Mundo Fesc, 10 (19), pp. 179-193, Enero-Junio, 2020, ISSN 2216-0353, 2216-0388

Herramientas de optimización para el sector carbón del departamento Norte de Santander

Optimization tools for the coal sector of the northern department of Santander

[a]Leonor Jaimes-Cerveleón, [b]Javier Dario Fernández-Ledesma, [c]Luis Enrique Mendoza

a Maestría en administración de empresas e innovación, leonor.cerveleon@unipamplona.edu.co, Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia.
b Doctor en Ingeniería Electrónica, Javier.fernandez@upb.edu.co, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín. Colombia.
c Magister en Ingeniería biomédica, luis.mendoza@unipamplona.edu.co, Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia.

Recibido: Julio 16 de 2019 **Aceptado:** Noviembre 22 de 2019

Forma de citar: L. Jaimes-Cerveleón, J.D. Fernández-Ledesma, L.E. Mendoza, "Herramientas de optimización para el sector carbón del departamento Norte de Santander.", *Mundo Fesc*, vol. 10, no. 19, pp. 179-193, 2020

Resumen

Las herramientas de optimización se han utilizado en diferentes campos del conocimiento, principalmente en la solución de problemas logísticos. Entre las herramientas más utilizadas están Colonia de hormigas, Búsqueda Tabú, Algoritmos Genéticos, Recocido Simulado, entre otras herramientas que contribuyen a brindar soluciones a problemas reales en diferentes áreas y sectores productivos. Este artículo tiene como finalidad determinar las herramientas de optimización que se pueden utilizar en los procesos logísticos específicamente en el sector carbón. Para ello se realizó una descripción de los modelos de optimización más adecuados dentro de los cuales se encuentran los métodos heurísticos y metaheurísticos más apropiados para la implementación a futuro en la solución de un problema logístico. De la misma manera, se muestra la importancia que tiene para los procesos logísticos incluir herramientas de la industria 4.0 que sean aplicables a los problemas que enfrenta el sector carbón con el fin de contribuir a la optimización de estos. Seguidamente, este artículo presenta un recorrido general por los procesos logísticos que se llevan a cabo actualmente en el sector carbón de nuestro país, así como muestra un consolidado de técnicas heurísticas y metaheurísticas las cuales serían de gran importancia se aplicaran en el sector carbón. Adicionalmente, se da a conocer la importancia de la inclusión de herramientas de la industria 4.0 que pueden incluirse en conjunto con las herramientas de optimización y pueden potenciar aún más el mejoramiento de los procesos logísticos que se llevan a cabo en el sector carbón. Finalmente, se presentan resultados de la aplicación de un diagnóstico inicial en el cual se tomaron como base de análisis 106 empresas de carbón del departamento Norte de Santander, con el propósito de indagar acerca de la inclusión de técnicas y herramientas de innovación logística que permitan la adaptación de las herramientas analizadas en este artículo. Se pudo concluir que aunque hay iniciativa por parte de las empresas en la inclusión de técnicas y nuevas herramientas para mejorar sus procesos, aun es baja la inclusión de ellas. Sin embargo, se hacen evidentes las buenas prácticas industriales y el acompañamiento en algunos casos de instituciones públicas y privadas permitiendo mejor entendimiento y comprensión de la inclusión de herramientas que apoyen estos procesos.

Palabras clave: heurísticas; metaheurísticas; industria 4.0; optimización; procesos logísticos.

Autor para correspondencia:
*Correo electrónico:leonor.cerveleon@unipamplona.edu.co

© 2020. Fundación de Estudios Superiores Comfanorte.

Abstract

Optimization tools have been used in different fields of knowledge, mainly in the solution of logistic problems. Among the most used tools are Ant Colony, Tabu Search, Genetic Algorithms, Simulated Annealing, among other tools that contribute to provide solutions to real problems in different areas and productive sectors. The purpose of this article is to determine the optimization tools that can be used in logistic processes, specifically in the coal sector. For this purpose, a description of the most suitable optimization models was made, among which are the most appropriate heuristic and metaheuristic methods for future implementation in the solution of a logistic problem. In the same way, the importance of including Industry 4.0 tools that are applicable to the problems faced by the coal sector in order to contribute to the optimization of these processes is shown. Next, this article presents a general overview of the logistics processes that are currently carried out in the coal sector of our country, as well as shows a consolidation of heuristic and metaheuristic techniques which would be of great importance to be applied in the coal sector. Additionally, the importance of the inclusion of Industry 4.0 tools that can be included in conjunction with optimization tools and can further enhance the improvement of logistics processes carried out in the coal sector is made known. Finally, we present the results of the application of an initial diagnosis in which 106 coal companies in the department of Norte de Santander were taken as a basis for analysis, with the purpose of inquiring about the inclusion of logistics innovation techniques and tools that allow the adaptation of the tools analyzed in this article. It was concluded that although there is initiative on the part of the companies in the inclusion of techniques and new tools to improve their processes, their inclusion is still low. However, good industrial practices and the support in some cases of public and private institutions are evident, allowing a better understanding and comprehension of the inclusion of tools that support these processes.

Keywords: heuristics; metaheuristics; industry 4.0; optimization; logistics processes.

Introducción

En la actualidad, la logística es un instrumento que permite intensificar los mercados en los cuales se desenvuelve una empresa. Una adecuada coordinación de los procesos que involucran la logística, hacen que sea más fácil acceder a todos aquellos involucrados en una cadena de abastecimiento. Esto permite que las empresas sean más competitivas en el mercado, pero para poder conseguirlo, es importante que en los procesos logísticos se implementen herramientas alternativas que permitan mejorar y optimizar su desempeño. Los métodos heurísticos y metaheurísticos brindan soluciones recomendables a problemas difíciles de solucionar a través de estrategias para el diseño y/o mejoramiento de los procesos. De la misma manera, es importante destacar que la optimización de los procesos no solo se realiza con la implementación de métodos matemáticos, sino que adicionalmente se deben incluir tecnologías como herramientas computaciones, internet de las cosas, sistemas ciber-físicos entre otros, incluidas en la industria 4.0.

Otros trabajos se han desarrollado en el ámbito de la logística, entre los más notables se encuentra el trabajo desarrollado por [1], quienes realizaron en su investigación rediseñando una red de cadena de suministros con múltiples niveles y materias primas utilizando búsqueda tabú, ejecutando experimentos computacionales para explorar el espacio de las variables de ubicación de las instalaciones. Finalmente, obtuvo como resultado que el esquema de oscilación estratégica funciona correctamente al usar búsqueda tabú [1]. Para [2], la solución al problema de localización y ruteo se realizó por medio de recocido simulado con búsqueda granular. El propósito de esta investigación se concentró en determinar los depósitos a ser abiertos, cuáles de sus clientes se debían situar a cada depósito abierto y que rutas convenían construirse para poder satisfacer la demanda de los clientes. Esto permite minimizar costos de depósitos, vehículos y costos de las rutas a ser asignados a

cada depósito abierto, y las rutas a ser construidas para cumplir las demandas realizadas por los clientes, mostrando el valor de esta investigación [2]. En el trabajo realizado por [3], se muestra la necesidad de la implementación de soluciones innovadoras en procesos logísticos y en la cadena de suministro debido a la industria 4.0, internet de las cosas y Big data. En esta investigación se da a conocer que la aplicación de este tipo de herramientas proporciona valor para los clientes, en correspondencia con los tiempos de entrega oportunas, disponibilidad del producto y la fiabilidad de la organización al utilizar productos inteligentes e incluyendo la innovación como un socio estratégico que permite concebir factores clave de éxito para las empresas que quieren estar a la delantera de la globalización y el ambiente actual de las empresas [3].

Algunos trabajos relevantes desarrollados en el área de logística puntualmente para el sector carbón, son los realizados por [4] con la Universidad Francisco de Paula Santander-Cúcuta, en el que se da a conocer el análisis a modo general de la situación del sector carbón en este departamento. En cuanto a la logística puntualiza en los procesos de transporte y comercialización resaltando que las principales vías de acceso son trochas por lo cual el pequeño minero prefiere tercerizar este proceso. Adicionalmente establece que existen 5 o 6 patios de acopio propiedad de intermediarios y cooperativas en donde los pequeños mineros llevan el producto para ser comercializado al interior del país, principalmente termoeléctricas. El carbón que se dirige al exterior se concentra en 3 centros de acopia propiedad de Colcarbex (cooperativa multiactiva) [4]. También resaltan trabajos como el de Hermenegildo Gil Gómez, Martín D. Arango Sierra, y Julián A. Zapata Cortés [5], donde reflejan la importancia de la logística esbelta en el transporte en el sector minero aurífero, planteando 4 ítems para su aplicación: flexibilidad, relación con los transportadores, comunicación, optimización de rutas y operaciones. Dentro de esta investigación se plantean métodos como: Método de Ahorros, Método de barrido, Metaheurísticos: Recocido simulado, búsqueda tabú, algoritmos genéticos, colonias de hormigas [5]. Es de suma importancia ver que diversos investigadores en el ámbito nacional e internacional muestran su interés en la optimización de los propósitos básicos de la logística, como es el trabajo desarrollado por Luis Gabriel Márquez, quien se centra en la optimización de una red de transporte combinado para la exportación del carbón del interior de Colombia identificando las rutas óptimas del carbón desde los distritos de producción localizados en el interior del país hasta los puertos marítimos de exportación. Se establece una red de flujo de mínimo costo considerando transporte por carretera, fluvial y ferroviario integrando infraestructuras ferroviaria y fluvial por el puerto de barranquilla y carretera y fluvial.

La optimización se llevó a cabo por medio de la técnica de programación lineal [6]. Investigaciones como la de [7] y la de [8] resaltan la necesidad del tema no solo en Colombia sino en países como China donde son uno de los países principales productores de este mineral y al mismo tiempo consumidores del mismo, en donde estos investigadores realizaron un modelo de la cadena de suministro del carbón basado en red de Petri, con el propósito de optimizar dicha cadena, por medio de la optimización de recursos y el medio ambiente con el fin de satisfacer la demanda de los clientes. Se hace uso del flujo de capital y el flujo logístico mediante el método simplex de programación lineal y se establece mediante la red de Petri orientada a objetivos desde la perspectiva del flujo de trabajo [7]. En estas investigaciones se han realizado estudios que incluyen el rediseño de cadenas de suministro usando búsqueda tabú, solución a problemas de

localización y rutas por medio de recocido simulado con búsqueda granular, soluciones en la logística y en la cadena de suministros utilizando industria 4.0, internet de las cosas y Big Data, logística esbelta en el transporte del sector minero utilizando técnicas como colonia de hormigas, recocido simulado, búsqueda tabú, algoritmos genéticos, entre otros. De la misma manera, trabajos basados en algoritmos de búsqueda tabú para la optimización del enrutamiento de vehículos abiertos de material de minas de carbón, algoritmos genéticos que tienen como fundamento métodos de muestreo de máxima verosimilitud, búsqueda de vecindario y recocido simulado con el fin de establecer rutas de almacenamiento para optimizar la ubicación de los depósitos, el enrutamiento de salida y los planes de seguridad.

En cuanto a la industria 4.0 se han realizado diversos estudios dentro de los que se destacan estudios de múltiples análisis de casos de aplicación de industria 4.0 realizando una clasificación según sectores de actividad y departamentos empresariales [9], identificando el impacto de diversas tecnologías en los diversos sectores empresariales lo que permite que las empresas conozcan alternativas en cuanto a la implementación de nuevas tecnologías que les permitan aportar soluciones a los problemas que se puedan presentar en el ámbito en el que se desempeñan.

De igual forma, investigaciones como la realizada por [10] en la cual se hace un análisis utilizando como soporte modelos para la colaboración interdisciplinaria en el marco de la industria 4. 0, esto aporta un nuevo método que representa un ambiente de comunicación directa entre los expertos interdisciplinarios, realizando talleres de gestión de procesos comprometiéndose en procesos de planificación, configuración y preparación de escenarios de producción con expertos de otras disciplinas como la informática, la logística o la ingeniería aplicando enfoques basados en ontologías.

Los trabajos analizados anteriormente evidencian la importancia de la temática que será base en este proyecto, demostrando que los métodos heurísticos y metaheurísticos son altamente utilizados en problemas logísticos. Además, se evidencia la relevancia que tiene la aplicación de herramientas tecnológicas partiendo de la base de la industria 4.0 lo cual permite que las empresas se encuentren a la vanguardia de los nuevos adelantos tecnológicos que hagan que sus procesos sean más dinámicos y satisfagan las expectativas y necesidades de los clientes.

Adicionalmente, es necesario resaltar que la industria del carbón tanto en el ámbito nacional como internacional está buscando alternativas diferentes para mejorar sus procesos incluyendo la logística. Es evidente que en nuestro país el sector carbón se ha analizado de manera descriptiva, pero hace falta un análisis más profundo de la cadena de carbón que permita aportar soluciones factibles a problemas reales del entorno. Es precisamente aquí, donde radica la diferencia de esta investigación con respecto a los trabajos analizados anteriormente, ya que, si bien es cierto que se ha analizado el sector, no se ha planteado un modelo que conjugue todos los procesos logísticos que están inmersos dentro del sector carbón utilizando los métodos heurísticos y metaheurísticos y las herramientas que proporciona la industria 4.0 [10-14].

Por todo lo anterior, se puede concluir que este artículo da un aporte demostrativo en los procesos logísticos que hoy por hoy se presentan en el sector carbón del departamento en donde, se hará uso de diferentes técnicas que no se han usado en los procesos logísticos del presente.

Materiales y Métodos

Procesos logísticos en la cadena del carbón

Para describir los procesos logísticos que se encuentran inmersos dentro de la cadena del carbón, es necesario identificar los elementos básicos que intervienen en un proceso logístico de manera general. Dentro de ellos podemos encontrar cuatro grandes elementos que son: proveedores de insumos y materia primas, transformación, producto y comercialización. Es importante identificar las condiciones específicas en las cuales se encuentra el sector en el departamento Norte de Santander, por ello en la figura 1 se muestra dicho proceso teniendo en cuenta no solo los procesos que involucran la cadena del carbón sino los procesos que intervienen de manera indirecta y paralela y que son importantes para los procesos ejecutados en la cadena del carbón [15].

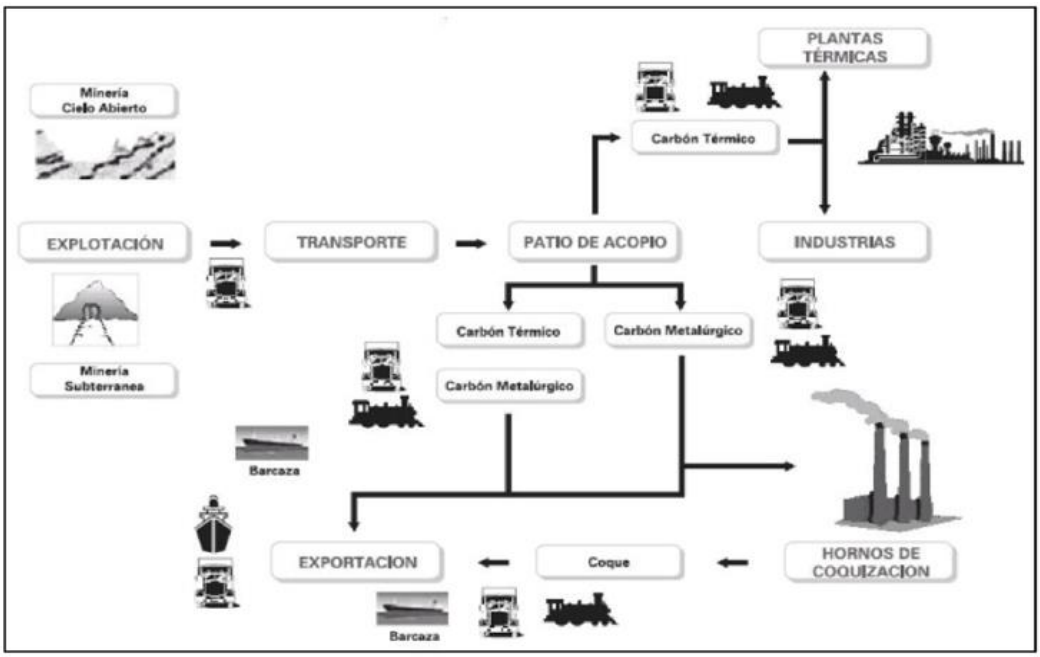

Figura 1. Cadena del carbón en Colombia

Fuente: Plan Estratégico departamental de Ciencia, tecnología e innovación – PEDCTI 2014-2020

Modelos de optimización

Para que los procesos logísticos se puedan desarrollar de una manera eficiente, es importante recurrir a herramientas como el análisis de decisiones, modelos matemáticos, sistemas de optimización, simulación, entre otros, que permiten dar soluciones a problemas de transporte, costos, distribución, servicio al cliente, los cuales hacen necesario que los gerentes conozcan y dominen estas herramientas para una toma de decisiones adecuada en pro del mejoramiento de los procesos logísticos de las organizaciones.

Para el desarrollo de un modelo de optimización es importante tener en cuenta los pasos que se muestran en figura 2. Aquí se muestra cuáles son los pasos mínimos para poder llevar a cabo el desarrollo de un modelo de optimización. Algunas de las herramientas utilizadas para el desarrollo de modelos de optimización se pueden encontrar en técnicas heurísticas y metaheurísticas, las cuales proporcionan

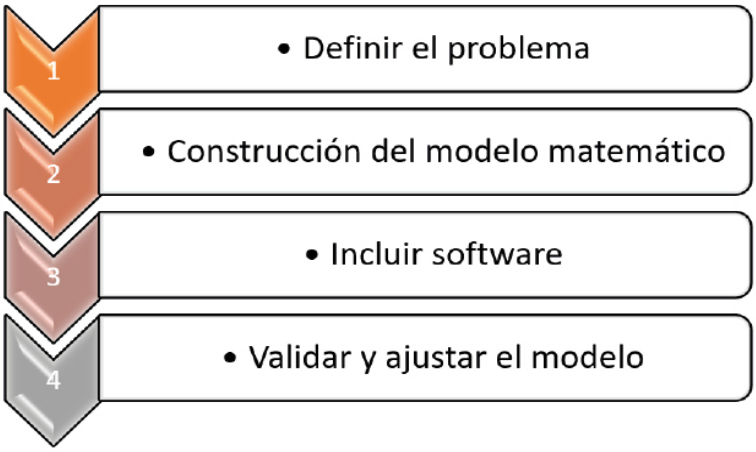

Figura 2. Pasos mínimos para desarrollar un modelo de optimización

Fuente: Propia

Heurísticas y metaheurísticas

Heurísticas

En todos los campos existen problemas complejos de solucionar y en el área de la logística no es la excepción, debido a que se pueden hallar problemas en los cuales no logramos garantizar el encontrar una solución óptima. Es aquí donde encontramos los métodos heurísticos, las cuales permiten encontrar una solución buena así no sea la óptima [16-18].

Estos métodos se clasifican en [16-18]:

- Métodos de descomposición: el problema se descompone en problemas más pequeños de resolver teniendo presente que todos pertenecen al mismo problema.

- Métodos inductivos: buscan generalizar las técnicas para que sean más fáciles de analizar y aplicar a todo el problema.

- Métodos de Reducción: permiten determinar propiedades que se cumplan en mayor proporción e incluirlas como restricciones del problema, con el fin de limitar el área de soluciones al reducir el problema dejando por fuera las soluciones óptimas del problema inicial.

- Métodos constructivos: se basa en la mejor elección en cada iteración. Se construye paso a paso la solución del problema.

- Métodos de búsqueda local: inician con una solución del problema la cual va mejorando de manera incremental, finalizando en el instante en que para la solución no existe ninguna solución que permita mejorarla.

Las técnicas heurísticas permiten buscar soluciones flexibles y firmes en cuanto a las características del problema, lo cual permite que se busquen inicialmente soluciones buenas [16-18].

Metaheurísticas

Son herramientas que permiten crear estrategias para diseñar y/o mejorar los problemas que son difíciles de encontrar una solución óptima, esto permite que se realice una combinación de conceptos de diversos campos del conocimiento como la Inteligencia artificial, Matemática, Biología, física, Genética y algunos otros que permiten la generación de algoritmos nuevos con el fin de encontrar soluciones óptimas [16-18].

Los métodos metaheurísticos se pueden clasificar en [16-18]:

• Metaheurísticas inspiradas en la física: Recocido simulado, es una técnica basada en el calentamiento y enfriamiento de un metal.

• Metaheurísticas inspiradas en la evolución: dentro de algunas de ellas se encuentran los Algoritmos genéticos, los cuales se basan en las formas de selección que utiliza la naturaleza, determinando que individuos se adaptan fácilmente a los cambios del entorno.

• Metaheurísticas inspiradas en la biología: Optimización basada en colonias de Hormigas, en las cuales individuos se comunican mediante feromonas, restableciendo una repetición de recorridos que demarcan la vía óptima entre su nido y donde se encuentra su fuente de alimentación [16-18].

Algunas de las técnicas metaheurísticas más utilizadas en la solución de problemas logísticos se encuentran [19]:

Colonias de Hormigas.

Este algoritmo se basa en el comportamiento real de las hormigas en la solución de problemas de optimización. Dicho comportamiento consiste en encontrar el camino más corto entre la fuente de alimento y el hormiguero. Para ello esparcen una sustancia química llamada feromona, la cual puede detectarse al olor por lo cual pueden encontrar el camino de manera más fácil, sin embargo, si no existen rastros de feromona, las hormigas encuentran el camino de manera aleatoria.

De esta manera funciona la optimización basada en colonias de hormigas, en las cuales necesitan de elementos computacionales que realicen la simulación de una colonia de hormigas artificial, al mismo tiempo que la simulación de rastros de feromona artificial. Estos algoritmos construyen la solución a medida que las hormigas recorren el grafo de construcción identificando los posibles pasos que podría dar la hormiga la realizar el recorrido por el grafo [19-21]. En los pasos de la hormiga, se registran dos tipos de información que direccionan los movimientos de la hormiga, la información heurística que permite medir la preferencia de moverse de un nodo hacia otro; y la información de los rastros de feromona artificiales, la cual mide la preferencia de moverse de un nodo a otro teniendo en cuenta la "deseabilidad aprendida", la cual se puede modificar en la ejecución del algoritmo y dependiendo de las soluciones encontradas [22-26].

Búsqueda Tabú

Esta herramienta metaheurística se basa en el trabajo basado en la utilización de la memoria adaptativa la cual utiliza estrategias inteligentes para la solución de problemas complejos al desarrollar una búsqueda inteligente usando técnicas con estructura de memoria. Estas estrategias se establecen en procedimientos implícitos y explícitos de aprendizaje [26-27].

La memoria adaptativa que se genera en la Búsqueda Tabú permite que se tenga en cuenta los antecedentes para el proceso de solución de problemas al contemplar que se creen las estructuras necesarias para sacar provecho de los antecedentes del proceso de solución de problemas, de esta manera se trabaja basado en la experiencia y aprendizaje obtenido en dicho proceso [28-30].

Industria 4.0

La industria 4.0 es denominada la cuarta revolución industrial, gracias a que uno de los principales objetivos de esta herramienta es realizar una conexión entre el mundo

físico real y el mundo virtual de las organizaciones [31-38]. Esto permite que los procesos que se generen al interior estén interconectados y se puedan conocer y manejar en tiempo real teniendo en cuenta la tecnología y el manejo de información por medio de las tecnologías de la información y las comunicaciones. Esta herramienta busca que se dé un flujo de información de manera continua tanto en el ámbito interno y externo, esto permite que la comunicación sea instantánea, es decir, en tiempo real permitiendo niveles más personalizados de producción convertidos en flexibilidad, aumento en la calidad y productividad, entre otros beneficios [39-43]. Algunas de las tecnologías base para la aplicación de esta herramienta son [44-52]:

- Big Data
- Internet de las Cosas (IoT)
- Sistemas Ciber-Físicos (CPS)
- La Nube
- Simulación
- Realidad Aumentada
- Fabricación Aditiva
- Ciber seguridad
- Robots

Resultados y discusión

En la figura 3, se muestran los elementos integrantes dentro de un proceso logístico en el sector carbón. Nótese la importancia de la inclusión de las herramientas como las heurísticas, metaheurísticas integradas con las técnicas de la industria 4.0. Estas herramientas que actúan en conjunto pueden proporcionar a las organizaciones, soluciones importantes a los problemas reales que se presentan en el día a día de sus actividades. Así mismo, permiten encontrar soluciones óptimas aplicables a los problemas logísticos que se presentan en este sector, pues como se mencionó anteriormente estas herramientas se pueden utilizar en problemas de rutas de transporte, minimización de costos, mejoramiento de la distribución, localización, entre otros.

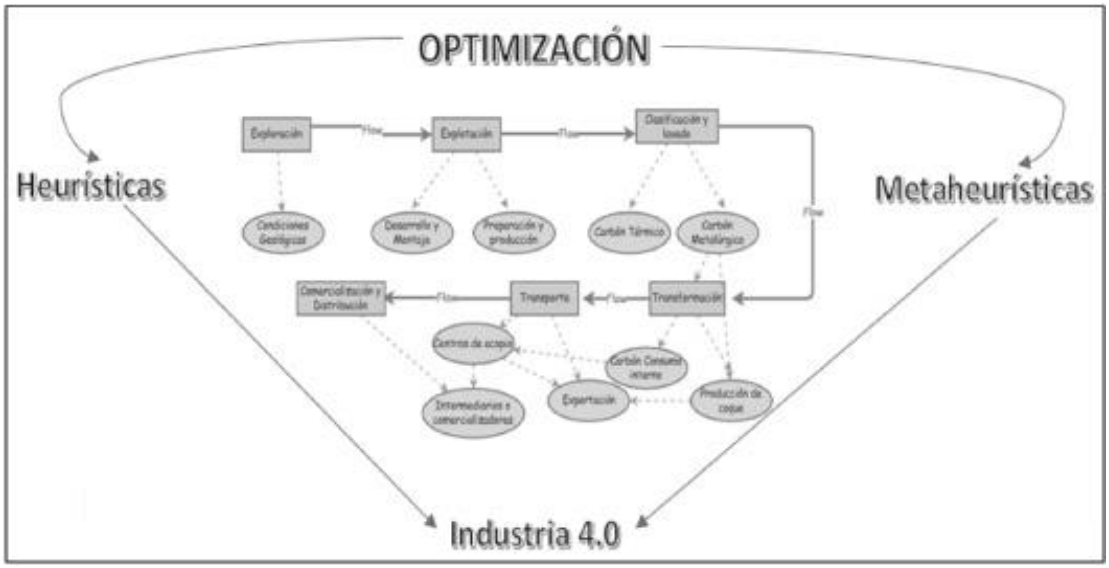

Figura 3. Integración de los procesos logísticos del sector carbón con las herramientas de optimización. **Fuente:** Propia

Se ha realizado un estudio de diagnóstico preliminar en el marco del presente proyecto en el cual se tomaron como base 106 minas de carbón ubicadas en el departamento Norte de Santander en las cuales se aplicó un instrumento inicial que servirá para evidenciar el estado actual de las minas en cuanto a procesos de innovación, investigación y desarrollo, co-creación con clientes y consumidores, propiedad intelectual entre otros. Este instrumento está comprendido por 54 preguntas de las cuales se muestra un análisis descriptivo utilizando medidas de tendencia central que permitan identificar de manera general como se encuentran las empresas en los procesos mencionados anteriormente y que sirven como información de contexto para los habilitadores de la logística inteligente o logística 4.0.

La Figura 4, muestra las mediciones estadísticas del valor que más se repite en cada resultado de la encuesta, a esta medida se le llama moda. Aquí se puede observar que la empresa etiquetada con el número 26 es la empresa que mantiene sus prácticas de innovación en un valor promedio de 3.75, esto significa A Menudo (AM), lo cual indica que en su gran mayoría esta empresa procura por aplicar prácticas de innovación sin saber que estas acciones permiten posicionarla como una de las pocas en realizarlo, mientras que el resto mantienen valores por debajo de 2.5, lo cual caracteriza un escenario en el sector de pocas prácticas de innovación.

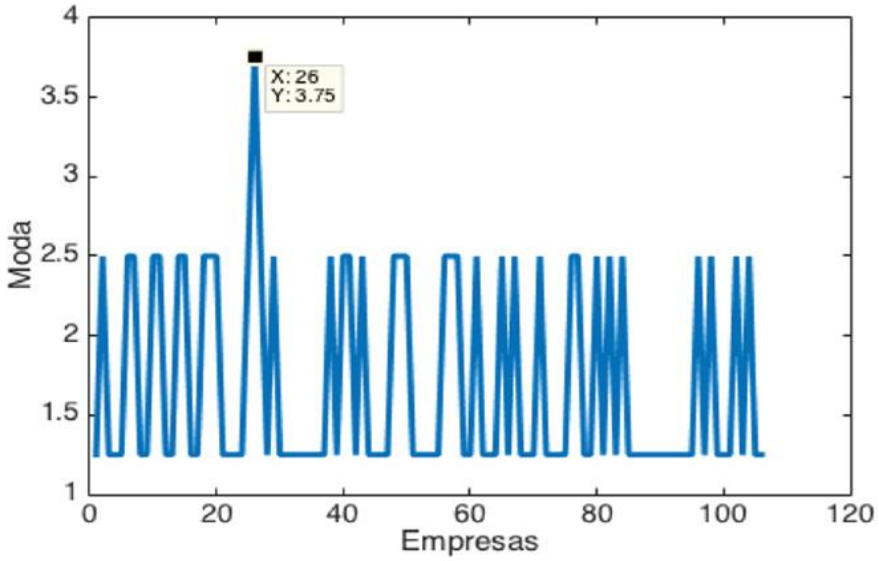

Figura 4. Modas de los datos por empresas

En la figura 5, se indica la mediana de los datos por empresa, la cual presenta el valor central del conjunto de datos. En esta figura se evidencia que 3 empresas superan el valor de las respuestas a las preguntas por encima de un valor de 3 siendo más positivas que negativas. Esto quiere decir que mantienen unos estándares de prácticas de innovación de mejor manera o de manera más estable y superior que el resto de las empresas, pero sigue siendo muy bajo y poco representativo con respecto al universo de la muestra. El 16,98% de las empresas muestra una mediana de un poco más de 1,6 indicando que el 50% de sus respuestas se encuentran ubicadas en valores negativos como Nunca, Muy negativo, Totalmente en desacuerdo o muy por debajo de sus competidores. Adicionalmente el porcentaje restante de las empresas está en valores promedios de respuesta de 2,5 lo cual muestra que el 50% se encuentra en respuestas como algunas veces, de acuerdo, similar

a los competidores entre otras; lo anterior caracteriza un sector que es más que líder en procesos de innovación es seguidor para la adopción de estrategias de innovación.

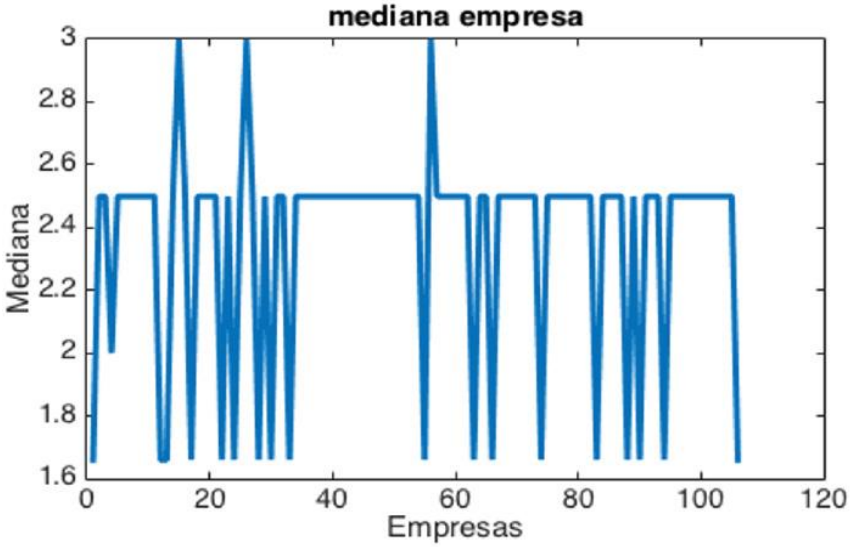

Figura 5. Mediana de los datos por empresa

En la figura 6, se muestra el promedio por cada una de las empresas encuestadas, destacándose 4 empresas (3,77%) que presentan los picos más altos en sus promedios, lo cual indica que estas desarrollan de mejor manera prácticas de innovación que el 96,23% restante. Además de ello, el promedio de los datos por empresa muestra que el 96,23% de ellas desarrolla en forma similar sus prácticas de innovación abierta pero que no se referencian como prácticas disruptivas para el sector.

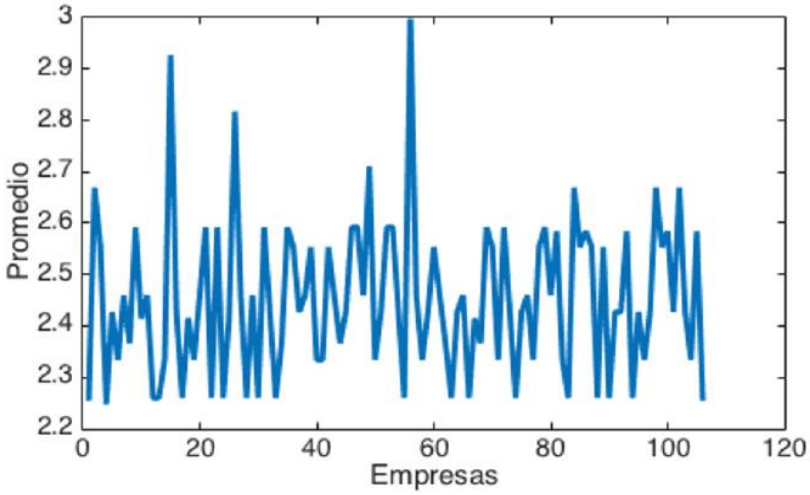

Figura 6. Media de los datos por empresa

La figura 7, muestra los datos obtenidos para la varianza, la cual expresa la dispersión existente en los datos en relación con la media que se obtiene de la diferencia de los datos con la media del conjunto. Por lo anterior se puede decir que existe un 14,15% de las empresas que se encuentra con una varianza entre 0,7 a 0,9 indicando que existe homogeneidad de

estas empresas con respecto a la media del conjunto, es decir, hay poca dispersión por lo cual se expresa que entre ellas existe similitud con una regular aplicación de prácticas de innovación abierta.

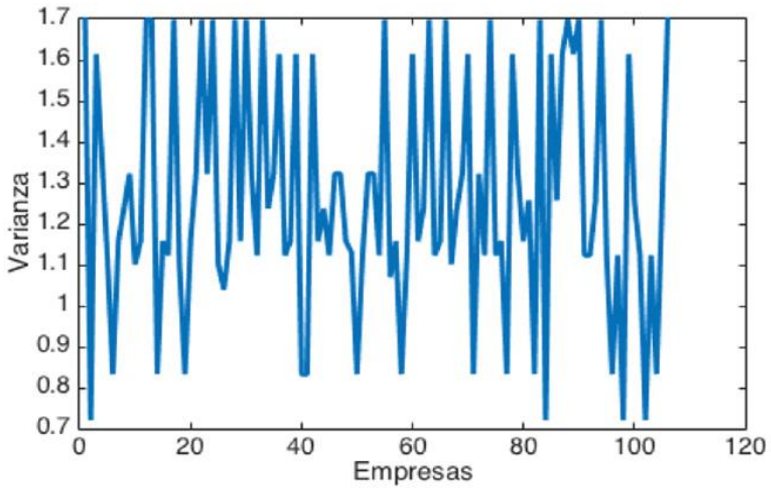

Figura 7. Varianza de los datos por empresa

Por ejemplo, la empresa número 81 presenta un promedio 2,3 en sus respuestas y una varianza de 0,7, esto indica que la mayoría de sus respuestas en cuanto a aplicación de prácticas de innovación abierta se encuentran en escalas como: muy negativo, negativo, algunas veces, Nunca y como máximo estable o a menudo. Lo anterior teniendo en cuenta que el valor de la varianza es muy pequeño y por tanto no hay dispersión en las respuestas obtenidas de esta empresa.

Un 23,58% restante de las empresas presenta varianza con valores entre 1,6 y 1,7 es decir que se alejan del promedio del conjunto por lo tanto los datos son dispersos mostrando que estas empresas aplican sus prácticas de manera diferente entre sí. Además de ello existe un 62,27% de las empresas que presentan varianzas entre 1 y 1,4 lo cual indica que, aunque no se alejan mucho del promedio no existe comparación en cuanto a la aplicación de prácticas de innovación abierta entre sí.

Finalmente, en la figura 11, podemos encontrar la desviación estándar de los datos por empres. Los análisis de la desviación estándar son similares a los obtenidos por el análisis de la varianza, teniendo en cuenta que esta es la raíz cuadrada de la varianza. Por lo tanto, en los posteriores análisis de resultados solo se trabajará con la varianza.

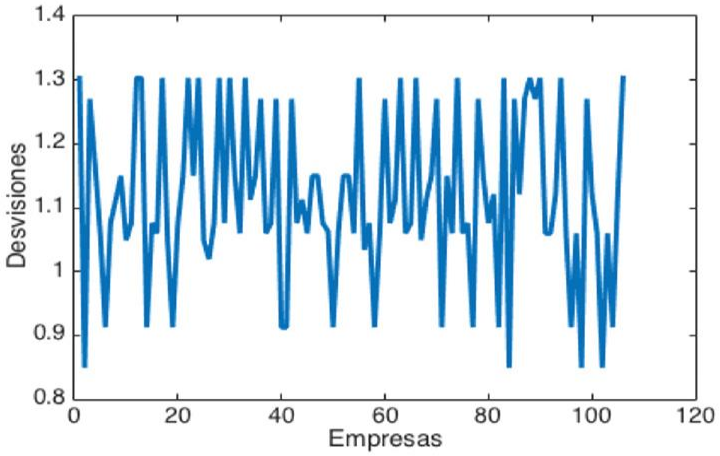

Figura 11. Desviación estándar de los datos por empresa

Conclusiones

Según el análisis de los estudios teóricos, así como el análisis de los elementos que integran los procesos logísticos y específicamente los del sector carbón, integrados con herramientas como las heurísticas, meta heurísticas y técnicas de la industria 4.0 permiten que los procesos logísticos tengan una relevancia y una evolución en los últimos años, esto se hace evidente en los diversos trabajos consultados en los cuales se utilizan algunas de estas herramientas para la solución de problemas en el área de la logística. De la misma forma, se muestra la importancia en la búsqueda de soluciones óptimas a los problemas que presenta el sector y su solución a través de estas herramientas.

Se evidencian brechas en cuanto a la adopción de procesos de innovación logística para el sector carbón y de diferentes tipos en tanto un gran número de empresas del sector refieren bajos niveles de adopción de tecnologías, pero buenas prácticas industriales; además de esto refieren algunos procesos de innovación abierta que facilitan la adopción de modelos y técnicas heurísticas y meta heurísticas para sus procesos logísticos pero se requieren procesos de adaptación y de apropiación tecnológica fundamentales para cerrar dichas brechas.

Referencias

[1] M. T. Melo, S. Nickel, and F. Saldanha-da-Gama, “A tabu search heuristic for redesigning a multi-echelon supply chain network over a planning horizon,” *Int. J. Prod. Econ*., vol. 136, no. 1, pp. 218–230, Mar. 2012

[2] J. W. Escobar and R. Linfati, “Un Algoritmo Metaheurístico Basado en Recocido Simmulado com Espacio de Busqueda Granular para el Problema de Localizacion y ruteo con Restricciones de Capacidade,” *Rev. ing. univ. Medellín*, vol. 11, no. 21, pp. 139–150, 2012

[3] K. Witkowski, “Internet of Things, Big Data, Industry 4.0 – Innovative Solutions in Logistics and Supply Chains Management,” *Procedia Eng.*, vol. 182, pp. 763–769, 2017

[4] J. E. Rodríguez-Guevara y A. Mora-Urbina, "Diagnóstico de la logística del carbón en Norte de Santander", *Respuestas,* vol. 20, n.º 1, pp. 30–37, ene. 2015

[5] H. Gil et al., “Logística esbelta aplicada al transporte en el sector minero,” pp. 121–136, 2009

[6] L.G Márquez, "Optimización de una red de transporte combinado para la exportación del carbón del interior de colombia", *Revista EIA,* vol. 16, pp. 103–113, 2011

[7] L. Man-zhi, Z. Mei-hua, L. Xue-qing, and Y. Ji-xian, "The research on modeling of coal supply chain based on objectoriented Petri net and optimization," *Procedia Earth Planet. Sci.*, vol. 1, no. 1, pp. 1608–1616, 2009

[8] Y. Xiao and A. Konak, "A genetic algorithm with exact dynamic programming for the green vehicle routing & scheduling problem," *J. Clean. Prod.*, pp. 1–14, 2016

[9] S. Yu, C. Ding, and K. Zhu, "A hybrid GA-TS algorithm for open vehicle routing optimization of coal mines material," *Expert Syst. Appl.*, vol. 38, no. 8, pp. 10568–10573, 2011

[10] S. Q. Liu and E. Kozan, "A hybrid metaheuristic algorithm to optimise a real-world robotic cell," *Comput. Oper. Res.*, vol. 84, pp. 188–194, 2017

[11] J.L. Del Val Romám, Industria 4.0: la transformación digital de la industria. En Valencia: Conferencia de Directores y Decanos de Ingeniería Informática, Informes CODDII. 2016

[12] L. Aguilar, *Industria 4.0: la cuarta revolución industrial*. Marcombo, 2017

[13] M. Navarro and X. Sabalza, "Reflexiones sobre la Industria 4.0 desde el caso vasco." Ekonomiaz: *Revista vasca de economía,* vol. 89, pp. 142-173, 2016

[14] C.B. Ynzunza Cortés, J.M, Izar Landeta, J.G. Bocarando Chacón, F. Aguilar Pereyra, Felipe y M. Larios Osorio. "El entorno de la industria 4.0: implicaciones y perspectivas futuras." *Conciencia tecnológica,* vol. 54, pp. 33-45, 2017

[15] Plan Estratégico Departamental de Ciencia Tecnología e Innovación PEDCTI 2014-2020, pp. 434–440, 2014

[16] O. Suarez. "Una aproximación a la heurística y metaheurísticas", *INGE@ UAN*, Vol. 1, pp 1-8, 2011

[17] L. Flores Garrido y C. Oliva San Martín, "Algoritmos para el problema de localización de plantas y centros de distribución maximizando beneficio. Ingeniare", *Revista chilena de ingeniería*, vol. 24, no. 3, pp. 493-501, 2016

[18] E. Guzmán Ortiz, and R. Poler. "Modelos y algoritmos para la optimización de planes de aprovisionamiento, producción y distribución en empresas industriales y cadenas de suministro." *13th International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management.* Servicio de Publicaciones de la Universidad de Oviedo, 2019

[19] N. Umang, M. Bierlaire, and I. Vacca, "Exact and heuristic methods to solve the berth allocation problem in bulk ports," *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.*, vol. 54, pp. 14–31, 2013

[20] X.-C. Dong and G.-X. Wang, "Coal Logistics Competency Strategies for Ports in the Tianjin and Hebei Regions around the Bohai Bay in China," *Energy Procedia,* vol. 17, pp. 436–443, 2012

[21]C.A Robles Algarín, "Optimizaciónpor colonia de hormigas: aplicaciones y tendencias", *Revista Ingeniería Solidaría*, vol. 6, núm. 10, pp. 83-89, 2010

[22] M. Dorigo and T. Stützle, "Ant colony optimization: overview and recent

advances", *In Handbook of metaheuristics* (pp. 311-351). Springer, Cham, 2019

[23].W. Deng, J. Xu, and H. Zhao, "An improved ant colony optimization algorithm based on hybrid strategies for scheduling problem, *IEEE access,* vol. 7, pp. 20281-20292, 2019

[24.]Q. Yang, W.N. Chen, Z. Yu, T. Gu, Y. Li, H. Zhang and J. Zhang, "Adaptive multimodal continuous ant colony optimization". *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 21, no. 2, pp. 191-205, 2016

[25] N. Romero, E. Flórez and L. Mendoza, "Optimization of a multi-link steering mechanism using a continuous genetic algorithm", *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 31, no. 7, pp. 3183-3188, 2017

[26]E. López, and E. Vílchez, "Método de búsqueda tabú para optimización combinatoria apoyado con el software wolfram mathematica." *Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones,* vol. 26.1, pp. 99-114, 2019

[27] D. L. P. Marti, "Análisis de Casos de Estudio sobre Industria 4.0 y Clasificación según Sectores de Actividad y Departamentos Empresariales.," 2016

[28] N. Hou, F. He, Y. Zhou and H. Ai, "A GPU-based tabu search for very large hardware/software partitioning with limited resource usage", *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, vol. 11, no. 5, 2017

[29] Y. Xia, and Z. Fu, "Improved tabu search algorithm for the open vehicle routing problem with soft time windows and satisfaction rate", *Cluster Computing*, vol. 22, no. 4, pp. 8725-8733, 2019

[30] Y. Xia, Z. Fu, L. Pan and F. Duan, "Tabu search algorithm for the distance-constrained vehicle routing problem with split deliveries by order", *PloS one*, vol. 13, no. 5, pp. e0195457, 2018

[31]L. C. Ríos-Ramírez, L. Pérez-Domínguez, y I. J. C. Pérez Olguin, "Tendencias actuales de la industria 4.0", reflex. contab. (Cúcuta), vol. 2, no. 2, pp. 8–22, jul. 2019

[32] A. Garrell, and G. Lloren, *La industria 4.0 en la sociedad digital*, Marge books, 2019

[33]T.K. Sung, "Industry 4.0: a Korea perspective". *Technological forecasting and social change, 132, 40-45, 2018*

[34] L. D. Xu, E. L. Xu and L. Li, "Industry 4.0: state of the art and future trends", *International Journal of Production Research*, vol. 56, no. 8, pp. 2941-2962, 2018

[35] A. G. Frank, L. S. Dalenogare, and N. F Ayala, "Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies", *International Journal of Production Economics*, 210, 15-26, 2019

[36] T. Wagner, C. Herrmann adn S. Thiede, "Industry 4.0 impacts on lean production systems", *Procedia Cirp*, vol. 63, pp. 125-131, 2017

[37]L.S. Dalenogare, G.B. Benitez, N. F. Ayala and A.G. Frank, "The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance", *International Journal of Production Economics*, vol. 204, pp. 383-394, 2018

[38] A. Acosta. S&OP como herramienta de alineación entre la estrategia corporativa

y la estrategia de Supply Chain–Caso Coca Cola Femsa, 2018

[39] L. D. Xu, E. L. Xu and L. Li, "Industry 4.0: state of the art and future trends. International", *Journal of Production Research*, vol. 56, no. 8, 2941-2962, 2018

[40] L. Li, Y. Lei, S. Wu, C. He and D. Yan, "Study on the coordinated development of economy, environment and resource in coal-based areas in Shanxi Province in China: based on the multi-objective optimization model", *Resources Policy,* vol. 55, 80-86, 2018

[41] V. Hrinov and A. Khorolskyi, "Improving the process of coal extraction based on the parameter optimization of mining equipment", *In E3S Web of Conferences*, vol. 60, p. 00017, 2018

[42] H. R. Maier, S. Razavi, Z. Kapelan, L. S. Matott, J. Kasprzyk and B. A. Tolson, "Introductory overview: Optimization using evolutionary algorithms and other metaheuristics". *Environmental modelling & software,* 114, 195-213, 2019

[43] J. D. Fernández, *La industria 4.0: Una revisión de la literatura*, en Desarrollo e Innovación en ingeniería, Medellín-Colombia; Editorial Instituto Antioqueño de Investigación p. 369, 2017

[44] M. Quintero-Méndez y M. Jerez-Rico, "Un enfoque metaheurístico para optimizar la planificación de cortas en plantaciones forestales A metaheuristic approach for optimizing the harvest scheduling in forest plantations", *Revista Ciencia e Ingeniería.* vol, 38, no. 3, 2017.

[45]J.M. Orjuela Ramos, "Optimización por técnicas metaheurísticas aplicadas a unidades destilación (CDU)–hidroruptura (HC) para mantener rendimiento y calidad del diésel obtenido", trabajo de fin de grado Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2017

[46] M. F. Valdiviezo Condolo, "Diseño y aplicación de técnicas metaheurísticas para control de tráfico", trabajo de fin de grado Maestría, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2017

[47] A. Benítez-Hidalgo, A. J. Nebro, J. García-Nieto, I. Oregi and J. Del Ser, "jMetalPy: A Python framework for multi-objective optimization with metaheuristics". *Swarm and Evolutionary Computation*, 51, 100598, 2019

[48] C. B. Y. Cortés, J. M. I. Landeta y J. G. B. Chacón, "El entorno de la industria 4.0: implicaciones y perspectivas futuras", *Conciencia tecnológica*, vol. 54, pp. 33-45, 2017

[49] F. F. Santiago Valdez, "Obtención y optimización del carbón activado a partir de los residuos de tecnopor (poliestireno-6) para su posterior uso en la industria", trabajo de fin de grado Maestría, Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, 2019

[50] Bearzotti, L. A. (2018). Industria 4.0 y la Gestión de la Cadena de Suministro: el desafío de la nueva revolución industrial. Gaceta Sansana, 3(8).

[51] M.J. Naji, "Industria 4.0, competencia digital y el nuevo Sistema de Formación Profesional para el empleo", *Revista Internacional y Comparada de relaciones laborales y derecho del empleo,* vol. 6, no. 1, 2018

[52] A. I. Basco, G. Beliz, D. Coatz, and P. Garnero, *Industria 4.0: fabricando el futuro,* Buenos Aires: Banco Interamericano de Desarrollo, 2018