



Análisis de Viabilidad para Implementar una Red de Logística Inversa en Aerogeneradores de los Parques Eólicos

Kelly Johana Zapata Yarce y Jhoan Steven Gómez Padilla

Universidad Tecnológica de Pereira
Facultad de Ciencias Empresariales

2020

Agradecimientos

Deseamos expresar el más profundo agradecimiento a nuestras familias, por habernos acompañado desde el primer instante en que tomamos la decisión de emprender este nuevo camino de vida, proporcionado amor incondicional, acompañamiento y confianza en cada una de nuestras decisiones.

Agradecemos también a nuestra asesora Eliana Mirledy Toro que nos brindó todo su apoyo, acompañamiento y conocimiento para emprender esta Tesis de grado, teniéndonos paciencia y guiándonos por el camino correcto.

Para finalizar, también queremos agradecer a la Universidad Tecnológica de Pereira por brindarnos desde el primer día de clases educación integral, con el acompañamiento de excelentes docentes que nos brindaron sus conocimientos y su apoyo día tras día; formándonos profesionalmente y además como personas.

Índice general

1. Resumen	6
2. Planteamiento del problema	8
3. Objetivos	11
3.1. Objetivo General	11
3.2. Objetivos Específicos	11
4. Justificación del problema	13
5. Antecedentes	17
5.1. Logística inversa	22
5.2. Impacto de la logística inversa en aerogeneradores al medio ambiente . . .	24
5.3. Innovación, Aportes de la logística inversa a la economía y el mejoramiento del medio ambiente	25
5.4. Energía eólica en América, Manejo de los aerogeneradores al final de su vida útil	31

5.5. Estado actual de la logística inversa en Suramérica y Beneficios ambientales de su implementación	32
5.6. Investigación de operaciones aplicada a la logística inversa	33
5.7. Problema de Localización y Ruteo considerando restricciones de capacidad (CLRP)	38
5.8. Problemas de ruteo con flota propia y subcontratada	43
5.9. Problema de localización y ruteo con flota propia y subcontratada, CLRPPC	47
5.10. Problema de localización y ruteo abierto (OLRP)	49
6. Modelo matemático propuesto	52
6.1. Análisis Económico	57
6.2. Resultado y análisis	63
7. Conclusiones	68

Capítulo 1

Resumen

Partiendo de una revisión literaria sobre la logística inversa y la importancia de la aplicación de esta, se encontró que la problemática que se está viviendo actualmente con el cambio climático y con lo mucho que está sufriendo nuestro planeta es realmente grave; de esto nace la necesidad de proponer una solución alterna a la disposición de los desechos que se generan por los aerogeneradores, los cuales son producto una alternativa que busca ser amigable con el medio ambiente, pero que se identificó a lo largo de este proyecto que causa graves daños en el largo plazo al ambiente dado que no se tiene claro una forma óptima de reciclar estos dispositivos que generan bastantes desechos al final de su vida útil. A partir de lo anterior, se planteó un modelo matemático con problemas de localización y ruteo abierto (OLRP) considerando sólo flotas subcontratadas con restricciones de capacidad y analizando diferentes escenarios, además se plantean estimaciones económicas aproximadas buscando un acercamiento real a los resultados obtenidos.

Based on a literary review on reverse logistics and the importance of its application, it was found that the problems currently being experienced with climate change and how much our planet is suffering are really serious; From this arises the need to propose an alternative solution to the disposal of waste generated by wind turbines, which are a product of an alternative that seeks to be friendly to the environment, but that was identified throughout this project that causes serious damage in the long term to the environment because it is not clear an optimal way to recycle these devices that generate enough waste at the end of its life. Based on the above, a mathematical model with location and open routing problems (OLRP) was proposed, considering only subcontracted fleets with capacity restrictions and analyzing different scenarios. In addition, approximate economic estimates were proposed, seeking a real approach to the results obtained.

Capítulo 2

Planteamiento del problema

La energía eólica juega un papel crucial en la mejora de las fuentes de energía renovables de un país para la reducción del efecto invernadero y equilibrio ecológico. Esto lo demuestran estadísticas como el informe de 2018 de la red REN21, donde la energía eólica instalada a nivel global es equivalente a 536 Megawatt (MW). Según esto, es la segunda energía más usada junto con la hidráulica, y la segunda con más inversión durante el año 2017 incluyendo la solar (REN21, n.d). A pesar de tener un impacto positivo en la generación de energía eléctrica sin generar gases de efecto invernadero, su ciclo de vida si genera una huella ambiental desde su producción hasta su desmantelamiento (Kaldellis and Apostolou, 2017). En estudios se ha demostrado que, aunque algunas configuraciones de turbinas eólicas tienen una viabilidad positiva bajo la perspectiva económica, pueden tener altos impactos ambientales en términos de alta huella de carbono (Savino et al., 2017). Para adicionar al problema de emisión de gases a efecto invernadero, las turbinas eólicas tienen una esperanza de vida de 25 años en promedio y se deben reemplazar debido a

esfuerzos continuos que se ejercen en sus componentes mecánicos (Liu and Zhang, 2020). Esto hace que las turbinas a pesar de tener larga vida útil generen residuos (Ortegon et al., 2013). Se espera que para el año 2050 haya 43 millones de toneladas de residuos de aspas en todo el mundo, donde China poseerá el 40 % de los residuos, Europa el 25 %, los Estados Unidos el 16 % y el resto del mundo el 19 % (Liu and Barlow, 2017). Es entonces que se ha vuelto necesario darles un buen uso a los residuos ya que se ha demostrado que la fabricación de unas turbinas de 2 MW generan el 84 % del CO₂ producido durante el ciclo de vida, y su transporte un 7 %, pero se concluyó que el reciclaje de sus componentes permitía disminuir las emisiones de un 43 % (Guezuraga et al., 2012). En otro estudio se cuantificó esto para un parque eólico de 500 MW en un escenario donde el 100 % de sus componentes se reciclaba, y resultó que se redujo la emisión de CO₂ en 7351 ton. (Jensen, 2019). Además, se ha efectuado un estudio de tipo Life Cycle Assessment (LCA) en aerogeneradores para saber el impacto ambiental generado por cada uno de sus componentes, donde se resaltó que la mayoría de estos son reciclables al final de su vida útil a excepción de la base (Martínez et al., 2009). El buen manejo de residuos generados por turbinas eólicas podría mejorar de manera significativa costos económicos y ambientales, y una forma de realizarlo es a través de logística inversa (Riveros and Silva, 2007). En estudios efectuados se ha podido concluir que el reciclaje de componentes de parques eólicos marinos podría pagar casi el 20 % de los costos totales de desmantelamiento de parques eólicos (Topham et al., 2019). Por otra parte, los aerogeneradores son reconocidos al brindar energía limpia del viento sin dejar residuos peligrosos, ni emisiones a la atmósfera; sin embargo, al final de su vida útil pueden causar afecciones sobre el me-

dio ambiente, debido a que con el paso de los años se han ido acumulando sus palas ya como residuos. También debemos tener en cuenta que antes de tener un aerogenerador funcionando la fabricación de este genera una contaminación con sus diferentes partes, además de montarlas y transportarlas, este proceso lleva implícito, transformar recursos y generar emisiones. Debido a todo lo mencionado anteriormente, se plantea una correcta planeación para la disposición de sus componentes durante y al final de la vida útil de los aerogeneradores haciendo un correcto mantenimiento de todas sus partes y el cambio oportuno de estas, también se sabe que cada una de sus partes por lo general pesa demasiado y su transporte hasta el sitio es bastante costoso; Por lo cual con la logística inversa se podría recuperar la mayor parte, y no solo se reducirán las emisiones contaminantes al evitar que se pongan en marcha las máquinas nuevamente para producir la pieza desde cero; se reducirán costos importantes lo cual hará más viable esta energía renovable.

Capítulo 3

Objetivos

3.1. Objetivo General

Analizar la viabilidad de la implementación de logística inversa en un parque eólico, con un caso de prueba enmarcado en Jepírachi, La Guajira, Colombia; para aprovechar de manera óptima los residuos de los aerogeneradores.

3.2. Objetivos Específicos

1. Investigar qué avances en logística inversa existen en Colombia y en el mundo.
2. Especificar la importancia de la logística inversa en aerogeneradores.
3. Determinar qué tan viable es la implementación de una red de logística inversa en el parque eólico Jepírachi la Guajira, Colombia.

4. Identificar los beneficios que traería al cambio climático colombiano y al parque eólico Jepírachi, el implementar una red de logística inversa en sus aerogeneradores.

Capítulo 4

Justificación del problema

A través de esta investigación se busca la creación de una tesis con bases teóricas sólidas que sirvan para sustentar la viabilidad de implementación de una red logística inversa en un parque eólico el cual se aborda como un problema de ruteo y localización, analizando un caso enmarcado en el parque eólico Jepírachi, la Guajira, Colombia; centrando nuestros esfuerzos en demostrar los beneficios ambientales que traerá la implementación de dicha red; además se demostrará durante el proceso cada uno de los beneficios que conlleva la implementación de este método a esta energía renovable, pues se ha podido analizar que la energía eólica durante su proceso de montaje o construcción afecta de manera radical no solo la naturaleza, sino, que causa gran impacto social en las comunidades que están cerca a dichos centros de energía eólica; Además, cuando sus generadores cumplen su ciclo de vida útil, causan un gran impacto negativo al ambiente por no hacer una disposición eficiente de sus residuos. En consecuencia y teniendo como punto de partida todo lo anteriormente mencionado, emprenderemos un camino hacia

la construcción de una posible vía de desarrollo de la red de logística inversa aplicada a aerogeneradores, de manera satisfactoria para los parques eólicos. Además, se ha podido demostrar que a lo largo de la vida útil de un aerogenerador la fabricación, la operación y mantenimiento, son aquellos factores de mayor costo (Ioannou et al., 2017). Para saber el costo que representa la fabricación, en un estudio efectuado sobre el costo del ciclo de vida de una turbina instalada en alta mar, se resaltó que el acero tiene un costo de 0.524 €/kg y los 7 cables eléctricos de 20V que usa cada generador tiene un costo de 172 a 223 €/m cada cable (Laura and Vicente, 2014). En paralelo, en un estudio de LCA se calculó que de las 860 ton. que pesa una turbina de alta mar sin contar sus cimientos, la torre del aerogenerador está compuesta de 680 toneladas de aceros y 2.8 ton de cobre en cables flotantes (Angelakoglou et al., 2014). También, el buen manejo de residuos generados por turbinas eólicas podría mejorar de manera significativa costos económicos y ambientales, y una forma de realizarlo es a través de logística inversa (Riveros and Silva, 2007). En estudios efectuados se ha podido concluir que el reciclaje de componentes de parques eólicos marinos podría pagar casi el 20 % de los costos totales de desmantelamiento de parques eólicos (Topham et al., 2019). Para finalizar, en Colombia, la última subasta de energía efectuada dio como resultado 8 proyectos adjudicados, que en total suman una capacidad efectiva total de 1298.9 MW, los cuales se encuentran distribuidos de la siguiente manera: 17.39 % corresponde a solar fotovoltaica y el 82.61 % a eólica, en términos de energía, lo cual significa que la eólica resaltó en esta subasta energética (UPME, 2019). Actualmente, Colombia es un país donde la buena planificación de los desechos ha sido importante, como lo demuestran el decreto 2676 del 2000 sobre gestión de residuos hos-

pitalarios (GONZALEZ et al.), y el decreto 1713 de 2002 en residuos sólidos (Económico, 2002). Se escogió el caso de estudio en la Guajira debido a que este departamento tiene un potencial eólico muy prometedor, los gobiernos actuales están incluyendo proyectos de energía eólica en sus planes de gobierno. se puede observar en el plan departamental de desarrollo de la Guajira 2020-2023 donde está estipulado que: “La Guajira como la primera potencia en energía eólica del país. Los parques generadores de energía estarían ubicados en el resguardo Wayuú de la Alta y Media Guajira. Los parques eólicos que están en trámite impactarán a 128 comunidades Wayúu del resguardo Alta y Media Guajira en veredas de los municipios de Uribia y Maicao”. Con base en esto podemos deducir que la participación de la energía eólica en Colombia está teniendo un gran crecimiento por lo cual es muy importante estar preparados para el tratamiento de los residuos que estos puedan producir, porque a pesar de su larga vida útil, estos producen demasiados desechos que son nocivos para el medio ambiente (Téllez et al., 2020).

Lo anterior se sustenta con un artículo del tiempo en el que la presidenta habla sobre los proyectos de la guajira y su inversión. Allí la vicepresidenta habla que con una inversión de más de 10 billones de pesos y la meta de generar 12 mil nuevos empleos directos e indirectos, la Guajira será escenario fundamental de la matriz energética de Colombia, con un 12 % de participación. La instalación de fuentes no convencionales de energía renovable y sus líneas de transmisión, es una de las apuestas del Gobierno Nacional. De los 19 proyectos a llevarse a cabo en el país, 9 estarán ubicados en La Guajira. Además enfatizo en que la iniciativa permitirá que 81.960 habitantes cuenten con cobertura eléctrica y que más de 500 mil colombianos tengan acceso a ese fluido eléctrico en el

resto del país, reduciendo en 9 millones de toneladas las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) (Martinez, 2020) La situación mencionada anteriormente, es la que hace realmente importante empezar a dar pronto los primeros pasos hacia la implementación de esta metodología, ya que al hacer un análisis superficial de la situación, esto nos motiva a creer que el proyecto es más que viable y que su desarrollo en Colombia no es muy lejano; y aunque los costos juegan un papel de suma importancia en este proyecto tal y como lo muestran las cifras, nuestro enfoque va más hacia lo ambiental, dado que nuestra tendencia como millenials es cuidar nuestro planeta y creemos que al darle el enfoque ambiental como principal objetivo a la red de logística inversa, en el proceso se justificarán los costos de viabilidad ya que se ha demostrado que el porcentaje de recuperación de los materiales de cada aerogenerador son muy altos y que de esta manera a largo plazo; con la implementación de la red de logística inversa, se espera poder mitigar la cantidad de desechos producidos por los aerogeneradores al final de su vida útil, debido a que en los proyectos de implementación de energía eólica no se tienen previstos los grandes impactos ambientales que se pueden generar.

Capítulo 5

Antecedentes

Dado que no se encontraron estudios anteriores que traten este tema en específico, debemos partir de los temas afines con el fin de que nos brinden bases sólidas como punto de partida o que nos den una guía de cómo debemos comenzar a analizar y afrontar esta problemática, en este caso tomaremos como referencia los estudios que se han hecho anteriormente de logística inversa aplicada a diferentes campos ya sea en Colombia o en otros países y los estudios del reciclaje que se le hace a los aerogeneradores o los diferentes usos que estos pueden tener luego de su vida útil.

Según ([Montoya, 2010](#)) La industria de la energía eólica está ascendiendo rápidamente. Las turbinas eólicas se perciben como una energía renovable de bajo impacto ambiental, pero, aunque tienen una vida útil significativa, se debe tener en cuenta que el aerogenerador llegará al final de está en 25 años; sin embargo, solo se han evaluado las fases de extracción y procesamiento. En Estados Unidos se hizo un estudio a modo de discusión para tomar conciencia sobre las oportunidades económicas y los desafíos de la

energía eólica, y así preparar adecuadamente lo que sucederá al final de la vida útil de las turbinas eólicas.

En este estudio se dieron cuenta que las turbinas eólicas recuperadas de proyectos como repotenciación pueden ser remanufacturadas, y si no es posible la reutilización pueden venderlos como chatarra, pero posteriormente, se dieron cuenta que la calidad chatarra y el valor son variables. En consecuencia, la implementación de logística inversa aumentó y la planificación de la vida útil de las turbinas eólicas podría aumentar el valor obtenido de esta fase final.

Pero antes de decidir acerca del final de cada componente de la turbina eólica, se debe identificar qué contribuciones individuales pueden brindar los componentes, además de identificar las técnicas actuales de eliminación o recuperación disponibles.

Hoy en día, se centran en el reciclaje abierto, logrando un ahorro de energía y materiales, Pero el reciclaje cerrado, reutilización y reprocesamiento de materiales como acero, cobre, imanes y fibra de vidrio podrían disminuir el recurso total y podría alivianar cambios inesperados en el mercado como escasez de oferta por alza de precios, así los materiales remanufacturados podrían ser una estrategia al largo plazo para la industria de la energía eólica.

La cadena de suministro inversa en aerogeneradores tiene un enfoque sistémico, el diseño, la fabricación y desarrollo de la logística inversa, debería tenerse en cuenta desde el momento en que se adquiere un producto, pero la logística inversa para turbinas eólicas permanece actualmente indefinida ya que los mercados con turbinas remanufacturadas o mercados usados son inexplorados.

A continuación, según el autor ([Ortegon et al., 2013](#)), se describe el proceso de logística inversa para un aerogenerador: deconstrucción en el siguiente orden: cuchillas, góndola y torre, separación en el sitio en módulos, y transporte en forma de módulo / componente para la instalación de recuperación.

Después del proceso los componentes se limpian, clasifican y prueban para definir el estado actual y el reproceso a seguir (Reutilización, reacondicionamiento o Refabricación), siempre se busca la mejor calidad del proceso, y luego cuando el aerogenerador está listo para volver a usar, Puede instalarse en el parque eólico original o en un nuevo sitio. Si el aerogenerador no se puede recuperar, se estima un valor del material y un precio de desecho, los componentes irrecuperables se envían a vertederos o son incinerados.

Basándonos nuevamente en el autor ([Montoya, 2010](#)); Es también alentador haber encontrado que, en Colombia, ya se usa la logística inversa para contribuir a la reducción de desechos en diferentes sectores y así cuidar nuestro ambiente; no solo esto se ha logrado, también este trabajo, ha llevado a que se crearan unos decretos para la regulación y la gestión de residuos en algunos sectores como los hospitalarios principalmente, el cual consideramos que ha sido de los más importantes debido a su impacto ambiental.

Específicamente en el estudio se identificó que la logística inversa ha adquirido importancia para los gobiernos y las empresas, por los impactos que puede generar en el ambiente y el aporte de la eficiencia de los procesos y recuperación de valor de los productos. En el caso de Colombia, se identificó la aplicación de decretos como, 2676 del 2000 de Gestión de Residuos Hospitalarios y 1713 DE 2002: Residuos Sólidos, que reglamentan

la gestión de los productos, con el fin de promover la protección del medioambiente y la comunidad.

Además de los logros en estos campos, de allí podríamos tomar un modelo general a seguir a la hora de tomar las decisiones finales para cada una de las partes de los aerogeneradores, pues ellos plantean que se deben evaluar la disposición de las partes de la siguiente manera: 1) Rehusó, reventa o redistribución, 2) el reprocesamiento, 3) el reciclaje y 4) eliminación ([Montoya, 2010](#)). Si se analizan estas rutas, podríamos decir que no son muy detalladas pero se alinean con lo que se mencionaba anteriormente y la suma de estos datos nos dan un punto de partida sólido para comenzar a evaluar la posibilidad de aplicación de cada caso a cada una de las partes de los aerogeneradores y también es una secuencia lógica, que además deja como última opción la eliminación o disposición en vertederos lo cual se desea evitar.

Por otra parte, el proceso de logística inversa en los parques eólicos marinos es diferente, debido a las condiciones y al tipo de infraestructura y suelen ser más costosos que los terrestres.

El último siglo se ha caracterizado por extraordinarios cambios climáticos, la forma creciente del uso de combustibles fósiles ha contaminado notoriamente la atmósfera. Actualmente el ser humano está enfocado en la generación de energía eléctrica sin generar gases de efecto invernadero, una buena solución es la energía eólica, pero esta, a pesar de tener un impacto positivo en la generación de electricidad, al final de su ciclo de vida si genera una huella ambiental desde su producción hasta su desmantelamiento lo cual hace necesario que se genere un plan que gestione la distribución de todas las partes de buena

manera y disminuyendo el impacto ambiental al máximo.

Según el autor ([García Blanco et al., 2016](#)), en un estudio hecho por la universidad de Cantabria en España, evaluaron la posibilidad y los impactos que traería consigo la alternativa de crear aerogeneradores con material reciclado. Esta tesis resulta relevante para nuestro estudio, ya que, con los resultados obtenidos en el ensayo del motor modificado, queda demostrado que el diseño de un aerogenerador tripala, usando materiales reciclados del propio vertedero, es un proyecto técnicamente viable. Esto es debido a su simplicidad constructiva, a la facilidad de encontrar los componentes y a los buenos resultados del ensayo. También hablan sobre su implementación refiriéndose a que usar estos aerogeneradores en las comunidades de Accra podría reducir el impacto medioambiental en dos sentidos. Por un lado, el reciclado de los materiales. Por el otro, la reducción de energía producida por combustibles fósiles, además de mejorar su calidad de vida tanto por la adquisición de conocimientos técnicos, como por dejar de exponerse a gases nocivos producidos por la quema de plásticos y otras sustancias lo que repercute en su salud a medio y largo plazo.

Esto nos hace dar un paso hacia adelante ya que nos brinda unos datos sólidos de otra alternativa para reciclar las partes del aerogenerador y además aumenta la posibilidad de restaurar el mismo para que pueda seguir funcionando en un futuro, pues si se puede crear un aerogenerador con material electrónico reciclado, también se podrá hacer a partir de un aerogenerador que terminó su vida útil. Por otra parte, nos da la primicia de un mercado para estos aerogeneradores reciclados o restaurados poco explorado, en caso de

que no se encontrara una viabilidad a la utilización de estos en nuestro país, y estos brindarían un gran impacto no solo a la economía energética, sino que también contribuirán de gran manera a la conservación del medio ambiente.

5.1. Logística inversa

En primer lugar, debemos tener claro que la logística inversa es el proceso de planificación y gestión de los materiales, tratando de recuperar el residuo obtenido para introducirlo en el mercado o buscando su correcta eliminación, en otras palabras, la logística inversa prácticamente es lo mismo que la logística, pero de manera inversa (Cure Vellojín et al., 2011).

Por otro lado, la logística inversa a pesar de ser un proceso muy nuevo en el mercado está surgiendo, ya que muchas empresas obligan a la recuperación o reciclado de la gran mayoría de sus productos, lo que va a implicar en los próximos años una importante modificación de los procesos productivos. Como consecuencia de lo anterior, la logística inversa va a suponer una importante revolución en el mundo empresarial y, muy probablemente, se convertirá en uno de los procesos con mayor crecimiento. Una actividad con un enorme potencial de crecimiento que ha sido definida como el último descubrimiento para la reducción de costes en las empresas y como una de las principales soluciones al medio ambiente en el mundo industrializado.

Asimismo, la logística inversa tiene tres fases diferentes: planificación, implementación y control de los flujos de materiales. Por lo tanto, el uso del proceso de logística

inversa requiere la toma de decisiones estratégicas, acertadas y operativas (Benedito Benet, 2010).

Para terminar todas estas diferencias indican que las soluciones logísticas tradicionales no son directamente aplicables a los sistemas de logística inversa. Por tanto, los procesos requeridos para recuperar un producto dependen de la complejidad de las labores a realizar, la modificación del producto requerida y la cantidad de valor agregado durante la modificación. En (Benedito Benet, 2010), mencionaron los siguientes procesos de recuperación de productos:

Reparación: Procesos necesarios para que un producto defectuoso funcione correctamente; las labores involucradas son el desmontaje del producto, la reparación de piezas dañadas y el reensamblaje.

Reformas: Procesos aplicables a productos usados que aún funcionan, pero han perdido calidad de rendimiento; las labores involucradas son inspección, desmontaje, reparación / reemplazo de las piezas necesarias y reensamblaje. Se debe tener en cuenta que, al finalizar este proceso, los productos no tienen la misma calidad que un producto nuevo, sin embargo, es una solución que nos permite el manejo óptimo para los recursos económicos y ambientales.

5.2. Impacto de la logística inversa en aerogeneradores al medio ambiente

Para empezar revisaremos el estado de la logística inversa a nivel mundial en cuanto al uso de energías renovables en general, se nos hace valioso resaltar la iniciativa que ha tenido el Reino Unido, el cual se ha dado cuenta que las energías renovables también tienen efectos secundarios para el ambiente, los cuales muchos países han pasado por alto a lo largo del tiempo; Ellos centran su estudio en datos claros y contundentes, convenciéndonos de que este proyecto es viable y generará no solo efectos positivos para el ambiente, sino que podría llegar a dar una reducción de costos significativos en cuanto a la producción de energía eólica. Dicho esto, ellos resaltan los siguientes datos y/o aspectos importantes:

Aproximadamente el 38% de las emisiones actuales de GEI (gas de efecto invernadero) del Reino Unido se pueden atribuir al sector de suministro de energía (esto incluye la generación de electricidad, el uso de combustibles fósiles para el refinado de petróleo y la producción de coque y combustibles sólidos sin humo) ([Allen et al., 2008](#)).

Igualmente, esto nos hace reflexionar sobre la magnitud y la importancia ambiental que tiene cada acción que nosotros realizamos con el fin de hacer que el uso y creación de la energía en el mundo sea mucho más amigable con el ambiente; Pues el panorama a nivel de emisiones en el Reino Unido no es indiferente con lo que pasa en el mundo, el cual en las últimas décadas ha tenido una degradación a nivel acelerado y nos hace un llamado a tener conciencia del daño que hemos causado y a usar nuestra creatividad para reparar

dicho daño a nuestro ambiente, y en este caso a hacerlo a través de la disminución de la huella de carbono por parte del sector de suministro de energías, más puntualmente al suministro de energía a través de la energía eólica.

5.3. Innovación, Aportes de la logística inversa a la economía y el mejoramiento del medio ambiente

El Reino unido ha evaluado la posibilidad de que al final de la vida útil de los aerogeneradores, cuando se reciclen, con sus partes se construyan Micro aerogeneradores y este estudio ha arrojado datos alentadores, lo cual brindará un impacto muy positivo al medio ambiente si se logra desarrollar en su totalidad esta idea. En el estudio se sugiere que: “Existe la posibilidad de que las microturbinas eólicas tengan un impacto significativo en la generación de electricidad doméstica” ([Allen et al., 2008](#)).

Además, concretan esta afirmación diciendo que “el consumo promedio de electricidad en el hogar fue de aproximadamente 4500 kWh durante el período 2000–2005, y que esta cifra ha sido ampliamente constante desde la década de 1970. Por lo tanto, la producción media de energía del micro generador del aerogenerador (870 kWh) es aproximadamente una quinta parte de esta demanda eléctrica promedio. En un entorno urbano, la producción media de la turbina (164 kWh) es aproximadamente 1/25 de la demanda. Estas cifras resaltan la importancia de la eficiencia energética y la reducción de la demanda, junto con la instalación adecuada de una turbina, si la turbina debe suministrar

una proporción significativa de la demanda. Los datos muestran que, en un entorno urbano, la turbina ahorra más GEI de los que consume durante la producción, incluso con la producción de energía urbana mínima sobre sus 15 años de vida” (Allen et al., 2008).

Lo anterior, nos da una idea muy exacta de lo que se puede lograr en cuanto a la reducción de producción de estas piezas, las cuales requieren de muchos materiales y a su vez demanda mucha energía para lograr su fabricación e instalación final; Por medio de esta idea no solo se alarga la vida útil de la mayoría de las piezas del aerogenerador, sino que se reducen los demás factores (energía y materia prima) que afectan de igual manera al medio ambiente degradándolo.

Por un lado, un recurso importante que se logra recuperar al final de la vida útil de los aerogeneradores o micro aerogeneradores es la cantidad de aluminio que tienen todos los componentes de este. Entonces, dado que la mayor parte de estos están compuestos de este material, si se logra hacer una recuperación adecuada por medio del reciclaje se estará reduciendo en un poco más del 50 % la energía utilizada para crear aerogeneradores en comparación a si se usara aluminio virgen. Dicho esto, el aluminio juega uno de los papeles más importantes a la hora de reducir el impacto de los aerogeneradores en el ambiente, pues se afirma que aproximadamente el 60 % del aluminio utilizado en el Reino Unido se recicla, y las turbinas podrán reciclarse al final de su vida útil. El aluminio reciclado no se puede utilizar en todos los casos, ya que generalmente hay muy poca contaminación con otros metales. Sin embargo, esto no se cree que sea un problema con la mayoría de los componentes de microturbinas eólicas (Allen et al., 2008).

Aunque el uso del aluminio a nivel mundial no se tiene contemplado como impac-

to negativo, si detallamos su proceso y su utilización en la industria en general seremos conscientes de que con la utilización de aluminio reciclado, al menos en este proceso, reduciremos aún más el impacto negativo que causa esta energía renovable a nuestra naturaleza; cabe resaltar que estos efectos positivos no se dan de manera directa en el ambiente, pero sí de manera indirecta al reducirse la producción de este material. Por otro lado, las tecnologías de metal sólido para la producción de turbinas eólicas generan una solución de las más ambientales, y la energía eólica tiene un impacto ambiental muy bajo. Sin embargo, dentro del ciclo de vida de una turbina eólica, la fase de desmantelamiento se ha identificado como un punto ciego al analizar los impactos ambientales de la energía eólica ([Andersen et al., 2014](#)).

De lo anterior, notamos que es importante afianzar esta parte del proceso de logística inversa, ya que se han tenido varias ideas a lo largo del tiempo sobre cómo debería ser dicho transporte, pero el principal inconveniente ha sido la falta de datos e información, para poder evaluar su viabilidad y sus costos con exactitud; Además, se piensa que el proceso de desmantelamiento de las turbinas llegará algo tardío, por este ende se arriesgan poco a investigar sobre estas soluciones de transporte, pero entre más pronto se exploren alternativas viables, se podrá ir haciendo una planeación mucho mejor. También se resalta que el diseño y mejora de las turbinas es muy importante y aunque es un proceso lento, crea la necesidad de modificarlo a lo largo de los años esperando que las turbinas nuevas que se diseñen sean mucho más eficientes, duraderas y amigables con la naturaleza.

Los estudios más recientes de LCA de turbinas eólicas apuntan a dos incertidumbres en la evaluación del impacto ambiental de por vida. El primero se refiere a lo que sucederá

con los materiales y componentes, en particular las palas, al final de sus vidas: ¿serán reciclados o arrojados a los vertederos? La segunda área de incertidumbre se refiere a las decisiones tomadas sobre el servicio y mantenimiento durante la vida operativa de las turbinas. Juntas, estas dos incertidumbres crean una incertidumbre del 14-20 % en el impacto ambiental previsto del ciclo de vida de las turbinas eólicas ([Andersen et al., 2014](#)).

Estas preguntas mencionadas anteriormente son importantes al hacer que se decida sobre la ruta que tomarán los aerogeneradores después de su vida útil, estas son: 1) buscar un mercado secundario el cual compre los aerogeneradores pequeños o que ya estén viejos a un costo mucho más bajo, haciendo las modificaciones o adecuaciones necesarias para continuar con su funcionamiento (estos aerogeneradores adquiridos a más bajo costo pueden llegar a tener una vida útil de 10-15 años ([Ortegon et al., 2013](#)) y, 2) Hacer un reciclaje de sus partes por separado, para posteriormente venderse como materia prima a la industria. Pero, este segundo punto tiene un gran inconveniente a la hora de reciclar las palas de los aerogeneradores ya que están hechas de fibra de vidrio.

Como se indicó anteriormente, es bien sabido que las palas de fibra de vidrio pueden crear problemas de reciclaje, debido a que cuando una pala se desgasta por las cargas y las fuerzas que soporta, es necesario hacerle un reemplazo para que las normas de seguridad se cumplan, o para reemplazarlos con modelos más actuales. Por ende, se necesitan reponer con nuevas piezas, por ejemplo, los aerogeneradores dependen en gran medida de materiales termoestables que componen la turbina principal, entre estos materiales termoestables se encuentra la fibra de vidrio impregnada con resina de epoxy (GFRP) que se usan para construir los álabes ([Jensen and Skelton, 2018](#)).

Para el manejo de materiales compuestos al final de su vida útil existen tres más además de las mencionadas anteriormente y estas son: vertedero, incineración o reciclaje. La correcta eliminación de estos álabes es difícil debido a que el vertido de estas hojas está prohibido en países como Alemania y el relleno sanitario se destaca como una opción no muy recomendable por la jerarquía de residuos. Así que como última opción está la incineración que sigue dejando una problemática ya que el 60% de compuesto es ceniza y esto se tiene que enviar a vertederos o usarlo como relleno sanitario que también es prohibido en algunos países (Cousins et al., 2019).

Por lo tanto, el consorcio GENVIND (2012-2016) que fue un proyecto apoyado por la Agencia Nacional Danesa de Investigación e Innovación, hizo un énfasis significativo en las posibles aplicaciones secundarias de los residuos compuestos para elementos tales como estructuras arquitectónicas, bienes de consumo y material de relleno industrial utilizando los principios de economía circular (Mativenga et al., 2018). Se valoraron los componentes de los residuos y la forma de los compuestos en busca de poder reutilizar y reusar todo lo posible por medio del reciclaje. Actualmente se han desarrollado varios procesos para reutilizar el compuesto de la pala. Por ejemplo, se puede reciclar el material de la pala volviéndolo polvo para así poderlo usar como un material aditivo en la pintura para que proteja mejor la madera (Cousins et al., 2019).

Posteriormente, un estudio hecho con base a la norma ISO 14040 ha permitido realizar un estudio que cuantifica el impacto general de una turbina eólica y sus componentes. De este trabajo se pudo concluir que la base del aerogenerador es aquel componente que afecta más el medio ambiente y que es recomendable usar alternativas para construir

la base. También se pudo encontrar que la torre que está compuesta de acero se puede reciclar casi totalmente pero que otros componentes como lo son la góndola que son muy complejos son más difíciles de descomponer. Aun así, de la góndola se puede extraer el cobre que es un material reciclable con gran valor, pero su extracción genera un gran impacto ambiental ([Martínez et al., 2009](#)).

Varias décadas de investigación han dado como resultado métodos prácticos para recuperar y reciclar fibra de vidrio y los otros materiales a partir de compuestos. Desafortunadamente, los altos costos de inversión y procesamiento significan que las fibras de vidrio recuperadas son más caras que las prístinas, por lo que las aplicaciones comerciales han sido limitadas. Uno de los desafíos es reducir la temperatura de funcionamiento de los procesos de reciclaje. Un panorama alentador es que se adelantan varios estudios alrededor del mundo para solucionar este problema de reciclaje ([Andersen et al., 2014](#)).

Por el momento se hace el mayor esfuerzo por buscarle una manera óptima de reciclar o de encontrar un uso para los desechos de las palas de fibra de vidrio al final de su vida útil y solo queda esperar que a lo largo de los años logremos solucionar este problema por completo.

5.4. Energía eólica en América, Manejo de los aerogeneradores al final de su vida útil

Centrándonos un poco en una economía más cercana, podemos tomar para Colombia como marco de referencia a estados unidos, ya que este tiene mucha más experiencia en uso de la energía eólica; pues Del total de energía primaria que consume EE. UU., Las fuentes renovables proporcionan el 8%, y de este porcentaje, la participación de la energía eólica es del 9% (0,72% del total) (Ortegon et al., 2013). Por este motivo es válido asumir que ellos saben manejar de mejor manera los residuos de los aerogeneradores y podríamos tomarlos como ejemplo para aplicar las técnicas que les han sido exitosas. Aquí podemos resaltar que Estados Unidos concuerda con la idea de que una posible solución al final de la vida útil de los aerogeneradores puede ser su re manufactura, además afirma que a la hora de realizar el proceso de reciclaje En la actualidad, la recuperación de material EOSL para un WT puede ser tan grande como el 80% del peso total y que los tres componentes WT (torre, palas del rotor y caja de engranajes) son responsables de aproximadamente el 61.0% del costo total de fábrica de WT (Ortegon et al., 2013).

Esto nos permite que a la hora de planear cómo será el reciclaje, si es que se decide usar este método, en cuales partes del aerogenerador centrar nuestros esfuerzos y así ser mucho más eficientes, intentando siempre reducir al máximo los costos. También en este caso nos permite pensar objetivamente en la forma de transportar las partes, de manera tal que se haga la planeación satisfaciendo de manera óptima el tema de los costos y de tiempos, que la mayoría de las veces juega un papel muy importante.

Estados Unidos ha dado además un enfoque especial a la re manufactura de estos elementos, visibilizando no solo el mercado potencial para estas partes, si no que ha tenido muy en cuenta la calidad de las partes lo cual da una especial importancia a el mantenimiento de los aerogeneradores a tiempo durante su vida de utilización, pues si esto se hace debidamente se podrán recuperar al final unas partes en excelente estado, lo cual hará que su comercialización y restauración sea mucho más fácil. Todo este proceso se hace porque podría ahorrar el equivalente al 70 % de la energía total consumida si el WT fuera nuevo y evitar la emisión de aproximadamente 862 toneladas de CO2 (Ortegon et al., 2013). También, con el fin de reducir el porcentaje de garantías de estas piezas ya que, si no se mantiene controlado este aspecto, los costos de transporte para cubrir las garantías podrían hacer inviable este mercado y a su vez aumentará la huella de carbono lo cual no es lo ideal.

5.5. Estado actual de la logística inversa en Suramérica y Beneficios ambientales de su implementación

Actualmente se está generando una conciencia medioambiental y se está optando por una postura respetuosa con el medio ambiente principalmente en Europa, China, Canadá y Estados Unidos donde se empiezan a modificar las políticas que se deben asumir dentro y al final del ciclo de vida de los productos. En Colombia el reto es implementar una logística inversa efectiva, ya que internacionalmente es requerido. Sin embargo, el

término apenas surge y requiere de más cuidado, ya que la logística inversa es un proceso más complejo que la fabricación, por lo tanto, demanda que el producto regresado pueda ser vendido nuevamente para recuperar el coste de producción (Torres, 2013).

En el mercado colombiano la logística inversa ya adquirió importancia para los gobiernos y empresas. Se determinaron decretos obligatorios como 2676 del 2000: “Gestión de Residuos Hospitalarios” y 1713 de 2002: “Residuos Sólidos”, que buscan recuperar, reutilizar e reincorporar los materiales al ciclo económico mediante el diseño de una logística inversa. En abril de 2007 se suscribió el convenio de concertación entre los operadores COMCEL, TELEFÓNICA, COLOMBIA MÓVIL(TIGO), AVANTEL, la cámara de Colombia informática (ASOCEL) y NOKIA como fabricante, para una gestión ambientalmente adecuada de los residuos al final de su ciclo de vida. En Colombia la logística inversa también es aplicada en la gestión de residuos de llantas, donde el gobierno promueve el reencauche, la reutilización y el reciclaje. Internacionalmente empresas como CISCO y MICROSOFT implementan la logística inversa para aumentar su productividad y aprovechar sus productos al final de su vida útil (Montoya, 2010).

5.6. Investigación de operaciones aplicada a la logística inversa

La logística inversa requiere un conjunto de operaciones que dan inicio en el usuario final y finalizan en el fabricante. El reciclaje, la reutilización y reproceso de productos

son actividades propias de esta logística (Alshamsi and Diabat, 2017). Durante la revisión literaria encontramos que los métodos matemáticos han resultado muy útiles para la solución de este tipo de problemas y que, uno de los modelos más utilizados para la implementación de la logística inversa en diversos campos de aplicación es el de programación lineal de enteros mixtos.

Actualmente, se tienen objetivos en la gestión de residuos en la planificación de un sistema de logística inversa, esto se debe a la lucha entre optimización económica y cuidado al medio ambiente (Pati et al., 2008).

En (Pati et al., 2008), los autores proponen un modelo de programación de objetivos enteros mixtos (MIGP) para ayudar en la gestión apropiada del sistema logístico de reciclaje de papel. Este modelo estudia la relación entre múltiples objetivos en una red de distribución de papel reciclado, además se tienen en cuenta; el costo de logística inversa, la mejora de calidad del producto y los beneficios obtenidos de la recuperación del papel utilizado. El modelo que ellos proponen ayuda a la toma de decisiones estratégicas como la ubicación de la instalación, ruta y flujo de productos reciclables en un entorno de múltiples elementos, múltiples niveles y múltiples instalaciones.

(Zhou and Zhou, 2015), desarrollaron un modelo de programación de enteros no lineal para establecer las ubicaciones, número de estaciones y plantas de reciclaje, buscando la minimización de los costos totales debido a que, si la planta de reciclaje y la estación de reciclaje se localizan en sitios diferentes, los costos de transporte son diferentes. Los autores hicieron un análisis de sensibilidad dónde consideraron la cantidad y ubicación de las estaciones y plantas de reciclaje, ya que, estos factores pueden influir en los costos

totales y los resultados óptimos. Analizaron un caso de estudio de sitios seleccionados a lo largo de la carretera Xueyuan en Beijing para ilustrar cómo sería el modo operativo y la estructura de red de la logística inversa de papel de oficina.

Los autores ([Demirel et al., 2016](#)) para cumplir con las reglamentaciones relacionadas en Turquía y la recuperación de los vehículos en desuso de manera eficiente, presentaron un modelo de programación lineal de enteros mixtos (MILP) que se centró en establecer las ubicaciones óptimas para los centros de recolección, desmantelados y los flujos de material entre las instalaciones. Además, aplicaron este modelo en un estudio de caso inspirado en un problema de la vida real en Ankara (Turquía) para el reciclaje de vehículos en desuso, usando datos reales.

([Demirel et al., 2016](#)), también presentaron un modelo para cuantificar el desarrollo promedio a largo plazo en el número de vehículos en desuso por año y generaron un análisis de escenarios basados en las proyecciones de los vehículos en desuso hasta el 2022. Los resultados demostraron que la cantidad de instalaciones a ubicar y el costo del sistema aumentan mientras que la cantidad de vehículos en desuso aumenta en el futuro; con el estudio del caso y las proyecciones hallaron que es probable que el número de vehículos en desuso para Ankara aumente aproximadamente 32,000 entre 2011 y 2022.

En ([Alshamsi and Diabat, 2017](#)), Plantearon el objetivo de determinar la ubicación óptima y la capacidad de los nodos importantes de una red de logística inversa, considerando los centros de inspección y las instalaciones de remanufactura. Esta investigación se llevó a cabo con un problema aplicado en un electrodoméstico en la región del Consejo de Cooperación del Golfo (CCG). Este trabajo se centró en el desarrollo de una progra-

mación lineal de enteros mixtos (MILP), el cual, logró solucionar problemas grandes y pequeños para los casos de optimización.

(Kilic et al., 2015) tuvieron en cuenta diez escenarios para implementar la logística inversa en la recolección de desechos eléctricos y electrónicos en Turquía, con respecto a diferentes tasas de recolección, el cual se soluciona a través de un modelo de programación lineal de enteros mixtos (MILP), considerando diferentes tipos de sitios de almacenamiento e instalaciones de reciclaje dentro del modelo que difería de los estudios existentes hasta el momento. Las ubicaciones óptimas de los sitios de almacenamiento y las instalaciones de reciclaje se obtienen para que cada escenario satisfaga las tasas mínimas de reciclaje establecidas por la directiva de la Unión Europea para cada categoría de producto eléctrico y electrónico; Para la ejecución del modelo matemático y la obtención de las soluciones óptimas, ellos optaron por hacerlo a través del programa de optimización GAM y lograron evaluar las diferentes alternativas planteadas. Concluyeron que el modelo propuesto en el estudio puede ampliarse incorporando algunas opciones, como la reutilización y la remanufactura en los estudios posteriores. Además, El modelo se puede utilizar para varios casos, incluidos otros tipos de residuos distintos de desechos eléctricos y electrónicos.

Los autores (Dat et al., 2012), presentan un modelo de programación matemática que minimiza el costo total de procesamiento de múltiples tipos de redes de logística inversa de residuos eléctricos y electrónicos (WEEP). Los factores monetarios considerados en el modelo incluyen los costos de recolección, tratamiento y transporte, así como los ingresos por ventas con diferentes fracciones de productos devueltos. Basado en el modelo

propuesto, se pueden determinar las ubicaciones óptimas de las instalaciones y los flujos de material en la red de logística inversa. La función objetivo del modelo se planteó con el fin de minimizar el costo total de toda la red de reciclaje, que es la suma del costo de transporte, el costo de operación, el costo fijo, el costo de eliminación menos los ingresos generados por la venta de materiales y componentes recuperables y renovables. También presentaron un análisis de sensibilidad del modelo propuesto. Finalmente, se ilustra un ejemplo numérico para obtener una mejor comprensión del modelo propuesto y dicho modelo se plantea utilizando AMPL (un lenguaje de programación matemático) y luego resuelto por CPLEX. Los resultados indican que el costo de transporte juega un papel importante en la estructura de costos del proceso de reciclaje. Por lo tanto, la forma más efectiva de eliminar el costo total del sistema es reducir el costo de transporte según este artículo. En este modelo los autores sólo consideran la logística inversa involucrada en el proceso de reciclaje y enfatizan en que en una investigación futura se puede considerar extender este modelo para incluir la logística avanzada en la red de reciclaje para hacer que el modelo sea más completo y cercano a la realidad.

En [\(Pan et al., 2020\)](#), diseñaron un modelo de programación lineal de enteros mixtos de objetivos múltiples para minimizar los costos de eliminación de los desechos de construcción y demolición (CDW) de los contratistas y maximizar las ganancias de las empresas de reciclaje y la tasa de reciclaje de CDW. En este estudio se explora la investigación de logística inversa para establecer las posibles soluciones al problema del diseño de la red de reciclaje de CDW; teniendo como objetivos la planificación de la ubicación de las plantas de tratamiento de CDW y la planificación de la expansión de la capacidad

en la industria de la construcción. Ellos seleccionaron un caso de estudio para verificar el modelo, y obtuvieron resultados positivos, ya que esta herramienta es eficiente para el diseño de redes de reciclaje CDW.

Finalmente, los autores (Calderón et al., 2012) hicieron una revisión literaria del estado del arte de los problemas estimados en el diseño de redes de logística inversa. Además, desarrollaron un modelo matemático de programación lineal entera mixta para la aplicación al caso específico de la gestión de llantas fuera de uso en las ciudades de Pereira y Dosquebradas (Colombia), para resolver el modelo, se implementaron un modelador (GAMS 21.2), y un solver (Cplex). Finalmente, la aplicación a un caso real les permitió evaluar y determinar mejores alternativas de gestión acerca del aprovechamiento de productos fuera de uso.

5.7. Problema de Localización y Ruteo considerando restricciones de capacidad (CLRP)

Usualmente en los problemas tradicionales de localización, uno de las principales metas es ubicar los centros de distribución (depósitos) y conectar directamente los clientes a cada depósito a un costo mínimo. En sentido contrario en los VRPs el objetivo es esquematizar un conjunto de rutas que inician y terminan en los depósitos. Los LRPs representan un enfoque integrado, donde se desean coordinar las decisiones de localización

de depósitos y ruteo de vehículos (Ulukan and Demircioğlu, 2015).

En (Vincent and Lin, 2015), plantearon un problema abierto de enrutamiento de ubicación (OLRP) que es una variación del problema capacitado de enrutamiento de ubicación (CLRP). El OLRP está motivado por el aumento de empresas logísticas de terceros y el objetivo es minimizar el costo total teniendo en cuenta los costos de operación de las instalaciones, los costos fijos del vehículo y los costos de viaje. También, propusieron una heurística basada en *simulated annealing* (SA) para resolver OLRP y compararon con otras heurísticas o métodos para evaluar su eficiencia. Concluyeron que el modelo se puede aplicar para resolver pequeñas instancias OLRP cuando se quiera soluciones exactas y también se puede utilizar para verificar el rendimiento de la heurística para OLRP. Por último, encontraron que la heurística SA desarrollada supera a CPLEX tanto en calidad como en tiempo de solución. Además, CPLEX no resuelve muchas instancias OLRP de gran tamaño, mientras que la heurística SA propuesta resuelve las 85 instancias en los tres conjuntos de instancias de referencia OLRP.

Los problemas de localización y ruteo, tienen diversas aplicaciones en diferentes frentes económicos y se pueden encontrar aplicaciones en: localización de centrales y ruteo de documentos clasificados de las fuerzas armadas (Chan and Baker, 2005), distribución de documentos en ciudades (Lin and Kwok, 2006), planeación y operación logística militar (Burks Jr, 2006), instalación de centrales de incineración de basuras y el ruteo de recolección de las mismas (Lopes et al., 2008), cadena de suministro de maderas (Marinakis and Marinaki, 2008), distribución de cadenas de supermercados (Ambrosino et al., 2009), distribución de repuestos de vehículos

(Schittekat and Sörensen, 2009), distribución de correos (Çetiner et al., 2010), planeamiento de misiones en exploraciones especiales (Ahn et al., 2012).

(Ting and Chen, 2013), desarrollaron un algoritmo de optimización de colonias de hormigas múltiples (MACO) para resolver el LRP con restricciones de capacidad (CLRP) en depósitos y rutas. Se descompuso el CLRP en problema de ubicación de instalación (FLP) y problema de enrutamiento de vehículos de depósito múltiple (MDVRP). Para la solución del CLRP se definió qué depósitos debían abrirse, asignar a cada cliente uno y solo un depósito abierto y determinar rutas de vehículos para atender a los clientes. Usaron tres colonias de hormigas siguiendo esta característica de solución las cuales son: selección de ubicación, asignación de clientes y construcción de rutas. Al ellos desarrollar el algoritmo de optimización y compararlo con otros algoritmos encontrados en la literatura, encontraron que el MACO puede obtener buenas soluciones en varios tipos de instancias CLRP dentro de tiempos computacionales razonables. El MACO es especialmente muy efectivo para resolver las instancias de LRP de mayor tamaño ($n > 200$) y el rendimiento general es competitivo con otros algoritmos en la literatura. Además, los autores sugieren que otra dirección de investigación podría ser el estudio del problema de enrutamiento de ubicación confiable, en el cual algunas instalaciones están sujetas a fallas.

Los métodos fundamentados en agrupamiento de los clientes o clusters fueron propuestos por (Barreto et al., 2007). En la primera fase el conjunto de clientes es repartido en grupos con base en la capacidad del vehículo. En la segunda fase se resuelve un TSP para cada cluster. En la fase final cada circuito de TSP es agrupado en supernodos para

resolver el problema de localización de depósitos capacitados.

En (Vincent et al., 2010) proponen una heurística basada en el SA con el fin de resolver el problema de enrutamiento de ubicación (LRP) y para ello implementaron el lenguaje C; dicha heurística fue probada en tres conjuntos de instancias de referencias diferentes y para cada caso, solo realizaron una ejecución del enfoque propuesto para tener una comparación equitativa entre enfoques según el tipo de heurística que se implementara para su solución. El documento se enfoca en resolver el LRP con depósitos y rutas capacitadas. y concluyeron que resultados comparativos del rendimiento del algoritmo propuesto con otros algoritmos en la literatura indican que la heurística SALRP es capaz de resolver eficazmente diversas instancias de LRP en un tiempo razonable. Aunque el tiempo de CPU requerido es más largo que otros enfoques, sigue siendo razonable para un problema tan estratégico que no necesita ser resuelto todos los días.

Para resolver casos de gran tamaño (Prins et al., 2007b), (Prins et al., 2007a), (Prodhon and Prins, 2008), (Prodhon, 2009), (Prodhon, 2011), (Duhamel et al., 2010) y (Escobar et al., 2013) proponen varias metaheurísticas. Dentro de estas, las técnicas basadas en Búsqueda Tabú granular han sido los más eficientes para resolver casos hasta de 200 clientes. Estos métodos combinan modelos de programación lineal entera resueltos por Relajación Lagrangeana para las decisiones de localización, seguido por una Búsqueda Granular para confeccionar las rutas.

En (Karimi, 2018) el modelo propuesto busca minimizar el costo total de la ubicación del centro y la ruta del vehículo, sujeto al tiempo de viaje predefinido, la capacidad del centro, la capacidad del vehículo y las recolecciones y entregas simultáneas; lo realizó

a través de una programación de enteros mixtos de tamaño polinómico y lo introdujo a la formulación para el tipo de asignación única de los problemas. Además, requirieron que estos límites inferiores sean ajustados para la evaluación de la solución del problema, por lo cual propusieron un conjunto de desigualdades válidas para la formulación y se sugiere una heurística basada en la búsqueda tabú que determina la ubicación del centro y las rutas de los vehículos simultáneamente. Finalmente, los resultados de la investigación hecha por el autor revelaron que la incorporación de desigualdades válidas en el concentrador capacitado que cubre el problema de enrutamiento de ubicación (CHCLRP) no solo proporcionó mejores límites inferiores, sino que también redujo el tiempo de cálculo. Por otro lado, en los problemas de pequeño tamaño, la búsqueda de tabú (TS) dio la solución óptima; en las instancias de tamaño medio, el TS funcionó mejor que el solucionador de CPLEX en el mismo tiempo de cálculo.

En ([Pirkwieser and Raidl, 2010](#)) propusieron la búsqueda en Vecindario Variable VNS (Variable Neighborhood Search) para resolver el problema periódico de CLRP (PLRP) y el CLRP apoyado en la unión de la técnica pura VNS con la solución sucesiva de PLEs. Los PLEs que se consideran son un modelo de dos índices que resuelve el problema de Localización y otro que hace reasignación a través de un modelo Set Partitioning.

En ([Yu et al., 2009](#)) Plantearon el algoritmo de recocido simulado en el cual la diversificación es controlada de acuerdo con el parámetro de la temperatura a n de escapar de los óptimos locales. La metodología propuesta encuentra mejores gaps que los hallados en los trabajos de ([Prins et al., 2007b](#)); ([Duhamel et al., 2010](#)). Además, introduce el concepto de ubicación-asignación donde se toman las decisiones de localización y ruteo

simultáneamente.

En (Prodhon, 2011) desarrollaron la heurística Adaptive Large Neighborhood Search (ALNS) para el CLRP. 16 En esta técnica distintos vecindarios son aplicados y se ordenan de acuerdo a los resultados obtenidos, en las siguientes iteraciones los vecindarios con mejor puntuación tienen las mayores probabilidades de ser escogidos.

El problema ha sido resuelto a través de técnicas exactas incluido el Branch and Cut (Contardo et al., 2011); (Contardo et al., 2014) y generación de columnas (Akca et al., 2009). Esos métodos resuelven casos hasta de 200 clientes. Sin embargo, algunos casos con 100 clientes aún siguen sin resolverse.

5.8. Problemas de ruteo con flota propia y subcontratada

La recolección de desechos de los aerogeneradores desde parques eólicos hasta el sitio de su disposición final se puede plantear como un problema práctico dentro de la gestión de la logística inversa. Dados los requerimientos para el transporte de estos aerogeneradores por su gran tamaño, es necesario hacer un análisis detallado con el fin de evaluar si se requiere de una flota propia o subcontratada, o la combinación de ambas.

Problema de ruteo de vehículos con flota propia y subcontratada VRPPC: Los problemas de ruteo considerando flota propia y subcontratada no son usuales en la literatura del VRP. En (Ball et al., 2007) hacen uno de los primeros acercamientos, donde se considera el problema de planeación de la flota de vehículos, la cual debe realizar recorridos largos para poder ejecutar las entregas de mercancías a un conjunto de clientes. El estudio

fue promovido por la observación de una empresa comercial que debía hacer entregas a una gran cantidad de clientes, por tanto, era indispensable considerar el recorrido de las rutas utilizando la flota propia o subcontratando el servicio de transporte con una empresa externa. La solución del problema radica en calcular el tamaño óptimo de la flota de forma que se atiendan las rutas sin exceder las restricciones de tiempo de las mismas y asignado las rutas a los vehículos. Se formula el problema, se describen algunas soluciones aproximadas y se discuten aspectos de la implementación.

En (Bolduc et al., 2007) proponen la mejora de dos soluciones iniciales diferentes con sofisticadas estrategias de intercambio de clientes. En (Bolduc et al., 2008) se presenta una metaheurística con procedimientos de perturbación más robustos que combinan aleatoriedad, mejoramiento y perturbación.

Esta metaheurística realiza una búsqueda local descendente basada en diferentes estructuras de vecindad con dos estrategias de diversificación: Un procedimiento aleatorio constructivo y un mecanismo de perturbación basado en estrategias de intercambio de clientes. La metodología es verificada sobre casos donde se considera flota homogénea y heterogénea.

(Côté and Potvin, 2009) desarrollaron una heurística fundamentada en Búsqueda Tabú y encadenamiento de trayectorias. La integración de estos mecanismos permite descubrir mejores respuestas particularmente para los casos heterogéneos propuestos por (Bolduc et al., 2008). El vecindario del encadenamiento de trayectorias tiene la característica de modificar la asignación de clientes entre la flota propia y la flota subcontratada. (Azi et al., 2010) proponen una heurística basada en Búsqueda Tabú con encadenamiento

de trayectorias. Para su estudio, fueron usados casos homogéneos y heterogéneos, obteniendo mejoras en las soluciones, sin embargo los tiempos computacionales son significativamente más altos que los reportados en (Bolduc et al., 2008).

(Liu and Jiang, 2012) denominan el VRPPC cómo close-open vehicle routing problem (COMVRP) considerando en la solución del problema rutas abiertas y rutas cerradas. El objetivo del problema es minimizar los costos fijos y variables de los dos tipos de rutas. los autores plantean un modelo matemático lineal entero mixto y un algoritmo memético para resolver el problema. Reportan en los resultados computacionales los casos propuestas en (Augerat et al., 1998) adaptadas a las condiciones del problema.

El modelo matemático fue implementado en CPLEX 12.2 con un límite de tiempo de 48 horas para los casos entre 32 y 50 clientes, reportan GAPs de 20 % en promedio. El algoritmo memético propuesto es comparado con los valores hallados con CPLEX para casos desde 32 clientes hasta 361 clientes, reportando GAPs de 0.3 a 13.88 % . (Kratika et al., 2012) designan el problema como de selección de ruteo y tercerización routing and carrier selection problem. En dicho problema el objetivo es minimizar todos los costos, los cuales se reflejan en tres partes: costos fijos debido al uso de los vehículos de la flota propia, costos variables de cada 34 vehículo y costo de las rutas realizadas por la flota subcontratada. Exponen una heurística basada en un marco de búsqueda genética, donde se ordenan los clientes que no fueron atendidos por la flota propia de acuerdo a sus distancias y a través de ellas orienta la búsqueda en el espacio de soluciones, aplicando operadores genéticos de selección, recombinación y mutación. Certifican la metodología con casos homogéneas y heterogéneas tomadas de (Bolduc et al., 2008).

Problema Multi-depósito de ruteo considerando flota propia y flota subcontratada (MDVRPPC): (Chu et al., 2007) consideran una variante multi-depósito de distribución del VRPPC, donde se realizan entregas y recogidas simultáneamente a los clientes, pero no presenta de forma específica cuáles son atendidos por la flota subcontratada. Allí se propone un modelo matemático y una heurística simple, los cuales son validados con casos hasta de 10 clientes y 2 centros de distribución, documentadas en el artículo.

(Stenger et al., 2013) desarrollan un problema de ruteo que ocurre en las entregas finales, donde los trayectos son inferiores a 1 milla y las cargas son pequeños paquetes, el cual es llamado como problema de ruteo multi- centro de distribución con flota propia y subcontratada, Multi-Depot Vehicle Routing Problem with private fleet and common carrier (MDVRPPC), presentado como una extensión del problema de ruteo con múltiples centros de distribución, donde los clientes pueden ser atendidos por la flota propia que se sitúa en los centros de distribución de la empresa o por vehículos subcontratados. En este trabajo se desarrolla un algoritmo apoyado en vecindarios de intercambio cíclico que incorporan un mecanismo adaptativo, considerando una fase aleatoria de perturbación. Los estudios computacionales son ejecutados sobre dos conjuntos de casos desarrollados por los autores.

5.9. Problema de localización y ruteo con flota propia y subcontratada, CLRPPC

El CLRPPC, es un área de interés que se considera como una nueva línea de investigación ([Prodhon and Prins, 2014](#)). En esta situación, se puede observar el momento del aumento en el nivel de actividades, como en el caso de la industria de servicios, donde aparecen de forma reiterada actividades como el mantenimiento y reparación de la flota de vehículos, que hacen que la flota no sea suficiente para atender la demanda de los clientes. Esta situación también se presenta en la logística de desastres, donde la demanda desborda la capacidad de atención con los recursos disponibles.

En ([Alshamsi and Diabat, 2015](#)), plantearon un Programa Lineal de Enteros Mixtos (MILP, Mixer-Integer Linear Programming), abordando así la compleja configuración de red de un sistema RL, la cual podrá decir una óptima selección de lugares, capacidad de centros de inspección y las instalaciones de remanufacturado. En cuanto a transporte, consideraron flotas propias y subcontratadas, que a su vez suponen consideraciones tales como: la inversión inicial, esta va a limitar las inversiones posteriores de flota o en centro de periodo de tiempo posteriores. Se plantea un caso de estudio en una empresa en los Emiratos Árabes Unidos (EAU), la cual se encargará de distribuir electrodomésticos de línea blanca, estos productos serán transportados a 14 localidades, las cuales son las más pobladas del país. Las localidades serán centros de recolección, se considerarán también potenciales sitios para estos centros y para las plantas de remanufacturado.

En ([Ghezavati and Beigi, 2016](#)) se plantea un problema de ubicación y enrutamien-

to con la ventana de tiempo (LRPTW) donde la red RL propuesta consta de centros híbridos de recolección / inspección, centros de recuperación y centros de eliminación, el tipo de flota es homogénea y el diseño de la red de logística inversa capacitada es de múltiples niveles. Se considera que el turno del cliente no ha sido tenido en cuenta en la literatura anteriormente. Además, para este problema se propuso un algoritmo genético de clasificación no dominado II (NSGA-II) para llegar a la frontera de Pareto para el problema propuesto, en problemas de gran tamaño. Luego de desarrollado el problema y solucionado, los resultados muestran que el método de restricción es capaz de resolver instancias de pequeño tamaño a la óptima dentro de tiempos de computación razonables, y para problemas de tamaño mediano a grande, el NSGA-II propuesto funciona mejor que la restricción

En (Goeke et al., 2019), los autores proponen un algoritmo branch-price-and-cut de cort (BPC) que es capaz de resolver instancias pequeñas y medianas y ofrece límites inferiores, también desarrollan una búsqueda de vecindario que permite ver una calidad de solución decente y tiempos de ejecución competitivos. Se tiene en cuenta el problema de enrutamiento de vehículos con flota privada y transportista común (VRPPC) el cual, amplía el VRP capacitado al estudiar la opción de subcontratar clientes a subcontratistas a un costo dependiente del cliente en lugar de atenderlos con la flota privada. Ellos presentan el primer método de solución exacto para la flota heterogénea VRPPC. Su algoritmo BPC resuelve instancias con hasta 100 clientes a la óptima y proporciona límites inferiores para instancias con hasta 480 clientes. En el caso de flota homogénea, los autores dicen que se pueden mejorar los resultados de la literatura al proporcionar cinco nuevas solu-

ciones óptimas, ofreciendo límites inferiores por primera vez para seis instancias, y logran disminuir significativamente las brechas con respecto a las soluciones más conocidas.

5.10. Problema de localización y ruteo abierto (OLRP)

Este modelo consiste en iniciar la ruta en un depósito para luego analizar el último cliente servido. También puede considerarse la ruta inversa, es decir la ruta inicia en un cliente y luego se analiza en un depósito. La literatura es escasa, sin embargo, la consultada brinda unos resultados alentadores para poder desarrollar e implementar este tipo de modelo al proyecto propuesto.

([Vincent and Lin, 2015](#)) proponen una heurística que se basa en el SA para resolver el OLRP cuando se quieren soluciones exactas. El objetivo principal de OLRP es minimizar el costo total, que contiene los costos de operación de las instalaciones, los costos fijos del vehículo y los costos de viaje. Se prueba en instancias OLRP que se han adoptado tres conjuntos de instancias de referencia CLRP conocidas con hasta 318 clientes y 4 depósitos potenciales. Y los resultados muestran la eficiencia de la heurística.

([Toro et al., 2016](#)) enfocan el documento en el modelado en lugar de los métodos de solución con el fin de minimizar el consumo de combustible. El modelo propuesto se formula como un problema bi-objetivo, considerando la minimización de los costos operativos y la minimización de los efectos ambientales, y se resuelve utilizando la técnica de restricción ϵ . El uso de restricciones de radialidad en la solución de VRP abierto ha sido muy efectivo, lo que fue motivado por la topología radial de las rutas abiertas.

Además, proponen que en el trabajo futuro se debería explorar otras metodologías para el cálculo del consumo de combustible y se debería considerar aspectos como la pendiente de la carretera y la velocidad del vehículo en diferentes bordes.

(Pichka et al., 2018) desarrollaron tres nuevos modelos de programación lineal de enteros mixtos, y una heurística híbrida de SA para resolver el 2E-OLRP. Abordaron el problema de enrutamiento de ubicación abierta de dos escalones(2E-OLRP), el cual es una variante del problema de enrutamiento de ubicación (LRP), este problema, busca encontrar las rutas de la flota a un mínimo costo que no regresen al depósito en el primer escalón y no regresen a los satélites en el segundo escalón en las que se emplean proveedores logísticos de terceros. La heurística que se utiliza produce soluciones que están dentro del 7.9% de lo óptimo.

En (Granada et al., 2019) se presenta una nueva formulación de programación de enteros mixtos para OLRP el cual se desarrolla por medio de un árbol de expansión a través de restricciones que brindan soluciones formadas por un gráfico; este enfoque da como resultado una forma alternativa de evitar generar subtours, lo que simplifica significativamente el conjunto de restricciones asociadas con la conectividad de la solución y los requisitos de capacidad del vehículo. Los resultados que se obtuvieron del modelo fueron buenos, sin embargo los autores resaltan que los resultados podrían mejorar aún más con la inclusión de técnicas de delimitación, modelos de partición de conjuntos o procedimientos para la generación de rutas que podrían aumentar significativamente el tamaño y el número de instancias que se pueden resolver mediante técnicas exactas.

Como conclusión, todos los datos de los que se viene hablando a lo largo del do-

cumento son los que dan motivación y razón de ser a este proyecto, ya que, nos permiten creer que se puede hacer algo útil con las partes de un aerogenerador al final de su vida útil, a través de un modelo matemático que nos brinde el resultado más óptimo y no solo para prevenir daños más graves al medio ambiente en Colombia, sino también en el mundo en general, previniendo que se fabrican estas piezas nuevas desde cero sin necesidad. Además, nos brinda un mercado de exportación nuevo el cual puede ser una gran oportunidad de emprendimiento para Colombia, implementando una buena planeación, estudio de este mercado, y la aplicación de logística inversa que se irá desarrollando en el proceso de optimizar el reciclaje y la re-manufactura de los aerogeneradores en el parque Jepírachi de Colombia.

Capítulo 6

Modelo matemático propuesto

Nomenclatura

La nomenclatura del problema se describe a continuación:

Sets

- I Conjunto de centros de distribución (Depósitos)
- J Conjunto de clientes
- V conjunto de nodos $V = I \cup J$

Parámetros

- O_i Costo de apertura del centro de distribución i .
- W_i Capacidad del centro de distribución i .
- Q Máxima carga que puede ser transportada por un vehículo.

- D_j Demanda de cada cliente $j \in J$.
- c_{ij} Costo de viajar entre los nodos i y j .
- P Factor de penalización aplicado a cada arco cuando es transitado usando un vehículo subcontratado.

Variables.

- s_{ij} Variable binaria que se activa cuando el camino entre los nodos $i, j \in V$ es recorrido por un vehículo subcontratado.
- y_i Variable binaria que indica la apertura del centro de distribución. $i \in I$.
- f_{ij} Variable binaria que define si el consumidor ubicado en el nodo $j \in J$ es atendido por una ruta que inicia en el centro de distribución $i \in I$.
- l_{ij} Variable continua que indica la cantidad de carga transportada entre los nodos recorridos por la flota subcontratada i y j .

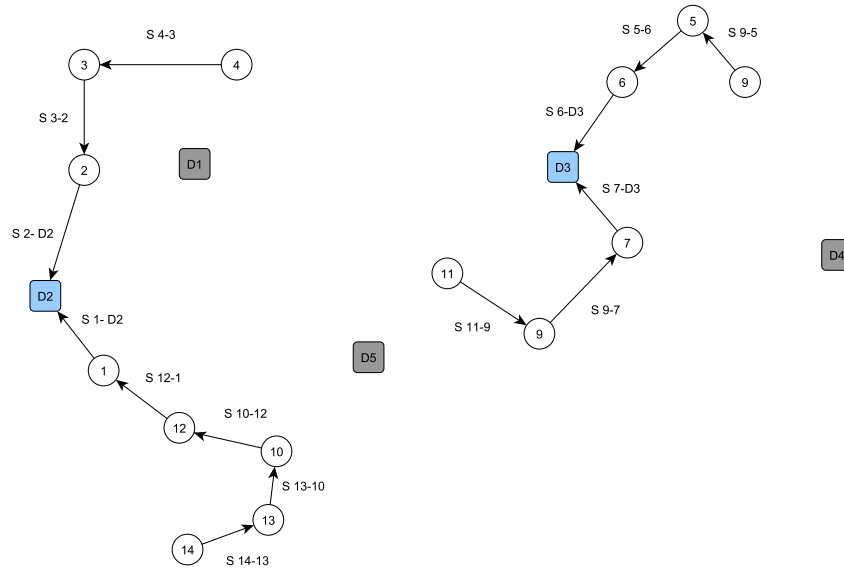


Figura 6.1: OLRP
Fuente: (Ocampo, 2016)

El problema de localización y ruteo con flota subcontratada (OLRP) es formulado como un problema lineal entero binario y esta definido por las ecuaciones (5.1)-(5.15) y representado en la figura (5.1).

En esta figura se observa, que de 5 depósitos propuestos, 2 son seleccionados. En la misma también se observa que la existencia de rutas abiertas y trayectorias abiertas e identificado con la letra s, el cual representa el problema propuesto.

$$\mathbf{mín} = \sum_{i \in I} o_i y_i + P \sum_{\substack{i \in V \\ j \in V}} c_{ij} s_{ij} \quad (6.1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{i \in V} s_{ij} = 1, \forall j \in J \quad (6.2)$$

$$\sum_{k \in J} s_{jk} \leq \sum_{i \in V} s_{ij} \quad \forall j \in J \quad (6.3)$$

$$s_{ij} + s_{ji} \leq 1, \quad \forall i, j \in V \quad (6.4)$$

$$\sum_{\substack{i \in V \\ i \neq j}} l_{ij} = \sum_{\substack{k \in V \\ k \neq j}} l_{jk} + D_j, \quad \forall j \in J \quad (6.5)$$

$$\sum_{\substack{i \in V \\ j \in V}} s_{ij} = \text{card}(J), \quad \forall j \in J \quad (6.6)$$

$$\sum_{i \in I} f_{ij} \leq 1, \quad \forall j \in J \quad (6.7)$$

$$l_{ij} \leq Q s_{ij}, \quad \forall i, j \in V \quad (6.8)$$

$$l_{ij} \leq w_i y_i, \quad \forall i \in I \quad (6.9)$$

$$\sum_{i \in I} y_i \geq \frac{\sum_{j \in J} D_j}{\sum_{i \in I} w_i}, \quad \forall i \in I \quad (6.10)$$

$$\sum_{j \in J} s_{ij} \leq \sum_{j \in J} \frac{D_j}{Q} \quad (6.11)$$

$$s_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, j \in V \quad (6.12)$$

$$y_i \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I \quad (6.13)$$

$$f_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I, \forall j \in V \quad (6.14)$$

$$l_{ij} \in R, \quad \forall i, j \in V \quad (6.15)$$

Función objetivo

Minimiza costos de apertura de los centros de distribución y el costo de recorrer la ruta

con el vehículo subcontratado (5.1). Indica que cada nodo j , solo sea atendido por un centro de distribución i (5.2). Asegura que si se sale de un nodo con una ruta subcontratada es necesario llegar con una ruta subcontratada, siendo posible que se llegue al nodo, pero no se salga de él (5.3). Evita la duplicación de arcos y define la orientación de los arcos (5.4). Representa el balance de flujos o peso para las rutas subcontratadas (5.5). Nos indica los arcos activos que generan tipologías radiales (5.6). Nos garantiza que la demanda de una ruta esté conectada a un centro de distribución (5.7). Limita el flujo de carga por una ruta de acuerdo con la capacidad de los vehículos y a la variable que determina el uso de este tipo de ruta (5.8). Limita los flujos de carga que salen de un centro de distribución de acuerdo con su capacidad y a la decisión de construir ese centro de distribución (5.9). Determina un límite inferior para el número de centros de distribución que deben ser construidos de acuerdo con la suma de las demandas y con la capacidad de los centros de distribución (5.10). Garantiza que el número de rutas sea suficiente para atender la demanda (5.11). Se hace un análisis económico con el fin de completar los datos del modelo matemático y además con dar más detalle sobre los aspectos que se tuvieron en cuenta para este problema de localización y ruteo;(5.12)-(5.14) definen la naturaleza binaria de las variables, s_{ij} , y_i y f_{ij} . Finalmente (5.15) define la variable l_{ij} como continua y representa la cantidad de flujo de mercancía que se desplaza entre el nodo i y j por las rutas subcontratadas.

6.1. Análisis Económico

Costos de apertura:

	valor m ²	COSTO 3.200 m ²
Terreno	1.000	3.200.000
Mano de obra		
Maquinaria	179.000	572.800.000
Materia prima		
TOTAL		576.000.000

Cuadro 6.1: Fuente: Elaboración Propia

Costo de maquinaria	
Horno de fundición	190.000.000
Pulpo hidráulico	17.456.400
Secador industrial	275.359.400
Retro excavadora	665.000.000
Trituradora	546.060.000
TOTAL	2.269.875.800

Cuadro 6.2: Fuente: Elaboración Propia

Gastos administrativos:

Este proyecto a pesar de ser exclusivamente teórico, se hace un análisis financiero de iniciación lo más cercano posible a la realidad. Debido a esto, se presupuestan los gastos administrativos desde el año 2022 hasta el año 2026, ya que son de vital importancia para una empresa y se originan del acto de la administración. En los gastos administrativos se optó por conservar la estructura más básica, ya que el proyecto está en su estado inicial, pero estos gastos tienden a crecer con el paso del tiempo. Los gastos tenidos en cuenta se pueden observar a continuación:

Gastos administrativos					
	2022	2023	2024	2025	2026
Salarios ejecutivos (2)	3.600.000	3.600.000	3.600.000	3.600.000	3.600.000
Depreciación	14.400.000	14.400.000	14.400.000	14.400.000	14.400.000
Varios	1.200.000	1.248.000	1.304.160	1.369.368	1437836,4
Total	19.200.000	19.248.000	19.304.160	19.369.368	19.437.836
Total pagos	4.800.000	4.848.000	4.904.160	4.969.368	5.037.836

Cuadro 6.3: Fuente: Elaboración Propia

En la tabla anterior se define que son necesarios dos ejecutivos, para el correcto funcionamiento del proyecto en su etapa inicial, además, se hace una depreciación en línea recta del terreno y la maquinaria, y para finalizar en la parte de varios, se incluyen los gastos de papelería.

Para presupuestar el costo de apertura nos basamos en los siguientes parámetros para acercarnos a la realidad: Costo del terreno, costo de construcción y costo de maquinaria. Para el costo del terreno y el costo de construcción consultamos el precio de estos dos ítems por metro cuadrado para luego evaluar cuál sería el tamaño del terreno óptimo (3200 m²). Luego de tener el costo de la construcción completos, consultamos las herramientas que se usan para desmantelar los materiales de las partes del aerogenerador (Aleación de fibra de vidrio y acero). Después de saber cuáles herramientas se usan en la industria para desmantelar estos materiales, hicimos una cotización real en las páginas como Alibaba y Mercado libre; Pero como estas cotizaciones se nos daban en dólares y una en peso argentino, hicimos la debida conversión con los precios del dólar y peso argentino del día 22 de octubre del 2020 (1 dólar= 3784 COP y 1 ARS = 48,4767 COP) con el fin de dejar todos los costos en pesos colombianos. Ya totalizado el costo de apertura se

pudo proseguir a correr el modelo matemático.

Proyecciones financieras de la demanda

A continuación se hace una proyección de la materia prima a procesar proveniente de los parques eólicos a partir del año 2026.

Presupuesto de materia prima a procesar			
Año	Toneladas	% Procesado	Ton procesadas
2026	2.238	80,00 %	1.790
2027	2.349,9	80,00 %	1.880
2028	2.467,395	80,00 %	1.974
2029	2.590,76475	80,00 %	2.073

Cuadro 6.4: Fuente: Elaboración Propia

Componentes recuperados	Material	Porcentaje	Mercado (\$ / TON)
Pala del rotor	fibra de vidrio	37,50 %	10.000
Torre	Acero	37,50 %	2.500.000,00
Emgranajes	Acero	25,00 %	2.500.000,00

Cuadro 6.5: Fuente: Elaboración Propia

Parte	Medidas (m)
Diam pala	60
Torre	60
Diam engranaje	40

Cuadro 6.6: Fuente: Elaboración Propia

Para las proyecciones se inició con una demanda estimada, la cual está propuesta en el modelo matemático, según (Ortegon et al., 2013) el porcentaje de recuperación de un aerogenerador eólico es del 80 % y las partes de este que se reciclan son la pala, la torre y los engranajes. Para tener el precio de venta estimado de los materiales ya procesados se consultó en páginas confiables como HomeCenter y Mercado Libre, lo cual dio una

base para estimar los ingresos anuales; Con el fin de tener un cálculo más cercano a la realidad de las ventas anuales, se basó en el tamaño en metros de cada uno de las partes principales que se procesan del aerogenerador, dando como resultado un porcentaje que sirve como factor de conversión para este cálculo final. También se estima que de este total, el 30 por ciento representa las ganancias netas del proyecto anualmente.

Retorno de la inversión

Retorno de la inversión	
2026	-62,94 %
2027	-24,02 %
2028	16,84 %
2029	59,74 %

Cuadro 6.7: Fuente: Elaboración Propia

Se hace un retorno de la inversión inicialmente desde el año 2026 teniendo en cuenta sólo la demanda de los aerogeneradores, ya que a pesar de plantear el panorama de iniciar actividades con desechos electrónicos, se desconoce la demanda exacta de estos desechos electrónicos. Teniendo esto claro, se estima que se va a retornar el total de la inversión hacia el tercer año de atender la demanda de los aerogeneradores.

Análisis de multifuncionalidad del centro de acopio

Este proyecto dará inicios en la parte de la construcción de los centros de acopio en el año 2021, con una duración de 1 año para iniciar a operar. Actualmente Colombia solo cuenta con el parque eólico Jepirachi de la Guajira, el cual entró en operación comercial plena el 19 de abril de 2004 (EPM, 2020), sin embargo el proyecto en su etapa inicial brindará el servicio a el procesamiento de basura electrónica para que los centros

de acopio inicien sus labores en el 2022 esto para ocupar el total de la capacidad, antes de que se atienda la demanda de los aerogeneradores. La basura electrónica es un buen recurso a procesar mientras se inician los labores con los aerogeneradores, se puede evidenciar, ya que en otros países se está implementando la logística inversa en desechos electrónicos, lo anterior se sustenta dado que el ciclo de vida de los dispositivos electrónicos se ha reducido considerablemente generando altos volúmenes en residuos, que pueden causar problemas ambientales por su nivel de toxicidad. Actualmente en México entre los equipos electrónicos más utilizados se encuentran los dispositivos móviles, las computadoras portátiles y los televisores (Wath et al., 2011). Los desechos electrónicos son una de las varias categorías de desechos de equipo electrónico y eléctrico (*Waste Electrical and Electronic Equipment, WEEE*) que abarca varios productos que tienen componentes reciclables entre los cuales se encuentran metales ferrosos y no-ferrosos, vidrio y plásticos (Wath et al., 2011). Por otro lado, la unión europea, especialmente los países industrializados han mostrado preocupación por la cantidad de la basura electrónica, lo que hace que aparezcan regulaciones ambientales como la Directiva WEEE en Europa (Directive et al., 2002) que incrementa la tensión sobre las empresas manufactureras para que incluyan entre sus actividades la recuperación, re-manufactura y reciclaje de por lo menos un porcentaje significativo de los componentes de los productos que fabrican y que han sido desechados por el consumidor final. Se tiene estimado que los centros de acopio inicien operaciones para el procesamiento de turbinas eólicas en 2026, ya que para ese año los aerogeneradores instalados en el parque eólico Jepirachi de la Guajira tendrán aproximadamente 23 años de vida. A pesar de ser un panorama de tiempo cercano, sabemos que

es posible debido a que la empresa IBERDROLA la cual es una empresa española líder energética global, realizó un proyecto llamado BRÍO, que consistió en dar procesamiento a las palas eólicas al final de su vida útil. Este proyecto fue financiado por la Unión Europea en el marco del programa LIFE. En este proyecto también participaron los centros tecnológicos de Gaiker-IK4 y Tecnalia. “La primera fase del proyecto se llevó a cabo en junio de 2015 en Glasgow, donde se realizó el pretratamiento de dos palas eólicas procedentes de un parque de ScottishPower en Reino Unido”. “Ahora se está llevando a cabo en las instalaciones de Gaiker, en el parque tecnológico de Zamudio en Bilbao, la segunda parte del proyecto, consistente en la separación de los materiales y la recuperación de las fibras”. “Entre los resultados esperados destacar una reducción de las emisiones de CO2 asociadas a los procesos de gestión de ese tipo de residuos, la consecución de unas tasas de reciclado de estos materiales superior al 75 por ciento” (IBERDROLA, n.d).

El desarrollo del proyecto anterior, nos demuestra que las grandes productoras de energía eólica a nivel mundial, están pensando qué hacer con los desechos de los aerogeneradores al final de la vida útil, y da firmeza a la idea de crear centros de logística inversa para Colombia. Lo anterior nos brinda una base sólida para asegurar que los centros de distribución que se van a crear pueden ser multifuncionales, es decir, también pueden procesar materiales tecnológicos en general dado que las empresas cada vez más se están preocupando por crear una producción más limpia y crear sus productos con material reciclado lo que les dará un valor agregado; Además, se suplirá el problema de la demanda en los Centros de distribución ya que la demanda de los aerogeneradores es muy variable dado a su larga vida útil y esto suplirá costos de mantener activo el centro de distribución.

6.2. Resultado y análisis

Para este proyecto se utilizó un modelo de programación lineal entera mixta tomado y adaptado al problema específico de la tesis doctoral de la Ph. Eliana Mirleydi Toro Ocampo ([Ocampo, 2016](#)), la cual en su tesis plantea un modelo general que es adaptable a diversas situaciones y en nuestro caso específico fué adaptado al problema de localización y ruteo abierto (OLRP), considerando que toda la flota en las condiciones iniciales será subcontratada.

Se tomó como caso de estudio el departamento de la Guajira, Colombia, debido a que se proyecta como potencial eólico, por ello todos los datos considerados para el modelo fueron tomados con la idea de aplicar el proyecto en este departamento. Para este análisis se optó por trabajar con 3 posibles centros de acopio, a los cuales se les dio a cada uno 3 posibles localizaciones estratégicas con el fin de comparar cuál era el más óptima según su función objetivo; además, se decidió trabajar con un número de 8 clientes con las ubicaciones reales de los posibles parque eólicos que se tendrán en el futuro dado que son proyectos que ya se han aprobado por el gobierno nacional, pero no se ha iniciado su construcción; además, se debió hacer una rotación de 60° a los ejes de las coordenadas para evitar inconvenientes en el momento de realizar la programación en el software AMPL ([Fourer et al., 2003](#)). Todo esto, con el fin de hacerlo mucho más práctico y llevarlo a la situación más cercana a la realidad, pero teniendo en cuenta que el modelo funciona para muchos más clientes, muchas más posibles localizaciones de centros de acopio simultáneas y factores alternos como las emisiones de CO₂ que hacen los cálculos más exactos,

pero que no se utilizaron por cuestiones de tiempo o falta de herramientas para medir dichos factores alternos. A continuación se ilustran los resultados obtenidos con las tres posibles localizaciones de cada uno de los centros de acopio.

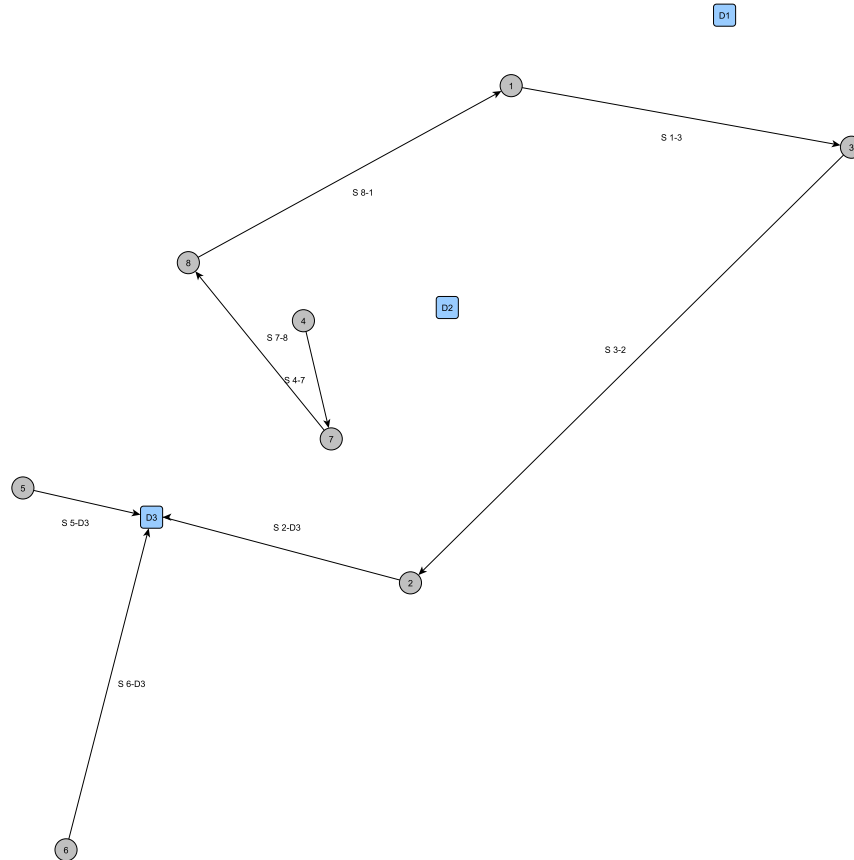


Figura 6.2: OLRP Resultado caso de estudio 1
Fuente: Elaboración Propia

En el primer ensayo se obtuvo un costo de apertura de depósitos de 2270 millones de pesos colombianos (COP) y un costo total por la utilización de flota subcontratada de 517 millones de pesos colombianos (COP), lo cual nos permite conocer una función objetivo de 2787 millones de pesos colombianos (COP). Para este primer caso de estudio los resultados nos muestran que se abre únicamente el depósito número tres, el cual está

ubicado en las coordenadas (11.43335,-72.58912) cerca a atkusirro.

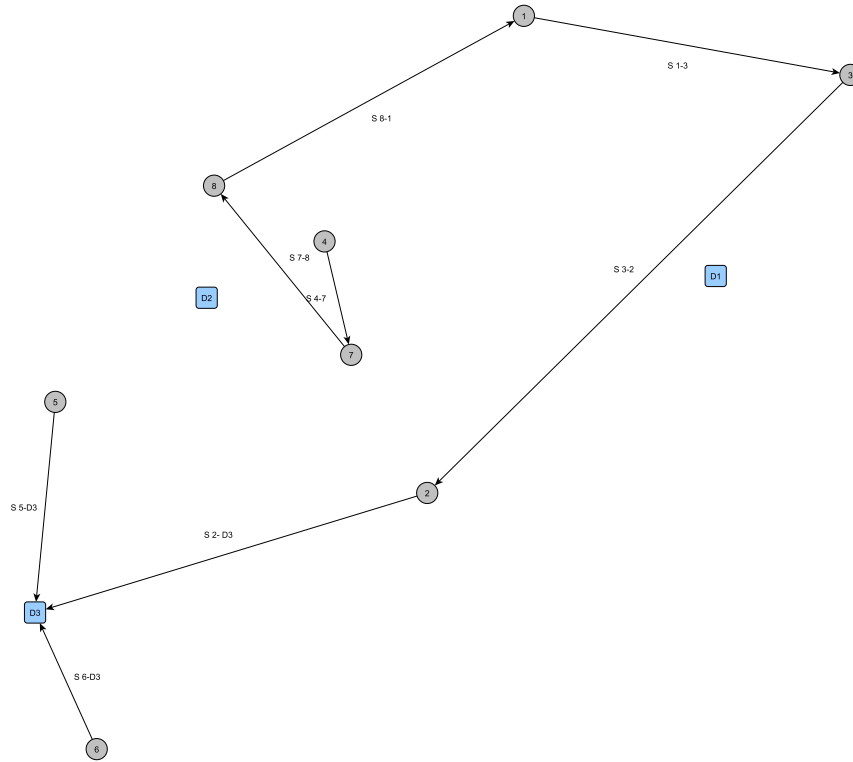


Figura 6.3: OLRP Resultado caso de estudio 2
Fuente: Elaboración Propia

En el segundo ensayo se obtuvo un costo de apertura de depósitos de 2270 millones de pesos colombianos (COP) y un costo total por la utilización de flota subcontratada de 511 millones de pesos colombianos (COP), lo cual nos permite conocer una función objetivo de 2781 millones de pesos colombianos (COP). Para este segundo caso de estudio los resultados nos muestran que se abre también únicamente el depósito número tres, el cual está ubicado en las coordenadas (11.222469,-72.752374) cerca a Rioacha.

Para finalizar se hace un tercer ensayo, donde obtuvo un costo de apertura de depósitos de 2270 millones de pesos colombianos (COP) y un costo total por la utilización

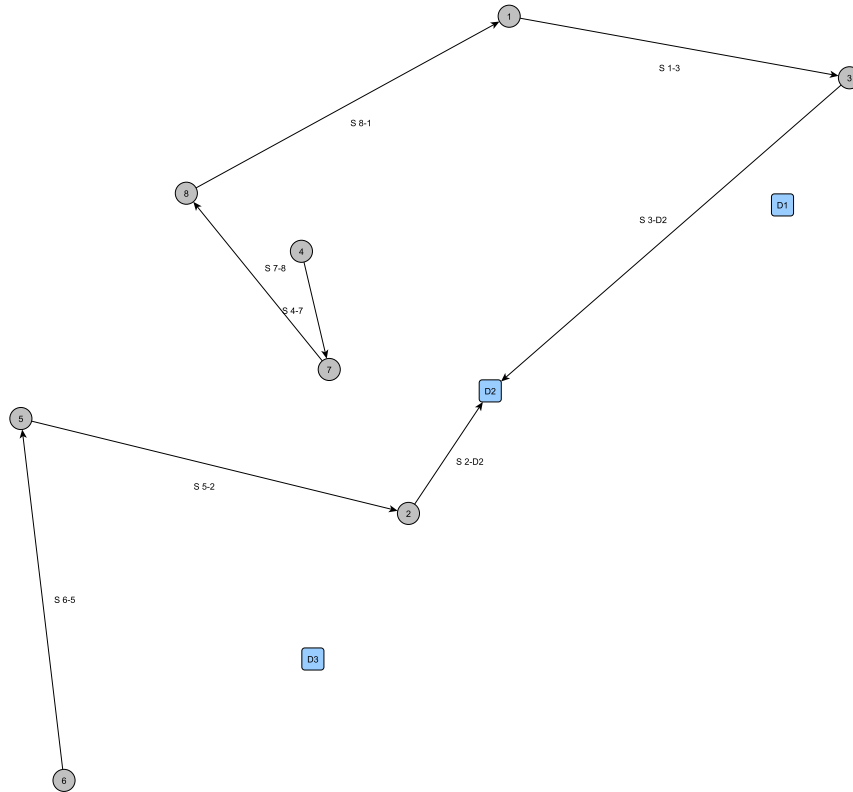


Figura 6.4: OLRP Resultado caso de estudio 2
Fuente: Elaboración Propia

de flota subcontratada de 523 millones de pesos colombianos (COP), lo cual nos permite conocer una función objetivo de 2793 millones de pesos colombianos (COP). Para este tercer y último ensayo de localización para el caso de estudio los resultados nos muestran que se abre el depósito número dos, el cual está ubicado en las coordenadas (11.602111,-72.26347) cerca a Maicao.

Al realizar el análisis de los resultados obtenidos de los tres posibles escenarios planteados, se puede notar que la diferencia entre las funciones objetivo es poca, sin embargo dado que se busca minimizar los costos, se opta por escoger la localización del centro de acopio encontrada en el segundo ensayo por el modelo matemático y además

se puede observar que la diferencia entre los resultados radica en los costos de subcontratar las flotas, lo cual puede aumentar o disminuir anualmente dando la oportunidad de implementar mejoras en el futuro que brinden disminuciones significativas en este costo de transporte hasta los centros de acopio.

Capítulo 7

Conclusiones

1. Al iniciar el proyecto se hizo una revisión del estado del arte a los problemas de localización y ruteo, logística inversa y reciclaje al final de la vida útil de los aerogeneradores. Durante esta revisión literaria se encontró diversas oportunidades las cuales se lograron implementar en el modelo matemático propuesto y se ven reflejadas en los resultados obtenidos, dado que estos resultados lo que buscan es una disminución del impacto al medio ambiente e intenta crear una cultura que sea consciente del daño que se está causando al planeta y a su vez genera oportunidades de empleo que mejoren la calidad de vida de las personas de este sector del país.
2. Se encontró que el reciclaje de los aerogeneradores es muy importante dado que cada día se ve en aumento la generación de desechos electrónicos, además, el potencial de reciclaje de este producto es muy alto dado que del total de las partes del aerogenerador se estima que se puede reciclar más del 70 % y debido a su gran

tamaño, el impacto será muy significativo.

3. Se pudo observar la viabilidad de este proyecto a través de los resultados obtenidos del modelo matemático, el cual es una adaptación al modelo matemático de programación lineal entera mixta, de localización y ruteo abierto (OLRP). Solucionado por la autora en su tesis doctoral llamada: "Solución del problema de localización y ruteo usando un modelo matemático flexible y considerando efectos ambientales" (Ocampo, 2016). Estos resultados se muestran muy alentadores, pues estos arrojan resultados muy acertados que son además cercanos a la realidad, ya que se tuvieron en cuenta coordenadas reales en el modelo, y nos da unas bases sólidas para plantear este proyecto como una necesidad en el largo plazo en Colombia, debido a las proyecciones como potencial eólico de la Guajira, Colombia; teniendo en cuenta lo anterior, se encontraron planteamientos de nuevos proyectos y algunos que ya se encuentran en desarrollo. Además, las estimaciones que se realizaron dan una base del posible costo del proyecto y brindan unas cotizaciones reales que se plantean como los primeros pasos hacia un presupuesto real que logre llevar a la ejecución del proyecto. Por otro lado, se encontró que ya existe un proyecto similar aplicado por la empresa BRIO de España, la cual aplicó el proceso de desmantelamiento de las palas de los aerogeneradores en Glasgow, Reino Unido y en Zamudio, España, con acompañamiento de dos centros tecnológicos que son Gaiker-IK4 y Tecnali. De este proyecto se puede resaltar que sus resultados más significativos fueron "la reducción de las emisiones de CO₂ asociadas a los procesos de gestión de ese tipo de

residuos y la consecución de unas tasas de reciclado de estos materiales superior al 75%". La aplicación a un caso real, como lo fue en el departamento de la Guajira, Colombia, permitió evaluar y determinar mejores alternativas de ubicación de los centros de acopio de logística inversa para parques eólicos.

4. Los beneficios para el ambiente se estima que serán muchos, entre estos uno de ellos será la disminución de la explotación de los recursos naturales como la fibra de vidrio y el acero, los cuales son unos de los componentes principales cuando a la hora de construir un aerogenerador y que, se estima que se va a lograr reciclar la mayor parte de estos elementos; Por otro lado, se disminuye el impacto al suelo ya que se evita que estos desechos electrónicos sean arrojados a vertederos, lo cual causa un grave daño al suelo y además, a largo plazo puede causar también daños a la capa de ozono y aumentar el cambio climático

Bibliografía

- J. Ahn, O. De Weck, Y. Geng, and D. Klabjan. Column generation based heuristics for a generalized location routing problem with profits arising in space exploration. *European Journal of Operational Research*, 223(1):47–59, 2012.
- Z. Akca, R. Berger, and T. Ralphs. A branch-and-price algorithm for combined location and routing problems under capacity restrictions. In *Operations research and cyber-infrastructure*, pages 309–330. Springer, 2009.
- S. Allen, G. Hammond, and M. McManus. Energy analysis and environmental life cycle assessment of a micro-wind turbine. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 222(7):669–684, 2008.
- A. Alshamsi and A. Diabat. A reverse logistics network design. *Journal of Manufacturing Systems*, 37:589–598, 2015.
- A. Alshamsi and A. Diabat. A genetic algorithm for reverse logistics network design: A case study from the gcc. *Journal of Cleaner Production*, 151:652–669, 2017.
- D. Ambrosino, A. Sciomachen, and M. G. Scutellà. A heuristic based on multi-exchange

- techniques for a regional fleet assignment location-routing problem. *Computers & Operations Research*, 36(2):442–460, 2009.
- P. D. Andersen, A. Bonou, J. Beauson, and P. Brøndsted. Recycling of wind turbines. In *DTU International Energy Report 2014: Wind energy—drivers and barriers for higher shares of wind in the global power generation mix*, pages 91–97. Technical University of Denmark, 2014.
- K. Angelakoglou, P. N. Botsaris, and G. Gaidajis. Issues regarding wind turbines positioning: A benchmark study with the application of the life cycle assessment approach. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 5:7–18, 2014.
- P. Augerat, J.-M. Belenguer, E. Benavent, A. Corbéran, and D. Naddef. Separating capacity constraints in the cvrp using tabu search. *European Journal of Operational Research*, 106(2-3):546–557, 1998.
- N. Azi, M. Gendreau, and J.-Y. Potvin. An exact algorithm for a vehicle routing problem with time windows and multiple use of vehicles. *European Journal of Operational Research*, 202(3):756–763, 2010.
- M. O. Ball, B. Golden, A. Assad, and L. Bodin. Planning for truck fleet size in the presence of a common-carrier option. *Decision Sciences*, 14(1):103–120, 2007.
- S. Barreto, C. Ferreira, J. Paixao, and B. S. Santos. Using clustering analysis in a capacitated location-routing problem. *European Journal of Operational Research*, 179(3):968–977, 2007.

- E. Benedito Benet. Influence of reverse logistics on optimal manufacturing, remanufacturing, and storage capacities. 2010.
- M.-C. Bolduc, J. Renaud, and F. Boctor. A heuristic for the routing and carrier selection problem. *European Journal of Operational Research*, 183(2):926–932, 2007.
- M.-C. Bolduc, J. Renaud, F. Boctor, and G. Laporte. A perturbation metaheuristic for the vehicle routing problem with private fleet and common carriers. *Journal of the Operational Research Society*, 59(6):776–787, 2008.
- R. E. Burks Jr. An adaptive tabu search heuristic for the location routing pickup and delivery problem with time windows with a theater distribution application. 2006.
- L. Á. F. Calderón, E. M. T. Ocampo, and M. G. Echeverry. Diseño de redes de logística inversa: una revisión del estado del arte y aplicación práctica. *Ciencia e ingeniería neogranadina*, 22(2):153–177, 2012.
- S. Çetiner, C. Sepil, and H. Süral. Hubbing and routing in postal delivery systems. *Annals of Operations research*, 181(1):109–124, 2010.
- Y. Chan and S. F. Baker. The multiple depot, multiple traveling salesmen facility-location problem: Vehicle range, service frequency, and heuristic implementations. *Mathematical and Computer Modelling*, 41(8-9):1035–1053, 2005.
- C.-W. Chu, J.-R. Chang, and K.-H. Chang. A heuristic algorithm for the multi-depot vehicle routing problem with outsider carrier selection. 2007.

- C. Contardo, J.-F. Cordeau, and B. Gendron. *A branch-and-cut-and-price algorithm for the capacitated location-routing problem*. CIRRELT, 2011.
- C. Contardo, J.-F. Cordeau, and B. Gendron. An exact algorithm based on cut-and-column generation for the capacitated location-routing problem. *INFORMS Journal on Computing*, 26(1):88–102, 2014.
- J.-F. Côté and J.-Y. Potvin. A tabu search heuristic for the vehicle routing problem with private fleet and common carrier. *European Journal of Operational Research*, 198(2):464–469, 2009.
- D. S. Cousins, Y. Suzuki, R. E. Murray, J. R. Samaniuk, and A. P. Stebner. Recycling glass fiber thermoplastic composites from wind turbine blades. *Journal of cleaner production*, 209:1252–1263, 2019.
- L. Cure Vellojín, J. C. Meza González, and R. Amaya Mier. Logística inversa: una herramienta de apoyo a la competitividad de las organizaciones. *Revista Científica Ingeniería y Desarrollo*, 20(20):184–202, 2011.
- L. Q. Dat, D. T. T. Linh, S.-Y. Chou, and F. Y. Vincent. Optimizing reverse logistic costs for recycling end-of-life electrical and electronic products. *Expert Systems with Applications*, 39(7):6380–6387, 2012.
- E. Demirel, N. Demirel, and H. Gökçen. A mixed integer linear programming model to optimize reverse logistics activities of end-of-life vehicles in turkey. *Journal of Cleaner Production*, 112:2101–2113, 2016.

- E. Directive et al. 96/ec of the european parliament and of the council of 27 january 2003 on waste electrical and electronic equipment (weee). *Official Journal of the European Union L*, 37:24–38, 2002.
- C. Duhamel, P. Lacomme, C. Prins, and C. Prodhon. A grasp× els approach for the capacitated location-routing problem. *Computers & Operations Research*, 37(11):1912–1923, 2010.
- M. D. D. Económico. Decreto 1713 de 2002. *Obtenido de <http://www.cdm.gov.co/web/ciudadano/centro-de-descargas/273-decreto-1713-2002-1/file>*, 2002.
- EPM. Parque eólico jepírachi. <https://www.epm.com.co/site/home/nuestra-empresa/nuestras-plantas/energia/parque-eolico>, Noviembre 2020.
- J. W. Escobar, R. Linfati, and P. Toth. A two-phase hybrid heuristic algorithm for the capacitated location-routing problem. *Computers & Operations Research*, 40(1):70–79, 2013.
- R. Fourer, D. M. Gay, and B. W. Kernighan. *Ampl. a modeling language for mathematical programming*. 2003.
- J. García Blanco et al. *Diseño del aerogenerador con materiales reciclados*. 2016.
- V. Ghezavati and M. Beigi. Solving a bi-objective mathematical model for location-routing problem with time windows in multi-echelon reverse logistics using metaheuristic procedure. *Journal of Industrial Engineering International*, 12(4):469–483, 2016.

- D. Goeke, T. Gschwind, and M. Schneider. Upper and lower bounds for the vehicle-routing problem with private fleet and common carrier. *Discrete Applied Mathematics*, 264:43–61, 2019.
- C. R. GONZALEZ, M. D. M. AMBIENTE, J. P. B. ARBOLEDA, V. D. M. AMBIENTE, G. V. VIZCAINO, D. G. A. SECTORIAL, S. V. YEPES, C. G. D. G. AMBIENTAL, C. R. RODRÍGUEZ, R. C. VÁSQUEZ, et al. Manual de procedimientos para la gestión integral de residuos hospitalarios y similares en colombia mpgirh.
- M. Granada, E. M. Toro, and R. Gallego. An mip formulation for the open location-routing problem considering the topological characteristic of the solution-paths. *Networks*, 74(4):374–388, 2019.
- B. Guezuraga, R. Zauner, and W. Pölz. Life cycle assessment of two different 2 mw class wind turbines. *Renewable Energy*, 37(1):37–44, 2012.
- IBERDROLA. Locución vídeo proyecto brio. https://www.iberdrola.com/wcorp/gc/prod/es_ES/sostenibilidad/docs/locucion_proyecto_brio_esp.pdf, n.d.
- A. Ioannou, L. Wang, and F. Brennan. Design implications towards inspection reduction of large scale structures. *Procedia CIRP*, 60:434–439, 2017.
- J. P. Jensen. Evaluating the environmental impacts of recycling wind turbines. *Wind Energy*, 22(2):316–326, 2019.
- J. P. Jensen and K. Skelton. Wind turbine blade recycling: Experiences, challenges and

- possibilities in a circular economy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 97:165–176, 2018.
- J. Kaldellis and D. Apostolou. Life cycle energy and carbon footprint of offshore wind energy. comparison with onshore counterpart. *Renewable Energy*, 108:72–84, 2017.
- H. Karimi. The capacitated hub covering location-routing problem for simultaneous pickup and delivery systems. *Computers & Industrial Engineering*, 116:47–58, 2018.
- H. S. Kilic, U. Cebeci, and M. B. Ayhan. Reverse logistics system design for the waste of electrical and electronic equipment (weee) in turkey. *Resources, Conservation and Recycling*, 95:120–132, 2015.
- J. Kratica, T. Kostić, D. Tošić, D. Dugošija, and V. Filipović. A genetic algorithm for the routing and carrier selection problem. *Computer Science and Information Systems*, (21): 49–62, 2012.
- C.-S. Laura and D.-C. Vicente. Life-cycle cost analysis of floating offshore wind farms. *Renewable Energy*, 66:41–48, 2014.
- C. Lin and R. Kwok. Multi-objective metaheuristics for a location-routing problem with multiple use of vehicles on real data and simulated data. *European journal of operational research*, 175(3):1833–1849, 2006.
- P. Liu and C. Y. Barlow. Wind turbine blade waste in 2050. *Waste Management*, 62:229–240, 2017.

- R. Liu and Z. Jiang. The close–open mixed vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*, 220(2):349–360, 2012.
- Z. Liu and L. Zhang. A review of failure modes, condition monitoring and fault diagnosis methods for large-scale wind turbine bearings. *Measurement*, 149:107002, 2020.
- R. B. Lopes, S. Barreto, C. Ferreira, and B. S. Santos. A decision-support tool for a capacitated location-routing problem. *Decision Support Systems*, 46(1):366–375, 2008.
- Y. Marinakis and M. Marinaki. A bilevel genetic algorithm for a real life location routing problem. *International Journal of Logistics: Research and Applications*, 11(1):49–65, 2008.
- B. Martinez. Proyectos de energía eólica. <https://www.tuuputchika.com/2020/07/01/con-proyectos-de-energia-eolica-gobierno-busca-generar-empleo-y-desarrollo-en-la-guajira/>, Julio 2020.
- E. Martínez, F. Sanz, S. Pellegrini, E. Jiménez, and J. Blanco. Life cycle assessment of a multi-megawatt wind turbine. *Renewable energy*, 34(3):667–673, 2009.
- P. T. Mativenga, E. Lou, et al. Managing supply chain complexity: Foresight for wind turbine composite waste. *Procedia CIRP*, 69:938–943, 2018.
- R. Montoya. Logística inversa un proceso de impacto ambiental y productividad. spanish). inverse logistics a process with environmental and productivity impacts. english), 5, 1–14, 2010.
- E. M. T. Ocampo. *Solución del problema de localización y ruteo usando un modelo matemático*

- flexible y considerando efectos ambientales*. PhD thesis, Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Ingenierías Eléctrica . . . , 2016.
- K. Ortegon, L. F. Nies, and J. W. Sutherland. Preparing for end of service life of wind turbines. *Journal of Cleaner Production*, 39:191–199, 2013.
- X. Pan, Q. Xie, and Y. Feng. Designing recycling networks for construction and demolition waste based on reserve logistics research field. *Journal of Cleaner Production*, page 120841, 2020.
- R. K. Pati, P. Vrat, and P. Kumar. A goal programming model for paper recycling system. *Omega*, 36(3):405–417, 2008.
- K. Pichka, A. H. Bajgiran, M. E. Petering, J. Jang, and X. Yue. The two echelon open location routing problem: Mathematical model and hybrid heuristic. *Computers & Industrial Engineering*, 121:97–112, 2018.
- S. Pirkwieser and G. R. Raidl. Variable neighborhood search coupled with ilp-based very large neighborhood searches for the (periodic) location-routing problem. In *International Workshop on Hybrid Metaheuristics*, pages 174–189. Springer, 2010.
- C. Prins, C. Prodhon, A. Ruiz, P. Soriano, and R. Wolfler Calvo. Solving the capacitated location-routing problem by a cooperative lagrangean relaxation-granular tabu search heuristic. *Transportation Science*, 41(4):470–483, 2007a.
- C. Prins, C. Prodhon, A. Ruiz, P. Soriano, and R. Wolfler Calvo. Solving the capacitated

- location-routing problem by a cooperative lagrangean relaxation-granular tabu search heuristic. *Transportation Science*, 41(4):470–483, 2007b.
- C. Prodhon. An elsxpath relinking hybrid for the periodic location-routing problem. In *International Workshop on Hybrid Metaheuristics*, pages 15–29. Springer, 2009.
- C. Prodhon. A hybrid evolutionary algorithm for the periodic location-routing problem. *European Journal of Operational Research*, 210(2):204–212, 2011.
- C. Prodhon and C. Prins. A memetic algorithm with population management (ma | pm) for the periodic location-routing problem. In *International Workshop on Hybrid Metaheuristics*, pages 43–57. Springer, 2008.
- C. Prodhon and C. Prins. A survey of recent research on location-routing problems. *European Journal of Operational Research*, 238(1):1–17, 2014.
- REN21. Reference tables. https://ren21.net/gsr-2018/pages/tables/tables/#Table_R2, n.d.
- D. P. B. Riveros and P. P. B. Silva. Importancia de la logística inversa en el rescate del medio ambiente. *Scientia et technica*, 5(37):315–320, 2007.
- M. M. Savino, R. Manzini, V. Della Selva, and R. Accorsi. A new model for environmental and economic evaluation of renewable energy systems: The case of wind turbines. *Applied energy*, 189:739–752, 2017.

- P. Schittekat and K. Sörensen. Or practice—supporting 3pl decisions in the automotive industry by generating diverse solutions to a large-scale location-routing problem. *Operations research*, 57(5):1058–1067, 2009.
- A. Stenger, D. Vigo, S. Enz, and M. Schwind. An adaptive variable neighborhood search algorithm for a vehicle routing problem arising in small package shipping. *Transportation Science*, 47(1):64–80, 2013.
- C.-J. Ting and C.-H. Chen. A multiple ant colony optimization algorithm for the capacitated location routing problem. *International Journal of Production Economics*, 141(1):34–44, 2013.
- E. Topham, D. McMillan, S. Bradley, and E. Hart. Recycling offshore wind farms at decommissioning stage. *Energy Policy*, 129:698–709, 2019.
- E. M. Toro, J. F. Franco, M. G. Echeverri, G. Rendí, et al. Green open location-routing problem considering economic and environmental costs. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, pages 203–216, 2016.
- A. C. Torres. Importancia de la logística inversa para un desarrollo sostenible en colombia. *Gestión & Sociedad*, 6(2):113–126, 2013.
- B. M. Téllez, C. S. Ramos, D. P. González, G. D. Brito, Ángel Mendoza Rodríguez, L. C. Jiménez, R. O. Celedón, J. F. Ortiz, N. V. Rivadeneira, Y. C. Mena, Y. M. Figueroa, A. B. Sierra, A. O. D. A. S. C. Malena Oñate Oñate, Astrith Riveira Pinto, J. C. D. Atencio,

- R. A. Mendoza, B. B. Brito, R. R. Rivera, M. J. Barros, and J. M. Arredondo. Plan departamental de desarrollo de la guajira). 2020.
- Z. Ulukan and E. Demircioğlu. A survey of discrete facility location problems. *International Journal of Industrial and Manufacturing Engineering*, 9(7):2487–2492, 2015.
- UPME. Circular externa 0462019. https://www1.upme.gov.co/Normatividad/Circular_046_2019.pdf, 2019.
- F. Y. Vincent and S.-Y. Lin. A simulated annealing heuristic for the open location-routing problem. *Computers & Operations Research*, 62:184–196, 2015.
- F. Y. Vincent, S.-W. Lin, W. Lee, and C.-J. Ting. A simulated annealing heuristic for the capacitated location routing problem. *Computers & Industrial Engineering*, 58(2):288–299, 2010.
- S. B. Wath, P. Dutt, and T. Chakrabarti. E-waste scenario in india, its management and implications. *Environmental monitoring and assessment*, 172(1-4):249–262, 2011.
- B. Yu, Z.-Z. Yang, and B. Yao. An improved ant colony optimization for vehicle routing problem. *European journal of operational research*, 196(1):171–176, 2009.
- X. Zhou and Y. Zhou. Designing a multi-echelon reverse logistics operation and network: A case study of office paper in beijing. *Resources, Conservation and Recycling*, 100:58–69, 2015.