neumáticos

Medida	Modelamiento		
	Horas totales (1 y 2)	Horas totales (3 y 4)	Horas desde 5 y 6 hasta cumplimiento
40.00R57	2800	4600	7680
53/80R63	1968	3850	5810
59/80R63	1328	3500	5080

Fuente: Elaboración propia.

### Modelo de TKPH de neumático más grande

Se tienen los siguientes parámetros de referencia [5]:

- Dimensión: 59/80R63

- Marca: Modelo A
- TKPH según catálogo: 1590 (TKPH)
- Velocidad según catálogo: 20 km/h
- Carga según catálogo: 100 toneladas
- Modelo: 360 TM
- Temperatura ambiente promedio: 15 °C
- Cantidad de ciclos: 810
- Tiempo total: 30 días
- Promedio: 10,996 km(s) 1 min, 18,7 km/h

### Modelo de condiciones físicas de camión

Para este modelo, se considerará el empleo de tuberías HDP como alternativa de solución para el cuidado de neumáticos. Las tuberías HDPE son accesorios que se tienen naturalmente o se pueden incorporar en las tolvas de los camiones, con el fin de retener las rocas restantes de las sobrecargas de los equipos de carguío (palas neumáticas). En campo, se ha identificado que las rocas que caen en las partes laterales del camión pueden generar corte profundo en la banda de rodamiento debido al giro rápido en el área de carguío de parte del operador de camión.

$$NT \text{ HDPE} = NC \times 2 \text{ (1 por lado)}$$

NT: Número de tuberías

NC: Número de camiones sin tubería

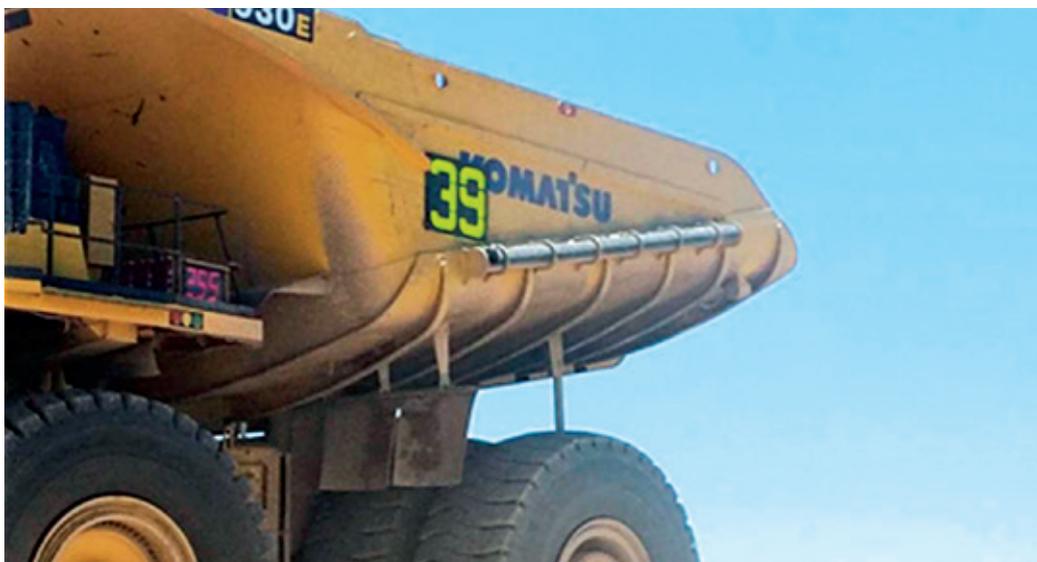


Figura 6. Tubería HDPE en parte lateral de camión.  
Fuente: [4]

### Evaluación de la aplicación del modelo matemático en la gestión de los neumáticos OTR

Como se había señalado previamente, mediante el gráfico de Ishikawa, se tienen los siguientes factores establecido para el modelamiento:

#### a) Factores internos al neumático

##### a.1) Factor de presión de inflado de neumático (PI)

Para empezar a modelar el factor de presión de inflado del neumático (en PSI), se requiere definir la frecuencia a la que

será medido dicho factor por semana. Se ha establecido dicha frecuencia tomando en consideración las buenas prácticas realizadas por empresas contratistas sobre el mantenimiento de neumáticos en campo. Para ello, se presenta la tabla 6.

Tabla 6  
Número de veces que se mide la presión por semana del neumático (FPI)

Neumático - Frecuencia normal	2
Neumático - Frecuencia regular	3
Neumático - Frecuencia óptima	4

Fuente: Elaboración propia.

Dicha frecuencia permite calcular el promedio de presión de inflado por la vida útil (PPI).

$$PPI = \frac{\sum \text{presiones medidas (PSI)}}{FPI \times \text{Vida nominal}} \dots (5)$$

Fuente: Elaboración propia.

Tomar en cuenta que, para la sumatoria de presiones medidas en PSI, este modelo restringe solo la sumatoria para todas las mediciones de presión en frío o todo en caliente. No aplica la sumatoria variada de presiones frío y caliente.

El factor para convertir la presión de inflado de frío a caliente es aproximadamente un valor de 1,2 (fórmula PIC = PIF X 1,2). Esta fórmula es resultado de experiencias y prácticas operativas en campo, tomando en cuenta que se emplea como parámetro por empresas contratistas como Neuma, entre otros [4].

Tabla 7  
Relación PPI y PI

PPI	PI
0,9 PEI	0,90
0,8 PEI	0,75
0,7 PEI	0,50
1,1 PEI	0,95
1,2 PEI	0,90
1,3 PEI	0,80

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 7 ha sido creada según la metodología de interpolación y extrapolación para la asignación de valores numéricos a los equivalentes de PPI. Se ha tomado en cuenta, además, los resultados de experiencias y prácticas operativas en campo, tomando en cuenta que se emplea como parámetro por empresas contratistas [4].

La interpretación es de la siguiente manera: si el promedio de presión de inflado por la vida útil representa en algún caso el 90 % de la presión estándar de inflado (PEI), el factor de presión de inflado equivalente será 0,9, de manera sucesiva para los otros factores.

### a.2) Factor de rotación de neumático (RO)

Para realizar el modelamiento, se han establecido dos variables importantes: «x» que es la tasa de desgaste de neumáticos según posición; «y» que es el incremento o decremento de vida útil. Las variables «x» y «y» se han tomado en función de las muestras (medidas y marcas de neumáticos) de campo [4].

Para este factor, se adjunta un ejemplo de modelamiento para una medida y marca específico.

Tabla 8  
Modelo matemático de rotación del neumático

Modelo	59/80R63	59/80R63
Marca	A	B
<b>Caso optimización</b>		
Diferencia entre óptimo y nominal (h)	500	500
Diferencia entre óptimo y nominal %	9,09	9,09
Tasa de desgaste 1 y 2 (mm/día)	0,20	0,20
Tasa de desgaste 3 y 4 (mm/día)	0,53	0,53
Tasa de desgaste 5 y 6 (mm/día)	0,553	0,55
<b>Caso nominal</b>		
Diferencia entre óptimo y nominal (h)	0	0
Diferencia entre óptimo y nominal %	0,00	0,00
Tasa de desgaste 1 y 2 (mm/día)	0,27	0,27
Tasa de desgaste 3 y 4 (mm/día)	0,58	0,58
Tasa de desgaste 5 y 6 (mm/día)	0,47	0,47
<b>Caso pérdida</b>		
Diferencia con nominal (%)	-420	-420
Diferencia con nominal %	-7,64	-7,64
Tasa de desgaste 1 y 2 (mm/día)	0,37	0,37
Tasa de desgaste 3 y 4 (mm/día)	0,49	0,49
Tasa de desgaste 5 y 6 (mm/día)	0,55	0,55

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9  
Modelo matemático de rotación del neumático

<b>Escenarios</b>	
Caso óptimo (%)	9,09
Caso nominal (%)	0
Caso pérdida (%)	-7,64
<b>Tasa de desgaste:</b>	
Posición 1 y 2	0,20
Caso óptimo (h/mm)	0,27
Caso nominal (h/mm)	0,37
Caso perdida (h/mm)	

Fuente: Elaboración propia.

**a.3) Factor TKPH (TH)**

Para el caso del TKPH, existe el valor nominal que se especifica en las guías de empresas fabricantes, estas empresas consideran temperaturas relativas de neumáticos de 38 °C y condiciones que no superan los 5 km de longitud de ruta de acarreo. Por otro lado, existe el TKPH real que puede ser superior o inferior al nominal dependiendo de los factores K1 (factor que considera la longitud de ruta de acarreo) y K2 (factor temperatura).

Para este caso, a más de 5 km, el factor K1 empieza a aumentar hasta llegar a un valor de K igual a 1,23 (para 50 km de ruta de acarreo).

Para el caso del factor K2, se tiene la siguiente fórmula:

$$K_2 = \frac{V_m + (0,25x(T_a - T_r))}{V_m} \dots (6)$$

Donde [5]:

Tr: Es temperatura relativa del neumático (38°)

Ta: Temperatura ambiente

Vm: Velocidad media en km/h

Por experiencia en campo, el factor de la temperatura (fórmula anterior) altera menos que el factor por longitud por ruta de acarreo, por ende, para la presente investigación, solo se ha considerado necesario establecer la relación de K1 con el factor TKPH.

Tabla 10  
Relación L (km) y valor K1

L (km)	L (ml)	K1	L (km)	L (ml)	K1	L (km)	L (ml)	K1
			11	6,8	1,13	21	13	1,19
			12	7,4	1,14	22	13,7	1,19
			13	8	1,15	23	14,3	1,20
			14	8,7	1,16	24	14,9	1,20
5	3,1	1,00	15	9,3	1,16	25	15,5	1,20
6	3,7	1,04	16	9,9	1,17	26	16,2	1,20
7	4,3	1,06	17	10,6	1,17	27	16,8	1,21
8	5	1,09	18	11,2	1,18	28	17,4	1,21
9	5,6	1,10	19	11,8	1,18	29	18	1,21
10	6,2	1,12	20	12,4	1,19	30	18,6	1,21

L = Longitud del ciclo en kilómetro y en millas.

Fuente: [8]

Tabla 11  
Relación L (Km) y valor K1

L (km)	L (ml)	K1	L (km)	L (ml)	K1	L (km)	L (ml)	K1
21	13	1,19	31	19,3	1,21	41	25,5	1,23
22	13,7	1,19	32	19,9	1,21	42	26,1	1,23
23	14,3	1,20	33	20,5	1,22	43	26,7	1,23
24	14,9	1,20	34	21,1	1,22	44	27,3	1,23
25	15,5	1,20	35	21,7	1,22	45	28	1,23
26	16,2	1,20	36	22,4	1,22	46	28,6	1,23
27	16,8	1,21	37	23	1,22	47	29,2	1,23
28	17,4	1,21	38	23,6	1,22	48	29,8	1,23
29	18	1,21	39	24,2	1,22	49	30,4	1,23
30	18,6	1,21	40	25	1,22	50	31	1,23

Fuente: [8]

**b) Factores externos al neumático**

b.1) Factor de condición de vía (CV)

Los factores de condición de vía se señalan continuación:

b.1.1) Zona de carga y descarga (CD)

Las zonas de carga y descarga, dependiendo del caso de estudio, pueden relacionar el número de daños por neumático y su influencia con la pérdida de vida útil (%) que se detalla a continuación. Para este caso, se ha optado en encontrar una relación directa entre ambos parámetros según experiencias de prácticas operativas.

Tabla 12  
Influencia de zona de carga y descarga

Ruta	Cálculo n.º de daños por neumático	Pérdida de vida útil porcentaje
Carga - chancadora	10 %	10 %
Carga - botadero	10 %	10 %
Depósito de stock	7 %	7 %
Ruta	Cálculo n.º de daños por neumático	Pérdida de vida útil porcentaje
Equipo de carguío mineral	30 %	30 %
Equipo de carguío desmonte	40 %	40 %
Botadero	10 %	10 %
Depósito de stock	3 %	3 %

Fuente: [3]

b.1.2) Geometría (GE)

La geometría de la vía está vinculada con el rendimiento del neumático, los problemas relacionados por este factor afectan en los impactos en los flancos, lo cual, es un tipo de daño muy común. Para esta investigación, se han considerado dos vías características de caso de estudio.

**Vía de doble camino**

La siguiente tabla es resultado de un cálculo de ancho total de ruta de acarreo tomando en cuenta las fórmulas de diseño de mina a tajo abierto.

Ancho de vía = (3 x Ancho) + Ancho de base de berma

Fuente: D.S 024 – 2016 – EM.

Tabla 13  
Influencia de doble camino

Camión	Ancho camión (m)	Altura de neumático (m)	Ancho total ruta de acarreo (m)
220 tm	7,680	3,500	30,007
220 tm	7,240	3,500	28,687
290 tm	8,300	4,300	33,459
360 tm	9,755	4,600	38,422

Fuente: Elaboración propia.

**Vía con un solo camino**

La siguiente tabla es resultado de un cálculo de ancho total de ruta de acarreo tomando en cuenta las fórmulas de diseño de mina a tajo abierto.

Ancho de vía = (2 x Ancho) + Ancho de base de berma

Fuente: D.S 024 – 2016 – EM.

Tabla 14  
Influencia de un solo camino

Camión	Ancho camión (m)	Altura de neumático (m)	Ancho total ruta de acarreo (m)
220 tm	7,680	3,500	22,327
220 tm	7,240	3,500	21,447
290 tm	8,300	4,300	25,159
360 tm	9,755	4,600	28,667

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 15  
Relación de altura de neumático y ancho de ruta

Doble carril			
Altura de neumático (m)	Ancho ruta de acarreo (m)	Relación ancho/altura (AN/AR)	Vida útil neumático (H)
3,5	30,007	0,117	7000
4,3	33,459	0,129	6000
4,6	38,422	0,120	5500

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 16  
Relación de altura de neumático y ancho de ruta

Un solo carril			
Altura de neumático (m)	Ancho ruta de acarreo (m)	Relación ancho/altura (AN/AL)	Vida útil neumático (H)
3,5	22,327	0,157	7000
4,3	25,159	0,171	6000
4,6	28,667	0,160	5500

Fuente: Elaboración propia.

En las tablas 15 y 16, si AN/AL es menor de los valores establecidos, en consecuencia, se trata de anchos con mayores dimensiones. Lo que no se debe tener son relaciones mayores a las establecidas, ya que su significado sería que se tienen anchos menores, lo cual, para ese tipo de neumáticos, causaría el desgaste de su vida útil.

b.1.3) Pendiente (PD)

Tabla 17  
Velocidades KPH

Velocidad media camión	KPH
Cargado en pendiente	22
Cargado en plano	33
Vacío en pendiente	29
Vacío en plano	36

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 18  
Relación vida de neumático vs. pendiente

% vida plano	% vida pendiente 5 %	% vida pendiente 10 %	% vida pendiente 12 %	velocidad KPH
105	95	85	81	8,05
100	90	80	76	16,09
95	85	75	71	24,14
88	78	68	64	32,19
82	72	62	58	40,23
74	64	54	50	48,28
65	55	45	40	56,33
55	45	35	31	64,37
50	40	30	26	72,42

Fuente: Elaboración propia.

Las tablas 17 y 18 se referencian de los cálculos de campo [4].

b.1.4) Peralte (PL)

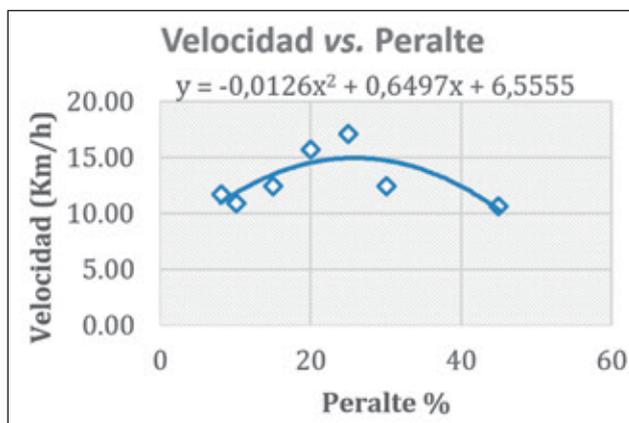


Figura 7. Relación entre velocidad y peralte.  
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 19  
Vida en función a peralte vs. porcentaje de peralte

Vida útil en función a peralte	% peralte
0,69	11,70
0,62	10,92
0,72	12,36
0,92	15,66
1,00	17,08
0,72	12,36
0,62	10,62

Fuente: Elaboración propia.

Se ha establecido, por referencias bibliográficas, la referencia entre velocidad de rodado y el peralte al cuál se realiza el transporte. Esta relación permite relacionar con la vida útil en función del peralte [4].

b.1.5) Mantenimiento y limpieza de vías (M)

**Nivelación de piso de pala**

- Suelo nivelado 0 % de pérdida de vida útil (1,00 de factor).
- Suelo nivelado hasta 30 % de pérdida vida útil (0,70 de factor).

**Riego de vías**

- Riego intermitente 0 % de pérdida de vida útil (1,00 de factor).
- Riego excesivo en ruta de acarreo 10 % de pérdida de vida útil (0,90 de factor).

Los anteriores valores son resultado de prácticas operativas en unidades mineras y caso de estudio [4].

b.1.6) Factor de flota de equipos auxiliares (AUX)

Uno de los principales factores a considerar es la compatibilidad de la cantidad de equipos auxiliares con las necesidades de soporte para la construcción y mantenimiento de vías de rutas de acarreo.

Los resultados de cálculo señalado son consecuencia del caso de estudio mencionado previamente, es importante ajustar el modelo a las necesidades de mina.

Tabla 20  
Factor de vida útil de neumático: caso motoniveladora

Factor vida útil neumático	(n.º de motoniveladora) (Puntos de carguío)
0,6	0,18
0,8	0,27
0,9	0,36
1	0,45
1,2	0,55

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 21  
Factor de vida de neumático vs. factor tractor

Factor vida útil neumático	(n.º de tractor) (Puntos de carguío)
0,5	0,55
0,7	0,73
0,8	0,82
0,9	1,09
1	1,27
1,3	1,45

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 22  
Factor de vida útil vs. número de rodillo

Factor vida útil neumático	(n.º rodillo) (Puntos de carguío)
0,8	0,00
1	0,18
1,3	0,36

Fuente: [4]

El factor de equipos de servicios auxiliares se calcula:

$$\frac{(v. \text{ útil motoniveladora} + v. \text{ útil tractor} + v. \text{ útil rodillo})}{3}$$

b.2) Factor de mantenimiento de equipo (HDPE)

- Incorporación de tubos HDPE: 1,0
- Sin incorporación de tubos HDPE: 0,7

b.3) Factor influencia del operador (OP) [4]

- Operador con experiencia y cultura de cuidado de neumático: 1,25.
- Operador con regular experiencia: 1.
- Operador con regular experiencia y sin cultura de cuidado de neumáticos: 0,80 – 1.
- Operador con poca experiencia y sin cultura de cuidado de neumático: 0,75.

**RESULTADOS**

**Factor PI**

Es importante señalar que, en la presente investigación, se presentarán gráficos de funciones lineales y cuadráticas que representarán el modelamiento entre los factores influyentes vs. parámetros inherentes de la operación minera que serán especificados a medida que se detalle la metodología.

Para este caso, se tiene la figura 8 que relaciona el factor de presión de inflado vs. la presión estándar de inflado.

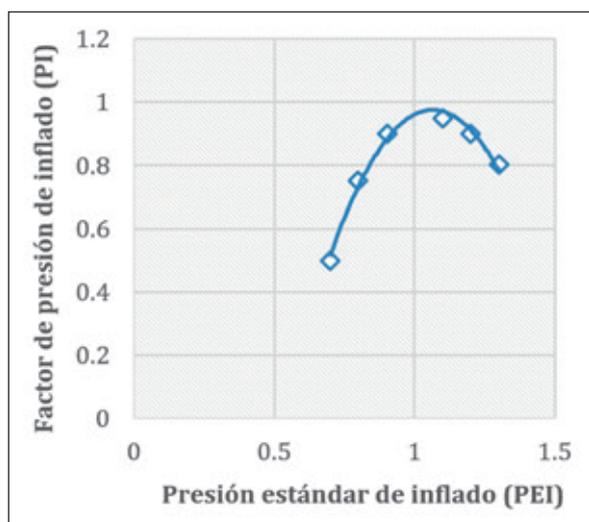


Figura 8. Relación de factor de presión de inflado vs. presión estándar de inflado.  
Fuente: Elaboración propia.

Se tiene los siguientes resultados

$$FPI = -3,44PPIF^2 + 7,33PPIF - 2,93 \dots (7)$$

**Factor RO**

En la tabla 23, se presentan los resultados del modelamiento de rotaciones de neumáticos por posiciones. Tomar en cuenta que en cada casillero se puede observar el modelo matemático lineal o cuadrático según la medida y marca.

Tabla 23  
Modelo matemático de rotación del neumático

Neumático	Rotación 1 y 2 (Y)	Rotación 3 y 4 (Y)	Rotación 5 y 6 (Y)
59/80R63			
Marca A	-99,9x + 28,236	-7373,9x2 + 8025,4x - 2171,7	29798x2 - 30392x + 7702,3
Marca B		9378,1x2 - 20025x2	
53/80R63			
Marca A		- 7749x + 1597,5	+ 7589x - 3859,5
Marca B		10150x2 - 8391,9x + 1731	-5361,7x2 + 4505,9x - 942,76
40.00R57			
Marca B		2026,4x2 - 1310,1x + 174,65	140616x2 - 123451x + 27023
Marca A		-8274,3x2 + 3139,4x - 282,36	-2306,3x2 + 1235,4x - 151,59

Donde:  
X: Tasa de desgaste de neumáticos según posición  
Y: % de incremento o decremento de vida útil  
Fuente: Elaboración propia.

El factor de rotación es equivalente a «100 + Y» o «100 - Y» (dependiendo si hay incremento o decremento de vida útil). Para considerarlo en fórmula general, se debe convertir a parte decimal.

$$RO = (100 + Y) / 100; RO = (100 - Y) / 100 \dots (8)$$

**Factor TH**

Para el factor TH, se ha establecido un modelo de TH = 1 - (K1 - 1), debido a que, si se excede los 5 km de longitud de acarreo, ese factor K1 tendrá un intervalo de incremento que irá desde 0 a 0.23. Se ha establecido previamente, por aspectos operativos, considerar solo K1 [4].

**Factor GE**

Para doble carril

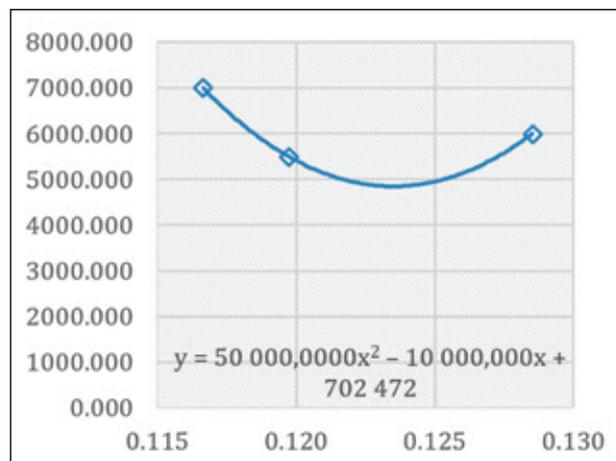


Figura 9. Relación AN/AL vs. vida útil.  
Fuente: Elaboración propia.

Se tiene el siguiente modelo cuadrático, el cual es:

$$y = 50\,000\,000x^2 - 10\,000\,000x + 702\,472 \text{ (Doble vía)}$$

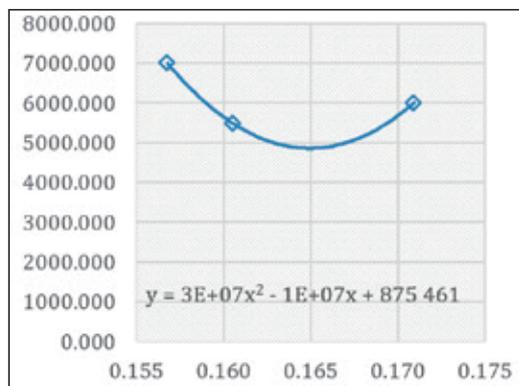


Figura 10. Relación AN/AL vs. vida útil.  
Fuente: Elaboración propia.

Se tiene el siguiente modelo cuadrático, el cual es el siguiente:

$$y = 30\,000\,000x^2 - 10\,000\,000x + 875\,461 \text{ (Sola vía)}$$

**Factor PD**

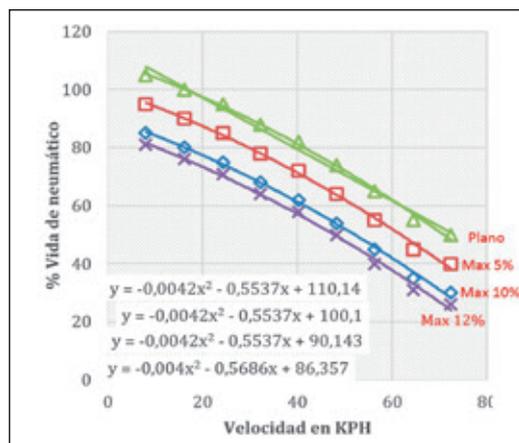


Figura 11. Relación porcentual de vida útil vs. velocidad.  
Fuente: Elaboración propia.

**Factor PL**

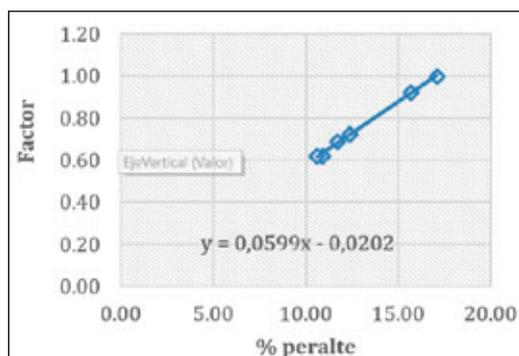


Figura 12. Factor vs. influencia de peralte.  
Fuente: Elaboración propia.

**Factor AUX**

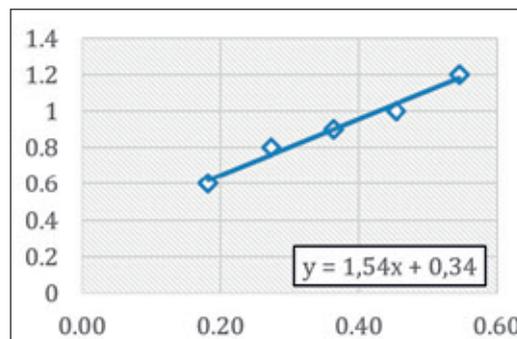


Figura 13. Número de motoniveladoras / punto de carga vs. factor de vida útil.  
Fuente: Elaboración propia.

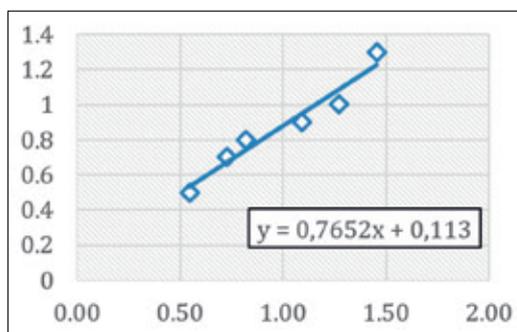


Figura 14. Número de tractores / punto de carga.  
Fuente: Elaboración propia.

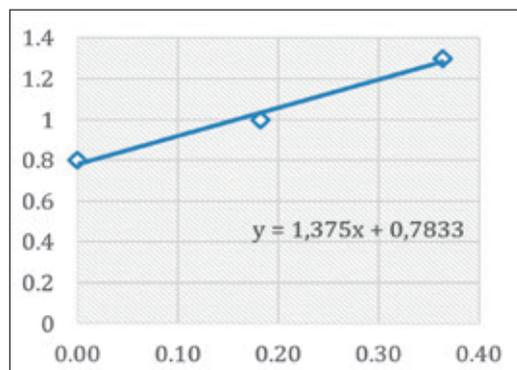


Figura 15. Número de rodillos / puntos de carga.  
Fuente: Elaboración propia.

**Fórmula de aplicación**

Una vez presentados los resultados, se tiene la fórmula final.

**Factores internos (I)**

$$I = \frac{PI + RO + TH}{3}$$

**Factores externos (E)**

$$E = \frac{CD + GE + PD + PL + M + AUX + HDPE + OP}{8}$$

**Modelamiento de gestión de neumáticos: (I x E)**

Tabla 24  
Calificación de gestión en función del valor I x E

Calificación	Valor (I x E)
Gestión óptima	1,20 – 1,29
Gestión buena	1,10 – 1,19
Gestión regular	1,00
Gestión deficiente	0,90 – 0,99
Gestión muy deficiente	0,80 – 0,89

Fuente: Elaboración propia.

Para la aplicación en caso de estudio, se tienen los siguientes datos y resultados:

Tabla 25  
Parámetros y factores de modelamiento de caso de estudio

Parámetros y factores	Valores
Medida	59/80R63
Presión (PSI)	105
Temperatura (C°)	20 – 65
Horas de rotación 1 y 2	1328
Horas de rotación 3 y 4	3500
Horas de rotación 5 y 6	5080
Cocada inicial (mm)	144
FPI (Frecuencia normal)	2
Presión de inflado 1	110
Presión de inflado 2	104
Vida nominal (h)	5080
PPI (promedio de presión de inflado)	107
PI (Factor de presión de inflado)	0,97
Tasa de desgaste 1 y 2 ( mm/ día)	0,27
Tasa de desgaste 3 y 4 ( mm/ día)	0,58
Tasa de desgaste 5 y 6 (mm/día)	0,47
% de incremento de vida útil	1,26
% de incremento de vida útil	2,45
% de incremento de vida útil	0,44
RO (factor de rotación de neumático)	1,01
Longitud máxima de ruta (Km)	8
K1 Factor influyente en TKPH	1,09
TH (factor TKPH)	1,09
Influencia zona de carga y descarga	-0,1
CD (factor zona carga y descarga)	0,9
Camión de 360, ancho total (m)	38,422
Relación (AN/AL)	0,16
GE (factor de Geometría)	0,84
Velocidad máxima (KPH)	16
Pendiente (%)	12
PD (factor pendiente)	0,76
Peralte	17
PL (factor peralte)	1
Suelo nivelado y riego intermitente	1
M (factor mantenimiento y limpieza de vías)	1
Factor de n.º de motoniveladora / punto de carguío	0,36
Factor de n.º de tractor / punto de carguío	1,09
Factor de n.º de rodillo / punto de carguío	0,18
Factor vida útil por motoniveladora	0,9
Factor vida útil por tractor	0,9
Factor vida útil por rodillo	1
AUX (factor de flota de equipos auxiliares)	0,93
HDPE (factor mantenimiento de equipo)	0,7
OP (factor influencia del operador)	0,9
I (factores internos)	1,02
E (factores externos)	0,88
modelo de gestión de neumáticos	0,90

Fuente: Elaboración propia.

Se tiene el siguiente resultado final de la gestión:

Tabla 26  
Gestión deficiente con oportunidades de mejora

Calificación	Valor (I x E)
Gestión óptima	1,20 – 1,29
Gestión buena	1,10 – 1,19
Gestión regular	1
<b>Gestión deficiente</b>	<b>0,90 – 0,99</b>
Gestión muy deficiente	0,80 – 0,89

Fuente: Elaboración propia.

**CONCLUSIONES**

- Se ha comprobado que el diagrama de Ishikawa permite identificar los factores influyentes de un problema, como es el caso de la gestión de neumáticos OTR.
- Se ha podido justificar, en el presente artículo, la importancia de un modelo de gestión de neumáticos OTR para la optimización del acarreo en mina.
- La aplicación del modelamiento permitió aplicar modelos matemáticos de regresión lineal y cuadrático.
- Se ha desarrollado el modelamiento de factores internos y externos, a su vez, se aplicó al caso de estudio teniendo valores de 1,02 y 0,88 respectivamente.
- El modelo de gestión de neumáticos está representado por el producto de los factores internos y externos, teniendo para el caso de aplicación un valor de 0,90 como gestión deficiente con oportunidad de mejoras según la tabla 26.
- La aplicación de un modelo en la gestión de neumáticos OTR, permite hacer visible las oportunidades de mejora, así como hacer una evaluación cuantitativa y cualitativa.

**REFERENCIAS**

- [1] Chávez, J. (2013). Gestión de neumáticos OTR. *Seminario de neumáticos gigantes en unidad minera de Cerro Verde. Universidad Nacional San Agustín de Arequipa.*
- [2] Chepillo, N. y Jaime, A. (2003) *Mejoramiento de caminos y accesos en mina escondida* [Tesis de grado], Universidad de Santiago de Chile.
- [3] Delgado, R. (2014) Estadística de reporte y daños de neumáticos OTR 2014 enero a junio. Mina Toquepala.
- [4] Delgado, R. (2014) *Estudio de factores influyentes en la vida útil de neumáticos para una gestión estratégica en*

*mina a tajo abierto de cobre 2014*. [Tesis de grado], Universidad Nacional San Agustín de Arequipa.

- [5]** Michelin. (2013) *Análisis de TKPH camión 67*. Informe de Michelin.
- [6]** Michelin Informaciones (s. a.). *Manual de Técnicas para Minería y Obra Civil*.
- [7]** Mora, A. (2011) *Factores influyentes en la vida útil de llantas de camiones Komatsu 930E fuera de carretera en la mina a tajo abierto* [Tesis de grado]. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.
- [8]** Paredes, C. (2008) *Eficiencia en tiempo de vida de neumáticos con relación a rotación de posiciones 01y 02 en Volquetes Komatsu 930E4* [Tesis de grado]. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima. Recuperado de [http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/859/1/paredes\\_sc.pdf](http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/859/1/paredes_sc.pdf)
- [9]** Tafur, R. (2005) *La Tesis Universitaria*. Lima: Mantaro.
- [10]** Tejada, Á. (2014) *Metodología del cambio de posiciones 1 y 6 de neumáticos gigantes 793-D, para incrementar la vida útil y reducir costos en SM Cerro Verde – Arequipa* [Tesis de grado]. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.

## ACERCA DEL AUTOR

### Roberto Delgado Alemán

Ingeniero de minas de la Universidad Nacional de San Agustín. Egresado de la maestría en Gestión en Seguridad, Salud y Medio Ambiente en Minería por la Universidad Nacional de Huancavelica y Cámara Minera del Perú. Diplomatura en Minería Superficial: Planeamiento, Diseño y Optimización de Operaciones unitarias por Cámara Minera Del Perú. Ha participado en el curso Comité Paritario de Seguridad y Salud para la prevención de Accidentes APA Chile. Posee experiencia en la supervisión y la gestión de despacho en operaciones mineras a tajo abierto. Asimismo, ha supervisado la seguridad y la salud ocupacional en el entorno minero e industrial; es catedrático en Tecsup Sede Sur.

@ rdelgadoa@tecsup.edu.pe

@ rodeal@hotmail.es

Recibido: 18-06-19    Revisado: 20-07-29    Aceptado: 24-07-19



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NonComercial 4.0 Internacional.



CEPADE  
UNIVERSIDAD  
POLITÉCNICA  
DE MADRID

La primera  
escuela de negocios  
vía Internet en español



Impartimos formación de posgrado a distancia en la modalidad *online*, con valor oficial reconocido por SUNEDU.



### Calidad académica

La Universidad Politécnica de Madrid está presente en los principales rankings nacionales e internacionales:

- QS World University Ranking
- Scimago Institutions Ranking
- Times Higher Education World University Ranking



### Programa acumulativo de créditos

Puedes cursar programas base, experto y de especialización acumulando créditos que te permitirán obtener hasta un máster.

# PAEP

Programas de Alta  
Especialización Profesional

Especialízate en Tecsup y conviértete en un experto en gestión y aplicación de tecnología industrial.

- ELECTRICIDAD Y ELECTRÓNICA
- TECNOLOGÍA DIGITAL Y GESTIÓN
- MINERÍA Y SEGURIDAD
- MECÁNICA

## BENEFICIOS



Sesiones prácticas orientadas al desarrollo de casos reales aplicados a la industria.



Docentes expertos nacionales e internacionales.



Networking con profesionales de diversos sectores.

### CONVERSEMOS

- ▶ Melissa Chang
- 📞 939 117 042
- 📞 938 105 348

Los resultados experimentales revelaron que **el tratamiento de acción conjunta del método Singlete, complementado con la coagulación y floculación, fue el más efectivo para para obtener un efluente clarificado** con un contenido de cianuro que cumple con la normativa ambiental y sirve para recircular el agua y reutilizarla en los procesos de la planta metalúrgica.



## Evaluación experimental del tratamiento de efluentes cianurados de una minera aurífera por el método de Taguchi

### *Experimental Evaluation of the Treatment of Cyanide Effluents from a Gold Mining Company by the Taguchi Method*

#### RESUMEN

Las plantas metalúrgicas que procesan minerales auríferos emplean soluciones de cianuro para disolver el oro que estos contienen. Así, generan efluentes de relaves contaminados cuya disposición final ocasiona impactos ambientales severos a los ecosistemas acuáticos si estos no se tratan previamente.

La nocividad ambiental de estos efluentes depende directamente del tipo y de la concentración de los agentes químicos que acarrea, de los cuales el cianuro constituye el más representativo y perjudicial para el ambiente.

El objetivo de este estudio es determinar el efecto de las variables proporcionadas por el uso de varios tipos de reactivos químicos y su tiempo de reacción, empleados en cuatro métodos de tratamiento por oxidación avanzada, aplicados para obtener un efluente clarificado con un contenido de cianuro total que cumpla no solo la normativa ambiental, sino también para poder recircular el agua y reutilizarla en los procesos de la planta metalúrgica.

El diseño experimental aplicado en esta investigación se realiza con el enfoque de Taguchi usando una matriz ortogonal  $L_{16}(4^3)$  y un análisis de varianza (Anova) para identificar el efecto de los parámetros sobre las variables de respuesta. Los resultados experimentales revelaron que el tratamiento de acción conjunta del peróxido de hidrógeno al 70 % y del hipoclorito de sodio al 10 % (método Singlete), complementado con la coagulación y floculación, fue el más efectivo para lograr el objetivo propuesto. El resto de los tratamientos evaluados fue relativamente menos efectivos.

#### ABSTRACT

*Metallurgical plants processing gold minerals use cyanide solutions to dissolve gold contained in these minerals, generating effluents from contaminated tailings whose final disposal causes severe environmental impacts to aquatic ecosystems if they are not previously treated.*

*The environmental harmfulness of these tailings effluents depends directly on the type and concentration of the chemical agents they carry, of which cyanide is the most representative and harmful to the environment.*

*The objective of this study is to determine the effect of the variables provided by the use of various types of chemical reagents and their reaction time, used in four methods of treatment by advanced oxidation, applied to obtain a clarified effluent with a total cyanide content that complies not only with the environmental regulations but also to be able to recirculate the water and reuse it in the processes of the metallurgical plant.*

*The experimental design applied here is done with the Taguchi approach using an orthogonal matrix  $L_{16}(4^3)$  and analysis of variance (ANOVA) to identify the effect of the parameters on the response variables. The experimental results revealed that the joint action treatment of 70 % hydrogen peroxide and 10 % sodium hypochlorite (Singlet method), supplemented with coagulation and flocculation was the most effective to achieve the proposed objective. The rest of the treatments were relatively less effective to achieve it.*



#### Palabras clave

Diseño de experimentos, método de Taguchi, relación señal / ruido (S/N), Anova, límites máximos permisibles, oxidación avanzada.

#### Key words

Design of experiments, Taguchi method, signal-to-noise ratio (S/N), Anova, maximum permissible limits, advanced oxidation.

## INTRODUCCIÓN

Las empresas mineras auríferas que actualmente operan en nuestro país realizan labores de explotación, tanto a tajo abierto como de socavón. Así, generan relaves mineros como pasivos ambientales, tanto lodos como clarificados.

La presente investigación está enmarcada en el tratamiento del agua clarificada obtenida en el sedimentador que recibe el lodo en la etapa previa del circuito de decantación en contracorriente (CCD). Para ello, deberá tener una concentración de cianuro total menor de 1,0 mg/L, según el límite máximo permisible (LMP) estipulado en el anexo 1 del DS 010-2010-MINAM (ver tabla 1).

Tabla 1  
Ley n.º 28611, Ley General del Ambiente

Parámetro	Unidad	Límite en cualquier momento	Límite para el promedio anual
pH		6 - 9	6 - 9
Sólidos totales en suspensión	mg/L	50	25
Aceites y grasas	mg/L	20	16
Cianuro total	mg/L	1	0.8
Arsénico total	mg/L	0,1	0,08
Cadmio total	mg/L	0,05	0,04
Cromo hexavalente(*)	mg/L	0,1	0,08
Cobre total	mg/L	0,5	0,4
Hierro (disuelto)	mg/L	2	1,6
Plomo total	mg/L	0,2	0,16
Mercurio total	mg/L	0,002	0,0016
Zinc total	mg/L	1,5	1,2

Anexo 1, DS 010-2010-MINAM. Límites máximos permisibles para descargas de efluentes de actividades minero-metalúrgicos. Ley n.º 28611 (21 de agosto de 2010).

Fuente: [4]

Los objetivos de la presente investigación son los siguientes:

- Aplicar el diseño de experimentos (DOE) a los datos obtenidos siguiendo el método de Taguchi para planificar y evaluar el estudio experimental del tratamiento del agua clarificada, y determinar cuál es el óptimo.
- Obtener una solución clarificada con una concentración de cianuro total menor de 1,0 mg/L para recircularla y cumplir con el DS 010-2010-MINAM.
- Encontrar el tratamiento de oxidación avanzada más viable, técnica y económicamente, para el agua clarificada, *overflow* de la separación sólido-líquido del relave de pulpa proveniente de la última etapa de la decantación contracorriente.

de usar por otros profesionales [7] El enfoque de Taguchi para el diseño de experimentos es fácil de adoptar y aplicar por usuarios con un conocimiento no especializado de estadística; de ahí que ha ganado una gran popularidad en la comunidad científica y de ingeniería. Consiste en identificar la función objetivo que se debe optimizar, así como los factores de control y sus niveles. Para realizar el experimento, se selecciona un arreglo matricial.

## 2. Términos empleados en el diseño de experimentos (DOE)

- **Respuesta DOE.** Es el resultado medible, el cual estamos interesados en mejorar.
- **Factores DOE.** Son todas las variables analizadas en el DOE.
- **Niveles DOE.** Son los valores concretos que utilizaremos por cada factor.

Así, un análisis factorial de 4<sup>3</sup> significa 3 factores de proceso y 4 niveles para cada uno, lo cual implicaría realizar 64 pruebas. Sin embargo, según el arreglo ortogonal de Taguchi, que se muestra en la tabla 2, se debe ejecutar solo 16 pruebas experimentales (L<sub>16</sub>).

## FUNDAMENTOS

### 1. El método de Taguchi

Los métodos de diseño experimental se desarrollaron en los primeros años del siglo xx y han sido ampliamente estudiados por los estadistas desde entonces, pero no fueron fáciles

Tabla 2  
Extracto de la Tabla de selección de arreglos ortogonales de Taguchi

Numbers of Parameters (P)	Numbers of Levels		
	2	3	4
2	L4	L9	L16
3	L4	L9	L16
4	L8	L9	L16
5	L8	L18	L16
6	L8	L18	L32
7	L8	L18	L32
8	L12	L18	L32

Fuente: [8]

Taguchi especificó tres situaciones estándar de características de calidad [7]:

- «Cuanto más grande, mejor» (por ejemplo, fuerza y rendimiento).
- «Cuanto más pequeño, mejor» (por ejemplo, contaminación).
- «Nominal es lo mejor» (por ejemplo, dimensión).

El diseño del experimento (DOE) requiere una planificación, que consiste en seleccionar los factores a estudiar, seleccionar el diseño experimental, establecer los niveles para cada factor, y analizar y examinar el resultado, donde se determina la significación de los parámetros mediante un análisis de varianza (Anova) [3].

Taguchi ha utilizado la relación señal/ruido (S/N) como la característica de calidad elegida. La relación S/N se utiliza como valor medible en lugar de la desviación estándar debido a que, a medida que disminuye la media, también disminuye la desviación estándar.

### 3. Tratamiento de agua del efluente

El cianuro es un anión monovalente diatómico que se encuentra libre o anexado a metales formando complejos. Por ello, se pueden distinguir tres tipos principales:

- **Cianuro libre.** Es el cianuro en forma de anión monovalente  $CN^{1-}$  o ácido cianhídrico acuoso (HCN).
- **Cianuro WAD (weak acid dissociable).** Son complejos formados por metales de transición y cianuro relativamente disociables (incluyen Cd, Cu, Ni y Zn).
- **Cianuro SAD (strong acid dissociable).** Son cianuros que forman complejos fuertes con metales de transición disociables con ácido fuerte o de complejos estables (con metales como Fe, Co, Ag y Au), es decir, son disociables bajo acidez extremas (pH muy bajos) debido a la estabilidad de dichos complejos.

En la figura 1, se puede apreciar que, en el uso del cianuro en solución, se debe mantener el pH por encima de 9 para evitar la

formación del cianuro de hidrógeno (HCN). Este, al liberarse como gas, es muy peligroso, ya que es tóxico. En la misma gráfica, se nota que la oxidación del cianuro lo transforma en cianato. Esto nos indica que los tratamientos de oxidación avanzada del cianuro, primero, se deben aplicar a pH básicos por encima de 9. Además, se requiere oxidación para transformarlo en cianato, que es una especie más estable y menos peligrosa; más aún, porque se hidroliza y se convierte en amonio y carbonato [1].

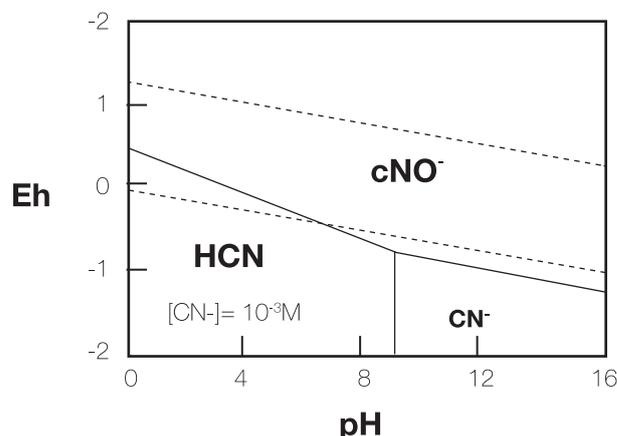


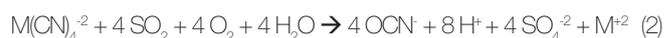
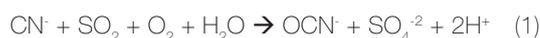
Figura 1. Diagrama de Pourbaix del cianuro.  
Fuente: [2]

A continuación, presentaremos los métodos de oxidación más importantes para la remoción de cianuro en efluentes y pulpas, con el propósito de que, más adelante, se entiendan la metodología de investigación aplicada y la discusión de los resultados obtenidos:

#### 3.1. Método INCO de oxidación

El proceso INCO ( $SO_2$  con aire) para oxidación de cianuro fue introducido en 1994 después de que la empresa INCO (International Nickel Company) obtuvo la patente canadiense original. Este método se expandió rápidamente debido a que se adaptaba a diversos escenarios de pH, la concentración de cianuro, la dosificación de  $SO_2$ , la concentración de los metales cobre y hierro en solución y otros aniones como  $SCN^-$  y  $S_2O_3^{2-}$ , la viscosidad y la transferencia de oxígeno [6].

El cianuro libre y el cianuro WAD se oxidan a cianatos en presencia de dióxido de azufre y el aire utilizando como catalizador cobre soluble, de acuerdo con las siguientes reacciones:



En donde M es un metal; por ejemplo, Cu, Ni o Zn.

El inconveniente radica en la complejidad de la generación, del almacenamiento, de la manipulación y de la agresividad química del  $SO_2$  gaseoso que impacta en la salud de los trabajadores y en el medioambiente en general. Por ello, se prefiere utilizar una sustancia (preferentemente una sal) que pueda formar  $SO_2$  cuando esté disuelta en el agua. Estas sales pueden ser sulfito (por ejemplo:  $Na_2SO_3$ ), bisulfitos (por ejemplo:  $NaHSO_3$ ) y metabisulfitos (por ejemplo:  $Na_2S_2O_5$ ).



El SO<sub>2</sub> generado reacciona con el cianuro y el oxígeno, según lo indicado en las ecuaciones 1 y 2. La temperatura en el rango entre 5 °C y 60 °C no muestra cambios significativos en la cinética química. Además, de acuerdo con la estequiometría, cada gramo de cianuro WAD requiere 2,46 g de SO<sub>2</sub> para oxidarse. Sin embargo, en la práctica, el uso real fluctúa entre 3 y 5 g, siempre que no haya otros contaminantes como los metales pesados y tiocianatos. Para ello, se deben realizar las pruebas experimentales correspondientes.

### 3.2. Oxidación avanzada con el método de oxígeno singlete (O°)

La formación de este radical oxígeno singlete se genera por la reacción de hipoclorito ClO<sup>-</sup> (generalmente de calcio o sodio) y peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>). Lo interesante de este método es que, a diferencia de otros tratamientos de oxidación, no dejará cloro residual que pueda formar cloraminas o trihalometanos. Estos son subproductos contaminantes del uso del cloro o hipoclorito, ya que la dosificación de peróxido de hidrógeno es superior a la de ion hipoclorito. Por ello, el único residual que se producirá será de ion cloruro, el cual es inactivo. La ecuación de la formación del radical oxígeno singlete es la siguiente:



Es uno de los métodos de oxidación avanzada más moderno. Se caracteriza porque, a diferencia de los otros métodos, el oxidante formado en el mecanismo no es el radical hidroxilo OH\*, sino que el agente oxidante por excelencia es el radical singlete, que es un radical de oxígeno en forma de O°.

Al comparar su solubilidad en agua, así como su fuerza oxidante expresada como potencial estándar de reducción, se puede deducir su gran aplicabilidad en la oxidación de cianuro (ver tabla 3).

Tabla 3  
Cuadro comparativo de la capacidad oxidante y de disolverse en agua

Oxidantes	Potencial de reducción (E°) en voltios	Solubilidad en agua, comparando con la del O <sub>2</sub>
Peróxido de hidrógeno	1,87 mv	> 1 000 000
Oxígeno	1,20 mv	10
Cloro	1,50 mv	10
Ozono	2,20 mv	10 000
Singlete Oxygen	2,90 mv	> 1 000 000

Fuente: Elaboración propia.

## METODOLOGÍA

### Desarrollo y evaluación experimental de los datos

En el contexto de las etapas y las condiciones mencionadas de la planta, podemos decir que el experimento pasó por las siguientes fases:

#### A) Diseño del experimento

Para evaluar los factores que afectan el proceso, se utilizó la metodología de diseño experimental según el enfoque de Taguchi, con el diseño de matriz ortogonal. Se empleó la matriz ortogonal L<sub>16</sub> (4<sup>3</sup>), que requiere tres factores de proceso y cuatro niveles, la cual se presenta en la tabla 4.

Tabla 4  
Dosificación por método y tiempo de reacción aplicado en la detoxificación del agua clarificada del decantador

Niveles	Factores		
	Peróxido mL/L	Catalizador (mL/L)	Tiempo (min)
1	3,13	0	0
2	3	CuSO <sub>4</sub> .5H <sub>2</sub> O	5
3	0,9	NaClO	10
4	3,35	FeSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	15

Fuente: Elaboración propia.

Los parámetros o factores de proceso seleccionados para este experimento fueron la dosificación del peróxido H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, del catalizador CuSO<sub>4</sub>.5H<sub>2</sub>O, del hipoclorito de sodio NaClO y del catalizador FeSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O, indicada por las columnas respectivas en la tabla de matriz ortogonal. El experimento consta de 16 pruebas (cada fila en la matriz ortogonal L<sub>16</sub>), y las columnas se asignaron con los parámetros. El resultado experimental a estudiar es el rendimiento de las muestras de prueba y las observaciones se transforman en una relación señal/ruido (S/N). Se calcula como la transformación logarítmica de la función de pérdida, tal como se muestra a continuación:

$$S/N = -10 \log (1/n \sum (Y_i^2)) \quad (5)$$

Donde n es el número de observaciones y Y<sub>i</sub> es el valor medido del rendimiento. Se sugiere que las características de calidad se optimicen cuando la respuesta S/N sea «cuanto más pequeño, mejor».

#### B) Caracterización del efluente

Para ello, se reproducen las pruebas a escala de laboratorio con muestras de pulpa proveniente del CCD de una planta minera aurífera, con énfasis en el overflow obtenido en el clarificador, que es caracterizado. En promedio, reporta un contenido de cianuro total de 98 mg/L.

### C) Aplicación de cuatro métodos de oxidación avanzada

Se emplea en múltiples ensayos a escala de laboratorio (batch), con los que se determina la óptima dosificación de químicos para lograr que el cianuro total llegue por debajo de 1 mg/L. Los métodos aplicados se designan con las letras A, B, C y D de la siguiente manera:

- **Método A.** Oxidación avanzada solo con peróxido de hidrógeno al 70 %, complementado con coagulación y floculación.
- **Método B.** Oxidación avanzada con peróxido de hidrógeno al 70 % y sulfato cúprico al 5 % como catalizador, complementado con la coagulación y floculación.
- **Método C.** Oxidación avanzada por el método singlete, es decir, con peróxido de hidrógeno al 70 % e hipoclorito al 10%, complementado con la coagulación y floculación.
- **Método D.** Oxidación avanzada con peróxido de hidrógeno al 70 % y sulfato ferroso al 5 % como catalizador, complementado con la coagulación y floculación.



Figura 4. Lodos generados en el proceso.  
Fuente: Elaboración propia.

Las dosis de los reactivos químicos usados aparecen en la tabla 4. Se mantiene constante la dosificación del coagulante y floculante preparados al 10 % y 0,10 %, respectivamente, propios del proceso de decantación de la planta.



Figura 2. Resultado de la oxidación avanzada.  
Fuente: Elaboración propia.

## RESULTADOS

Los valores experimentales de rendimiento y los valores calculados de la relación S/N para una respuesta dada para los 16 conjuntos de experimentos se muestran en la tabla 5, con uso del MINITAB 18®.

Tabla 5  
Matriz ortogonal L16 con las 16 pruebas y las relaciones S/N (REL SR1) respectivas

Peróxido	Catalizador	Tiempo	Resultado	REL SR1
0,90	0	0	98,0	-39,8245
0,90	CuSO <sub>4</sub>	5	13,1	-22,3454
0,90	NaClO	10	5,2	-14,3201
0,90	FeSO <sub>4</sub>	15	2,0	-6,0206
3,00	0	5	23,6	-27,4582
3,00	CuSO <sub>4</sub>	0	98,0	-39,8245
3,00	NaClO	15	0,5	6,0206
3,00	FeSO <sub>4</sub>	10	11,8	-21,4376
3,13	0	10	2,6	-8,2995
3,13	CuSO <sub>4</sub>	15	0,1	20,0000
3,13	NaClO	0	98,0	-39,8245
3,13	FeSO <sub>4</sub>	5	44,5	-32,9672
3,35	0	15	0,3	10,4576
3,35	CuSO <sub>4</sub>	10	1,6	-4,0824
3,35	NaClO	5	28,8	-29,1878
3,35	FeSO <sub>4</sub>	0	98,0	-39,8245

Fuente: Elaboración propia.



Figura 3. Resultado de la coagulación – floculación.  
Fuente: Elaboración propia.

El experimento 7 dio el mayor rendimiento y tuvo la mayor relación S/N. La relación entre el rendimiento del hipoclorito de sodio y la relación S/N observada en otros experimentos muestran una tendencia similar.

### Análisis de la variación para el rendimiento

El resultado del análisis de varianza (Anova) con el MINITAB 18® sobre la producción de rendimiento se muestra en la tabla 6. Este análisis se lleva a cabo a un nivel de significación del 5 %, que equivale a un nivel de confianza del 95 %. Aquí se muestra que tanto el uso del hipoclorito de sodio como reactivo y el tiempo de agitación son los parámetros más importantes del proceso que influyen en el rendimiento.

Tabla 6  
Anova de las relaciones S/N

Análisis de varianza de relaciones SN						
Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	MC Ajust.	F	P
Peróxido	3	38,0	38,0	12,67	0,48	0,706
Catalizador	3	384,1	384,1	128,02	4,89	0,047
Tiempo	3	17583,8	17583,8	5861,25	223,92	0,000
Error residual	6	157,1	157,1	26,18		
<b>Total</b>	<b>15</b>	<b>18162,9</b>				

Fuente: Elaboración propia.

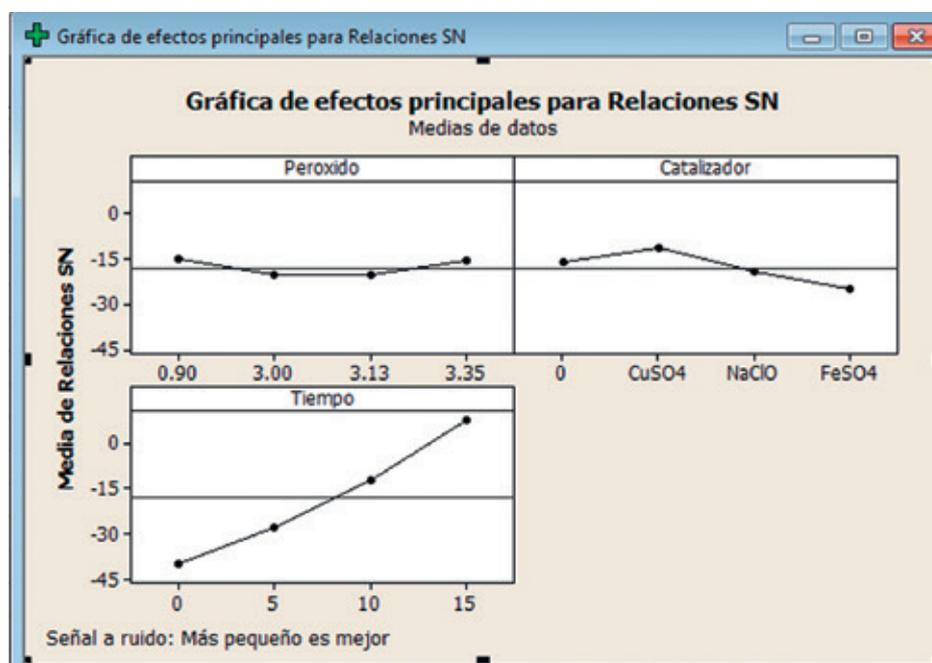


Figura 5. Efectos principales para las relaciones S/N.  
Fuente: Elaboración propia.

## CONCLUSIONES

Se empleó el método de Taguchi, que utilizó un conjunto de matrices ortogonales para realizar 16 experimentos, un número menor que los 64 que usa el diseño factorial ( $4^3 = 64$ ) para los ensayos experimentales aplicados al tratamiento del agua clarificada obtenida en el sedimentador de la planta. Además, se realizó una prueba Anova para analizar sistemáticamente la importancia relativa de cada parámetro experimental en el logro del objetivo de bajar el contenido de cianuro total a menos del 1 mg/L.

De los resultados del estudio, con el enfoque de Taguchi «Cuanto más pequeño, es mejor», se extraen las siguientes conclusiones:

- Según el método de Taguchi, los parámetros de influencia se encuentran en el orden de 0,9 mL/L del peróxido  $H_2O_2$  y 0,16 mL/L del hipoclorito de sodio NaClO, y con un tiempo de agitación de 15 minutos, lo que produce un rendimiento máximo.
- De manera similar, los resultados de la prueba Anova muestran que el tiempo de agitación y el hipoclorito de sodio NaClO tienen la mayor influencia estadística en el rendimiento en un 96,8 % y 2,11 %, respectivamente.
- El valor P, en la prueba de Anova para el hipoclorito, y del tiempo de agitación dan como resultado valores menores de 0,05, con lo que se confirma su influencia en el rendimiento del proceso.

**REFERENCIAS**

- [1]** Díaz, D., y Condori, I. (2010). *Proceso de detoxificación de soluciones cianuradas usando el método INCO en efluentes mineros* (Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería). Recuperado de <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/1020>
- [2]** Domic, E. (2001). *Hidrometalurgia. Fundamentos, procesos y aplicaciones*. Santiago de Chile: Concejo Minero de Chile.
- [3]** Hafeez, K., Rowland, H., Kanji, G., e Iqbal, S. (2002). Design optimization using ANOVA. *Journal of Applied Statistics*. 29(6), 895-906.
- [4]** Ley n° 28611-Ley General del Ambiente Diario, Recuperado de <http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2013/06/ley-general-del-ambiente.pdf>
- [5]** Logsdon, M., Hagelstein, K., y Mudder, T. (2001). *Manejo del cianuro en la extracción del oro*. Ottawa: Consejo Internacional de Metales y Medioambiente.
- [6]** Padilla, F., Vargas, C., y Colpas, F. (2000). Degradación de cianuro en aguas residuales provenientes de la actividad minera del municipio de San Martín de Loba empleando métodos de oxidación química. Recuperado de <http://blade1.uniquindio.edu.co/uniquindio/eventos/siquia/siquia2005pap3.pdf>
- [7]** Phadke, M. (1989). *Quality Engineering Using Robust Design*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall.
- [8]** Roy, R. (2001). *Design of experiments using the Taguchi approach: 16 steps to product and process improvement*. John Wiley & Sons Inc.: New York.

**ACERCA DE LOS AUTORES**

**Enrique Cáceres Aguinaga**

Ingeniero metalúrgico por la Universidad de Lima, con maestría en Ciencias Ambientales por la Universidad Nacional Agraria La Molina-UNALM, especializado en Gestión de la Calidad Total con beca de AOTS en Tokio (Japón). Tiene amplia experiencia en el sector industrial y metalúrgico. Ha sido docente en la Universidad de Lima, y es docente-consultor en el Departamento de Minería y Procesos Químico-Metalúrgicos de Tecsup y docente del diplomado en Sistemas Integrados de Gestión en la UNMSM. Ha sido consultor de gestión de riesgos de desastres para Welthungerhilfe - Comisión Europea a través de la ONG Kallpa.

 [ecaceres@tecsup.edu.pe](mailto:ecaceres@tecsup.edu.pe)

**Huguez Enrique Ames Ramírez**

Ingeniero químico egresado de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, perteneciente al Colegio de Ingenieros del Perú, y magíster en Educación por la Universidad de Piura. Tiene experiencia en la industria química y metalúrgica, sobre todo, ha ejercido su actividad profesional en diversas empresas dedicadas al tratamiento de aguas. Ha sido docente en la Universidad Nacional Agraria La Molina, la Universidad Nacional Continental de Huancayo, entre otras; así como autor de diversos textos y compendios de cursos universitarios. Ha sido consultor del Ministerio de Educación en currículo, evaluación y materiales de enseñanza. Actualmente, es coordinador de la carrera de Procesos Químicos y Metalúrgicos en Tecsup Lima. Asimismo, trabaja como consultor técnico en una reconocida empresa dedicada al tratamiento de aguas y de efluentes industriales.

 [hames@tecsup.edu.pe](mailto:hames@tecsup.edu.pe)

Recibido: 30-05-19    Revisado: 20-06-19    Aceptado: 09-07-19



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.

**Las mayores concentraciones de partículas sedimentables fueron encontradas en la dirección noreste y sureste de la zona industrial de Zárate (SJL), principalmente, debido a la influencia de la dirección de viento del sur y oeste de la zona metropolitana de Lima.**



## Dependencia del material particulado en aire respecto a parámetros meteorológicos en la localidad de Zárate (SJL)

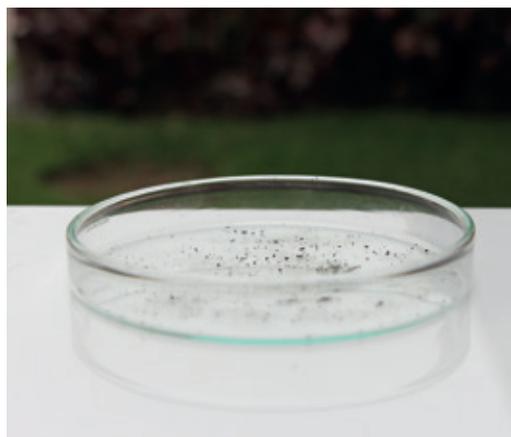
### *Dependence of the Particulate Material in the Air with Respect to Meteorological Parameters in the Town of Zarate (SJL)*

#### RESUMEN

El objetivo del estudio fue evaluar la concentración de partículas sedimentables (PS) y concentración de metales pesados (Pb, Cu y Zn) en la zona de Zárate industrial, distrito de San Juan de Lurigancho en Lima. Asimismo, se analizó la relación de las concentraciones encontradas (PS y metales pesados) con los principales parámetros meteorológicos locales tales como temperatura, humedad relativa, dirección y velocidad del viento. Se establecieron cuatro estaciones de monitoreo y las muestras fueron colectadas mediante el método pasivo durante los meses de septiembre y octubre del año 2018. Los resultados obtenidos indicaron altas concentraciones de PS con valores de 9,16 y 6,12 mg/cm<sup>2</sup> al mes y altos contenidos de metales pesados al norte de la zona de estudio, llegando a superar los estándares nacionales e internacionales para zonas residenciales, fue evidente la influencia ejercida por los parámetros meteorológicos evaluados sobre la concentración de PS. Es necesario continuar investigando sobre la asociación de este material y su relación con partículas finas como PM10, PM2.5, la presencia de metales en suelos y la identificación de fuentes.

#### ABSTRACT

*The objective of this study is to evaluate the concentration of sedimentary particles (SP) and the concentration of heavy metals (Pb, Cu, and Zn) in the industrial Zarate zone, district of San Juan de Lurigancho (Lima). Additionally, it was analyzed the relationship between the concentrations (SP and heavy metals) and the main local meteorological parameters. Four monitoring stations were established and the samples were collected by the passive method during September and October of 2018. Results obtained indicate high SP concentrations with values of 9.16 and 6.12 mg / cm<sup>2</sup> per month and high heavy metals contents, at the north of the study area. These were higher when compared with other national and international standards for residential zones, is evident the influence of the meteorological parameters on the concentration of PS. It is necessary to make future investigations on the relationship between this and fine particles such as PM10, PM2.5, the presence of metals in soils and sources identification.*



#### Palabras clave

Partículas sedimentables, parámetros meteorológicos, metales pesados, rosas de viento, humedad relativa.

#### Key words

Sedimentable particles, meteorological parameters, heavy metals, wind roses, relative humidity.

## INTRODUCCIÓN

Las emisiones de material particulado de fuentes industriales y la explotación de fuentes naturales representan, actualmente, una importante contribución a la contaminación de los suelos. Estas partículas atmosféricas, usualmente partículas sedimentables (PS), se depositan sobre la superficie tanto por deposición seca como por deposición húmeda [26]. En la deposición seca, las PS impactan directamente, por gravedad, sobre el suelo o superficie de agua; mientras que la disolución o suspensión de aerosoles y gases en cristales de hielo o gotas de agua, son características de la deposición húmeda [6]. Sin embargo, a pesar de que las partículas de gran tamaño contribuyen mayoritariamente a la deposición seca, estas aún no fueron caracterizadas en estudios previos [8]. Además, se cree que las PS representan un bajo riesgo a la salud cuando son comparados con aerosoles (< 50 µm) y partículas finas (< 3 µm) [12], es decir, estas partículas sedimentables representan principalmente una importante fuente de perturbación y/o molestia [27]. Debido a su alta velocidad de sedimentación, estas sedimentan muy cerca de su punto de origen, antes de ser transportadas por el viento hacia zonas más alejadas [4].

Respecto a la metodología de medición de PS, resulta ser muy simple y de bajo costo, pero es capaz de caracterizar el material particulado del aire; a pesar de la limitada información en la determinación de contaminantes y efectos a la salud, esta es relevante para determinar la presencia de contaminantes, tales como los metales pesados, en las plantas y suelos, principalmente por efectos de deposición [5]. La deposición de metales pesados sobre las plantas ocasiona alteración del funcionamiento de algunas enzimas, alteración de las propiedades ópticas de las hojas y disturbios de las fotosíntesis [14] [19]. Asimismo, los PS pueden depositarse sobre materiales, edificios y construcciones, produciendo decoloración y descomposición de materiales [19]. De acuerdo con Brookes, las PS, luego de depositarse en el suelo, pueden permanecer en él por algunos cientos de años [7]. En este contexto, los factores meteorológicos juegan un rol importante, especialmente en la distribución del material particulado y con el de otros contaminantes como los metales pesados.

En esta investigación, se analizó la relación de los parámetros meteorológicos, la concentración de metales pesados (Pb, Cu, Zn) y de partículas sedimentables, en cuatro estaciones de muestreo meteorológicas, en los meses de septiembre y octubre de 2018, meses representativos de las estaciones de invierno y

primavera austral, con la finalidad de establecer una línea de base en un sector ciudadano con fuerte influencia industrial.

## FUNDAMENTOS

La presencia de actividad industrial en zonas urbanas ha generado altas tasas de deposición de PS [20]. Esta es causada, principalmente, por el rápido y desorganizado crecimiento de las grandes ciudades de países en vías de desarrollo, como Egipto, Irán, China e India, donde se ha encontrado elevados niveles de metales pesados [2] y en este contexto, la ciudad de Lima ha emergido en esta década como una megaciudad con 10 millones de habitantes y una creciente actividad industrial que viene comprometiendo la calidad de aire.

En el caso del área metropolitana de Lima y Callao (AMLC), considerada por la OMS, como una de las ciudades más contaminadas en el mundo [25], debido a la coexistencia de comercio, fábricas, colegios y zonas residenciales, se cuenta con un plan de desarrollo urbano metropolitano (PLAM 2035), que incluye ese gran número de fábricas, principalmente industriales, textiles y metálicas, localizadas en los distritos de San Juan de Lurigancho (S JL) y Huachipa [18].

La existencia de tales fuentes de emisión requiere con urgencia identificar las zonas urbanas que sufren un mayor impacto por la inmersión de este material particulado y de metales. El método aplicado en la búsqueda de las distribuciones de estos agentes contaminantes resultó relativamente sencillo, por la recolección de muestras por deposición seca, húmeda y total. Esto ha permitido la identificación de Pb, Cu y Zn dentro de otros como Al, Fe y Na [6]. Asimismo, valores altos de PS han sido relacionados con la presencia de actividades industriales en el interior de grandes ciudades en Brasil [20], mientras que la variabilidad espacial de la concentración de metales traza y las fuentes emisoras en una zona específica ha sido vinculada con la variabilidad de las condiciones climáticas del lugar [26] definiendo la calidad del aire.

En este contexto, existen diversos estándares internacionales respecto al PS, tal como se muestra en la tabla 1, que según el método de muestreo puede expresarse en mg/cm<sup>2</sup> por mes o µg/m<sup>3</sup> [16]. Como se observa, Perú presenta estándares más rigurosos que a la fecha no puede ser cumplidos por la escases de información sobre la distribución relacionada entre el material particulado y la presencia de metales pesados.

Tabla 1  
Normativa nacional e internacional referente a los PS y metales pesados en suelos

País / entidad	PS mg /cm <sup>2</sup> mes	Metal	Uso agrícola (mg/kg)	Uso residencial (mg/kg)	Uso comercial (mg/kg)	Uso industrial (mg/kg)	Admisible en suelo (mg/kg)
<b>OMS</b>	0,5	Pb					25
<b>México</b>	260*	Pb	400	400	400	800	
		Cu	63	63	91	91	
<b>Ecuador</b>	1	Pb	100	100	150	150	
		Zn	200	200	380	380	
<b>Perú</b>	0,5	Pb	70	140	800	800	

\*Expresado en µg/m<sup>3</sup> x 24 h [16].  
Fuente: [1] [10] [11] [21] [22]

**METODOLOGÍA**

**Muestreo**

El muestreo de las PS se realizó mediante el método pasivo durante 30 días consecutivos, por dos meses, con la finalidad de acumular la masa particulada suficiente para medirla en el laboratorio. Las muestras fueron recolectadas en placas de Petri (10 cm de diámetro). Previamente a la instalación de las placas, estas fueron limpiadas y, posteriormente, con ayuda de una paleta, se sembró una capa fina de vaselina uniformemente esparcida.

Para la determinación del peso de la placa, peso y concentración de las PS, se emplearon las siguientes fórmulas [9]:

$$W_{inicial} = W_{placa} + W_{vaselina} \tag{1}$$

$$W_{final} = W_{placa} + W_{vaselina} + W_{PS} \tag{2}$$

$$\Delta W = W_{PS} = W_{final} - W_{inicial} \tag{3}$$

$$C = \frac{\Delta W \times 30}{A_p \times \text{días de exposición}} \tag{4}$$

Donde:

- W = Masa en miligramos (mg)
- $\Delta W$  = Variación de masa en miligramos (mg)
- $W_{PS}$  = masa de las partículas sedimentables.
- $A_p$  = área de placa en centímetros cuadrados.
- C = Concentración de las PS (mg/cm<sup>2</sup>. 30 días).

**Estaciones meteorológicas y de muestreo**

Se instalaron 4 estaciones: A, B, C y D, cuyas ubicaciones se muestran en la tabla 2. Paralelamente, igual número de estaciones meteorológicas fueron instaladas, realizando lecturas diarias de velocidad, dirección del viento, temperatura, y humedad relativa. Las estaciones usadas en este estudio (de la marca Conrad Electronic SE, modelo WS1080) fueron previamente calibradas por INMETRO.

Tanto el muestreo como los análisis se realizaron por triplicada a fin de minimizar el error experimental.

El presente estudio se realizó en un área específica ubicada en el distrito de SJL, llamada «Zarate Industrial», donde se ha observado gran presencia de industrias, zonas residenciales y colegios. La zona de estudio es presentada en la figura 1.

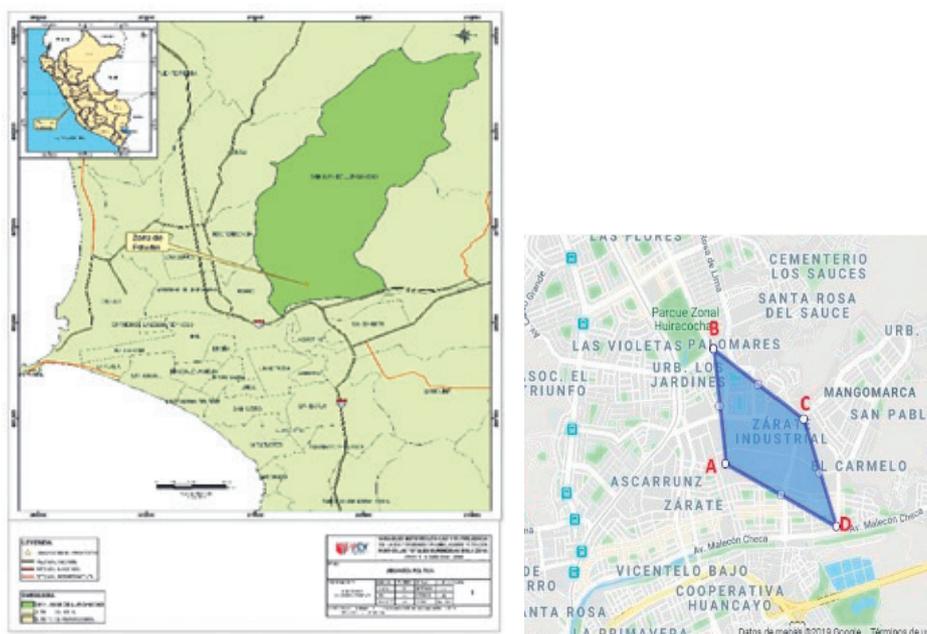


Figura 1. Ubicación de zona de estudio y puntos de recolección de muestras, Zarate industrial, distrito de San Juan de Lurigancho, Lima, Perú.  
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2  
Ubicación de las estaciones de monitoreo, Zarate industrial, SJL, Lima

	Código	Días de monitoreo	Este	Norte	Altitud
Hidrostal	A	01/09/2018 - 30/10/2018	282510	8670308	394
Av. Tusilagos	B	01/09/2018 - 30/10/2018	282396	8671561	626
Colegio Pamer	C	01/09/2018 - 30/10/2018	283385	8670791	375
Av. Pajaten	D	01/09/2018 - 30/10/2018	283764	8669860	337

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 2 muestra las 4 estaciones de muestreo en torno a la zona de estudio, las cuales cubrieron la zona más industrializada de Zárate en San Juan de Lurigancho, donde no existe un ordenamiento territorial adecuado, sino una improvisación de sitios productivos y servicios, así como de áreas residenciales.

### Análisis de metales

Las muestras recolectadas en las placas de Petri fueron pesadas y digestadas (HNO<sub>3</sub>). Posteriormente, se prepararon patrones para cada metal y se analizaron por absorción Atómica (Thermo Electron Corp. S Series, GFS97), en el laboratorio de contaminación ambiental y recursos marinos, de la Universidad Nacional Federico Villarreal.

PS se presentaron en los puntos C (colegio) y D (avenida y zona residencial). Asimismo, las mayores concentraciones de metales pesados se presentaron en los puntos A (industria) y B (avenida, zona residencial) respectivamente. Todos los valores de concentración de PS son superiores a los presentados por el Ministerio de Salud, el cual reportó concentraciones de PS para SJL de 1,15 mg/cm<sup>2</sup> por mes [17]. Con relación al contenido metálico, destaca las altas concentraciones de Zn, en todos los puntos de monitoreo, superando el umbral de 1500 mg/kg, que finalmente alcanza a depositarse en el suelo convirtiéndolo en un suelo extremadamente contaminado. Según la normativa internacional [13], el contenido de plomo y cobre excedió la normativa nacional e internacional para zonas residenciales, e incluso superó los estándares para zonas industriales, según la normativa ecuatoriana. El punto E, ubicado en la frontera oeste del distrito (fuera del área de Zárate industrial), presenta igualmente altas concentraciones de PS y metales. En este estudio, no se evidenció una relación entre la concentración de PS y la concentración de metales; sin embargo, se infiere que las fuentes de emisión de la zona industrial de Zárate tienen un mayor impacto en las zonas en torno a los puntos A y B, donde se presentaron las mayores concentraciones de metales, mientras que los altos valores de PS en los puntos C y D se explicaron por la cercanía a las avenidas de alto tránsito vehicular y a la posible resuspensión de polvo del suelo (punto C, Av. las Lomas y D, Av. Malecón Checa).

## RESULTADOS

### Deposición y contenido metálico

Los resultados de la deposición de partículas sedimentables, expresada en mg/cm<sup>2</sup> por mes, se presentan en la tabla 3.

Los valores encontrados en todos los puntos de monitoreo exceden el estándar nacional e internacional para PS; además, se observó que las más altas concentraciones de

Tabla 3  
*Deposición de partículas sedimentables y metales pesados*

Estación y mes de monitoreo	mg/ cm <sup>2</sup> por mes	Pb (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Zn (mg/kg)
Estación: A				
Sept.	1,19	453,68	390,52	2852,70
Octubre	1,98	390,5	288,3	2573,9
Estación: B				
Sept.	1,22	453,75	416,59	3008,98
Octubre	1,24	340,24	284,64	2985,92
Estación: C				
Sept.	9,16	45,35	136,89	1006,30
Octubre	9,70	51,82	121,69	914,64
Estación: D				
Sept.	4,3	182,5	117,7	1339,2
Octubre	6,12	192,46	127,06	1403,31

Fuente: Elaboración propia.

### Dirección y velocidad del viento

Los resultados de la elaboración de rosas de viento en cada una de las estaciones de monitoreo son presentados en la figura 2, para cada punto de monitoreo (A-D). El análisis de las rosas de viento refleja que, en los puntos de monitoreo, el viento tiene componente SO (suroeste), predominando vientos débiles y moderados en todas las estaciones, excepto en la estación D, donde se observó alta frecuencia de vientos de 11 m/s, probablemente, debido a la proximidad de la estación

al río Rímac. Los resultados se asemejan a lo reportado por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (Senamhi) en los meses de agosto y octubre de 2018 [23 -24].

Las mayores concentraciones del PS encontradas en las direcciones noreste y sureste (C y D) se atribuyen a la predominancia de los vientos de la dirección oeste y sur de la zona de estudio. El efecto de la dirección del viento y la concentración de PS también fue reportado por Alkas (2016) [3].

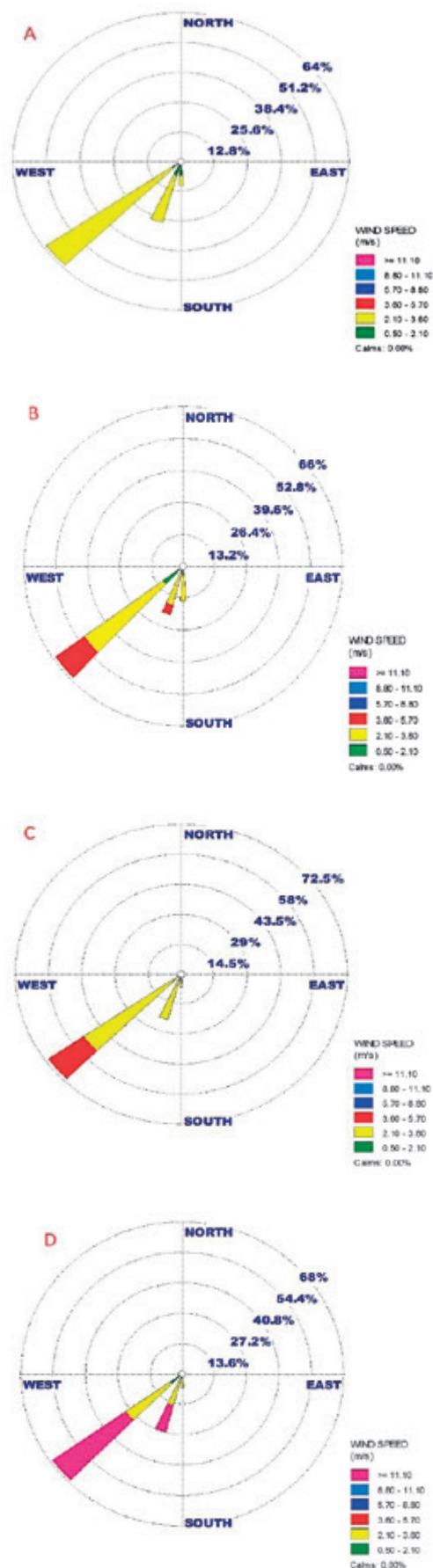


Figura 2. Rosas de viento, estaciones de monitoreo A hasta E. Fuente: Elaboración propia.

### Temperatura y humedad relativa

En la figura 3, se presentan los valores obtenidos de la estación meteorológica sobre temperatura y humedad relativa en octubre y noviembre de 2018. Se observa que, en octubre, hubo un incremento de la humedad relativa, así como una disminución de temperatura, con respecto a septiembre del mismo año.

Los valores de octubre tanto de temperatura como de humedad son similares a los reportados por Senamhi para el distrito de SJL [24]. Además, reportó un aumento en los registros de las precipitaciones, en octubre, esto repercute en los mayores valores de PS, registrados en este mes, principalmente por deposición húmeda. El efecto de la humedad relativa y temperatura en las precipitaciones fue también reportado por Mawonike y Mandonga (2017) [15]. Consecuentemente, las condiciones meteorológicas de temperatura y humedad se relacionan con la deposición de PS tal como fue registrado por otros estudios [26].

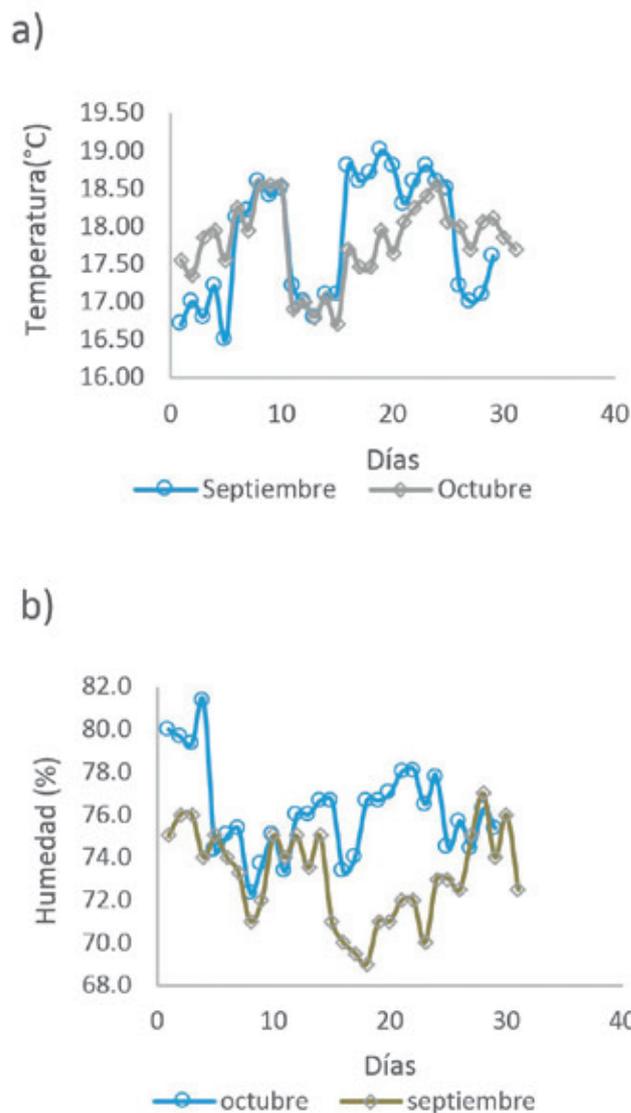


Figura 3. a) Temperatura y b) Humedad relativa meses de septiembre y octubre de 2018. Fuente: Elaboración propia.

## CONCLUSIONES

- Las mayores concentraciones de PS fueron encontradas en la dirección noreste y sureste de la zona industrial de Zárate, principalmente, debido a la influencia de la dirección de viento del sur y oeste de la zona metropolitana de Lima. Estas se reportaron en octubre, debido a la influencia de precipitaciones, relacionado por un incremento de humedad relativa y disminución de temperatura.
- No se encontró una relación entre la concentración de PS y la presencia de metales Pb, Cu y Zn, se recomienda realizar estudios de presencia de metales en suelos, particularmente por presencia de Zn, debido a los altos valores encontrados en este estudio.

## REFERENCIAS

- [1] Alegría, C., & Gessella, Y. (2010). *Evaluación química toxicológica de plomo en suelo de Lima Metropolitana*. (Tesis de licenciatura). Recuperado de <http://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/cybertesis/1621>
- [2] Ali, M. H., & Al-Qahtani, K. M. (2012). Assessment of some heavy metals in vegetables, cereals and fruits in Saudi Arabian markets. *The Egyptian Journal of Aquatic Research*, 38(1), 31-37.
- [3] Alkas, D. (2016). A Case Study for the Assessment of Settleable and Suspended Particulate Material in Sand and Gravel Industry. *Journal of Pollution Effects & Control*, 4(2), 1-4.
- [4] Asthana, D. K & Asthanana, M (2012). *A Textbook of Environmental studies*. New Deli: S. Chand & Company LTD, 2012.
- [5] ASTM, (American Society for testing and Materials) (1974) *Instrumentation for Monitoring Air Quality: A Symposium*. Baltimore: ASTM.
- [6] Azimi, S., Ludwig, A., Thévenot, D. R., & Colin, J. L. (2003). Trace metal determination in total atmospheric deposition in rural and urban areas. *Science of the Total Environment*, 308(1-3), 247-256.
- [7] Brookes, P. C. (1995). The use of microbial parameters in monitoring soil pollution by heavy metals. *Biology and Fertility of soils*. 19(4), 269-279.
- [8] Cheng, Y., Lee, S., Gu, Z., Ho, K., Zhang, Y., Huang, Y., Chow, J., Watson, J., Cao, J & Zhang, R. (2015). PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10-2.5</sub> chemical composition and source apportionment near a Hong Kong roadway. *Particology*, 18, 96-104.
- [9] Chipoco, J. G., & Rodríguez, F. (2015). *Determinación de la capacidad de adsorción de material particulado en el aire en una especie arbórea Schinus terebinthifolius y una rastrera Aptenia cordifolia en el condominio La Quebrada-Cieneguilla*. (Tesis de licenciatura). Recuperado de <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/2192>
- [10] Diario Oficial. (2007). Secretaria de medio ambiente y recursos naturales. Recuperado de [http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/1392/1/nom-147-semarnat\\_ssa1-2004.pdf](http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/1392/1/nom-147-semarnat_ssa1-2004.pdf)
- [11] El Peruano (2017). Normas legales Decreto Supremo N.º 011-2017. Minam Recuperado de <https://sinia.minam.gob.pe/normas/aprueban-estandares-calidad-ambiental-ecasuelo-0>.
- [12] Glicksman, R., Markell, D., Buzbee, W., Tarlock, D & Mandelker, D. (2007). *Environmental Protection: Law and Policy* (casebook) (5.ª edition). Aspen Publishers.
- [13] Instituto geológico y minero de España (IGME) (2005). *Los residuos mineros-Metalúrgicos en el medio ambiente*. [en línea] Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/263741877\\_Los\\_residuos\\_minero-metalurgicos\\_en\\_el\\_medio\\_ambiente](https://www.researchgate.net/publication/263741877_Los_residuos_minero-metalurgicos_en_el_medio_ambiente)
- [14] Li, Q., Cai, S., Mo, C., Chu, B., Peng, L., & Yang, F. (2010). Toxic effects of heavy metals and their accumulation in vegetables grown in a saline soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 73(1), 84-88.
- [15] Mawonike, R & Mandonga, G (2017) The effect of temperature and relative humidity on rainfall in gokwe region, zimbabwe: a factorial design perspective. *International Journal of Multidisciplinary Academic Research*, 5 (2) 36-46.
- [16] MINAM. (2009) *Taller: Armonización de redes de monitoreo de calidad del aire, Compendio teórico*. SINIA. Recuperado de <https://sinia.minam.gob.pe/download/file/fid/38940>.
- [17] MINSA, Ministerio de Salud (2012) *Sistema Nacional de Información Ambiental*. Recuperado de <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/estudio-saturacion-lima-metropolitana-callao-ano-2011>
- [18] Municipalidad metropolitana de Lima MML. (2008) *Plan metropolitano de Desarrollo Urbano 2035*. Recuperado de <http://www.munlima.gob.pe/images/descargas/region-lima/asamblea-metropolitana/PLAN-METROPOLITANO-DE-DESARROLLO-URBANO.pdf>
- [19] Nikolopoulou, M., Kleissl, J., Linden, P. F., & Lykoudis, S. (2011). Pedestrians' perception of environmental stimuli through field surveys: Focus on particulate pollution. *Science of the total environment*, 409(13), 2493-2502.
- [20] Santos, J. M., Reis, N. C., Galvão, E. S., Silveira, A., Goulart, E. V & Lima, A. T. (2017). Source apportionment of settleable particles in an impacted urban and industrialized region in Brazil. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(27), 22026-22039.
- [21] Secretaria de Ambiente, Norma tecnica Ambiental Ecuatoriana - Aire. (2010) *DSpace*. Recuperado de <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/6078/45/LIBRO%20VI%20Anexo%204%20Calidad%20de%20aire.doc>

- [22] Secretaria de Ambiente (2013). Norma técnica ambiental ecuatoriana. Recuperado de <http://www.quitoambiente.gob.ec/ambiente/index.php/biblioteca-digital/category/15-marco-normativo?download=299:propuesta-norma-tecnica-suelo-2013-09-23&start=20>
- [23] Servicio nacional de Meteorología y climatología Senamhi. (2018) Boletines de medio ambiente. *Boletín mensual de vigilancia de calidad del aire en Lima metropolitana*, Volumen 18, 8. Recuperado de <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/03201SENA-62.pdf>
- [24] Servicio nacional de Meteorología y climatología Senamhi. (2018) Boletines de medio ambiente. *Boletín mensual de vigilancia de calidad del aire en Lima metropolitana*, volumen 18, 10. Recuperado de <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/03201SENA-65.pdf>
- [25] Silva, J., Rojas, J., Norabuena, M., Molina, C., Toro, R. A., & Leiva-Guzmán, M. A. (2017). Particulate matter levels in a South American megacity: the metropolitan area of Lima-Callao, Peru. *Environmental monitoring and assessment*, 189(12), 635.
- [26] Soriano, A., Pallarés, S., Pardo, F., Vicente, A. B., Sanfeliu, T., & Bech, J. (2012). Deposition of heavy metals from particulate settleable matter in soils of an industrialised area. *Journal of Geochemical Exploration*, 113, 36-44.
- [27] Vallack, H. W., & Shillito, D. E. (1998). Suggested guidelines for deposited ambient dust. *Atmospheric Environment*, 32(16), 2737-2744.

### Rita Cabello Torres

Ingeniero químico, con 14 años de experiencia en investigación medioambiental en el Instituto del Mar del Perú, en la Unidad de Gestión y Monitoreo Ambiental. Ha sido miembro del Plan Nacional para el establecimiento del Convenio de Estocolmo, del Grupo Nacional de Sustancias Químicas (CONAM) y miembro del plan de Contingencia ante derrames de petróleo y sustancias nocivas. Fue ejecutiva de Proyectos de Ciencia y Tecnología (i+d) en la Unidad Coordinadora del Programa de Ciencia y Tecnología (FINCYT). Cuenta con una maestría en Química Fundamental y Ambiental en la Universidad Da Coruña (España) y un postgrado en Gestión Ambiental efectuado en la Universidad Nacional de Ingeniería (Perú). Fue responsable de la carrera profesional de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur. Actualmente, es consultora ambiental y docente universitaria en la Universidad César Vallejo en la sede Lima Este.

 rcabello@ucv.edu.pe

### Patricia Reynoso Quispe

Graduada en Matemática por la Universidad Santa Úrsula de Río de Janeiro (2007) y en la maestría en Ingeniería de Materiales y de Procesos Químicos y Metalúrgicos en la Pontificia Universidad Católica de Río de Janeiro (2010). Tiene experiencia en el área de computación, física e ingeniería de procesos y medioambiente; principalmente, en los siguientes temas: modelado matemático y ambiental. Actualmente, cursa el doctorado en Medio Ambiente en UNALM y es docente en UTEC.

### Lorgio Valdiviezo Gonzales

Ingeniero metalúrgico por la Universidad Nacional de Trujillo (2003). Asimismo, es máster y doctor en Ingeniería de Materiales y de Procesos Químicos y Metalúrgicos, especializado en tratamiento de efluentes por la Pontificia Universidad Católica de Río de Janeiro (2006-2012, PUC-RIO. Brasil), con más de 12 años dedicado a la investigación, impartiendo cursos y conferencias en temas relacionados con la calidad y tratamiento de agua. Actualmente, es docente investigador de la universidad César Vallejo.

 lvaldiviezo@ucv.edu.pe

Recibido 08-05-19      Revisado 28-06-19      Aceptado 15-07-19



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.

## ACERCA DE LOS AUTORES

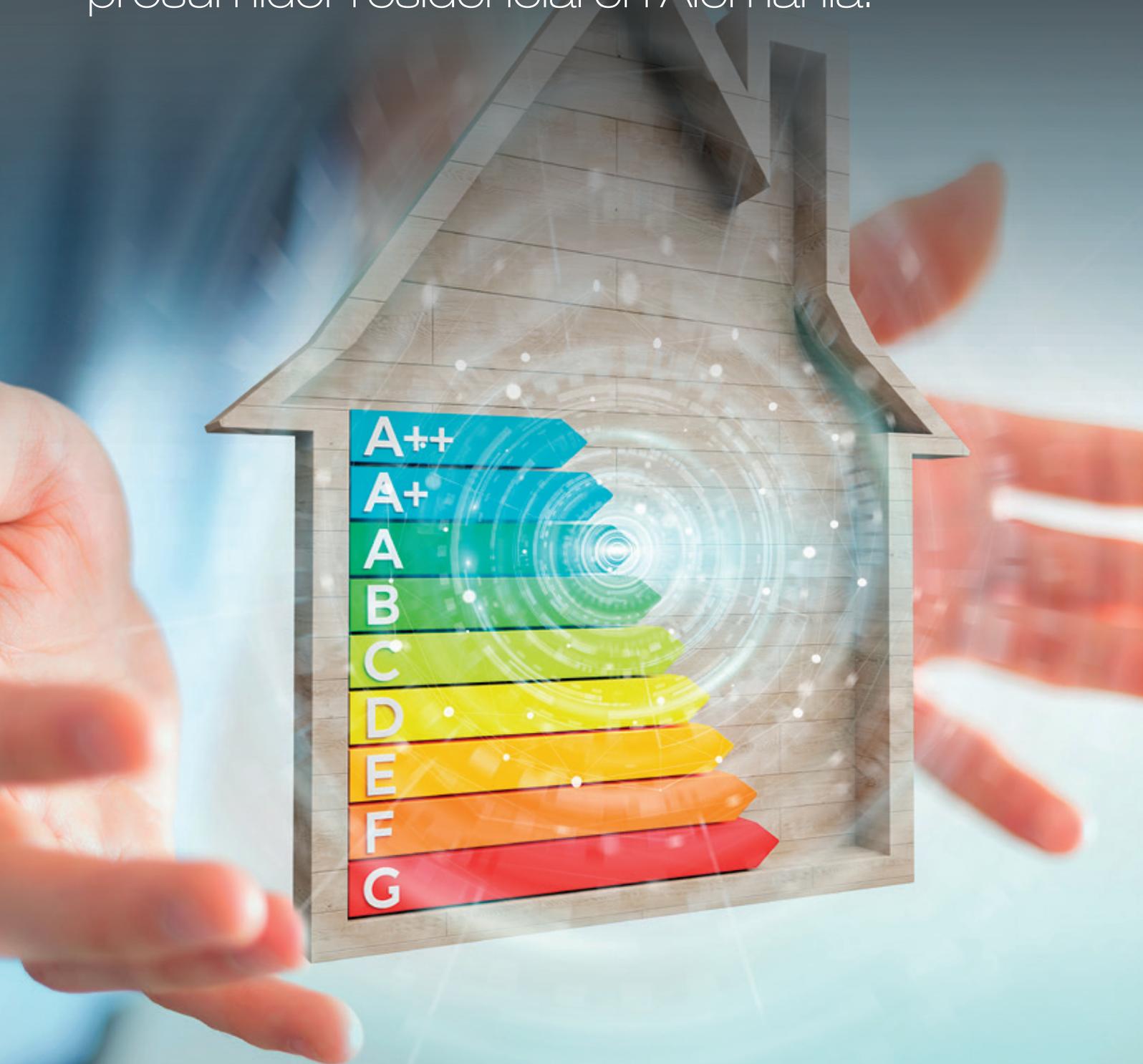
### Carmen Rosa Goicochea Carranza

Ingeniera ambiental. Actualmente, labora en la empresa minera Buenaventura, Up Tantauatay – Cajamarca, como ingeniera de seguridad. Trabajó como supervisora de riesgo, catástrofes y desastres en la empresa IRM Ingenieros S. A. C. en el Área de Medio Ambiente. Se desempeñó como monitorista ambiental, en la empresa Envirotec S. A. C. y Labeco SAC.

Asimismo, ha realizado trabajos independientes de monitoreo ambiental, estudios de impacto ambiental, asistente de laboratorios y capacitaciones en diferentes instituciones respecto a temas ambientales.

 rosita8193.crgc@gmail.com

Se presenta **una metodología para construir e implementar, de manera práctica, modelos basados en el aprendizaje automático para resolver la complejidad de pronosticar el consumo de electricidad** de un prosumidor residencial en Alemania.



# Métodos de aprendizaje automático para el pronóstico del consumo eléctrico de prosumidores

## Machine Learning Methods for Forecasting Electricity Consumption of Prosumers

### RESUMEN

La tendencia hacia la llamada digitalización de los sistemas energéticos trae consigo la implementación de medidores de electricidad inteligentes y el desarrollo del mercado de «prosumidores» (usuarios productores y consumidores de energía quienes generan electricidad localmente a partir de fuentes renovables), el cual requiere de tecnologías emergentes, tales como el aprendizaje automático (en inglés, *machine learning*) para mejorar la gestión energética. El objetivo de la investigación es desarrollar modelos basados en métodos de aprendizaje automático para pronosticar el consumo eléctrico horario de un prosumidor residencial ubicado en Alemania.

En este estudio, se desarrolla una metodología para construir modelos de predicción basados en los métodos seleccionados «k-vecinos más cercanos» y «redes neuronales artificiales» (en inglés, *k-Nearest Neighbors* y *Artificial Neural Networks*, respectivamente), los cuales son aplicados a las mediciones históricas de consumo eléctrico de quince meses en combinación con datos meteorológicos de temperatura local.

A pesar de la complejidad para predecir el consumo, debido al uso irregular de energía eléctrica en un hogar, los modelos *k-Nearest Neighbors* y *Artificial Neural Networks* mostraron resultados de exactitud aceptables con un error porcentual absoluto medio en el orden del 30 % en tres escenarios diferentes con períodos de pronóstico de 48, 24 y 1 horas. Los modelos predictivos desarrollados pueden ser implementados por modelos de negocio emergentes orientados hacia el prosumidor, cuya propuesta de valor se basa en reducir los costos de electricidad a través de la mejora del autoconsumo de energía renovable.

### ABSTRACT

*The trend towards the so-called digitalization of energy systems brings with it the implementation of smart meters and the development of the “prosumer” market (energy producers and consumers which generate electricity locally), which demands emerging technologies, such as machine learning, to improve energy management. This research aims to build models based on machine learning methods for forecasting hourly electricity consumption of a residential prosumer located in Germany.*

*In this study, a methodology is developed to build prediction models based on k-Nearest Neighbors and Artificial Neural Networks methods, which are applied on historical electricity consumption data obtained along fifteen months and in combination with local temperature data.*

*Despite the complexity of predicting consumption due to the irregular usage of electricity in a household, the k-Nearest Neighbors and Artificial Neural Networks models showed acceptable accuracy results with a medium absolute percentage error around 30% in three different scenarios with forecast periods of 48, 24 and 1 hours. The predictive models can be implemented through emerging prosumer-oriented business models, whose value proposition aims at reducing electricity costs through improvement of renewable energy self-consumption.*



### Palabras clave

Prosumidor, pronóstico de consumo eléctrico, k-vecinos más cercano, redes neuronales artificiales, aprendizaje automático.

### Key words

Prosumer, electricity consumption forecasting, k-Nearest Neighbors, Artificial Neural Networks, machine learning.

## INTRODUCCIÓN

El desarrollo del mercado de prosumidores, es decir, aquellos consumidores que producen y consumen electricidad, juega un papel importante en la llamada transición energética y sus principales impulsores: descarbonización, descentralización y digitalización. Descarbonización, mediante la generación de energía renovable, especialmente a partir de sistemas fotovoltaicos. Descentralización, mediante el consumo de electricidad autoproducida y la reducción de aquella importada de la red. Además, en la digitalización de los sistemas energéticos, descrita como la aplicación de tecnologías de la información y comunicaciones [5], los métodos de análisis avanzados, como el aprendizaje automático, permiten explotar grandes cantidades de datos con el objetivo de mejorar la gestión energética.

Pronosticar el consumo de electricidad de un prosumidor es una tarea bastante compleja debido al uso irregular de los aparatos eléctricos. La previsión a corto plazo, es decir, de 1 hora a varios días de antelación [7], es particularmente importante, ya que proporciona información para evaluar el consumo diario, la demanda pico, así como los perfiles de carga [2]. De esta manera, pronósticos confiables son requeridos para optimizar el consumo de electricidad y su respectivo costo.

En ese sentido, surge la idea de explorar la aplicación práctica de métodos de aprendizaje automático en prosumidores. El objetivo de la investigación es construir modelos predictivos basados en el aprendizaje automático para pronosticar el consumo de electricidad a corto plazo de un prosumidor residencial; asimismo, determinar el rendimiento de los modelos en términos de exactitud. La investigación es relevante, dado que hasta la fecha solo se han realizado estudios limitados sobre este tema.

En este estudio, se describe una metodología experimental para resolver el problema de previsión energética, la cual comprende un proceso de construcción y evaluación de modelos de predicción basados en los métodos *k-Nearest Neighbors* y *Artificial Neural Networks*. Esta metodología es aplicada en un prosumidor residencial, cuyas mediciones históricas de consumo eléctrico en combinación con variables meteorológicas son utilizadas como datos de entrada para entrenar y optimizar los modelos predictivos.

## FUNDAMENTOS

Las técnicas de pronóstico de consumo eléctrico pueden clasificarse en dos grupos: métodos convencionales y métodos de aprendizaje automático [8]. Diversos estudios han desarrollado modelos basados en métodos convencionales de análisis de series temporales para predecir la demanda de energía eléctrica. El método estadístico Box y Jenkins, también conocido como modelo Autorregresivo Integrado de Media Móvil (ARIMA, por sus siglas en inglés), ha sido ampliamente utilizado.

Asimismo, solo algunas publicaciones han explorado la aplicación de técnicas de aprendizaje automático para predecir el consumo individual de un usuario, con especial interés en mejorar la exactitud de los pronósticos. En este estudio, se analiza la literatura relacionada con los métodos *k-Nearest Neighbors* (k-NN) y *Artificial Neural Networks* (ANN).

### K-vecinos más cercanos (k-NN)

El método de aprendizaje automático k-NN es ampliamente utilizado para la clasificación de patrones; sin embargo, también es aplicado a problemas de regresión tales como el pronóstico de series temporales.

El algoritmo k-NN aprende a pronosticar a partir de los datos de entrenamiento, los cuales utiliza para encontrar la relación entre las variables predictoras (variables independientes) y la variable objetivo (variable dependiente). Para calcular el valor de un pronóstico, el algoritmo promedia el valor de las muestras más similares, es decir, los k vecinos más cercanos, de los datos de entrenamiento. Por lo tanto, los modelos k-NN son de fácil parametrización [14], es decir, la selección del valor de k, el cual es un parámetro clave y puede seleccionarse ejecutando un proceso iterativo para encontrar aquel que produce el menor error de validación [15].

Según la revisión de la literatura, el método de aprendizaje automático *k-Nearest Neighbors* se ha aplicado de forma individual [2] [14] o en combinación con otras técnicas [4] para pronosticar demandas de electricidad.

### Redes neuronales artificiales (ANN)

Las redes neuronales artificiales están inspiradas en el proceso biológico y las conexiones de las neuronas en el cerebro, en donde cada neurona recibe entradas que son al mismo tiempo salidas de otras neuronas en una capa anterior [12]. Por ejemplo, la figura 1 muestra la topología de una red simple, donde  $X_1$ ,  $X_2$  y  $X_3$  son las variables de entrada (predictoras) conectadas a un nodo (que actúa como una neurona), y donde  $Y$  es la variable de salida (objetivo). Además, el número 1 se le denomina intercepción y los números 2, 3 y 4 son los coeficientes. Se puede observar que el último nodo llamado «nodo de umbral» en la capa de entrada es especial y no tiene entradas. La función de  $Y$  es una representación matemática de la red neuronal para un modelo lineal [6].

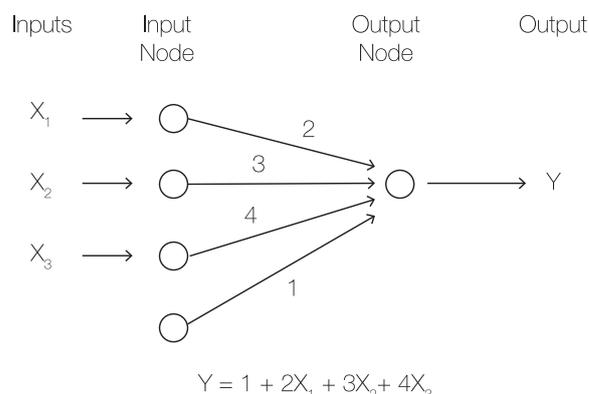


Figura 1. Ejemplo de una red neuronal artificial. Fuente: [6]

Modelos basados en ANN han sido aplicados para predecir el consumo eléctrico de un hogar. En algunos estudios, utilizando ANN (con datos históricos de consumo, temperatura y humedad como variables), se obtuvieron resultados con exactitud similar al método k-NN y mejores que los del método convencional

ARIMA [3]. Sin embargo, los resultados de otro análisis señalan la dificultad para predecir el consumo eléctrico y detectar los picos en un hogar individual, debido al uso irregular de los electrodomésticos [16].

electricidad (variable objetivo) de un prosumidor residencial. Los modelos k-NN y ANN son propuestos como alternativas a métodos convencionales y utilizan mediciones históricas de consumo y datos meteorológicos como variables predictoras.

## METODOLOGÍA

En este estudio, se construyen modelos basados en el aprendizaje automático para pronosticar el consumo de

El proceso para construir los modelos consta de cinco pasos generales: preprocesamiento de datos, entrenamiento, validación, prueba y evaluación [13]. La figura 2 muestra el diagrama de flujo utilizado para construir los modelos propuestos.

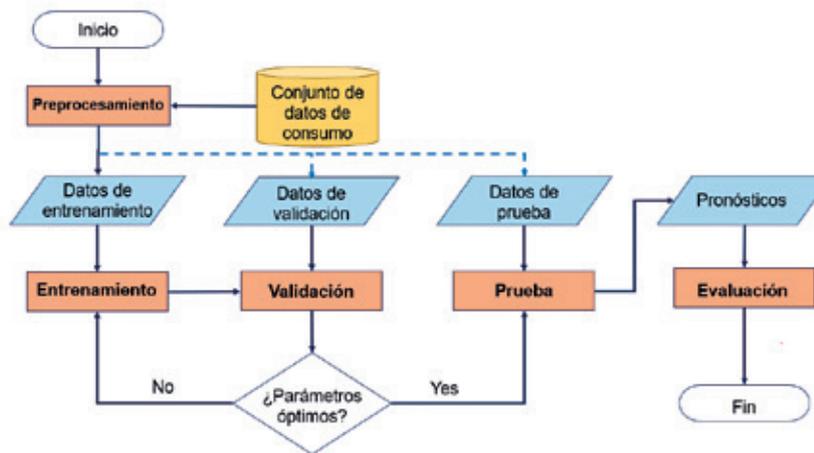


Figura 2. Diagrama de flujo para construir modelos basados en el aprendizaje automático. Fuente: Elaboración propia.

En primer lugar, problemas tales como datos faltantes o no estructurados se abordan en el preprocesamiento del conjunto de datos [7]. Luego, los datos preprocesados se dividen en tres subconjuntos para el entrenamiento, validación y prueba del algoritmo de aprendizaje automático (k-NN o ANN), respectivamente.

Los datos de entrenamiento se introducen en el algoritmo para que este pueda aprender la relación entre las variables predictoras y la variable objetivo. A continuación, los datos de validación se utilizan para evaluar el rendimiento general del modelo y ajustar los parámetros del algoritmo. Para el presente estudio, a fin de minimizar el riesgo de sobreajuste (conocido en inglés como *overfitting*) [6], se realizó un muestreo estratificado con una relación de 80 a 20 entre los datos de entrenamiento

y validación [9]. Posteriormente, utilizando los datos de prueba, el modelo final pronostica el consumo eléctrico para un periodo específico. Finalmente, la exactitud del modelo se evalúa comparando los pronósticos de prueba con el consumo real y se mide en términos de métricas comunes: raíz del error cuadrático medio (RMSE), error absoluto medio (MAE), error porcentual medio absoluto (MAPE) y coeficiente de correlación.

### Software de modelado

Para construir desde cero los modelos propuestos, k-NN y ANN, se utiliza un *software* popular de ciencia de datos: RapidMiner Studio [11]. La figura 3 muestra el modelo general construido en la aplicación, el cual está conformado por subprocesos.

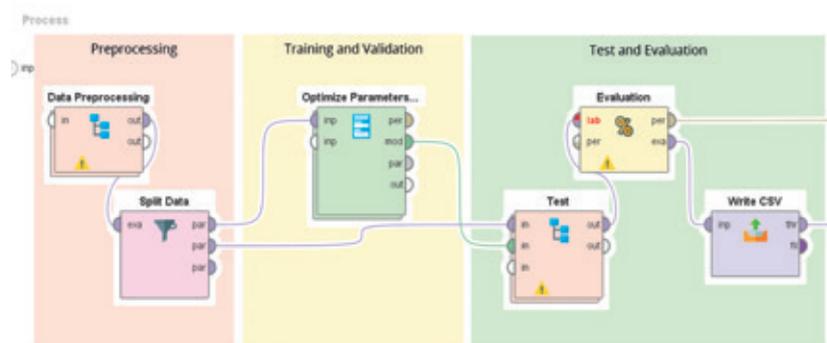


Figura 3. Modelo construido en RapidMiner Studio. Fuente: Elaboración propia.

### Descripción de datos

Para llevar a cabo el estudio, se seleccionó un conjunto de datos del proyecto *Open Power System Data* (OPSD) [10]. Estos datos pertenecen a un prosumidor residencial ubicado en Constanza, Alemania, y consisten en mediciones acumuladas de consumo y producción eléctrica en kWh.

De acuerdo con el propósito de esta investigación, la variable objetivo es el consumo de electricidad, independientemente de si esta es suministrada por la red pública o autoproducida por el sistema fotovoltaico, y se ha definido como la adición del consumo de los dispositivos individuales, tales como bomba de calor, vehículo eléctrico, lavavajillas, lavadora, congelador, y refrigerador.

Luego de la tarea de preprocesamiento, el conjunto de datos contiene 11 196 observaciones horarias para el periodo comprendido entre el 1 de noviembre de 2015 y el 9 de febrero de 2017 (15 meses). Una muestra del intervalo entre el 1 de enero al 9 de febrero de 2017 es representada en la figura 4. Se puede observar que los valores varían entre 0,4 y 3,8 kWh.

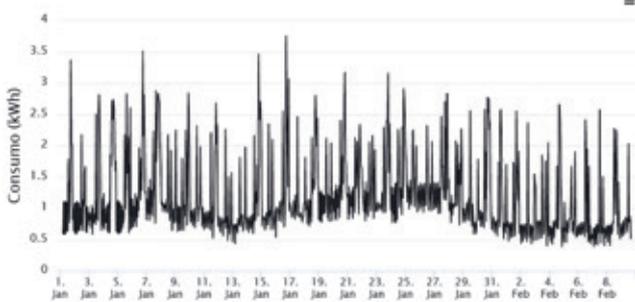


Figura 4. Consumo eléctrico horario.  
Fuente: Elaboración propia.

### Autocorrelación

Se analiza la correlación entre el consumo de electricidad en la hora siguiente y las mediciones anteriores. La correlación es medida a través del coeficiente de correlación de *Pearson* ( $r$ ), el cual indica la relación lineal entre dos variables [6]. La figura 5 muestra que las mediciones de las dos horas anteriores ( $t$  y  $t-1$ , respectivamente), así como la del día anterior ( $t-23$ ), son las más correlacionadas con el consumo de la hora siguiente ( $t+1$ ).

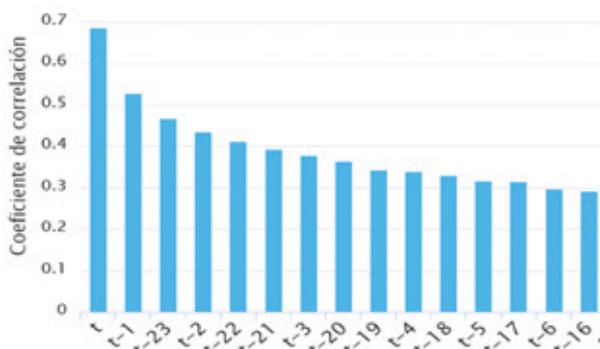


Figura 5. Coeficiente de correlación del consumo.  
Fuente: Elaboración propia.

### Correlación de variables meteorológicas

El consumo de electricidad puede estar influenciado por factores externos como las condiciones meteorológicas [3]. La figura 6 muestra que la correlación entre el consumo de electricidad y la temperatura es significativa, y la más importante entre las otras variables meteorológicas [1] de la zona donde se ubica el prosumidor.

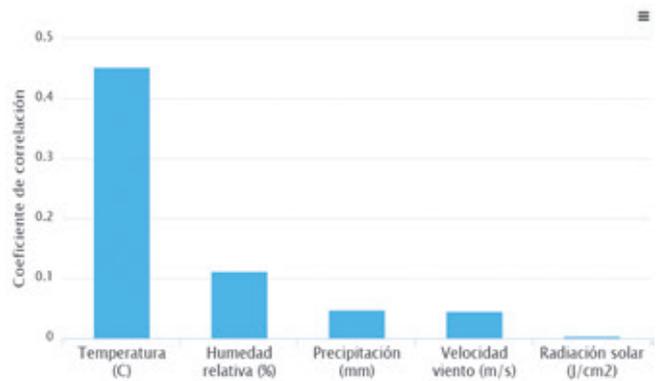


Figura 6. Correlación de variables meteorológicas.  
Fuente: Elaboración propia.

### Escenarios de prueba

Los modelos son diseñados para pronosticar el consumo de electricidad con una anticipación entre 1 y 48 horas. Asimismo, se elige una resolución de una hora, la cual es adecuada para comprender las variaciones y patrones de consumo durante el día, y permite tomar acciones oportunas para optimizar el consumo.

En la tabla 1 se resumen los escenarios seleccionados para evaluar el desempeño de los modelos propuestos.

Tabla 1  
Escenarios propuestos

Escenario	Resolución	Periodo de pronóstico
1	1 hora	48 horas
2	1 hora	24 horas
3	1 hora	1 hora

Fuente: Elaboración propia.

Los modelos pronostican el consumo de forma recursiva en los escenarios 1 y 2, es decir, el valor del pronóstico para la siguiente hora se utiliza para predecir el consumo en la hora subsiguiente; mientras que en el escenario 3, se simulan pronósticos con una hora de anticipación durante un periodo de 48 horas.

### Construcción del modelo k-NN

A diferencia de métodos convencionales como ARIMA, los modelos de aprendizaje automático no se limitan a series temporales de una variable, sino que permiten introducir múltiples variables.

En las etapas de entrenamiento y validación, se introducen diferentes combinaciones de variables predictoras en el algoritmo k-NN a fin de evaluar si la exactitud del modelo mejora. Las variables óptimas seleccionadas se muestran en la tabla 2.

Tabla 2  
Variables predictoras para el modelo k-NN

Tipo	Etiqueta	Descripción
<b>Variable objetivo</b>	consumo (t+1)	Consumo en la próxima hora (tiempo t+1) en kWh.
<b>Variables predictoras</b>	consumo (t0)	Consumo en horas previas en kWh.
	consumo (t-1)	
	consumo (t-23)	
	hora (t0)	Hora actual (valores enteros entre 0 y 23).
	mes (t0)	Mes actual (valores enteros entre 1 y 12).
	fin de semana (t0)	Valores binarios para días de fin de semana (1) y laborables (0).
	feriado (t0)	Valores binarios para días festivos (1) y laborables (0).
	temperatura (t0)	Temperatura actual.

Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, la figura 7 resume los resultados de probar el modelo k-NN con diferentes valores del parámetro k en la etapa de validación. Se observa que un valor de 8 es el parámetro óptimo, ya que produce el menor error cuadrático medio (RMSE).

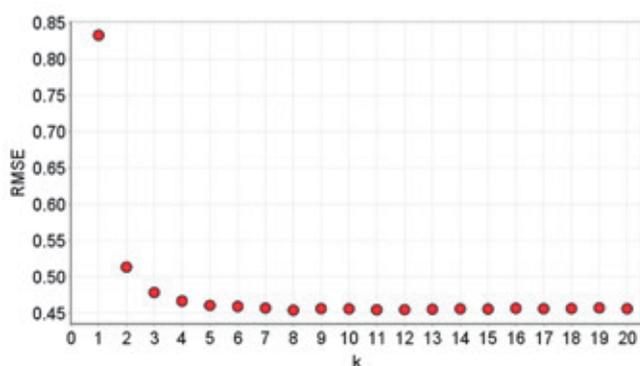


Figura 7. Selección del parámetro k.  
Fuente: Elaboración propia.

### Construcción del modelo ANN

A diferencia del modelo k-NN, el análisis de múltiples iteraciones en la etapa de validación determina que el modelo ANN arroja mejores resultados utilizando variables predictoras binarias. Por ejemplo, se requieren 24 variables binarias para la hora de consumo y 12 variables binarias para el número de mes.

Por otro lado, el número de capas y nodos se determina de forma iterativa [6]. En RapidMiner Studio, el tamaño de la capa oculta se establece de forma predeterminada mediante la

siguiente fórmula: (número de entradas + número de salidas)/2 + 1, sin incluir el nodo de umbral.

La tabla 3 muestra las 42 variables predictoras seleccionadas para el modelo. Asimismo, la figura 8 presenta la topología del modelo ANN: 42-23-1, es decir, 42 nodos en la capa de entrada, 23 nodos en la capa oculta y 1 nodo en la capa de salida.

Tabla 3  
Variables predictoras para el modelo ANN

Tipo	Etiqueta	Descripción
<b>Variable objetivo</b>	consumo (t+1)	Consumo en la próxima hora (tiempo t+1) en kWh.
<b>Variables predictoras</b>	consumo (t0), consumo (t-1), consumo (t-23)	Consumo en horas previas en kWh.
	hora (t0)	24 variables binarias para la hora actual.
	mes (t0)	12 variables binarias para el mes actual.
	fin de semana (t0)	Valores binarios para días de fin de semana (1) y laborables (0).
	feriado (t0)	Valores binarios para días festivos (1) y laborables (0).
	temperatura (t0)	Temperatura actual.

Fuente: Elaboración propia.

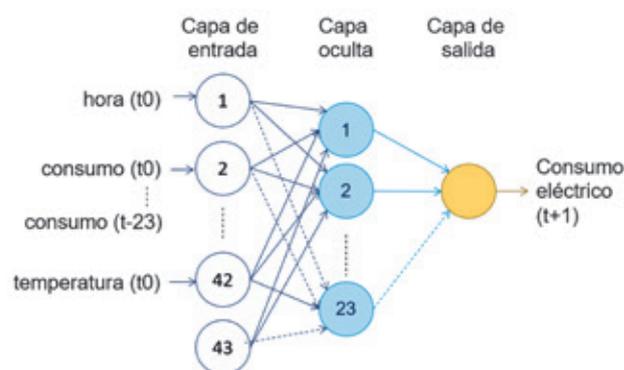


Figura 8. Topología del modelo ANN.  
Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, en el entrenamiento y la validación del modelo, se determinan los parámetros óptimos, es decir, el número de ciclos de entrenamiento y el ratio de aprendizaje. La tabla 4 resume los resultados, en donde se observa que el RMSE más bajo se obtiene con 500 ciclos y un ratio de aprendizaje de 0,001. Cabe mencionar que con un mayor número de ciclos y un menor ratio, el RMSE no disminuye; no obstante, el tiempo de ejecución aumenta considerablemente.

Tabla 4  
Selección de parámetros para el modelo ANN

Ciclos de entrenamiento	Ratio de aprendizaje	RMSE
300	0,100	0,655
400	0,100	0,595
300	0,010	0,436
400	0,010	0,449
300	0,001	0,425
400	0,001	0,423
500	0,001	0,423

Fuente: Elaboración propia.

## RESULTADOS

Los modelos propuestos k-NN y ANN basados en el aprendizaje automático mostraron pronósticos de exactitud aceptable, con un error porcentual absoluto medio (MAPE) en el orden del 30 % en tres diferentes períodos de pronóstico. Además, la capacidad de los modelos para detectar patrones de consumo fue otro hallazgo importante. Asimismo, se observa en los resultados que los modelos lograron pronosticar picos y variaciones en el consumo; sin embargo, los picos fueron suavizados ligeramente.

### Validación de modelos

El tercer paso en el proceso para construir los modelos de predicción basados en el aprendizaje automático fue la validación. En este subproceso, la exactitud de los modelos

indica cómo podrían funcionar los modelos con nuevos datos. En esta etapa, los pronósticos obtenidos por el modelo ANN fueron más exactos que los del modelo k-NN. Asimismo, puede observarse que los cálculos del modelo ANN tienen mayor correlación con el consumo real. Sin embargo, la exactitud de ambos modelos disminuye cuando el consumo real es alto. Las métricas de exactitud se presentan en la tabla 5 y la figuras 9 y 10 muestra la correlación entre el consumo real y los pronósticos.

Tabla 5  
Validación de los modelos k-NN y ANN

Modelo	RMSE	MAE	MAPE	Correlación
k-NN (T)	0,454	0,258	133,98 %	0,691
ANN (T)	0,423	0,249	143,46 %	0,741

Fuente: Elaboración propia.

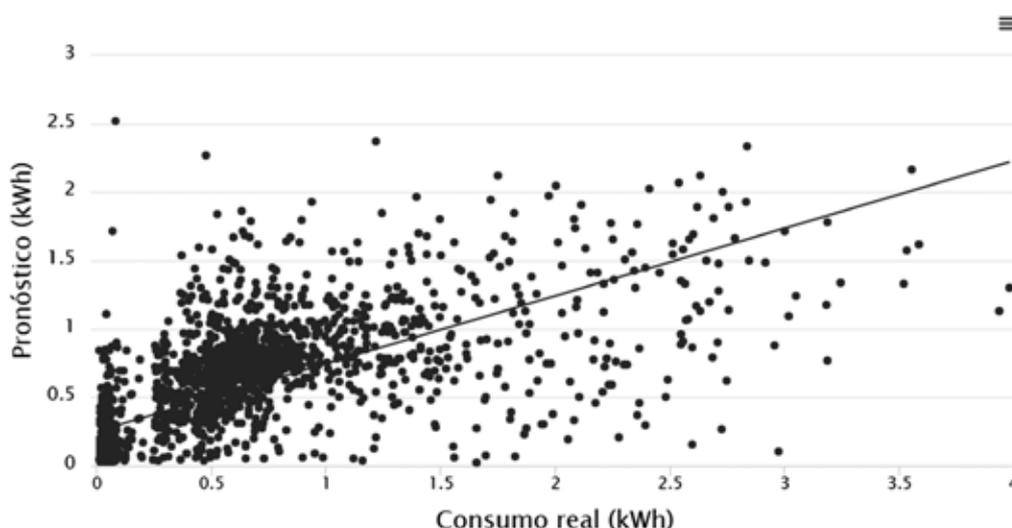


Figura 9. Correlación entre consumos reales y pronósticos del modelo k-NN.

Fuente: Elaboración propia.

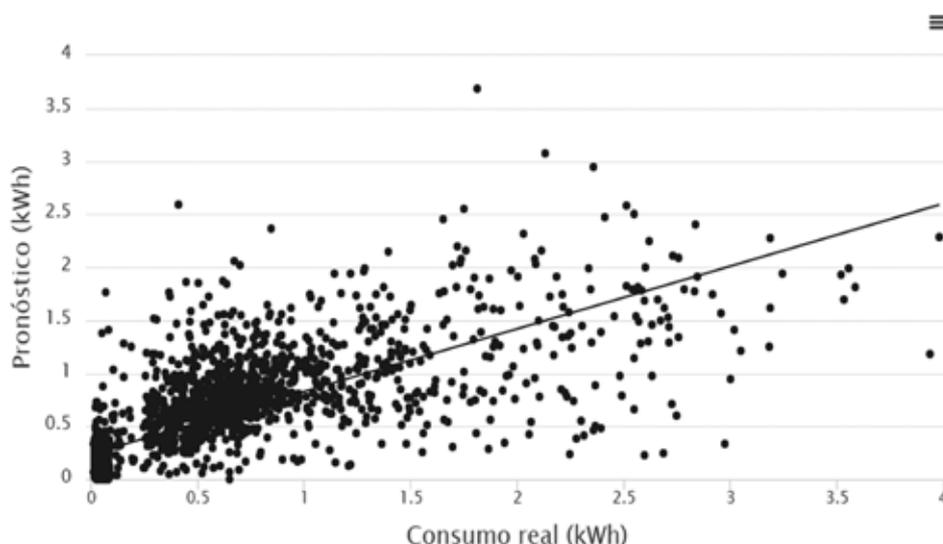


Figura 10. Correlación entre consumos reales y pronósticos del modelo ANN.  
Fuente: Elaboración propia.

### Evaluación de modelos

En la etapa de evaluación, se determinó que el modelo k-NN obtuvo resultados más exactos en términos de RMSE, MAE, MAPE y coeficiente de correlación que el modelo ANN. Además,

puede observarse que el error de los modelos disminuye en el segundo y tercer escenario con periodos de pronóstico más cortos. Los resultados para los tres escenarios propuestos se muestran en las tablas 6, 7 y 8, y las figuras 11, 12 y 13.

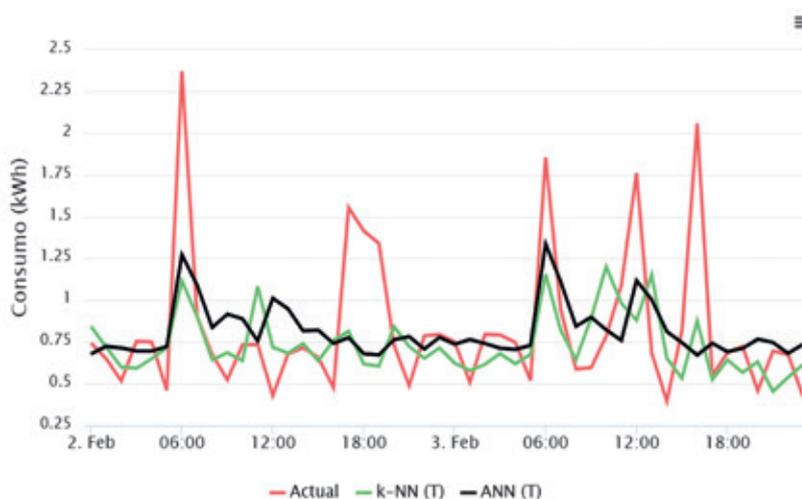


Figura 11. Escenario 1: pronósticos y consumos reales.  
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6  
Exactitud de los modelos en el Escenario 1

Modelo	RMSE	MAE	MAPE	Correlación
k-NN	0,393	0,263	29,07 %	0,467
ANN	0,390	0,265	32,52 %	0,432

Fuente: Elaboración propia.

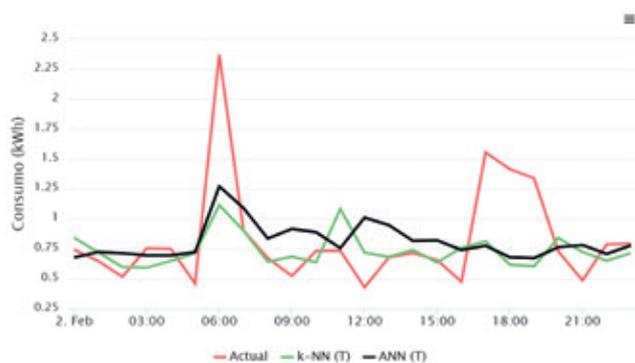


Figura 12. Escenario 2: pronósticos y consumos reales.  
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7  
Exactitud de los modelos en el Escenario 2

Modelo	RMSE	MAE	MAPE	Correlación
<b>k-NN</b>	0,400	0,255	27,56 %	0,436
<b>ANN</b>	0,397	0,280	34,10 %	0,384

Fuente: Elaboración propia.

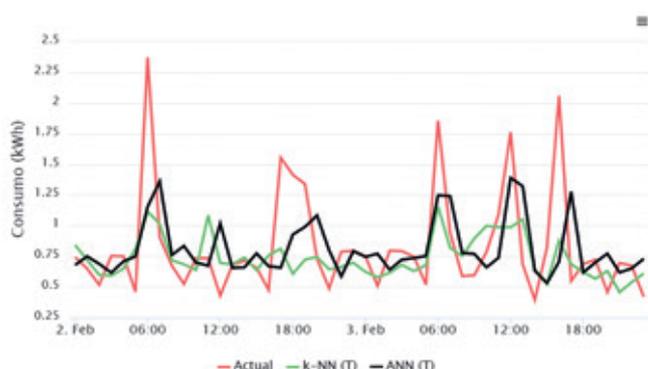


Figura 13. Escenario 3: pronósticos y consumos reales.  
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8  
Exactitud de los modelos en el Escenario 3

Modelo	RMSE	MAE	MAPE	Correlación
<b>k-NN</b>	0,381	0,258	28,75 %	0,535
<b>ANN</b>	0,404	0,280	34,79 %	0,376

Fuente: Elaboración propia.

### Tiempos de ejecución

El tiempo de procesamiento de datos, el cual se muestra en la tabla 9, varía entre los modelos k-NN y ANN; sin embargo, una vez que son entrenados, solo se necesitan unos segundos para elaborar pronósticos.

Tabla 9  
Tiempos de ejecución

Modelo	Procesamiento	Pronóstico
<b>k-NN</b>	2 min	1 s
<b>ANN</b>	10 min	2 s

Fuente: Elaboración propia.

## CONCLUSIONES

- En esta investigación, se presentó una metodología para construir e implementar, de manera práctica, modelos basados en el aprendizaje automático para resolver la complejidad de pronosticar el consumo de electricidad de un prosumidor residencial, cuyo rol es muy importante en la llamada transición energética.
- Se comprobó, en tres escenarios distintos, que los modelos basados en los métodos de aprendizaje automático k-NN y ANN permiten obtener pronósticos de consumo eléctrico a corto plazo (hasta 48 horas) con niveles de exactitud aceptables.
- El tiempo de ejecución requerido por los modelos para procesar los datos es corto, por lo tanto, adecuado para su implementación en el pronóstico de consumo eléctrico a corto plazo.
- Los modelos propuestos pueden ser adoptados y aprovechados por diferentes modelos de negocio emergentes orientados en gestionar la demanda y oferta de energía de los prosumidores, a fin de mejorar el autoconsumo de energía renovable y reducir los costos de electricidad.

## REFERENCIAS

- [1] DWD Climate Data Center (2018). Historical hourly station observations of 2m air temperature and humidity for Germany. Version v006. Recuperado de [ftp://opendata.dwd.de/climate\\_environment/CDC/observations\\_germany/climate/hourly/](ftp://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/climate/hourly/).
- [2] Fan, C., Xiao, F., Wang, S. (2014). Development of prediction models for next-day building energy consumption and peak power demand using data mining techniques. *Applied Energy*, 127, 1–10.
- [3] Gajowniczek, K., Ząbkowski, T. (2017). Electricity forecasting on the individual household level enhanced based on activity patterns. *PloS one*, 12 (4). Recuperado de <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0174098>.
- [4] He, W. (2008). Forecasting electricity load with optimized local learning models. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 30 (10), 603–608.

- [5]** International Energy Agency (2017). *Digitalization and Energy*. International Energy Agency (IEA). Recuperado de <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/DigitalizationandEnergy3.pdf>.
- [6]** Kotu, V., Deshpande, B. (2015). *Predictive analytics and data mining. Concepts and practice with RapidMiner*. Amsterdam: Elsevier/Morgan Kaufmann.
- [7]** Kuster, C., Rezgui, Y., Mourshed, M. (2017). Electrical load forecasting models. A critical systematic review. *In Sustainable Cities and Society*, 35, 257–270.
- [8]** Makridakis, S., Spiliotis, E., Assimakopoulos, Vassilios (2018). Statistical and Machine Learning forecasting methods. Concerns and ways forward. *PloS one*, 13 (3). Recuperado de <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194889>.
- [9]** Moon, J., Park, J., Hwang, E., Jun, S. (2018). Forecasting power consumption for higher educational institutions based on machine learning. *The Journal of Supercomputing*, 74 (8), 3778–3800.
- [10]** Open Power System Data (2017). Data Package Household Data. Versión 2017-11-10. Recuperado de [https://doi.org/10.25832/household\\_data/2017-11-10](https://doi.org/10.25832/household_data/2017-11-10).
- [11]** RapidMiner Inc. (2018). RapidMiner Studio. Versión 9.0.3. Recuperado de <https://rapidminer.com/get-started>.
- [12]** Shalev-Shwartz, S., Ben-David, S. (Eds.) (2014). *Understanding machine learning. From theory to algorithms*. New York: Cambridge University Press.
- [13]** Suthaharan, S. (2016). *Machine Learning Models and Algorithms for Big Data Classification*. Boston, MA: Springer US.
- [14]** Valgaev, O., Kupzog, F., Schmeck, Harmut (2016). Low-voltage power demand forecasting using K-nearest neighbors approach. *2016 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT-Asia)*. Melbourne: IEEE, 1019–1024.
- [15]** Zhang, R., Xu, Y., Dong, Z., Kong, W., Wong, K. (2016). A composite k-nearest neighbor model for day-ahead load forecasting with limited temperature forecasts. *2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM)*. Boston: IEEE, 1–5.
- [16]** Zufferey, T., Ulbig, A., Koch, S., Hug, G. (Eds.) (2017). Forecasting of Smart Meter Time Series Based on Neural Networks. *Data Analytics for Renewable Energy Integration*. Cham: Springer International Publishing.

## ACERCA DEL AUTOR

### Javier Castillo Peña

Profesional técnico en Mantenimiento de Maquinaria de Planta por Tecsup (2004), bachiller en Ingeniería Industrial por la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (2012), y Master of Business Administration (MBA) - Energy Management por la Technische Universität Berlin (2019).

@ javiercastillopena@gmail.com

Recibido: 27-05-19    Revisado: 24-06-19    Aceptado: 02-07-19



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.

La guía de autoevaluación le permite al micro y pequeño empresario identificar el área con mayor deficiencia, determinar los problemas encontrados, medirlos y plantear posibles soluciones a los mismos.



## Guía de autoevaluación empresarial: un aporte para las mypes

### *Business Self-evaluation Guide: A Contribution for Mypes*

#### RESUMEN

Las mypes representan el 99,1% de las empresas existentes en el Perú según el documento *Perú: Estructura Empresarial 2017*, publicado por el INEI en noviembre de 2018, lo que dio empleo a más de 8 millones de peruanos.

Uno de los principales problemas que enfrenta este sector es el nivel de productividad, lo cual no le permite tener ventajas competitivas frente a otras empresas en el mercado. A esto se suma que el 65,3 % de este tipo de empresas son familiares, razón por la cual, en muchos casos, no cuentan con profesionales debidamente calificados para gestionar de manera óptima los recursos.

Esta situación se agrava aún más ante la propia actitud de los pequeños empresarios de no contratar consultores porque piensan que es costoso y que no es necesario, ya que consideran que conocen los aspectos importantes y algunos se rehúsan al cambio.

Frente a esta situación, el presente artículo plantea como objetivo brindar al empresario una «Guía de autoevaluación» que le permita evaluar, identificar y medir los problemas en las áreas principales de todo negocio: logística, operaciones, *marketing*, personal, finanzas y estratégico.

La metodología empleada corresponde a la investigación aplicada que es el tipo de investigación en la cual el problema está establecido y es conocido por el investigador, por lo que utiliza la investigación para dar respuesta a preguntas específicas.

Para una mayor comprensión del lector, se desarrolla un caso empresarial siguiendo la secuencia planteada por la «Guía de autoevaluación», contribuyendo de esta forma al crecimiento de las mypes en nuestro país.

Finalmente, la guía permitirá al empresario identificar el área o las áreas con mayor deficiencia, determinar los problemas encontrados, medirlos y plantear posibles soluciones a los mismos.

#### ABSTRACT

*Mypes represent 99.1 % of the existing companies in Peru, according to Peru: Corporate Structure 2017, published by INEI in November 2018, employing more than 8 million Peruvians.*

*One of the main problems facing this sector is the level of productivity, which does not allow them to have competitive advantages compared to other companies in the market. Besides, 65.3 % of this type of companies are familiar ones, which, in many cases, do not count on with qualified professionals to optimize and manage the resources.*

*This situation is further aggravated by the small entrepreneurs' attitude of not hiring consultants because they think it is expensive and consider it is not necessary because they believe they already know everything and some of them refuse to change.*

*Facing this situation, this article aims to provide the entrepreneurs with a "Self-Assessment Guide" that allows them to evaluate, identify and measure problems in the main areas of their businesses: logistics, operations, marketing, personnel, finance, and strategy.*

*The methodology used corresponds to applied research, which is the type of research in which the problem is established and is known by the researcher, so he uses the research to answer specific questions.*



#### Palabras clave

Micro y pequeña empresa (mype), *core business*, mejora de procesos, guía de autoevaluación, diagnóstico.

#### Key words

*Micro and Small Business (Mype), Core Business, Process improvement, Self-evaluation Guide, Diagnosis.*

*For a better understanding of the reader, a business case is developed following the sequence outlined by the "Self-Assessment Guide", thus contributing to the growth of Mypes in our country.*

*Finally, this guide will allow the entrepreneur to identify the most deficient areas, determine the problems found, measure them and propose possible solutions to them.*

## INTRODUCCIÓN

Las micro y pequeñas empresas (mypes) cumplen un rol fundamental en la economía peruana, contribuyendo con el 42 % de participación del PBI, según el estudio *Factores que Limitan el Crecimiento de las Micro y Pequeñas Empresas en el Perú (Mypes)*, elaborado por Centrum Católica.

Las mypes representan el 99,1 % de las empresas a nivel nacional. El 45,5 % de las microempresas se dedican a actividades de comercio y reparación de vehículos automotores y motocicletas, mientras que un 39,2 %, las pequeñas empresas.

En un porcentaje menor del 0,2 %, las microempresas se dedican a actividades de electricidad, gas y agua, siendo mayor el porcentaje 0,4 % para el caso de las pequeñas empresas en referencia a la misma actividad, de acuerdo con el documento *Estructura Empresarial 2017*.

De acuerdo con la Agencia Peruana de Noticias, de cada 100 puestos de trabajo, 85 se generan de la actividad de las micro y pequeñas empresas.

Sin embargo, las mypes enfrentan una serie de obstáculos que limitan su supervivencia a largo plazo y desarrollo. Estudios previos indican que la tasa de mortalidad de los pequeños negocios es mayor en los países en desarrollo que en los países desarrollados [2].

Además, las pequeñas empresas deben desarrollar estrategias específicas de corto y largo plazo para salvaguardarse de la mortalidad. Dado que iniciar una pequeña empresa involucra un nivel de riesgo y las probabilidades de perdurar más de cinco años son bajas [18].

A esta problemática, se suma que muchos de los empresarios de las micro y pequeñas empresas no consideran contratar un asesor o consultor, porque consideran que es un gasto y no una inversión. Por ello, deciden invertir sus excedentes económicos en comprar materia prima e insumos, asegurando su capital de trabajo para los próximos meses de operación del su negocio.

Es por ello que nace la propuesta de la elaborar la presente «Guía de Autoevaluación», una herramienta de apoyo a los micro y pequeños empresarios, permitiéndoles identificar sus problemas más agudos, para plantear posibles soluciones a ello.

Para un mejor entendimiento del lector, es que se desarrolla un caso real de una empresa textil (Textiles S.A.C.), en donde se aplican los pasos que sugiere la guía.

## FUNDAMENTOS

El Directorio Central de Empresas y Establecimientos (DCCE) registró al 31 de diciembre del 2017, 2 millones 303 mil 511 unidades económicas, cifra mayor en 8,4 % de empresas registradas respecto al año anterior. Así mismo presentó una tasa de crecimiento promedio de 6,7 % durante los últimos 5 años [12].

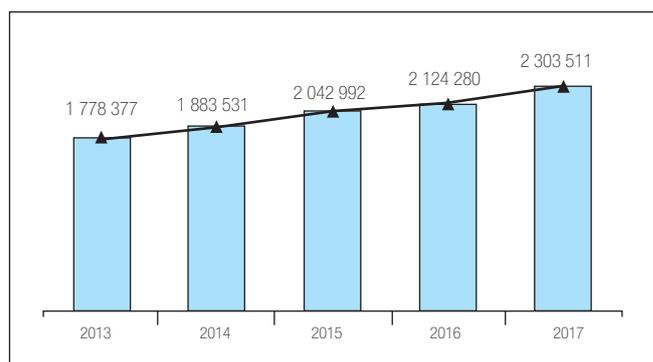


Figura 1. Perú: stock de empresas por año, 2013-2017. Fuente: INEI – Directorio Central de Empresas y Establecimiento.

Del total de empresas registradas en el Perú, 94,8 % son microempresas y el 4,3 % son pequeñas empresas.

Tabla 1  
Perú: empresas, según segmento empresarial, 2013-17

Segmento empresarial	2016	2017		Var % 2017/16
		Absoluto	Porcentaje	
<b>Total</b>	<b>2 124 280</b>	<b>2 303 511</b>	<b>100,0</b>	<b>8,4</b>
Microempresa	2 011 153	2 187 121	94,8	8,4
Pequeña empresa	92 789	98 942	4,3	6,6
Gran y mediana empresa	13 031	13 898	0,6	6,7
Administración pública	7307	7550	0,3	3,3

Fuente: INEI – Directorio Central de Empresas y Establecimiento.

La micro y pequeña empresa es la unidad económica constituida por una persona natural o jurídica, bajo cualquier forma de organización o gestión empresarial contemplada en la legislación vigente, que tiene como objeto desarrollar actividades de extracción, transformación, producción, comercialización de bienes o prestación de servicios [9].

Para efectos legales, tributarios y laborales, el tamaño empresarial es definido de acuerdo con la Ley 30056. «Ley que modifica diversas leyes para facilitar la inversión, impulsar el desarrollo productivo y el crecimiento empresarial». Esta clasifica las empresas según su nivel de ventas anuales en tres categorías: microempresa, pequeña empresa y mediana empresa [5].

Las micro y pequeñas empresas deben ubicarse en alguna de las siguientes categorías empresariales, establecidas en función de sus ventas anuales [9].

**Microempresa:** Ventas anuales hasta el monto máximo de 150 unidades impositivas tributarias (UIT).

**Pequeña empresa:** Ventas anuales superiores a 150 UIT y hasta un monto máximo de 1700 (UIT).

El 45,5 % de las microempresas en el Perú se dedican actividades de comercio y reparación de vehículos automotores y motocicletas y un 0,2 % electricidad, gas y agua.

En el caso de la pequeña empresa el 39,2 %, se dedican a actividades de comercio y un 0,4 % electricidad, gas y agua.

Tabla 2  
Perú: Microempresas según actividad económica, 2017/16

Actividad económica	2016	2017		Var % 2017/16
		Absoluto	Porcentaje	
<b>Total</b>	<b>2 011 153</b>	<b>2 183 121</b>	<b>100,0</b>	<b>8,6</b>
Agricultura, ganadería, selvicultura y pesca	33 390	35 180	1,6	5,4
Explotación de minas y canteras	9 629	17 310	0,8	79,8
Industrias manufactureras	162 273	171 895	7,9	5,9
Electricidad, gas y agua	3 711	3 989	0,2	7,5
Construcción	47 228	55 002	2,5	16,5
Comercio y reparación de vehículos automotores y motocicletas	921 044	994 525	45,5	8,0
Transporte y almacenamiento	97 674	109 868	5,0	12,3
Actividades de alojamiento	21 918	23 279	1,1	6,2
Actividades de servicio de comidas y bebidas	156 980	176 231	8,1	12,3
Información y comunicaciones	49 646	51 858	2,4	4,5
Servicios profesionales, técnicos y de apoyo empresarial	210 581	223 194	10,2	6,0
Otros servicios	297 079	320 972	14,7	8,0

Fuente: INEI – Directorio Central de Empresas y Establecimiento.

Tabla 3  
Perú: Pequeñas empresas según actividad económica, 2017/16

Actividad económica	2016	2017		Var % 2017/16
		Absoluto	Porcentaje	
<b>Total</b>	<b>92 789</b>	<b>98 942</b>	<b>100,0</b>	<b>6,6</b>
Agricultura, ganadería, selvicultura y pesca	3 057	3 104	3,1	1,5
Explotación de minas y canteras	1 007	1 141	1,2	13,3
Industrias manufactureras	9 355	9 566	9,7	2,3
Electricidad, gas y agua	407	433	0,4	6,4
Construcción	6 767	7 225	7,3	6,8
Comercio y reparación de vehículos automotores y motocicletas	36 006	38 801	39,2	7,8
Transporte y almacenamiento	9 552	9 787	9,9	2,5
Actividades de alojamiento	840	912	0,9	8,6
Actividades de servicio de comidas y bebidas	2 660	2 988	3,0	12,3
Información y comunicaciones	2 041	2 174	2,2	6,5
Servicios profesionales, técnicos y de apoyo empresarial	11 922	12 651	12,8	6,1
Otros servicios	9 175	10 160	10,3	10,7

Fuente: INEI – Directorio Central de Empresas y Establecimiento.

En el Perú, las micro y pequeñas empresas tienen una participación de aproximadamente 42 % en el PBI, cifra importante. Esta podría alcanzar niveles más elevados si las unidades económicas se encontraran registradas oficialmente. [19].

En la agricultura, la mayor parte del producto es generada, principalmente, por las pequeñas y las microempresas con escasa tecnología, una relativa capacidad de acumulación y poco acceso al financiamiento. En la tabla 4, se presentan los estimados de la contribución de las pymes en el PBI según sectores económicos.

Tabla 4  
Participación de las pymes en el PBI

Sectores económicos	Participación porcentual
Agricultura	10,40
Pesca	0,30
Minería	0,10
Manufactura	6,90
Construcción	3,10
Servicios	21,20
Total	42,0

Fuente: INEI

De cada 100 puestos de trabajo, 85 se generan gracias a la actividad de las micro y pequeñas empresas. Este es un sector intensivo en mano de obra, generando así la principal fuente de empleo en el Perú [4].

De acuerdo con el estudio «Perfil del micro y pequeño empresario peruano sobre sus hábitos de consumo», realizado por la consultora Arellano, se tiene que el 83 % de los microempresarios no tienen seguro contratado para su empresa y, en el caso de los pequeños empresarios, el porcentaje es de 58 %.

En los rubros de servicios (hoteles, restaurantes, asesoría, etc.), el 44 % de los micro y pequeños empresarios tienen como nivel educativo el superior no universitario, 39 % hasta superior universitario completo, 8 % hasta secundaria completa y 9 % otros.

En el rubro de manufactura (fabricación de productos), 36 % cuenta con educación hasta secundaria completa, 34 % hasta superior universitaria completa, 27 % superior no universitaria y 3 % otros.

En el sector comercio (ventas de productos), 40 % hasta secundaria completa, 37 % superior no universitaria, 23 % hasta superior universitaria completa y 2 % otros [3].

Todo ello fundamenta, aún más, la necesidad de contar con una guía de autoevaluación.

## METODOLOGÍA

La metodología empleada para la presente investigación es de tipo descriptiva, a partir de un diseño no experimental trasversal, enfocado en la revisión, la evaluación y la determinación de las principales herramientas de la ingeniería e indicadores.

Asimismo, se presentará un caso práctico de una empresa textil, para la validación de la guía propuesta.

### Guía de autoevaluación

La guía de autoevaluación para mypes se compone de 6 pasos a seguir, los cuales se enumeran a continuación:

#### Paso 1 Concientización en la empresa

El empresario debe tomar conciencia de la importancia de mejorar cada una de las áreas de su empresa, buscando siempre mitigar o eliminar algunas deficiencias. Es importante que los colaboradores de una micro y pequeña empresa (mype) tengan una actitud positiva hacia la mejora continua. De lo contrario, pierde fuerza el realizar una autoevaluación, si desde el corazón de la empresa no existe una predisposición a autoevaluarse, sabiendo que los resultados podrían ser negativos o deficientes.

Para ello, el empresario deberá involucrar a los miembros de la empresa en el proceso de autoevaluación para explicarles la importancia y la necesidad de identificar sus falencias. El responsable directo de llevar a cabo la autoevaluación es el dueño de la empresa o gerente asignado. Él elegirá a los responsables del área que requiere el análisis, quienes ayudarán en el desarrollo del diagnóstico.

#### Paso 2 Reunir información

El responsable de la autoevaluación solicitará a los responsables de área la información relevante para la realización del diagnóstico, que permita responder el *check list*.

Se recomienda que el plazo de entrega no sea mayor de 7 días hábiles, para evitar la manipulación de datos o la alteración por cambio de trabajo en último momento.

#### Paso 3 Check list para identificar las deficiencias o causas del problema.

El responsable de la autoevaluación deberá realizar un *check list* (ver tabla 5) con la ayuda de los responsables de cada área para identificar las deficiencias en la micro o pequeña empresa. El cual consta de 5 preguntas o enunciados por área o subárea, en donde deberá marcar la respuesta según las alternativas de la escala Likert (1 totalmente en desacuerdo – 5 totalmente de acuerdo).

Se tomarán en cuenta las principales áreas de la empresa: logística, operaciones, *marketing*, personal, finanzas, estratégico; centrándose en los dos primeros por ser *Core Business* de la mayoría de las micro y pequeñas empresas.

Tabla 5  
Check list

PREGUNTAS - ENUNCIADOS	ESCALA				
	1	2	3	4	5
<b>LOGÍSTICA - ABASTECIMIENTO</b>					
Tiene uno o dos proveedores.					
Se abastece según requerimiento de las ventas.					
No usa pronósticos ni planes de planificación de compras.					
Tiene compras urgentes de insumos indispensables.					
En ocasiones detiene su producción por falta de insumos.					
<b>LOGÍSTICA - ALMACÉN</b>					
Tiene desconocimiento de todo lo almacenado.					
Desconoce los productos que tiene en el almacén.					
Tiene déficit o sobrantes en almacén al cierre anual.					
Falta espacio y orden en el almacén.					
Pierde o se deterioran productos por un mal almacenamiento.					
Su almacenero es irremplazable.					
<b>LOGÍSTICA - DESPACHOS</b>					
Tiene errores o problemas con los despachos de la mercadería.					
Suele despachar por partes o con faltantes.					
Tiene continuas devoluciones.					
Las devoluciones de sus productos son frecuentes.					
El tiempo de entrega es más alto de lo que espera.					
No cuenta con sistemas o rutas de despacho.					
<b>OPERACIONES - MEDIO</b>					
La distribución de la planta es inadecuada.					
Los procesos no están en línea consecutiva.					
La planta requiere constante uso de luz artificial.					
Falta orden y limpieza en la zona de producción.					
El personal debe movilizarse mucho entre proceso y proceso.					
<b>OPERACIONES - PRODUCCIÓN</b>					
Se realizan constantes reprocesos.					
Se genera excesiva merma en los procesos.					
Existe falta de control en los procesos.					
Tiene procesos no estandarizados.					
Hay tiempos muertos durante el proceso.					
<b>OPERACIONES - MAQUINARIA</b>					
Los equipos suelen fallar continuamente.					
No se tiene un plan de mantenimiento de equipos.					
Los equipos están obsoletos y desfasados.					
Hay equipos que generan cuello de botella.					
El manejo de los equipos es complicado para los operarios.					
<b>OPERACIONES - PERSONAL</b>					
El personal desconoce sus funciones y responsabilidades.					
El personal es irremplazable.					
El personal no se encuentra capacitado en sus funciones.					
El personal está desmotivado y con problemas de comunicación.					
El personal comete continuas fallas.					
<b>OPERACIONES - SEGURIDAD</b>					
Los trabajadores no usan EPP.					
Se presentan constantes incidentes y/o accidentes.					
No se tienen registros de los accidentes.					
El personal no toma seriedad, no se compromete con los aspectos de seguridad.					
El personal desconoce los riesgos en su trabajo.					
<b>MARKETING</b>					
El plan de <i>marketing</i> está desactualizado.					
No se aplican las estrategias de MKT.					
Marca poco reconocida genera falta de ventas.					
Continuo remate de productos por falta de marketing en ventas.					
No hay planificación de ventas y promociones.					
<b>PERSONAL</b>					
Hay alta rotación del personal.					
Continuas inasistencias del personal.					
Existe desmotivación en los trabajadores.					
El personal no cuenta con todas las competencias requeridas del puesto.					
Continuo confrontamiento entre personal.					
<b>FINANZAS</b>					
Continuos prestamos que se realiza la empresa.					
Endeudamiento (entidades financieras).					
Falta de liquidez.					
Alto número de cuentas por pagar (proveedores).					
Alto número de cuentas por cobrar (clientes).					
<b>ESTRATÉGICO</b>					
La misión y visión están desactualizados.					
No se tienen estrategias a corto o mediano plazo.					
Falta de contacto con clientes potenciales.					
Falta de indicadores clave.					
Falta de reportes para la toma de decisiones.					

Fuente: Elaboración propia.

El responsable del diagnóstico conjuntamente con los responsables de las áreas asignados, marcarán la respuesta correspondiente a cada una de las preguntas contenidas en el *check list*, apoyando su decisión en la información obtenida en el paso 2. Esto permitirá identificar rápidamente las áreas con mayor nivel de deficiencia, ya que si se observa un mayor número de marcas en la escala 4 y 5 se determinará que «hay un problema», si las marcas están entre un rango de 1 y 2 significará que la empresa se encuentra bien en dicho aspecto y un valor de 3 representa una situación intermedia.

En caso de que se presente más de un área con problemas críticos, se deben resolver estos en forma conjunta. Si por motivos económicos no se pudiera actuar sobre todos los problemas detectados, entonces, se deberá intervenir primero los problemas relacionados con las áreas de operaciones y

logística, ya que la solución de ellos permitirá la disminución de deficiencias de otras áreas, por efecto cascada.

#### **Paso 4** **Identificación de problemas**

Con base a las áreas identificadas con ciertas deficiencias (paso 3), se aplicarán herramientas, metodologías y técnicas de análisis que permitan determinar el problema.

En la tabla 6, se presenta un resumen de las herramientas, metodologías y técnicas de análisis e identificación de problemas para cada área. El responsable del diagnóstico deberá aplicarlas según el área que el *check list* evidenció como deficiente, esto con el objeto de determinar cuál es el problema que genera esa deficiencia/causa.

Tabla 6  
*Herramientas, metodologías y técnicas de análisis*

Herramienta / técnicas	Objetivo	Área de aplicación
ABC	Similar al Pareto con más escala.	Todas
ANÁLISIS DE DATA HISTÓRICA	Permite conocer deficiencias o problemas que se presenten, tendencias o problemas puntuales.	Todas
ÁRBOL DE PROBLEMAS	Permite determinar los problemas raíz y problemas derivados para dar prioridad de resolución.	Todas
FOCUS GROUP	Ayuda a obtener información primaria respecto a una problemática.	Todas
FODA	Para identificación de fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas.	Todas
GEMBA WALK	Mira, escucha, pregunta, permite identificar y analizar un puesto	Todas
HISTOGRAMAS	Permite identificar si existe un problema en base a data analizada.	Todas
HOJA DE VERIFICACIÓN	Para verificar un proceso e identificar deficiencias.	Todas
INFORMACIÓN SECUNDARIA	Permite identificar problemas del entorno o del mismo proceso con base en datos recolectados anteriormente.	Todas
ISHIKAWA	Determinar causas raíz de un problema.	Todas
LEAD TIME	Medición de un tiempo, permite saber si es alto o bajo para luego identificar sus causas.	Todas
LLUVIA DE IDEAS	Permite identificar diversas posibles problemáticas o causales a una deficiencia en el proceso.	Todas
LOS 5 PORQUÉ	Permite analizar, por medio de 5 preguntas, si el problema es relevante o problema raíz	Todas
MATRIZ SEMICUANTITATIVA	Permite ponderar por grado de afección algún causal, problema u otro que se requiere comprar y valorizar.	Todas
PARETO	Permite determinar el 80-20 para identificar problemas base o procesos base.	Todas
8 DESPERDICIOS	Permite identificar mudas en la empresa basado en 8 aspectos.	Todas
AMOFHIT	Análisis interno de la empresa.	Estratégico Todas
ANÁLISIS VISUAL	El análisis fotográfico permite identificar y retener información de problemas en campo.	Operaciones
BALANCE SCORE	Por medio de 4 perspectivas, permite identificar deficiencias en KPI y más adelante establecer estrategias.	Estratégico
CUELLO DE BOTELLA	Permite determinar las actividades que toman mayor tiempo.	Logística Operaciones
DAP	Permite presentar visualmente el proceso separando procesos de inspecciones, demoras, etc.	Operaciones
DIAGRAMA DE ENTRADAS Y SALIDAS	Permite identificar los insumos que ingresa y los resultantes de cada parte de un proceso, para medir mermas, pérdidas u otros.	Operaciones
DIAGRAMA DE FLUJO	Se visualiza el flujo de materiales en un proceso para determinar tiempos muertos o procesos que no agregan valor.	Operaciones
DIAGRAMA DE SPAGUETI	Para determinar el recorrido de un proceso o trabajador, buscando determinar el tiempo o falta de alineación de procesos.	Operaciones
FLUJOGRAMA	Permite una visualización de un proceso para conocer los pasos del mismo y si son correctos o necesarios.	Operaciones Logística
LAY OUT	Permite visualizar el corte de una planta para identificar deficiencias	Operaciones
MEDAL	Identifica los problemas logísticos por medio de 7 claves.	Logística
MATRIZ MPC	Para determinar el perfil competitivo de la empresa, las fortalezas y debilidades respecto la competencia.	Marketing
METODOLOGIA D'ALESSIO	Para identificar problemas en aspectos estratégicos de la empresa.	Estratégico
PESTEL	Análisis del sector para saber si es positivo o negativo respecto lo analizado.	Marketing Estratégico
PORTER	Análisis del sector para identificar aspectos del entorno de oferta.	Marketing Estratégico
SCOR	Permite identificar problemas logísticos en base a 6 aspectos claves del área.	Logística
SLP	Para analizar la disposición de planta en la empresa.	Operaciones
VSM	Mapeo de la cadena de valor, permite la visualización del proceso, sus pasos y tiempos.	Logística Operaciones

Fuente: Elaboración propia.

Las herramientas, metodologías y técnicas que aplican a todas las áreas se presentan en orden alfabético, seguido, se presentan para las diversas aéreas.

Luego de aplicar la herramienta apropiada para cada caso, se identifica el problema y causa, lo que permite obtener el diagnóstico de la empresa.

En este paso, se obtiene el resultado de la problemática, el resultado de la autoevaluación.

Tabla 7  
Herramientas de mejora

HERRAMIENTA	OBJETIVO
ANDON	Permite evitar errores, basado en sistemas de colores.
BECHMARKING	Permite conocer lo mejor de la competencia y buscar igualarlo o mejorarlo.
BOX SCORE	Para determinar propuestas e indicadores a lograr.
BROWN Y GIBSON	Para determinar la ubicación óptima de la planta o empresa.
CAME	Estrategias para corregir, afrontar, mantener o explotar los resultados de un FODA.
ERP	Sistemas operativos para obtener informes y procesamiento de data que permita tomar decisiones correctas.
FIFO	Para evitar pérdidas en almacén, deterioro de mercadería, vencimiento de productos.
GUERCHET	Para determinar el espacio y/o tamaño de una planta o espacio requerido en la empresa.
HEJUNKA O PEODUCCIÓN NIVELADA	Herramienta <i>lean</i> que permite planificar, nivelar y satisfacer la demanda de los clientes durante un día o turno.
HOSHIN KANRI	Técnica para ir desde la cabeza de grupo ante un cambio en la empresa.
JUST IN TIME	Reducir tiempos improductivos.
KAIZEN	Busca la mejora continua.
KANBAN	Es un método para gestionar el trabajo intelectual, con énfasis en la entrega justo a tiempo, mientras no se sobrecarguen los miembros del equipo.
MANUFACTURA CELULAR	Para producir en línea, agrupando procesos.
MATRIZ RASCI	Para asignar correctamente las responsabilidades y funciones por puesto.
MIX DE MARKETING	Permite establecer estrategias marketeras.
MRP	Para planificar producción o abastecimiento de mercadería.
PLAN DE CAPACITACIONES	Para problemas con el personal y sus habilidades duras principalmente.
PLAN MOTIVACIONAL	Para motivar al personal sin necesidad directa de subir sueldos.
POKE YOKE	Para evitar error simples cometidos continuamente.
REINGENIERIA	Para modificar un proceso específico.
SISTEMA PULL	Para evitar sobre <i>stock</i> o almacenamiento de producto en proceso.
SMED	Permite mejorar problemas por cambio de línea.
TAKT TIME	El tiempo en el cual una pieza ha de producirse para satisfacer la necesidad del cliente, nivelando la producción a los requerimientos de venta.
TPM	Para problemas con el mantenimiento de equipos o maquinaria.
TQM	Sistema de calidad total.
5'S	Para generar orden y limpieza.

Fuente: Elaboración propia.

Las herramientas y técnicas de la tabla 7 servirán para hallar solución a los problemas identificados en cada una de las áreas evaluadas; asimismo, esta información será utilizada para redactar las conclusiones y recomendaciones del diagnóstico realizado.

### **Paso 5** **Herramientas de mejora**

El paso 4 determina los problemas, el paso 5 será para brindar diversas técnicas y herramientas que permitan optimizar, eliminar y/o mitigar los problemas y las causas identificadas en el anterior.

### **Paso 6** **Conclusiones del diagnóstico**

En este último paso, se presentan las conclusiones a las que se llega luego de seguir los pasos anteriores, logrando determinar el área en deficiencia, los problemas y causas; además, es posible seleccionar las soluciones a implementar.

El microempresario deba redactar, en este último paso, el informe del diagnóstico y la posible solución a implementar, la cual se llevaría a cabo tras autorización de la gerencia/dueño o podría solicitar una consultoría especializada si el problema es complejo.

**CASO ESTUDIO:**

**Textiles S. A. C.**

Para facilitar la comprensión de la guía de autoevaluación desarrollada, se aplicarán los seis pasos de la guía en el caso de estudio de una pequeña empresa de textil de Arequipa, la cual pertenece al rubro de confección de prendas textiles de fibra de alpaca.

**Paso 1**  
**Concientización en la empresa**

Textiles S. A. C. inició sus actividades económicas en el año 2005. El dueño entiende que se requiere mejorar y optimizar su negocio debido a la creciente competencia, por lo que imparte en los miembros de la organización la necesidad de analizarse para continuar creciendo.

Por medio de una reunión con todos los trabajadores de las diversas áreas, el dueño explica qué se necesita lograr como empresa para perfeccionar los números de esta.

Todos los miembros toman conciencia de ello y están dispuestos a trabajar en conjunto para mejorar, teniendo en cuenta que este proceso les puede demandar tiempo adicional o hacer notar sus falencias.

El encargado de la autoevaluación, el dueño en esta ocasión, designa responsables por área, como facilitadores del proceso.

**Paso 2**  
**Reunir información**

El encargado de la autoevaluación se reúne con los responsables de las distintas áreas, para solicitarles la información que se requiere para el desarrollo del diagnóstico.

Se otorga un plazo de 7 días hábiles para poder recaudar la información e indicadores relevantes de cada una de las áreas de la empresa.

Esta información es analizada por cada uno de los responsables de área, dada su experiencia y coyuntura de la empresa.

**Paso 3**  
**Check List para identificar las deficiencias o causas del problema**

Se reúne nuevamente el responsable del diagnóstico con los responsables de área, para evaluar la información obtenida en el paso 2 y realizar el *check list*, dando respuesta a las preguntas de la tabla 5.

Tabla 8  
Check list

PREGUNTAS - ENUNCIADOS	ESCALA				
	1	2	3	4	5
<b>LOGÍSTICA - ABASTECIMIENTO</b>					
Tiene uno o dos proveedores.		X			
Se abastece según requerimiento de las ventas.	X				
No usa pronósticos ni planes de planificación de compras.		X			
Tiene compras urgentes de insumos indispensables.	X				
En ocasiones detiene su producción por falta de insumos.		X			
<b>LOGÍSTICA - ALMACÉN</b>					
Tiene desconocimiento de todo lo almacenado.	X				
Desconoce los productos que tiene en el almacén.					
Tiene déficit o sobrantes en almacén al cierre anual.		X			
Falta espacio y orden en el almacén.	X				
Pierde o se deterioran productos por un mal almacenamiento.	X				
Su almacenero es irremplazable.	X				
<b>LOGÍSTICA - DESPACHOS</b>					
Tiene errores o problemas con los despachos de la mercadería.	X				
Suele despachar en partes o con faltantes.	X				
Tiene continuas devoluciones.	X				
Las devoluciones de sus productos son frecuentes.	X				
El tiempo de entrega es más alto de lo que espera.	X				
No cuenta con sistemas o rutas de despacho.	X				
<b>OPERACIONES - MEDIO</b>					
La distribución de la planta es inadecuada.	X				
Los procesos no están en línea consecutiva.			X		
La planta requiere constante uso de luz artificial.			X		

PREGUNTAS - ENUNCIADOS	ESCALA				
	1	2	3	4	5
Falta orden y limpieza en la zona de producción.				X	
El personal debe movilizarse mucho entre proceso y proceso.		X			
<b>OPERACIONES - PRODUCCIÓN</b>					
Se realizan constantes reprocesos.					X
Se genera excesiva merma en los procesos.					X
Existe falta de control en los procesos.				X	
Tiene procesos no estandarizados.				X	
Hay tiempos muertos durante el proceso.					X
<b>OPERACIONES - MAQUINARIA</b>					
Los equipos suelen fallar continuamente.		X			
No se tiene un plan de mantenimiento de equipos.	X				
Los equipos están obsoletos y desfasados.	X				
Hay equipos que generan cuello de botella.			X		
El manejo de los equipos es complicado para los operarios.		X			
<b>OPERACIONES - PERSONAL</b>					
El personal desconoce sus funciones y responsabilidades.		X			
El personal es irremplazable.		X			
El personal no se encuentra capacitado en sus funciones.		X			
El personal esta desmotivado y con problemas de comunicación.		X			
El personal comete continuas fallas.		X			
<b>OPERACIONES – SEGURIDAD</b>					
Los trabajadores no usan EPP.	X				
Se presentan constantes incidentes y/o accidentes.	X				
No se tienen registros de los accidentes.	X				
El personal no toma seriedad, no se compromete con los aspectos de seguridad.	X				
El personal desconoce los riesgos en su trabajo.	X				
<b>MARKETING</b>					
El plan de <i>marketing</i> está desactualizado.	X				
No se aplican las estrategias de MKT.		X			
Marca poco reconocida genera falta de ventas.	X				
Continuo remate de productos por falta de <i>marketing</i> en ventas.	X				
No hay planificación de ventas y promociones.	X				
<b>PERSONAL</b>					
Hay alta rotación del personal.	X				
Continuas inasistencias del personal.	X				
Existe desmotivación en los trabajadores.	X				
El personal no cuenta con todas las competencias requeridas del puesto.			X		
Continuo confrontamiento entre personal.	X				
<b>FINANZAS</b>					
Continuos prestamos que se realiza la empresa.	X				
Endeudamiento (entidades financieras).	X				
Falta de liquidez.	X				
Alto número de cuentas por pagar (proveedores).		X			
Alto número de cuentas por cobrar (clientes).		X			
<b>ESTRATÉGICO</b>					
La misión y la visión están desactualizadas.	X				
No se tienen estrategias a corto o mediano plazo.		X			
Falta de contacto con clientes potenciales.	X				
Falta de indicadores clave.		X			
Falta de reportes para la toma de decisiones.		X			

Fuente: Textiles S.A.C.

Según la indicación anterior, 1 es completamente en desacuerdo y 5 completamente de acuerdo. En ese caso, se estaría indicando que hay deficiencias en el área de operaciones.

Como se observa, las causas del problema de Textiles S.A.C. se encuentran en el Área de Operaciones, principalmente, en el proceso mismo y en los aspectos de orden y limpieza en el área.

Con dicho resultado, el responsable del área junto con el responsable del diagnóstico procede a realizar el paso 4, que permitirá saber cuál es la causa de la problemática.

**Paso 4**  
**Identificación de problemas**

Conociendo que las deficiencias de la empresa se presentan en el Área de Operaciones, es necesario conocer en cuál de los procesos se debe enfocar la solución atacar primero. Textiles S.A.C. confecciona varios tipos de productos con procesos diferentes, por lo que es necesario saber cuál es el principal producto, sobre el que se debe tomar acción.

Basándonos en las herramientas de análisis de la tabla 6, se escogen las herramientas a aplicar según los problemas identificados en el paso anterior. Las cuáles serán las siguientes:

**PARETO**

Se realiza un diagrama de Pareto de los diversos productos de la empresa, teniendo en cuenta el margen de contribución de cada uno durante el año 2018 [6], para identificar el producto estrella.

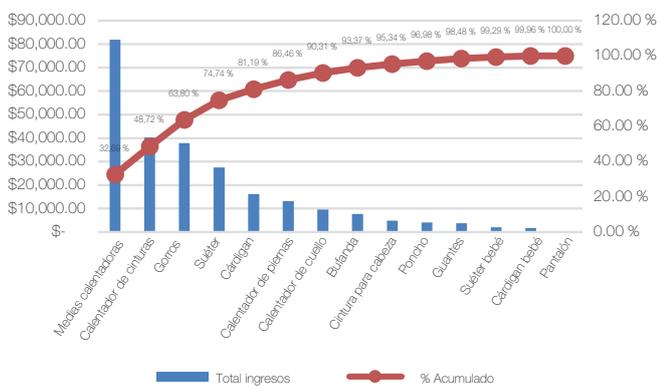


Figura 2. Pareto de margen de contribución de productos  
Fuente: Textiles S.A.C.

Esto permitió determinar que el 32,69 % del margen de contribución económica de la empresa corresponde a línea de producción de «medias calentadoras», por lo que dicho proceso es el que se analizará buscando identificar el problema y sus causas.

**DAP**

Con base en el proceso de confección de «medias calentadoras», se realiza un diagrama de análisis de procesos para facilitar su comprensión, manejo tiempos, desarrollo de actividades y otros aspectos relacionados [13].

Tabla 9  
Resumen DAP

Actividad	Cantidad
Operación	14
Inspección	5
Transporte	12
Demora	0
Almacenamiento	3

Fuente: Textiles S. A. C.

Se observa, en la tabla 9, que existen muchos transportes; asimismo, las operaciones que agregan valor son menos del 50 % de total de actividades

**DATA HISTÓRICA**

Se realiza el análisis de data histórica de los últimos 3 años para identificar posibles problemas o tendencias, el responsable de área y el responsable del diagnóstico examinan el DAP y la realidad del proceso y deciden estudiar los reprocesos [16].

Tabla 10  
Número de reprocesos

Año	Total cantidad solicitada	Total reprocesos	% reproceso
2016	12 483	362	2,90 %
2017	12 644	347	2,74 %
2018	17 521	442	2,52 %

Fuente: Textiles S.A.C.

Como se observa en la tabla 10, el número de reprocesos parece bajo y en mejora, pero al pasar dicho dato a dinero, considerando los reprocesos del 2018, el precio de venta es de \$5,50 y el costo unitario de producción es de \$ 4,42. Así, se obtiene un costo total de producción de \$ 1954,52.

Además, basándose en la contribución, de las «medias calentadoras» se analiza la productividad de estos.

Tabla 11  
Productividad

Año	Unidades	Utilidad (\$/año)	Productividad (media c./ \$)
2016	12 483	22 902,88	0,545
2017	12 644	20 181,54	0,627
2018	17 521	38 886,50	0,451

Fuente: Textiles S. A. C.

Se determinó, según la tabla 11, que la productividad media disminuyó en un -0,28 % en el año 2018 con referencia al 2017, por lo que se termina de confirmar la problemática en el área. Aquí el problema sería la baja productividad.

### Mapeo de flujo de valor (VSM)

Se toma la herramienta de mapeo de la cadena de valor por su practicidad visual del proceso y para identificar los tiempos productivos, a continuación, se muestra el resumen de dicha herramienta [17].

Tabla 12  
Resumen VSM

	Subtotal	Total (min)
Tiempo no agrega valor	20 días, 4 horas, 37 min	29 016,66
Tiempo de proceso	133,39 min	133,39
Tiempo de entrega	20 días, 6 horas y 50 min	29 150,05

Fuente: Textiles S. A. C.

Se observa en la tabla 12 que el tiempo que no agrega valor al producto es considerablemente alto, por lo que para identificar el causal se utiliza la técnica de 8 desperdicios.

### 8 DESPERDICIOS

Es necesario identificar la causa de los tiempos que no agregan valor determinados en tabla 12, por lo que se realiza la herramienta de 8 desperdicios para identificar la problemática y sus causales [17].

Al ejecutar la herramienta, se obtuvo problemas en los 8 aspectos analizados, en la tabla 13, se muestra el resultado del análisis del primer desperdicio.

Tabla 13  
Conclusión del análisis del desperdicio de despilfarro de corrección

Problema	Área	Causa	Efecto
Alto número de reprocesos	Tejido	Deficiente control de tejido.	Generación de órdenes de reprocesos por parte de procesos posteriores.
	Lavado - Secado	Procesamiento incorrecto de la prenda, malogrando textura deseada.	Generación de órdenes de reprocesos para completar lote de producción.
	Etiquetado	Los trabajadores no conocen la importancia de hacer bien el trabajo.	Retraso de lote en proceso hasta completarlo correctamente.  Generación de orden de reposición por parte de control de calidad.  Pérdida de tiempo para retiro de etiqueta y unión de una nueva.

Fuente: Textiles S.A.C.

Se observa el problema, las áreas que afectan, la causa y el efecto del mismo.

Con el resultado de los 8 análisis se realiza el resumen en la tabla 14.

Tabla 14  
Resumen del análisis de 8 desperdicios

Desperdicio	Problema
1 Despilfarros de corrección	Deficiente seguimiento y control de procesos de calidad.
2 Transportes innecesarios	Lotes excesivamente grandes. Stocks Intermedios. Largas distancias de transporte de producto en proceso.
3 Movimientos innecesarios	Carencia de implementos para optimizar labor. Inmobiliario inadecuado para el proceso.
4 Despilfarros de espera	Espera de personal a finalización de actividad de otro personal. Elaboración de tareas indirectas preparativas para el proceso principal. Recursos humanos adicionales necesarios para inspecciones y retrabajos.
5 Inventarios	Almacenamiento excesivo. Excesivo producto intermedio.
6 Sobre procesamiento o procesamiento incorrecto	Carencia de estandarización de proceso de control de tejido.
7 Sobreproducción	Fabricación de productos no comprendidos en el pedido. Fabricación de acuerdo con la capacidad de línea y no según demanda del cliente.
8 Planificación	No contar con plan de eliminación de problemas.

Fuente: Textiles S. A. C.

La información de la tabla 14 permite conocer los problemas, de igual forma, el desglose de esta con los 8 desperdicios da las causas y los efectos; con toda la información de dicho análisis, se procese a realizar la identificación de cuellos botella o procesos de excesivo tiempo.

### ABC – Cuello de botella

El ABC puede ser usado para diversos motivos, en esta ocasión, permite identificar el cuello de botella. Con base en la información obtenida, se realiza un ABC [6] en la tabla 15, con los tiempos por proceso, considerando una cantidad requerida de 17 600 pares de medias calentadoras (escenario conservador para el año 2019), y tomando el mayor tiempo (55,34 días como 100 %). Así, se determinan los tiempos altos, llamados cuello de botella [1] sobre los que se debe actuar para reducir los tiempos de la tabla 12.

Tabla 15  
ABC, tiempos cuello de botella

n.º	Proceso	Cantidad requerida	subtotal (min)	Total (días)	Puntaje
1	Tejido	17 600	11 101,20	11,56	20,90 %
2	Control Tejido	17 600	1 645,60	2,64	4,77 %
3	Desglose y remallado	17 600	17 265,60	55,34	100,00 %
4	Lavado	17 600	3 520,00	7,33	13,25 %
5	Secado	17 600	4 400,00	9,17	16,56 %
6	Plancha y armado	17 600	9 988,00	32,01	57,85 %
7	Conteo, armado y despacho	0	0	0	0,00 %
8	Limpieza	17 600	3 999,60	51,28	92,66 %
9	Plancha final	17 600	12 909,60	55,17	99,69 %
10	Etiquetado	17 600	8 800 00	28,21	50,97 %
11	Control final	17 600	12 056,00	38,64	69,83 %
12	Encintado y embolsado	17 600	4 693,33	15,04	27,18 %
13	Embalado	17 600	176,00	0,56	1,02 %

Fuente: Textiles S. A. C.

Con dicha información, se determinan los procesos a tratar con mayor detalle por presentar tiempos prolongados.

### ISHIKAWA

Todos los problemas ya identificados hasta el momento deben plasmarse en un solo esquema para facilitar su comprensión y análisis, por los que se plasman en un diagrama causa-efecto, Ishikawa [8].

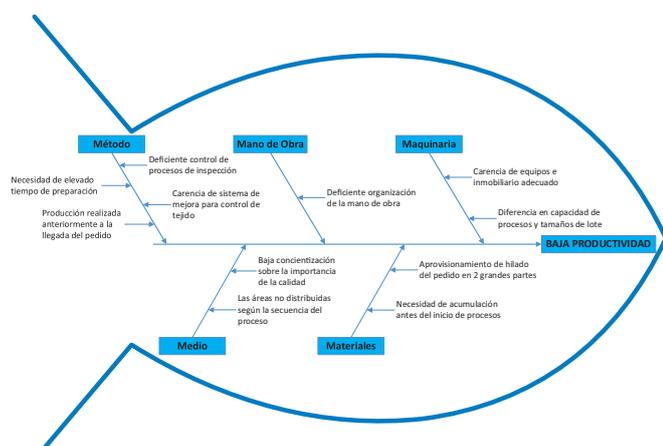


Figura 3. Ishikawa de problemas.  
Fuente: Textiles S. A. C.

En la figura 3 se resumen los resultados ya obtenidos del: DAP, Análisis de data histórica, VSM, 8 desperdicios, ABC-Cuello de botella.

### MATRIZ SEMICUANTITATIVA

Los problemas resumidos en la figura 3 serán ponderados por medio de la matriz semicuantitativa [14] para dar prioridad, junto con un árbol de problemas [11], con la finalidad de determinar la relevancia de un problema respecto a otros, cuáles son causales o raíz de otros.

### PARETO

Finalmente, con la información de la matriz semicuantitativa, se identifica la importancia de cada problema para plasmarlo en un diagrama de Pareto, que nos indica los principales puntos a mejorar en la empresa [6].

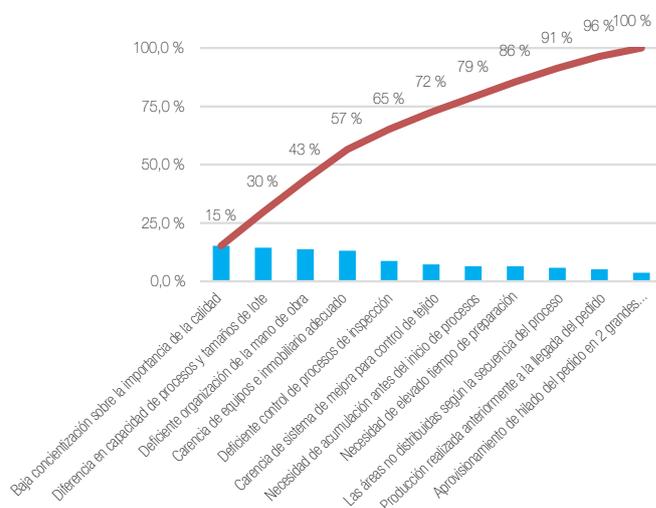


Figura 4. Pareto de problemas.  
Fuente: Textiles S. A. C.

La figura 4 aclara cuáles son los principales puntos de mejorar en la empresa: el Área de Operaciones.

### Paso 5

#### Herramientas de mejora

Con base en los problemas determinados luego de la autoevaluación, se seleccionan alternativas para las deficiencias

encontradas. Teniendo en cuenta los problemas de la figura 4, se busca en la tabla 7 posibles alternativas. Luego, por medio de la herramienta de los 5 porqués [15], se logró determinar cuáles de las alternativas serían las óptimas.

Tabla 16  
Resumen del análisis de 8 desperdicios

Problemas	Alternativas propuestas
Baja concientización sobre la importancia de la calidad.	• Kaizen - Capacitaciones
Deficiente control de procesos de inspección.	
Diferencia en capacidad de procesos y tamaños de lote.	• Kanban • Rasci
Deficiente organización de la mano de obra.	
Carencia de equipos e inmobiliario adecuado.	• 5'S • Poka Yoke

Fuente: Textiles S. A. C.

En la tabla 16, se presentan las alternativas de solución a los problemas de la empresa.

### Paso 6 Conclusiones del diagnóstico

Luego de aplicar la «guía de autoevaluación», se determinó que la problemática de la empresa está en su línea de operación del producto «medias calentadoras», concentrándose en el proceso de la confección de este producto por contribuir con un 32,69 % del margen total de la empresa. Este cuenta con un total de 34 actividades, de las cuales se determinó, según un DAP, que solo 14 de ellas agregan valor. Asimismo, se identificó que se cuenta con 442 reprocesos que conllevan a una pérdida de costos de fabricación de 1954,52 dólares por año. A consecuencia de ello, la productividad bajó en los años 2017 a 2018 de 0,627 a 0,451. Esta disminución se debe también a un total de tiempo que no agrega valor de 29 016,66 minutos. Este lapso se centra en 3 procesos de cuello de botella, por lo que se concluye que se debe implementar herramientas de mejora, para lograr reducir el tiempo de producción y, de esta forma, incrementar la productividad.

## CONCLUSIONES

Finalmente, se concluye, en el presente artículo, que la metodología propuesta permite a las micro y pequeñas empresas identificar las áreas que presentan mayores deficiencias, para luego identificar el problema y causales por medio de técnicas establecidas y plantear propuestas sobre la base de un listado de técnicas propuestas.

- La guía de autoevaluación le permite al micro y pequeño empresario identificar el área o áreas con mayor deficiencia, determinar los problemas encontrados, medirlos y plantear posibles soluciones a los mismos.

- La predisposición de los trabajadores para contribuir en este proceso es vital para llevar a cabo el autodiagnóstico de la empresa.
- Las herramientas de análisis y mejora son empleadas para proponer soluciones a los problemas encontrados en las áreas, como resultado de la aplicación del *check list* por parte del responsable del diagnóstico y responsables de área.

## REFERENCIAS

- [1] Aguilera, C. I. (2000). Un enfoque gerencial de la teoría de las restricciones. *Estudios gerenciales*, 53-70.
- [2] Arinaitwe, J. K. (2006). Factors Constraining the Growth and Survival of Small Scale Businesses. A Developing Countries Analysis. *Journal of American Academy of Business*, 8(2), 167-178.
- [3] Arellano. (2015) *Estudio del Perfil del Micro y Pequeño Empresario sobre sus Hábitos de Consumo*.
- [4] Chau, Estefanía. (2018, 29 de mayo). Produce: Micro y Pequeñas Empresas aportan 24 % al PBI Nacional [Publicación web]. Agencia Peruana de Noticias.
- [5] Chávez, Martha., Quevedo, Isabel & Rivero, Eduardo. (2018). *Planes de Negocio: Un Enfoque Contable y Financiero*. Lima: Universidad del Pacífico.
- [6] Delgado, R. (2008). El diagrama de Pareto. *Revista Virtual de la Universidad Católica de Occidente*, 47, 48-49.
- [7] Herrera, W. D. M., & Costa, H. G. (2005). Una Forma de Clasificación Multicriterio-ABC. *Pesquisa e Desenvolvimento Engenharia de Produção*, (4), 55-66.
- [8] Ishikawa, K. (1943). Diagrama Causa-Efecto.
- [9] Ley N.º 28015 (2003, 3 de julio). Lima, Perú: Congreso de la Republica. Recuperado de <http://www.leyes.congreso.gob.pe/Documentos/Leyes/28015.pdf>
- [10] Ley N.º 30056 (2013, 2 de julio). Lima, Perú: Congreso de la Republica. Recuperado de <http://www.leyes.congreso.gob.pe/Documentos/Leyes/30056.pdf>.
- [11] Martínez, R., & Fernández, A. (2010). Árbol de problema y áreas de intervención. *Metodologías e instrumentos para la formulación, evaluación y monitoreo de programas sociales*. Recuperado de [https://www.comfama.com/contenidos/servicios/Gerenciasocial/html/Cursos/Cepal/memorias/CEPAL\\_Arbol\\_Problema.pdf](https://www.comfama.com/contenidos/servicios/Gerenciasocial/html/Cursos/Cepal/memorias/CEPAL_Arbol_Problema.pdf)
- [12] Perú: Instituto Nacional de Estadística e Informática (2017). *Perú: Estructura Empresarial, 2017*. Lima: INEI.
- [13] Ramos, R. (2015). Diagrama de análisis de procesos.
- [14] Restrepo, I., Domínguez, I. C., Corrales, S. M., & Patricia Bastidas, S. (2011). *Lineamientos para la planificación*

y el diseño de sistemas de uso múltiple del agua: En zonas rurales de Colombia. Programa Editorial UNIVALLE.

- [15]** Ries, E. (2012). *Metodología lean startup*. Barcelona: Deusto. Recuperado de <https://www.casadellibro.com/libro-el-metodo-de-lean-startup/9788423409495/1953644>
- [16]** Rojas López, M. D., Correa Espinal, A., & Gutiérrez Roa, F. (2012). Sistemas de control de gestión. *Editorial Ediciones de la U, Bogotá-Colombia*, 51-53.
- [17]** Rother, M., & Shook, J. (2003). *Learning to see: value stream mapping to add value and eliminate muda*. Lean Enterprise Institute.
- [18]** Sauser, W. I., Jr. (2005). Starting Your Own Business? Pre-prepare for Success. *SAM Management in Practice*, 3(1), 1-4.
- [19]** Valdivieso, Adam. Las Pymes y su Aporte a la Economía Peruana. *Revista de la Escuela de Negocios*. Universidad de Lima.

Región Arequipa. Economista por la Universidad Católica Santa María. Magíster en Ingeniería Industrial con mención en Gestión de la Producción en la Universidad Nacional de San Agustín. Scrum Master Certified, Certified ID 713453. Conferencista en congresos internacionales y Nacionales en proyectos de inversión. Miembro del Project Management Institute (PMI)®, Member ID: 3100459. Actualmente, se desempeña como encargado de jefatura de Estudios Generales en Tecsup sede Sur.

@ jrojas@tecsup.edu.pe

### **Carolina Guerra Ortiz**

Ingeniera industrial con MBA en la Universidad Rey Juan Carlos en España, magíster en Supply Chain de la Universidad de Barcelona. Actualmente, cursa un doctorado en Gestión Estratégica en la Pontificia Universidad Católica del Perú. Tiene más de 7 años de experiencia en *supply*, compras, planificación, gestión y administración en empresas del sector minero y consumo masivo. Aplica herramientas de gestión y optimización, orientado hacia la productividad y optimización de KPI. Posee experiencia en docencia de educación superior por más de 6 años, aplicando TIC y plataformas virtuales.

@ cguerrao@tecsup.edu.pe

## **ACERCA DE LOS AUTORES**

### **SMC™ José Eduardo Rojas Gómez**

Asesor y consultor de proyectos de inversión pública y privada, con más de 15 años de experiencia en la formulación y evaluación de proyectos públicos y privados. Exconsultor del Banco de Proyectos de la

Recibido 17-05-19    Revisado 18-08-19    Aceptado 19-08-19



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.

# NUEVAS CARRERAS DE TECSUP



LOGÍSTICA DIGITAL **2 AÑOS**

+ 1 año Titúlate en  
PRODUCCIÓN Y  
GESTIÓN INDUSTRIAL



ADMINISTRACIÓN  
DE DATOS **2 AÑOS**

+ 1 año Titúlate en  
BIG DATA Y CIENCIA  
DE DATOS



MODELADO Y  
ANIMACIÓN 3D **2 AÑOS**



BIG DATA Y  
CIENCIA DE DATOS **3 AÑOS**



## Lima

Av. Cascanueces 2221,  
Santa Anita  
📞 920 412 516

## Arequipa

Urb. Monterrey Lote D-8,  
José Luis Bustamante y Rivero  
📞 945 583 620

## Trujillo

Mz. A Sub Lote 1 Urb. Tecsup  
Víctor Larco Herrera  
📞 978 855 909

**El taller propuesto promueve la participación activa de los estudiantes, desarrollando un trabajo colaborativo donde se observó liderazgo,** entusiasmo por el uso de la tecnología, así como solidaridad para compartir conocimientos con los participantes de la sesión.



## Taller de reforzamiento para mejorar el rendimiento académico en el curso de Química de un ciclo de preparación para ingresar a un instituto superior

### *Reinforcement Workshop to Improve Academic Performance in the Course of Chemistry of a Cycle of Preparation Period to enter a Higher Institute*

#### RESUMEN

El presente trabajo de investigación aplicada tiene como objetivo principal evaluar la eficacia de una sesión de clase de tipo taller de reforzamiento, con la finalidad de mejorar el rendimiento académico de los alumnos en el curso de Química del ciclo de preparación para el ingreso a un instituto de educación superior.

Se aplica este taller a cuatro aulas del ciclo PREPARATEC del curso de Química en un periodo de un año (2017), en dos semanas previas a la práctica calificada para evaluar la eficacia.

Las notas de la primera práctica servirán para comparar con las otras dos prácticas calificadas mediante una prueba de comparación estadística para evaluar si hay diferencias significativas en las notas.

El desarrollo del taller grupal comprende tres etapas: test virtual con el uso de Socrative con el celular, desarrollo de problemas y sustentación de su respuesta en pizarra.

Los resultados estadísticos señalan que, de siete pruebas comparativas en las cuatros secciones, cuatro tienen diferencia significativa, es decir, hay un aumento en las notas cuando se aplica el taller propuesto respecto a la práctica de aquel que no tuvo dicho taller.

Finalmente, se observa que en promedio del aula hay un incremento en las notas, lo que permite inferir que los talleres mejoran el rendimiento académico de los estudiantes.

#### ABSTRACT

*The main objective of this research is to evaluate the effectiveness of a class session of a reinforcement workshop to improve the academic performance of students in the course of Chemistry in the preparation period for entering a higher education institute. This workshop is given to four groups of the PREPARATEC cycle of the course Chemistry in one year (2017), two weeks before the test, which evaluates the effectiveness.*

*The scores of the first test will be compared with those of the other two tests using a statistical comparison to evaluate if there are significant differences in the scores.*

*The development of the group workshop comprises three stages: virtual test applying Socrative by using a smartphone, problems development, and presentation of problems solutions at the class board.*

*The statistical results indicate that out of seven comparative tests in the four sections, four have a significant difference, that is to say, there is an increase in the scores when the proposed workshop is applied, against to one that did not have this workshop.*

*Finally, it is observed that in the classroom there is an increase in the scores, which implies that the workshops improve the academic performance of students.*



#### Palabras clave

Socrative, taller, reforzamiento, química, educación, trabajo colaborativo.

#### Key words

Socrative, chemical, reinforcement, workshop, education, collaborative work.

## INTRODUCCIÓN

El uso de la tecnología actualmente implica un mayor desafío para los docentes al enseñar ciencias básicas como la química. El volumen de conceptos que los alumnos tienen que aprender y aplicar es numeroso. Es por ello, el reforzar los temas enseñados mediante talleres de grupos incorporando las herramientas TIC se hace interesante con la finalidad de lograr el objetivo de enseñanza aprendizaje.

El objetivo de este trabajo es evaluar la eficacia de una sesión tipo taller de reforzamiento con la finalidad de mejorar el rendimiento académico de los estudiantes en el curso de Química.

Los talleres en pedagogía están compuestos por actividades importantes en el proceso de enseñanza, aprendizaje que incentiva el trabajo colaborativo por grupos.

La propuesta se elabora con base en la práctica en la enseñanza del curso de Química, como parte de una sesión de clase incorporada en el temario y se elabora un plan de clase que permita reforzar temas ya desarrollados previos a la práctica calificada. Para ello, se incorpora en una primera etapa del taller el uso de Socrative con preguntas de respuestas rápidas de tipo test que considere una evaluación de conceptos y algunas aplicaciones. En la segunda parte, se plantean tres problemas para desarrollar, finalmente en una tercera etapa los primeros

grupos sustentan en pizarra los problemas para toda el aula y así compartir sus resultados.

Finalmente, se realizan dos talleres previos a la práctica calificada 2 y 3, por lo tanto, se comparan las notas de la primera práctica versus la segunda y tercera para evaluar, estadísticamente, si hay diferencias significativas y, con ello, concluir acerca de la eficacia del taller propuesto.

## FUNDAMENTOS

### Talleres pedagógicos

Según Pestalozzi, «los conocimientos sin actividades prácticas constituyen el don más funesto que un genio enemigo ha hecho a nuestra época» [2].

Un taller del tipo pedagógico, entre muchos otros objetivos, debe aplicar los conceptos aprendidos en el aula y perfeccionarlos, en este caso, con el desarrollo de problemas.

El taller normalmente está orientado a un trabajo grupal, lo cual permite desarrollar un trabajo colaborativo.

Es muy importante recordar que el éxito de un taller, en cuanto al logro del proceso de enseñanza y aprendizaje, está sustentado en estudios que se resumen en la figura 1.

## El cono del aprendizaje de Edgar Dale



Figura 1. Pirámide de aprendizaje.  
Fuente: [7]

Es muy importante definir la metodología con la cual se lleva el taller. Mercedes Sosa propone una estructura que sirva de apoyo para tomar en consideración al momento de elaborar un taller pedagógico. Según Sosa [6], hay que tener en cuenta los siguientes elementos:

- **Planeación:** Es la estructuración del taller a lo largo del tiempo, tomando en cuenta el tema a tratar, los participantes, dónde se realiza, el tiempo (entre 2 y 3 horas) y los recursos que se usarán.
- **Organización:** Es la administración y el manejo de todos los componentes del taller, así como las funciones de los componentes del mismo, como los estudiantes, el coordinador, los recursos, el tiempo y el lugar.
- **Dirección:** El coordinador es quien dirige y organiza el proceso para que se dé el aprendizaje. También se habla del facilitador del taller.
- **Coordinación:** Se refiere al buen manejo de las actividades en cuanto a tiempo, secuencia y cumplimiento de las funciones de cada componente y que los recursos sean bien utilizados.
- **Control y evaluación:** Aquí se verifica que se desarrolle el taller según lo planeado, es decir, ayuda a reflexionar y extraer ideas sobre el cumplimiento del proceso del aprendizaje final.

### Aprendizaje colaborativo

Se fundamenta en el trabajo grupal mediante el desarrollo de actividades que permitan lograr un objetivo grupal, más allá de la adquisición de conocimiento, se sustenta la aplicación en la resolución de problemas y se desarrollan competencias que una evaluación cognitiva no toma en cuenta.

Entre las ventajas de esta técnica cabe mencionar: trabajo colectivo, desenvolvimiento social, comunicación en grupo, organización, solidaridad, liderazgo, entre otras.

Johnson y Johnson [5] mencionan estudios realizados donde se compara el trabajo colaborativo con el trabajo individual de escolares. Los autores destacan el primero en tres grandes áreas: esfuerzo al logro, relaciones interpersonales positivas y salud mental.

### Socrative

Está considerada como una herramienta TIC (tecnología de información y comunicación) que en la actualidad sirve como herramienta en las diversas técnicas de enseñanza y aprendizaje. Es una aplicación diseñada especialmente para móviles, que permite realizar en tiempo real un test de evaluación en el aula, ya sea individual o grupal. Es de fácil uso tanto para los estudiantes como para el docente en la elaboración del material. La aplicación es una herramienta que incentiva la participación de los estudiantes en el aula, sorprendidos por la utilidad de su celular con fines de aprendizaje.

El *feedback* inmediato, la participación y la sencillez en su uso son tres elementos clave de Socrative que permiten cumplir con el objetivo en este taller.



Figura 2. Desarrollo por equipos usando Socrative. Fuente: [8]

## METODOLOGÍA

Por su finalidad, es una investigación aplicada en este trabajo, debido a que se desea contribuir con la mejora del proceso de enseñanza a partir de herramientas y métodos ya existentes [1].

### Aplicación

Esta investigación se aplicó en el curso de Química del ciclo PREPARATEC 2017-1 y 2017-2 en aulas AB y CD, es decir, 4 aulas. Se dictaron dos talleres de reforzamiento en las semanas previas a la segunda y tercera práctica calificada, con la finalidad de evaluar mediante las notas obtenidas si hay mejora en el rendimiento académico comparando con la primera practica que no tiene un reforzamiento previo tipo taller. Ejemplo aula 2017-2 AB:

Tabla 1  
Características de los talleres de reforzamiento

Taller	Tema	Fecha	Tiempo
1	Distribución electrónica Cálculos químicos	16-05-17	150 min
2	Reacciones químicas Estequiometría	13-06-17	150 min

Coordinador: Docente  
Alumnos participantes: 38

Fuente: Elaboración propia.

### Organización/planificación de sesión

En el desarrollo del taller propuesto, se integran, en las diversas etapas, los métodos y las técnicas que permiten cumplir con el objetivo, por ejemplo, Socrative durante el test virtual.

A continuación, se plantea la estructura de la sesión de tipo taller de reforzamiento a realizar, con el fin de mostrar la secuencia de desarrollo y que sirva como guía al docente. Cabe destacar que existen diversos modelos de plan de clase, los cuales se pueden aplicar a criterio del docente o la institución.

Tabla 2  
Estructura de la propuesta de taller de reforzamiento

Fases	Actividad	Método/ Técnica	Tiempo
<b>Inicio</b>	Saludo inicial Toma de asistencia	Expositivo / uso de hoja de asistencia	10 min
<b>Motivación</b>	Importancia del taller Explicación del desarrollo del taller Formación de grupos (Máximo 4)	Expositivo, participativo / uso de pizarra	15 min
<b>Transferencia y aplicación</b>	1) Test virtual de preguntas conceptuales y respuesta cortas (5 a 7 preguntas)	Aprendizaje colaborativo / uso de Socrative con celular y/o Tablet	30 min
	2) Desarrollo y resolución de problemas aplicativos (cantidad: 3)	Hoja con formato de evaluación escrita	40 min
	3) Sustentación en pizarra de los tres primeros grupos(1 pregunta c/u)	Exposición / preguntas del aula ( <i>feedback</i> )	30 min
<b>Cierre</b>	- Revisión de los resultados de Socrative - Recomendaciones generales	Expositivo / uso de multimedia e internet	15 min

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se realizó una prueba de significancia estadística con las notas de la primera práctica calificada donde no se realizó el taller previamente en comparación con las notas de la segunda y tercera prácticas calificadas, donde previamente se realizaron los talleres de reforzamiento. Se analizará si hay una mejora en el rendimiento académico al aplicarlos, lo cual es parte de los objetivos de un proceso de enseñanza y aprendizaje.

## RESULTADOS

Luego de aplicar los talleres de reforzamiento según lo planificado, se pueden resaltar los siguientes aspectos cualitativos y cuantitativos:

### Aspectos cualitativos

- Se observó una activa y entusiasta participación de los estudiantes, sobre todo, el uso de su celular como herramienta de aprendizaje.
- Los estudiantes empezaron a trabajar en forma colaborativa, donde se percibe que un líder asume este papel y organiza al grupo en la mayoría de los casos.
- Se genera un espíritu de competencia al trabajar con Socrative, debido a que se muestra por multimedia el avance de su participación en forma de juego espacial y con música de fondo, lo que incentiva su participación.

- La sustentación permite ver el desarrollo y los resultados de los problemas, logrando que comparen y discutan entre grupos para llegar a un consenso con la conducción del docente.



Figura 3. Test virtual usando SOCRATIVE.  
Fuente: Elaboración propia.



Figura 4. Desarrollo grupal de problemas.  
Fuente: Elaboración propia.



Figura 5. Sustentación por grupos de problemas resueltos.  
Fuente: Elaboración propia.

### Aspectos cuantitativos

Se muestran, a continuación, los resultados de las tres prácticas calificadas que luego serán analizadas para evaluar si hay mejoras en el rendimiento académico.

Tabla 3  
Notas de las prácticas calificadas

	2017-2 AB			2017-2 CD			2017-1 AB			2017-1 CD		
	PRÁCTICAS						PRÁCTICAS					
	1	2	3	1	2		1	2	3	1	2	3
19	16	16	8	14		7	8	8	9	14	15	
5	16	13	14	19		9	6	10	16	20	14	
19	16	18	17	14		11	12	11	13	16	18	
11	15	16	19	13		12	15	12	14	17	8	
20	18	19	10	16		14	15	12	14	17	8	
14	15	16	18	20		5	14	14	20	16	13	
9	16	16	18	20		7	11	15	15	18	14	
9	9	10	6	17		5	5	10	10	7	8	
16	17	17	10	10		8	19	13	8	7	9	
12	18	19	5	18		15	16	15	14	14	15	
14	17	13	12	17		10	7	12	20	19	13	
18	14	16	8	14		12	17	15	10	14	13	
9	11	13	5	10		12	13	11	11	13	11	
11	12	14	5	10		9	12	13	9	10	12	
17	16	15	6	7		9	13	13	9	5	12	
7	8	12	9	17		8	11	9	20	17	17	
15	18	17	5	5		13	16	10	5	17	10	
11	6	14	8	16		16	17	11	10	16	13	
18	12	18	18	18		16	16	15	7	9	7	
12	19	11	9	9		9	7	14	14	17	14	
9	14	17	13	17		8	15	16	19	20	19	
17	12	17	13	17		7	14	10				
13	19	18	19	18								
15	17	16	7	18								
19	19	17	16	16								
13	15	16	16	19								
7	15	16	12	17								
15	11	12	9	5								
15	20	14	11	16								
20	14	16	10	9								
10	16	13	13	17								
9	15	17	8	5								
5	8	17	19	18								
14	19	16	5	5								
18	20	18	9	18								
15	13	11	12	16								
6	14	16	10	13								
20	5	17	7	15								
			11	17								
			18	16								
<b>Promedio</b>	<b>13,3</b>	<b>14,6</b>	<b>15,4</b>	<b>11,0</b>	<b>14,1</b>	<b>Promedio</b>	<b>10,1</b>	<b>12,7</b>	<b>12,3</b>	<b>12,5</b>	<b>14,1</b>	<b>12,7</b>
<b>Cantidad</b>	<b>38</b>	<b>38</b>	<b>38</b>	<b>40</b>	<b>40</b>	<b>Cantidad</b>	<b>22</b>	<b>22</b>	<b>22</b>	<b>21</b>	<b>21</b>	<b>21</b>

Fuente: Elaboración propia.

Estos datos son llevados al Minitab (*software* estadístico) para una prueba de normalidad de las notas de prácticas 1, 2 (P1P2) y prácticas 1, 3 (P1P3), las cuales sí arrojan un *p-value* < 0,05 (95 % confiabilidad) como criterio, lo cual indica que no

sigue una distribución normal y deberá aplicarse una prueba no paramétrica, en caso contrario, una prueba de *student* apareada.

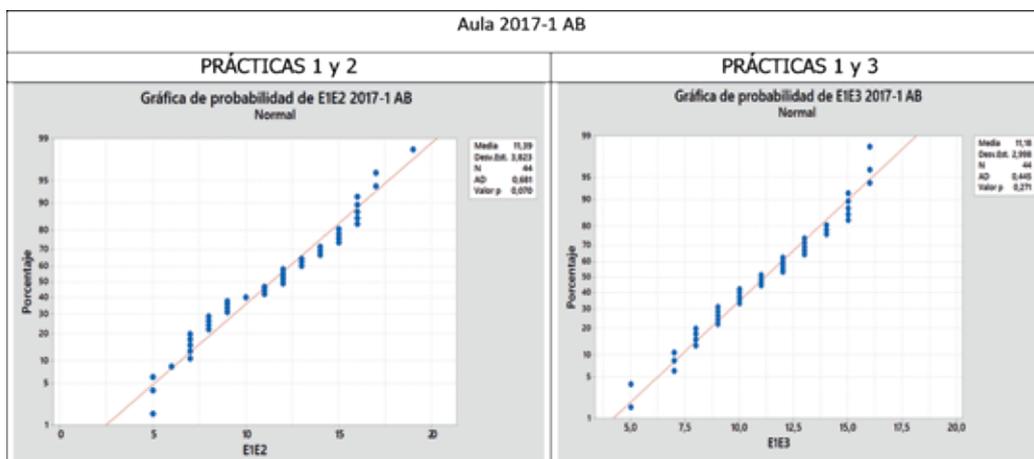


Figura 6. Pruebas de normalidad de aula 2017-1 AB.  
Fuente: Elaboración propia.

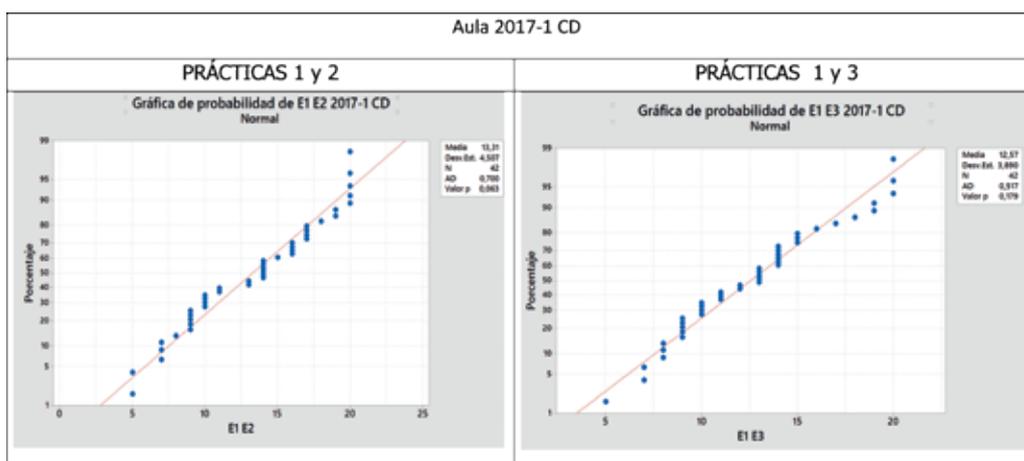


Figura 7. Pruebas de normalidad de aula 2017-1 CD.  
Fuente: Elaboración propia.

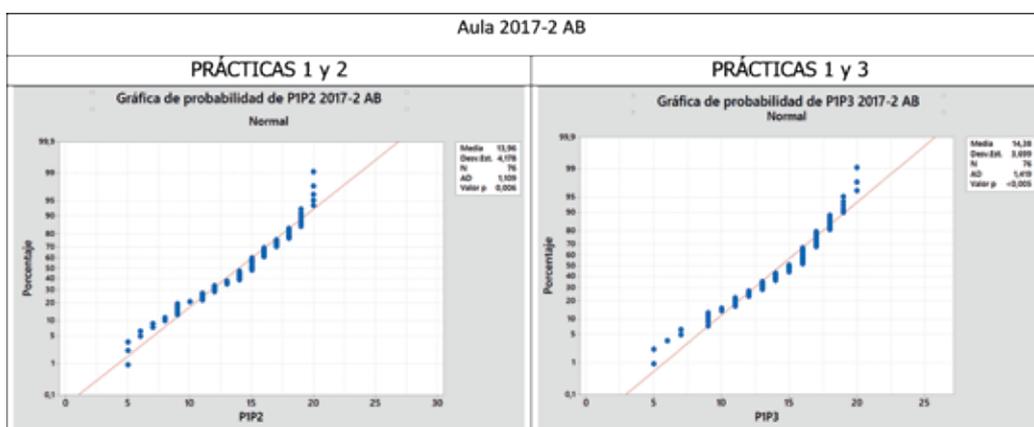


Figura 8. Pruebas de normalidad de aula 2017-2 AB.  
Fuente: Elaboración propia.

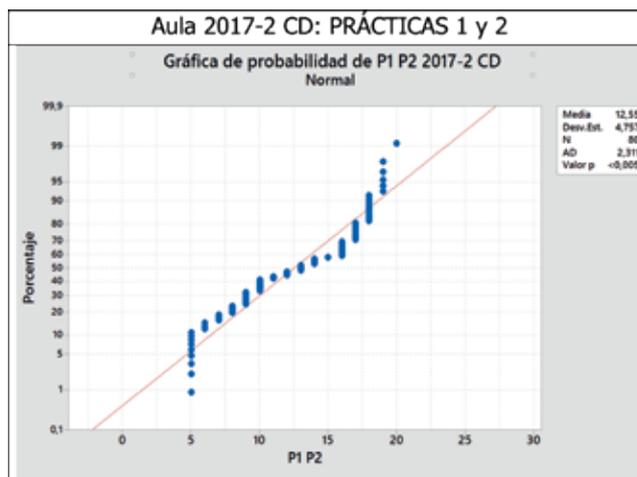


Figura 9. Pruebas de normalidad de aula 2017-2 CD.  
Fuente: Elaboración propia.

Se realiza la prueba de significancia no paramétrica de Mann-Whitney al 95 % de confiabilidad y de *student*

apareada, con el criterio de hay diferencia significativas si *pvalue* <0,05.

PRÁCTICAS 1 y 2		PRÁCTICAS 1 y 3																															
<b>IC y Prueba T pareada: E1. E2</b> <b>Estadísticas descriptivas</b> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Muestra</th> <th>N</th> <th>Media</th> <th>Desv.Est.</th> <th>Error estándar de la media</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>E1</td> <td>22</td> <td>10,091</td> <td>3,294</td> <td>0,702</td> </tr> <tr> <td>E2</td> <td>22</td> <td>12,682</td> <td>3,945</td> <td>0,841</td> </tr> </tbody> </table>		Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media	E1	22	10,091	3,294	0,702	E2	22	12,682	3,945	0,841	<b>IC y Prueba T pareada: E1. E3</b> <b>Estadísticas descriptivas</b> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Muestra</th> <th>N</th> <th>Media</th> <th>Desv.Est.</th> <th>Error estándar de la media</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>E1</td> <td>22</td> <td>10,091</td> <td>3,294</td> <td>0,702</td> </tr> <tr> <td>E3</td> <td>22</td> <td>12,273</td> <td>2,251</td> <td>0,480</td> </tr> </tbody> </table>		Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media	E1	22	10,091	3,294	0,702	E3	22	12,273	2,251	0,480
Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media																													
E1	22	10,091	3,294	0,702																													
E2	22	12,682	3,945	0,841																													
Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media																													
E1	22	10,091	3,294	0,702																													
E3	22	12,273	2,251	0,480																													
<b>Estimación de la diferencia pareada</b> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Media</th> <th>Desv.Est.</th> <th>Error estándar de la media</th> <th>IC de 95% para la diferencia_μ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>-2,591</td> <td>3,608</td> <td>0,769</td> <td>(-4,190, -0,991)</td> </tr> </tbody> </table>		Media	Desv.Est.	Error estándar de la media	IC de 95% para la diferencia_μ	-2,591	3,608	0,769	(-4,190, -0,991)	<b>Estimación de la diferencia pareada</b> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Media</th> <th>Desv.Est.</th> <th>Error estándar de la media</th> <th>IC de 95% para la diferencia_μ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>-2,182</td> <td>3,607</td> <td>0,769</td> <td>(-3,781, -0,582)</td> </tr> </tbody> </table>		Media	Desv.Est.	Error estándar de la media	IC de 95% para la diferencia_μ	-2,182	3,607	0,769	(-3,781, -0,582)														
Media	Desv.Est.	Error estándar de la media	IC de 95% para la diferencia_μ																														
-2,591	3,608	0,769	(-4,190, -0,991)																														
Media	Desv.Est.	Error estándar de la media	IC de 95% para la diferencia_μ																														
-2,182	3,607	0,769	(-3,781, -0,582)																														
<b>Prueba</b> Hipótesis nula $H_0$ : diferencia_μ = 0 Hipótesis alterna $H_1$ : diferencia_μ ≠ 0 <table border="1"> <thead> <tr> <th>Valor T</th> <th>Valor p</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>-3,37</td> <td>0,003</td> </tr> </tbody> </table>		Valor T	Valor p	-3,37	0,003	<b>Prueba</b> Hipótesis nula $H_0$ : diferencia_μ = 0 Hipótesis alterna $H_1$ : diferencia_μ ≠ 0 <table border="1"> <thead> <tr> <th>Valor T</th> <th>Valor p</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>-2,84</td> <td>0,010</td> </tr> </tbody> </table>		Valor T	Valor p	-2,84	0,010																						
Valor T	Valor p																																
-3,37	0,003																																
Valor T	Valor p																																
-2,84	0,010																																

Figura 10. Pruebas de significancia de aula 2017-1 AB.  
Fuente: Elaboración propia.

PRÁCTICAS 1 y 2		PRÁCTICAS 1 y 3																															
<b>IC y Prueba T pareada: E 1. E 2</b> <b>Estadísticas descriptivas</b> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Muestra</th> <th>N</th> <th>Media</th> <th>Desv.Est.</th> <th>Error estándar de la media</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>E 1</td> <td>21</td> <td>12,476</td> <td>4,546</td> <td>0,992</td> </tr> <tr> <td>E 2</td> <td>21</td> <td>14,143</td> <td>4,419</td> <td>0,964</td> </tr> </tbody> </table>		Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media	E 1	21	12,476	4,546	0,992	E 2	21	14,143	4,419	0,964	<b>IC y Prueba T pareada: E 1. E 3</b> <b>Estadísticas descriptivas</b> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Muestra</th> <th>N</th> <th>Media</th> <th>Desv.Est.</th> <th>Error estándar de la media</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>E 1</td> <td>21</td> <td>12,476</td> <td>4,546</td> <td>0,992</td> </tr> <tr> <td>E 3</td> <td>21</td> <td>12,667</td> <td>3,215</td> <td>0,701</td> </tr> </tbody> </table>		Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media	E 1	21	12,476	4,546	0,992	E 3	21	12,667	3,215	0,701
Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media																													
E 1	21	12,476	4,546	0,992																													
E 2	21	14,143	4,419	0,964																													
Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media																													
E 1	21	12,476	4,546	0,992																													
E 3	21	12,667	3,215	0,701																													
<b>Estimación de la diferencia pareada</b> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Media</th> <th>Desv.Est.</th> <th>Error estándar de la media</th> <th>IC de 95% para la diferencia_μ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>-1,667</td> <td>3,746</td> <td>0,817</td> <td>(-3,372, 0,039)</td> </tr> </tbody> </table>		Media	Desv.Est.	Error estándar de la media	IC de 95% para la diferencia_μ	-1,667	3,746	0,817	(-3,372, 0,039)	<b>Estimación de la diferencia pareada</b> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Media</th> <th>Desv.Est.</th> <th>Error estándar de la media</th> <th>IC de 95% para la diferencia_μ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>-0,190</td> <td>3,737</td> <td>0,815</td> <td>(-1,891, 1,510)</td> </tr> </tbody> </table>		Media	Desv.Est.	Error estándar de la media	IC de 95% para la diferencia_μ	-0,190	3,737	0,815	(-1,891, 1,510)														
Media	Desv.Est.	Error estándar de la media	IC de 95% para la diferencia_μ																														
-1,667	3,746	0,817	(-3,372, 0,039)																														
Media	Desv.Est.	Error estándar de la media	IC de 95% para la diferencia_μ																														
-0,190	3,737	0,815	(-1,891, 1,510)																														
<b>Prueba</b> Hipótesis nula $H_0$ : diferencia_μ = 0 Hipótesis alterna $H_1$ : diferencia_μ ≠ 0 <table border="1"> <thead> <tr> <th>Valor T</th> <th>Valor p</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>-2,04</td> <td>0,055</td> </tr> </tbody> </table>		Valor T	Valor p	-2,04	0,055	<b>Prueba</b> Hipótesis nula $H_0$ : diferencia_μ = 0 Hipótesis alterna $H_1$ : diferencia_μ ≠ 0 <table border="1"> <thead> <tr> <th>Valor T</th> <th>Valor p</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>-0,23</td> <td>0,818</td> </tr> </tbody> </table>		Valor T	Valor p	-0,23	0,818																						
Valor T	Valor p																																
-2,04	0,055																																
Valor T	Valor p																																
-0,23	0,818																																

Figura 11. Pruebas de significancia de aula 2017-1 CD.  
Fuente: Elaboración propia.

Aula 2017-2 AB																																																	
PRÁCTICAS 1 y 2	PRÁCTICAS 1 y 3																																																
<p><b>Mann-Whitney: P1. P2</b></p> <p><b>Método</b>  <math>\eta_1</math>: mediana de P1  <math>\eta_2</math>: mediana de P2                      Diferencia: <math>\eta_1 - \eta_2</math></p> <p><b>Estadísticas descriptivas</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Muestra</th> <th>N</th> <th>Mediana</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>P1</td> <td>38</td> <td>14</td> </tr> <tr> <td>P2</td> <td>38</td> <td>15</td> </tr> </tbody> </table> <p><b>Estimación de la diferencia</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Diferencia</th> <th>IC para la diferencia</th> <th>Confianza lograda</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>-1</td> <td>(-3, 1)</td> <td>95,10%</td> </tr> </tbody> </table> <p><b>Prueba</b>                      Hipótesis nula <math>H_0: \eta_1 - \eta_2 = 0</math>                      Hipótesis alterna <math>H_1: \eta_1 - \eta_2 \neq 0</math></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Método</th> <th>Valor W</th> <th>Valor p</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>No ajustado para empates</td> <td>1340,00</td> <td>0,203</td> </tr> <tr> <td>Ajustado para empates</td> <td>1340,00</td> <td>0,202</td> </tr> </tbody> </table>	Muestra	N	Mediana	P1	38	14	P2	38	15	Diferencia	IC para la diferencia	Confianza lograda	-1	(-3, 1)	95,10%	Método	Valor W	Valor p	No ajustado para empates	1340,00	0,203	Ajustado para empates	1340,00	0,202	<p><b>Mann-Whitney: P1. P3</b></p> <p><b>Método</b>  <math>\eta_1</math>: mediana de P1  <math>\eta_2</math>: mediana de P3                      Diferencia: <math>\eta_1 - \eta_2</math></p> <p><b>Estadísticas descriptivas</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Muestra</th> <th>N</th> <th>Mediana</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>P1</td> <td>38</td> <td>14</td> </tr> <tr> <td>P3</td> <td>38</td> <td>16</td> </tr> </tbody> </table> <p><b>Estimación de la diferencia</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Diferencia</th> <th>IC para la diferencia</th> <th>Confianza lograda</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>-2</td> <td>(-4, 0,0000000)</td> <td>95,10%</td> </tr> </tbody> </table> <p><b>Prueba</b>                      Hipótesis nula <math>H_0: \eta_1 - \eta_2 = 0</math>                      Hipótesis alterna <math>H_1: \eta_1 - \eta_2 \neq 0</math></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Método</th> <th>Valor W</th> <th>Valor p</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>No ajustado para empates</td> <td>1265,00</td> <td>0,040</td> </tr> <tr> <td>Ajustado para empates</td> <td>1265,00</td> <td>0,039</td> </tr> </tbody> </table>	Muestra	N	Mediana	P1	38	14	P3	38	16	Diferencia	IC para la diferencia	Confianza lograda	-2	(-4, 0,0000000)	95,10%	Método	Valor W	Valor p	No ajustado para empates	1265,00	0,040	Ajustado para empates	1265,00	0,039
Muestra	N	Mediana																																															
P1	38	14																																															
P2	38	15																																															
Diferencia	IC para la diferencia	Confianza lograda																																															
-1	(-3, 1)	95,10%																																															
Método	Valor W	Valor p																																															
No ajustado para empates	1340,00	0,203																																															
Ajustado para empates	1340,00	0,202																																															
Muestra	N	Mediana																																															
P1	38	14																																															
P3	38	16																																															
Diferencia	IC para la diferencia	Confianza lograda																																															
-2	(-4, 0,0000000)	95,10%																																															
Método	Valor W	Valor p																																															
No ajustado para empates	1265,00	0,040																																															
Ajustado para empates	1265,00	0,039																																															

Figura 12. Pruebas de significancia de aula 2017-2 AB.  
Fuente: Elaboración propia.

Aula 2017-2 CD: PRÁCTICAS 1 y 2																									
<p><b>Mann-Whitney: P 1. P 2</b></p> <p><b>Método</b>  <math>\eta_1</math>: mediana de P 1  <math>\eta_2</math>: mediana de P 2                      Diferencia: <math>\eta_1 - \eta_2</math></p> <p><b>Estadísticas descriptivas</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Muestra</th> <th>N</th> <th>Mediana</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>P 1</td> <td>40</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>P 2</td> <td>40</td> <td>16</td> </tr> </tbody> </table> <p><b>Estimación de la diferencia</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Diferencia</th> <th>IC para la diferencia</th> <th>Confianza lograda</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>-4</td> <td>(-6, -1)</td> <td>95,09%</td> </tr> </tbody> </table> <p><b>Prueba</b>                      Hipótesis nula <math>H_0: \eta_1 - \eta_2 = 0</math>                      Hipótesis alterna <math>H_1: \eta_1 - \eta_2 \neq 0</math></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Método</th> <th>Valor W</th> <th>Valor p</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>No ajustado para empates</td> <td>1331,50</td> <td>0,006</td> </tr> <tr> <td>Ajustado para empates</td> <td>1331,50</td> <td>0,005</td> </tr> </tbody> </table>		Muestra	N	Mediana	P 1	40	10	P 2	40	16	Diferencia	IC para la diferencia	Confianza lograda	-4	(-6, -1)	95,09%	Método	Valor W	Valor p	No ajustado para empates	1331,50	0,006	Ajustado para empates	1331,50	0,005
Muestra	N	Mediana																							
P 1	40	10																							
P 2	40	16																							
Diferencia	IC para la diferencia	Confianza lograda																							
-4	(-6, -1)	95,09%																							
Método	Valor W	Valor p																							
No ajustado para empates	1331,50	0,006																							
Ajustado para empates	1331,50	0,005																							

Figura 13. Pruebas de significancia de aula 2017-2 CD.  
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4  
Resumen de pruebas de significancia

Periodo	Aula	Test normalidad	Prácticas	Tipo	Resultado
2017-2	AB	No cumple	P1 y P2	Mann-Whitney	No significativo
			P1 y P3	Mann-Whitney	<b>Significativo</b>
2017-1	CD	No cumple	P1 y P2	Mann-Whitney	<b>Significativo</b>
	AB	Cumple	P1 y P2	Student	<b>Significativo</b>
			P1 y P3	Student	<b>Significativo</b>
CD	Cumple		P1 y P2	Student	No significativo
			P1 y P3	Student	No significativo

Fuente: Elaboración propia.

## CONCLUSIONES

De la presente investigación aplicada se concluye lo siguiente:

- Se evidenció que el taller propuesto promueve una participación activa de los estudiantes, desarrollando un trabajo colaborativo donde se observó liderazgo, entusiasmo por la tecnología en el uso del celular con fines educativos, así como solidaridad al compartir sus conocimientos con el grupo y con los demás participantes de la sesión.
- Los resultados estadísticos de la tabla 4 muestran que, de 7 pruebas comparativas, 4 son significativas, lo que permiten inferir que los talleres de reforzamiento ayudan a mejorar el rendimiento académico de los estudiantes en general.
- La herramienta TIC Socrative es muy amigable, de fácil uso para los estudiantes siempre y cuando este bien articulada por el docente en la sesión de clase.
- Se logró evaluar la eficacia del taller de reforzamiento sobre la base de los resultados cualitativos y cuantitativos logrando mejorar el rendimiento académico en el curso de Química con un aprendizaje activo y uso de las TIC integradas en una sesión tipo taller.

## REFERENCIAS

- [1] Caballero R. A. (2006). *Guías metodológicas para los planes y tesis de maestría y doctorado*. Lima: Editorial Instituto Metodológico ALEN CARO.
- [2] Casado Ángel y Juana Sanchez-Gey (2007). Filósofos españoles en la Revista de Pedagogía (1922-1936). España: Editorial Idea.
- [3] Collazos, C., & Mendoza, J. (2006). Cómo aprovechar el "aprendizaje colaborativo" en el aula. *Educación y Educadores*, 9(2), 61-76.
- [4] Enrique González C. (2012). *Aprendizaje colaborativo y competencia tecnológica en un curso de química de nivel preparatoria* (tesis de maestría). Recuperado de <http://hdl.handle.net/11285/619704>

- [5] Johnson, D y Johnson R, (1999). *Aprender juntos y solos*. Buenos Aires: Editorial AIQUE S.A.
- [6] Sosa G. Mercedes (2002) *El taller estrategia educativa para el aprendizaje significativo*. Bogotá: Editor Círculo de lectura Alternativa ISBN 9583332348
- [7] Vargas, S. (2010). Aprender enseñando. Nuevas metodologías en el área de expresión gráfica. El cono del aprendizaje de Edgar Dale [Figura]. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/3350533.pdf>
- [8] Room: west [Figura]. Recuperado de <https://blogs.nvcc.edu/fsrc/files/2015/07/socrative-space-race.jpeg>

## ACERCA DEL AUTOR

### Iván Zacarías Gonzáles Saavedra

Ingeniero químico por la Universidad Nacional del Callao (UNAC) con estudios de maestría en Gerencia de la Calidad y Desarrollo Humano de la Universidad Nacional del Callao (UNAC) y diplomado en Sistemas de Gestión de la Calidad en Laboratorios según ISO/IEC 17025 por la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP).

Posee experiencia profesional en el área de aseguramiento de la calidad en la industria de procesos y docente en los cursos de Química General (teoría y laboratorio), Físicoquímica, Operaciones Industriales, Matemática Aplicada y Química Analítica. También, tiene experiencia en sistemas de gestión de calidad, seguridad y medioambiente en la industria alimentaria.

@ igonzales@tecsup.edu.pe

@ ivanchemical2007@yahoo.com

Recibido: 29-04-19    Revisado: 30-07-19    Aceptado: 01-08-19



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.

# ÚNETE A LA COMUNIDAD DE INNOVADORES TECSUP



LICENCIADO  
POR MINEDU



1

Exigencia académica

2

Más de 80 laboratorios de última tecnología

3

Nuestras carreras son 60 % prácticas

## Admisión 2020

INSCRIPCIONES ABIERTAS

### Lima

Av. Cascanueces 2221,  
Santa Anita  
☎ 920 412 516

### Arequipa

Urb. Monterrey Lote D-8,  
José Luis Bustamante y Rivero  
☎ 945 583 620

### Trujillo

Mz. A Sub Lote 1 Urb. Tecsup  
Víctor Larco Herrera  
☎ 978 855 909

## INSTRUCCIONES PARA LA PRESENTACIÓN DE ARTÍCULOS

La revista Investigación Aplicada e Innovación I+i se publica anualmente y tiene como objetivo principal difundir trabajos de investigación aplicados a la ingeniería y tecnología, con el fin de apoyar al sector productivo en la mejora de sus procesos, eficiencia de sus procedimientos e incorporación nuevas técnicas para fortalecer su competitividad. Las principales áreas temática son: Tecnología, Gestión, Procesos y Educación, teniendo subtemas en cada una de ellas.

### Quienes pueden publicar:

Profesionales en ingeniería y tecnología, investigadores, docentes de educación superior, directivos académicos y especialistas en cualquiera de las temáticas que aborda la revista.

### Convocatoria:

Los interesados en publicar en la revista I+i de Tecsup, deben enviar sus artículos de investigación al correo: [investigacioneinnovacion@tecsup.edu.pe](mailto:investigacioneinnovacion@tecsup.edu.pe)

## REQUISITOS PARA LA PUBLICACIÓN

### 1.- Formato de presentación:

- Se aceptarán artículos escritos en idioma español, portugués o inglés.
- El artículo debe tener una extensión entre 7 y 14 páginas escritos a una sola columna.
- El interlineado será sencillo, fuente Tahoma o Arial, tamaño 11 puntos.
- Todos los márgenes son de 2,5 cm en tamaño de página A4.
- El artículo debe enviarse en formato Word, además de la versión en pdf.
- Las tablas, figuras y gráficas deberán incluirse con buena resolución y presentarse según los lineamientos de las Normas APA.
- Las ecuaciones deben estar bien definidas, digitadas y no presentadas como imágenes.

### 2.- Estructura del artículo:

- **TÍTULO:** Se colocará el título de la investigación en el idioma original y en inglés. El título no debe exceder de 12 palabras y debe dar cuenta del objeto de investigación.
- **AUTORES:** Es necesario nombres y apellidos completos de los autores y su afiliación académica e institucional.
- **RESUMEN:** Contenido breve del artículo en el idioma original e inglés, no debe exceder las 300 palabras. Evitar el uso de siglas, ecuaciones, tablas y fórmulas.
- **PALABRAS CLAVES:** Debe identificar los temas principales del artículo redactados en el idioma original e inglés, y presentados en orden de prioridad, no exceder de 08 palabras claves.
- **INTRODUCCIÓN:** Debe explicar el problema general, definir el tema investigado, definir los objetivos del estudio y generar interés al lector.
- **FUNDAMENTOS:** Presentar los antecedentes que fundamentan el estudio haciendo uso de citas. También debe describir el estudio de la investigación incluyendo premisas y limitaciones.
- **METODOLOGÍA:** Debe explicar cómo se llevó a la práctica el trabajo, justificando la elección de procedimientos y técnicas.
- **RESULTADOS:** Debe resumir la contribución del autor; presentar la información hallada y pertinente que se relaciona con los objetivos del estudio en forma comprensible y coherente; y debe mencionar todos los hallazgos relevantes, incluso aquellos contrarios a la hipótesis.
- **CONCLUSIONES:** Deben estar acorde a los objetivos del trabajo, responden a la(s) pregunta(s) de investigación planteadas en la introducción y a las interrogantes que condujeron a la realización de la investigación.
- **REFERENCIAS:** Incluir todas las fuentes mencionadas en el artículo. Es necesario el uso de referencias de autoridad, de carácter académico y de actualidad, incluidos en bases de datos especializadas. Su presentación es bajo el formato de una adaptación de las Normas APA para la revista I+i.
- **ACERCA DEL AUTOR(ES):** Incluir información profesional breve de cada autor (institución, labor que desempeña y correo electrónico).

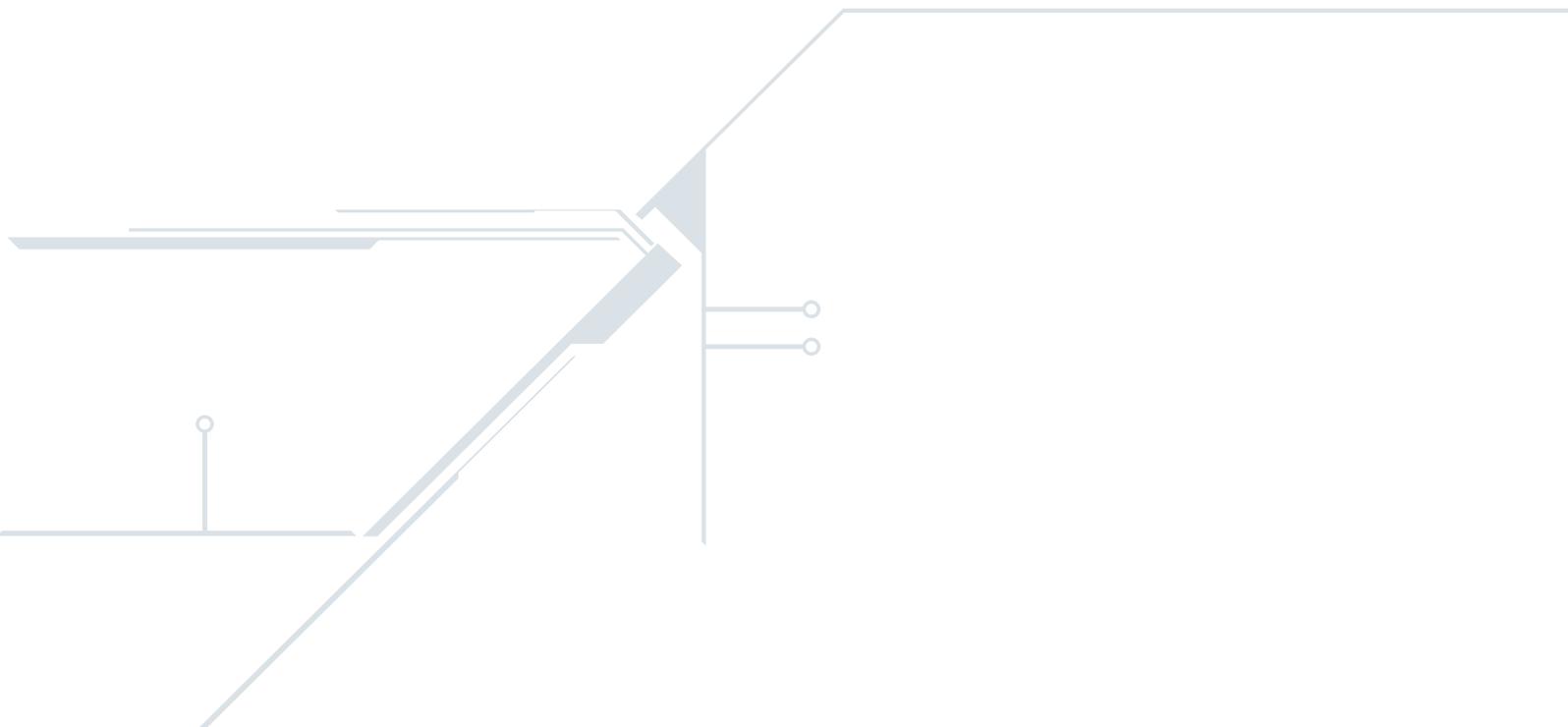
### 3.- Proceso editorial de la revista:

- Recepción de resúmenes para evaluar si se aborda alguna de área temática de la revista.
- Recepción de artículo completo previamente seleccionados, el Comité Editorial realiza la revisión del cumplimiento del formato y estructura de presentación. Y se valida si el trabajo es inédito.
- Se verifica la originalidad del artículo a través de la herramienta Turnitin.
- Evaluación de artículos completos o arbitraje de artículos, consiste en la validación a cargo de dos especialistas en el tema, quienes recomendarán o no la publicación y opinan si el artículo es:
  - o *Publicable sin modificaciones:* El documento no tiene ningún tipo de observación de fondo y se publica como fue recibido.
  - o *Publicable con ligeras modificaciones:* El documento amerita fundamentalmente modificaciones de forma.
  - o *Publicable con modificaciones sustanciales:* El documento amerita algunas modificaciones de fondo corregibles.
  - o *No publicable:* el documento no es recomendado para su publicación.
- Los artículos aceptados para publicación pasan por un proceso de corrección de estilo y ortografía en coordinación con los autores dentro de los plazos que se estimen.
- Concluidos todos los procesos de revisión y aceptación se procede con la diagramación e impresión de la revista.

Para más información puede revisar el sitio web de la Revista I+i en <https://www.tecsup.edu.pe/revista>



Se terminó de imprimir en los talleres gráficos de  
**Tarea Asociación Gráfica Educativa**  
Pasaje María Auxiliadora 156 - Breña  
Correo electrónico: [tareagrafica@tareagrafica.com](mailto:tareagrafica@tareagrafica.com)  
Página web: [www.tareagrafica.com](http://www.tareagrafica.com)  
Teléf. 332-3229 Fax: 424-1582  
Noviembre, 2019  
Lima - Perú



## Tecsup

### Sede Norte

Mz. A Sub lote 1 Urbanización Tecsup  
Víctor Larco Herrera, Trujillo - Perú  
informestrujillo@tecsup.edu.pe

T. (044) 485420

### Sede Centro

Av. Cascanueces 2221  
Santa Anita, Lima - Perú  
informeslima@tecsup.edu.pe

T. (51-1) 317-3900

### Sede Sur

Urb. Monterrey Lote D-8  
José Luis Bustamante y Rivero,  
Arequipa - Perú  
informesarequipa@tecsup.edu.pe

T. (54) 426610

F. (54) 426654

[www.tecsup.edu.pe](http://www.tecsup.edu.pe)

