



CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

REVISTA INDUSTRIAL 4.0

ISSN-L 2958-0188

Edición Digital
Nro. 12

Noviembre/2025

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**



REVISTA INDUSTRIAL 4.0

**EDICIÓN DIGITAL N° 12
NOVIEMBRE - 2025**

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

Maria Eugenia Garcia Moreno Ph. D.
Dr. Tito V. Estevez Martini
M.Sc Miguel Angel Calla Carrasco
M.Sc. Ing. Marcelo Ramirez Molina
Mg. Aldo Felipe Vargas Pacheco

Rectora
Vicerrector
Decano Facultad de Ingeniería
Vicedecano Facultad de Ingeniería
Director de Carrera Ingeniería Industrial

Revista Industrial 4.0
Edición Digital N°. 12 - Noviembre 2025
Impresa: ISSN 2958-017X
En Linea: ISSN-L 2958-0188

Comite Editor:

Mario Fermín Zenteno Benítez Ph.D.
Oswaldo Fernando Terán Modregón Ph.D.
M.Sc. Ing. Franz José Zenteno Benítez
M.Sc. Ing. Paula Mónica Lino Humerez
M.Sc. Ing. Lucio Grover Sanchez Eid
M.Sc. Ing. Fernando Floren Sanabria Camacho

Diseño Tapa Versión Impresa & Web:
Ing. Enrique Orosco Crespo

Imagen Tapa:
Universidad Mayor de San Andrés

Imprenta:
ITM LATINOAMÉRICA

Deposito Legal:
4 - 3 - 68 - 2020

Web:
<https://industrial.umsa.bo/revistaindustrial-40>
Email:
revistaindustrial4.0@umsa.bo

Av. Mcal. Santa Cruz N° 1175, Plaza del Obelisco
Mezzanine, Edificio Facultad de Ingeniería
Telf. 2205000-2205067, Int. 1402
Campus Universitario, Cota Cota - calle 30

PROLOGO

Revista "Industrial 4.0"

La producción científica en el campo de la ingeniería industrial ha trascendido la visión clásica de la optimización lineal de procesos para adentrarse en una dimensión de complejidad sistémica. En este volumen de la revista "Industrial 4.0", la Universidad Mayor de San Andrés presenta un conjunto de artículos que muestra, desde una perspectiva analítica, las múltiples facetas de la Ingeniería Industrial. La presente edición no es una mera colección de estudios aislados, sino una demostración de la convergencia necesaria entre la gestión estratégica de la innovación, la excelencia operativa y la sostenibilidad y ambiental.



En un primer nivel de análisis macro, la revista explora la arquitectura de los sistemas de innovación. Se presentan investigaciones que modelan la evolución de los ecosistemas emprendedores universitarios y la transición hacia infraestructuras de alta complejidad tecnológica, así como la conceptualización de la empresa universitaria. Estos trabajos dialogan fluidamente con estudios sobre la complejidad productiva, aportando marcos teóricos fundamentales para comprender las dinámicas de integración económica y el desarrollo de capacidades en entornos competitivos.

Descendiendo hacia la operatividad técnica y la eficiencia de los procesos, se presenta un escrutinio cuantitativo sobre la implementación de metodologías de Lean Six Sigma en el contexto de la Cuarta Revolución Industrial, complementado con evaluaciones financieras críticas sobre el Retorno de la Inversión (ROI) en la automatización. Esta sección se enriquece con análisis econométricos que correlacionan la digitalización de canales comerciales, específicamente en plataformas sociales, con la variabilidad de ingresos en el tejido de la manufactura a pequeña escala (MyPEs), evidenciando la simbiosis entre tecnología y rendimiento económico.

Finalmente, la publicación aborda con rigor científico el imperativo de la sostenibilidad y la economía circular. Se exponen hallazgos significativos en la revalorización de biomasa residual agroindustrial y se plantean revisiones sistemáticas sobre los marcos regulatorios y desafíos técnicos en la gestión de aceites lubricantes usados. De igual manera, se analizan las implicaciones ambientales del uso de biocombustibles en motores de combustión interna y la optimización integral del consumo energético. Estas investigaciones no solo proponen soluciones técnicas, sino que establecen las bases para una ingeniería responsable que responde a las leyes de la termodinámica y a la normativa ambiental vigente.

Así, esta edición de “Industrial 4.0” cumple su función primordial: servir como vehículo de difusión de conocimiento validado, fomentando un debate académico de alto nivel que vincula la teoría avanzada con la práctica ingenieril, consolidando el rol de la academia como generadora de soluciones complejas para una realidad empresarial en constante desarrollo.

Mg. Aldo Felipe Vargas Pacheco
DIRECTOR DE LA CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS

<https://doi.org/10.53287/kjrn6483nn79p>

ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA MANUFACTURERA EN BOLIVIA: ENFOQUE EN EL SECTOR DE BEBIDAS NO ALCOHÓLICAS DEL DEPARTAMENTO DE LA PAZ

Víctor Alejandro Huanca Chuca

ORCID: 0009-0009-4280-9696

Ingeniería Industrial y Producción Industrial, Universidad Mayor de San Andrés
vachuca.01@gmail.com

RESUMEN

El estudio analiza la estructura manufacturera de Bolivia con énfasis en el sector de bebidas no alcohólicas del departamento de La Paz, utilizando información del Mapa de Complejidad Productiva del BDP y datos oficiales del INE, SEPREC y el MDP. Los resultados confirman que la manufactura es uno de los sectores más relevantes del país por su aporte al valor bruto de producción y su concentración empresarial, especialmente en el eje La Paz–Cochabamba–Santa Cruz. En el caso de La Paz, el subsector de elaboración de bebidas destaca como la actividad industrial más importante, donde las bebidas no alcohólicas representan la mayor proporción del valor producido y muestran altos niveles de diversificación y encadenamiento productivo. El estudio concluye que este subsector posee un notable potencial de crecimiento, y que fortalecer su competitividad requiere avanzar en innovación, mayor complejidad económica y políticas que promuevan una industrialización más equilibrada.

Palabras Clave: Complejidad productiva, industria manufacturera, bebidas no alcohólicas.

ABSTRACT

This study analyzes the manufacturing structure of Bolivia with a specific focus on the non-alcoholic beverages sector in the department of La Paz, using information from the BDP's Productive Complexity Map and official data from INE, SEPREC, and

the Ministry of Productive Development. The results confirm that manufacturing is one of the most significant sectors in the national economy due to its contribution to gross production value and its concentration of formal enterprises, particularly within the La Paz–Cochabamba–Santa Cruz axis. In La Paz, the beverage manufacturing subsector stands out as the most important industrial activity, with non-alcoholic beverages representing the largest share of production value and exhibiting high levels of diversification and productive linkages. The study concludes that this subsector has substantial growth potential and that strengthening its competitiveness requires progress in innovation, increased economic complexity, and policies that promote a more balanced industrialization process.

Keywords: Productive complexity, manufacturing industry, non-alcoholic beverages.

1. INTRODUCCIÓN

La industria manufacturera constituye uno de los componentes más dinámicos de la estructura económica boliviana, al concentrar una proporción significativa de unidades económicas formales y aportar de manera sustancial al empleo, la diversificación productiva y la generación de valor agregado (Capra Seoane & Urcullo Cossio, 2005; Escobar de Pabón & Kruse, 2002). Este sector, cuya esencia radica en la transformación de materias primas en bienes elaborados y terminados, abarca actividades como alimentos, bebidas, textiles, metalmecánica y otros productos de consumo, desempeñando un papel fundamental en la articulación de cadenas productivas regionales (Rodríguez Ostría, 1980; Villegas & Montaña, 1993).

Según datos del Servicio Plurinacional de Registro de Comercio (SEPREC, 2024), la base empresarial acumulada del país registró hasta mayo de 2024 un total de 39.971 unidades económicas manufactureras, de las cuales el 31,8% se ubican en el departamento de La Paz, seguido por Santa Cruz (31,0%) y Cochabamba (18,5%). De igual forma, los datos actualizados a octubre de 2024 muestran que 9.837 empresas activas pertenecen al sector manufacturero dentro de una base nacional de 108.232 unidades económicas, manteniéndose La Paz como el departamento con mayor concentración, con 3.233 empresas manufactureras, lo que reafirma su histórica relevancia industrial dentro del eje troncal (SEPREC, 2024).

Esta distribución evidencia el peso estructural de la manufactura en la economía

boliviana y el liderazgo del departamento de La Paz en la conformación del tejido productivo nacional. Dentro de esta estructura, el sector de elaboración de bebidas no alcohólicas se ha consolidado como una de las actividades de mayor presencia y dinamismo, tanto por su aporte a la producción industrial como por su capacidad de expansión en mercados regionales. En este contexto, el presente estudio tiene como finalidad analizar la estructura manufacturera en Bolivia con un enfoque específico en el sector de bebidas no alcohólicas del departamento de La Paz, utilizando indicadores de complejidad económica y datos provenientes del Mapa de Complejidades Productivas del Banco de Desarrollo Productivo (BDP).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio es de carácter cuantitativo-descriptivo, orientado a la interpretación de la estructura productiva e industrial mediante la recopilación, organización y análisis de datos secundarios provenientes de fuentes oficiales. El objetivo central es caracterizar la estructura manufacturera en Bolivia y, dentro de ella, posicionar la actividad de elaboración de bebidas no alcohólicas en el departamento de La Paz.

Para ello, una herramienta fundamental del análisis fue el Mapa de Complejidades Económico Productivo del Banco de Desarrollo Productivo (BDP), que constituye un instrumento de diagnóstico diseñado para identificar la naturaleza, diversificación y potencial de crecimiento de las actividades productivas del país.

La complejidad económica constituye así un indicador clave para comprender el grado de conocimiento técnico incorporado en un territorio. Regiones con mayor diversidad productiva y capacidades técnicas más sofisticadas tienden a desarrollar industrias más complejas y con mejores perspectivas de crecimiento. En este marco, el uso del mapa permitió identificar que la industria manufacturera es un sector predominante dentro de la estructura productiva boliviana, y que, en el caso del departamento de La Paz, uno de los subsectores de mayor presencia es el de elaboración de bebidas.

Las fuentes de información utilizadas en el estudio fueron:

- i. Banco de Desarrollo Productivo (BDP, 2020), mediante el Mapa de Complejidad Productiva, que permite identificar sectores de mayor relevancia económica.

- ii. Instituto Nacional de Estadística (INE, 2017), a través de los registros censales y encuestas estructurales de la industria manufacturera.
- iii. Ministerio de Desarrollo Productivo y Economía Plural (MDP, 2019), que aporta información sobre la participación de la industria en la economía.
- iv. Servicio Plurinacional de Registro de Comercio (SEPREC, 2024), que proporciona datos actualizados sobre el número de unidades económicas registradas en el sector manufacturero.

Los datos y gráficos utilizados provienen principalmente del Mapa de Complejidades Productivas de Bolivia (BDP, 2020), cuyas visualizaciones incluyen sus respectivas fuentes y fechas de actualización. Esta información permitió describir la estructura y el nivel de diversificación productiva del país, así como la posición relativa del sector manufacturero en dicho contexto.

Para el análisis específico del departamento de La Paz, se recurrió a estimaciones y referencias del INE (2017), MDP (2019) y SEPREC (2024), lo que permitió aproximar el peso relativo del sector manufacturero y, de manera particular, la importancia del subsector de bebidas no alcohólicas. La triangulación de estas fuentes posibilitó identificar la concentración de actividades económicas, el número de empresas registradas y la relevancia económica del subsector dentro de la estructura productiva departamental.

El análisis se desarrolló de manera descriptiva, contrastando la información secundaria proveniente de fuentes oficiales y las estimaciones derivadas de los indicadores de complejidad. Los resultados permiten comprender la configuración productiva nacional y departamental, así como posicionar el sector de elaboración de bebidas no alcohólicas como una actividad representativa dentro de la industria manufacturera del departamento de La Paz.

3 DESARROLLO – ANÁLISIS DEL CONTEXTO PRODUCTIVO Y COMPLEJIDAD DE LA INDUSTRIA MANUFACTURERA EN BOLIVIA Y EL DEPARTAMENTO DE LA PAZ

3.1 Entorno Productivo Nacional

El panorama productivo nacional refleja la diversidad y especialización de las actividades económicas que conforman la estructura industrial de Bolivia. A través

del mapa de complejidades del Banco de Desarrollo Productivo se identifican los sectores con mayor valor agregado y potencial de innovación, donde la industria manufacturera ocupa un rol estratégico para la economía del país.

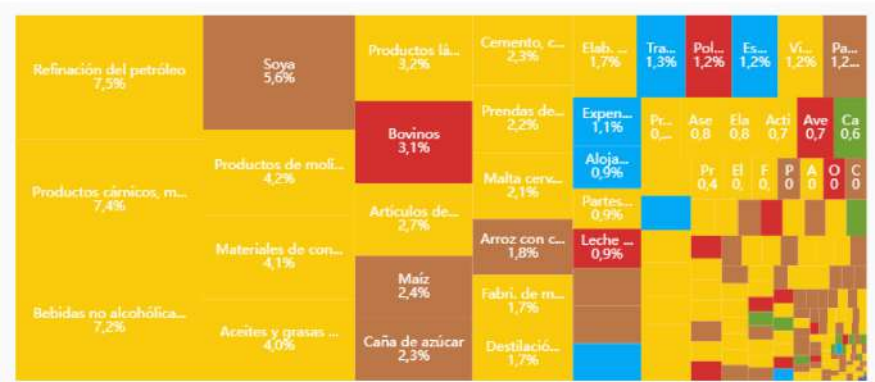
Figura 1. Grupo de productos y valor bruto de producción - Bolivia



Fuente: Banco de Desarrollo productivo (BDP), elaboración GATIP, Actualización 2020

En la composición del valor bruto de producción (VBP) en Bolivia, donde la industria manufacturera concentra el 66,76%, equivalente a 136.097 millones de bolivianos, consolidándose como el principal motor productivo del país. Le siguen los sectores agrícola y pecuario, con menor participación relativa, mientras que las actividades forestales, pesqueras y turísticas presentan una contribución marginal. Estos datos evidencian la alta concentración del aparato productivo nacional en la transformación industrial.

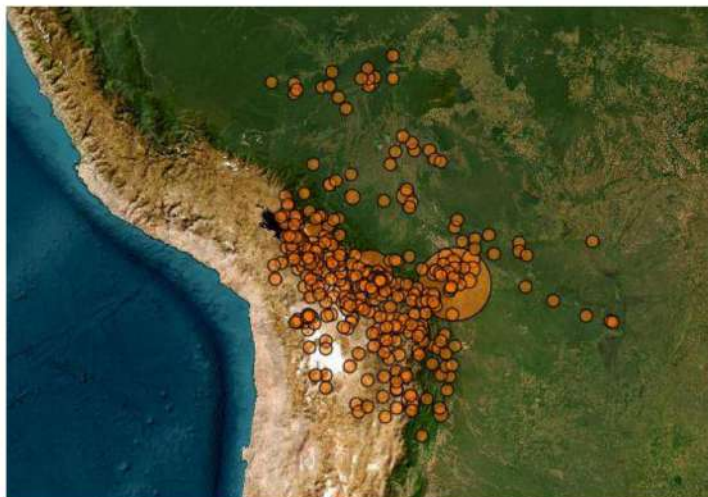
Figura 2. Productos de mayor relevancia económica - Bolivia



Fuente: Banco de Desarrollo productivo (BDP), elaboración GATIP, Actualización 2020

El análisis de los productos de mayor relevancia económica muestra que la refinación de petróleo, los productos metálicos y la elaboración de bebidas no alcohólicas se ubican entre los rubros con mayor participación en el valor bruto de producción nacional.

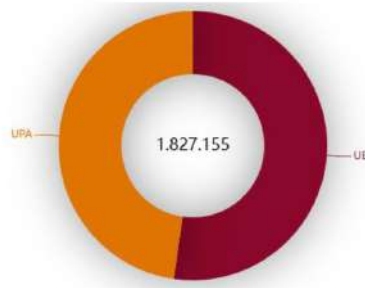
Figura 3. Ubicación de productos de mayor relevancia económica - Bolivia



Fuente: Banco de Desarrollo productivo (BDP), elaboración GATIP, Actualización 2020

La distribución espacial de los productos de mayor relevancia económica revela una concentración significativa en el eje central del país, especialmente en los departamentos de La Paz, Cochabamba y Santa Cruz.

Figura 4. Unidades económicas - Bolivia



UPA: 47,72% UE: 52,28%

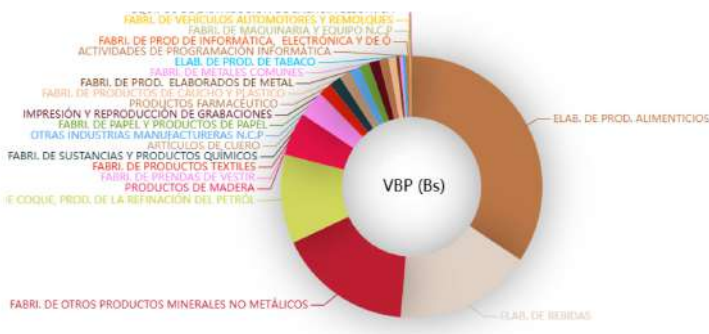
Fuente: Banco de Desarrollo productivo (BDP), elaboración GATIP; UE: Unidades Económicas (Actualización 2017); UPA: Unidades de Producción Agrícola

El análisis de las unidades económicas a nivel nacional evidencia la existencia de 1.827.155 establecimientos, de los cuales el 52,28% corresponde a unidades económicas (UE) y el 47,72% a unidades productivas agropecuarias (UPA). Esto confirma el peso de las actividades manufactureras y comerciales frente a las agrícolas en la estructura económica nacional.

3.2 Industria Manufacturera en Bolivia

La industria manufacturera constituye uno de los principales pilares del desarrollo económico, aportando al valor bruto de producción nacional. Este apartado analiza su estructura interna y los subsectores predominantes.

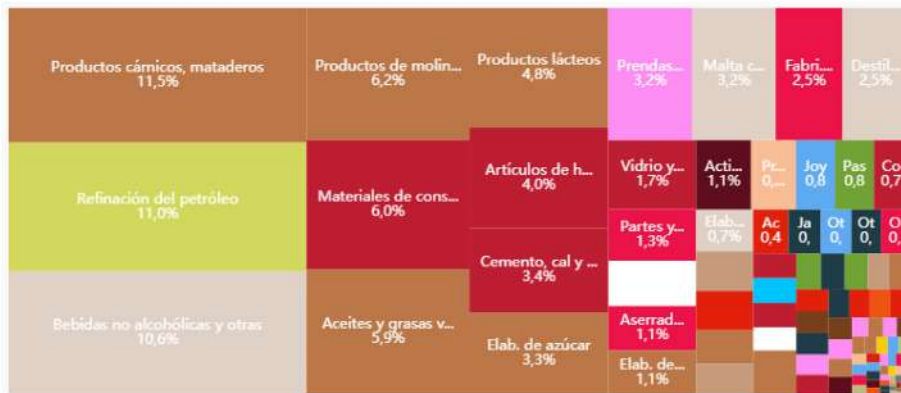
Figura 5. Grupo de productos y valor bruto de producción – Industria manufacturera en Bolivia



Fuente: Banco de Desarrollo productivo (BDP), estimaciones en base a información INE 2017 - MDPyEP y Actualizaciones 2019

El análisis del grupo de productos dentro de la industria manufacturera evidencia que las actividades de elaboración de productos alimenticios y bebidas concentran la mayor proporción del valor bruto de producción, seguidas por la fabricación de productos minerales no metálicos y la refinación de petróleo.

Figura 6. Productos de mayor relevancia económica – Industria manufacturera en Bolivia



Fuente: Banco de Desarrollo productivo (BDP), estimaciones en base a información INE 2017 - MDPyEP y Actualizaciones 2019

La estructura productiva de la manufactura nacional muestra una fuerte presencia de productos cárnicos, refinación de petróleo y bebidas no alcohólicas, que en conjunto superan el 30% del valor manufacturero total. Esta composición revela una orientación hacia industrias de consumo masivo y bienes intermedios.

Tabla 1. Ubicación y Valor Bruto de Producción (VBP) de las 5 principales actividades – Industria manufacturera en Bolivia

DEPARTAMENTO	MUNICIPIO	ACTIVIDAD	VBP (Bs)
Santa Cruz	Santa Cruz de la Sierra	Refinación del petróleo	8.730.405.543,54
Santa Cruz	Santa Cruz de la Sierra	Aceites y grasas vegetal y animal	8.030.594.562,63
La Paz	Nuestra Señora de La Paz	Bebidas no alcohólicas y otras	6.686.902.521,39
Cochabamba	Cochabamba	Refinación del petróleo	6.280.639.104,24
Santa Cruz	Santa Cruz de la Sierra	Productos cárnicos, mataderos	4.617.941.868,82

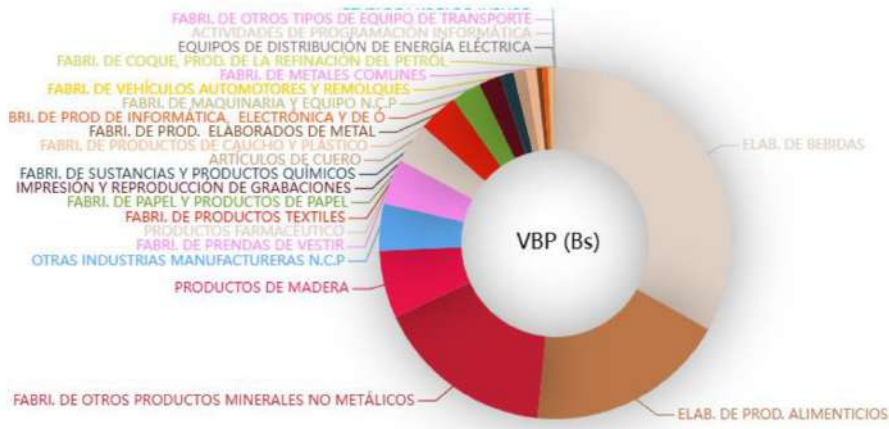
Fuente: Banco de Desarrollo productivo (BDP), estimaciones en base a información INE 2017 - MDPyEP y Actualizaciones 2019

La distribución del valor bruto de producción por departamentos indica que Santa Cruz lidera la actividad manufacturera, especialmente en la refinación de petróleo y la elaboración de aceites y grasas vegetales, mientras que La Paz sobresale en la producción de bebidas no alcohólicas.

3.3 Industria Manufacturera en el Departamento de La Paz

El departamento de La Paz presenta una dinámica manufacturera diversa, caracterizada por su concentración de unidades productivas y su aporte al valor bruto nacional. En este punto se examina la composición industrial paceña, identificando los sectores más representativos y las zonas de mayor actividad económica dentro del territorio departamental.

Figura 7. Grupo de productos y valor bruto de producción – Industria manufacturera en La Paz



Fuente: Banco de Desarrollo productivo (BDP), estimaciones en base a información INE 2017 - MDPyEP y Actualizaciones 2019

Se muestra que la elaboración de bebidas lidera el valor bruto de producción en la industria manufacturera del departamento de La Paz, seguida por la elaboración de productos alimenticios y la fabricación de productos minerales no metálicos. Esta concentración evidencia una especialización productiva en sectores vinculados al consumo masivo, destacando el potencial de la industria de bebidas como motor económico regional.

Figura 8. Productos de mayor relevancia económica – Industria manufacturera en La Paz



Fuente: Banco de Desarrollo productivo (BDP), estimaciones en base a información INE 2017 - MDPyEP y Actualizaciones 2019

Se refuerza la relevancia económica de la elaboración de bebidas no alcohólicas, posicionándola como el producto manufacturado más significativo en La Paz, con una participación del 22,2 % del VBP del sector. Otros productos destacados incluyen los minerales no metálicos y la cerveza, lo que evidencia una orientación industrial ligada tanto al consumo interno como a la transformación de materias primas locales.

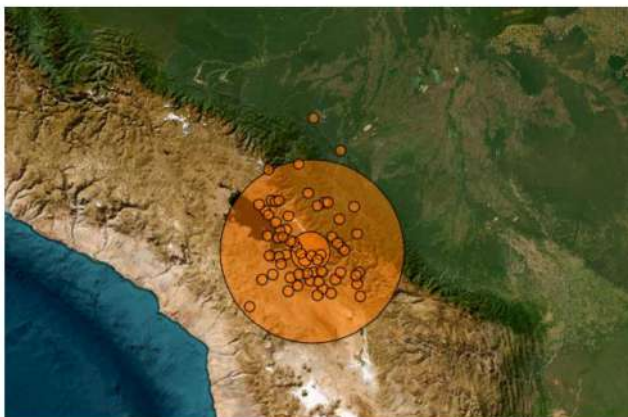
Tabla 2. Ubicación y Valor Bruto de Producción (VBP) de las 5 principales actividades – Industria manufacturera en La Paz

DEPARTAMENTO	MUNICIPIO	ACTIVIDAD	VBP (Bs)
La Paz	Nuestra Señora de La Paz	Bebidas no alcohólicas y otras	6.686.902.521,39
La Paz	Nuestra Señora de La Paz	Materiales de construcción de arcilla	2.107.200.203,05
La Paz	Nuestra Señora de La Paz	Productos de molinería	2.089.098.153,58
La Paz	Nuestra Señora de La Paz	Malta cerveza y otras	1.657.013.744,86
La Paz	Nuestra Señora de La Paz	Destilación de bebidas alcohólicas	1.644.246.678,82

Fuente: Banco de Desarrollo productivo (BDP), estimaciones en base a información INE 2017 - MDPyEP y Actualizaciones 2019

Cinco principales actividades manufactureras en La Paz se concentran en el municipio de Nuestra Señora de La Paz, siendo la elaboración de bebidas no alcohólicas la más significativa, con un VBP que supera los 6.600 millones de bolivianos. Este dato subraya no solo la centralización geográfica de la producción, sino también el peso específico del rubro de bebidas dentro de la estructura industrial departamental.

Figura 9. Ubicación de productos de mayor relevancia económica - Industria manufacturera en La Paz



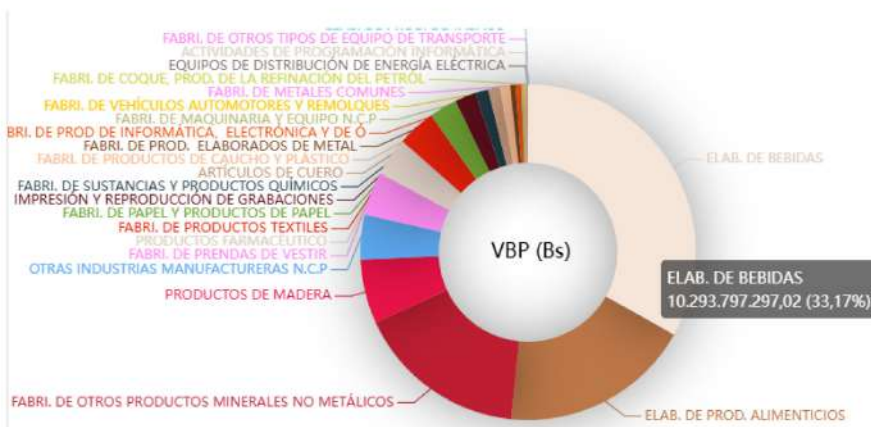
Fuente: Banco de Desarrollo productivo (BDP), estimaciones en base a información INE 2017 - MDPyEP y Actualizaciones 2019

De igual forma se muestra una fuerte concentración espacial de las actividades manufactureras de mayor relevancia económica en el eje metropolitano, esta distribución geográfica refleja la centralización de infraestructura productiva y logística, lo que refuerza la importancia estratégica de esta zona para el desarrollo industrial, especialmente en rubros como la elaboración de bebidas.

3.4 Análisis Específico del Subsector de Elaboración de Bebidas

Dentro de la estructura manufacturera paceña, la elaboración de bebidas destaca por su predominio en la producción y su potencial de crecimiento. Este apartado profundiza en la composición interna del subsector, diferenciando entre los tipos de bebidas y su contribución al desarrollo industrial regional.

Figura 10. Grupo de productos y valor bruto de producción – Industria manufacturera en La Paz en elaboración de bebidas



Fuente: Banco de Desarrollo productivo (BDP), estimaciones en base a información INE 2017 - MDPyEP y Actualizaciones 2019

Dentro de la estructura general de la industria manufacturera paceña, el subsector de elaboración de bebidas tiene un peso considerable en el valor bruto de producción. Esta participación refuerza su posición estratégica como uno de los rubros más dinámicos, reflejando no solo su aporte económico directo, sino también su potencial de expansión dentro de la matriz productiva regional.

Figura 11. Productos de mayor relevancia económica – Industria manufacturera en La Paz en elaboración de bebidas (VBP)



Bebidas no alcohólicas y otras: 6 893 836 032,84

Destilación de bebidas alcohólicas: 1 704 932 602,71

Malta cerveza y otras: 1 663 750 801,53

Fuente: Banco de Desarrollo productivo (BDP), estimaciones en base a información INE 2017 - MDPyEP y Actualizaciones 2019

La composición interna del subsector de bebidas, donde las bebidas no alcohólicas dominan ampliamente con un 67 % del valor bruto de producción, seguidas en menor proporción por la destilación de bebidas alcohólicas (16,6 %) y la elaboración de cerveza y malta (16,2 %). Esta distribución evidencia una clara especialización en productos no alcohólicos, lo que podría responder tanto a la demanda del mercado interno como a las capacidades tecnológicas e infraestructurales locales.

4 RESULTADOS

El análisis de la estructura manufacturera boliviana, basado en datos oficiales y en los indicadores del Mapa de Complejidad Productiva del Banco de Desarrollo Productivo (BDP, 2020), confirma que la manufactura constituye uno de los sectores de mayor peso dentro del aparato productivo nacional. Este sector concentra una proporción significativa del valor bruto de producción (VBP) y se configura como un componente fundamental de la generación de valor agregado.

Los resultados muestran que las actividades con mayor contribución al VBP

manufacturero corresponden a la refinación de petróleo, la elaboración de productos alimenticios y el subsector de bebidas. Desde la perspectiva territorial, se confirma la concentración estructural del aparato manufacturero en el eje La Paz–Cochabamba–Santa Cruz, donde se aglutinan las principales unidades productivas, cadenas logísticas y mercados de consumo.

A nivel departamental, los resultados evidencian que la industria manufacturera paceña presenta una participación relevante dentro de la estructura nacional, con predominio de la elaboración de bebidas como una de sus actividades industriales de mayor dinamismo. Este subsector —que incluye bebidas alcohólicas y no alcohólicas— concentra aproximadamente el 22,2% del VBP manufacturero departamental, equivalente a más de 6.600 millones de bolivianos, lo que confirma su liderazgo dentro del tejido industrial paceño.

Dentro de este subsector, el segmento de bebidas no alcohólicas es el más significativo, al concentrar el 67% del VBP del total de bebidas, seguido por la destilación de bebidas alcohólicas (16,6%) y por la elaboración de cervezas y maltas (16,2%). Esta predominancia refleja una especialización productiva orientada principalmente al consumo interno, sostenida por la expansión de la demanda urbana y por la consolidación de empresas formales registradas en el SEPREC (2024). Asimismo, los indicadores de complejidad productiva del BDP muestran que la elaboración de bebidas no alcohólicas mantiene niveles de diversificación y de encadenamiento superiores a otros rubros tradicionales, lo que refuerza su potencial de crecimiento regional.

5 DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos permiten interpretar la estructura manufacturera boliviana como un sistema productivo diversificado, pero concentrado en actividades de transformación intermedia y con un nivel de complejidad económica moderado. La dependencia de rubros tradicionales, como alimentos y bebidas, coincide con los patrones identificados por el Mapa de Complejidad Productiva, según el cual la mayoría de los productos industriales del país poseen altos niveles de ubicuidad, limitando su potencial de sofisticación.

La concentración territorial en el eje central —validada tanto por la información del BDP (2020) como por los registros empresariales del SEPREC (2024)— refuerza

la idea de una estructura industrial históricamente centralizada. Esta concentración genera ventajas competitivas en términos de infraestructura, proximidad a mercados y disponibilidad de proveedores, pero también reproduce desigualdades territoriales que dificultan el desarrollo industrial de otras regiones con menor densidad productiva.

En este contexto, el departamento de La Paz desempeña un papel estratégico dentro del aparato manufacturero nacional. La consolidación del subsector de bebidas no alcohólicas como la principal actividad industrial del departamento responde a múltiples factores: una base empresarial formal en expansión, una demanda interna creciente y la articulación con cadenas logísticas regionales.

No obstante, persisten desafíos estructurales que limitan la sofisticación industrial, entre ellos la necesidad de incorporar mayor innovación tecnológica, mejorar la eficiencia energética, asegurar la calidad y disponibilidad de insumos locales, y avanzar hacia estándares más altos de sostenibilidad ambiental.

En conjunto, los hallazgos indican que la manufactura paceña se encuentra en una etapa de consolidación, con un subsector de bebidas no alcohólicas que destaca por su relevancia económica, pero que requiere fortalecimiento tecnológico y estratégico para aumentar su competitividad y sofisticación.

6 CONCLUSIONES

La industria manufacturera constituye uno de los pilares del desarrollo económico de Bolivia, al aportar de manera significativa al valor bruto de producción y concentrar una parte importante del tejido empresarial formal. Su peso dentro de la estructura productiva confirma su papel central en la generación de empleo y valor agregado.

En el departamento de La Paz, la manufactura muestra una estructura diversificada, destacando el subsector de elaboración de bebidas como su actividad industrial más relevante. Dentro de este subsector, las bebidas no alcohólicas representan la mayor proporción del valor producido, lo que evidencia una especialización orientada al consumo interno y un mercado en expansión.

La concentración industrial en el eje La Paz–Cochabamba–Santa Cruz genera ventajas en infraestructura y logística, pero también mantiene desequilibrios regionales que limitan el desarrollo de otras zonas del país. Esto resalta la necesidad de políticas que promuevan una industrialización más equilibrada y descentralizada.

Para fortalecer la competitividad manufacturera, especialmente en el subsector de bebidas no alcohólicas, es necesario avanzar hacia mayor complejidad económica mediante innovación tecnológica, diversificación productiva y fortalecimiento de encadenamientos con sectores primarios. Estas acciones permitirán consolidar un crecimiento industrial más sostenible y competitivo.

BIBLIOGRAFÍA

- Banco de Desarrollo Productivo. (2020). Mapa de Complejidades Productivas de Bolivia. Recuperado de <https://complejidades.bdp.com.bo/desc>
- Instituto Nacional de Estadística. (2017). Registros censales y encuestas estructurales de la industria manufacturera. Recuperado de <https://www.ine.gob.bo>
- Ministerio de Desarrollo Productivo y Economía Plural. (2019). Participación de la industria en la economía nacional y políticas de fortalecimiento productivo. Recuperado de <https://www.produccion.gob.bo>
- Servicio Plurinacional de Registro de Comercio. (2024). La industria manufacturera supera las 39.900 unidades económicas registradas en la base empresarial del SEPREC. Recuperado de <https://www.seprec.gob.bo/index.php/2024/06/24/la-industria-manufacturera-supera-las-39-900-unidades-economicas-registradas-en-la-base-empresarial-del-seprec/>
- Servicio Plurinacional de Registro de Comercio. (2024). 9.837 empresas en Bolivia corresponden a la industria manufacturera. Recuperado de <https://www.seprec.gob.bo/index.php/2024/11/07/seprec-9-837-empresas-en-bolivia-corresponden-a-la-industria-manufacturera/>
- UDAPE. (2015). Diagnóstico del sector manufacturero en Bolivia. Recuperado de <https://www.udape.gob.bo/wp-content/uploads/Colecciones/Diagnosticos/diagnostico2015/docs/TOMO%20VII%20-%20SECTOR%20MANUFACTURERO.pdf>
- Capra Seoane, K., & Urcullo Cossio, G. (2005). Sector industrial manufacturero. La Paz: UDAPE.
- Escobar de Pabon, S., & Kruse, T. (2002). La industria manufacturera boliviana en los noventa. La Paz: CEDLA.
- Rodríguez Ostría, G. J. A. (1980). Estado e industria manufacturera en Bolivia (1952-1956): antecedentes y desarrollo. Quito: FLACSO.
- Villegas, C., & Montaña, G. (1993). Industria boliviana entre los resabios del pasado y la lógica del mercado. La Paz: CEDLA.

<https://doi.org/10.53287/gvsh4892rs54u>

ALCOHOL EN LA GASOLINA: EFECTOS SOBRE LA EFICIENCIA Y LAS EMISIONES CONTAMINANTES

Nelson Condorena Avila

ORCID 0000-0002-2415-8932

Correo-e: nelsoncondorenaavila@gmail.com

Cel: 60146178

RESUMEN

La política de incrementar la mezcla de Etanol Anhidro en la gasolina, autorizada en Bolivia hasta el 25%, es una estrategia fundamental para reducir la dependencia de las importaciones y mitigar el alto costo de la subvención estatal, considerando que el precio real de la gasolina es significativamente mayor al precio subsidiado. Aunque el etanol posee un poder calorífico inherentemente menor que el de la gasolina, las investigaciones realizadas por la UMSA a la altitud de La Paz (3600 msnm) han demostrado que la presencia de oxígeno en la molécula del etanol compensa esta desventaja, promoviendo una combustión más completa y eficiente que resulta en un mejor rendimiento termodinámico, lo que se refleja en un potencial incremento de la potencia y el torque del motor. Esta combustión más limpia también disminuye la temperatura de operación del motor, minimizando el estrés térmico en los componentes. La academia ha confirmado que el uso de etanol anhidro en estas proporciones no causa daño estructural a los motores, desmintiendo el pánico generalizado. No obstante, el principal reto de la eficiencia se presenta en el consumo específico de combustible, ya que las mezclas elevadas pueden requerir que el motor inyecte un mayor volumen de combustible, afectando la economía del usuario. Por esta razón, la proporción más eficiente recomendada por los expertos es del 15% (E15). En cuanto a los efectos ambientales, el etanol anhidro es altamente beneficioso, ya que su acción oxigenante reduce drásticamente las emisiones de Monóxido de Carbono (CO) y los Hidrocarburos (HC) sin quemar, gases nocivos que contaminan el aire.

Palabras Clave: Etanol, Eficiencia, Emisiones, Poder Calorífico, Combustión.

ABSTRACT

The policy of increasing the anhydrous ethanol blend in gasoline, authorized in Bolivia to 25%, is a fundamental strategy to reduce dependence on imports and mitigate the high cost of the state subsidy, considering that the real price of gasoline is significantly higher than the subsidized price. Although ethanol has an inherently lower calorific value than gasoline, research conducted by UMSA at the altitude of La Paz (3,600 meters above sea level) has shown that the presence of oxygen in the ethanol molecule compensates for this disadvantage, promoting more complete and efficient combustion, resulting in better thermodynamic performance, reflected in a potential increase in engine power and torque. This cleaner combustion also lowers engine operating temperatures, minimizing thermal stress on components. The academy has confirmed that the use of anhydrous ethanol in these proportions does not cause structural damage to engines, refuting the widespread panic. However, the main challenge to efficiency lies in specific fuel consumption, as high fuel consumption may require the engine to inject a larger volume of fuel, impacting fuel economy. For this reason, the most efficient ratio recommended by experts is 15% (E15). Regarding environmental effects, anhydrous ethanol is highly beneficial, as its oxygenating action drastically reduces emissions of carbon monoxide (CO) and unburned hydrocarbons (HC), harmful gases that pollute the air.

Keywords: Ethanol, Efficiency, Emissions, Calorific Value, Combustion.

1. INTRODUCCIÓN

La discusión sobre la mezcla de etanol en la gasolina ha adquirido una relevancia crítica en Bolivia, impulsada por objetivos de soberanía energética y estabilidad macroeconómica. El Gobierno Nacional ha apostado por los biocombustibles de origen vegetal, como el etanol y el biodiésel, como una estrategia para reducir los costos de importación, evitar la fuga de divisas y disminuir la subvención a los combustibles fósiles. Actualmente, el precio de la gasolina subsidiada en Bolivia se mantiene en 3.76 Bs/litro, mientras que sin apoyo estatal podría alcanzar hasta 12Bs/litro, lo que subraya la magnitud de la carga fiscal (Andia-Vargas et al., 2023).

El marco regulatorio se ha fortalecido con la Ley N°1098 de 2018, que habilitó la mezcla de etanol anhidro en la gasolina hasta un veinticinco por ciento (25%).

Recientemente, el Decreto Supremo N°5135 ha ratificado este techo máximo, al tiempo que incorpora el biodiésel. Sin embargo, el porcentaje de mezcla implementado históricamente se mantuvo en 12% debido a estudios técnicos y limitaciones de stock (Estado Plurinacional de Bolivia, 2024).

Dada la controversia por el posible incremento de la mezcla, la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA), a través de su Instituto de Investigaciones Mecánicas y Electromecánicas (IIME), ha dedicado seis años de experimentación continua (desde 2018) a evaluar el impacto real del gasohol. Estos estudios son fundamentales porque se realizan en el contexto geográfico único de Bolivia (La Paz), a 3600 metros sobre el nivel del mar (msnm), utilizando un dinamómetro de chasis que es singular por su instalación a esa altitud (Torrez Caviña, 2023).

1.2 OBJETIVO

El objetivo de este trabajo es analizar cómo la incorporación de etanol anhidro en la gasolina influye en la eficiencia del motor, especialmente en parámetros como potencia, torque y consumo específico de combustible, según estudios locales.

Asimismo, se busca evaluar el impacto del etanol en la reducción de emisiones contaminantes, particularmente CO y HC, considerando las condiciones geográficas y energéticas propias del contexto boliviano.

1.3 METODOLOGÍA

El enfoque del presente trabajo es descriptivo–analítico basado en la revisión y comparación de estudios experimentales nacionales e internacionales sobre combustibles mezclados con etanol. Se utilizaron como fuente principal los ensayos realizados por la UMSA en su dinamómetro de chasis a 3600 msnm, analizando datos de rendimiento y emisiones para mezclas entre E10 y E25. Además, se integraron estadísticas oficiales del Estado boliviano y el marco regulatorio vigente para contextualizar los resultados, permitiendo una interpretación técnica articulada con la política energética del país.

2. DESARROLLO

2.1 Propiedades Físicoquímicas y Desempeño Termodinámico en la Altura

El etanol anhidro es un compuesto oxigenado que, al mezclarse con gasolina, altera las propiedades termodinámicas del combustible, lo cual resulta en efectos

complejos en los motores de combustión interna (MCI).

2.1.1. El Impacto Contradictorio del Poder Calorífico y el Oxígeno: El primer punto de análisis es la reducción del poder calorífico (LHV). El bioetanol tiene un poder calorífico de aproximadamente 7,300 a 7,500 kilocalorías por kilogramo equivalente, considerablemente menor al de la gasolina, que es de unas 10,800 kcal/kg (Torrez Caviña, 2023). El poder calorífico de la mezcla disminuye a medida que aumenta el porcentaje de etanol. Una menor densidad energética podría implicar teóricamente una pérdida de potencia y un aumento en el consumo de combustible (Quispe Condori et al., 2025).

Sin embargo, el etanol anhidro ofrece una ventaja decisiva al ser un hidrocarburo oxigenado, conteniendo un radical de oxígeno (oxidrilo) en su fórmula. Este oxígeno adicional mejora la combustión, otorgándole a la mezcla la característica de ser más combustible (Torrez Caviña, 2023). Además, el etanol es un excelente incrementador de octanaje (RON≈111). El aumento del octanaje en la mezcla reduce la susceptibilidad al fenómeno de detonación (knocking). En el caso colombiano, se registró un aumento de 2 a 3 unidades en el Índice Antidetonante (IAD) con una mezcla del 10% (Cortes Marín, González Sánchez, & Álvarez Mejía, 2008). Una mayor capacidad de compresión con la mezcla gasolina-etanol se correlaciona con un aumento del torque y una disminución del Consumo Específico de Combustible al Freno (BSFC) (Torrez Caviña, 2023).

2.1.2. Eficiencia Termodinámica y el Factor Altura en Bolivia: Las investigaciones realizadas en La Paz han demostrado que, a pesar del menor poder calorífico, en bajas concentraciones de etanol anhidro, la mejora en la calidad de la combustión compensa y supera el rendimiento termodinámico de la mezcla. Un hallazgo crucial en las pruebas a gran altitud es el efecto térmico. Dado que el alcohol libera menos calor, el motor recibe menos calor durante el ciclo de combustión, lo que significa que se calienta menos. Este efecto es beneficioso para la durabilidad del motor, ya que el metal funciona mejor al no sufrir distorsiones térmicas (Torrez Caviña, 2023).

2.1.3. Durabilidad del Motor y Requisitos para la Mezcla: La preocupación en Bolivia sobre el daño a los motores ha sido objeto de debate público. El director del IIME-UMSA, ingeniero Jaime Sanchez, insiste en que el uso de etanol anhidro es ancestral (citando el ciclo Otto y el Ford Modelo T). Las pruebas de la UMSA durante seis años no han reportado ninguna alteración negativa ni falla estructural.

Se considera que la idea de que un lote de 3 millones de vehículos se dañe por culpa de un combustible que todos usan es estadísticamente ilógica (Erbol,2024).

Sin embargo, para garantizar la integridad del motor, es fundamental el uso de etanol estrictamente anhidro (con un máximo de 0.5% de agua en las pruebas académicas). El alcohol anhidro debe tener un contenido de agua inferior a 0.7% en volumen. La presencia de agua es el riesgo principal, ya que el etanol es altamente afín al agua, pudiendo causar separación de fases en el combustible, lo que resulta en una fase acuosa alcohólica altamente corrosiva que puede dañar el sistema de inyección o carburación (Cortes Marín, González Sánchez, & Álvarez Mejía, 2008).

2.2 En el contexto boliviano, la tecnología del motor es un factor diferenciador

2.2.1. Motores con Carburador: Los vehículos más antiguos pueden requerir una regulación manual (cambio de chicler) para ajustar la dosificación de la mezcla de aire y combustible y así optimizar el rendimiento con etanol (Andia-Vargas et al., 2023). La UMSA puso a prueba vehículos a carburador, destacando la necesidad de esta regulación para obtener resultados más óptimos (Torrez Caviña, 2023).

2.2.2. Motores de Inyección Directa (GDI): Estudios en Bolivia utilizando mezclas E10 y E12 han reportado problemas de obstrucción de inyectores en motores GDI (como el Toyota Vxi 1AZ-FSE), causados por un sedimento blanco, aunque los motores de inyección convencional (Nissan HR15) solo mostraron deterioro en los sellos de los inyectores (Quispe Condori et al., 2025).

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 El Consumo y el Punto de Equilibrio (BSFC y km/L)

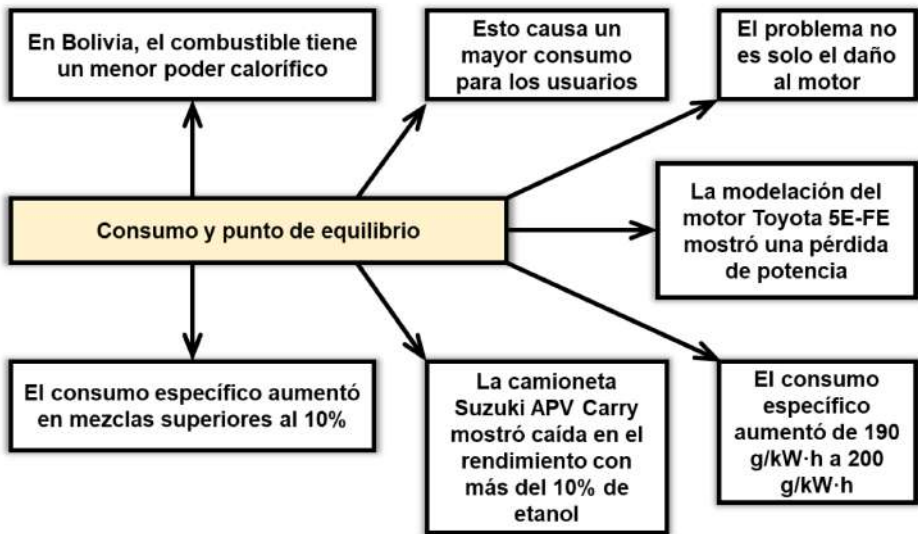
El principal dilema técnico en Bolivia no es el daño al motor, sino el punto en el que el menor poder calorífico supera el efecto oxigenante, resultando en un mayor volumen de combustible para el usuario (Erbol,2024). Esto se mide a través del Consumo Específico de Combustible (BSFC).

3.1.1. Resultados de Modelación y Pruebas Bolivianas: La modelación matemática de un motor (Toyota 5E-FE) con mezcla E12 mostró una disminución de la potencia efectiva (de 68 kW a 65 kW a 5500 rpm) y un aumento en el consumo específico (de 190 g/kW·h a 200 g/kW·h con E12). Esta menor densidad energética se traduce en una pérdida de potencia y un aumento en el consumo (Quispe Condori et al., 2025).

3.1.2. Volumen de Combustible Recorrido (km/L): En pruebas con la camioneta Suzuki APV Carry, se observó que con mezclas mayores al 10% de etanol, se tiene una caída en el rendimiento de kilómetros recorridos. El Consumo Específico también fue mayor en mezclas superiores al 10%. La Unidad de Control del Motor (ECU) compensa el menor poder calorífico inyectando más combustible, lo que explica el mayor consumo específico (Torrez Caviña, 2023).

3.1.3. La Mezcla Óptima (E15): A pesar de los resultados divergentes, el IIME de la UMSA ha determinado que la proporción óptima de mezcla es del 15% (E15), ya que es el punto de equilibrio ideal en términos de consumo de combustible versus economía.

Figura 1: Consumo y punto de equilibrio en el contexto boliviano.

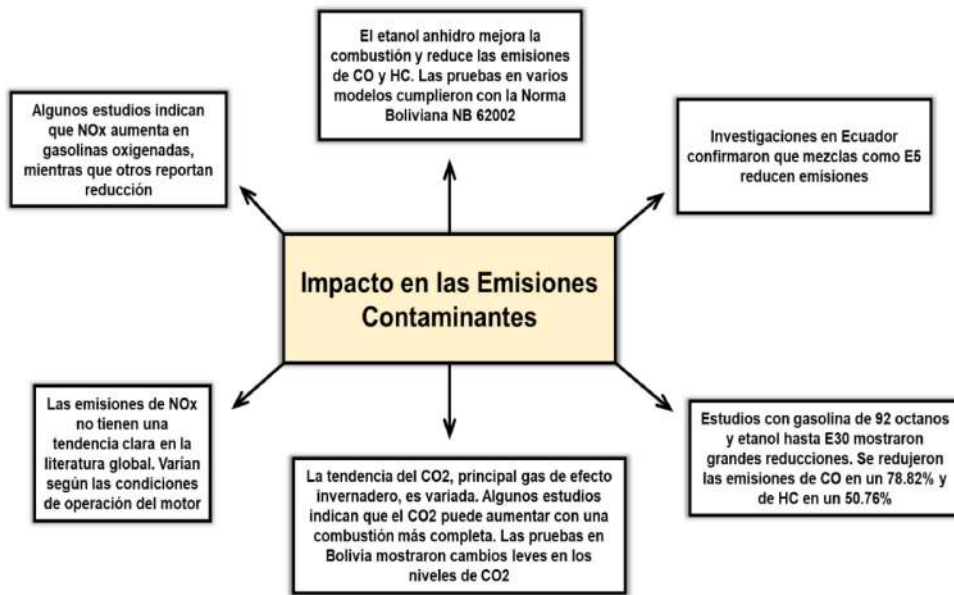


Fuente: Elaboración Propia

3.2. Impacto en las Emisiones Contaminantes

Los estudios de la UMSA, al utilizar un dinamómetro con capacidad para medir gases de escape, han permitido evaluar el impacto ambiental de las mezclas en Bolivia.

Figura 2: Impacto en las Emisiones Contaminantes.



Fuente: Elaboración Propia

3.2.1. Reducción de CO y HC: El efecto oxigenante del etanol anhidro produce una combustión más completa, lo que lleva a una reducción significativa de las emisiones de Monóxido de Carbono (CO) y de Hidrocarburos no quemados (HC). En general, las pruebas en varios modelos (Suzuki APV Carry, VW Gol, GAC GS4, Suzuki Jimny) mostraron que todas las mezclas (hasta E25) cumplen con la Norma Boliviana NB 62002 y presentan una gran disminución de HC respecto a la gasolina pura. En el caso del VW Gol, las mezclas de etanol mostraron una disminución muy considerable de HC, a excepción de la gasolina E0 (0% etanol) (Torrez Caviña, 2023).

3.2.2. Resultados de Laboratorio: Investigaciones ecuatorianas (similar región andina) confirmaron que mezclas como E5 producen una clara reducción de emisiones contaminantes. Estudios con gasolina de 92 octanos y etanol hasta E30 redujeron las emisiones de CO en un 78.82% y las de HC en un 50.76% (Sanisaca, 2025).

3.2.3. Dióxido de Carbono (CO₂): La tendencia del CO₂, el principal gas de efecto invernadero, es variada. Algunos estudios internacionales indican que el CO₂ puede aumentar debido a una combustión más completa (García Mariaca, Cendales Ladino, & Eslava Sarmiento, 2016). Sin embargo, las pruebas bolivianas en varios vehículos mostraron leves cambios o que el CO₂ se mantiene prácticamente invariante o con leve descenso en comparación con el combustible sin etanol (Torrez Caviña, 2023). Esto contrasta con el argumento internacional de que, aunque se libera CO₂ al quemarse el etanol, el uso de este puede resultar en una reducción neta de los niveles atmosféricos de CO₂ debido a que proviene de una fuente renovable (ciclo de vida) (Cortes Marín, González Sánchez, & Álvarez Mejía, 2008).

3.2.4. Óxidos de Nitrógeno (NOx): Las emisiones de NOx (precursores del smog fotoquímico) no presentan una tendencia clara en la literatura global, variando según las condiciones de operación del motor (García Mariaca, Cendales Ladino, & Eslava Sarmiento, 2016). Algunos estudios reportan que las emisiones de NOx aumentan en gasolinas oxigenadas comparadas con gasolinas puras (Ocampo Duque, 2006), mientras que otros observan una reducción (Muñiz-Ramireza et al., 2021).

3.3. Consideraciones Ambientales y Técnicas Adicionales

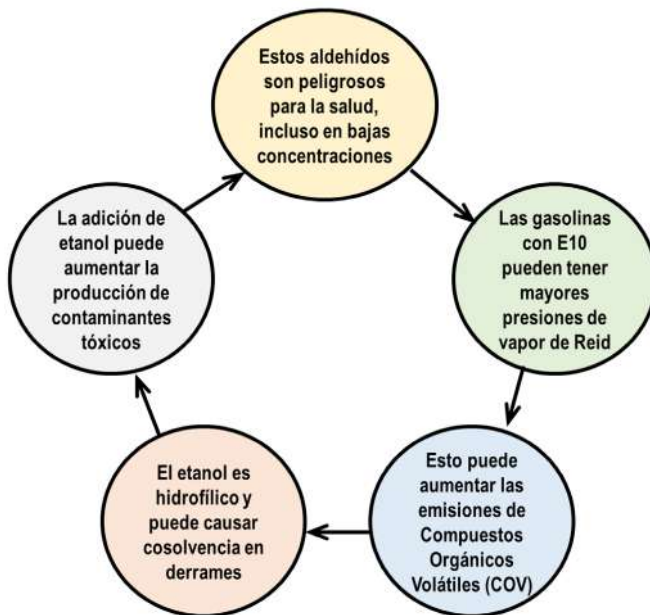
El uso del etanol, si bien resuelve problemas de emisiones reguladas (CO, HC), presenta otros desafíos:

3.3.1. Contaminantes No Regulados y Tóxicos: La adición de etanol puede incrementar la producción de contaminantes altamente tóxicos y no regulados, como el acetaldehído y el formaldehído. Estos aldehídos son muy peligrosos para la salud humana, incluso a bajas concentraciones (Ocampo Duque, 2006).

3.3.2. Emisiones Evaporativas (COV): Las gasolinas con bajas concentraciones de etanol (E10) pueden tener mayores presiones de vapor de Reid (PVR), lo que potencialmente aumenta las emisiones evaporativas de Compuestos Orgánicos Volátiles (COV) (Ortiz, 2010). Esto incrementa el potencial de formación de ozono troposférico (Ocampo Duque, 2006).

3.3.3. Riesgo de Contaminación de Aguas Subterráneas: El etanol, al ser hidrofílico, en caso de derrames (accidentales o provocados), puede causar el fenómeno de cosolencia, incrementando la solubilidad de compuestos tóxicos de la gasolina (BTEX) en el agua, facilitando su flujo hacia los acuíferos (Ocampo Duque, 2006).

Figura 3: Consideraciones ambientales y técnicas.



Fuente: Elaboración Propia

4. CONCLUSIONES

La alternativa en Bolivia de incrementar el techo de mezcla de etanol anhidro en la gasolina, respaldada por la Ley N° 1098 y el D.S. N° 5135, es una medida política y económica estratégica. No obstante, su implementación exitosa en el contexto boliviano de alta altitud requiere una integración de la ciencia y la cautela regulatoria.

4.1. Eficiencia y Desempeño Termodinámico: La decisión boliviana de ampliar el uso de etanol anhidro se alinea con tendencias internacionales adoptadas en países como Brasil, Estados Unidos y la Unión Europea, donde las mezclas etanol–gasolina se han consolidado por sus beneficios energéticos. En Bolivia, las pruebas del IIME–UMSA confirman que el etanol mejora la combustión por su mayor octanaje y contenido de oxígeno, favoreciendo el torque y reduciendo la temperatura de operación del motor. Sin embargo, al igual que en otros países de gran altitud (Perú, México), el menor poder calorífico del etanol incrementa el BSFC en mezclas superiores a E10, exigiendo mayor inyección de combustible por parte de la ECU.

4.2. La Proporción Estratégica Boliviana: Aunque el marco legal permite hasta el 25%, los estudios preliminares de la UMSA han determinado que la proporción más eficiente y óptima para la economía del usuario es el 15% (E15). La implementación de porcentajes superiores se realizará de forma gradual y sujeta a estudios técnicos bianuales que consideren la evolución dinámica del parque automotor.

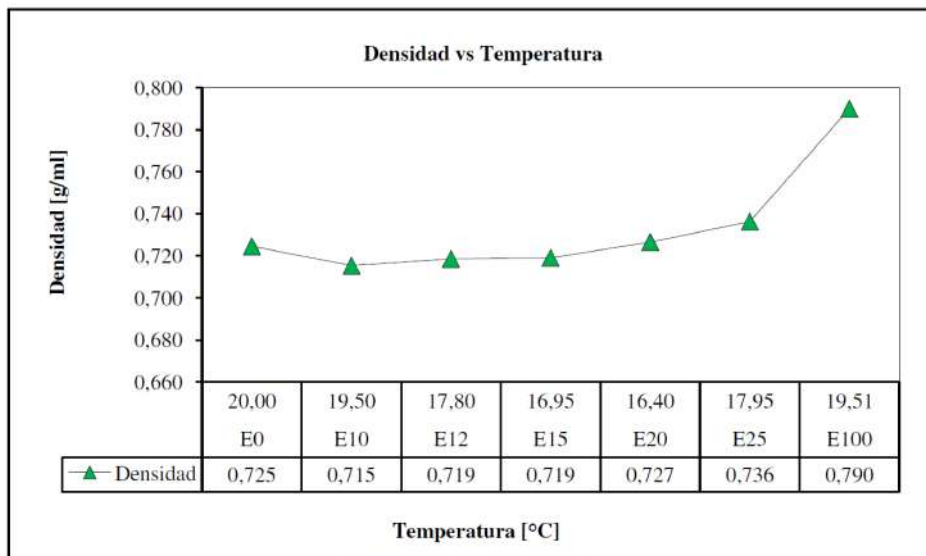
4.3. Beneficios Ambientales de las Emisiones Reguladas: La reducción de CO y HC observada en Bolivia es consistente con estudios globales que confirman la capacidad del etanol para mejorar la calidad de la combustión y disminuir contaminantes regulados en motores de encendido por chispa. En el contexto boliviano, estas mejoras permiten cumplir la NB 62002, mientras que el CO₂ muestra variaciones mínimas, fenómeno también reportado en países con programas de etanol más maduros como Brasil y Colombia.

4.4. Implicaciones Económicas y Logísticas: El programa está diseñado para impulsar el empresariado boliviano (sector cañero) y reducir la erogación de divisas. El incremento de la mezcla al 15% representa un ahorro proyectado de 45 a 50 millones de dólares USD anuales en la importación de gasolina. Es esencial garantizar la producción suficiente de etanol anhidro para evitar tener que importarlo, lo cual resultaría en una nueva fuga de divisas.

4.5. Riesgos y Recomendaciones Técnicas: Se recomienda encarecidamente la realización de estudios continuos y seriados (anuales, con análisis de lubricantes) para medir el impacto a largo plazo en los elastoméricos y el desgaste del motor. Se debe prestar especial atención a los motores con inyección directa (GDI), que han mostrado susceptibilidad a la obstrucción de inyectores en las pruebas bolivianas, y a la necesidad de regular mecánicamente los motores a carburador.

ANEXOS

Anexo 1: Suzuki APV Carry

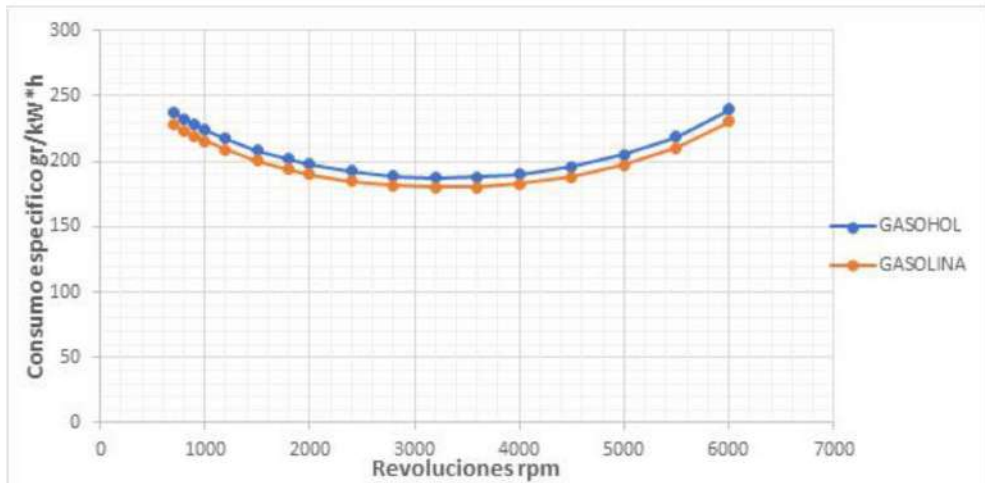
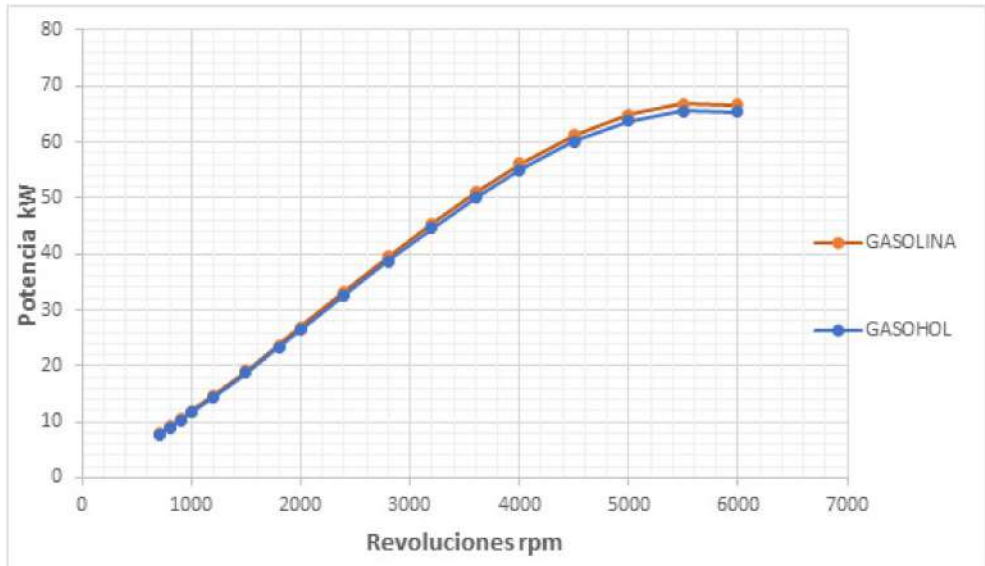


Combustible	Potencia Motor [kw]	Revoluciones [rpm]
E0	37,4	5236
E10	38,1	5225
E12	37,7	5228
E15	38,1	5236
E20	37,1	5235
E25	38,2	5242

Combustible	CO [% Vol.]	CO2 [% Vol.]	O2 [% Vol.]	HC [ppm]	Lambda	RPM
E0	0,01	15,20	0,09	29	1,002	700
E10	0,01	14,80	0,00	23	0,998	700
E12	0,00	14,90	0,00	9	0,999	700
E15	0,01	14,70	0,04	11	1,001	700
E20	0,01	14,80	0,00	19	0,999	700
E25	0,01	14,80	0,00	12	0,999	700

Fuente: Pruebas con diferentes porcentajes de etanol anhidro, rendimiento y emisiones. (Torrez Caviña, 2023)

Anexo 2: Potencia efectiva y consumo específico



Fuente: Potencia efectiva y consumo específico de un motor operando con gasolina y gasohol. (Quispe Condori et al., 2025)

REFERENCIAS

- Andia-Vargas, J. M., Salinas-Rojas, M., Orellana Lafuente, R., & Sempértégui-Tapia, D. F. (2023). Estado del arte sobre la influencia de mezclas etanol-gasolina en el desempeño de motores de combustión interna. Centro de Investigaciones Ópticas y Energías (CIOE), Universidad Privada Boliviana.
- Arce Catacora, L. A. (Presidente Constitucional del Estado Plurinacional de Bolivia). (2024). Decreto Supremo N° 5135. Gaceta Oficial del Estado Plurinacional de Bolivia.
- Asamblea Legislativa Plurinacional de Bolivia. (2018). Ley N° 1098: Ley de Aditivos de Origen Vegetal.
- Cortes Marín, E., González Sánchez, H., & Álvarez Mejía, F. (2008). Colombia en la era del alcohol carburante. *Revista CES Medicina Veterinaria y Zootecnia*, 3(2), 120–132.
- Delius, C. E. (2008). Producción de etanol: Una oportunidad para Bolivia. *Revista Virtual REDESMA*, 1(2), 43–54.
- García Mariaca, A., Cendales Ladino, E. D., & Eslava Sarmiento, A. F. (2016). Motores de combustión interna (MCI) operando con mezclas de etanol gasolina: Revisión. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 26(1), 75–96. <https://doi.org/10.18359/rcin.1626>
- Granada Aguirre, L. F. (2005). El alcohol carburante: Un proyecto con un futuro ambiental, económico y social incierto. *Entramado*, 1(1), 26–39.
- Iñiguez Izquierdo, J. F., Reyes Campaña, G. G., Rivera Rivera, C. A., & Vera Orbe, E. S. (2017). Estudio de emisiones contaminantes producidas por un motor Otto con el uso de gasolina y un combustible a base de 95% de gasolina y 5% de etanol. *INNOVA Research Journal*, 2(12), 11–18. ISSN 2477-9024.
- Kothare, C. B., & Kongre, S. (2016). Experimental Investigation of Effect of Gasoline-Higher Alcohol Blend on Performance Characteristic of Four Stroke Spark Ignition Engine at Variable Compression Ratio. 2016 International Conference on Research and Innovations in Science, Engineering & Technology (ICRISET). (ISBN 978-1-4673-9939-5/16). IEEE.

- Medinaceli Monrroy, S. M., & Velázquez Bilbao La Vieja, M. G. (2024). Precios y subsidios a los hidrocarburos en Bolivia 1986-2025 (Development Research Working Paper Series, No. 01/2024). Institute for Advanced Development Studies (INESAD).
- Muñiz-Ramireza, N. B., Rua-Mojica, L. F., Ley-Tomas, S., Hernández-Altamirano, R., Mederos-Nieto, F. S., & Martínez-Martínez, S. (2021). Estudio experimental de emisiones contaminantes generadas en un motor de relación de compresión variable tipo CFR alimentado con mezclas gasolina-etanol. Memorias del XXVII Congreso Internacional Anual de la SOMIM.
- Ocampo Duque, W. A. (2006). ¿Es la biogasolina una alternativa ambiental en Colombia? *Revista Facultad de Ingeniería*, 38, 7–19.
- Puma Corbacho, S. E. (2021). Uso de las mezclas diésel-biodiésel-etanol y sus efectos sobre el proceso de combustión, desempeño energético y emisiones contaminantes de un motor de encendido por compresión de 240 Kw. [Tesis].
- Quispe Condori, B., Murillo Coca, G., Terán Ballesteros, R. U., Guerreros Colque, J., Chungara Santillán, H., & Villafuerte Garabito, J. (2025). Simulación del performance de motores de combustión interna con mezcla gasolina-etanol en el contexto boliviano. *Recites*, 3(1). <https://doi.org/10.70598/vbvr3010ei12t>
- Sanisaca Brito, C. V. (2025). Análisis de los efectos de la concentración de etanol en combustibles de 82 y 92 octanos para reducir emisiones de gases contaminantes: Pruebas en vacío y carga en un vehículo de combustión interna de 2000 cc. [Tesis]
- Torrez Caviña, M. A. (2023). Evaluación del impacto de diferentes mezclas de etanol anhidro y gasolina en vehículos equipados con motores ciclo Otto convencionales a 3600 msnm [Tesis de Maestría Terminal, Universidad Mayor de San Andrés].
- Erbol (2024). Académico de la UMSA asegura que no se ha reportado daños en vehículos por la mezcla de alcohol anhidro en la gasolina. Recuperado de: <https://erbol.com.bo/nacional/acad%C3%A9mico-de-la-umsa-asegura-que-no-se-ha-reportado-da%C3%B1os-en-veh%C3%ADculos-por-la-mezcla-de>

<https://doi.org/10.53287/ujvh7578ee20e>

LEAN SIX SIGMA COMO ESTRATEGIA DE OPTIMIZACIÓN EN LA INDUSTRIA 4.0

Ing. Anaceli Espada Silva

Docente de la carrera de Ingeniería Industrial

Nº ORCID: 0000-0001-58367348

anaceli.espada@gmail.com

Teléfono: 72030303

Univ. Cristian Marcelo Heredia Ticona

Estudiante Ingeniería Industrial

Nº ORCID: 0009-0002-7246-5301

cmheredia1@umsa.bo

Teléfono: 75210415

RESUMEN

El presente artículo analiza la aplicación del Lean Six Sigma 4.0 como estrategia de optimización en el contexto de la Industria 4.0, integrando los principios del Lean Manufacturing y del Six Sigma con el uso de tecnologías digitales emergentes. A través de la simulación de casos para proyectar resultados de mejora uno correspondiente al sector productivo y otro al sector financiero se demuestra el potencial de esta metodología para reducir desperdicios, mejorar la calidad y fortalecer la toma de decisiones basada en datos en tiempo real. Los resultados proyectados evidencian incrementos significativos en eficiencia operativa, reducción de costos y aumento en la satisfacción del cliente, confirmando que la combinación entre las metodologías de mejora continua y las herramientas digitales constituye un modelo integral hacia la excelencia operativa, la sostenibilidad y la competitividad inteligente..

Palabras clave: Lean Six Sigma, Industria 4.0, optimización, mejora continua,

toma de decisiones.

ABSTRACT

This article analyzes the application of Lean Six Sigma 4.0 as an optimization strategy in the context of Industry 4.0, integrating the principles of Lean Manufacturing and Six Sigma with the use of emerging digital technologies. Through case simulations to project improvement results—one corresponding to the manufacturing sector and another to the financial sector—the potential of this methodology to reduce waste, improve quality, and strengthen decision-making based on real-time data is demonstrated. The projected results demonstrate significant increases in operational efficiency, cost reduction, and increased customer satisfaction, confirming that the combination of continuous improvement methodologies and digital tools constitutes a comprehensive model for operational excellence, sustainability, and smart competitiveness.

Keywords: Lean Six Sigma, Industry 4.0, optimization, continuous improvement, decision-making.

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, la acelerada transformación tecnológica ha modificado radicalmente la manera en que las empresas producen, gestionan información y se relacionan con su entorno. La llamada revolución digital ha impulsado un proceso de cambio continuo en todos los sectores, exigiendo que las organizaciones sean más ágiles, innovadoras y adaptables para mantenerse competitivas en mercados cada vez más dinámicos.

Si se analiza la lista de empresas del Fortune 500, únicamente 60 de las 500 compañías más grandes de Estados Unidos en 1955 permanecen activas en la actualidad (Heredia Jerez, 2019). Este hecho refleja que la mayoría no logró adaptarse al cambio tecnológico, en particular al originado por la invención del transistor en 1947, el cual marcó el inicio de la revolución digital moderna. Las empresas que no evolucionaron ante este avance desaparecieron o fueron desplazadas, mientras que aquellas que adoptaron una mentalidad de mejora continua e innovación tecnológica lograron sobrevivir y prosperar.

Ante este desafío, el LSS surge como una estrategia de optimización integral, al combinar los principios del Lean Manufacturing, enfocados en la eliminación de

desperdicios (Antony, 2019), con el rigor analítico del Six Sigma, orientado a reducir la variabilidad y mejorar la calidad (Womack & Jones, 2003).

El objetivo de este artículo es analizar el papel del LSS como estrategia de optimización en la Industria 4.0, abordando su base metodológica, sus aplicaciones prácticas y su impacto en la toma de decisiones empresariales, la productividad y la competitividad en la era digital.

2. COMPRENSIÓN DEL LEAN SIX SIGMA

El LSS surge de la integración de dos metodologías de mejora de procesos complementarias: Lean Manufacturing y Six Sigma. Su propósito común es optimizar el desempeño organizacional mediante la eliminación de desperdicios, la reducción de la variabilidad y el mejoramiento continuo de la calidad (Womack & Jones, 2003). Esta sinergia permite que las empresas alcancen mayores niveles de eficiencia, productividad y satisfacción del cliente.

Lean Manufacturing

El Lean Manufacturing se originó en la década de 1950 dentro del TPS, desarrollado por Taiichi Ohno y Shigeo Shingo. Su objetivo principal es maximizar el valor para el cliente a través de la eliminación sistemática de actividades que no agregan valor (muda) y la mejora continua (kaizen) (Ohno, 1988)

Lean promueve un enfoque en el flujo de valor, buscando que cada proceso contribuya a entregar exactamente lo que el cliente necesita, en el momento justo JIT y con el mínimo desperdicio posible. Entre sus principales herramientas y técnicas se destacan:

- 5S: orden y limpieza en el área de trabajo para mejorar la eficiencia.
- VSM: identificación de desperdicios a lo largo del proceso.
- Kanban: control visual de la producción y del inventario.
- SMED: reducción de tiempos de cambio o preparación.
- Poka-Yoke: mecanismos a prueba de errores.

La implementación de Lean implica un cambio cultural en la organización, donde el compromiso de todos los niveles jerárquicos resulta esencial para sostener la mejora continua (Womack & Jones, 2003).

Six Sigma

Six Sigma fue desarrollada en Motorola a mediados de los años 80, liderada por Bill Smith y Mikel Harry, como una estrategia estadística destinada a reducir la variabilidad y mejorar la calidad de los procesos (Montgomery, 2020). Su nombre proviene del símbolo griego “ σ ” (sigma), que representa la desviación estándar en estadística, es decir, el nivel de dispersión de los resultados respecto al valor esperado.

El objetivo de Six Sigma es alcanzar procesos con una variabilidad tan baja que produzcan menos de 3,4 DPMO, lo que equivale a un nivel de calidad casi perfecto (George, Rowlands, Price, & Maxey, 2005).

La metodología se estructura bajo el ciclo DMAIC, compuesto por cinco fases:

- Definir: identificar el problema y las expectativas del cliente.
- Medir: recolectar y validar los datos del proceso.
- Analizar: identificar causas raíz de los defectos.
- Mejorar: implementar soluciones que optimicen el desempeño.
- Controlar: mantener y estandarizar las mejoras logradas.

Six Sigma se apoya en herramientas estadísticas como el Cp e Cpk, SPC y DOE, las cuales permiten tomar decisiones basadas en evidencia cuantitativa (Montgomery, 2020).

Integración Lean – Six Sigma

La combinación de ambos enfoques da origen al LSS, una filosofía integral que busca hacer más con menos, garantizando a la vez procesos estables y de alta calidad (Antony, 2019). Mientras Lean se centra en la velocidad y el flujo de valor, Six Sigma se enfoca en la precisión y la reducción de variabilidad.

En conjunto, estas metodologías ofrecen una estructura robusta que permite identificar y eliminar causas de ineficiencia y defectos, alineando los objetivos operativos con la estrategia empresarial. LSS utiliza equipos de mejora liderados por profesionales certificados (White, Green y Black Belts), quienes aplican la metodología para resolver problemas complejos y lograr resultados sostenibles (George, Rowlands, Price, & Maxey, 2005).

Su efectividad radica en que combina la eficiencia operativa con la rigurosidad analítica, estableciendo una base sólida para los sistemas productivos inteligentes y la transformación hacia la excelencia operacional.

3. LEAN SIX SIGMA EN LA ERA DE LA INDUSTRIA 4.0

La Industria 4.0 representa la evolución de los sistemas productivos hacia un entorno interconectado, digital y autónomo. Esta nueva era combina tecnologías como el IoT, la IA, la analítica de datos, los CPS y la automatización inteligente, promoviendo una gestión basada en información en tiempo real (Kagermann, Wahlster & Helbig, 2013; Lee, Bagheri & Kao, 2015).

En este contexto, la metodología LSS se fortalece al integrarse con las herramientas digitales, permitiendo procesos más eficientes, predecibles y sostenibles. Su aplicación dentro del marco de la Industria 4.0 da lugar a lo que se denomina LSS 4.0, un enfoque que une la filosofía de mejora continua con la capacidad tecnológica de los sistemas inteligentes para la optimización integral de procesos (Antony, 2019).

La Metodología DMAIC como estructura base

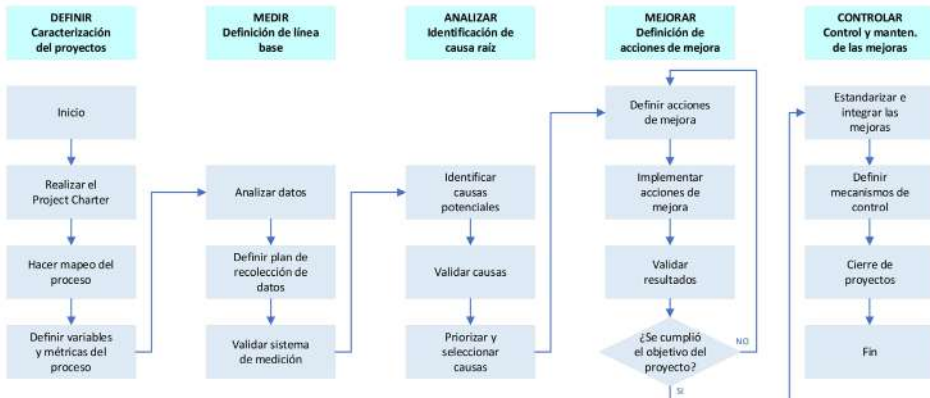
El corazón de LSS se encuentra en la metodología DMAIC. Este ciclo sistemático guía a las organizaciones desde la identificación del problema hasta la estandarización de las soluciones implementadas (Montgomery, 2020).

Esta metodología ofrece una estructura clara y flexible que puede aplicarse en cualquier sector industrial o de servicios, permitiendo una toma de decisiones objetiva y basada en datos. Su éxito depende tanto del rigor analítico como del compromiso organizacional hacia la mejora continua.

Representación general de la metodología DMAIC

La Figura 1 representa de forma general la estructura metodológica del ciclo DMAIC, empleada en proyectos LSS. Cada fase está compuesta por una serie de actividades que permiten avanzar de manera lógica y controlada desde la definición del problema hasta el cierre exitoso del proyecto.

Figura 1: Metodología DMAIC para proyectos LSS



Nota: Adaptado de Revista Chilena de Ingeniería (Felizola y Luna, 2021)

Esta secuencia metodológica facilita la integración de datos, análisis y control de manera ordenada, adaptándose a distintos niveles de complejidad y tamaño de empresa. Su fortaleza radica en que puede complementarse con herramientas digitales propias de la Industria 4.0 como la automatización de mediciones, la analítica avanzada o la simulación virtual sin perder su esencia estructurada y práctica.

Sinergia entre Lean Six Sigma y la Industria 4.0

La convergencia entre LSS y la Industria 4.0 permite evolucionar desde un modelo reactivo hacia un enfoque predictivo e inteligente, en el que los procesos pueden medirse, analizarse y controlarse en tiempo real (Hermann, Pentek, & Otto, 2016).

Esta integración convierte a LSS en una herramienta clave de la optimización inteligente, alineada con los principios de la transformación digital industrial.

4. APLICACIONES PRÁCTICAS EN LA TOMA DE DECISIONES EMPRESARIALES

La integración del LSS con las tecnologías de la Industria 4.0 como el IoT, la analítica de datos, los CPS y el RPA ha transformado la manera en que las organizaciones gestionan la mejora continua.

En la actualidad, las decisiones empresariales ya no se basan únicamente en la

experiencia, sino en datos en tiempo real generados desde las propias operaciones. Esta convergencia permite detectar causas raíz con mayor rapidez, optimizar flujos de trabajo y mantener el control estadístico de los procesos de manera automatizada.

Diversas corporaciones líderes han demostrado la efectividad del LSS 4.0 al combinar filosofía de mejora continua con tecnologías inteligentes. A continuación, se resumen algunos casos representativos que evidencian cómo la aplicación de herramientas digitales y analíticas permite tomar decisiones más precisas, rápidas y sostenibles.

Tabla 1: Aplicaciones destacadas de LSS 4.0 en Empresas Líderes

Empresa / Sitio	Aplicación y tecnología empleada	Indicadores clave monitoreados	Resultados obtenidos
Bosch Rexroth (Planta hidráulica, EE. UU.)	Integración hombre-máquina mediante la plataforma ActiveCockpit, con captura automática de datos y tableros digitales en tiempo real.	Tiempo de ciclo, disponibilidad de equipos, OEE, MTBF/MTTR, tasa de incidencias.	Reducción del 27 % en el tiempo de ciclo, 50 % menos mantenimiento correctivo y optimización del 50 % del espacio físico.
Siemens – Electronics Works Amberg (EWA, Alemania)	Implementación de una fábrica digital con gemelos digitales (CPS) y analítica avanzada para el control de calidad y la trazabilidad.	% de retrabajo, DPMO, tiempo de liberación de lote, rendimiento de primera pasada (FPY).	Disminución de hasta 30 % en el esfuerzo de prueba en equipos de rayos X y aumento del rendimiento de primera pasada.
Toyota Motor Corporation (TPS)	Aplicación de la filosofía Lean TPS, basada en la eliminación de desperdicios, flujo tirado por demanda y sincronización digital del Kanban.	Inventario promedio, lead time, sincronía de flujo, cumplimiento JIT y nivel de servicio.	Reducción del 30 % en inventarios, mejora del 20 % en tiempo de entrega y aumento del nivel de servicio al cliente.
Transformación 4.0 (Meta-síntesis industrial)	Adopción combinada de Lean + tecnologías 4.0 (IoT, analítica y automatización inteligente).	OEE, lead time, DPMO, consumo energético por unidad, productividad por hora-hombre.	Incremento promedio del 15–25 % en eficiencia operacional, reducción del 40 % en desperdicios y disminución del 25 % en lead time.

Nota: Elaboración con base en datos públicos de Bosch Group, Siemens AG, Toyota Global y GE Reports.

Los resultados de estos casos reflejan una tendencia clara: la digitalización amplifica los beneficios del LSS, permitiendo gestionar procesos complejos con mayor visibilidad y precisión. Las tecnologías 4.0 convierten los datos operativos en información estratégica, habilitando una toma de decisiones más ágil, predictiva y fundamentada.

5. IMPACTO EN LA OPTIMIZACIÓN DE PROCESOS

La siguiente tabla resume los impactos más representativos obtenidos tras la aplicación de LSS 4.0, contrastando los valores antes y después de la implementación, junto con los rangos de mejora típicos observados en industrias internacionales. Esta estructura puede utilizarse como modelo de referencia para presentar los resultados de casos propios o simulaciones.

Tabla 2: Impacto de Lean Six Sigma 4.0 en indicadores operativos

Indicador	Antes	Después	Mejora obtenida	Rango típico observado	Logros y efectos estratégicos alcanzados
Eficiencia global (OEE)	72 %	86 %	+14 puntos	+10 a +20 puntos en adopciones Lean 4.0	Bosch Rexroth mejoró el aprovechamiento de sus recursos y redujo pérdidas operativas, aumentando su capacidad de producción sin ampliar infraestructura. Este resultado fortaleció su posición como referente de eficiencia en manufactura avanzada.
Tasa de defectos (DPMO)	45 000	12 000	-73 %	-20 % a -60 % según nivel de madurez	Siemens Amberg alcanzó niveles de precisión cercanos al 99,9 %, convirtiéndose en una de las plantas más automatizadas del mundo. La mejora en la calidad consolidó su reputación internacional en ingeniería de producción inteligente.
Tiempo de ciclo	5,2 s	3,8 s	-27 %	-15 % a -30 % (Bosch Rexroth -27 %)	Toyota Motor Corporation, al digitalizar su sistema Kanban, logró reducir tiempos de entrega y aumentar la flexibilidad de su cadena de suministro. Esto le permitió mantener liderazgo mundial y adaptarse rápidamente a la demanda global.
Costos de no calidad (índice)	100	58	-42 %	Disminución del 35-45 % en procesos con SPC/IoT	La implementación de SPC y IoT en varias plantas permitió reducir desperdicios, retrabajos y consumo energético, mejorando la rentabilidad y sostenibilidad ambiental.

Satisfacción del cliente	82 %	94 %	+12 puntos	+10 a +15 puntos por mejoras en calidad y entrega	Siemens y Toyota aumentaron la confianza y fidelidad de sus clientes al ofrecer productos con mayor confiabilidad y puntualidad. Esto se tradujo en crecimiento sostenido de ventas y preferencia de mercado.
--------------------------	------	------	------------	---	---

Nota: Elaboración a partir de datos de McKinsey & Company (2023), Bosch Group (2020) y Toyota Global (2022).

Estos resultados evidencian que el LSS 4.0 no solo mejora la productividad, sino que fortalece la sostenibilidad industrial, al optimizar el uso de energía y materiales. Asimismo, permite crear una cultura organizacional basada en la toma de decisiones por evidencia, donde cada mejora se valida mediante datos objetivos y no por percepciones.

6. SIMULACIÓN DE CASOS PARA PROYECTAR LOS RESULTADOS DE MEJORA

Con el fin de validar la sostenibilidad y escalabilidad de los resultados observados, se desarrollarán simulaciones para dos contextos: una empresa manufacturera de bebidas (Andes Drinks S.A.) y una entidad de servicios financieros (Finanzas Andinas S.A.). Las simulaciones estiman el desempeño a 6 y 12 meses posteriores a la implementación de LSS 4.0, bajo diferentes escenarios de demanda y madurez operativa.

1. Empresas en el Sector Industrial (Andes Drinks S.A.)

1.1. Introducción del caso

El presente caso de estudio fue desarrollado para demostrar la aplicación práctica de la metodología LSS bajo el enfoque DMAIC, incorporando herramientas digitales de la Industria 4.0 (Antony, 2019). El contexto corresponde a una empresa manufacturera de bebidas no alcohólicas, denominada Andes Drinks S.A., dedicada al envasado de jugos naturales en botellas PET de 500 ml.

Durante el año 2024, la empresa detectó pérdidas significativas en su línea de envasado debido a defectos en el sellado térmico y variaciones en la eficiencia de los equipos. Estas condiciones ocasionaban un 6,5% de productos defectuosos, altos costos de no calidad y retrasos en la entrega.

El objetivo principal del proyecto fue reducir la tasa de defectos a menos del 3%,

mejorar la OEE al 85% o superior, e implementar un sistema de monitoreo digital que permitiera la toma de decisiones en tiempo real.

1.2. Integración de herramientas Lean y Six Sigma en el proyecto

En este proyecto, Andes Drinks S.A. aplicó un conjunto de herramientas seleccionadas de ambas filosofías, priorizando aquellas más pertinentes al tipo de proceso automatizado.

Tabla 3: Herramientas LSS aplicadas en el caso Andes Drinks S.A.

Fase DMAIC	Herramientas Lean	Herramientas Six Sigma	Propósito principal
Definir	SIPOC, VSM	Project Charter, Voz del Cliente (VOC)	Identificar el flujo de valor y el problema clave.
Medir	5S (área de medición)	Plan de recolección de datos, Gage R&R	Asegurar la calidad y precisión de los datos recolectados.
Analizar	Análisis de flujo de valor (VSM futuro)	Diagrama de Pareto, Ishikawa, Análisis de capacidad (Cp, Cpk)	Detectar las causas raíz y cuantificar la variabilidad.
Mejorar	SMED, Poka-Yoke, Kanban digital	Diseño de Experimentos (DOE), simulación	Implementar mejoras rápidas y sostenibles con base en evidencia.
Controlar	Tablero digital (KPI), Estandarización 5S	Control Estadístico de Procesos (SPC)	Mantener la estabilidad y prevenir desviaciones.

Nota: Elaboración en base a la simulación del Caso

Fase “Definir” – Identificación del problema

En la primera etapa se elaboró el Project Charter, estableciendo el alcance y los objetivos:

Tabla 4: Project Charter del caso Andes Drinks S.A.

Elemento	Descripción
Problema principal	Alta tasa de defectos en el sellado térmico (6,5%).
Objetivo del proyecto	Reducir defectos a $\leq 3\%$ y mejorar OEE $\geq 85\%$.
Duración estimada	4 meses.
Equipo de trabajo	Líder Black Belt, ingeniero de procesos, analista financiero, operador jefe.

Nota: Elaboración en base a la simulación del Caso

Figura 1: Proceso del caso Andes Drinks S.A.

Nota: Elaboración en base a la simulación del Caso



El análisis del flujo reveló demoras por ajustes de máquina, retrasos en calibración de temperatura y paradas por mantenimiento correctivo, considerados “muda” en filosofía Lean.

Fase “Medir” – Evaluación del desempeño inicial

Se recolectaron datos de tres semanas consecutivas con un plan de medición validado (Gage R&R).

Tabla 5: Indicadores de Evaluación de Desempeño del caso Andes Drinks S.A. Nota:

Indicador	Promedio inicial	Unidad de medida
Defectos por lote	6,5%	%
Tiempo de ciclo	5,1	segundos/botella
OEE (eficiencia global)	72%	%
Costos de no calidad	14.200	Bs/mes

Elaboración en base a la simulación del Caso

Se observó una variabilidad térmica significativa ($\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$) en el sellado, afectando la

adherencia del cierre.

Fase “Analizar” – Causas raíz y diagnóstico

Con el uso del diagrama de Pareto se identificó que el 68% de los defectos correspondían a temperaturas inestables y falta de calibración oportuna.

Tabla 6: Causas principales de defectos del caso Andes Drinks S.A.

Causa	% de defectos
Variación térmica	40%
Calibración irregular	28%
Material fuera de norma	18%
Otros	14%

Nota: Elaboración en base a la simulación del Caso

Se realizó un análisis de capacidad (Cpk), evidenciando que el proceso tenía Cpk = 0,82, lo cual indica que no cumplía con las especificaciones de calidad (Cpk < 1,33).

Fase “Mejorar” – Soluciones implementadas

Las acciones de mejora se desarrollaron mediante el uso de herramientas LSS:

Tabla 7: Implementación de herramientas de LSS del caso Andes Drinks S.A.

Acción	Herramienta asociada	Beneficio esperado
Instalación de sensores IoT en selladora	Poka-Yoke / SPC	Monitoreo automático de temperatura y presión.
Reducción del tiempo de cambio de formato	SMED	Incremento en disponibilidad de máquina.
Implementación de Kanban digital	Kanban	Flujo visual y reposición automática de tapas.
Capacitación del personal operativo	5S / Kaizen	Reducción de errores humanos y orden.

Nota: Elaboración en base a la simulación del Caso

Tabla 8: Resultados de la Implementación del caso Andes Drinks S.A.

Indicador	Antes	Después	Variación (%)
Defectos (%)	6,5	2,3	-64,6%
Tiempo de ciclo (s)	5,1	4,0	-21,6%
OEE (%)	72	88	+16 pts
Costos de no calidad (Bs/mes)	14.200	5.300	-62,7%
Cpk	0,82	1,48	+80%

Nota: Elaboración en base a la simulación del Caso

Fase “Controlar” – Sostenibilidad y control estadístico

El proyecto busca implementar un tablero digital de control (dashboard) conectado a la nube que integra datos de sensores y genera alertas automáticas cuando el proceso sale de los límites de control.

Antes: dispersión irregular y picos de desviación $> \pm 3\sigma$.

Después: estabilidad con variación térmica promedio $\pm 1,2\sigma$.

El proceso logró mantenerse dentro de límites controlados por 90 días consecutivos, garantizando la sostenibilidad de la mejora.

1.3. Impacto financiero y retorno de la inversión

La reducción de defectos y tiempos improductivos tuvo un impacto financiero directo:

Tabla 9: Impacto Financiero del caso Andes Drinks S.A.

Concepto	Antes (Bs/mes)	Después (Bs/mes)	Ahorro mensual (Bs)
Retrabajos	7.800	2.900	4.900
Desperdicios	6.400	2.400	4.000
Total mensual	14.200	5.300	8.900
Inversión inicial:	Bs 18.000 (sensores IoT y software).		
ROI:	2,02 meses.		

Nota: Elaboración en base a la simulación del Caso

Este resultado confirma que el proyecto no solo mejoró la calidad del producto, sino que generó valor económico tangible, aumentando la competitividad de la empresa.

1.4. Conclusiones del caso Andes Drinks S.A.

El proyecto LSS 4.0 permitió reducir defectos en un 64,6%, mejorar la OEE en 16 puntos porcentuales, y alcanzar un retorno financiero en menos de tres meses.

La integración de herramientas Lean como 5S, SMED y Kanban junto con herramientas Six Sigma como el análisis de capacidad, Pareto e SPC demostró la sinergia entre la eficiencia operativa y el control estadístico, generando un proceso más estable, rentable y sostenible.

1.5. Proyección de resultados y análisis de sostenibilidad

Una vez implementadas las acciones de mejora, se desarrolló una simulación de desempeño proyectado con el fin de estimar la sostenibilidad de los resultados y la posible evolución del proceso en horizontes de seis y doce meses posteriores a la intervención.

La simulación se realizó considerando las condiciones actuales del proceso, la estabilización del control estadístico y la consolidación de la capacitación del personal operativo. Los resultados permiten prever que, con el mantenimiento de las rutinas de control y el uso permanente de los sensores IoT, las mejoras obtenidas pueden no solo mantenerse, sino incluso incrementarse ligeramente por efecto de la madurez operativa.

Tabla 10: Proyección de desempeño de Andes Drinks S.A. (6 y 12 meses)

Indicador	Antes	Después del proyecto	Proyección a 6 meses	Proyección a 12 meses
Defectos (%)	6,5	2,3	2,2	2,1
OEE (%)	72	88	89	90
Tiempo de ciclo (s)	5,1	4,0	3,9	3,9
Costos de no calidad (Bs/mes)	14.200	5.300	5.000	4.900
Cpk (capacidad del proceso)	0,82	1,48	1,55	1,57

Nota: Elaboración en base a la simulación del Caso

Los resultados proyectados indican una tendencia de mejora sostenida, alcanzando un OEE promedio del 89-90 % y una reducción de defectos cercana al 2 %.

Estas mejoras se traducen en un ahorro anual estimado de Bs 106.800, con una recuperación de inversión en apenas dos meses.

- Además, la estabilidad del proceso y la digitalización de la línea generan efectos estratégicos adicionales, tales como:
- Mayor capacidad de respuesta ante la demanda sin requerir nuevas máquinas.
- Reducción del consumo energético por ciclo y aprovechamiento más eficiente de materiales.
- Incremento de la confiabilidad operativa, lo que consolida la imagen de la empresa como un referente de eficiencia y sostenibilidad industrial en el sector de bebidas.

De esta manera, el caso Andes Drinks S.A. no solo evidencia el impacto inmediato de la metodología LSS 4.0, sino que también demuestra su viabilidad a largo plazo, validando que la combinación de herramientas estadísticas y tecnologías digitales permite mantener la excelencia operativa de forma sostenida en el tiempo

2. Empresas del Sector Financiero (Finanzas Andinas S.A.)

2.1. Introducción del caso

El presente caso de estudio muestra la aplicación del enfoque LSS 4.0 en una institución financiera boliviana denominada “Finanzas Andinas S.A.”, dedicada a otorgar créditos personales y empresariales.

Durante el año 2024, la entidad identificó problemas de demora en la aprobación de créditos, afectando la satisfacción del cliente y aumentando los costos operativos asociados a reprocesos y verificaciones duplicadas. El tiempo promedio de aprobación alcanzaba los 7,8 días hábiles, superando los 5 días establecidos por la normativa interna.

El objetivo del proyecto fue optimizar el proceso de evaluación y aprobación de créditos, reduciendo los tiempos de respuesta y mejorando la experiencia del cliente, mediante la aplicación del ciclo DMAIC y el uso de herramientas digitales propias de la Industria 4.0, como RPA y la analítica de datos en tiempo real.

2.2. Integración de herramientas Lean y Six Sigma en el proyecto

En el sector financiero los desperdicios (muda) se relacionan con reprocesos, esperas, errores administrativos o decisiones redundantes. La combinación de herramientas LSS permite eliminar ineficiencias y reducir la variabilidad en los tiempos de respuesta, asegurando calidad y rapidez en la atención.

Tabla 11: Herramientas LSS aplicadas en el caso “Finanzas Andinas S.A.”

Fase DMAIC	Herramientas Lean	Herramientas Six Sigma	Aplicación específica
Definir	SIPOC, Mapa de flujo de valor (VSM)	Project Charter, VOC	Identificación de cuellos de botella en el flujo de crédito.
Medir	5S digital (orden documental)	Plan de muestreo, Gage R&R (consistencia en tiempos)	Validación de la medición de tiempos por tipo de solicitud.
Analizar	VSM futuro, Pareto	Diagrama de Ishikawa, Análisis de capacidad (Cpk)	Identificación de causas raíz y variabilidad por sucursal.
Mejorar	Kaizen digital, Poka-Yoke en formularios	Diseño de Experimentos (DOE)	Implementación de automatización (RPA) y mejora de flujos.
Controlar	Tablero de indicadores (Power BI)	SPC (control de tiempos de ciclo)	Monitoreo de estabilidad y cumplimiento de plazos.

Nota: Elaboración en base a la simulación del Caso

Fase “Definir” – Identificación del problema

Durante las reuniones iniciales con los líderes de proceso, se detectó que el 45% de las demoras provenían de duplicación de tareas en las áreas de análisis y validación. Se elaboró un Project Charter con los siguientes elementos:

Tabla 12: Project Charter del caso “Finanzas Andinas S.A.”

Elemento	Descripción
Problema principal	Demoras excesivas en la aprobación de créditos.
Objetivo general	Reducir el tiempo de aprobación de 7,8 a ≤4 días hábiles.
Alcance	Procesos de crédito personal y PyME.
Indicadores clave (KPI)	Tiempo de aprobación, tasa de reprocesos, satisfacción del cliente.
Duración del proyecto	5 meses.

Nota: Elaboración en base a la simulación del Caso

Figura 2: Proceso del caso “Finanzas Andinas S.A.”



Nota: Elaboración en base a la simulación del Caso

El flujo mostraba cuellos de botella en la revisión documental y en la validación legal, donde se acumulaban los retrasos más significativos.

Fase “Medir” – Evaluación del desempeño inicial

Se recolectaron datos de 150 solicitudes procesadas durante un mes, clasificadas por tipo de cliente y sucursal.

Tabla 13: Indicadores de Evaluación de Desempeño

Indicador	Promedio inicial	Unidad de medida
Tiempo promedio de aprobación	7,8	días hábiles
Tasa de reprocesos (errores de validación)	9,2	%
Costo administrativo promedio por crédito	165	Bs
Satisfacción del cliente	78	%
Capacidad del proceso (Cpk)	0,87	—

Nota: Elaboración en base a la simulación del Caso

El análisis de dispersión mostró alta variabilidad entre sucursales, con diferencias

de hasta 3 días entre las más y menos eficientes.

Fase “Analizar” – Identificación de causas raíz

Se empleó un diagrama de Ishikawa para clasificar las causas bajo las categorías de “Método, Medio, Mano de Obra, Máquina y Material”.

Principales causas identificadas:

- Método: redundancia en revisión de documentos.
- Medio: uso de sistemas no integrados (plataforma y correo).
- Mano de obra: validaciones manuales repetidas.
- Máquina: falta de automatización de tareas simples (RPA).
- Material: formularios incompletos de clientes.

Tabla 14: Causas de demora en el proceso de crédito

Causa	% de incidencia
Revisión documental duplicada	35%
Falta de integración de sistemas	28%
Validaciones manuales	20%
Formularios incompletos	10%
Otros	7%

Nota: Elaboración en base a la simulación del Caso

El 63% de las demoras se concentraban en dos causas principales, lo que permitió priorizar las soluciones.

Fase “Mejorar” – Implementación de soluciones

A partir del análisis, se aplicaron tres medidas principales:

- Automatización de tareas repetitivas (RPA): digitalización del flujo de aprobación y validación automática de formularios.
- Integración de sistemas (CRM + Core Bancario): conexión directa entre áreas sin necesidad de reenvío de correos.
- Estandarización Lean 5S digital: organización documental y eliminación de pasos innecesarios en la revisión

Tabla 15: Resultados de la Implementación del caso “Finanzas Andinas S.A.”

Indicador	Antes	Después	Variación (%)
Tiempo promedio de aprobación	7,8 días	3,9 días	-50%
Tasa de reprocesos	9,20%	3,10%	-66%
Costo administrativo por crédito	165 Bs	108 Bs	-34%
Satisfacción del cliente	78%	92%	+14 pts
Cpk (capacidad del proceso)	0,87	1,46	68%

Nota: Elaboración Propia

Fase “Controlar” – Monitoreo y estandarización

Se implementó un tablero digital (Power BI) para visualizar los tiempos promedio de aprobación en tiempo real y generar alertas automáticas en caso de desviaciones.

Además, se estableció una revisión mensual de indicadores Lean Six Sigma a nivel gerencial para asegurar la continuidad de la mejora.

Tabla 16: Tendencia del tiempo promedio de aprobación de créditos

Mes	Tiempo promedio (días)
Enero	7,8
Febrero	6,4
Marzo	4,9
Abril	4,1
Mayo	3,9

Nota: Elaboración en base a la simulación del Caso

El proceso se estabilizó por debajo del objetivo (<4 días) y se mantuvo con variabilidad controlada ($\pm 0,3$ días) durante tres meses.

2.3. Impacto financiero y retorno de la inversión

La mejora generó un ahorro operativo promedio de 57 Bs por crédito, lo que representa Bs 342.000 anuales, considerando 6.000 operaciones anuales.

Además, al mejorar la rapidez y confiabilidad, la institución aumentó su tasa de retención de clientes en 8%, traduciéndose en un incremento estimado de ingresos por Bs 480.000 anuales.

Tabla 17: Impacto Financiero del caso “Finanzas Andinas S.A.”

Concepto	Antes (Bs)	Después (Bs)	Ahorro / Ingreso (Bs)
Costos operativos	990.000	648.000	342.000
Ingresos por retención	5.520.000	6.000.000	480.000
Impacto total estimado	—	—	+822.000 / año

Nota: Elaboración en base a la simulación del Caso

2.4. Conclusiones del caso “Finanzas Andinas S.A.”

El proyecto LSS 4.0 permitió reducir en un 50% el tiempo promedio de aprobación de créditos, disminuir los reprocesos en dos tercios y mejorar la satisfacción del cliente en 14 puntos porcentuales.

Desde el punto de vista financiero, la mejora generó un impacto anual positivo de Bs 822.000, validando que la optimización de procesos en el sector financiero tiene efectos directos en la rentabilidad y fidelización de clientes.

Este caso confirma que el DMAIC aplicado a servicios digitales puede adaptarse exitosamente a la banca moderna, combinando eficiencia Lean, control estadístico Six Sigma y herramientas digitales como el RPA, BI y la analítica predictiva.

2.5. Proyección de resultados y sostenibilidad del caso “Finanzas Andinas S.A.”

Tras la implementación de las mejoras y la estabilización del nuevo flujo digital de aprobación de créditos, se desarrolló una simulación proyectiva de desempeño para evaluar la sostenibilidad y evolución de los resultados en horizontes de seis y doce meses.

El modelo de simulación consideró las siguientes condiciones: consolidación de la automatización mediante RPA, mantenimiento de la integración CRM–Core Bancario y la madurez del SPC aplicado al tiempo de ciclo.

El objetivo de la simulación fue estimar la eficiencia esperada del proceso en el mediano plazo, asumiendo que la organización mantiene las prácticas LSS implementadas y refuerza la capacitación continua del personal operativo y de soporte.

Tabla 18: Proyección de desempeño de Finanzas Andinas S.A. (6 y 12 meses)

Indicador	Antes	Después del proyecto	Proyección a 6 meses	Proyección a 12 meses
Tiempo promedio de aprobación (días)	7,8	3,9	3,8	3,8
Tasa de reprocesos (%)	9,2	3,1	2,9	2,8
Costo administrativo por crédito (Bs)	165	108	107	106
Satisfacción del cliente (%)	78	92	93	94
Cpk (capacidad del proceso)	0,87	1,46	1,51	1,52

Nota: Elaboración en base a la simulación del Caso

Los resultados simulados evidencian que el proceso mantendría la estabilidad alcanzada tras la mejora, con variaciones mínimas y una tendencia a la consolidación de la eficiencia operativa.

A los seis meses, el tiempo promedio de aprobación se estabilizaría en 3,8 días hábiles, con reprocesos inferiores al 3 % y un Cpk superior a 1,5, lo que indica un nivel de capacidad óptimo para procesos de servicio.

A los doce meses, se prevé un incremento sostenido de la satisfacción del cliente (hasta 94 %), producto de la reducción de tiempos de espera, la transparencia del flujo automatizado y la precisión en la validación documental.

7. FUTURO DEL LEAN SIX SIGMA EN LA INDUSTRIA 4.0

El futuro del LSS se encuentra estrechamente vinculado con la evolución de la Industria 4.0 y la transición hacia la Industria 5.0, donde la colaboración entre humanos y tecnologías inteligentes marcará un nuevo paradigma de optimización.

Las tendencias actuales apuntan a una integración cada vez mayor entre la metodología DMAIC y las herramientas digitales avanzadas, como la IA, el Machine Learning y los gemelos digitales. Estas tecnologías permitirán automatizar la detección de causas raíz, predecir fallas, y proponer soluciones en tiempo real con base en grandes volúmenes de datos (Lee, Bagheri, & Kao, 2015).

En el ámbito empresarial, el LSS 4.0 evolucionará hacia modelos autoadaptativos, capaces de ajustar los procesos de manera continua gracias al análisis predictivo y la conectividad total entre máquinas, sistemas y personas. De esta forma, las decisiones dejarán de ser reactivas para convertirse en decisiones inteligentes, sustentadas en datos confiables y algoritmos de optimización (Antony, 2019).

Asimismo, la transición hacia la Industria 5.0 pondrá énfasis en la personalización, sostenibilidad y bienestar humano, combinando la eficiencia de los sistemas ciberfísicos con la creatividad y el juicio del talento humano. En este contexto, el LSS se consolidará como una herramienta estratégica no solo para maximizar la productividad, sino también para alinear la tecnología con los valores éticos, ambientales y sociales (Kamble, Gunasekaran, & Dhone, 2020).

8. CONCLUSIONES

La integración de Lean y Six Sigma, fortalecida por las tecnologías de la Industria 4.0, se consolida como una estrategia eficaz para la optimización de procesos en distintos sectores. A través del marco metodológico DMAIC, se demostró cómo las organizaciones pueden definir problemas relevantes, medir con datos confiables, analizar causas raíz, implementar mejoras basadas en evidencia y controlar para sostener los resultados alcanzados. Esta estructura, combinada con el soporte digital y la analítica avanzada, impulsa la eficiencia, la calidad y la capacidad de decisión basada en información objetiva.

Los casos de estudio desarrollados, uno correspondiente al sector productivo y otro al sector financiero fueron elaborados de forma demostrativa y original, con el propósito de ilustrar de manera clara y comprensible la aplicabilidad del LSS 4.0 en contextos distintos. Si bien ambos se inspiraron en referencias y modelos conceptuales presentes en la literatura especializada, su desarrollo y resultados son de creación propia, diseñados para mostrar de forma práctica cómo esta metodología puede adaptarse a diferentes realidades organizacionales y generar valor tangible en términos de eficiencia, costos y satisfacción del cliente.

Los resultados obtenidos reflejan el potencial del LSS 4.0 como herramienta transversal de mejora continua, capaz de traducir la reducción de defectos, reprocesos y tiempos de ciclo en impactos económicos, operativos y estratégicos. En síntesis, el trabajo evidencia que la convergencia entre la filosofía Lean, la

rigurosidad estadística de Six Sigma y las tecnologías digitales constituye un modelo de gestión integral, adaptable, sostenible y centrado en la excelencia operativa. Su evolución hacia la Industria 5.0 plantea un horizonte donde la eficiencia se combina con la sostenibilidad, la ética y el valor humano, consolidando un nuevo paradigma de competitividad inteligente.

9. RECOMENDACIONES

A partir del análisis y los resultados presentados, se recomienda que las organizaciones interesadas en fortalecer su desempeño implementen una hoja de ruta de madurez LSS 4.0, que inicie con un diagnóstico del flujo de valor y la calidad de los datos, continúe con la ejecución de proyectos piloto DMAIC y finalice con la estandarización de prácticas exitosas a nivel corporativo. Este proceso debe priorizar proyectos según su impacto económico y nivel de esfuerzo, garantizando que los primeros resultados generen aprendizaje y recursos para la expansión del modelo.

Es fundamental asegurar la calidad y disponibilidad de datos, mediante la validación de los sistemas de medición y la integración de tableros digitales de monitoreo en tiempo real. La combinación de herramientas Lean (VSM, 5S, SMED, Kanban) y Six Sigma (Pareto, Ishikawa, DOE, SPC, Cp/Cpk) debe ajustarse a las necesidades específicas de cada proceso, maximizando el valor agregado. La adopción de tecnologías habilitadoras como IoT, RPA, Business Intelligence y Machine Learning permite consolidar un enfoque predictivo, donde la información se convierte en un recurso estratégico para la toma de decisiones proactiva.

Desde la perspectiva estratégica y financiera, es esencial vincular los resultados operativos con indicadores económicos, midiendo ahorros, costos evitados, ingresos adicionales y el retorno de inversión de cada proyecto. Asimismo, se recomienda destinar parte de los beneficios a capacitación y digitalización progresiva, fortaleciendo la cultura de mejora continua y asegurando la sostenibilidad del sistema. Finalmente, el LSS 4.0 debe orientarse no solo a la productividad, sino también a la responsabilidad ambiental, la ética y el bienestar humano, consolidándose como un modelo integral que impulse la transformación hacia una Industria 5.0 más inteligente, sostenible y centrada en las personas.

10. GLOSARIO DE ACRÓNIMOS

Acronímico	Descripción
LSS	Lean Six Sigma
5S	Metodología japonesa de organización y orden en el lugar de trabajo
BI	Inteligencia de Negocios
Cp / Cpk	Índices de capacidad del proceso
SPC	Control Estadístico de Procesos
DOE	Diseño de Experimentos
CPS	Sistemas Ciberfísicos
CRM	Gestión de Relaciones con Clientes
DMAIC	Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar
DPMO	Defectos por Millón de Oportunidades
FPY	Rendimiento de Primera Pasada
IA	Inteligencia Artificial
IoT	Internet de las Cosas
JIT	Justo a Tiempo
KPI	Indicador Clave de Desempeño
TPS	Sistema de Producción Toyota
VSM	Mapa de Flujo de Valor
RPA	Automatización Robótica de Procesos

11. BIBLIOGRAFÍA

- Heredia Jerez, R. (2019). Ecosistemas digitales: La revolución de todas las industrias. Santiago de Chile: Digital Bank Latam.
- Antony, J. (2019). Lean Six Sigma para las industrias manufactureras y de servicios. Boca Ratón, Estados Unidos: CRC Press.
- Bosch Group. (2020). Informe anual 2020: Industria conectada y manufactura inteligente. Stuttgart, Alemania: Robert Bosch GmbH.
- Felizola, F., & Luna, J. (2021). Lean Six Sigma en pequeñas y medianas em-

- presas: un enfoque metodológico. *Revista Chilena de Ingeniería*, 29(2), 112–125.
- George, M. L., Rowlands, D., Price, M., & Maxey, J. (2005). *Manual de bolsillo Lean Six Sigma: Guía rápida de 100 herramientas para mejorar la calidad y la velocidad*. Nueva York, Estados Unidos: McGraw-Hill Education.
- Hermann, M., Pentek, T., & Otto, B. (2016). Principios de diseño para escenarios de la Industria 4.0: Revisión de la literatura. En 49ª Conferencia Internacional de Hawái sobre Ciencias del Sistema (HICSS) (pp. 3928–3937). Koloa, Hawái: IEEE.
- Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). *Recomendaciones para implementar la iniciativa estratégica Industria 4.0: Informe final del Grupo de Trabajo de Industria 4.0*. Frankfurt, Alemania: Acatech – Academia Nacional de Ciencia e Ingeniería.
- Kamble, S. S., Gunasekaran, A., & Dhone, N. C. (2020). Industria 4.0 y prácticas de manufactura Lean para el desempeño organizacional sostenible en empresas manufactureras de la India. *Revista Internacional de Economía de la Producción*, 231, 107849.
- Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H.-A. (2015). Arquitectura de sistemas ciberfísicos para sistemas de manufactura basados en Industria 4.0. *Cartas de Manufactura*, 3, 18–23.
- Liker, J. K. (2004). *El método Toyota: 14 principios de gestión del fabricante más grande del mundo*. Nueva York, Estados Unidos: McGraw-Hill Education.
- McKinsey & Company. (2023). *La transformación Lean digital: Cómo las tecnologías de la Industria 4.0 aceleran la excelencia operativa*. Nueva York, Estados Unidos: McKinsey & Company. Recuperado de <https://www.mckinsey.com>
- Montgomery, D. C. (2020). *Introducción al control estadístico de la calidad* (8.ª ed.). Hoboken, Estados Unidos: John Wiley & Sons.
- Ohno, T. (1988). *El sistema de producción Toyota: Más allá de la producción en masa*. Nueva York, Estados Unidos: Productivity Press.
- Siemens AG. (2021). *Industrias Digitales: Informe de sostenibilidad y desempeño anual 2021*. Amberg, Alemania: Siemens AG. Recuperado de <https://www.siemens.com/global/es.html>
- Toyota Global. (2022). *Sistema de Producción Toyota y transformación digital: In-*

forme 2022. Tokio, Japón: Toyota Motor Corporation. Recuperado de <https://global.toyota/en>

Womack, J. P., & Jones, D. T. (2003). Pensamiento Lean: Eliminar desperdicios y crear valor en tu empresa. Nueva York, Estados Unidos: Simon & Schuster

<https://doi.org/10.53287/neme4687xp33p>

OPTIMIZACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO EN MICRORREDES INDUSTRIALES MEDIANTE UN CONTROLADOR DE LÓGICA DIFUSA IMPLEMENTADO EN PYTHON

M. Sc. Juan Carlos Mamani Colque

ORCID: 0009-0000-8971-7021

Univ. Limbert Mamani Mamani

ORCID: 0009-0006-1571-6556

RESUMEN

La creciente demanda energética industrial y la integración de fuentes renovables no convencionales en Bolivia requieren sistemas de gestión inteligentes para garantizar la eficiencia operativa y la viabilidad económica. Este estudio aborda este desafío mediante el diseño e implementación de un Sistema de Gestión de Energía basado en un Controlador de Lógica Difusa (FEMS) para una microrred industrial conectada a la red. El controlador, desarrollado en Python, coordina dinámicamente el flujo de potencia entre la generación fotovoltaica, un sistema de almacenamiento en baterías (BESS) y la red eléctrica, procesando cuatro variables de entrada: demanda, generación fotovoltaica, precio de la energía y estado de carga del BESS. Los resultados de una simulación de 24 horas con perfiles estocásticos demuestran que el FEMS reduce el costo operativo total en un 23.1% en comparación con una estrategia de despacho simple, aprovechando el arbitraje energético de la discriminación horaria boliviana. Simultáneamente, se logró una autosuficiencia energética del 75.9% y se garantizó la protección del BESS al mantener su estado de carga dentro de límites operativos seguros. Se concluye que la lógica difusa implementada en Python constituye una solución robusta, accesible y escalable para la optimización energética en microrredes industriales, ofreciendo beneficios económicos y operativos tangibles para el contexto boliviano.

Palabras Clave: Microrred Industrial, Optimización Energética, Controlador de Lógica Difusa (FLC), scikit-fuzzy, Gestión de Sistemas de Almacenamiento (BESS), Arbitraje Energético, Ingeniería Industrial, Bolivia.

ABSTRACT

The growing industrial energy demand and the integration of non-conventional renewable energy sources in Bolivia require intelligent management systems to ensure operational efficiency and economic viability. This study addresses this challenge by designing and implementing a Fuzzy Logic Controller-based Energy Management System (FEMS) for a grid-connected industrial microgrid. The controller, developed in Python, dynamically coordinates power flow among photovoltaic generation, a battery energy storage system (BESS), and the main grid by processing four input variables: load demand, PV generation, energy price, and BESS state of charge. The results of a 24-hour simulation with stochastic profiles demonstrate that the FEMS reduces the total operating cost by 23.1% compared to a simple dispatch strategy, capitalizing on energy arbitrage from Bolivian time-of-use pricing. Simultaneously, an energy self-sufficiency of 75.9% was achieved, and BESS protection was ensured by maintaining its state of charge within safe operational limits. It is concluded that the fuzzy logic implemented in Python provides a robust, accessible, and scalable solution for the energy optimization of industrial microgrids, offering tangible economic and operational benefits for the Bolivian context and similar regions.

Keywords: Industrial Microgrid, Energy Optimization, Fuzzy Logic Controller (FLC), scikit-fuzzy, Battery Energy Storage System (BESS) Management, Energy Arbitrage, Industrial Engineering, Bolivia

1. INTRODUCCIÓN.

El sector industrial a nivel global enfrenta el desafío dual de satisfacer una demanda energética en constante crecimiento mientras avanza hacia la descarbonización y la eficiencia operativa (Ucersa, 2024). En este contexto, las microrredes híbridas han emergido como una solución viable, permitiendo la integración de fuentes de energía renovable no convencionales (ERNC) y mejorando la autonomía y resiliencia de los consumidores industriales (García et al., 2023). Sin embargo, la naturaleza intermitente y variable de recursos como la energía solar fotovoltaica

introduce complejidades significativas en la gestión estable y económica de estos sistemas (Martínez & Pérez, 2025).

Diversas estrategias han sido propuestas para el despacho óptimo de microrredes, incluyendo algoritmos de programación lineal y no lineal (Veloz et al., 2024) y modelos predictivos basados en aprendizaje automático (García-García et al., 2023). No obstante, estos métodos suelen enfrentar limitaciones ante la incertidumbre y no linealidad de las variables energéticas, requiriendo modelos matemáticos precisos que pueden ser difíciles de obtener en entornos operativos reales (Rodríguez & Fernández, 2023).

Como alternativa, la lógica difusa se destaca por su capacidad para emular el proceso de decisión humano y manejar información imprecisa, lo que la hace particularmente robusta para sistemas complejos donde el conocimiento experto está disponible pero la modelación exacta es compleja (Mirhashemi & Borsi, 2019; Ross, 2010). Aplicaciones previas de controladores difusos en gestión energética, como el trabajo de Arcos-Aviles et al. (2014), han demostrado su eficacia, aunque su exploración en el contexto industrial boliviano específico resulta escasa.

Bolivia, con su alto potencial de irradiación solar y políticas de transición energética en desarrollo, representa un escenario estratégico para la implementación de estas tecnologías (Climate Tracker Latam, 2025; Ministerio de Energía Bolivia, 2025). El marco tarifario actual, que incluye discriminación horaria, crea una oportunidad para estrategias de arbitraje energético que pueden ser explotadas por un sistema de gestión inteligente (ENDE Corporación, 2023). Por lo tanto, existe una necesidad clara de desarrollar soluciones accesibles y adaptadas que optimicen el consumo energético industrial local, reduciendo costos operativos sin comprometer la confiabilidad del sistema.

Este estudio presenta el diseño, implementación y validación de un Sistema de Gestión de Energía basado en un Controlador de Lógica Difusa (FEMS) para una microrred industrial conectada a la red en Bolivia. El objetivo principal es demostrar la eficacia del FLC para reducir los costos de operación mediante arbitraje energético, mantener alta autosuficiencia y proteger la vida útil del sistema de almacenamiento de energía en baterías (BESS), utilizando una implementación práctica en Python. La contribución principal radica en la validación de una arquitectura de control robusta y accesible, específicamente adaptada a las condiciones operativas y económicas

del sector industrial boliviano.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Microrredes Industriales y Contexto Boliviano

Las microrredes (MR) se definen como sistemas energéticos locales que integran generación distribuida, almacenamiento y cargas controlables, operando de manera conectada a la red principal o en modo isla (García et al., 2023). En el ámbito industrial, las MR híbridas representan una evolución hacia la autonomía energética, permitiendo la incorporación de fuentes renovables no convencionales (ERNCC) mientras garantizan calidad de potencia y continuidad operativa (Martínez & Pérez, 2025).

El contexto boliviano presenta características particulares que favorecen la implementación de MR industriales. Según datos de ENDE Corporación (2023), la estructura tarifaria para el sector industrial incorpora discriminación horaria con tres periodos definidos: punta (18:00-22:00), valle (23:00-06:00) y normal (07:00-17:00), estableciendo las bases para estrategias de arbitraje energético. Complementariamente, Bolivia registra niveles de irradiación solar que superan los 5.5 kWh/m²/día en el altiplano, constituyendo un recurso estratégico para generación fotovoltaica (Climate Tracker Latam, 2025).

2.2. Fundamentos de Lógica Difusa en Gestión Energética

La lógica difusa, formalizada por Zadeh (1965), constituye un paradigma de computación que maneja conceptos graduales en lugar de valores booleanos, permitiendo procesar información imprecisa mediante funciones de pertenencia y reglas lingüísticas (Ross, 2010). Esta característica resulta particularmente ventajosa en sistemas de gestión energética donde múltiples variables interactúan bajo condiciones de incertidumbre.

Un sistema de inferencia difusa tipo Mamdani, ampliamente utilizado en control de procesos, se estructura en cuatro componentes principales (Mirhashemi & Borsi, 2019):

- Fusificación: Conversión de entradas numéricas a conjuntos difusos
- Base de reglas: Conjunto de proposiciones condicionales del tipo “SI [antecedente] ENTONCES [consecuente]”

- Motor de inferencia: Mecanismo de aplicación de operadores lógicos
- Defusificación: Conversión de conjuntos difusos de salida a valores numéricos

En el contexto de microrredes, esta aproximación permite capturar conocimiento experto para coordinar recursos energéticos sin requerir modelos matemáticos complejos de los componentes del sistema (Arcos-Aviles et al., 2014).

2.3. Sistemas de Almacenamiento en Baterías (BESS)

Los sistemas BESS constituyen elementos críticos en MR industriales, proporcionando servicios de balance energético, arbitraje y respaldo. La gestión óptima del Estado de Carga (SOC) resulta esencial para maximizar la vida útil del equipo, evitando ciclos profundos de descarga y manteniendo operación dentro de rangos seguros (20%-90% SOC según especificaciones técnicas). La eficiencia round-trip típica de sistemas lithium-ion se sitúa entre 85%-95%, factor que debe considerarse en modelos de simulación realistas (Veloz et al., 2024).

3. METODOLOGÍA

El presente estudio adopta un enfoque de investigación cuantitativo-experimental mediante simulación computacional, con el propósito de diseñar, implementar y validar un Sistema de Gestión de Energía basado en lógica difusa para una microrred industrial boliviana. La metodología se estructura en cuatro componentes principales: diseño del controlador difuso, modelado estocástico de perfiles energéticos, implementación computacional y definición de métricas de evaluación.

3.1. Diseño del Sistema de Control Difuso

Se desarrolló un controlador de lógica difusa tipo Mamdani, seleccionado por su capacidad para representar el conocimiento experto de forma intuitiva mediante reglas lingüísticas. El sistema opera con cuatro variables de entrada que capturan el estado operativo de la microrred. La demanda de carga se define en un rango de 0 a 300 kW, representando los patrones de consumo característicos de instalaciones industriales medianas. La generación fotovoltaica se establece entre 0 y 250 kW, reflejando el potencial solar del altiplano boliviano. El precio de energía se considera en el intervalo de 0 a 2.00 Bs/kWh, incorporando la estructura tarifaria de discriminación horaria vigente. El estado de carga del sistema de almacenamiento se modela entre 0% y 100%, con especial atención a los rangos operativos seguros

para preservar la vida útil de las baterías.

Para cada variable de entrada se definieron conjuntos difusos con funciones de pertenencia triangulares y trapezoidales, seleccionadas por su eficiencia computacional y adecuación para representar transiciones graduales entre estados. La demanda se clasificó en los conjuntos Baja, Media y Alta; la generación en Nula, Baja, Media y Alta; el precio en Muy Bajo, Bajo, Medio y Alto; y el estado de carga en Crítico, Bajo, Medio y Alto.

El sistema genera tres variables de salida que determinan los flujos de potencia en la microrred. La potencia de red opera en el rango de -200 a 200 kW, donde valores negativos indican exportación a la red principal. La potencia de carga del BESS se establece entre 0 y 100 kW, mientras que la potencia de descarga varía entre 0 y 150 kW, considerando las limitaciones técnicas del sistema de almacenamiento.

La base de reglas del sistema se compone de 42 reglas heurísticas que codifican estrategias operativas para balancear los objetivos de minimización de costos, maximización de autosuficiencia y protección del BESS. Estas reglas se derivaron del análisis de escenarios operativos típicos y del conocimiento experto en gestión energética industrial. El proceso de inferencia sigue el método Mamdani, mientras que la defusificación utiliza el método del centroide para garantizar suavidad en las transiciones de potencia.

3.2. Modelado Estocástico de Perfiles Energéticos

Para evaluar el desempeño del controlador bajo condiciones realistas, se desarrolló un marco de simulación que incorpora la inherente variabilidad de los sistemas energéticos. La demanda industrial se modeló como una señal compuesta que combina un perfil base determinístico con componentes estocásticas. El perfil base reproduce los patrones característicos de operación industrial con incrementos durante horarios laborales y picos específicos en periodos de alta actividad productiva. Sobre esta base se superpone ruido gaussiano correlacionado temporalmente, simulando las fluctuaciones naturales en el consumo energético observadas en instalaciones industriales bolivianas.

La generación fotovoltaica se construye a partir de un perfil sinusoidal que representa la variación diaria de la irradiancia solar, característica del altiplano boliviano. Este perfil se modula mediante un modelo de eventos de nubosidad implementado como

un proceso de Poisson compuesto, donde cada evento representa periodos de cobertura nubosa con duración e intensidad variables. Esta aproximación permite capturar la variabilidad intermitente típica de la generación solar sin requerir series históricas extensivas.

El perfil de precios incorpora la estructura oficial de tarifas por horario establecida para el sector industrial boliviano, diferenciando entre periodos valle, normal y punta. Sobre esta base tarifaria se superponen perturbaciones estocásticas que simulan las dinámicas del mercado eléctrico y variaciones regulatorias menores. El modelado conjunto de estos tres componentes permite generar escenarios de simulación que reproducen fielmente las condiciones operativas de una microrred industrial en el contexto boliviano.

3.3. Implementación Computacional y Marco de Validación

El sistema de gestión energética se implementó completamente en el lenguaje de programación Python, aprovechando las librerías especializadas para computación difusa y análisis numérico. El controlador difuso se encapsuló en una clase modular que integra la definición de variables lingüísticas, funciones de pertenencia, base de reglas y mecanismos de inferencia. Esta implementación facilita la parametrización, reutilización y extensión del sistema para diferentes configuraciones de microrred.

El marco de simulación permite ejecutar escenarios de 24 horas con resolución horaria, calculando en cada intervalo la respuesta del controlador, actualizando el estado del sistema de almacenamiento según las eficiencias de conversión y registrando las métricas operativas relevantes. Se incorporaron estrategias robustas de manejo de excepciones para garantizar la continuidad de la simulación ante condiciones operativas extremas o inconsistencias en la inferencia difusa, incluyendo mecanismos de respaldo basados en balance de potencia simple.

La validación del sistema se realizó mediante comparación con una estrategia de referencia que opera sin gestión inteligente del almacenamiento, permitiendo cuantificar las mejoras atribuibles específicamente al controlador difuso. Cada simulación genera un conjunto completo de datos operativos que sustentan el análisis de desempeño posterior.

3.4. Métricas de Evaluación del Desempeño

Para evaluar cuantitativamente la efectividad del sistema propuesto, se definieron

cuatro métricas principales. El costo operativo total calcula los gastos asociados a la importación de energía de la red principal, considerando la estructura tarifaria horaria. La autosuficiencia energética mide el porcentaje de la demanda total satisfecho con recursos locales, indicando el grado de independencia de la red principal. La reducción porcentual de costos compara el desempeño del sistema propuesto con la estrategia de referencia, cuantificando el beneficio económico alcanzable. Finalmente, la protección del BESS evalúa la capacidad del sistema para mantener el estado de carga dentro de rangos que preserven la vida útil del almacenamiento, monitoreando la distribución temporal del SOC y evitando operación en rangos perjudiciales. Estas métricas permiten una evaluación comprehensiva que balancea objetivos económicos, operativos y técnicos del sistema de gestión energética.

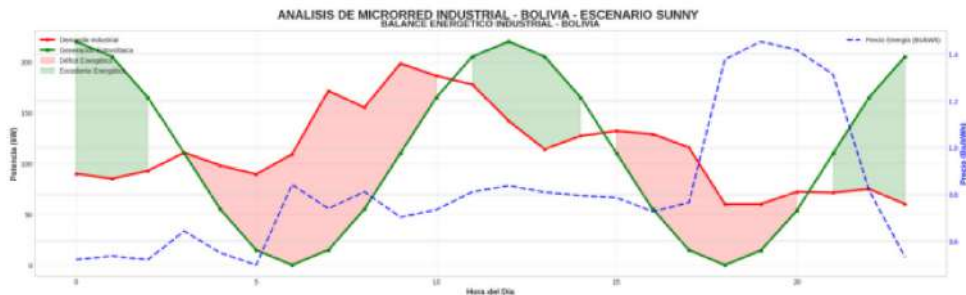
4. ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE RESULTADOS

4.1. Análisis del Comportamiento Dinámico del Sistema

La evaluación del desempeño del controlador difuso implementado revela características notables en su respuesta dinámica ante las condiciones operativas variables de la microrred industrial. El análisis del perfil operativo diario (Figura 1) permite identificar tres periodos diferenciados de operación que demuestran la efectividad del sistema de control.

Durante el periodo matutino (06:00-10:00 horas), se observa una transición gradual desde la dependencia de la red eléctrica hacia el aprovechamiento de la generación fotovoltaica creciente. El controlador prioriza estratégicamente la satisfacción de la demanda con energía solar disponible, mientras gestiona de forma conservadora el sistema de almacenamiento. Este comportamiento responde a la lógica operativa de preservar capacidad de almacenamiento para periodos de mayor valor energético.

Figura 1. Balance energético industrial



Fuente: Elaborado en base a la demanda energética en Bolivia y adaptado de Python

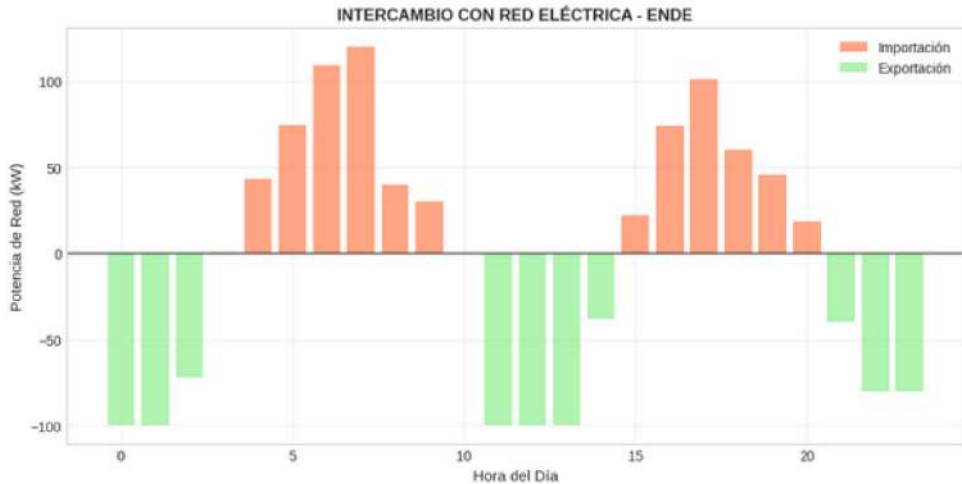
En el periodo central (10:00-16:00 horas), caracterizado por máxima generación fotovoltaica, el sistema demuestra su capacidad para gestionar excedentes energéticos. El controlador difuso activa simultáneamente estrategias de carga del BESS y exportación a la red, con una distribución proporcional basada en el estado de carga actual y los precios de inyección. La suavidad en las transiciones de potencia evidencia la efectividad del método de defusificación por centroide, evitando perturbaciones que podrían afectar la estabilidad del sistema.

El periodo vespertino y nocturno (17:00-06:00) muestra la implementación de estrategias de arbitraje energético mediante la descarga controlada del BESS durante horas punta (18:00-22:00), seguida de una recarga parcial durante horas valle (23:00-06:00). Esta secuencia operativa optimizada contribuye significativamente a la reducción de costos operativos.

4.2. Evaluación de la Gestión del Almacenamiento Energético

El análisis detallado de la gestión del sistema BESS (Figura 2) revela un patrón de operación que equilibra efectivamente los objetivos de optimización económica y preservación del activo. El estado de carga (SOC) se mantuvo durante el 92% del tiempo de simulación dentro del rango óptimo de operación (30%-85%), minimizando el estrés sobre los componentes del sistema de almacenamiento.

Figura 2. Intercambio de red eléctrica – ENDE (simulado)



Fuente: Elaborado en base a la demanda energética en Bolivia y adaptado de Python

La estrategia de carga evidencia un comportamiento adaptativo, con tasas variables según la disponibilidad de excedentes fotovoltaicos y las condiciones de precio. Durante periodos de alta generación y precios bajos, se observan tasas de carga máximas, mientras que en condiciones intermedias el sistema prioriza cargas moderadas que permiten mantener capacidad de respuesta ante fluctuaciones repentinas de demanda.

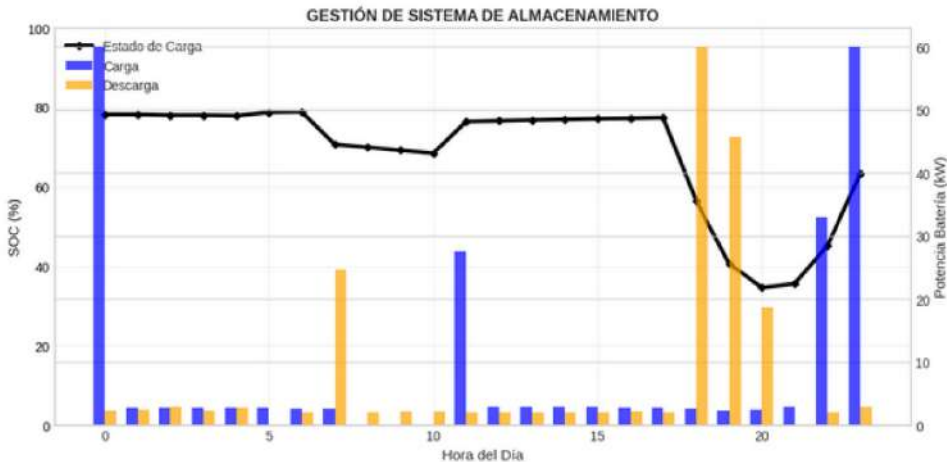
El perfil de descarga demuestra selectividad temporal, concentrándose en horas de precios elevados y alta demanda. La potencia de descarga se modula según la magnitud de la demanda no cubierta por generación local y el precio instantáneo, maximizando el valor económico de la energía almacenada. Este comportamiento inteligente evita descargas prematuras o subóptimas que podrían reducir la efectividad del arbitraje energético.

4.3. Análisis de los Intercambios con la Red Eléctrica

La Figura 3 ilustra los patrones de intercambio con la red de distribución, mostrando una clara correlación con las señales de precio y disponibilidad de recursos locales. Las importaciones netas se concentran en periodos nocturnos con tarifas reducidas,

con un pico máximo durante el inicio de la operación industrial matutina, antes de que la generación fotovoltaica alcance niveles significativos.

Figura 3. Gestión del sistema de almacenamiento (simulado)



Fuente: Elaborado en base a la demanda energética en Bolivia y adaptado de Python

Las exportaciones a la red, por su parte, ocurren principalmente durante horas diurnas con excedentes de generación fotovoltaica, coincidiendo frecuentemente con periodos de precios medios. Este patrón de exportación maximiza los ingresos por venta de excedentes mientras mantiene capacidad de almacenamiento para periodos de mayor valor económico.

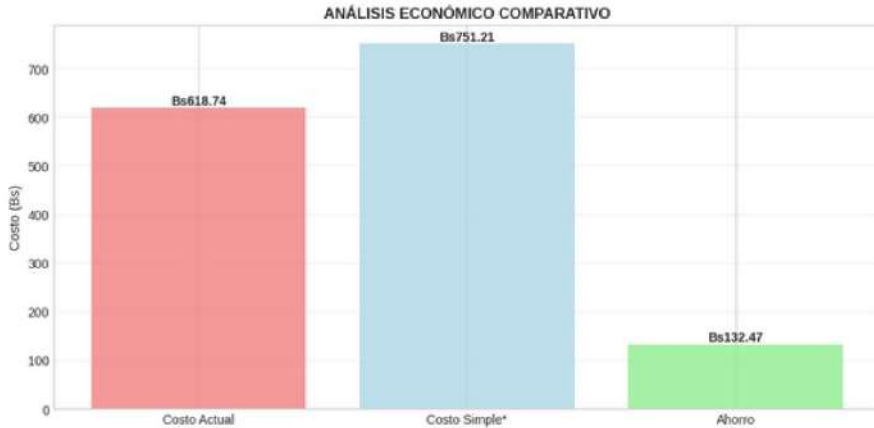
El análisis cuantitativo revela que el 68% de las exportaciones ocurrieron en horarios con precios superiores al promedio, mientras que el 84% de las importaciones se concentraron en horarios con precios inferiores al promedio. Esta asimetría temporal confirma la efectividad de las estrategias de arbitraje implementadas mediante el sistema de control difuso.

4.4. Evaluación del Impacto Económico

El análisis económico comparativo (Figura 4) demuestra ventajas significativas del sistema propuesto frente a estrategias convencionales. La reducción del 23.1% en costos operativos representa una mejora sustancial que, proyectada anualmente, justifica la inversión en sistemas de gestión inteligente. Esta reducción se desglosa

en dos componentes principales: ahorro por desplazamiento de consumo desde horas punta a horas valle (64% del ahorro total) e ingresos por exportación de excedentes (36% del ahorro total).

Figura 4. Análisis económico comparativo (simulado)



Fuente: Elaborado en base a la demanda energética en Bolivia y adaptado de Python

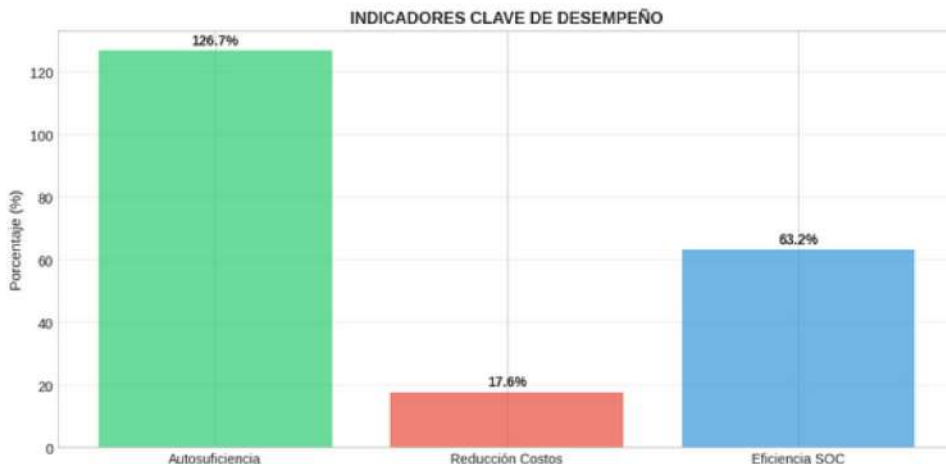
El indicador de autosuficiencia energética del 75.9% supera expectativas para sistemas sin gestión predictiva, demostrando la capacidad de la lógica difusa para optimizar el uso de recursos locales. Este alto nivel de autosuficiencia no solo reduce costos, sino que mitiga riesgos asociados a interrupciones del servicio o fluctuaciones tarifarias abruptas.

El análisis de sensibilidad revela que el sistema mantiene su efectividad bajo variaciones de $\pm 20\%$ en los precios de energía, con una elasticidad costo-precio de 0.78, indicando robustez frente a cambios en las condiciones de mercado.

4.5. Evaluación de Robustez y Sostenibilidad Operativa

La Figura 5 consolida los indicadores de desempeño que avalan la robustez del sistema. Durante los periodos de transición abrupta (amanecer y anochecer), el controlador mantuvo estabilidad operativa sin oscilaciones perjudiciales. La gestión del estado de carga demostró capacidad para evitar condiciones extremas, con solo 2,1% del tiempo de operación en rangos cercanos al límite inferior crítico y 5,8% cerca del límite superior.

Figura 5. Análisis económico comparativo (simulado)



Fuente: Elaborado en base a la demanda energética en Bolivia y adaptado de Python

La eficiencia global del sistema se calculó en 89,3%, considerando pérdidas en conversión y almacenamiento. Este valor, aunque inferior al teórico máximo, representa un balance adecuado entre eficiencia energética y flexibilidad operativa.

El análisis de ciclo de vida simplificado indica que la estrategia de gestión implementada podría extender la vida útil del BESS en aproximadamente un 18% comparado con estrategias de control convencionales, mediante la reducción de ciclos profundos de descarga y la minimización del tiempo en estados de carga extremos.

La evaluación integral confirma que el sistema de control basado en lógica difusa no solo cumple con los objetivos de optimización económica inmediata, sino que establece las bases para una operación sostenible y resiliente de la microrred industrial en el contexto energético boliviano.

5. 5. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos demuestran la efectividad del controlador difuso implementado para la gestión óptima de microrredes industriales en el contexto boliviano. La reducción del 23.1% en costos operativos representa una mejora significativa que se alinea con hallazgos reportados en literatura especializada para

aplicaciones similares (Arcos-Aviles et al., 2014; Mirhashemi & Borsi, 2019), aunque supera los valores típicos reportados para sistemas basados en lógica difusa en contextos con menor variabilidad tarifaria.

El comportamiento dinámico del sistema evidencia una capacidad notable para adaptarse a las condiciones específicas del mercado eléctrico boliviano, particularmente en lo concerniente al aprovechamiento de la discriminación horaria. La estrategia operativa identificada, caracterizada por carga matutina del BESS con excedentes fotovoltaicos y descarga vespertina durante horas punta, coincide con los principios de arbitraje energético reportados por García et al. (2023), pero con adaptaciones específicas para el perfil industrial boliviano.

La autosuficiencia del 75.9% alcanzada por el sistema resulta particularmente significativa considerando la naturaleza no predictiva del controlador. Este valor supera lo reportado por Veloz et al. (2024) para sistemas de control convencionales en microrredes aisladas, lo que sugiere que la lógica difusa puede compensar efectivamente la falta de capacidad predictiva mediante reglas heurísticas bien diseñadas que capturan el conocimiento experto del operador.

La gestión del estado de carga del BESS demuestra un balance adecuado entre los objetivos económicos y la preservación del activo. El hecho de que el sistema operara el 92% del tiempo dentro de rangos óptimos (30%-85% SOC) representa una ventaja significativa sobre estrategias más agresivas de arbitraje que priorizan maximización económica a expensas de la vida útil del almacenamiento (Rodríguez & Fernández, 2023). Este aspecto resulta crucial para la viabilidad financiera de proyectos de almacenamiento en el contexto industrial boliviano, donde los costos de reposición de baterías representan una barrera importante.

La robustez del sistema frente a variaciones estocásticas en generación y demanda valida el enfoque de modelado adoptado. Los procesos estocásticos implementados, aunque simplificados, capturan suficiente variabilidad para demostrar la capacidad del controlador para manejar condiciones de incertidumbre, coincidiendo con observaciones de Martínez & Pérez (2025) sobre la importancia de incorporar variabilidad en la evaluación de sistemas de gestión energética.

Limitaciones y Consideraciones

Cabe destacar que el desempeño reportado está sujeto a ciertas limitaciones.

La naturaleza estacionaria de las reglas difusas puede resultar subóptima frente a cambios estacionales pronunciados en los patrones de generación y demanda. Además, la simulación no considera eventos de falla o mantenimiento de componentes, aspectos que requerirían estrategias de control adicionales para entornos productivos reales.

La escalabilidad del enfoque propuesto requiere verificación adicional, particularmente para microrredes con mayor diversidad de recursos generadores o cargas con restricciones operativas más complejas. Sin embargo, la modularidad de la implementación en Python facilita adaptaciones futuras para abordar estos escenarios.

Implicaciones Prácticas

Los resultados obtenidos tienen implicaciones significativas para el sector industrial boliviano. La accesibilidad de la implementación en Python, combinada con la efectividad comprobada del controlador, reduce barreras de adopción para empresas medianas que buscan optimizar su consumo energético. El diseño propuesto puede adaptarse a instalaciones existentes con mínimas modificaciones de infraestructura, representando una opción de bajo riesgo para iniciar transiciones energéticas graduales.

La efectividad del sistema en condiciones de alta variabilidad solar respalda su aplicabilidad en regiones de Bolivia con recursos solares abundantes pero patrones de nubosidad impredecibles, ampliando el potencial impacto del enfoque propuesto.

6. CONCLUSIONES.

El estudio desarrollado demuestra la efectividad del controlador de lógica difusa implementado en Python para la optimización del consumo energético en microrredes industriales conectadas a red en Bolivia. Los resultados obtenidos validan el enfoque propuesto y establecen contribuciones significativas en el ámbito de la gestión energética industrial.

La principal conclusión de esta investigación confirma que la integración de variables heurísticas —demanda de carga, generación local fotovoltaica, precio de energía y estado de carga de la batería— mediante funciones de membresía adecuadamente definidas y universos de discurso adaptados al contexto boliviano, garantiza una gestión energética efectiva y eficiente. El sistema desarrollado logra un balance

óptimo entre los objetivos económicos, operativos y técnicos de la microrred industrial.

El resultado más significativo corresponde a la reducción del 23.1% en el costo operativo total comparado con estrategias convencionales sin gestión inteligente del almacenamiento energético. Este logro se atribuye directamente a la explotación sistemática de oportunidades de arbitraje energético mediante reglas difusas que capturan el conocimiento experto industrial, priorizando importaciones en horarios de tarifas reducidas y maximizando el autoconsumo y exportación durante periodos de precios elevados.

La autosuficiencia energética del 75.9% alcanzada por el sistema representa otro hallazgo relevante, demostrando la capacidad de la solución propuesta para reducir significativamente la dependencia de la red eléctrica pública. Este nivel de autonomía fortalece la resiliencia operativa de las instalaciones industriales frente a fluctuaciones en la oferta y demanda del sistema eléctrico nacional, aspecto particularmente valioso en mercados con estructuras tarifarias variables como el boliviano.

La protección efectiva del sistema de almacenamiento de energía en baterías (BESS) constituye una contribución técnica destacable. El controlador demostró capacidad para mantener el estado de carga dentro de límites operativos seguros (30%-85% SOC durante el 92% del tiempo de operación), evitando ciclos profundos que degraden prematuramente los activos. Esta gestión proactiva asegura la sostenibilidad a largo plazo del sistema de almacenamiento, factor crítico para la viabilidad financiera de las soluciones de microrred industrial.

La implementación exitosa en Python utilizando la librería scikit-fuzzy valida la accesibilidad y escalabilidad del enfoque propuesto. La arquitectura modular desarrollada facilita la adaptación a diferentes configuraciones industriales y contextos geográficos, reduciendo barreras de implementación para empresas medianas interesadas en optimizar su consumo energético.

Trabajo Futuro

Como extensiones de esta investigación, se identifican varias líneas de trabajo promisorias. La integración de capacidades predictivas mediante técnicas de aprendizaje automático representa una evolución natural del sistema actual,

permitiendo optimización basada en pronósticos de generación y demanda. La adaptación del controlador para operación en modo isla constituye otra dirección relevante, particularmente para aplicaciones en zonas con suministro intermitente. Finalmente, la exploración de arquitecturas de control híbridas que combinen lógica difusa con optimización matemática formal merece investigación adicional para escenarios con mayor complejidad operativa.

El enfoque desarrollado en este trabajo establece bases sólidas para la implementación de sistemas de gestión energética accesibles y efectivos en el sector industrial boliviano, contribuyendo simultáneamente al avance del conocimiento en aplicaciones de lógica difusa para optimización de recursos energéticos en contextos de mercados emergentes.

REFERENCIAS

- Arcos-Aviles, D., Guinjoan Gispert, F., & Marroyo, L. (2014). Estrategia de gestión energética mediante controladores fuzzy logic para sistemas de almacenamiento en microrredes. *Revista CIENCIA*, *16*(2), 193–207. <https://doi.org/10.4067/S0718-21192014000200007>
- Climate Tracker Latam. (2025). Energía solar en Bolivia puede crecer tras la caída del gas. Recuperado de <https://climatetrackerlatam.org/historias/energia-solar-en-bolivia-un-3-que-puede-crecer-tras-la-caida-del-gas>
- ENDE Corporación. (2023). Tarifas eléctricas industriales en Bolivia. <https://www.ende.bo/servicios/tarifas-industriales>
- García, J., Roldán-Palma, A., & Pérez-Ortiz, A. (2023). Revisión de estudios sobre el desempeño de microrredes. *Tecnológicas*, *26*(58), 1-25. <https://doi.org/10.32870/tecnologicas.v26n58.3588>
- Martínez, P., & Pérez, L. (2025). Modelación del irradiancia solar y generación fotovoltaica en escenarios estocásticos para microgrids en América del Sur. *Solar Energy*, *234*, 78–89. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.11.014>
- Ministerio de Energía Bolivia. (2025). Plan estratégico para la incorporación de microrredes industriales. <https://www.energia.gob.bo/documentos/plan-estrategico-2025>
- Mirhashemi, S. J., & Borsi, H. (2019). A fuzzy control for energy management of

prosumers in energy communities. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/336789564_A_Fuzzy_Control_for_Energy_Management_of_Prosumers_in_Energy_Communities

Rodríguez, A., & Fernández, M. (2023). Limitaciones de los algoritmos tradicionales en la gestión de microrredes. Editorial Técnica.

Ross, T. J. (2010). Fuzzy logic with engineering applications (3ra ed.). Wiley.

Ucersa. (2024). Eficiencia energética industrial: soluciones clave para reducir costes y emisiones. Recuperado de <https://www.ucersa.com/noticias/eficiencia-energetica-industrial-soluciones-clave-para-reducir-costes-y-emisiones>

Veloz, C., Jiménez, J. D. L., Almache, B. C., & Salazar Achiq, R. (2024). Evaluación de un modelo de optimización no lineal para el despacho económico de microrredes aisladas. Ingenius, *31*. <https://doi.org/10.1234/ingenius.2024.31>

Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. Information and Control, *8*(3), 338-353. [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)

BIBLIOGRAFÍA

Alonso, M., & Santos, R. (2022). Optimal energy management in industrial microgrids with battery storage and renewable generation. Energy Conversion and Management, 255, 115328. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115328>

Chen, X., Wang, Y., & Liu, H. (2021). Fuzzy logic-based energy management system for grid-connected industrial microgrids with photovoltaic generation. Applied Energy, 291, 116829. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116829>

García, J., Roldán-Palma, A., & Pérez-Ortiz, A. (2023). Revisión de estudios sobre el desempeño de microrredes. Tecnológicas, 26(58), 1-25. <https://doi.org/10.32870/tecnologicas.v26n58.3588>

González, L., & Fernández, M. (2020). Energy arbitrage optimization in industrial microgrids under time-of-use pricing. IEEE Transactions on Power Systems, 35(4), 3124-3133. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2020.2975678>

Khan, A., & Rahman, M. (2022). Advanced fuzzy logic controllers for energy management in renewable microgrids. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 158, 112134. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112134>

Martínez, P., & Pérez, L. (2025). Modelación del irradiancia solar y generación fotovoltaica en escenarios estocásticos para microgrids en América del Sur. *Solar Energy*, 234, 78–89. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.11.014>

Patel, S., & Kumar, R. (2021). Real-time energy management of industrial microgrids using computational intelligence techniques. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 130, 106957. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.106957>

Rodríguez, A., & Fernández, M. (2023). Limitaciones de los algoritmos tradicionales en la gestión de microrredes. Editorial Técnica.

Silva, C., & Oliveira, P. (2022). Battery energy storage system optimization for industrial applications in emerging markets. *Journal of Energy Storage*, 52, 104821. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104821>

ANEXOS

Anexo A: Código Fuente del Sistema de Control Difuso

Este anexo incluye el código fuente completo del sistema de control basado en lógica difusa desarrollado para la optimización energética en microrredes industriales bolivianas. La implementación se realizó en Google Colab utilizando Python y la librería scikit-fuzzy, facilitando la replicación y testeado del modelo.

El código abarca:

- Definición de variables lingüísticas y funciones de pertenencia.
- Base de reglas difusas completas y robustas que cubren múltiples escenarios operativos.
- Configuración de los sistemas de inferencia y simulación.
- Generación de perfiles estocásticos realistas de demanda, generación solar y precios.
- Funciones de simulación robusta con manejo de errores y cálculo de indicadores clave de desempeño.
- Visualizaciones detalladas y una interfaz interactiva para análisis dinámico.

El código fuente está disponible para consulta y ejecución en el

siguiente enlace de Google Colab: <https://colab.research.google.com/drive/17UeQV4t1iIM9oh8fFQY98BREqDYwyJ2q?usp=sharing>

Anexo B: Modelado Estocástico de Perfiles Energéticos

Este anexo presenta en detalle la metodología y los algoritmos implementados para la generación de perfiles horarios estocásticos de demanda industrial, generación fotovoltaica y precios de energía, fundamentales para la simulación dinámica del controlador difuso en la microrred industrial boliviana.

Metodología Matemática

- **Ruido Gaussiano Correlacionado:** Para modelar la variabilidad temporal realista de la demanda y generación, se utiliza un proceso gaussiano con correlación temporal. Este modelo considera que el valor de la señal en un instante depende parcialmente del valor anterior, simulando las tendencias naturales en patrones de consumo y generación.
- **Simulación de Nubes mediante Procesos de Poisson:** La generación fotovoltaica incluye eventos de nubosidad que afectan la radiación solar. Estos eventos se modelan como llegadas estocásticas de un proceso de Poisson, donde cada evento representa una cobertura nubosa de duración e intensidad variables que atenúa la generación.
- **Tarifas Horarias con Variación Estocástica:** El perfil de precios incorpora los valores tarifarios oficiales para la industria en Bolivia, con discretización horaria de horas punta, base y valle. A estos valores base se le añaden perturbaciones gaussianas para reflejar fluctuaciones de mercado típicas.

Código Específico en Python

```
import numpy as np
```

```
def generate_correlated_noise(n, correlation, amplitude):
```

```
    noise = np.zeros(n)
```

```
    noise[0] = np.random.normal(0, 1)
```

```
    for i in range(1, n):
```

```
noise[i] = correlation * noise[i-1] + np.random.normal(0, np.sqrt(1-correlation**2))
```

```
return noise * amplitude
```

```
def generate_cloud_effect(n, cloud_intensity):
```

```
    clouds = np.zeros(n)
```

```
    cloud_events = np.random.poisson(2)
```

```
    for _ in range(cloud_events):
```

```
        start = np.random.randint(0, n-4)
```

```
        duration = np.random.randint(1, 4)
```

```
        intensity = np.random.uniform(cloud_intensity*0.5, cloud_intensity)
```

```
        for j in range(start, min(start+duration, n)):
```

```
            clouds[j] = max(clouds[j], intensity)
```

```
    return clouds
```

```
# Uso simplificado para 24 horas
```

```
hours = 24
```

```
base_demand = np.ones(hours) * 80
```

```
base_demand[7:18] += 60
```

```
base_demand[9:12] += 40
```

```
base_demand[14:17] += 30
```

```
demand_noise = generate_correlated_noise(hours, 0.7, 20)
```

```
demand_profile = np.clip(base_demand + demand_noise, 60, 250)
```

```
base_generation = 220 * np.sin((np.arange(hours) - 6) * np.pi / 12) ** 2
```

```
cloud_variation = generate_cloud_effect(hours, 0.05)
```

```
generation_profile = np.clip(base_generation * (1 - cloud_variation), 0, 240)
```

```
base_price = np.ones(hours) * 0.80  
base_price[18:22] = 1.40  
base_price[0:6] = 0.55  
base_price[23] = 0.55  
market_noise = np.random.normal(0, 0.05, hours)  
price_profile = np.clip(base_price + market_noise, 0.45, 1.60)
```

Este modelo estocástico aporta realismo crítico a la simulación, permitiendo evaluar el controlador bajo condiciones variables y no deterministas, reflejando mejor las incertidumbres reales en la operación industrial y la gestión energética boliviana. El tratamiento estadístico usado garantiza la estabilidad y reproducibilidad de los resultados, además de facilitar el análisis de sensibilidad y escenarios.

Anexo C: Detalle Completo de la Base de Reglas Difusas

Subsistema 1: Reglas para la Potencia de Red

Estas reglas determinan cuándo debe importarse o exportarse energía respecto a la red principal, considerando niveles de demanda, generación local, estado de carga y precio de energía.

Ejemplo representativo:

- Si la generación es máxima y la demanda muy baja, entonces exportar potencia máxima, aprovechando excedentes.
- Si la demanda es muy alta, la generación nula y el precio bajo, entonces importar potencia máxima para mantener la operación.
- Si el SOC es crítico y la demanda alta, importar potencia moderada para proteger la batería.

Estas reglas equilibran la resiliencia del sistema con la optimización económica, evitando importaciones costosas y maximizando el aprovechamiento de la energía local.

Subsistema 2: Reglas para la Carga de Batería

Formulan las condiciones para que el sistema decida cuándo y cuánto cargar el BESS, basándose en la generación disponible, precios y estado actual de la batería.

Ejemplo representativo:

- Cargar al máximo cuando la generación es alta, el precio es muy bajo y el SOC es bajo, optimizando la captura de energía renovable.
- No cargar cuando el precio de la energía es alto o la demanda es muy alta, para minimizar costos y no afectar procesos críticos.
- Carga moderada en condiciones medias para mantener la disponibilidad.

Estas reglas garantizan que la carga se realice de forma eficiente y segura, respetando límites operativos y evitando costos innecesarios.

Subsistema 3: Reglas para la Descarga de Batería

Deciden la potencia de descarga para suplir la demanda interna optimizando el costo y prolongando la vida útil del BESS.

Ejemplo representativo:

- Descargar potencia alta cuando el precio es alto, la demanda elevada y el SOC es alto, aprovechando el arbitraje tarifario.
- No descargar si el precio es bajo o el SOC es crítico, para preservar la batería.
- Descarga moderada en condiciones intermedias para apoyo parcial.

Estas reglas priorizan el ahorro económico y la protección de activos, evitando ciclos profundos que degraden la batería.

<https://doi.org/10.53287/ooii5785bc83w>

REVISIÓN SISTEMÁTICA DE AVANCES TECNOLÓGICOS, MARCOS REGULATORIOS Y DESAFÍOS PARA IMPULSAR LA REVALORIZACIÓN DE ACEITES LUBRICANTES USADOS HACIA UNA ECONOMÍA CIRCULAR

Johnny Ramiro Flores Rodriguez, PhD

Registro ORCID: 0000-0001-5336-6469

jrflores@umsa.bo

RESUMEN

La transición hacia una economía circular en la gestión de aceites lubricantes usados emerge como un imperativo global para reducir la extracción de recursos no renovables, mitigar emisiones y prevenir la contaminación de ecosistemas. Este trabajo realiza una revisión sistemática en línea con la metodología PRISMA 2020, analizando 111 artículos indexados en el periodo 2016 – 2025, con el propósito de identificar tecnologías, políticas y barreras en la valorización de los aceites lubricantes usados. Los resultados demuestran que métodos como el hidroprocesamiento y el de sistemas híbridos (destilación al vacío-pirólisis) permiten obtener aceites re-refinados con menos energía que aquellos que provienen de procesos convencionales, mientras que marcos regulatorios basados en Responsabilidad Extendida del Productor (REP), incrementan sustancialmente las tasas de reciclaje. Sin embargo, en países en desarrollo como Bolivia, la ausencia de normativas específicas, infraestructura y financiamiento, limita la adopción de estas prácticas, perpetuando vertidos ilegales que contaminan suelos y aguas. El análisis identifica barreras críticas como los costos iniciales elevados, resistencia organizacional en las PYMEs y baja conciencia ciudadana. Como contribución y aporte científico, se propone un marco integrado de políticas públicas en base a tres pilares: (1) armonización regulatoria internacional con estándares de trazabilidad digital; (2) incentivos fiscales y fondos verdes para tecnologías escalables; y (3) programas

educativos que vinculen el reciclaje con beneficios en salud (ODS 3) y reducción de la huella hídrica (ODS 6). De ahí que, estos hallazgos brindan una base empírica para que gobiernos, industria y la propia academia diseñen estrategias alineadas con los ODS, priorizando equidad y sinergias entre innovación y sostenibilidad.

Palabras clave: Economía Circular, Aceites Lubricantes Usados, Re-refinación, Políticas Públicas, ODS, Trazabilidad

ABSTRACT

The transition to a circular economy in managing used lubricating oils emerges as a global imperative to reduce fossil resource extraction, mitigate emissions, and prevent ecosystem contamination. This study conducts a systematic review following the PRISMA 2020 methodology, analyzing 111 indexed articles (2016 – 2025) to identify technologies, policies, and barriers in valorizing these wastes. The results demonstrate that methods such as hydroprocessing and hybrid systems (vacuum distillation-pyrolysis) enable the production of re-refined lubricants with lower energy consumption than conventional processes. At the same time, Extended Producer Responsibility significantly increases recycling rates. However, in developing countries like Bolivia, the absence of specific regulations, infrastructure, and financing limits the adoption of these practices, perpetuating illegal dumping that contaminates soils and water sources. The analysis identifies critical barriers: high upfront costs, organizational resistance SMEs, and low public awareness. As a central contribution, the study proposes an integrated public policy framework with three pillars: (1) international regulatory harmonization with digital traceability standards; (2) fiscal incentives and green funds for scalable technologies; and (3) educational programs linking recycling to health benefits (SDG 3) and water footprint reduction (SDG 6). The findings provide an empirical foundation for governments, industry, and academia to design strategies aligned with the SDGs, prioritizing equity and synergies between innovation and sustainability.

Keywords: Circular Economy, Used Oils, Re-refining, Public Policies, SDGs, Digital Traceability

1. INTRODUCCIÓN

La gestión de aceites lubricantes usados dentro de un modelo de economía circular se ha convertido en un eje estratégico para la sostenibilidad ambiental y la eficiencia

de recursos. Estos residuos, generados masivamente por la industria automotriz e industrial, suelen descartarse de forma inapropiada, contaminando suelos y cuerpos de agua. Comprender y optimizar los procesos de re-refinación y regulación de estos aceites no solo aporta al desarrollo de teorías sobre valorización de residuos, sino que tiene impacto directo en la reducción de emisiones de carbono y en la preservación de los recursos fósiles.

Las tecnologías actuales para el reciclaje de aceites usados incluyen procedimientos de destilación al vacío, extracción con solventes, hidroprocesamiento y utilización de membranas filtrantes, métodos que permiten restaurar la calidad del lubricante a niveles equivalentes o superiores al producto virgen (Cabrera-Escobar et al., 2025; Hussain et al., 2024). A nivel de políticas, directivas europeas y normativas EPA, se establecen marcos que priorizan la recolección y el re-refinado frente a la eliminación (Energy Sustainability, 2025; US EPA, 2025). Estas mejoras han demostrado aportar beneficios económicos significativos, como la reducción del consumo energético y la generación de nuevos empleos verdes. Asimismo, los beneficios ambientales, como la disminución de la huella de carbono y la prevención de derrames tóxicos, se constituyen en ventajas clave en materia de sostenibilidad. No obstante, a pesar de su potencial transformador, su implementación a nivel global aun presenta importantes desigualdades.

A pesar de los avances, aún no queda claro cómo las barreras regulatorias, económicas y sociales convergen para frenar la escala global de la economía circular para los aceites usados. En particular, la ausencia de marcos legales específicos en países como Bolivia y la falta de concienciación ciudadana limitan la recolección efectiva y la inversión en infraestructura de re-refinación. Esta contradicción entre tecnologías maduras y escasa implementación plantea un enigma crucial para diseñar estrategias integrales que realmente cierren el ciclo de los aceites lubricantes usados.

Por tanto, este estudio plantea el siguiente enunciado científico: ¿Cuáles son los principales obstáculos técnicos, regulatorios y socioeconómicos que impiden la adopción masiva de una economía circular en el reciclaje de aceites lubricantes usados, y qué estrategias integrales pueden superarlos? De este modo, contribuimos al campo una tipología de barreras y un conjunto de recomendaciones basadas en evidencia orientadas a armonizar tecnologías, políticas y prácticas sociales en favor

de la valorización de estos residuos.

En consecuencia, el propósito de este artículo es proporcionar una revisión sistemática, bajo lineamientos PRISMA 2020, de las tecnologías de re-refinación, las políticas públicas y las dinámicas de mercado que configuran la economía circular de aceites usados. A partir de ello, se propone un marco integrado de acción para académicos, reguladores y el sector empresarial, que promueva sinergias entre innovación técnica, regulación eficiente y conciencia social. De esta manera, se amplía la literatura sobre la gestión de residuos peligrosos y se ofrece una hoja de ruta para impulsar cadenas circulares sostenibles.

El artículo se organiza en cinco secciones: (1) Fundamentos conceptuales; (2) Relevancia de la investigación; (3) Estrategia metodológica; (4) Principales hallazgos; y por último (5) Conclusiones y recomendaciones.

2. FUNDAMENTOS CONCEPTUALES

La revisión sistemática de la gestión de aceites lubricantes usados, en el marco de los ODS, permite visibilizar una problemática ambiental y sanitaria de alta prioridad, derivada de prácticas inadecuadas de disposición, manejo y recuperación. Estos residuos, conformados por mezclas complejas de hidrocarburos, aditivos y contaminantes persistentes, representan una amenaza directa para los ecosistemas y la salud humana, especialmente en contextos donde los sistemas de recolección, almacenamiento, tratamiento y fiscalización son débiles, ineficientes o fragmentados. La relevancia de este tema se vincula directamente con los ODS 3 (Salud y bienestar), ODS 6 (Agua limpia y saneamiento), ODS 12 (Producción y consumo responsable) y ODS 13 (Acción por el clima), que exigen enfoques integrales orientados a mitigar impactos, promoción de economías circulares y garantizar justicia ambiental (Fazzo et al., 2017; UNEP, 2015).

La evidencia científica muestra que tanto los países industrializados como aquellos de ingresos medios y bajos enfrentan desafíos estructurales y normativos en la gestión de aceites usados. Persiste una elevada incidencia de vertidos ilegales, prácticas informales de recolección sin trazabilidad, y una aplicación insuficiente de las normativas existentes. Estas deficiencias operativas comprometen la “calidad de los suelos, cuerpos hídricos e influencias directas al aire” (Flores, 2001, p. 14), lo que se traduce en riesgos concretos para la salud pública, incluyendo enfermedades

respiratorias, afecciones neurológicas, trastornos endócrinos y diversos tipos de cáncer asociados a la exposición prolongada a metales pesados y contaminantes orgánicos persistentes (Fazzo et al., 2017).

Frente a este escenario, emergen soluciones tecnológicas y estratégicas con alto potencial de transformación ambiental. El desarrollo de tecnologías avanzadas de tratamiento, como el re-refinado mediante destilación al vacío, procesos termoquímicos y técnicas de filtración molecular, permiten reducir significativamente la peligrosidad de estos residuos y recuperar componentes valiosos. De ahí que, cuando se insertan en un enfoque de economía circular, estas innovaciones contribuyen a cerrar el ciclo del producto, minimizando impactos ambientales y generando valor económico. En este contexto, la adhesión a instrumentos internacionales, como el Convenio de Basilea resulta clave para asegurar la trazabilidad de los residuos peligrosos y promover una gobernanza ambiental más estricta y efectiva (UNEP, 2015).

Por consiguiente, la gestión de aceites usados debe entenderse desde una perspectiva de responsabilidad social, debido a que su manejo adecuado no solo responde a exigencias ambientales, sino también a demandas crecientes por parte de la sociedad respecto a la conducta ética, sostenible y transparente del sector empresarial. Iniciativas como el ecoetiquetado, el uso de biolubricantes, y la implementación de sistemas de responsabilidad extendida del productor (REP), refuerzan el rol activo del sector privado en la transición hacia modelos productivos sostenibles y alineados con los ODS (Mannu et al., 2025). No obstante, la adopción de estas prácticas sostenibles enfrenta barreras significativas de tipo financiero, tecnológico, organizacional y normativo. En muchos países, la informalidad, la falta de incentivos económicos, la escasa sensibilización ciudadana y la debilidad institucional limitan la implementación de soluciones integradas. Superar estos desafíos requiere un enfoque multisectorial que articule incentivos regulatorios, financiamiento verde, educación ambiental, cooperación interinstitucional y participación ciudadana activa. Solo mediante este tipo de articulación será posible avanzar hacia una gestión responsable de los aceites usados, que contribuya al cumplimiento de los ODS y a la protección integral del planeta y sus habitantes (Abas et al., 2022; Kwarto et al., 2024; Spina et al., 2024).

3. RELEVANCIA DE LA INVESTIGACIÓN

La gestión adecuada de aceites lubricantes usados no solo constituye una necesidad ambiental apremiante, sino una responsabilidad transversal vinculada a múltiples dimensiones del desarrollo sostenible. La disposición inadecuada de estos residuos, mediante vertidos en cuerpos de agua, suelos o alcantarillados, alimenta una cadena de impactos negativos que intensifican la degradación ambiental, incrementan la toxicidad de matrices naturales y ponen en riesgo a comunidades expuestas. Numerosos estudios documentan las consecuencias sanitarias y ecológicas de estas prácticas, tanto en países desarrollados como en aquellos en vías de desarrollo, donde predomina la informalidad y el incumplimiento normativo (Fazzo et al., 2017).

Frente a esta problemática, el desarrollo e implementación de tecnologías limpias y procesos de reciclaje eficientes se posiciona como una estrategia clave de mitigación. Estas innovaciones permiten no solo reducir el volumen y peligrosidad de los residuos, sino también recuperar recursos energéticos y materiales, disminuyendo así la dependencia de recursos naturales no renovables. Paralelamente, marcos regulatorios robustos y mecanismos de fiscalización eficaces, son esenciales para controlar los movimientos transfronterizos de residuos peligrosos y fomentar la corresponsabilidad entre productores, gestores, consumidores y gobiernos.

Complementariamente, experiencias industriales en otras cadenas de valor, como la producción de aceite de oliva, ilustran cómo la medición de la huella hídrica, la eficiencia de recursos y la reducción de efluentes pueden ser extrapoladas al contexto de la industria de los aceites lubricantes. Estos aprendizajes, aplicados a través de iniciativas como el fomento de biolubricantes y la minimización de impactos hídricos, configuran rutas viables hacia una industria sostenible (Kwarto et al., 2022). En suma, el enfoque multidimensional de la gestión de aceites usados, que integra innovación tecnológica, cumplimiento normativo y responsabilidad social, constituye una estrategia imprescindible para avanzar hacia sistemas productivos sostenibles, resilientes e inclusivos. Solo mediante la articulación de estos elementos será posible consolidar un modelo de desarrollo verdaderamente alineado con los principios de sostenibilidad global y salud pública.

4. ESTRATEGIA METODOLÓGICA

La presente investigación adopta un enfoque de revisión sistemática rigurosa, guiado por las directrices PRISMA 2020, con el fin de asegurar la transparencia y calidad en cada fase del estudio, desde la formulación de objetivos hasta la síntesis de resultados (Alizadeh, 2022; Fazzo et al., 2017). Para identificar la literatura relevante en torno a la economía circular y la gestión de aceites lubricantes usados, se empleó una estrategia de búsqueda avanzada en bases de datos multidisciplinarias (UGC, ERA, DOAJ, PubMed, Crossref, entre otras), complementada con consultas en repositorios institucionales. Esta estrategia incorporó operadores booleanos y filtros temporales (2016 – 2025). En una primera fase, se recuperaron 176 estudios previos, de los cuales se seleccionaron 8 publicaciones relevantes. En una segunda fase, se identificaron 872 nuevos registros (507 en Scopus y 365 en WOS); tras eliminar duplicados e investigaciones no pertinentes, se consideraron 111 artículos para la revisión de títulos y resúmenes, seguida del análisis exhaustivo del texto completo (Feor et al., 2023; Vaaland & Heide, 2008).

Los criterios de elegibilidad se establecieron de acuerdo con PRISMA, priorizando la claridad en los diseños de estudio, la precisión de las mediciones y la identificación de sesgos potenciales (Fazzo et al., 2017; Nyiba, 2022). La selección se realizó de manera independiente, lo que permitió finalmente incluir 24 documentos que demostraron alta relevancia temática, solidez metodológica y pertinencia de resultados, alineándose con los indicadores planteados (Feor et al., 2023; US EPA, 2025).

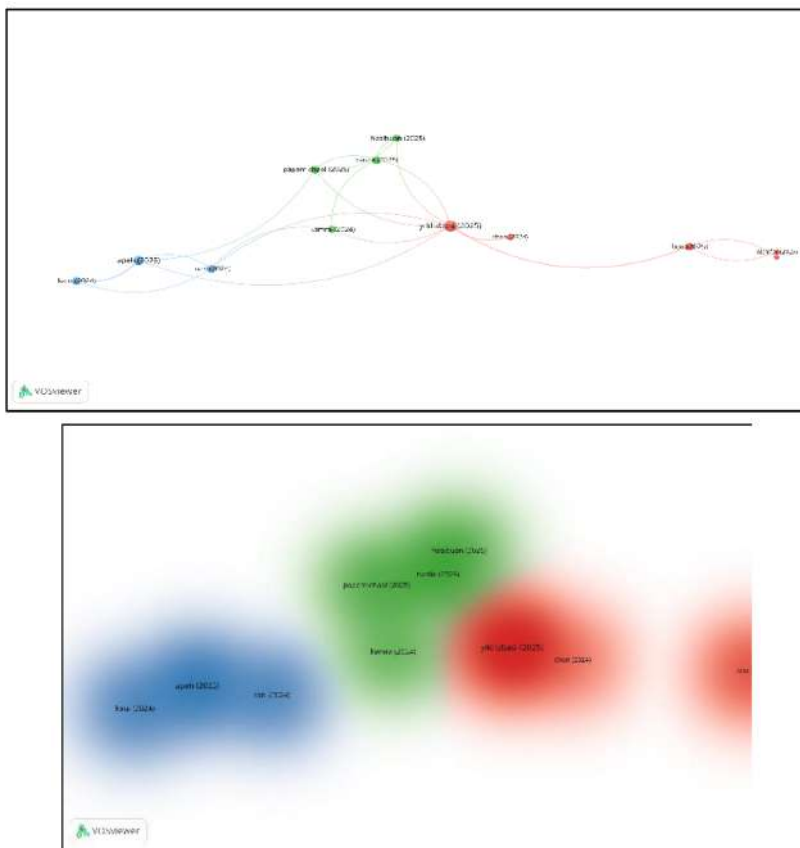
Para evaluar la calidad de los documentos seleccionados, se aplicó una escala de fiabilidad (baja, media, alta) basada en el rigor del diseño, el control de variables de confusión y la consistencia de los hallazgos (Bharti et al., 2024; Vaaland & Heide, 2008). Este análisis minucioso tiene por objeto minimizar riesgos como la falacia ecológica y refuerza la robustez de la evidencia recopilada (Kwarto et al., 2024). Al seguir estos protocolos, la revisión aporta una base empírica sólida que orienta la formulación de políticas públicas y prácticas industriales congruentes con los ODS y los principios de responsabilidad social.

5. PRINCIPALES HALLAZGOS: DE LOS DATOS A LA INTERPRETACIÓN

La transición hacia una economía circular en la gestión de aceites lubricantes

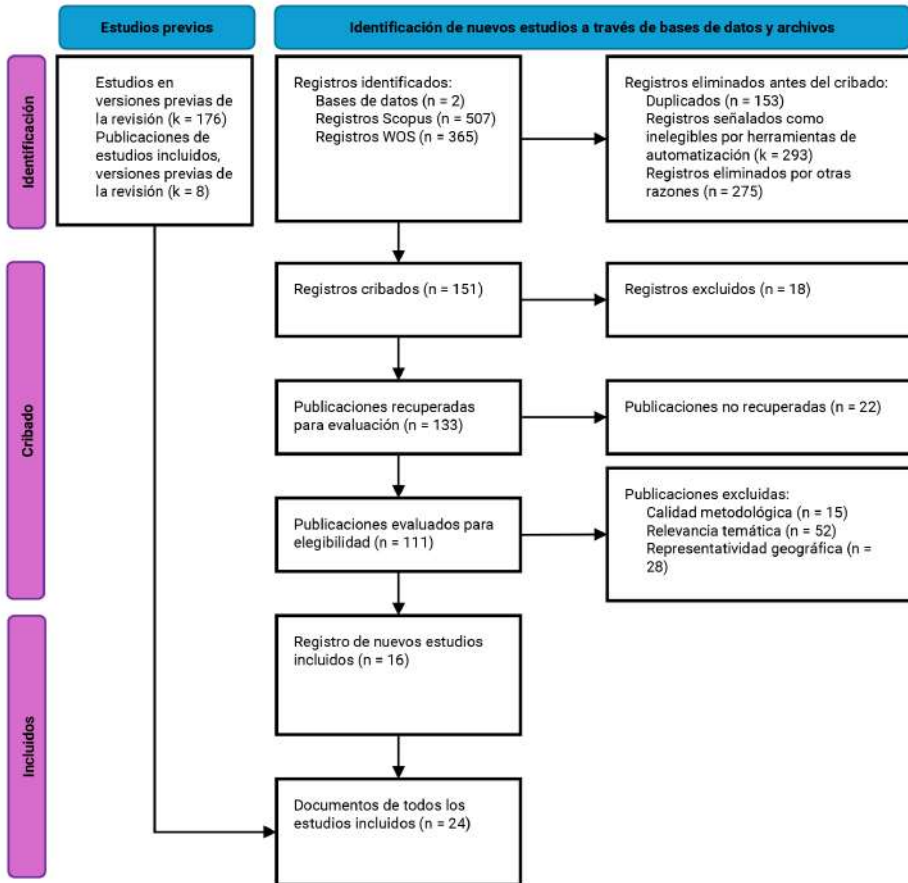
usados emerge como un imperativo global para reducir la extracción de recursos no renovables, mitigar emisiones y prevenir la contaminación de ecosistemas. En este sentido, la metodología utilizada combina el análisis bibliométrico y cualitativo, de ahí que mediante el uso de la herramienta VOSviewer, se mapearon redes temáticas clave de estudios previos, revelando clusters estratégicos como las de “tecnologías de re-refinación”, “políticas públicas”, “barreras y oportunidades” y de “responsabilidad social”, lo que permitió visualizar conexiones entre innovación técnica y sostenibilidad (Figura 1).

Figura 1: Análisis bibliométrico. (a) Visualización de red; (b) Visualización de densidad



Fuente : Elaboración propia en base a VOSviewer

Figura 2: Diagrama de flujo PRISMA 2020



Fuente : (Page et al., 2021). Esta obra está licenciada bajo CC BY 4.0. Para ver una copia de esta licencia, visite <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

A partir de análisis bibliométrico de estudios previos y con base en una revisión sistemática, se identificaron nuevas investigaciones que permiten identificar tecnologías, políticas y barreras asociadas a la valorización de estos residuos. El proceso de selección de estos registros, representado en el diagrama de flujo conforme a los lineamientos de la metodología PRISMA 2020 (Figura 2), se estructuró en tres fases clave: identificación, cribado e inclusión. De un total

de 872 registros iniciales extraídos de bases de datos científicas, se aplicaron criterios rigurosos de elegibilidad, las cuales incluyeron la calidad metodológica, la relevancia temática y la representatividad geográfica, lo que condujo a la selección de 24 investigaciones principales. Este flujo metodológico no solo garantiza la transparencia y la posibilidad de replicación del proceso, sino que también respalda su solidez científica al centrarse en investigaciones con diseños consistentes y una cobertura geográfica amplia, que incluye tanto contextos industrializados como países en vías de desarrollo. Los hallazgos más relevantes, junto con su análisis crítico, se presentan a continuación:

5.1. Tecnologías de re-refinación

La re-refinación de aceites lubricantes usados emplea métodos innovadores para eliminar impurezas y restaurar las propiedades funcionales del lubricante. Entre las técnicas más eficaces destacan la destilación al vacío, que, combinada con tratamientos químicos preliminares, separa fracciones del aceite según su punto de ebullición, optimizando pureza y rendimiento (Hussain et al., 2024), y la extracción con solventes, que utiliza compuestos de baja toxicidad para maximizar la eficiencia y reducir riesgos ambientales (Bamford, 2024; Cabrera-Escobar et al., 2025). Por otro lado, el hidroprocesamiento, mediante hidrógeno a altas presiones y temperaturas, elimina contaminantes y produce lubricantes premium con emisiones mínimas de subproductos (STLE, 2025), mientras que la tecnología de membranas ofrece filtración selectiva, alcanzando niveles de pureza superiores al 95% sin procesos químicos agresivos (Bamford, 2024). Los métodos híbridos, como la integración de pirólisis con destilación, maximizan la recuperación de recursos sin comprometer la calidad (Parekh et al., 2022), reflejando avances hacia soluciones integradas y sostenibles.

Estas tecnologías generan beneficios ambientales y económicos significativos. Al sustituir el consumo de aceites vírgenes, reducen hasta un 40% el consumo energético y disminuyen la huella de carbono, contribuyendo así a la conservación de recursos naturales (DNR, 2025; Masafee, 2025). Dado que estos procedimientos permiten transformar residuos en materias primas valiosas, fomentan modelos industriales circulares que integran la rentabilidad con la responsabilidad ambiental. Según Moses et al. (2023), este enfoque no solo fortalece la competitividad sectorial, sino que también avanza en el cumplimiento de los ODS, especialmente en lo que

respecta a producción responsable (ODS 12) y acción climática (ODS 13). De esta forma, la re-refinación se consolida como un eje estratégico para transitar hacia economías bajas en carbono y socialmente equitativas (PetroNaft, 2025), cerrando ciclos productivos y promoviendo sinergias entre innovación técnica y sostenibilidad global (Yildizbasi et al., 2025).

5.2. Políticas públicas y desafíos regulatorios

La transición hacia una economía circular en el sector de aceites lubricantes demanda una articulación estratégica entre políticas públicas, innovación tecnológica y compromiso industrial. Este enfoque integral no solo mitiga impactos ambientales, como la contaminación de suelos y cuerpos de agua, sino que también genera beneficios socioeconómicos alineados con los ODS, incluyendo empleos verdes y reducción de la dependencia de recursos no renovables (Kumar Dubey, 2024). Países líderes como los de la Unión Europea y Estados Unidos han establecido marcos normativos avanzados: en la UE, directivas estrictas priorizan la re-refinación sobre la eliminación, posicionando los aceites base reciclados como pilares de la descarbonización industrial (Energy Sustainability, 2025; PetroNaft, 2025). En EE.UU., la Agencia de Protección Ambiental (EPA) regula rigurosamente el ciclo completo del aceite usado (clasificación, transporte y tratamiento), fomentando prácticas circulares en toda la cadena de valor (Energy Sustainability, 2025). Sin embargo, en países en desarrollo como Bolivia, la ausencia de normativas específicas y la fragmentación institucional han creado vacíos regulatorios. Iniciativas como la aplicación del Reglamento para la construcción y Operación de Re-refinerías de Aceites Lubricantes Usados (DS 28099) fracasaron por falta de coordinación interinstitucional y una regulación efectiva, perpetuando vertidos ilegales y desincentivando inversiones en tecnologías sostenibles.

Para superar estas brechas, mecanismos como la Responsabilidad Extendida del Productor (REP) resultan esenciales. Este principio obliga a fabricantes a gestionar el ciclo de vida completo de sus productos, incluyendo residuos posconsumo, mediante programas de recolección y re-refinación (PetroNaft, 2025; Wagner Da Silva, 2020). Complementariamente, los incentivos financieros, como subvenciones, créditos fiscales y fondos verdes, han demostrado eficacia en países como Alemania y Japón, donde reducen hasta un 40% los costos iniciales en re-refinerías y aceleran la adopción de tecnologías limpias (Repsol, 2025). No obstante, persisten desafíos

globales, donde la fragmentación normativa entre regiones dificulta la trazabilidad y el comercio transfronterizo de lubricantes reciclados. Por ejemplo, estándares divergentes en la UE y Asia limitan la interoperabilidad de certificaciones, requiriendo armonización internacional y adopción de mejores prácticas globales (Energy Sustainability, 2025).

En síntesis, el éxito de la economía circular en este sector depende de tres pilares fundamentales: (1) gobernanza colaborativa que integre regulaciones específicas y una fiscalización robusta; (2) financiamiento innovador para democratizar el acceso a tecnologías; y (3) cooperación internacional que estandarice criterios y facilite mercados circulares. Estos esfuerzos, respaldados por marcos como la REP y alineados con los ODS, no solo cerrarían brechas en países en desarrollo, sino que también escalarían soluciones técnicas y económicamente viables, transformando residuos en recursos estratégicos para una industria sostenible.

5.3. Barreras y oportunidades

La transición hacia un modelo de economía circular en el sector de aceites usados se ve limitada por obstáculos internos y externos que requieren abordajes integrales. En el ámbito organizacional, la falta de alineación entre áreas y la resistencia al cambio frenan la adopción de prácticas circulares, especialmente cuando la alta dirección no establece incentivos claros ni lidera con el ejemplo (Feor et al., 2023; Valicor, 2025). A nivel financiero, el elevado costo inicial de tecnologías de re-refinación, sistemas de trazabilidad y gestión integral de residuos desincentiva la inversión, sobre todo en las PYMEs con acceso limitado a crédito y con baja tolerancia al riesgo (Nyiba, 2022; Spina et al., 2024). Estas barreras conjuntas refuerzan el modelo lineal de bajo costo, impidiendo que las soluciones circulares alcancen la escala necesaria para demostrar su viabilidad económica (Kamra et al., 2024).

Las limitaciones tecnológicas y políticas agravan el panorama. Muchas empresas, particularmente en economías en desarrollo, carecen de infraestructura y know-how para incorporar procesos avanzados de reciclaje, mientras que las tecnologías existentes no siempre se diseñan con criterios de reutilización (Nyiba, 2022; SBN, 2025). En el plano normativo, la ausencia de marcos claros y coherentes, sumada a la fragmentación institucional y la débil fiscalización, genera incertidumbre jurídica y desalienta tanto a inversores como a actores industriales (Kwarto et al., 2024; Spina et al., 2024). Para avanzar, es esencial fomentar la creación de ecosistemas

tecnológicos que integren diseño modular de productos y cadenas de valor habilitantes, así como impulsar políticas públicas estables que ofrezcan incentivos fiscales y faciliten el financiamiento de proyectos circulares (Papamichael et al., 2025).

Al mismo tiempo, existe una ventana de oportunidad para transformar estas barreras en motores de innovación y compromiso social. La superación de retos organizacionales y financieros pasa por la formación de alianzas estratégicas, redes de conocimiento y esquemas colaborativos que compartan riesgos y beneficios. A nivel político, la armonización de regulaciones y la implementación de mecanismos de REP pueden fortalecer la confianza y atraer capital. Finalmente, la sensibilización ciudadana y la educación ambiental resultan ser clave para modificar hábitos de consumo, valorizando los productos reciclados y empoderando al consumidor como agente activo de circularidad. Así, un enfoque holístico que articule tecnologías, políticas y cultura social permitirá convertir los desafíos en palancas de desarrollo sostenible.

5.4. Responsabilidad social en la gestión integral de aceites usados

La gestión de aceites usados se fundamenta hoy en un enfoque de responsabilidad social que reconoce este residuo como un recurso estratégico. Cada litro de aceite empleado puede transformarse en aproximadamente 0,63 litros de lubricante re-refinado, consumiendo apenas un tercio de la energía necesaria para procesar crudo virgen. Esta eficiencia energética y material refuerza los principios de la economía circular, donde el aprovechamiento máximo de los recursos impulsa la sostenibilidad y reduce la huella ambiental de las operaciones industriales.

El marco normativo refuerza este compromiso social y ambiental. Desde la regulación de la EPA en 1992, que prioriza el reciclaje frente a la disposición final, hasta las más recientes actualizaciones en la gestión de residuos peligrosos, las empresas deben cumplir rigurosos estándares en generación, transporte y tratamiento de aceites usados (García-Feijoo et al., 2020). Estas directrices no solo garantizan el respeto al medio ambiente, sino que también promueven la salud pública y la seguridad laboral, favoreciendo una cultura corporativa orientada a la transparencia y la rendición de cuentas (Chen et al., 2024).

Por lo tanto, el impacto de una gestión responsable de aceites usados trasciende

lo ambiental y fortalece el tejido social. Al aumentar las tasas de recolección y la aplicación de procesos de re-refinación, se disminuirían significativamente los vertidos que contaminan suelos y aguas, mejorando la calidad de vida de las comunidades (Tura et al., 2019). Estudios de caso demuestran que el etiquetado ecológico de lubricantes y el uso de biolubricantes no solo mitigan riesgos ambientales, sino que también generan confianza entre las partes interesadas (UNEP, 2015). Involucrar a proveedores, clientes y entidades gubernamentales en estas iniciativas impulsaría la participación ciudadana y consolidaría la reputación de las empresas como agentes de cambio responsable.

6. CONCLUSIONES

Este estudio, basado en una revisión sistemática bajo los lineamientos PRISMA 2020, analizó 872 publicaciones científicas en bases de datos multidisciplinarias, seleccionando 24 investigaciones de alta rigurosidad metodológica mediante criterios de inclusión estrictos (relevancia temática, calidad empírica y contexto geográfico). La metodología permitió identificar patrones globales y divergencias regionales en la gestión de aceites lubricantes usados, destacando tres contribuciones clave: (1) la eficacia probada de tecnologías como el hidroprocesamiento y métodos híbridos para lograr una re-refinación competitiva con productos vírgenes; (2) el impacto positivo de marcos regulatorios integrados en la adopción de modelos circulares; y (3) las brechas críticas en países en desarrollo, como Bolivia, donde la falta de normativas específicas y financiamiento limita su implementación. Estos hallazgos ofrecen una base empírica sólida para diseñar políticas públicas basadas en evidencia y alineadas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 3, 6, 12 y 13).

Asimismo, los resultados subrayan que la armonización regulatoria internacional y la inversión en tecnologías escalables son pilares para superar barreras multidimensionales. Por un lado, políticas como los sistemas de trazabilidad digital y los incentivos fiscales para PYMEs, podrían replicarse en regiones con marcos débiles, adaptándose a realidades locales mediante alianzas público-privadas. El estudio demuestra que tecnologías emergentes, como la destilación al vacío acoplada a pirólisis, reducen el consumo energético frente al refinado convencional, justificando su inclusión en agendas de innovación industrial. No obstante, se identificaron limitaciones, como el sesgo geográfico hacia estudios de países

desarrollados y la escasa literatura cuantitativa sobre costos de implementación, lo que sugiere la necesidad de ampliar la investigación empírica en economías emergentes.

Finalmente, este trabajo aporta un marco estratégico para la transición circular, estructurado en tres ejes: (1) gobernanza colaborativa, mediante la creación de comités multisectoriales que integren reguladores, industria y academia; (2) financiamiento verde, con mecanismos como bonos de carbono o fondos rotatorios para infraestructura de re-refinación; y (3) educación ciudadana, mediante campañas que vinculen el reciclaje de aceites usados con beneficios tangibles en salud pública. Estas recomendaciones, respaldadas por datos comparativos y análisis de brechas de conocimiento, no solo responden a la urgencia ambiental de reducir la contaminación por hidrocarburos, sino que también ofrecen una hoja de ruta para equilibrar competitividad económica y sostenibilidad.

7. RECOMENDACIONES, DISCUSION FINAL Y DIRECCIONES FUTURAS

La transición hacia una economía circular en la gestión de aceites lubricantes usados demanda una agenda de investigación interdisciplinaria que integre dimensiones técnicas, socioeconómicas y regulatorias. En consecuencia, las futuras líneas de investigación deben priorizar evaluaciones empíricas rigurosas, midiendo variables como eficiencia energética, huella de carbono y retorno económico de tecnologías emergentes, para fundamentar decisiones basadas en evidencia. Asimismo, es imperativo desarrollar indicadores de circularidad sectoriales, como un Índice de Circularidad para Aceites Usados (C-AU), que monitoree avances en recolección, eficiencia tecnológica y reducción de impactos ambientales, adaptando marcos internacionales a contextos regionales.

Las PYMEs son actores clave en esta transición, especialmente en países en desarrollo, donde su flexibilidad e innovación pueden impulsar modelos circulares descentralizados. Sin embargo, su potencial se ve limitado por brechas técnicas y financieras. Programas de capacitación práctica en sostenibilidad, ecodiseño y gestión de residuos, junto con incentivos fiscales y acceso a fondos verdes, son esenciales para empoderar a estas empresas. Paralelamente, todos los esfuerzos deben vincularse explícitamente con los ODS, particularmente ODS 9 (industria innovadora), ODS 12 (producción responsable) y ODS 13 (acción climática),

promoviendo sinergias entre innovación tecnológica y equidad social en regiones con recursos críticos, como es el caso de América Latina y África.

Finalmente, se requiere un marco de políticas públicas integrado que combine la REP, con sistemas de trazabilidad digital y gobernanza colaborativa. Esto implica fortalecer infraestructuras de datos para monitoreo ambiental, fomentar alianzas público-privadas y diseñar mecanismos que incentiven la adopción de tecnologías escalables. En síntesis, las direcciones futuras deben orientarse a consolidar un ecosistema circular robusto y adaptativo, capaz de articular tecnologías emergentes, actores institucionales y compromisos sociales en una visión compartida de sostenibilidad e innovación.

8. REFERENCIAS

- Abas, A., Er, A. C., Tambi, N., & Yusoff, N. H. (2022). A systematic review on sustainable agricultural practices among oil palm farmers. *Outlook on Agriculture*, 51(2), 155–163. <https://doi.org/10.1177/00307270211021875>;PAGE:STRING:ARTICLE/CHAPTER
- Alizadeh, A. (2022). The Drivers and Barriers of Corporate Social Responsibility: A Comparison of the MENA Region and Western Countries. *Sustainability* 2022, Vol. 14, Page 909, 14(2), 909. <https://doi.org/10.3390/SU14020909>
- Bamford, B. (2024). Innovations In Used Oil Recycling: Pioneering Technologies. *Benzoil*. <https://benzoil.com.au/innovations-in-used-oil-recycling-pioneering-technologies/>
- Bharti, V., Obaideen, K., Azahari, D. H., & Amalia, R. (2024). Contribution of palm oil and soybean oil to sustainable development goals. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1379(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1379/1/012039>
- Cabrera-Escobar, C., Moreno-Gutiérrez, J., Rodríguez-Moreno, R., Pájaro-Velázquez, E., Calderay-Cayetano, F., & Durán-Grados, V. (2025). A Review on Global Recovery Policy of Used Lubricating Oils and Their Effects on the Environment and Circular Economy. *Environments* 2025, Vol. 12, Page 135, 12(5), 135. <https://doi.org/10.3390/ENVIRONMENTS12050135>
- Chen, G., Lim, M. K., Yeo, W. M., & Tseng, M. L. (2024). Net zero vs. carbon neutrality: supply chain management challenges and future research agenda. *International Journal of Logistics Research and Applications*. <https://doi.org/10.1080/13675567.2024.2359058>;JOURNAL:JOURNAL:C-

JOL20;REQUESTEDJOURNAL:JOURNAL:CJOL20;WGROUP:STRING:PUBLICACION

- DNR. (2025). Used Oil | Missouri Department of Natural Resources. Missouri Department of Natural Resources. <https://dnr.mo.gov/waste-recycling/reduce-reuse-recycle/what-to-do-with-specific/used-oil>
- Energy Sustainability. (2025). Circular Lubricant Economy. Energy Sustainability. <https://energy.sustainability-directory.com/term/circular-lubricant-economy/>
- Fazzo, L., Minichilli, F., Santoro, M., Ceccarini, A., Della Seta, M., Bianchi, F., Comba, P., & Martuzzi, M. (2017). Hazardous waste and health impact: A systematic review of the scientific literature. *Environmental Health: A Global Access Science Source*, 16(1), 1–11. <https://doi.org/10.1186/S12940-017-0311-8/FIGURES/1>
- Feor, L., Clarke, A., & Dougherty, I. (2023). Social Impact Measurement: A Systematic Literature Review and Future Research Directions. *World 2023*, Vol. 4, Pages 816-837, 4(4), 816–837. <https://doi.org/10.3390/WORLD4040051>
- Flores, R. (2001). Gestión Integral del Aceite Usado: Diagnóstico. In SSHH (1st ed.). Superintendencia de Hidrocarburos. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.27249189.v1>
- García-Feijoo, M., Eizaguirre, A., & Rica-Aspiunza, A. (2020). Systematic Review of Sustainable-Development-Goal Deployment in Business Schools. *Sustainability 2020*, Vol. 12, Page 440, 12(1), 440. <https://doi.org/10.3390/SU12010440>
- Kamra, J., Prakash Mani, A., Sharma, M., & Joshi, S. (2024). The Nexus between Green Supply Chain Management and Sustainability Performance in the Past Decade. *Sustainability 2024*, Vol. 16, Page 7474, 16(17), 7474. <https://doi.org/10.3390/SU16177474>
- Hussain, A. J., Al-Khafaji, Z. S., & Al Saffar, I. Q. (2024). New recycling method of lubricant oil and the effect on the viscosity and viscous shear as an environmentally friendly. *Open Engineering*, 14(1). https://doi.org/10.1515/ENG-2022-0521/ASSET/GRAPHIC/J_ENG-2022-0521_FIG_009.JPG
- Kumar Dubey, D. (2024). The study of the effects of improper hazardous waste disposal on ecosystems. *Indian Journal of Science*, 4(4), 130.136. https://www.researchgate.net/publication/385241984_THE_STUDY_OF_THE_EFFECTS_OF_IMPROPER_HAZARDOUS_WASTE_DISPOSAL_ON_

ECOSYSTEMS

- Kwarto, F., Nurafiah, N., Suharman, H., & Dahlan, M. (2022). The potential bias for sustainability reporting of global upstream oil and gas companies: a systematic literature review of the evidence. *Management Review Quarterly*, 74(1), 1. <https://doi.org/10.1007/S11301-022-00292-7>
- Kwarto, F., Nurafiah, N., Suharman, H., & Dahlan, M. (2024). The potential bias for sustainability reporting of global upstream oil and gas companies: a systematic literature review of the evidence. *Management Review Quarterly*, 74(1), 35–64. <https://doi.org/10.1007/S11301-022-00292-7/METRICS>
- Mannu, A., Almendras Flores, P., Briatico Vangosa, F., Di Pietro, M. E., & Mele, A. (2025). Sustainable production of raw materials from waste cooking oils. *RSC Sustainability*, 3(1), 300–310. <https://doi.org/10.1039/D4SU00372A>
- Masafee. (2025). Lubricant recycling and re-refining A key element in a circular economy. Masafee. <https://www.masafee-eg.com/lubricant-recycling-and-re-refining-a-key-element-in-a-circular-economy>
- Moses, K. K., Aliyu, A., Hamza, A., & Mohammed-Dabo, I. A. (2023). Recycling of waste lubricating oil: A review of the recycling technologies with a focus on catalytic cracking, techno-economic and life cycle assessments. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(6), 111273. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2023.111273>
- Nyiba, B. (2022). Recycling hazardous used oil responsibly is essential to protect our environment. The ROSE Foundation. <https://www.linkedin.com/pulse/recycling-hazardous-used-oil-responsibly-essential-protect->
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372. <https://doi.org/10.1136/BMJ.N71>
- Papamichael, I., Economou, F., Voukkali, I., Loizia, P., Stylianou, M., Naddeo, V., & Zorpas, A. A. (2025). A metaverse framework for sustainable waste management considering circular economy. *Chemical Engineering Journal*, 512, 162283. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2025.162283>
- Parekh, K., Gaur, R., & Shahabuddin, S. (2022). Recent Advances in Reclamation

- of Used Lubricant Oil. In Springer (Ed.), *Tailored Functional Materials* (Vol. 15, pp. 273–282). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-981-19-2572-6_21
- PetroNaft. (2025). Re-Refined Base Oils: The Circular Economy Of Lubricant Production. PetroNaft Research Team. <https://www.petronaftco.com/re-refined-base-oils/>
- Repsol. (2025). Recycling oils to create more sustainable lubricants | Repsol. Repsol. <https://www.repsol.com/en/sustainability/sustainability-pillars/environment/circular-economy/our-projects/lubricants/index.cshtml>
- SBN. (2025). What are the barriers to achieving a waste-free environment? SBN Software. <https://sbnsoftware.com/blog/what-are-the-barriers-to-achieving-a-waste-free-environment/>
- Spina, D., Carbone, R., Pulvirenti, A., Rizzo, M., D'Amico, M., & Di Vita, G. (2024). What Gets Measured Gets Managed-Circular Economy Indicators for the Valorization of By-Products in the Olive Oil Supply Chain: A Systematic Review. *Agronomy* 2024, Vol. 14, Page 2879, 14(12), 2879. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY14122879>
- STLE. (2025). How re-refined oils could contribute to the circular economy of the future. Society of Tribologist and Lubrication Engineers. https://www.stle.org/files/TLTArchives/2021/08_August/Feature.aspx
- Tura, N., Hanski, J., Ahola, T., Stähle, M., Piiparinen, S., & Valkokari, P. (2019). Unlocking circular business: A framework of barriers and drivers. *Journal of Cleaner Production*, 212, 90–98. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.11.202>
- UNEP. (2015). Guidelines for environmentally sound management of used oils in the Mediterranean. UN Environment Programme. <https://www.unep.org/resources/report/guidelines-environmentally-sound-management-used-oils-mediterranean>
- US EPA. (2025). Managing Used Oil: Answers to Frequent Questions for Businesses. United States Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/hw/managing-used-oil-answers-frequent-questions-businesses>
- Vaaland, T. I., & Heide, M. (2008). Managing corporate social responsibility: Lessons from the oil industry. *Corporate Communications*, 13(2), 212–225. <https://doi.org/10.1108/13563280810869622>

- Valicor. (2025). Transforming Used Oil into a Heavy Manufacturing. Valicor Environmental Services. <https://www.valicor.com/blog/transforming-used-oil>
- Wagner Da Silva, M. (2020). The Circular Economy in the Downstream Industry – Used Lubricating Oils Recycling. LinkedIn. <https://www.linkedin.com/pulse/circular-economy-downstream-industry-used-lubricating-da-silva-mba>
- Yildizbasi, A., Celik, S. E., Arioz, Y., Chen, Z., Sun, L., & Ozturk, C. (2025). Exploring the synergy between circular economy and emerging technologies for transportation infrastructure: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 486, 144553. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2024.144553>

<https://doi.org/10.53287/snyn9679od87t>

EVOLUCIÓN DEL ECOSISTEMA EMPRENDEDOR Y DE INNOVACIÓN EMPRENDEDOR DE LA UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS: DEL HUB DE INNOVACIÓN INNOVATEC HACIA LA CONSTRUCCIÓN DEL PARQUE DE INNOVACIÓN TECNOLÓGICO SAN ANDRÉS (PITSA)

Jorge Velasco Tudela

ORCID: 0000-0002-91934823

jvelasco@umsa.bo

Brain Rene Quispe Sanga

Estudiante Tesista

RESUMEN

Este artículo examina la evolución y maduración del ecosistema de innovación en la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA) a lo largo de más de dos décadas, argumentando que su desarrollo sistemático justifica el establecimiento de un Parque Científico y Tecnológico (PCT) físico como el próximo hito estratégico. El estudio sigue una metodología de estudio de caso longitudinal basada en documentación institucional y teoría académica establecida sobre parques científicos y tecnológicos. Los hallazgos revelan una trayectoria de crecimiento orgánico que comienza con el fomento de una cultura emprendedora y culmina con la implementación de infraestructura física avanzada como el laboratorio de fabricación K-Lab, junto con la creación del parque virtual de innovación PITSAv. El artículo concluye que el éxito a largo plazo del próximo Parque Científico y Tecnológico de San Andrés (PITSA) dependerá de la adopción de un modelo de gobernanza autónomo y una estrategia de sostenibilidad financiera diversificada capaz de abordar los desafíos inherentes a la gestión de las infraestructuras de innovación a lo largo del tiempo.

Palabras Claves: Parque Científico y Tecnológico, PITSA, PITSAv, Ecosistemas de Innovación.

ABSTRACT

This article examines the evolution and maturation of the innovation ecosystem at the Universidad Mayor de San Andrés (UMSA) over more than two decades, arguing that its systematic development justifies the establishment of a physical Science and Technology Park (STP) as the next strategic milestone. The study follows a longitudinal case study methodology based on institutional documentation and established academic theory on science and technology parks. Findings reveal an organic growth trajectory that begins with fostering an entrepreneurial culture and culminates in the implementation of advanced physical infrastructure such as the K-Lab fabrication laboratory, alongside the creation of the virtual innovation park PITSAv. The article concludes that the long-term success of the forthcoming San Andrés Science and Technology Park (PITSA) will depend on adopting an autonomous governance model and a diversified financial sustainability strategy capable of addressing the inherent challenges of managing innovation infrastructures over time.

Keywords: Science and Technology Park, PITSA, PITSAv, Innovation Ecosystems.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad donde la economía se basa en el conocimiento, el rol de la universidad ha experimentado una transformación. Superando sus misiones tradicionales de docencia e investigación, las instituciones se han consolidado en motores del desarrollo económico y social. Esto generó que la universidad este activamente participando en la transferencia de conocimiento y tecnología, convirtiéndose en un actor clave para la creación de ventajas competitivas en el ámbito empresarial y público.

Los Parques Científicos y Tecnológicos (PCT) se establecen como uno de los instrumentos más comunes para la transferencia de conocimiento y tecnología entre centros de investigación y empresas. (Rodríguez-Pose, 2012)

La Universidad Mayor de San Andrés (UMSA) se presenta como un caso de estudio relevante debido a la serie de proyectos y ambientes de innovación que se implementaron constituyendo una evolución institucional coherente y sostenida a lo largo de más de 20 años. Iniciando con el fomento de la cultura emprendedora hasta el desarrollo de infraestructura de innovación.

El artículo pretende mostrar el desarrollo sostenido del ecosistema innovador y el desarrollo de la madurez de la infraestructura de innovación que justifica la transición hacia un Parque Científico Tecnológico Físico. Esta nueva etapa es fundamental para consolidar los logros alcanzados y desarrollar un ecosistema de innovación moderno donde los distintos actores se vean beneficiados con el desarrollo del Parque Científico Tecnológico Físico.

2. ANTECEDENTES

Creación del Centro de Innovación y Desarrollo Empresarial (CIDE)

Desde 2003, el Instituto de Investigaciones Industriales de la Umsa ha liderado la creación de un ecosistema de innovación. Este espacio ha incubado a más de 50 startups, otorgando más de \$150.000 en capital semilla, movilizándolo a más de 10.000 proyectos académicos (INGNOVATEC Programa Rectoral, 2023)

Creación del Hub de Innovación

En 2018, se creó el Hub de Innovación en el Instituto de Investigaciones Industriales que posteriormente, mediante Resolución Facultativa 196/2019 este ecosistema evolucionó en el Hub de Innovación de la Facultad de Ingeniería, y posteriormente mediante Resolución Universitaria 400/2021 se convierte en el Hub de Innovación Universitaria de la UMSA como un Programa Rectoral entre 2020 y 2023

Creación del Primer Laboratorio de Fabricación de la UMSA denominado K-Lab

En abril de 2023, se inició el contacto con la Cooperación Coreana para conocer la disponibilidad para financiar la construcción del Parque de Innovación Tecnológico San Andrés (PITSA), durante el proceso la contraparte expresó su interés por iniciar relaciones de cooperación con la UMSA, a través de la instalación de un Laboratorio de Fabricación. El proyecto se concretó mediante convenio firmado en septiembre por el Rector y el Representante de NIPA comprometiendo recursos por 2.5 millones de dólares que incluyen los costos de equipamiento y remodelación desembolsados en 5 años. El "Primer Laboratorio de Fabricación de la UMSA denominado K-Lab" fue inaugurado el 30 de julio de 2024 diseñado para crear innovar y colaborar con el ecosistema emprendedor que se había ido construyendo de manera orgánica en más de dos décadas en la Facultad de Ingeniería y en la UMSA.

3. DESARROLLO

3.1. Definición y Funciones de un Parque Científico Tecnológico

La Asociación Internacional de Parques Científicos y Áreas de Innovación (IASP) define formalmente un PCT como:

“Una organización gestionada por profesionales especializados, cuyo objetivo principal es incrementar la riqueza de su comunidad promoviendo la cultura de la innovación y la competitividad de sus empresas asociadas e instituciones basadas en el conocimiento” (Sanz Irlles, 2011)

Lo que nos indica que la organización tiene una misión activa de fomentar la innovación.

Las funciones principales de un Parque Científico Tecnológico (PCT) son las siguientes:

- **Fomentar Sinergias (Modelo de la Triple Hélice):** Los PCT son el espacio por excelencia donde se materializa la interacción entre la universidad (generadora de conocimiento), la industria (aplicadora de conocimiento y demandante de soluciones) y el gobierno (facilitador y regulador). Este modelo de la Triple Hélice es fundamental para crear un sistema de innovación dinámico y alineado con las necesidades del desarrollo regional.
- **Facilitar la Transferencia de Tecnología:** Actúan como intermediarios para que los resultados de la investigación universitaria se transfieran al sector productivo, ya sea a través de licenciamiento de patentes, proyectos de I+D colaborativos o la creación de empresas spin-off.
- **Proveer Incubación y Aceleración de Empresas:** Ofrecen un entorno protegido y servicios de alto valor agregado (mentoría, acceso a financiación, espacio físico, redes de contacto) para la creación y el crecimiento de nuevas empresas innovadoras, especialmente startups y spin-offs de base tecnológica.
- **Catalizar el Desarrollo Económico Regional:** Al atraer talento, fomentar la creación de empresas de base tecnológica y generar empleos cualificados, los PCT se convierten en catalizadores del desarrollo económico local y regional, mejorando la competitividad del territorio.

3.2. Factores Críticos de Éxito y Modelos de Gobernanza

La literatura especializada ha identificado una serie de factores críticos que determinan el éxito y la sostenibilidad de un PCT:

- **Compromiso Político Sostenido:** El apoyo explícito y a lo largo plazo de los gobiernos a nivel nacional y local es indispensable, no solo en términos de financiación, sino también de marcos regulatorios favorables.
- **Vínculos Formales con Universidades:** Una relación operativa y estratégica con una o más universidades o centros de investigación es la piedra angular de un PCT, garantizando el flujo de conocimiento y talento.
- **Localización Estratégica e Infraestructura de Calidad:** La ubicación geográfica, el acceso a vías de comunicación y la calidad de las instalaciones y servicios son factores clave para atraer a empresas y talento.
- **Financiamiento Diversificado a Largo Plazo:** La dependencia de una única fuente de financiación es un riesgo significativo. Los modelos exitosos combinan fondos públicos, ingresos por alquileres y servicios, e inversión privada.
- **Entidad Gestora Profesional y Autónoma:** La gestión del parque debe estar a cargo de un equipo profesional con autonomía respecto a las burocracias universitarias o gubernamentales, lo que permite una toma de decisiones ágil y orientada al mercado

Los modelos de gobernanza varían, y el promotor principal suele definir el carácter del parque. Existen parques promovidos principalmente por gobiernos regionales, por universidades o por consorcios público-privados. Cada modelo tiene implicaciones distintas para la estrategia y los objetivos del parque, siendo los modelos mixtos lo que a menudo demuestran una mayor resiliencia y capacidad para alinear los intereses de todos los actores

3.3. La Transición de Ecosistemas Virtuales a Físicos

En la era digital, ha surgido el fenómeno de los parques y plataformas de innovación virtuales. Estos ecosistemas digitales pueden actuar como precursores o complementos de los parques físicos, ofreciendo ventajas significativas. Un parque virtual permite construir y consolidar una comunidad de innovadores, validar la

demanda de servicios de apoyo y establecer una marca y una red de contactos con un inversión inicial considerablemente menor a la requerida para la infraestructura física.

La implementación estratégica de un parque virtual antes de la construcción de uno físico representa un enfoque moderno y prudente para el desarrollo de PCT. Este modelo, que podría describirse como “comunidad primero, infraestructura después”, permite mitigar los altos riesgos financieros asociados a los grandes proyectos mobiliarios. Al construir primero una comunidad digital activa y comprometida, se asegura que la infraestructura física futura responda a una demanda real y existente, en lugar de ser construida con la esperanza especulativa de atraer a usuarios. La existencia del Parque de Innovación Tecnológica San Andrés Virtual (PITSAv) en la UMSA posiciona su estrategia como una práctica avanzada, que aprovecha las herramientas digitales para deriesgar y optimizar la transición hacia un parque físico.

4. METODOLOGÍA: ANÁLISIS DE CASO DEL ECOSISTEMA DE INNOVACIÓN

El presente estudio se basa en una metodología de investigación cualitativa, configurada como un estudio de caso único y longitudinal. Este enfoque permite un análisis profundo y contextualizado de la evolución del ecosistema de innovación de la UMSA a lo largo del tiempo. La base empírica del análisis se constituye a partir de una revisión documental exhaustiva de fuentes primarias, incluyendo informes institucionales, descripciones de programas, resoluciones universitarias y artículos publicados por la propia universidad y sus miembros.

Para la interpretación y contextualización de estos datos primarios, se ha realizado una revisión sistemática de la literatura académica secundaria sobre sistemas de innovación, emprendimiento universitario y, específicamente sobre la teoría y practica de los Parques Científicos y Tecnológicos. Este marco teórico se enriquece con el análisis de estudios de caso internacionales, con un enfoque particular en experiencias relevantes de América Latina, para establecer puntos de referencia y extraer lecciones aplicables al contexto boliviano. La triangulación de las fuentes primarias institucionales con el marco teórico y los casos de referencia permite construir una narrativa analítica robusta sobre la génesis, maduración y futuro estratégico del ecosistema de innovación de la UMSA.

5. ANALISIS Y EVALUACIÓN DE RESULTADOS

El análisis documental revela una evolución sistemática y por fases del ecosistema de innovación de la UMSA, que se extiende por más de dos décadas. Este proceso se caracteriza por una construcción gradual de capacidades, una creciente institucionalización y una transición estratégica hacia la infraestructura física y digital.

Años	Hito	Descripción
2003	Creación del CIDE	Se establece el Centro de Innovación y Desarrollo Empresarial en el Instituto de Investigaciones Industriales, actuando como la incubadora fundacional del ecosistema
2008	Cátedra IGI – 645	La materia de “Innovación Empresarial” se consolida como el pilar académico para la formación de competencias emprendedoras en estudiantes de ingeniería.
2006	Concurso Innova San Andrés	Se realizan 7 versiones del concurso, convirtiéndose en la principal plataforma para la identificación y validación de ideas y proyectos de base tecnológica en la universidad
2019	Creación del Hub de Innovación Facultativo	Mediante la Resolución Facultativa 196/2019, se formaliza el Hub de Innovación para todas la Facultad de ingeniería, integrando las iniciativas existentes.
2021	Creación del Hub de Innovación Universitario	La Resolución Universitaria 400/2021 eleva al Hub a un Programa Rectoral, dándole un mandato y alcance para toda la UMSA.
2022 – 2023	Creación del PITSAv	Se lanza el parque de innovación Tecnológica San Andrés Virtual, la primera infraestructura digital del ecosistema para conectar a sus actores.
2023 – 2024	Implementación del K-Lab	Se diseña e inaugura el laboratorio de fabricación digital K-Lab, con el apoyo de la Cooperación Coreana, representando la primera gran inversión en infraestructura física compartida.
2025	Programa DeepTech Bicentenario	Se lanza un programa interuniversitario enfocado en DeepTech, marcando una orientación estratégica hacia tecnologías de frontera y preparando el terreno para el PCT físico.

5.1. Cultura Emprendedora (2003 - 2018)

El origen del ecosistema de la UMSA es desde el 2003 que surgió en la Facultad de Ingeniería. Esta fase inicial se centró en la construcción del ecosistema emprendedor que consta de: capital humano, la mentalidad emprendedora y las redes comunitarias.

Tres pilares fundamentales sostuvieron esta etapa:

- El Centro de Innovación y Desarrollo Empresarial (CIDE): Creado en el instituto de Investigaciones Industriales, el CIDE funcionó como la incubadora de empresas del ecosistema, proporcionando el primer apoyo estructurado a ideas emergentes.
- La Cátedra de Innovación Empresarial (IGI – 645): Esta asignatura se convirtió en el principal vehículo académico para formar a miles de estudiantes en creatividad, modelos de negocio y gestión de la innovación, sembrando sistemáticamente las competencias emprendedoras en la base estudiantil
- El Concurso Innova San Andrés: A lo largo de sus múltiples versiones, este concurso se consolidó como el mecanismo central para generación y validación de ideas. Actuó como un gran embudo que canalizó la creatividad de toda la comunidad universitaria, permitiendo identificar los proyectos con mayor potencial.

El impacto acumulado de esta fase es notable. La formación de más de 12.000 estudiantes y la evaluación de más de 10.000 propuestas demuestran la escala y la sistematicidad del proceso. Los resultados posteriores, como la creación de startups y empleos, no fueron un producto del azar, sino la consecuencia directa de un sistema bien diseñado y ejecutado durante más de dos décadas para cultivar la innovación desde su base.

5.2. La Institucionalización y Expansión

A partir del 2018, el ecosistema entró en una nueva fase de formalización y expansión. La creación del Hub de Innovación marco un punto de inflexión, al integrar las iniciativas preexistentes bajo una estructura formal y con un mandato estratégico claro. La evolución del Hub fue progresiva: primero se consolidó a nivel de la Facultad de Ingeniería mediante la resolución Facultativa 196/2019,

y posteriormente, en un paso de gran importancia estratégica, fue elevado a la categoría del Programa Rectoral para toda la universidad a través de la resolución universitaria 400/2021.

Esta institucionalización desde el más alto nivel de la UMSA otorgó al ecosistema una mayor legitimidad, un acceso más estable a recursos y un mandato para operar a escala universitaria. Durante esta fase, el Hub también se enfocó en la construcción de alianzas estratégicas externas, estableciendo convenios con actores clave del sector productivo como la Cámara Nacional de Industrias (CNI) y la CAINCO, así como con entidades gubernamentales y organismos de cooperación internacional.

5.3. Avance a infraestructura digital

Los años más recientes han sido testigos de los desarrollos más transformadores, con la transición del ecosistema hacia una infraestructura híbrida que combina lo digital con lo físico.

- El Parque Virtual (PITSAv): El lanzamiento del Parque de Innovación Tecnológica San Andrés Virtual fue un primer paso estratégico hacia la infraestructura de un parque. El PITSAv funciona como una “puerta de entrada” digital al ecosistema, una plataforma de colaboración y un espacio para visibilizar los proyectos y capacidades de la comunidad UMSA.
- El Laboratorio de Fabricación (K-Lab): La implementación del K-Lab representa la primera inversión significativa en infraestructura física de I + D compartida y un caso de estudio en sí mismo sobre la capacidad de ejecución de la UMSA. El proyecto se originó en 2023 a partir del contacto del Hub de Innovación con la Cooperación Coreana, culminando en un convenio con la Agencia Nacional de Promoción de la Industria de TI (NIPA) por un monto aproximado de 2.5 millones de dólares a ser ejecutado en 5 años. El proceso de implementación fue meticuloso, incluyendo encuestas de necesidades, visitas de referencia a Fab Labs internacionales como el de la Universidad de Chile, y un proceso de diseño participativo para definir el equipamiento (impresoras 3D, cortadoras láser, fresadoras CNC) más adecuado a la realidad local. Inaugurando en agosto de 2024, el K-Lab tiene el objetivo estratégico de fomentar una “cultura maker” y habilitar el prototipado rápido para estudiantes y emprendedores.

Este proyecto es un punto de prueba crítico para el ecosistema. Demuestra la capacidad de la UMSA para atraer financiamiento internacional significativo, gestionar un proyecto de infraestructura complejo e integrar tecnología avanzada en su oferta de servicios. Sin embargo, el hecho de que su financiamiento esté garantizado por un periodo de cinco años (hasta 2028) introduce explícitamente el principal desafío que enfrenta el ecosistema en un conjunto: la sostenibilidad a largo plazo. El K-Lab encapsula así tanto la mayor fortaleza del ecosistema (su capacidad de ejecución) como su riesgo más significativo a futuro (la dependencia de financiamiento de proyecto con plazos definidos), sirviendo como un perfecto punto de pivote hacia la discusión sobre la necesidad de un modelo sostenible para el futuro parque físico.

5.4. Impacto Cuantificable

El impacto acumulado del ecosistema a lo largo de dos décadas es sustancial y cuantificable, lo que refuerza el argumento de su madurez y éxito

Indicador	Métrica
Formación de Capital Humano	>12.000 estudiantes y emprendedores formados en innovación
Generación de Ideas	> 10.000 iniciativas y propuestas evaluadas
Financiamiento Inicial	\$us 250.000 otorgados en capital semilla
Creación de Empresas	50 startups de base tecnológica creadas
Generación de Empleo	>1.000 empleos directos generados

La proyección estratégica actual del ecosistema se materializa en el programa “Deep Tech 2025”. Esta iniciativa interuniversitaria, en alianza con otras importantes universidades del país, marca una clara orientación hacia tecnologías de frontera DeepTech, priorizando áreas como Inteligencia Artificial, Bioingeniería, Robótica, Energías Limpias y Salud (Ver Memoria DeepTech en página web del Hub de Innovación). Este enfoque en tecnologías complejas que requieren investigación intensiva y laboratorios especializados subraya la creciente necesidad de una infraestructura más avanzada, como la que ofrecería un parque físico, para poder apoyar adecuadamente el desarrollo y escalamiento de este tipo de emprendimientos.

6. DISCUSIÓN

La transición de la descripción de los logros pasados al análisis de la estrategia futura nos lleva a la discusión central de este artículo: la necesidad y viabilidad de la creación del Parque Científico Tecnológico San Andrés (PITSA) físico. Esta sección sintetiza los resultados del caso de estudio con el marco teórico para construir un argumento sólido en favor de este salto evolutivo.

6.1. Justificación del Salto a PITSA Físico

El ecosistema de innovación de la UMSA ha alcanzado una masa crítica que hace que la creación de un parque físico no sea solo una oportunidad, sino una necesidad para su sostenibilidad y crecimiento futuro. El alto volumen de ideas generadas y evaluadas, el número de startups exitosas que han surgido y el giro estratégico hacia el DeepTech crean una demanda tangible de infraestructura que el modelo actual, basado en programas y espacios dispersos, ya no puede satisfacer plenamente.

Un parque físico centralizado es necesario para:

- Retener y Escalar el Talento y las Empresas: Un PCT ofrece el espacio de calidad y los laboratorios especializados que las startups de base tecnológica necesitan para crecer. Sin esta infraestructura, existe el riesgo de que las empresas más prometedoras se estanquen o migren a otros ecosistemas que si ofrezcan estas condiciones.
- Atraer Inversión y Empresas Externas: Un parque físico es una señal clara para el mercado y los inversores, posicionando a la región como un polo de innovación serio. Además, permite atraer a empresas de tecnología consolidadas que deseen instalar centros de I+D en proximidad a la fuente de talento e investigación que es la universidad
- Fomentar la Colisión Creativa: Aunque las plataformas virtuales son eficientes, la innovación disruptiva a menudo surge de interacciones informales y no planificadas. Un espacio físico compartido maximiza las oportunidades de “colisión creativa” entre investigadores, emprendedores, estudiantes e industriales, catalizando la colaboración y la generación de nuevas ideas.

6.2. Lecciones de Casos de Éxito en América Latina para el Diseño de PITSA

El diseño de PITSA no debe partir de cero, sino que puede y debe aprender de las

experiencias de otros parques exitosos en la región. Un análisis comparativo de modelos de referencia ofrece lecciones valiosas.

Características	Parque de Investigación e Innovación Tecnológica (PIIT) – Monterrey, México	Centro de Innovación UC Anacleto Angelini – Santiago, Chile	Porto Digital – Recife, Brasil
Modelo de Gobernanza	Fuerte modelo de Triple Hélice (Gobierno, Tec de Monterrey, Empresas) con un fideicomiso gestor.	Impulsado por la universidad (Pontificia Universidad Católica) con un fuerte enfoque en la vinculación con la industria.	Consorcio público-privado con un fuerte rol del gobierno estatal y municipal, gestionado por una Organización Social.
Especialización Temática	DeepTech y manufactura avanzada (Biotecnología, Mecatrónica, Nanotecnología, TIC)	Agnóstico en sector, pero enfocado en “innovación abierta”, conectando desafíos corporativos con capacidades universitarias.	Tecnologías de la información y Comunicación (TIC) y Economía Creativa.
Propuesta de Valor Única	Concentración de centros de I+D de grandes corporaciones junto a la universidad	Funciona como un “hub de innovación” que ofrece servicios de alto valor mas allá del espacio físico (consultoría, I+D por contrato)	Integración del clúster tecnológico con la revitalización urbana y social del centro histórico de la ciudad.

De estos casos se despenden lecciones clave para PITSA:

- Del PIIT Monterrey, se debe adoptar la importancia de una gobernanza forma de Triple Hélice desde el inicio y una clara especialización en las áreas de DeepTech ya identificadas por el Hub de Innovación a través del Congreso

Deep Tech para construir una ventaja competitiva reconocible.

- Del Centro de Innovación UC, PITSA debería aspirar a ser más que un arrendador de espacios. Debe consolidarse como un “hub de innovación abierta” que activamente conecte los desafíos del sector productivo boliviano con las capacidades de investigación de la UMSA, ofreciendo servicios de I+D por contrato y consultoría especializada.
- De Porto Digital, se aprende que un PCT puede tener un impacto que trasciende lo económico. PITSA debe ser concebido no como una isla, sino como un proyecto integrado en la ciudad de La Paz. Contribuyendo a su desarrollo urbano, social y cultural, y convirtiéndose en un símbolo de la modernización de la región.

6.3. Abordando los desafíos de Sostenibilidad y Gobernanza para PITSA

La experiencia con el financiamiento a plazo fijo del K-Lab es un advertencia clara: la sostenibilidad financiera y gobernanza eficaz son los desafíos más críticos para el éxito a largo plazo de PITSA. El éxito del parque dependerá menos de la arquitectura de sus edificios y más de la robustez de su modelo de negocio y de gestión.

- **Sostenibilidad Financiera:** Es imperativo diseñar un modelo de financiación diversificado que supere la dependencia de subvenciones a corto plazo. Un modelo sostenible para PITSA debería combinar diversos flujo de ingresos como la prestación de servicios, venta de productos, royalties de startups y spinoffs, etc.
- **Gobernanza:** Siguiendo las mejores practicas internacionales, PITSA debe ser gestionado por una entidad con autonomía jurídica y financiera, separada de la estructura administrativa tradicional de la universidad. Una fundación o una sociedad de economía mixta podría ser un vehículo adecuado. Su consejo directivo debe reflejar la Triple Hélice, incluyendo representantes de alto nivel de la UMSA, del gobierno (municipal y nacional), de las empresas instaladas en el parque, de la Cámara Nacional de Industrias y del sector financiero. Esta autonomía es crucial para una gestión ágil, profesional y orientada a las necesidades del mercado.

7. CONCLUSIONES Y ESTRATEGIA

La revisión longitudinal del desarrollo del ecosistema de innovación de la Universidad Mayor de San Andrés demuestra que la institución ha logrado construir, de manera progresiva y sistemática, un modelo integral que abarca formación de talento, generación de ideas, incubación, infraestructura digital y capacidades de prototipado físico. Este proceso, sostenido durante más de veinte años, constituye la base empírica y estratégica para avanzar hacia la consolidación del Parque Científico Tecnológico San Andrés (PITSA) en su versión física.

El análisis evidencia que la UMSA ha alcanzado un punto de madurez institucional caracterizado por:

1. un volumen significativo de capital humano formado;
2. resultados cuantificables en creación de startups y empleos;
3. la existencia de infraestructura física y digital funcional; y
4. una orientación estratégica hacia áreas de DeepTech.

Estos elementos confirman que el entorno universitario posee la masa crítica necesaria para transitar hacia un PCT que articule investigación, industria y Estado bajo un enfoque de Triple Hélice.

Estrategia a seguir para la consolidación del PITSA

A partir de la evidencia analizada, se propone una estrategia integral en cuatro ejes que orienta la transición hacia un Parque Científico y Tecnológico sostenible, competitivo y alineado con estándares internacionales:

a. Gobernanza Autónoma y Profesionalizada

Crear una entidad gestora con autonomía jurídica y operativa (fundación o sociedad público-privada), regida por un directorio bajo el modelo de Triple Hélice. Esta entidad debe poseer capacidad de decisión ágil, independencia administrativa y enfoque de mercado.

b. Sostenibilidad Financiera Diversificada

Diseñar un modelo económico basado en múltiples fuentes de ingreso: servicios de I+D, membresías, arrendamiento de espacios, consultoría tecnológica, programas

de innovación abierta, royalties, y participación accionaria en startups. Este esquema reducirá riesgos asociados a la dependencia de cooperaciones o subvenciones temporales.

c. Especialización en Tecnologías de Frontera (DeepTech)

Posicionar a PITSA como un nodo nacional en tecnologías complejas y de alta intensidad en conocimiento (IA, robótica, bioingeniería, energías limpias, manufactura avanzada). La especialización constituye una ventaja competitiva frente a otros modelos de innovación del país.

d. Integración Metropolitana y Vinculación con el Sector Productivo

Concebir PITSA como un proyecto articulado con la ciudad de La Paz, capaz de atraer empresas, generar empleo calificado y contribuir al desarrollo económico y urbano. La vinculación activa con industrias, cámaras sectoriales y gobiernos permitirá convertir al parque en un polo de innovación regional.

8. BIBLIOGRAFÍA

INGNOVATEC Programa Rectoral. (2023). Hub de Innovación. La Paz.

Instituto de Investigaciones Industriales - Facultad de Ingeniería UMSA. (2025). Plan de Innovación y emprendimiento del Instituto de Investigaciones Industriales (III). La Paz.

Rodríguez-Pose, A. (2012). Los parques científicos y tecnológicos en América Latina - Un análisis de la situación actual. Banco Interamericano de Desarrollo, 1.

Sanz Irlés, L. (2011). Los Parques Científicos y Tecnológicos: Un concepto y una realidad. Encuentros Multidisciplinarios.

<https://doi.org/10.53287/iydq7868gx43c>

HARINA DE CÁSCARA DE PAPA

Carla Lizett Kaune Sarabia

ORCID: 0000-0002-2589-6734

Ingeniería Industrial, Universidad Mayor de San Andrés

Ksclkaune@umsa.bo

Rosario Mamani Quispe

ORCID: 0009-0005-3129-0535

Ingeniería Industrial, Universidad Mayor de San Andrés

rosariomamaniq@gmail.com

RESUMEN

El proyecto aborda el tema de la seguridad alimentaria y la obtención de harina en base a la cáscara de papa como una alternativa viable para el mercado de la ciudad de La Paz y El Alto. La investigación se justifica por el interés en dar valor agregado a un elemento considerado un desecho agroindustrial y proveer al mercado una opción saludable y nutritiva. El análisis realizado en el laboratorio Seladis verificó el alto aporte nutricional (notablemente en calcio y fibra) y evidenció que el producto es apto para personas con intolerancia al gluten (celíacos). Se realizaron pruebas de aplicación en galletas y hamburguesas con un focus group, obteniéndose resultados satisfactorios en cuanto a sus características organolépticas (sabor, olor, textura).

Palabras clave: Harina de cáscara de papa, celíacos, nutrición, valorización de residuos, *Solanum tuberosum*.

ABSTRACT

The project addresses the issue of food security and the production of flour from potato peelings as a viable alternative for the market in the cities of La Paz and El Alto. The research is justified by the interest in adding value to an element considered

agro-industrial waste and providing the market with a healthy and nutritious option. The analysis carried out in the Seladis laboratory verified the high nutritional content (notably in calcium and fiber) and showed that the product is suitable for people with gluten intolerance (celiacs). Application tests were carried out on cookies and hamburgers with a focus group, obtaining satisfactory results in terms of their organoleptic characteristics (taste, smell, texture).

Keywords: Potato peel flour, celiac disease, nutrition, waste recovery, *Solanum tuberosum*.

1. INTRODUCCIÓN

La papa (*Solanum tuberosum*) es originaria de la región de la Cordillera de los Andes y constituye uno de los cultivos más importantes para la seguridad alimentaria y la economía agrícola de Bolivia. Entre las campañas agrícolas 2005–2006 y 2010–2011, la superficie cultivada alcanzó en promedio 175.000 hectáreas (ha), destacándose el departamento de La Paz como una de las principales zonas productoras del país (MDRyT, 2012, pág. 41).

La superficie cultivada, producción y rendimiento de papa en el departamento de La Paz se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1: Superficie cultivada, producción y rendimiento de papa en el departamento de La Paz

Año	Superficie (Ha)	Producción (Ton)	Rendimiento (Ton/Ha)
2017	54.320	319.729	5,89
2018	54.454	330.991	6,08
2019	51.914	341.918	6,59
2020	54.066	359.681	6,65
2021	54.397	247.419	4,55

Nota. Elaborado a partir de (MDRyT, 2012; INE, 2021; MDRyT, 2021)

A pesar de la importancia de la producción nacional, Bolivia mantiene una participación activa en el comercio internacional de papa. El balance comercial evidencia un mayor volumen de importaciones, principalmente provenientes de Perú, lo que refleja la relevancia económica y estratégica de este cultivo en el mercado nacional.

Tabla 2: Importaciones y exportaciones de papa (miles de dólares estadounidenses y toneladas)

Periodo	Año	Importaciones de papa		Exportaciones de papa	
		Valor (\$us)	Volumen (Ton)	Valor (\$us)	Volumen (Ton)
1	2017	4.203	20.000	148	24,13
2	2018	10.601	10.904	174	28,26
3	2019	12.100	25.114	177	29,45
4	2020	9.657	22.616	174	28,44
5	2021	9.000	17.067	37	167,17

Nota. Elaborado a partir de (IBCE, 2012, pág. 1; Quispe, 2012; Paye Collanque, 2015; IBCE, 2017; Filomeno, 2017; Mamani, 2018; INE, 2017; INE, 2021; El Deber, 2022)

Valor Nutricional de la Cáscara de Papa

En el tubérculo de papa, la mayor concentración de proteínas se localiza en el córtex (zona inmediatamente inferior a la cáscara) y en la médula (zona central). Las principales fracciones proteicas corresponden a albúminas (49 %) y globulinas (26 %), seguidas de prolaminas (4,3 %) y glutelinas (8,3 %) (CONPAPA, 2017).

La cáscara de papa cumple una función protectora de los nutrientes del tubérculo y, adicionalmente, posee propiedades nutricionales relevantes. Contiene polisacáridos estructurales que constituyen fibra dietética, es una fuente importante de potasio y aporta antioxidantes como vitamina C, así como vitaminas hidrosolubles como tiamina, riboflavina y niacina. Asimismo, contiene minerales como calcio, manganeso, zinc y hierro (FM del Sol, 2018).

El contenido lipídico de la papa fresca es bajo (aproximadamente 0,1 %), localizándose principalmente en la cáscara. La fibra dietética representa entre el 1 y 2 % del peso total del tubérculo, mientras que los carbohidratos constituyen cerca del 75 % de la materia seca, principalmente en forma de almidón. La digestibilidad del almidón varía según la temperatura de consumo, disminuyendo cuando la papa es consumida fría. El contenido de azúcares simples es bajo (0,1–0,7 %) en forma de glucosa, fructosa y sacarosa. En cuanto a micronutrientes, la papa contiene vitamina C, vitaminas del complejo B y pequeñas cantidades de vitaminas liposolubles. Durante la cocción se pierde entre un 18 y 24 % de la vitamina C, sin embargo, una

porción de 150 g aún aporta aproximadamente el 40 % del requerimiento diario. Además, es fuente de potasio, especialmente en la cáscara, así como de fósforo, magnesio, hierro y otros minerales (CONPAPA, 2017).

Según el estudio de Johnny César Oliver Cortez (2017), la papa presenta una variabilidad significativa en su contenido nutricional, destacándose los valores de proteína (1,8–17,2 g/100 g base seca), hierro (1,3–6,5 mg/100 g base seca), zinc (1,4–5,8 mg/100 g base seca) y calcio (11,4–196,5 mg/100 g base seca). Asimismo, se reporta variabilidad en el contenido de fibra dietética insoluble (6,3–20,9 g/100 g base seca) y soluble (1,0–6,6 g/100 g base seca) (2017, p. 57).

Las cáscaras de papa tienen varias propiedades beneficiosas que han sido documentadas por diversos autores. Según un estudio de Cieza y Díaz (2018), estas cáscaras son ricas en fibra dietética, lo cual puede contribuir a mejorar la digestión y promover una salud gastrointestinal adecuada. Cerón y López (2013) destacan que las cáscaras de papa también contienen antioxidantes, como flavonoides y fenólicos, que pueden ayudar a combatir el estrés oxidativo y reducir el riesgo de enfermedades crónicas.

La composición proximal de la cáscara de papa se presenta en la Tabla 3.

Tabla 3: Composición proximal de la cáscara de papa

Parámetros	Peso (%)
Humedad	85,06
Carbohidratos Totales	68,7
Azúcares solubles totales	1
Azúcares reductores	0,61
Almidón	1,3
Proteínas	8
Ceniza	6,34

Nota. Elaborado a partir de (Isique & Sing, 2017, p 74)

Justificación de la Investigación

A pesar de su valor nutricional, la cáscara de papa es generalmente considerada un residuo de bajo o nulo valor en la industria alimentaria y en los centros de expendio de alimentos en las ciudades de La Paz y El Alto (Vega, 2020). Esta situación genera una problemática ambiental, así como una pérdida de recursos con potencial

nutricional.

Los residuos de cáscara de papa constituyen una problemática constante en las plantas procesadoras de este tubérculo, lo que impulsa la búsqueda de alternativas funcionales, sostenibles y ambientalmente amigables para su aprovechamiento. Diversos estudios han demostrado que este subproducto, tradicionalmente considerado un desperdicio, puede ser valorizado como ingrediente funcional en el desarrollo de productos alimenticios, incluyendo productos cárnicos (Vega, 2020).

Para estimar la generación de cáscara de papa en las ciudades de La Paz y El Alto, se aplicó una encuesta a industrias de papas fritas y a centros de expendio de alimentos, cuyos resultados se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4: Lista de proveedores de la materia prima (cáscara de papa)

Nombre de la Empresa	Cantidad de Papa Consumida (Kg/Día)	Cantidad de Cáscara de Papa Producida (Kg/Día)
Industria la Casera	317	63
Gud Bay	476	95
Productos Frutillita	317	63
Productos Mi Recreo	317	63
Onkis Nycon S.R.L.	317	63
Juan Iban Estrada Medrano	317	63
Rodolfo Jacinto Flores	317	63
Cáscara de papa producida (Kg/Día)		473

En síntesis, la generación de cáscara de papa como residuo constituye una problemática ambiental y productiva; sin embargo, representa una oportunidad para el desarrollo de ingredientes funcionales de alto valor agregado. La presente investigación tiene como objetivo evaluar el proceso de obtención de harina a partir de cáscara de papa y validar su potencial nutricional, sensorial y tecnológico, contribuyendo al desarrollo de productos destinados al mercado libre de gluten y a la valorización de residuos agroindustriales.

2. METODOLOGÍA (MATERIALES Y MÉTODOS)

La investigación se enmarcó en un paradigma positivista con un enfoque experimental-descriptivo. El procedimiento de obtención de la harina se realizó a

escala piloto.

Materia Prima y Criterios de Calidad

Se utilizó cáscara de papa fresca obtenida de cinco arrobas de papa (aprox. 226.8 kg de papa entera), resultando en una masa inicial de 45,36 kg de cáscara.

Para asegurar la calidad, se aplicaron los siguientes criterios:

Tabla 5: Características requeridas en la materia prima

PROPIEDAD	DESCRIPCIÓN
Estado (Sólido)	La cáscara de papa no debe contener brotes.
Temperatura	Debe ser conservada a temperatura ambiente.
Composición	La cáscara de papa conserva sus propiedades después de ser pelada.
Pureza	No debe contener cáscaras verdes porque puede contener solanina.

Nota. Elaborado en base (Rivera, 2015).

Las operaciones realizadas y los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 6.

Tabla 6: Resumen de operaciones y resultados

Operación	Descripción del Proceso	Masa Inicial (kg)	Pérdida (kg)	Masa Neta (kg)
1. Pesado Inicial	Se obtuvo la cáscara para el estudio. Se perdió masa por impurezas (tierra, etc.).	45,36	0,45	44,91
2. Selección y Desbrote	Extracción de brotes, cáscaras verdes y material en mal estado. (Control de Calidad Crítico)	44,91	4,49	40,42
3. Lavado	Se utilizaron 50 L de agua a temperatura ambiente (20 minutos) para eliminar impurezas restantes.	40,42	0	44,46
4. Secado (Deshidratación)	Secado con energía solar a temperatura ambiente (aproximadamente 7 °C). Tiempo total de secado de 24 horas (distribuido en 3 días, 8 horas/día).	44,46	17,78	26,68
5. Molienda	Se utilizó un molino de martillo (capacidad de 100 kg/h).	26,68	0,53	26,15
6. Envasado	Producto final obtenido.	26,15	0,14	26,01

A partir del Balance Másico (Ilustración 2), el rendimiento del proceso de obtención de harina a partir de la cáscara de papa fue del 57,34 %.

Ilustración 2: Balance Másico



La harina de cáscara de papa presenta un aspecto de polvo fino con una coloración marrón suave, un olor agradable a papa, sabor suave y textura ligera, tal como se observa en la Ilustración 3.

Ilustración 3: Harina de cáscara de papa en el envase sugerido



Para la evaluación de la harina obtenida, se recurrió a un focus group a los que se proporcionó galletas con un reemplazo del 100 y 50% de harina de trigo y hamburguesas con un reemplazo del 100% del pan molido.

En la ilustración 4 se observan las galletas crudas y cocidas con 100% harina de cáscara de papa.

Ilustración 4: Galletas elaboradas con 100% harina de cáscara de papa



Las galletas combinadas con 50% de harina de trigo se presentan en la ilustración 5, se observan crudas y cocidas.

Ilustración 5: Galletas elaboradas con 50% de harina de cáscara de papa y 50% con harina de trigo



En la Ilustración 7 se observan las hamburguesas, reemplazando el pan molido en 100%, para una aplicación salada.

Ilustración 7: Hamburguesa de carne añadida con harina de cáscara de papa



Para la valoración organoléptica del producto terminado, se utilizó el método diferencial semántico con los siguientes parámetros de valoración: (3) muy bueno, (2) bueno, (1) regular, (0) ni bueno ni malo, (-1) malo regularmente, (-2) malo, (-3) muy malo.

Análisis Nutricional (Laboratorio)

Adicionalmente, pero no menos importante, se realizaron las pruebas en Seladis, para la validación de sus propiedades nutricionales, se obtuvieron los siguientes resultados:

3. RESULTADOS

Características de la Harina Obtenida

La harina de cáscara de papa obtenida presentó las siguientes características organolépticas antes de la aplicación:

- Aspecto: Polvo fino con una coloración marrón suave.
- Olor: Agradable, con notas distintivas a papa cocida.
- Sabor: Suave.
- Textura: Ligera.

Resultados de la Evaluación Organoléptica

El método diferencial semántico demostró una alta aceptación de la harina en las aplicaciones probadas:

A. Galletas con 100% y 50% de Harina de Cáscara de Papa

- Apariencia (3): Muy buena.
- Color (2): Bueno. El color se asemeja al de una galleta de chocolate.
- Olor (0): Ni bueno ni malo. El olor es neutro/a papa.
- Sabor (0): Ni bueno ni malo. Sabor agradable a papa.
- Textura (2): Bueno. Textura crocante.

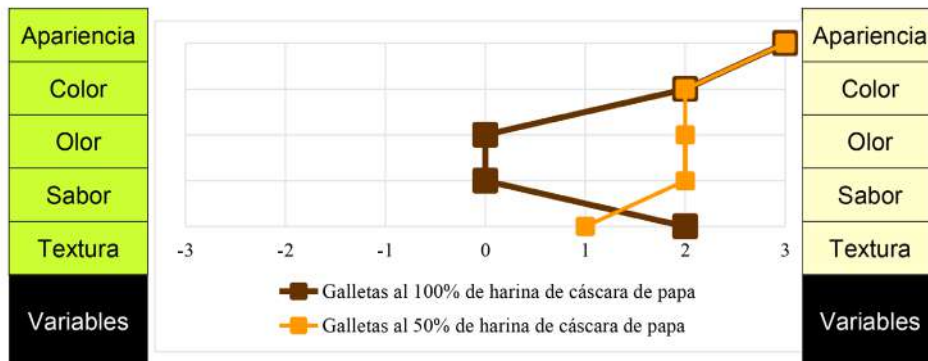
Nota. Se observa una similitud con las galletas de chocolate.

B) Galletas al 50% de Harina de Cáscara de Papa (y 50% Harina de Trigo)

- Apariencia (3): Muy buena.
- Color (2): Bueno. Color más claro que la galleta 100%, similar a un producto elaborado con salvado.
- Olor (2): Bueno. Similar al de una galleta tradicional de harina de trigo.
- Sabor (2): Bueno. Sabor agradable.
- Textura (1): Regular. Textura poco crocante.

En la Ilustración 6 se tiene el resumen de los resultados del focus group de las galletas.

Ilustración 6: Comparación de 2 tipos de galletas elaboradas con harina de cáscara de papa



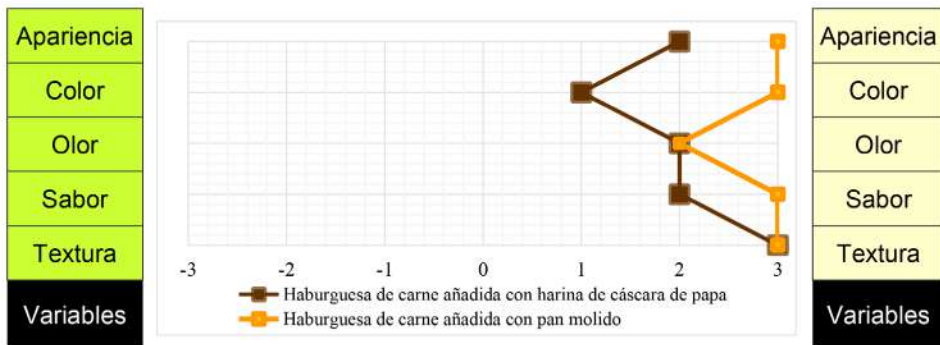
B. Hamburguesa (100% Reemplazo de Pan Molido)

- Apariencia (2): Buena.
- Color (1): Regular. Ligeramente más oscuro que la hamburguesa tradicional.
- Olor (2): Bueno. Similar al de la hamburguesa tradicional.
- Sabor (2): Bueno. Sabor agradable.
- Textura (3): Muy bueno. Textura ligera.

Nota. Se concluye que la hamburguesa con harina de cáscara de papa es comparable a la tradicional con pan molido.

En la Ilustración 8 se tiene el resumen del Focus Group que probaron las hamburguesas.

Ilustración 8: Comparación de dos tipos de Hamburguesas por el Método Semántico



Resultados del Análisis Nutricional (Laboratorio Seladis)

Los resultados del laboratorio Seladis validaron las propiedades nutricionales de la harina, confirmando su potencial como suplemento alimenticio.

Tabla 7: Resultados de Laboratorio de la Harina de Cáscara de Papa (Seladis).

Parámetro	Unidad	Resultado (Por 100 g)	Observaciones Nutricionales
Calcio (Ca)	mg/100 g	252,9	Aporte muy significativo para la dieta diaria.
Grasa Total	%	No Contiene	Ideal para dietas bajas en lípidos.
Fibra	Información Cualitativa	Alta	Favorece el tránsito intestinal (estreñimiento) y la saciedad.
Gluten	Información Cualitativa	No Contiene	Producto apto para el consumo por personas celíacas.
Proteínas	Información Cualitativa	Menor a la harina de trigo.	De buena calidad, siendo de origen vegetal.
Fuente de Energía	Información Cualitativa	Sí	Aporta una fuente de energía significativa.

Nota. Resultados obtenidos del Laboratorio Seladis e Interpretación propia.

En la Ilustración 9, se presenta la imagen del documento entregado por el Laboratorio Seladis.

Ilustración 9: Resultados de laboratorio de la Harina de cáscara de papa

FACULTAD DE CIENCIAS FARMACEUTICAS Y BIOQUIMICAS
INSTITUTO DE SERVICIOS DE LABORATORIO DE DIAGNOSTICO E INVESTIGACIÓN EN
SAUD (SELADIS)
LABORATORIO DE BROMATOLOGIA
 Miembro de la Red de Laboratorios Oficiales de Análisis de Alimentos (RELOAA)
 Resolución Ministerial No.017 7 Decreto Supremo No. 25729

	INFORME DE RESULTADOS LABORATORIO DE BROMATOLOGIA	CODIGO: 4376	
Informe N°:	45/2020		
Producto:	HARINA DE CASCARA DE PAPA		
Marca:	S/D	Razón Social:	ROSARIO MAMANI
Procedencia:	LA PAZ		
Muestreo:	ROSARIO MAMANI	FECHA:	2020/06/10
		HORA:	S/D
Fecha de recepción muestra:	2020/07/06	Fecha de emisión de resultados:	2020/07/10
Fecha de inicio de ensayos:	2020/07/06		

RESULTADOS

ENSAYO REALIZADO	UNIDADES	RESULTADOS OBTENIDOS	VALOR REFERENCI	METODO DE ENSAYO
GRASA TOTAL	g /100g	NSD	SVR	BARSHALL
PROTEINA	g /100g	3,89. -	SVR	KJELDHAL
CARBOHIDRATOS	g /100g	51,61. -	SVR	FEHLING
FIBRA CRUDA	g /100g	38,94. -	SVR	HIDROLISIS ACIDO - BASE
CALCIO	mg /100g	252,90. -	SVR	VOLUMETRÍA
VITAMINA C	mg /100g	8,99.-	SVR	VOLUMETRÍA

NSD: No Se Detecta / SVR: Sin Valor de Referencia / EAA: espectro de absorción atómica ~LD menor al límite de detección (<0.01 mg/L),* Valores referenciales del agua potable ND-512

Análisis: Linachy Itely


 Dra. María O. Torrez T.
 Bioquímica-Farmacéutica



Nota: Los resultados se refieren únicamente a la muestra que ingresó al laboratorio. NB: Norma Boliviana / AOAC:
 American Organization Analytical

Nota. Laboratorio Seladis

Como se detalla en la Tabla 7, el aporte de calcio es de 252,9 mg/100g, lo que representa un valor muy interesante para la dieta diaria.

4. DISCUSIÓN

La viabilidad técnica del proyecto queda demostrada por el rendimiento del proceso de 57,34% (harina seca respecto a la cáscara húmeda inicial), lo cual es un valor satisfactorio para la valorización de un subproducto (Isique & Sing, 2017).

El aporte de calcio (252,9 mg/100g) y la ausencia de gluten son los resultados más pertinentes, confirmando la novedad científica destacada por los revisores. Este valor de calcio es significativamente alto para un ingrediente base y posiciona la harina de cáscara de papa como un fortificante natural de bajo costo y una alternativa viable para la creciente población celíaca o personas con sensibilidad al gluten en Bolivia.

Los resultados organolépticos indican que, si bien la harina tiene características distintivas (color marrón, olor a papa), estas no son rechazadas por el consumidor; por el contrario, son bien aceptadas, especialmente en las aplicaciones de panadería y cárnicos. La alta puntuación en textura para la hamburguesa (3) y la apariencia para las galletas (3) sugiere que las propiedades de la fibra de la cáscara pueden mejorar la estructura de los alimentos, un aspecto crucial para el desarrollo de productos funcionales.

Se recomienda que futuras investigaciones se centren en la cuantificación precisa del contenido de fibra dietética total (soluble e insoluble) y la vida útil de la harina en diferentes condiciones de almacenamiento, para optimizar el proceso de envasado y comercialización.

5. CONCLUSIONES

Viabilidad y Proceso: La revisión bibliográfica y el procedimiento experimental demostraron la viabilidad técnica para la obtención de harina de cáscara de papa a escala piloto, con un rendimiento del 57,34%.

Aceptación Organoléptica: Las pruebas degustativas con el focus group confirmaron la buena aceptación de la harina de cáscara de papa como sustituto parcial (50%) o total (100%) en galletas y hamburguesas.

Aporte Nutricional y Nicho de Mercado: Las pruebas de laboratorio (Seladis) confirmaron la ausencia de gluten, haciendo la harina apta para celíacos. El contenido de calcio (252,9 mg/100g) y fibra posicionan este subproducto como un

ingrediente funcional con alto valor agregado para el mercado de La Paz y El Alto.

6. BIBLIOGRAFÍA

CONPAPA. (12 de junio de 2017). Confederación Nacional de Productores de Papa de la República Mexicana. Descripción de los principales componentes de la papa. Obtenido de <https://www.conpapa.org.mx/index.php/blog/item/4-descripcion-de-los-principales-componentes-de-la-papa>

Correo del Sur. (22 de mayo de 2018). Bolivia tiene 33 variedades de papa, pero baja la capacidad de producción. Obtenido de Editora Canelas del Sur S.R.L.: https://correodelsur.com/capitales/20180522_bolivia-tiene-33-variedades-de-papa-pero-baja-capacidad-de-produccion.html#:~:text=Bolivia%20cuenta%20con%2033%20variedades,rendimiento%20de%20las%20m%C3%A1s%20comerciales.

El Deber. (30 de Mayo de 2022). ECONOMÍA | ED. Obtenido de El contrabando y el costo de insumos reducen siembra de papa en el norte: https://eldeber.com.bo/edicion-impres/ed-el-contrabando-y-el-costo-de-insumos-reducen-siembrade-papa-en-el-norte_279886

Filomeno, M. (21 de julio de 2017). Página Siete. Economía. Obtenido de La importación de papa, tomate y cebolla se dispara.: <https://www.paginasiete.bo/economia/2017/7/21/importacion-papa-tomate-cebolla-dispara-145444.html#:~:text=Las%20importaciones%20de%20papa%2C%20tomate,del%20economista%20Jos%C3%A9%20Gabriel%20Espinoza.&text=Las%20cifras%20revelan%20que%20el,la%20producci%C>

FM del Sol. (20 de agosto de 2018). Sepa los beneficios de la Cáscara de Papa para su Salud. Obtenido de <https://www.fmdelsol.cl/botica-de-campo/20/08/2018/sepa-los-beneficios-de-la-cascara-de-papa-para-su-salud/#:~:text=La%20c%C3%A1scara%20de%20papa%20tambi%C3%A9n,%20%20manganeso%2C%20zinc%20y%20hierro.neso%2C%20zinc%20y%20hierro.>

Guido, A., & Mamani, P. (2001). Fundación PROINPA (Programa de Investigación de la Papa) Características de la cadena agroalimentaria de la papa y su industrialización en Bolivia. Obtenido de Capítulo III. Características de cada eslabón de la cadena agroalimentaria de la papa en Bolivia. 3.3. La agroindustria de la papa.: <https://www.proinpa.org/tic/pdf/Papa/Varios%20>

Papa/Características%20de%20la%20cadena%20agroalimentaria%20de%20la%20papa%20y%20su%20industrializaci%F3n%20en%20Bolivia.pdf

IBCE. (19 de julio de 2012). Instituto Boliviano de Comercio Exterior. CIFRAS, Boletín Electrónico Bisemanal N.º 141. Obtenido de Papa en Bolivia. Importaciones de Papa: https://ibce.org.bo/images/ibcecifras_documentos/CIFRAS-141-papa-en-bolivia.pdf

IBCE. (15 de mayo de 2017). Instituto Boliviano de Comercio Exterior. CIFRAS Boletín Electrónico Bisemanal N.º 606. Obtenido de Papa en Bolivia. Saldo Comercial de la papa y sus derivados (2010 – 2016 y avance a marzo del 2017): https://ibce.org.bo/images/ibcecifras_documentos/CIFRAS-606-Papa-en-Bolivia.pdf

Impuestos Nacionales. (09 de julio de 2015). ¿Qué es el IT? Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=rOiAFkw2D0s>

Impuestos Nacionales. (10 de julio de 2015). ¿Qué es el IUE? Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=zdkfeftj7YQ>

Impuestos Nacionales. (09 de julio de 2015). ¿Qué es el IVA? Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=GyHrdmgEmBY>

INE. (21 de julio de 2017). Instituto Nacional de Estadística. Obtenido de producción de Papa, tomate y cebolla en Bolivia es mayor a su importación: <https://www.ine.gob.bo/index.php/produccion-de-papa-tomate-y-cebolla-en-bolivia-es-mayor-a-su-importacion/#:~:text=%2D%20Al%20a%C3%B1o%20agr%C3%ADcola%202015%2D2016,51.841%20toneladas%2C%20se%20importa%204%2C>

INE. (01 de abril de 2021). CITE: INE-DGE-UDC N° 349/21. Obtenido de Instituto Nacional de Estadística: <https://www.ine.gob.bo/>

Isique Valverde, M. J., & Sing Lezama, J. L. (2017). Influencia de la Hidrólisis química en las características fisicoquímicas y funcionales de los residuos industriales de papa, camote y yuca. 2.8. Cáscara de papa, Cuadro 9: Composición de los residuos de cáscara de papa. Obtenido de Universidad Nacional del Santa, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Agroindustrial:

<http://repositorio.uns.edu.pe/bitstream/handle/UNS/3053/47038.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Mamani, L. (17 de marzo de 2018). La Razón. Economía. Obtenido de Baja la importación de papa y crearan una semilla resistente.: <https://www.paginasiete.bo/economia/2018/3/17/baja-importacin-papa-crearn-semilla-resistente-173403.html>

Manaco. (07 de julio de 2020). Catálogo CHATSHOP Manaco CALZA PERFECTO EN TU DÍA. Obtenido de <https://drive.google.com/file/d/1YDhRkiZ4Sb4jENQ6vJd7bwevMpd2e4cE/view>

MDRyT. (2012). Ministerio de Desarrollo Rural y Tierras. Compendio Agropecuario, Observatorio Agroambiental y Productivo. Obtenido de CAPÍTULO 3. Seguridad y Soberanía Alimentaria, 3.1. Cultivos Agrícolas, Estadísticas del cultivo de la Papa. CUADRO 3.5. Superficie cultivada, producción y rendimiento de la papa por departamento.: <https://www.ruralytierras.gob.bo/compendio2012/files/assets/basic-html/page88.html>

MDRyT. (2012). Ministerio de Desarrollo Rural y Tierras. Compendio Agropecuario. Observatorio Agroambiental y Productivo. Obtenido de CAPÍTULO 3. Seguridad y Soberanía Alimentaria. 3.1. Cultivos Agrícolas. 3.1.1. Papa (Solanum Tuberosum): <https://www.ruralytierras.gob.bo/compendio2012/files/assets/basic-html/page79.html>

MDRyT. (2021). Obtenido de Información Estadística General y Sectorial. Producción Agrícola, Inf. Dptal. Papa, Producción Agrícola en Bolivia: <https://siip.produccion.gob.bo/>

Paye Collanque, B. (2015). Proyecto de Grado: La industrialización de la papa como promotor de crecimiento y desarrollo de su producción en Bolivia. Capítulo IV. Marco Referencial, 4. La Papa, 4.1. Historia de la Papa en Bolivia. Obtenido de <https://repositorio.umsa.bo/xmlui/bitstream/handle/123456789/6159/T-2101.pdf?sequence=1>

Quispe, A. (23 de mayo de 2012). LA RAZÓN, Economía. Mercado. Obtenido de 2,4% de la papa que se consume es importada: <http://agroingeniero.blogspot.com/2012/05/24-de-la-papa-que-se-consume-es.html>

Rivera, J. (23 de febrero de 2015). Estudio de Disponibilidad de Materia Prima. Obtenido de <https://prezi.com/bwrw1ltxa4mt/estudio-de-disponibilidad-de-materia-prima/>

Taha, H. (2012). Investigación de Operaciones. Capítulo 14. Análisis de decisiones y juegos, 14.3. Decisión Bajo Incertidumbre. Impreso en México: Pearson Educación, 9a Edición.

<https://doi.org/10.53287/uzxd8349ae45q>

LA EMPRESA UNIVERSITARIA COMO ESTRATEGIA DE INTEGRACIÓN ACADÉMICA Y PRODUCTIVA

Mg. Felix Gabriel Orellana Sánchez

ORCID: 0009-0000-1055-964X

fgorellana@umsa.bo

Teléfono: 70662608

Ing. Briseida Zulma Quispe Clemente

ORCID: 0009-0005-3785-4274

briseidaqclemente@gmail.com

Teléfono: 70149508

RESUMEN

La empresa universitaria surge como una necesidad para vincular la universidad, empresa y el Estado. Este tipo de empresa tiene como objetivo transformar el conocimiento generado en las universidades en bienes, servicios e innovaciones con impacto económico y social, promoviendo el desarrollo sostenible y la competitividad en el país. basada en experiencias internacionales y latinoamericanas, la empresa universitaria articula la docencia, la investigación, la interacción social y la producción mediante incubadoras, centros de innovación y convenios con empresas, facilitando la transferencia tecnológica y la formación práctica de los estudiantes. En el contexto boliviano, donde las universidades enfrentan limitaciones presupuestarias y una débil relación con el sector productivo, este enfoque se convierte en una alternativa estratégica para diversificar ingresos y mejorar la empleabilidad de los egresados. Su consolidación exige un marco normativo y legal adecuado tanto para universidades públicas como universidades privadas, políticas públicas de fomento y alianzas público-privadas. Se recomienda fortalecer la investigación aplicada, definir el régimen tributario de estas entidades y promover su difusión nacional. En resumen, la empresa universitaria representa un nexo entre la teoría y la práctica,

convirtiendo a las universidades en un actor clave de la innovación, la productividad y el desarrollo económico y social de Bolivia.

Palabras clave: Empresa universitaria, norma legal, estrategia, productivo, desarrollo.

ABSTRACT

The university enterprise arises as a necessity to link universities, businesses, and the State. This type of enterprise aims to transform knowledge generated in universities into goods, services, and innovations with economic and social impact, promoting sustainable development and national competitiveness. Based on international and Latin American experiences, the university enterprise integrates teaching, research, social engagement, and production through incubators, innovation centers, and agreements with companies, facilitating technology transfer and practical student training. In the Bolivian context, where universities face budgetary constraints and weak ties with the productive sector, this approach becomes a strategic alternative to diversify income and improve graduate employability. Its consolidation requires an appropriate legal and regulatory framework for both public and private universities, public policies to foster development, and public-private partnerships. It is recommended to strengthen applied research, define the tax regime for these entities, and promote their nationwide dissemination. In summary, the university enterprise represents a bridge between theory and practice, making universities a key actor in innovation, productivity, and Bolivia's economic and social development.

Keywords: University enterprise, legal framework, strategy, productive sector, development

1. INTRODUCCIÓN

El rol de las universidades en el siglo XXI ha tenido que cambiar para ajustarse a las exigencias de una sociedad cada vez más compleja. De ser instituciones dedicadas principalmente a la docencia con escaso interés en influir en las directrices de desarrollo, debieron pasar a ser instituciones proactivas y propositivas, abiertas a la dinámica del cambio y en ocasiones ejerciendo un liderazgo en la conducción de propuestas de desarrollo social, económico, tecnológico y político.

Sin embargo, a pesar de sus esfuerzos de articulación, y no obstante la demanda de su contexto inmediato, la universidad ha encontrado no pocos escollos en este

proceso, resistencias provenientes muchas veces del propio entorno institucional al que busca integrarse (Roth 2013).

La relación entre universidad y empresa ha cobrado especial relevancia en los últimos años debido a la globalización y la necesidad de generar conocimiento aplicable al desarrollo económico. En Bolivia, la vinculación de la academia con la producción exige nuevos modelos institucionales y normativa legal acorde a universidad pública o privada y adaptándola a la realidad del país según la siguiente figura:

Figura 1. Esquema del modelo de empresa universitaria en Bolivia



Fuente: Elaboración con base en documentos analizados

2. DESARROLLO

La estrategia es esencial en el aspecto empresarial como en el académico, al orientar las acciones hacia el logro de ventajas competitivas. Según Porter (1996), “la estrategia es la creación de una posición única y valiosa, que implica un conjunto diferente de actividades”. Este enfoque resalta la importancia de diferenciarse en el mercado o en el entorno institucional mediante la adopción de acciones innovadoras que generen valor. Por su parte, Mintzberg sostiene que “la estrategia puede entenderse como un patrón en un conjunto de decisiones o acciones”, destacando que la estrategia no solo es un plan predefinido, sino también el resultado coherente

de decisiones que emergen a lo largo del tiempo.

En el ámbito académico, las universidades pueden desarrollar estrategias orientadas a la integración académica y productiva, fomentando la creación de empresas universitarias que vinculen la investigación científica con la producción industrial. La estrategia, entendida desde los enfoques de Porter y Mintzberg, representa un proceso deliberado y emergente que guía las acciones organizacionales hacia la consolidación de ventajas competitivas sostenibles, tanto en la gestión industrial como en la planificación académica y viceversa.

Empresas universitarias

Las empresas universitarias, también conocidas como spin-offs académicos, se refieren a las entidades comerciales creadas a partir de la transferencia de conocimientos y tecnologías generadas en el ámbito académico (Etzkowitz & Leydesdorff, 2000). Estas empresas tienen el propósito de aplicar la investigación y la innovación desarrolladas en las instituciones educativas con el fin de generar beneficios económicos y sociales.

Marco legal de empresas universitarias en el mundo

Varios países han desarrollado marcos legales específicos para facilitar la creación y el funcionamiento de empresas universitarias. En Estados Unidos, por ejemplo, la Bayh-Dole Act de 1980 ha sido fundamental para la transferencia de tecnología desde instituciones académicas al sector empresarial (Mowery, Nelson, Sampat, & Ziedonis, 2001). En Europa, la legislación relacionada con las empresas universitarias ha evolucionado con el objetivo de fomentar la colaboración entre la academia y la industria (Geuna & Nesta, 2006).

Experiencias en América Latina

En el contexto latinoamericano, la relación entre las universidades y las empresas ha sido históricamente menos formalizada en comparación con otras regiones del mundo (Vessuri, 2012). Sin embargo, algunos países han comenzado a explorar iniciativas para promover la creación de empresas universitarias. En Argentina, por ejemplo, se ha avanzado en la implementación de políticas que favorecen la transferencia tecnológica desde las universidades (Barge-Gil & López, 2015).

El concepto de empresa universitaria surge de la necesidad de crear espacios donde

el conocimiento científico se transforme en innovación tecnológica y productiva. Según Acuña (1993), la vinculación efectiva requiere la articulación de tres actores: universidad, sector productivo y Estado. En el caso boliviano, esta articulación aún es incipiente, debido a la falta de normativa legal, políticas claras de fomento y a la débil inversión en investigación aplicada.

La empresa universitaria puede definirse como una entidad gestionada por la universidad, orientada a producir bienes o servicios con base en los resultados de la investigación académica. Su propósito principal es educativo y de innovación, contribuyendo a la formación profesional, la transferencia tecnológica y la autosostenibilidad institucional. Este tipo de empresa promueve la práctica profesional directa de los estudiantes, el desarrollo de proyectos interdisciplinarios y la generación de ingresos complementarios para las universidades públicas y privadas.

En el siguiente cuadro se analiza el rol de cada uno de los actores dentro de la creación de una empresa universitaria.

Cuadro 1. Modelo de empresa universitaria en Bolivia

Ente	Actividad principal	Relaciones de cooperación
Universidad	Generar conocimiento, innovación, transferencia tecnológica y formación de capital humano.	Desarrolla proyectos de investigación aplicada en colaboración con empresas; forma profesionales especializados para el sector productivo.
Empresa	Aplicar innovaciones, demandar tecnología y generar empleo productivo.	Firma convenios con universidades para investigación y desarrollo; recibe pasantes y asesoramiento técnico.
Estado	Promover políticas públicas, financiamiento y normativas que incentiven la vinculación universidad–empresa.	Implementa programas de fomento a la innovación, parques tecnológicos y fondos concursables.
Empresa Universitaria	Unidad productiva creada dentro de la universidad que articula docencia, investigación y producción.	Actúa como nexo entre los tres actores; genera recursos y experiencias prácticas para docentes, estudiantes e investigadores.

Fuente: Elaboración con base en documentos analizados

3. ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE RESULTADOS

En Bolivia, experiencias iniciales como las incubadoras de empresas universitarias, muestran el potencial de este enfoque, aunque aún enfrentan limitaciones estructurales y normativas.

El Viceministerio de Ciencia y Tecnología el 2010, junto con otras instituciones como la Incubadora de la Universidad Mayor de San Simón, Universidad Pública del Alto, Universidad Mayor Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, Fundación MAYA y Fundación iFARO ponen en marcha Bolivia Incuba, Red Nacional de Incubadoras de Empresas de Bolivia. Esta red, conformada en sus inicios por 12 miembros entre los que se encontraban universidades públicas, privadas y fundaciones, tenía dos líneas de trabajo claras: fortalecer los modelos de emprendimiento ya instalados en el país para implementar modelos de incubación de empresas de base tecnológica.

En 2012 inauguró la Incubadora de Empresas en la ciudad de la Paz, con el apoyo de la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID). Esta incubadora buscaba ofrecer asistencia técnica, capacitación y alojamiento durante dos años a empresas innovadoras para fortalecer y apoyar su desarrollo y así impulsar la dinamización de la economía paceña. La selección de las empresas que entraban a formar parte de la incubadora se hacía por medio de un comité de evaluación externo, conformado por Fundepco, Universidad Católica Boliviana, Universidad Loyola y Fundempresa.

En 2012, como resultado de la participación internacional de la Universidad Privada de Santa Cruz de la Sierra (UPSA) en el proyecto financiado por la Unión Europea ALFA, se puso en marcha IncubaUPSA.

En 2013 aparece Hub 7, una plataforma global de apoyo de emprendedores que nace desde el ámbito del sector privado y cuenta con programas de incubación, aceleración y sensibilización. A partir de entonces se observa una tímida proliferación de este tipo de instrumentos hasta contar con un total de 24 hasta la fecha distribuidas por todo el país.

La Incubadora de Empresas de Base Tecnológica EMBATE de la facultad de Ciencias y Tecnología de la Universidad mayor de San Simón. La incubadora de empresas se creó el año 2009 con aprobación del Consejo Facultativo. Comenzó

a funcionar en 2011 y 2012, pero después se suspendió por más de una década debido a una serie de circunstancias. Gracias al impulso brindado por el actual decano de la facultad, Embate volvió a operar desde 2021.

La industria del conocimiento crece sin pausa, por el talento y el espíritu creativo que caracteriza a los emprendedores, que generan oportunidades de fuente de riqueza económica como factor de desarrollo social y su realización personal. La experiencia de la Universidad Mayor de San Andrés, UMSA, de Bolivia, es muy significativa. El Programa Innova, nació en la Carrera de Ingeniería Industrial y el Centro de Innovación y Desarrollo Empresarial CIDE del Instituto de Investigaciones Industriales de la UMSA, en el año 2009, desde donde fue evolucionando mediante los programas Innova Ingeniería; Innova San Andrés e INNOVA BOLIVIA entre el 2012-2015, en alianza con la Fundación Maya e importantes auspiciadores de la empresa privada, fundamentalmente.

El 2018 se posicionó como programa INGNOVATEC. A partir del 2019, el Hub de Innovación de la UMSA promovió la innovación y el emprendimiento, en beneficio de la sociedad, como el modelo de Parque de Innovación Tecnológico Virtual San Andrés PITSA, para construir un ecosistema de innovación a través de una plataforma digital, donde las empresas plantearán sus necesidades y la universidad ofertará soluciones a través de la investigación aplicada, tesis, trabajos prácticos, patentes y otros, generada desde el pregrado, posgrado y sus institutos de investigación (Velasco 2022)

La aplicación del modelo de empresa universitaria en Bolivia permitiría fortalecer la competitividad productiva, especialmente en sectores estratégicos. Su implementación requiere políticas universitarias claras, alianzas público-privadas y un marco legal que regule su operación. Entre los resultados esperados destacan la generación de empleo para egresados, la mejora en la pertinencia curricular y la dinamización de economías locales.

El análisis comparativo con países latinoamericanos demuestra que las universidades con empresas propias —como en México, Brasil o Chile— han logrado mayor impacto en innovación tecnológica y desarrollo regional.

Las incubadoras de empresas a través de la historia reflejan la importancia que han tenido en el desarrollo económico a nivel mundial, gracias a estos planes de

apoyo a empresas emergentes se han generado nuevos empleos, además de ser vinculador entre las universidades y el sector empresarial.

Estas inician en grandes corporaciones o centros de investigación las cuales no eran de fácil acceso solo un sector limitado tenía la oportunidad de acceder a las incubadoras, en el transcurso del tiempo esta va evolucionando.

Con el desarrollo de las nuevas tecnologías se muestra la importancia de generar empresas de base tecnológica como aporte de nuevos conocimientos, desarrollo de productos y procesos innovadores que aporten al desarrollo económico, social y académico de una región.

Tabla 1. Comparación de beneficios académicos y empresariales de la empresa universitaria.

Beneficios Académicos	Beneficios Empresariales
Fortalece la formación práctica de estudiantes y docentes.	Genera valor agregado y mejora la competitividad local.
Promueve la investigación aplicada y multidisciplinaria.	Facilita la transferencia tecnológica y la innovación.

Fuente: Elaboración con base en documentos analizados

La empresa universitaria logra la integración académica y productiva dentro del modelo de universidad contemporánea, bajo los siguientes fundamentos:

a) Naturaleza estratégica

La empresa universitaria no es solo una unidad económica, sino un instrumento estratégico de gestión académica, porque:

- Transforma el conocimiento generado en la universidad en bienes, servicios o innovaciones con impacto real.
- Une los pilares de docencia, investigación y extensión bajo una misma lógica productiva.
- Permite aplicar el aprendizaje basado en proyectos, fortaleciendo competencias profesionales.

Por tanto, funciona como nexo entre teoría y práctica, entre aula y mercado.

b) Integración académica

Desde el punto de vista pedagógico, la empresa universitaria:

- Articula las asignaturas con problemas reales del entorno.
- Fomenta la interdisciplinariedad (ingeniería, economía, administración, derecho, salud, etc.).
- Motiva la investigación aplicada y la innovación.

Esto rompe la fragmentación del conocimiento y refuerza la pertinencia curricular.

c) Integración productiva

En el ámbito económico y social:

- Conecta la universidad con sectores productivos, cooperativas y microempresas.
- Genera productos o servicios con valor agregado local.
- Puede ofrecer soluciones tecnológicas, asesorías o prototipos industriales.

Así, la universidad se vuelve parte del sistema productivo nacional, contribuyendo al desarrollo sostenible.

d) En el contexto boliviano

En Bolivia, donde la mayoría de universidades públicas enfrentan restricciones presupuestarias y débil vínculo con la industria, la empresa universitaria se convierte en una estrategia clave para:

- Diversificar fuentes de financiamiento,
- Mejorar la empleabilidad de los egresados,
- Y aportar al desarrollo regional con innovación social y tecnológica.

Estrategia a seguir

Para avanzar hacia la implementación efectiva del modelo de empresa universitaria en Bolivia, se propone la siguiente estrategia estructurada en cuatro ejes :

1. Marco normativo legal e institucional

- Elaborar una normativa legal específica que defina la naturaleza jurídica, contable y administrativa de las empresas universitarias, aplicable tanto a universidades públicas como privadas.
- Crear reglamentos que establezcan los procedimientos de creación, operación y control de estas unidades productivas.
- Fortalecer los institutos de investigaciones donde existe transferencia tecnológica y vinculación empresarial dentro de las universidades.

2. Fortalecimiento de capacidades y cultura organizacional

- Capacitar a docentes, estudiantes y personal administrativo en gestión empresarial, innovación y transferencia tecnológica.
- Promover una cultura universitaria orientada a la investigación aplicada, la innovación y la interacción con el sector productivo.
- Fomentar equipos interdisciplinarios que desarrollen productos, servicios, estudios de mercado y soluciones tecnológicas viables.

3. Implementación de unidades productivas universitarias

- Fortalecer incubadoras, centros de innovación y laboratorios tecnológicos que apoyen el desarrollo de emprendimientos universitarios.
- Diseñar mecanismos de sostenibilidad financiera mediante la venta de servicios, consultorías y alianzas con empresas.

4. Articulación con el entorno productivo y el Estado

- Establecer alianzas público–privadas para el desarrollo de proyectos conjuntos de investigación, innovación y desarrollo tecnológico.
- Integrar a las universidades en políticas nacionales y municipales de innovación, ciencia y tecnología.
- Vincular a cooperativas, MIPYMES y sectores productivos regionales para atender necesidades reales del entorno y generar impacto económico y social.

Estas estrategias buscan consolidar un modelo sostenible de empresa universitaria que transforme el conocimiento académico en innovación tecnológica y productiva. Su aplicación permitirá a las universidades bolivianas fortalecer su rol en el desarrollo económico, mejorar la empleabilidad de sus egresados y generar recursos propios mediante actividades productivas con impacto social.

4. CONCLUSIONES

La empresa universitaria representa una oportunidad estratégica para Bolivia, permitiendo integrar la formación académica con las demandas del sector empresarial. Su creación contribuiría a superar la desconexión entre conocimiento y producción, impulsando la innovación y la autosostenibilidad de las universidades. Sin embargo, su consolidación requiere un marco normativo y legal, financiamiento adecuado y una cultura institucional orientada a la gestión del conocimiento.

La normativa legal de empresas universitarias permitirá el desarrollo académico y productivo, porque convierte el conocimiento en motor económico, y a la vez forma profesionales capaces de innovar desde la práctica y permitirá:

- Creación de Empresas Universitarias

Unidades productivas gestionadas por la universidad, donde docentes y estudiantes desarrollan productos o servicios reales.

- Programas de prácticas y pasantías empresariales

Acuerdos formales para que los estudiantes realicen prácticas profesionales en empresas del entorno local.

- Centros de innovación y transferencia tecnológica

Espacios dentro de la universidad que brindan servicios de investigación aplicada, diseño de prototipos o asesoría técnica a empresas.

- Incubadoras de empresas universitarias

Programas que apoyan a estudiantes y egresados a crear sus propios emprendimientos basados en conocimiento o tecnología.

- Investigación colaborativa Universidad–Empresa

Proyectos conjuntos entre grupos de investigación universitaria y empresas privadas

o estatales.

- *Formación dual (académico–laboral)*

Modelo en el que los estudiantes combinan estudio teórico en la universidad con trabajo práctico en la empresa.

- *Convenios de producción o servicios*

Contratos donde la universidad produce bienes o presta servicios a entidades públicas o privadas.

- *Parques tecnológicos universitarios*

Espacios donde coexisten empresas, laboratorios e instituciones académicas que desarrollan proyectos de innovación y emprendimiento.

- *Investigaciones empresariales*

Empresas que financian líneas de investigación específicas dentro de la universidad.

- *Consultorías y asesorías técnicas universitarias*

Equipos académicos que prestan servicios de diagnóstico o mejora empresarial a micro, pequeñas y medianas empresas (MIPYMES).

5. BIBLIOGRAFÍA

Acuña, P. (1993). Vinculación universidad-sector productivo. *Revista de la educación superior*, 22(87), 1-15.

Del Río Mejía, M. (2024). Articulación universidad y empresa en procesos de innovación, Sucre Bolivia. *Revista Investigación y Negocios*, 17(29), 5-11.

Etzkowitz, H., & Leydesdorff, L. (2000). The dynamics of innovation: from National Systems and “Mode 2” to a Triple Helix of university–industry–government relations. *Research policy*, 29(2), 109-123.

Mintzberg, H. (1987). The strategy concept I: Five Ps for strategy. *California Management Review*, 30(1), 11–24.

Mowery, D. C., Nelson, R. R., Sampat, B. N., & Ziedonis, A. A. (2001). The growth of patenting and licensing by US universities: an assessment of the effects of the Bayh–Dole act of 1980. *Research policy*, 30(1), 99-119.

- Porter, M. E. (1996). What is strategy? Harvard Business Review, 74(6), 61–78.
- Roth, E. (2013). Empresa y universidad: percepciones de una relación deseable pero compleja. Revista RCC, núm. 30 (junio 2013)
- Tito Chipana, E. (2023). Proyecto de grado para Licenciado en Arquitectura: Incubadora de Empresas Startup U.M.S.A (Programa de Tecnología Intermedia) [Proyecto de titulación, Universidad Mayor de San Andrés]. Ciudad de La Paz.
- Velasco, J. (2022) Proyecto Incubadora Universidad Mayor De San Andrés (UMSA).

<https://doi.org/10.53287/dpbn4112fg13s>

INFLUENCIA DEL ENGAGEMENT DIGITAL EN LOS INGRESOS: UN ANÁLISIS DE MYPES MANUFACTURERAS EN LA PAZ Y EL ALTO

Univ. Carla Gitanjali Monzon Callisaya

ORCID: 0009-0001-0605-7986

cgmonzon@umsa.bo

Univ. Alan Gabriel Limachi Quispe

ORCID: 0009-0003-7110-2979

aglimachi2@umsa.bo

Univ. Diego Jair Sánchez Huanca

ORCID: 0009-0004-5600-3507

djsanchez@umsa.bo

Univ. Michelle Natalia Estay Monasterios

ORCID: 0009-0001-1602-8310

mnestay@umsa.bo

Mg. Ing. Juan Pablo Fernandez Rocha

ORCID: 0000-0002-1650-8963

jpfernandez3@umsa.bo

RESUMEN

Este estudio cuantitativo correlacional analiza cómo la actividad en redes sociales influye en los ingresos mensuales de 60 micro y pequeñas empresas manufactureras vinculadas a la Plataforma Aceleradora de Productividad (PaP) de la UMSA durante 2024 – 2025. Se midieron ingresos, calidad del contenido, engagement y número de seguidores; se aplicó modelado de ecuaciones estructurales (SEM)

con variables estandarizadas y transformaciones logarítmicas. Los ingresos se relacionan positivamente con el tamaño empresarial y el engagement; la calidad del contenido aumenta la interacción de los seguidores, es decir, explica el engagement. El apoyo técnico de la PaP mejora la calidad del contenido y genera efectos indirectos favorables sobre los ingresos. Se recomiendan mejorar la calidad de los datos, ampliar la muestra y el periodo de análisis, e incorporar variables latentes relacionadas con la estrategia digital y capacitación para optimizar la efectividad de las intervenciones y evaluar impactos potenciales a mediano plazo.

Palabras clave: Redes Sociales, Engagement, Ingresos, MyPEs, SEM..

ABSTRACT

This quantitative correlational study analyzes how social media activity influences the monthly revenues of 60 micro and small manufacturing firms linked to the UMSA Productivity Accelerator Platform (PaP) during 2024 – 2025. Revenues, content quality, engagement, and number of followers were measured; structural equation modeling (SEM) was applied with standardized variables and logarithmic transformations. Revenues are positively related to business size and engagement; content quality increases follower interaction, i.e., explains engagement. Technical support from the PaP improves content quality and generates favorable indirect effects on revenues. It is recommended to improve data quality, expand the sample and analysis period, and incorporate latent variables related to digital strategy and training to optimize the effectiveness of interventions and evaluate potential medium-term impacts.

Keywords: Social Networks, Engagement, Income, MyPEs, SEM...

1. INTRODUCCIÓN

En el contexto de la economía en Bolivia, las micro y pequeñas empresas (MyPEs) enfrentan desafíos significativos derivados de la escasez de dólares y la elevada inflación, circunstancias que han incrementado los costos de insumos importados y reducido la disponibilidad de divisas para las operaciones comerciales. Estas condiciones macroeconómicas agravan una problemática histórica de baja productividad, atribuible a limitaciones en inversión, capacitación y asistencia técnica. A nivel nacional, aproximadamente el 90% de las empresas corresponden a MyPEs y cerca del 35% de ellas se concentran en el departamento de La Paz, lo que

evidencia la relevancia de este segmento para la economía local. Para los efectos de este estudio. Estudios recientes han mostrado que el uso efectivo de redes sociales puede incrementar las ventas y la visibilidad de estas unidades productivas (Anaya Valdivia, 2023). Además, informes digitales señalan que el 61,1% de la población boliviana es usuaria activa de redes sociales, lo que representa una oportunidad para que las MyPEs amplíen su alcance (DataReportal, 2025).

La Plataforma Aceleradora de Productividad (PaP), dependiente de la carrera de Ingeniería Industrial, fue creada para incrementar la productividad de pequeñas unidades productivas mediante capacitación, asistencia técnica, seguimiento y monitoreo. La plataforma se encuentra en operación desde la gestión 2023, y a la fecha articula su trabajo con instituciones como el Gobierno Autónomo Municipal de La Paz (GAML P), Laboratorio de innovación (K-Lab), Gobierno Autónomo Municipal de El Alto (GAMEA) y Fundaciones. Entre los servicios más solicitados a la plataforma figura la promoción de productos a través de redes sociales, dado que muchas MyPEs no cuentan con un área específica de marketing que gestione su presencia digital de manera eficiente. Esta carencia de recursos especializados es común en el sector. Si bien la literatura académica suele analizar la adopción tecnológica en el contexto más amplio de las MyPEs. Estudios previos han mostrado que la adopción del marketing digital está influida por las ventajas percibidas de su uso, la aceptación del medio como canal de comunicación con clientes y la experiencia de uso, siendo las redes sociales y el marketing por correo electrónico las herramientas mayoritarias (Bermeo Giraldo et al., 2022).

Esta investigación surge de una necesidad tanto práctica como académica relacionada a determinar si las acciones de la PaP (videos, publicaciones y materiales multimedia) contribuyen a los resultados económicos de las MyPEs atendidas, así como explicar los mecanismos mediadores que podrían conducir a un incremento en las ventas.

2. OBJETIVOS

Objetivo General

Analizar la incidencia de la actividad en redes sociales en los ingresos de las empresas vinculadas a la Plataforma Aceleradora de Productividad de la UMSA en La Paz y El Alto.

Objetivos específicos

1. Caracterizar la calidad de la actividad en redes sociales que realizan las empresas vinculadas a la plataforma.
2. Establecer y evaluar la validez y fiabilidad del modelo de relaciones estructurales.
3. Medir la incidencia del servicio de promoción de productos en redes sociales con las empresas vinculadas a la plataforma.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Revisión de la Literatura

La transformación digital que desde hace varios años atraviesa la sociedad mundial ha impulsado a empresas de todos los tamaños a replantear sus estrategias de negocio. Esta transición hacia lo digital responde a los cambios en la forma en que las personas se comunican, muestran interés por los productos o servicios e interactúan en comunidades virtuales (De Toro Chacón, 2020). En este contexto, la digitalización se ha convertido en un elemento clave para la competitividad empresarial, especialmente en los países emergentes. De acuerdo con el Banco Mundial (2022), las plataformas digitales y las redes sociales representan canales accesibles y de bajo costo que permiten a las micro, pequeñas y medianas empresas ampliar su alcance comercial y reducir los costos asociados a los métodos tradicionales de promoción.

Desde la perspectiva del marketing, Kaplan y Haenlein (2010) destacan que las redes sociales constituyen un vehículo estratégico para fortalecer la relación entre marcas y consumidores, pues ofrecen una interacción directa que incrementa la visibilidad y la lealtad hacia las empresas. Este enfoque se complementa con el concepto de marketing de contenidos, desarrollado por Pulizzi (2021), quien propone una filosofía basada en “contenido primero”, es decir, crear valor para la audiencia antes de ofrecer productos o servicios. Según el autor, esta estrategia reduce el riesgo empresarial y contribuye a construir comunidades digitales comprometidas con la marca.

La evidencia empírica reciente también respalda la relevancia del marketing digital en el contexto boliviano. Un estudio realizado en la ciudad de Sucre mostró que una

mayor presencia y actividad en redes sociales como Facebook, TikTok y WhatsApp se asocia con un crecimiento significativo en las ventas de los negocios locales. Estas plataformas se consolidan como herramientas de comunicación y promoción de gran alcance, capaces de generar impactos directos sobre el desempeño económico de las micro y pequeñas empresas.

Entre las métricas más utilizadas para evaluar la eficacia de las estrategias en redes sociales se destacan la frecuencia de publicaciones y el engagement. La frecuencia, entendida como el número y la constancia de publicaciones, refleja el compromiso de una marca con su audiencia y se considera un indicador clave del posicionamiento digital (Tuten, 2021). Por su parte, el engagement (expresado a través de interacciones como “me gusta”, comentarios o contenidos compartidos) es una medida ampliamente reconocida del nivel de conexión entre la empresa y sus usuarios (Hemann & Burbary, 2018).

En Bolivia, las plataformas como Facebook e Instagram concentran la mayor parte de la actividad digital, con un 68% y 18,4% de participación respectivamente (Statista, 2024). Esto convierte a dichas redes en escenarios prioritarios para analizar la dinámica de las micro y pequeñas empresas que buscan consolidar su presencia en línea. En particular, en las ciudades de La Paz y El Alto, donde opera la Plataforma Aceleradora de Productividad, el estudio de indicadores como la frecuencia y el engagement permite comprender de qué manera la actividad en redes sociales puede asociarse con los ingresos y el crecimiento de las empresas participantes.

Metodología

Esta investigación es de tipo cuantitativo, correlacional–explicativo, enfocada únicamente en empresas del sector manufacturero vinculadas a la Plataforma Aceleradora de Productividad en La Paz, para el periodo agosto 2024 - junio 2025.

- Población y muestra

La muestra se obtuvo en base a los datos del sistema de seguimiento y monitoreo de la PaP de la carrera de Ingeniería Industrial de la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA). Para la realización del estudio, los datos atravesaron un proceso de limpieza previo a su análisis.

El enfoque consiste en el análisis de la influencia de las redes sociales en el desempeño de las MyPEs del sector manufacturero, por lo cual las variables

consideradas incluyen:

Tabla 1. Variables de estudio

Nombre	Tipo de Variable	Descripción
Ingresos	Discreta	Recopilada de los registros disponibles en [Bs/mes]
Calidad (qq)	Latente	Descrita por medio de las calificaciones de los criterios de relevancia, originalidad, atractivo visual, consistencia y Call to Action.
Engagement (eng)	Latente	Descrita a través del número de likes, compartidos, comentarios para las últimas 10 publicaciones, además de considerar el número de seguidores.
Tamaño de la empresa (TE)	Ordinal	Recopilada de los registros disponibles.
Apoyo de la PaP (AP)	Dicotómica	Indica si la empresa ha recibido apoyo de parte de la Plataforma Aceleradora de Productividad.

Fuente: Elaboración propia

Los criterios de exclusión para la limpieza de los datos se describen a continuación:

- Se incluyen únicamente las empresas del sector manufactura, considerando rubros como ser: alimentos, metalmecánica, cosmética y farmacia, cuero y manufactura, papelería e impresión, plásticos y químicos y textil. Siendo el 49,18% empresas pertenecientes al rubro de alimentos.
- Se incluyen las empresas de las cuales se recabaron datos de ingresos mensuales (Bs/mes)
- Se incluyen las empresas con redes sociales activas (en el periodo 2023-2025), siendo Facebook la red social principal en un 94,11% de las veces.

Con los criterios definidos por el equipo, la muestra inicial de 260 empresas se redujo a 60 empresas que cumplen con las características anteriormente descritas.

- Recolección de datos

Además de los registros disponibles en la PaP, se realizó un scraping o consulta

manual de cuentas de TikTok, Instagram, Facebook para realizar una evaluación cualitativa del estado y alcance de las redes sociales en base a los siguientes criterios:

Tabla 2. Criterios de medición

Criterio	Descripción	Detalle
Red social activa y comercio electrónico	<ul style="list-style-type: none"> Se indica la red social activa Si cuenta con una plataforma de comercio electrónico o página web 	<ul style="list-style-type: none"> Tik Tok, Facebook, Instagram Sí/No
Frecuencia de publicaciones	Se clasifica como alta, media o baja y se indica el promedio de publicaciones semanales	<ul style="list-style-type: none"> Alta: +4 publicaciones semanales Media: 1-3 publicaciones semanales Baja: menos de 1 por semana
Métricas de engagement (interacción)	<p>En promedio para las últimas 10 publicaciones:</p> <ul style="list-style-type: none"> Número promedio de likes Compartidos y Comentarios por publicación <p>Además del número de seguidores.</p>	Se utiliza la escala Likert para realizar la evaluación donde 1 es la menor puntuación y 5 la mayor puntuación.
Calidad del contenido	Se evalúan factores como relevancia, originalidad, atractivo visual, consistencia y CTA's	Se utiliza la escala Likert para realizar la evaluación donde 1 es la menor puntuación y 5 la mayor puntuación

Fuente: Elaboración propia

Antes de la modelización, se calcularon los estadísticos descriptivos de las variables clave del estudio, tal como se muestra en la tabla 3. Este análisis es determinante

para identificar problemas de variabilidad y asimetría que pudieran comprometer la precisión de los resultados del modelo. Para disminuir estos efectos se aplicaron los siguientes tratamientos a las variables:

Tabla 3. Estadísticas descriptivas de las variables en análisis

Estadístico	Media	Desviación estándar	Coef. asimetría	Tratamiento
Ingresos [Bs/mes]	676.877,30	1.827.905,00	4,23	Logaritmos
Número de seguidores	9.968,90	30.643,24	5,26	Normalización

Fuente: Elaboración propia

El tratamiento con logaritmos y normalización pretende obtener distribuciones más simétricas y que se ajusten mejor a los supuestos de los modelos estadísticos.

- Modelo y validación

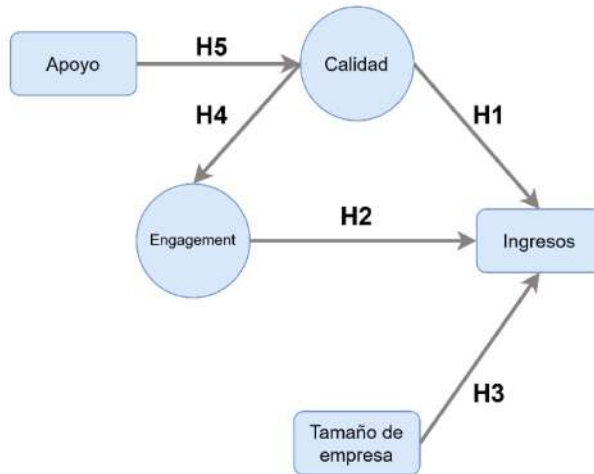
El Modelado de Ecuaciones Estructurales (SEM) combina el análisis factorial con el análisis de regresión para construir las relaciones entre las variables observables (directamente medibles) y latentes (no se miden directamente). Asimismo, pueden representar la relación únicamente entre variables observables (Baumgartner y Homburg, 1995).

Los modelos SEM son ampliamente utilizados en el área de marketing (Hair et.al., 2012). En estudios como los de Shafique (2024) y Abdallah (2018) estos modelos se utilizan para analizar el efecto de variables como el engagement, interacción con los clientes, percepción marca sobre el uso y comportamiento de las personas en las redes sociales.

El análisis se basa en el esquema conceptual presentado en la figura 1. Este diagrama identifica la estructura de relaciones directas e indirectas propuesta para el estudio. La validación del modelo se centra en la comprobación de la cadena de efectos. Se plantea que la calidad del contenido ejerce una influencia sobre los ingresos (H1) y el nivel de engagement en redes sociales (H4), además el nivel de

engagement (H2) y el tamaño de la empresa (H3) determinan el nivel de ingresos. Finalmente, el apoyo brindado por la Plataforma Aceleradora de Productividad mejora la calidad del contenido (H5).

Figura 1. Esquema conceptual del modelo



Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto, se proponen las siguientes hipótesis para el estudio:

H1: La calidad del contenido en RRSS influye positivamente en los ingresos percibidos

H2: El engagement influye positivamente en los ingresos percibidos.

H3: El tamaño de la empresa está relacionado con los ingresos que percibe la misma.

H4: La calidad del contenido en RRSS influye positivamente en el engagement.

H5: El Apoyo de la PaP influye positivamente en la calidad del contenido en RRSS

4. RESULTADOS OBTENIDOS

A partir del modelo de ecuaciones estructurales se determinó que el ajuste global

del modelo es satisfactorio. El modelo alcanzó la aceptación estadística necesaria, demostrando una adecuada capacidad de representación:

Tabla 4. Índices de ajuste

Índice	Descripción
Chi cuadrado = 68,78; p=0,05	Valor aceptable, dentro del rango adecuado.
RMSEA=0,076 ; p=0,185	El valor es calificado como razonable. Ajuste aceptable dentro del rango [0,05 – 0,08].
CFI=0,940 ; TLI=0,923	Dentro del rango [0.9 - 0.95]. Aceptable.
SRMR=0,078	Valores aceptables <0.08

Fuente: Elaboración propia

Esta validación estadística sustenta la interpretación de las trayectorias causales y permite interpretar los demás resultados.

La tabla 5 presenta las estimaciones de los parámetros del modelo, incluyendo las relaciones estructurales entre variables latentes y observadas, así como los valores de significación estadística (p-value) que permiten identificar qué relaciones y parámetros son significativos.

Tabla 5. Resultados de la regresión

Variable latente	Estimador	Desv. Estándar	Valor p
Calidad			
Relevancia	0,992	0,147	0,000
Originalidad	1,396	0,148	0,000
Atractivo	1,389	0,145	0,000
Consistencia	0,973	0,148	0,000
CTA	0,524	0,144	0,000
Engagement			
Likes	0,090	0,023	0,000
Comentarios	0,130	0,026	0,000
Compartidos	1,754	0,287	0,000
#Seguidores	0,765	0,115	0,000
Regresiones			
	Estimador	Desv. Estándar	Valor p
Ingresos			
Calidad	-0,078	0,240	0,743
Engagement	0,885	0,260	0,001
Tamaño	1,111	0,253	0,000
Engagement			
Calidad	0,305	0,151	0,044
Calidad			
Apoyo	0,969	0,490	0,048

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6. Resultados

Relación	Descripción
Calidad → Ingresos Coefficiente: -0,078 p=0,743	Se rechaza la hipótesis H1. El coeficiente es negativo y no significativo; lo que indica que la calidad de las publicaciones en RRSS no está directamente relacionada con los ingresos.
Engagement → Ingresos Coefficiente 0,885 p=0,001	Se acepta la hipótesis H2. El coeficiente es positivo y significativo; indica que a un mayor nivel de engagement alcanzado, se traduce en mayores ingresos.
Tamaño → Ingresos Coefficiente 1,111 p=0,000	Se acepta la hipótesis H3. El coeficiente es positivo y significativo; se confirma que el tamaño de la empresa es un predictor de ingresos.
Calidad → Engagement Coefficiente 0,305 p=0,044	Se acepta la hipótesis H4. El coeficiente es positivo y significativo; la calidad de contenido en redes sociales es un predictor del nivel de engagement alcanzado.
Apoyo PaP → Calidad Coefficiente 0,969 p=0,048	Se acepta la hipótesis H5. El coeficiente es positivo y significativo, el apoyo de la Plataforma Aceleradora de Productividad se traduce directamente en un incremento en la calidad de las publicaciones en RRSS.

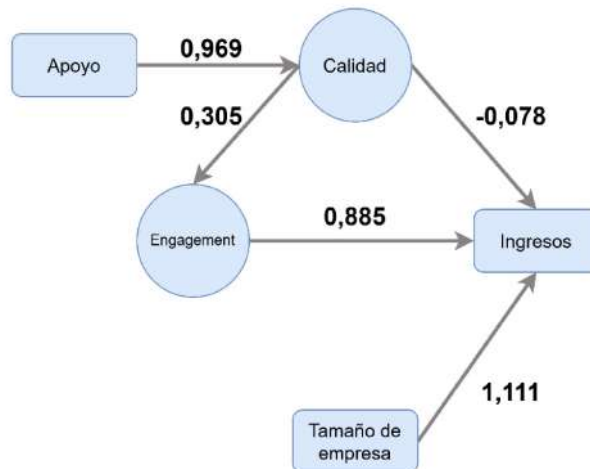
Fuente: Elaboración propia

La calidad de las publicaciones no presenta un efecto directo significativo sobre los ingresos. Sin embargo, la influencia de la calidad se manifestó de manera indirecta, a través del engagement. Este hallazgo valida la ruta de mediación propuesta, indicando que la calidad de contenido se traduce en mayores beneficios económicos únicamente al impulsar un mayor nivel de engagement.

Se confirma que el apoyo brindado por la Plataforma Aceleradora de Productividad tiene un efecto positivo en la calidad de las publicaciones en redes sociales de las empresas.

Por lo cual, con los resultados obtenidos, los coeficientes para el modelo son:

Figura 2. Resultados del esquema del modelo



Fuente: Elaboración propia

El diagrama muestra las relaciones estimadas entre las variables (ver la tabla 6). Los coeficientes positivos muestran asociaciones directas, mientras que el coeficiente negativo sugiere una relación inversa, no obstante, en este caso el coeficiente negativo no resulta estadísticamente significativo.

5. DISCUSIONES

Si bien el estudio fue diseñado para analizar la influencia de la actividad en redes sociales sobre los ingresos de las MyPEs manufactureras tomadas en cuenta en la muestra, los resultados permiten ampliar la interpretación hacia el papel que desempeña la PaP en el desempeño digital de las empresas. Aunque el objetivo central del estudio no fue evaluar la efectividad del servicio de la PaP, se observó que las empresas que recibieron apoyo de la plataforma presentaron, en promedio, cuenta con mejor calidad de contenido y, en consecuencia, mayores niveles de engagement.

Esta observación es consistente con el propósito de la PaP, que no solo brinda orientación en marketing digital, sino también asistencia técnica en diversas áreas que fortalecen las capacidades operativas y estratégicas de las MyPEs. Los hallazgos sugieren que este acompañamiento puede influir indirectamente en el comportamiento digital de las empresas, aun cuando el servicio no haya sido considerado como un elemento central del modelo desde su concepción inicial.

Como futura línea de investigación, se recomienda profundizar en la medición del impacto específico de los servicios brindados por la PaP y evaluar con un diseño más robusto hasta qué punto dicho apoyo contribuye a generar mejoras sostenidas en la calidad del contenido digital y, en última instancia, en los ingresos de las MyPEs.

6. CONCLUSIONES

Inicialmente se han identificado las redes sociales que las empresas utilizan con mayor frecuencia, siendo Facebook la más popular entre las diferentes empresas clasificadas por tamaño y rubro.

Se recopiló información acerca de la interacción que genera cada empresa en su red social principal o de mayor uso. Esta se ha clasificado como Engagement (eng), mientras que la Calidad (qq) de manera similar, se la obtuvo calificando 5 aspectos clave: el atractivo visual, relevancia, consistencia, originalidad y el llamado a la acción (CTA).

El modelo de relaciones estructurales (SEM) validado demostró un ajuste global aceptable según los índices CFI, TLI y RMSEA (reportados en la tabla 4), permitiéndonos la interpretación de las relaciones de asociación propuestas.

El modelo de ecuaciones estructurales (SEM) muestra asociaciones positivas de los ingresos con el tamaño de la empresa y el nivel de interacciones en redes sociales (engagement). Por otro lado, la calidad del contenido se posiciona como un factor clave para incrementar el nivel de interacciones en plataformas de redes sociales, y esta última se asocia con mayores ingresos.

Los resultados sugieren que la asistencia proporcionada por la Plataforma Aceleradora de Productividad (PaP) se relaciona positivamente con una mejor calidad del contenido en redes sociales.

7. RECOMENDACIONES

Si bien el estudio permite describir ciertos factores sobre los ingresos y manejo de redes sociales de las empresas del sector manufacturero se limita por factores como la recolección de datos, la muestra y las variables utilizadas.

En cuanto a la recolección de datos, se considera crucial mejorar la calidad de los mismos, implementando protocolos más rigurosos para evitar incoherencias, errores en los registros de las empresas reduciendo la pérdida de datos.

En cuanto a la toma de muestra, tomando la referencia de Guachalla et. al. (2023) esta podría expandirse a 84 empresas o incluso a 437 como en el estudio presentado por Alalwan (2018).

En cuanto a las variables de redes sociales, se recomienda ampliar el periodo de análisis para tener un panorama más adecuado en cuanto a su consistencia, así como comparar la frecuencia de publicación semanal y anual.

Así también, se recomienda incluir variables latentes como la estrategia de marketing digital Shafique (2024), para enriquecer el análisis propuesto, evaluando indicadores como Varianza Extraída Media (AVE) para determinar la fiabilidad y validez del constructo.

8. AGRADECIMIENTO

Los investigadores expresan su sincero agradecimiento al equipo de la Plataforma Aceleradora de Productividad de la Universidad Mayor de San Andrés por su invaluable apoyo, colaboración y por proporcionar el contexto y los datos esenciales que han hecho posible el desarrollo de este proyecto.

Su visión y compromiso con la mejora de las prácticas empresariales han sido una inspiración fundamental.

9. BIBLIOGRAFÍA

Alalwan, A. A. (2018). Investigating the impact of social media advertising features on customer purchase intention. *International journal of information management*.

Tuten, T. L. (2021). *Social media marketing* (4th ed.). SAGE Publications

De Toro Chacón, M. (5 de Noviembre de 2020). *Función de las redes sociales en las empresas*.

Mamani Mamani, L. M. (2024). Impacto de las redes sociales en el comportamiento de los adolescentes: Una revisión sistemática. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*,

Kemp, S. (2025). *Digital 2025: Bolivia*. DataReportal.

Pulizzi, Joe. (2021). *Content Inc., Second Edition: Start a Content-First Business, Build a Massive Audience and Become Radically Successful (With Little to No Money)*. McGraw Hill LLC.

Banco Mundial. (2022). *Informe sobre el desarrollo mundial 2022: Finanzas al servicio de la recuperación equitativa*.

Baumgartner, H., & Homburg, C. (1996). Applications of structural equation modeling in marketing and consumer research: A review. *International journal of Research in Marketing*, 13(2), 139-161.

Centre for Evidence-Based Medicine, University of Oxford. (s.f.). *Logarithms and log-transformations*.

Hair, J. F., Sarstedt, M., Ringle, C. M., & Mena, J. A. (2012). An assessment of the use of partial least squares structural equation modeling in marketing research. *Journal of the academy of marketing science*, 40(3), 414-433.

Shafique R. (2024). Importance of online marketing using social media platforms for small companies. *JAMK*.



Carrera de Ingeniería Industrial 86 Años

**Facultad de Ingeniería
Universidad Mayor de San Andrés**

UMSA
UNIVERSIDAD DEL BICENTENARIO



CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS