NUEVO MÉTODO BASADO EN LA ENTROPÍA E IMPORTANCIA NODAL PARA MEDIR LA ROBUSTEZ DE UNA RED ÓPTIMA DE LOGÍSTICA INVERSA

GERMÁN MAYA RODRÍGUEZ

Nota de Aceptación

Certificamos que el presente Trabajo de Grado Satisface, en alcances y calidad, todos los requisitos que demanda un Trabajo de Grado de Maestría.

DANIEL MORILLO TORRES Ph. D.
Director

JULIO CÉSAR LONDOÑO ORTEGA Ph. D.
Jurado

HÉCTOR FABIO BONILLA LONDOÑO M.Sc.
Jurado

Aprobado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Pontificia Universidad Javeriana Cali, para optar el título de Magister en Ingeniería.

HERNÁN CAMILO ROCHA NIÑO Ph. D.
Decano Facultad de Ingeniería y Ciencias

JUAN CARLOS MARTÍNEZ ARIAS
Director Posgrados de Ingeniería y Ciencias

Santiago de Cali (22, 08, 2022)

Santiago de Cali, 22 de agosto de 2022

Datos del estudiante:

Nombre: Germán Maya Rodríguez

Teléfonos de contacto: 317 729 5684 – 300 572 4823

Correo electrónico: germanm06@javerianacali.edu.co - germanm06@hotmail.com

Profesión: Ingeniero Industrial

Universidad: Universidad del Valle

Estudio posgrado: Esp. Sistemas gerenciales de ingeniería

Universidad: Pontificia Universidad Javeriana

Atentamente,

_____

Germán Maya Rodríguez
C.C. 1.115.080.771 de Buga (Valle)

NUEVO MÉTODO BASADO EN LA ENTROPÍA E IMPORTANCIA NODAL PARA MEDIR LA ROBUSTEZ DE UNA RED ÓPTIMA DE LOGÍSTICA INVERSA

GERMÁN MAYA RODRÍGUEZ

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS
SANTIAGO DE CALI
2022

NUEVO MÉTODO BASADO EN LA ENTROPÍA E IMPORTANCIA NODAL PARA MEDIR LA ROBUSTEZ DE UNA RED ÓPTIMA DE LOGÍSTICA INVERSA

GERMÁN MAYA RODRÍGUEZ

Trabajo de grado para optar al título de Magíster en Ingeniería

Énfasis Industrial

Director:
Daniel Morillo Torres, Ph.D.

Codirector:
John Wilmer Escobar, Ph.D.

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS
SANTIAGO DE CALI
2022

DEDICATORIA

Lo que años atrás inició siendo un sueño para mí…Hoy puedo decir con orgullo que se convirtió en una realidad.

Primero que todo quiero agradecer a Dios, porque sin Él nada sería posible, fue quién me dio la fortaleza y sabiduría para salir adelante en momentos de crisis.

A mis padres, que son el motivo por el cual me levanto cada día, por su apoyo incondicional…por no abandonarme en esta constante lucha, por motivarme a seguir preparándome y ayudarme siempre a cumplir la más mínima meta de mi vida.

A Eliana, esa persona que ha sido más que mi fiel compañera, más que mi amiga: el complemento perfecto que me ha permitido crecer en muchos ámbitos de mi vida…mi motivación y de quien siempre tengo algo que aprender.

Finalmente, y no menos importante, a mis profesores y compañeros quienes me educaron y me dejaron muchos aprendizajes en este posgrado.

Germán.

AGRADECIMIENTOS

A los diferentes profesores que me guiaron durante este tiempo: de cada uno de ellos, además del conocimiento impartido, me llevo un grato recuerdo… una experiencia que contar.

Al profesor Daniel Morillo, por su constante acompañamiento, disposición, direccionamiento y continua ayuda, muchas gracias. Al profesor John Wilmer Escobar quien, con su amplio conocimiento y experiencia, apoyó la culminación de este proyecto de manera satisfactoria.

Finalmente, a la empresa en la cual laboro, la cual me apoyó, abrió las puertas, enseñó y me dotó de las herramientas adecuadas para culminar ambos posgrados.

CONTENIDO

pág.

GLOSARIO 9
RESUMEN 11
ABSTRACT 11
INTRODUCCIÓN 12
1. JUSTIFICACIÓN 14
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 18
3. OBJETIVOS 22
3.1. OBJETIVO GENERAL 22
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 22
4. REVISIÓN DE LA LITERATURA 23
4.1. DISEÑO DE REDES DE LOGÍSTICA INVERSA 23
4.2. ROBUSTEZ DEL SISTEMA 28
4.2.1. Asignación de recursos 29
4.2.2. Optimización robusta y métricas de robustez en cadenas de suministro 29
4.2.3. Análisis de estructura u operatividad de redes eléctricas 33
5. METODOLOGÍA PROPUESTA PARA LA MEDICIÓN DE ROBUSTEZ EN CADENAS DE SUMINISTRO 35
5.1. SUPUESTOS DEL MODELO DE PROGRAMACIÓN Y CARACTERÍSTICAS PROPIAS DEL CASO DE PRUEBA 35
5.2. MODELO DETERMINÍSTICO 37
5.2.1. Conjuntos 37
5.2.2. Subconjuntos 38
5.2.3. Parámetros 38
5.2.4. Variables de decisión 40
5.2.5. Función objetivo 42

5.2.6. Restricciones 44
5.3. METODOLOGÍA DE ROBUSTEZ EN CIRCUITOS ELÉCTRICOS 54
5.3.1. Cálculo de robustez del nodo 56
5.3.2. Cálculo de importancia del nodo 59
5.4. ADAPTACIÓN DE METODOLOGÍA EN LA MEDICIÓN DE ROBUSTEZ PARA REDES DE LOGÍSTICA 60
5.4.1. Cálculo de robustez del nodo 61
5.4.2. Cálculo de importancia del nodo 64
5.5. CASO DE ESTUDIO 67
5.6. MODELO ESTOCÁSTICO 70
6. RESULTADOS 72
6.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS – CASO BASE 72
6.1.1. Medidas de desempeño operativas 72
6.1.2. Métrica de robustez adaptada 77
6.2. RESOLUCIÓN MODELO ESTOCÁSTICO 80
6.2.1. Identificación de configuraciones de la red 80
6.2.2. Evaluación de configuraciones de la red identificadas 82
6.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS – CONFIGURACIÓN SUGERIDA 86
6.3.1. Medidas de desempeño operativas 87
6.3.2. Métrica de robustez adaptada 90
7. CONCLUSIONES 96
8. RECOMENDACIONES 98
BIBLIOGRAFÍA 99

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Notación elementos redes de logística consignados en la Tabla 2.....26
Tabla 2: Elementos redes de logística inversa identificados.....27
Tabla 3: Tipos de producto, peso neto e identificación de utilización de material recuperable - caso de estudio.....69
Tabla 4: Parámetros estocásticos de sistema objeto de estudio 70
Tabla 5: Nivel de servicio promedio por cliente y tipo producto - caso base.....73
Tabla 6: % Utilización de capacidad instalaciones abiertas – caso base.....73
Tabla 7: Comparación por tonelada costo de recuperación en centros híbridos versus de compra - caso base.....77
Tabla 8: Comparación por tonelada costo de recuperación en centros recolección versus de compra - caso base.....77
Tabla 9: Cálculo de indicador de robustez en flujo directo - caso base. 78
Tabla 10: Cálculo de indicador de robustez en flujo inverso - caso base. 78
Tabla 11: Sugerencia de escenarios/configuraciones de instalaciones a abrir. 80
Tabla 12: % apertura de instalaciones en 500 escenarios.....81
Tabla 13: Solución determinista: caso base (SD) y mejores soluciones estocásticas (SE).....86
Tabla 14: Nivel de servicio promedio por cliente y tipo producto - configuración sugerida. 88
Tabla 15: % Utilización de capacidad instalaciones abiertas – configuración sugerida. 88
Tabla 16: Cálculo de indicador de robustez en flujo directo - configuración sugerida. 90
Tabla 17: Cálculo de indicador de robustez en flujo inverso - configuración sugerida. 91

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Índice de desempeño logístico año 2018.....14
Figura 2: Documentos publicados por año, *closed-loop supply chain* 15
Figura 3: Documentos publicados por año, *reverse logistics*.....16
Figura 4: Datos desarrollo de logística inversa en Colombia 16
Figura 5: Flujos directo e inverso red objeto de estudio.....18
Figura 6: Flujo directo red objeto de estudio. 19
Figura 7: Flujo inverso red objeto de estudio. 19
Figura 8: Ejemplo diferentes homogeneidades de distribución de carga – Igual grado de salida del nodo.....57
Figura 9: Ejemplo iguales homogeneidades de distribución de carga – Diferente grado de salida del nodo.....57
Figura 10: Flujo (ton) desde bodegas A, B, C y D hasta clientes E, F, G, H, I y J. 61
Figura 11: Localización de proveedores, clientes, plantas de producción, centros híbridos y de recolección – caso de estudio. 68
Figura 12: % composición costos logísticos – caso base. 74
Figura 13: % composición costos totales – caso base.....75
Figura 14: Necesidad de big bags en planta vs compra real – caso base. 76
Figura 15: Necesidad de estibas de madera en planta vs compra real – caso base. 76
Figura 16: Entropía y toneladas movilizadas flujos directo e inverso por configuración.....82
Figura 17: Comparación entre Robustez (Ri) y % capacidad ocupada de instalaciones abiertas por configuración flujo directo.....83
Figura 18: Comparación entre Robustez (Ri) y % capacidad ocupada de instalaciones abiertas por configuración flujo inverso. 84
Figura 19: Robustez total (RTOTAL) versus costos totales flujo directo por configuración.....84
Figura 20: Robustez total (RTOTAL) versus costos totales flujo inverso por configuración.....85
Figura 21: Robustez promedio versus costo total por configuración.....86
Figura 22: Necesidad de big bags en planta vs compra real - configuración sugerida. 89
Figura 23: Necesidad de estibas de madera en planta vs compra real - configuración sugerida. 89
Figura 24: Comparación case base y configuración 15 en términos de entropía y robustez. 91

Figura 25: Entropía y flujo pi por centro - configuración 15.....92
Figura 26: % capacidad utilizada, entropía y robustez (Ri) por centro - configuración 15.....93
Figura 27: % importancia, robustez (Ri) y total (Rtotal) por centro - configuración 94

GLOSARIO

CADENA DE SUMINISTRO: Supply Chain (SC, por sus siglas en inglés), abarca todas las actividades relacionadas con el flujo y transformación de bienes desde la etapa de extracción de materia prima hasta la entrega de producto terminado al usuario final, así como los flujos de información relacionados [1].

CADENA DE SUMINISTRO DE CIRCUITO CERRADO: Closed-Loop Supply Chain (CLSC, por sus siglas en inglés), hace referencia a la integración de los flujos directo e inverso (las rutas son las mismas en los dos flujos), considerada como una extensión de la cadena de suministro tradicional. Puede ser definida como las actividades de diseño, control y funcionamiento de un sistema para maximizar la creación de valor sobre el ciclo de vida de un producto con recuperación dinámica de este, a través de diferentes tipos de retornos a lo largo del tiempo [2].

CICLO DE VIDA DE UN PRODUCTO: es un concepto que proporciona una forma de rastrear las etapas de la aceptación de un producto, desde su introducción (nacimiento) hasta su declinación (muerte) [3].

COSTOS LOGÍSTICOS: comprenden todos aquellos vinculados con la planificación, gestión, control del flujo y almacenamiento de productos (incluyendo materias primas, insumos, productos en proceso o terminados, servicios e información), desde el punto de origen hasta el punto de consumo [4].

ENTROPÍA: concepto que fue introducido por primera vez por Clausius en 1865. En sus estudios sobre prácticas termodinámicas en máquinas de vapor, la conservación y la distorsión de la energía se explican en dos leyes esenciales. La entropía se menciona en la segunda ley, en la que se define como la tendencia de un sistema cerrado a volverse cada vez menos confiable como resultado del cambio en el estado de su energía. De acuerdo con esta ley, todo sistema cerrado tiene propensión entrópica y, por lo tanto, está condenado a un eventual y completo cese en sus actividades [5].

FALTANTES: o en inglés BACKORDER, hace referencia a las órdenes pendientes bajo las cuales se presentan las tres condiciones siguientes: a) el cliente debe estar dispuesto a esperar a que la orden le sea enviada, b) el cliente no puede ser atendido en el momento en que él realiza el pedido y c) la demanda pendiente debe poderse satisfacer en un momento posterior [6].

LOGÍSTICA: es la parte del proceso de la cadena de suministro que planea, lleva a cabo, controla el flujo y almacenamiento eficientes y efectivos de bienes/servicios, así como de la información relacionada desde el punto de origen hasta el de consumo, con el fin de satisfacer los requerimientos de los clientes [4].

LOGÍSTICA INVERSA: Reverse Logistics (RL, por sus siglas en inglés), se refiere al proceso de planificar, implementar y controlar eficientemente el flujo de materias primas, inventario en curso, producto terminado e información relacionada, desde el punto de consumo hacia el de origen con el propósito de recapturarlos, crearles valor o desecharlos [7].

INVENTARIO: es la cantidad de mercancías depositadas o las existencias de determinado producto, tanto en almacenes como en superficies de ventas: materias primas, productos semiterminados, productos terminados, bienes de equipo y recambio, materiales diversos, productos defectuosos u obsoletos, envases y embalajes, residuos [8].

NIVEL DE SERVICIO: se define como el porcentaje de los pedidos que la empresa es capaz de servir en el plazo adecuado. Este puede ser calculado con base a líneas, unidades y valor [9].

OUTSOURCING: o subcontratación, es la práctica de tomar una de las actividades relevantes de la organización y asignarla a una parte independiente [10].

SISTEMA: es un conjunto de elementos en interacción que se compone de un aspecto estructural (límites, elementos, red de comunicaciones e informaciones) y de un aspecto funcional [11].

SOSTENIBILIDAD: concepto que hace referencia al desarrollo que satisface las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de satisfacción de las necesidades de las generaciones futuras [12].

VALOR AGREGADO: es la traducción de la expresión inglesa *“value added”,* usada por los economistas norteamericanos para designar el valor que la actividad productiva de la empresa añade o incorpora, con la utilización de los factores de la producción a las materias primas o bienes intermedios que procesa. Podría decirse, simplificando las cosas, que el valor agregado es el que recibe un bien durante el proceso de su producción [13].

VENTAJA COMPETITIVA: valor que una empresa es capaz de crear para sus clientes, en forma de precios menores con respecto a los competidores o por la oferta de productos diferenciados. La ventaja competitiva crece fundamentalmente debido al valor que una empresa es capaz de generar [14].

RESUMEN

Debido a la alta incertidumbre y existencia de eventos que causan interrupciones en el flujo de las cadenas de suministro, se hace necesario conocer la capacidad de respuesta frente a las perturbaciones que se presenten a lo largo de la misma. En este trabajo se propone un modelo de programación lineal entera mixta para el diseño de una red de logística inversa, así como el análisis de su robustez mediante una nueva metodología, basada en la entropía e importancia de cada nodo, la cual se ha utilizado anteriormente en sistemas eléctricos. El principal aporte de la presente investigación consiste en la adaptación de una técnica diferente a las comúnmente utilizadas en la literatura para la medición de robustez en cadenas de suministro, con la finalidad de sugerir una distribución de dicha red que tenga el potencial de alcanzar el mayor parámetro. Una combinación de elementos teóricos y prácticos se llevan a cabo en el proyecto con el objetivo de evaluar un caso de estudio aplicado en la recuperación de estibas de madera y big bags por parte de una empresa productora de alimento balanceado. Se realiza un análisis con 500 escenarios para evaluar la adaptación de la métrica de robustez y agrupar las soluciones hasta en 16 tipos de configuraciones, con el objetivo de comparar estas en un conjunto de 5000 nuevos escenarios y poder seleccionar finalmente aquella que más brinda robustez al sistema logístico bajo estudio.

Palabras Clave: *logística inversa, programación lineal, entropía, importancia del nodo, escenarios, robustez.*

ABSTRACT

Due to the high uncertainty and existence of events that cause interruptions in the flow of supply chains, it is necessary to know the response capacity in the face of disturbances that occur throughout it. In this work, a mixed integer linear programming model is proposed for the design of a reverse logistics network, as well as the analysis of its robustness through a new methodology, based on the entropy and importance of each node, which has been used previously in electrical systems. The main contribution of this research consists in the adaptation of a different technique to those used in the literature for the measurement of robustness in supply chains, in order to suggest a distribution of said network that has the potential to reach the highest parameter. A combination of theoretical and practical elements are carried out in the project with the aim of evaluating a case study applied to the recovery of wooden pallets and big bags by a balanced feed production company. An analysis is carried out with 500 scenarios to evaluate the adaptation of the robustness metric and group the solutions into up to 16 types of configurations, with the aim of comparing these in a set of 5000 new scenarios and finally being able to select the one that provides the most robustness to the logistics system under study.

Keywords: *reverse logistics, linear programming, entropy, node importance, scenarios, robustness.*

INTRODUCCIÓN

La cadena de suministro está compuesta por todos aquellos eslabones que establecen interacciones orientadas a garantizar eficiencia y un nivel de servicio adecuado al cliente [15]; comprende todas aquellas actividades relacionadas con la búsqueda, adquisición y transformación de los bienes y servicios de una compañía [4]. Constantemente las empresas dinamizan estas con el objetivo de involucrarse en un abastecimiento más efectivo y rentable, el cual se caracteriza por la necesidad latente de minimizar costos, agregar valor al producto y desarrollar competitividad en un mercado cada vez más exigente. De ahí que los ejecutivos se enfrenten a una de las decisiones estratégicas más importantes al revisar y rediseñar sus redes de distribución con más frecuencia que nunca, en pro de que las cantidades producidas, ubicaciones y capacidades de instalaciones, así como el flujo entre cada una de ellas sean óptimas y logren responder adecuadamente a las necesidades del mercado. En consecuencia, durante los últimos años se ha logrado extender el alcance de la red al introducir procesos de recuperación con fines de reutilización, reciclaje o restauración [16]; en la literatura existente el anterior enfoque se ha denominado *cadena de suministro de circuito cerrado,* en la cual se realiza el proceso de *logística inversa* [17].

En términos generales, en la **logística directa o convencional**, después de ser compradas a los proveedores, las materias primas se convierten en productos terminados en las plantas de fabricación, para ser transferidos a los clientes con el objetivo de satisfacer sus demandas [18]. En la **logística inversa**, el flujo lo componen todos aquellos materiales que son retornados por estos últimos, quienes los regresan para la reparación, reconstrucción o eliminación [19].

La logística inversa surge debido a la necesidad de mitigar el impacto ecológico al responder a las preocupaciones ambientales y normas establecidas nacional e internacionalmente [20]. Estos últimos aspectos se convirtieron en el punto de partida de las empresas para identificar los distintos beneficios financieros que se pueden lograr al llevar a cabo un completo proceso de reutilización, puesto que todos los productos que ya han cumplido con su ciclo de vida pueden ser colocados de nuevo en circulación a lo largo del flujo de las operaciones. Cada vez son más las empresas que se han adherido a esta práctica, dado que los resultados se traducen en un ahorro en costos y en la disminución en el porcentaje de utilización de materias primas e insumos tradicionales [21]; su enfoque está en la recuperación de material (reciclaje), de partes o productos (remanufactura), y de administración de residuos (correcta disposición) [22]. Precisamente, la primera de estas es una de las actividades clave relacionadas con la reutilización de insumos en las empresas de la actualidad. El retorno y tratamiento recuperador de materiales, como por ejemplo de empaques (cajas, sobres, bolsas, estibas, entre otros), permite que dichos insumos puedan ser utilizados más de una vez en las operaciones de la compañía, ya que en cada proceso son dotados de características iguales, similares

o, incluso, diferentes a las iniciales, lo que garantiza un uso constante y repetitivo. Constantemente, estos materiales se mueven a lo largo de toda la red, por lo que debe existir una alta sincronización a lo largo de los distintos eslabones: es aquí donde entra en juego la eficiencia, tanto en el flujo directo (compra de unidades nuevas, reutilización, etc.), como en los procesos inversos (recuperación, correcta disposición, etc.) desempeñados a lo largo de toda la red de logística, con el objetivo de garantizar el máximo aprovechamiento de los insumos.

Ahora bien, constantemente los actores que intervienen en estas cadenas de suministro se ven expuestos a múltiples factores de incertidumbre e imprevistos, situaciones que pueden desencadenar consecuencias a lo largo la red. La robustez es definida por Ali, Maciejewski, Siegel y col. [23] como la capacidad que tiene un sistema de preservar sus características de rendimiento frente a diversas fluctuaciones que se presentan. Concretamente, una cadena de suministro es robusta si la degradación de sus características de rendimiento es restringida cuando ocurren determinadas perturbaciones. Es por esto, por lo que desarrollar y administrar cadenas de suministro con esta condición se vuelve una necesidad de cara a brindar normalidad en la operación, así como confiabilidad en la toma de decisiones en los niveles estratégico, táctico y operativo. En otras palabras, se hace necesario estructurar dichas redes de tal manera que puedan resistir todo evento que cause algún tipo de interrupción en el flujo operacional, es decir, se deben diseñar cadenas de suministro que lleguen a ser robustas y garanticen así, el rendimiento del sistema en general [24].

Con el objetivo de profundizar los conceptos y temáticas descritas previamente, el presente documento se desarrolla de la siguiente manera: en el capítulo 1, se consigna la justificación del proyecto, en el 2, se presenta el planteamiento del problema de investigación, en el 3, se formulan los objetivos, el 4, detalla la revisión de la literatura, en el 5, se propone el modelo de programación lineal y adaptación de la metodología para la medición de robustez en cadenas de suministro, lo cual se complementa con un caso de estudio presentado al final del capítulo, que servirá para analizar el comportamiento del sistema tanto determinista como estocásticamente. Por otro lado, los resultados obtenidos, así como la validación de la metodología y la propuesta de configuración más robusta se exponen en el capítulo 6, mientras que conclusiones son presentadas en el 7. Finalmente, las recomendaciones son abordadas en el capítulo 8.

1. JUSTIFICACIÓN

La reducción de los costos logísticos (almacenamiento, transporte, inventario, administrativos, entre otros) de una compañía constituye una tarea de primera necesidad, ya que en el territorio colombiano su proporción con respecto al precio de venta de un producto ha ido disminuyendo con el paso de los años: durante 2015 fue de 14.9%, de 13.5% en 2018 y de 12.6% en 2020 [25]; evolución producto del trabajo articulado entre el sector privado y público en pro de mejorar el desempeño logístico.

Tal como se afirma en el documento del Departamento Nacional de Planeación (DNP) Dirección de Infraestructura y Energía Sostenible [25] denominado *"Encuesta nacional logística 2020"*: "La mejora del desempeño logístico del país constituye uno de los principales medios para incrementar los niveles de competitividad y lograr que Colombia pueda alcanzar un mejor posicionamiento en los mercados globales, una mayor productividad de sus empresas y un aumento en la calidad de vida de sus habitantes". Según el último informe del Banco Mundial del año 2018 sobre el índice de desempeño logístico [26], Colombia alcanzó un parámetro de 2.94, ubicándose en el puesto 5 de 15 en América Latina –el mejor posicionado de la Región es Chile con 3.3-, superando a países como Perú, Ecuador o Argentina y hallándose por debajo de naciones como Estados Unidos (3.89), la OCDE (promedio de 3.6), o China (3.61). Para mayor ampliación y visualización de las demás naciones remitirse a la Figura 1.

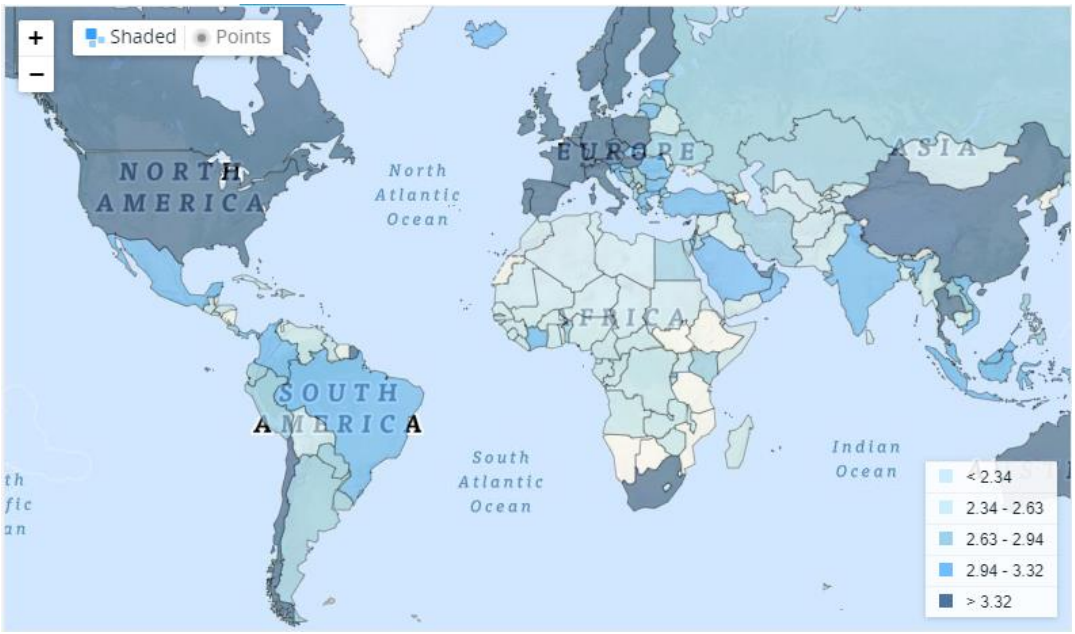

Figura 1: Índice de desempeño logístico año 2018 [26].

Intervenir las cadenas de suministro constituye un potencializador del crecimiento logístico empresarial, y como tal, debe ser prioridad a la hora de desarrollar estrategias que conlleven al incremento de la competitividad en los países. En consecuencia, la estructuración de una red de logística de una organización implica una decisión que no debe ser tomada a la ligera, ya que tiene efectos a largo plazo. Una cadena de suministro bien administrada es a lo que deben apuntar las empresas en la actualidad, dado que los beneficios que obtienen son significativos.

Con el objetivo de apoyar tal situación, se hace necesario tomar medidas correctivas innovadoras: una de ellas es llevar la cadena de abastecimiento más allá del ciclo de vida del producto, es decir, extendiéndola hasta la reutilización/reciclaje con el objetivo de generar mayores beneficios.

La logística inversa no es un capricho, existen por lo menos 4 factores para su impulso y fortalecimiento en las empresas: *ambientales, legales, sociales y económicos.* Es por esto por lo que la logística inversa y, en general, los problemas de la cadena de suministro de circuito cerrado han atraído la atención tanto del mundo académico como de los profesionales, situación que es respaldada por el gran número de publicaciones en revistas científicas [27]. Solo en las dos últimas décadas el número de investigaciones en el campo de la logística inversa ha presentado un aumento que no puede ser pasado por alto; al revisar, por ejemplo, las estadísticas provenientes de la base de datos *SCOPUS*™ [28] con respecto a los dos temas previamente enunciados: *"closed-loop supply chain"* y *"reverse logistics"*, se puede identificar la tendencia creciente en el número de artículos publicados (Figura 2 y Figura 3).

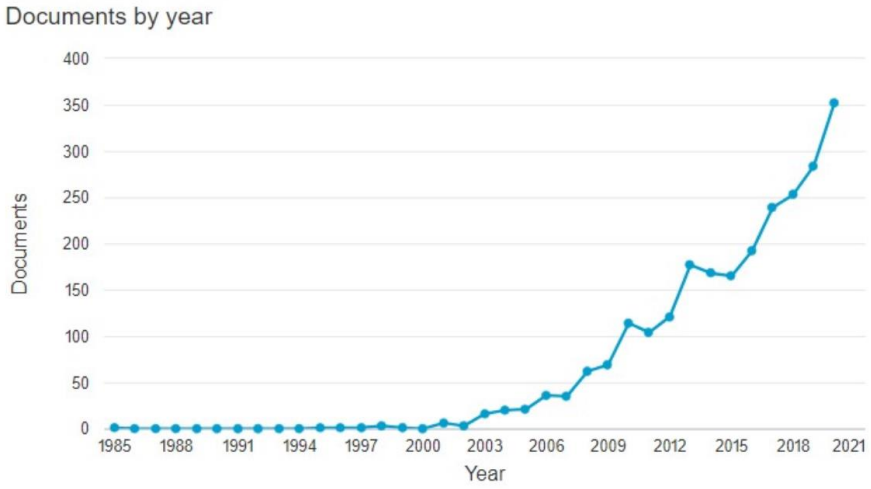

Figura 2: Documentos publicados por año, *closed-loop supply chain* [28].

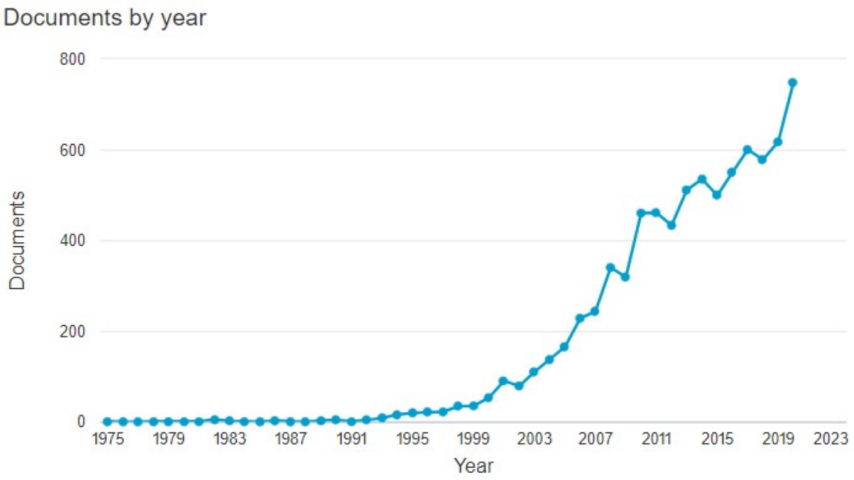

Figura 3: Documentos publicados por año, *reverse logistics* [28].

A nivel nacional, resulta conveniente referenciar de nuevo la *"Encuesta nacional logística"* [25] para destacar algunas de las cifras en las que se detallan los avances y tendencias de la actualidad colombiana alrededor de la logística inversa: por un lado, la proporción de empresas que han implementado alguna vez procesos recuperadores pasó del 51% en 2018 al 51.9% en 2020, lo cual refleja que, si bien las industrias están adoptando esta filosofía, aún hay un gran camino por recorrer. Por otro lado, se identifican las diferentes aplicaciones que se han fortalecido al desarrollar dichos procesos: reutilización, recuperación, reducción de emisiones, entre otros, así como los sectores más beneficiados por impulsar actividades inversas (Figura 4).

Acciones de logística verde	Agropecuaria	Industria	Construcción	Comercio	Minería	Transporte y almacenamiento
Desarrollo de empaques o envases reutilizables	16,2 %	17,5 %	20,1 %	21,3 %	13,6 %	8,7 %
Logística de reversa para la recuperación de materiales de desperdicio	17,0 %	18,3 %	18,3 %	17,5 %	18,2 %	23,0 %
Uso de vehículos alternativos (eléctricos, bicicleta y otros)	5,8 %	6,2 %	11,3 %	7,1 %	3,1 %	2,6 %
Manejo eficiente de la energía en los centros de distribución	11,6 %	13,3 %	8,6 %	17,8 %	14,2 %	10,1 %
Reducción de las emisiones de CO_2 en actividades logísticas	4,5 %	4,5 %	4,1 %	7,3 %	26,2 %	20,0 %
Uso de combustibles alternativos para la flota de transporte	3,3 %	2,8 %	2,3 %	1,6 %	8,2 %	4,5 %
Otras	13,5 %	1,1 %	2,7 %	3,6 %	10,0 %	3,9 %
Ninguna	46,8 %	54,3 %	42,4 %	47,7 %	45,7 %	40,1 %

Figura 4: Datos desarrollo de logística inversa en Colombia [25].

En concordancia con este documento: “El proceso generalizado de reducción de barreras arancelarias y apertura económica para el intercambio comercial de mercancías ha convertido al costo logístico en una variable determinante para medir la competitividad de un país. En consecuencia, diversos gobiernos y el sector privado a nivel global se han esforzado por medir los costos logísticos de sus sectores y apuestas productivas, con el propósito de lograr eficiencias que permitan contar con precios más competitivos para sus bienes”. Dicha situación se logrará en la medida en que las cadenas de suministro sean configuradas correctamente, y se puedan disminuir costos logísticos, siendo eficientes y controlando el elevado número de eventos que suceden al interior de estas, eventos que pueden entorpecer el flujo normal de las operaciones en algún punto; y son precisamente las consecuencias y el nivel de respuesta de la organización frente a las perturbaciones al sistema, lo que determina el nivel de robustez de alguna red en específico.

Por lo anterior, en el presente trabajo se evalúa la robustez de una cadena de suministro de ciclo cerrado mediante una nueva metodología, la cual se ha utilizado anteriormente en análisis de sistemas eléctricos.

El principal aporte de la investigación consiste en la adaptación de una técnica diferente a las comúnmente utilizadas en la literatura para la evaluación de la robustez de cadenas de suministro, la cual se integra con características que, de igual manera, no han sido ampliamente exploradas en el campo de logística inversa. Una combinación de elementos teóricos y prácticos se lleva a cabo en la investigación para diseñar una red de logística, que incorpore tanto el flujo directo como inverso, y en la que se evalúe un caso de estudio aplicado a una empresa productora de alimento balanceado, analizando, de igual manera, su nivel de tolerancia en comparación con múltiples escenarios estocásticos.

Todo esto tiene un impacto económico notable en la organización, por lo que es la directamente beneficiada; sin embargo, no son los únicos: indirectamente se retribuye a la sociedad en general, ya que al realizar una mejor utilización de los recursos se está ayudando a incrementar la sostenibilidad, al tiempo que se disminuye el impacto al medio ambiente.

Igualmente, el modelo planteado y la metodología adaptada son generalizados, razón por la cual pueden ser aplicados a una amplia variedad de industrias o sectores del país que se interesen por la logística inversa como herramienta de crecimiento rentable y sostenible.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Impulsar el desarrollo de redes de logística rentables y eficientes es una tarea de primera necesidad de cara a fortalecer el desarrollo competitivo en el territorio colombiano. Consecuente con lo anterior, en la presente investigación se toma como input una cadena para el suministro de alimento balanceado, la cual consta de dos flujos: ***1)*** *directo*, transportando producto terminado al cliente en **(a)** big bags para material a granel y **(b)** estibas de madera para material en bultos, y ***2)*** *inverso*, retornando ambos materiales ya utilizados con el objetivo de extender su ciclo de vida útil (Figura 5).

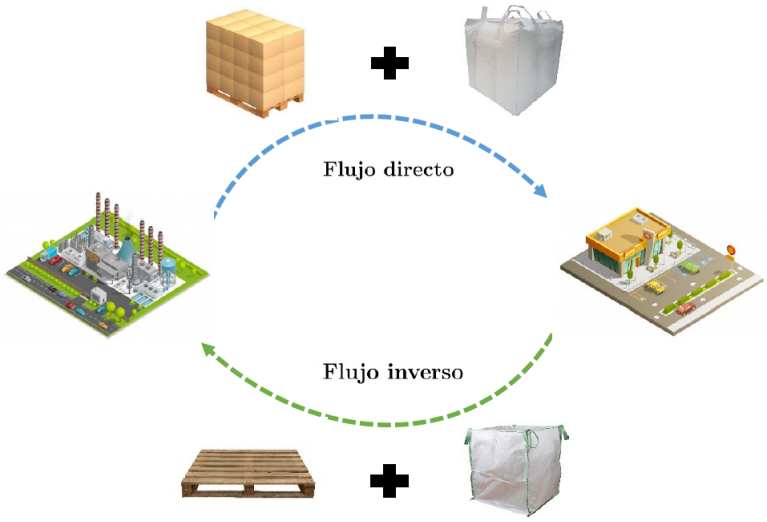

Figura 5: Flujos directo e inverso red objeto de estudio.

Agregando mayor nivel de detalle a la situación objeto de estudio se establece que:

- **Flujo directo:** se compone de los proveedores de estibas y big bags, que son quienes surten dichos materiales a las plantas de producción; estas últimas, a su vez, manufacturan y envían el producto terminado a los centros híbridos o directamente a los clientes; el flujo de materiales terminados entre las instalaciones híbridas está permitido. De igual manera, un proceso de maquila o subcontratación se activa cuando los requerimientos del mercado superan la capacidad de fabricación propia (Figura 6). Tener en cuenta que el flujo de la línea azul punteada se dirige de izquierda a derecha.

- **Flujo inverso:** comprende el retorno desde los clientes hasta los centros híbridos y/o centros de recolección de una fracción de estibas y big bags para realizar actividades de acopio y consolidación; a estas instalaciones llega el material clasificado con determinado estado de vida útil, para realizarle labores que le permitan continuar en la red de logística inversa o, por el contrario, ser

dispuesto por haber cumplido con su ciclo de vida útil. Aquellos que aún pueden ser aprovechados son reparados; caso seguido, el material recuperado es enviado a las plantas manufactureras propias donde se utilizarán de nuevo y se convertirán en un insumo disponible para surtir la demanda del siguiente período (el restante debe ser abastecido por los proveedores). Una vez se han determinado las nuevas necesidades de producción del siguiente período, el ciclo se repite (Figura 7). Tener en cuenta que el flujo de la línea verde punteada se dirige de derecha a izquierda.

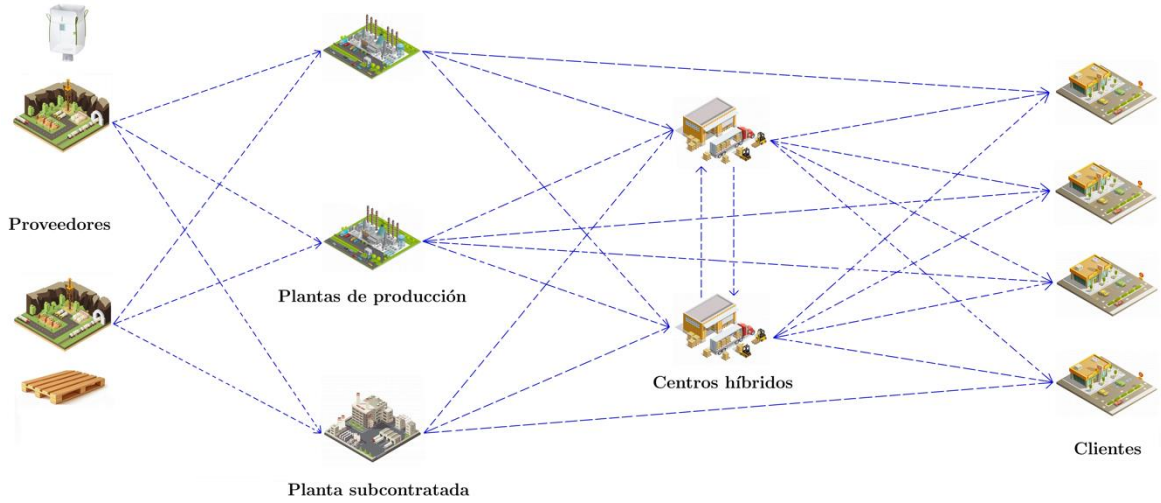

Figura 6: Flujo directo red objeto de estudio.

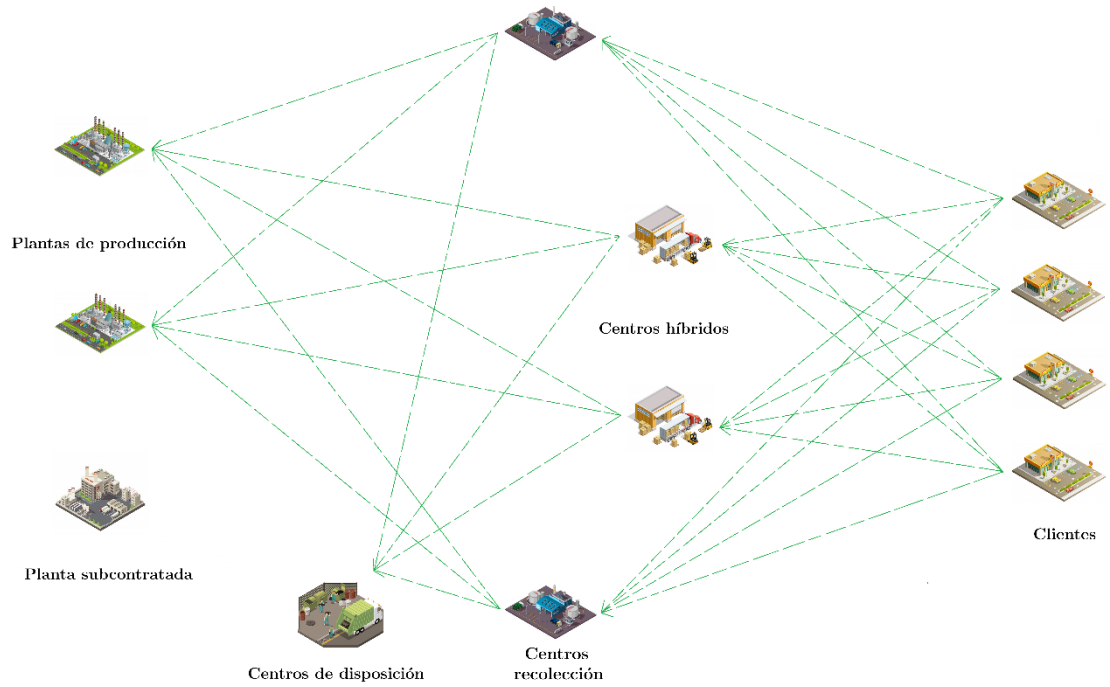

Figura 7: Flujo inverso red objeto de estudio.

En la red propuesta se desea determinar la ubicación y cantidad óptima (desde el análisis de costos) de dos clases de instalaciones, las cuales se caracterizan así:

- **Centros de recolección:** funcionan solamente en sentido inverso al permitir el flujo de material que ha sido retornado.

- **Centros híbridos:** facilitan envío en sentido directo e inverso; son considerados en ambos flujos con el objetivo de reducir la contaminación y generar economías a escala en algunos procesos al ahorrar costos por compartir equipos, materiales e infraestructura [29].

Ambos puntos son necesarios en la cadena de suministro dado que en dichas instalaciones se reúnen e intervienen los materiales que retornan, para que continúen a las actividades de remanufactura solamente los que aún no han finalizado su ciclo de vida; este es un eslabón importante dado que es aquí donde se realizan las actividades de reproceso antes de permitir que sea reutilizado el material.

Se parte del hecho de que la empresa ya posee una red de logística directa establecida, por lo que se considera la posibilidad de extender el alcance a procesos reversivos con las instalaciones que ya se cuentan o, por el contrario, de abrir centros que operen únicamente en sentido inverso. Cabe destacar, que el sistema propuesto posee características multiperíodo con el propósito de acercarse más al comportamiento de los sistemas del mundo real:

- En el primer período se decide cuáles de las instalaciones deben ser abiertas de acuerdo con la minimización de costos formulada.

- En los períodos posteriores se determina la cantidad de demanda que es servida o, si se considera, aquella que no y, por ende, los flujos que circulan en cada uno de los nodos, teniendo en cuenta que la demanda no atendida del período inmediatamente anterior es parte de las necesidades del período actual; sin embargo, no necesariamente esta debe ser siempre satisfecha.

Adicionalmente, en el proyecto se consideran parámetros entre los que se destacan (para mayor claridad ver el Capítulo 5.5):

- Costos de transporte, compra, manejo y almacenamiento de inventario de materiales, fijos de apertura de centros y de penalización por demanda no servida.

- Capacidades de instalaciones.

- Demandas de los clientes.

- Tasas de retorno y disposición.

El objetivo del problema es minimizar costos y permite determinar, además de la localización de instalaciones, el flujo entre cada par de eslabones de la red, las cantidades procesadas en las plantas: propias y externa (subcontratación), la demanda no servida a los clientes y la necesidad de compra de big bags y estibas de madera, así como el inventario de estos materiales y producto terminado en cada período.

Una vez se ha estructurado y validado el caso de estudio en conjunto con el modelo propuesto, se adapta la metodología de medición de robustez basada en la entropía e importancia de cada una de las instalaciones híbridas o de recolección abiertas, con el objetivo de medir qué tan resistente es la red optimizada frente a perturbaciones gestadas que desencadenen en algún cierre no previsto de los centros. Dicha metodología se toma como referencia de los sistemas eléctricos debido a que permiten capturar y analizar integralmente tanto los aspectos estructurales (factores estáticos en el tiempo) como los operativos (factores dinámicos en el tiempo). Caso seguido, se generan 500 escenarios, producto de la aleatoriedad en el *nivel de demanda* y en la *tasa de retorno del material a recuperar*, agrupando las soluciones en configuraciones similares; posteriormente, un análisis de 5000 escenarios –el número es limitado a este debido a los altos tiempos de cómputo que demanda por la variedad de posibilidades- es realizado con el objetivo de comparar las distintas configuraciones en iguales condiciones, esto para encontrar la mejor propuesta en términos de mayores parámetros de robustez y menores costos totales de operación y poder finalmente dar respuesta a los siguientes interrogantes de la presente investigación:

¿Cómo medir la robustez de una cadena de suministro con una metodología que esté basada en la entropía e importancia nodal y que haya sido aplicada con éxito en otros sistemas diferentes a los logísticos?

¿Qué tan robusto es el comportamiento de una red de logística cuando es sometida a alguna perturbación?

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la robustez en una red optimizada de logística inversa para la reutilización de materiales, mediante programación lineal entera mixta, con el propósito de identificar la estabilidad ante alguna perturbación, por medio de una nueva métrica de robustez basada en la entropía e importancia nodal.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar el sistema actual, analizando los elementos relevantes que se deben considerar para el diseño de un proceso de logística inversa en el sector manufacturero.

- Formular un modelo matemático de una red de logística inversa, con el objetivo de minimizar los costos asociados.

- Validar la implementación del modelo en un caso de estudio aplicado a una empresa productora de alimento balanceado.

- Medir la robustez de la cadena de suministro objeto de estudio mediante la adaptación de una metodología utilizada previamente en el análisis de sistemas eléctricos.

- Validar la medida de robustez en la red propuesta, con la finalidad de determinar el nivel de estabilidad de esta cuando es sometida a alguna perturbación.

4. REVISIÓN DE LA LITERATURA

Retomando lo expuesto en el capítulo 1, la logística inversa se ha convertido en un tema de vanguardia en el mundo académico y empresarial al fortalecerse como un paradigma de gestión en los mercados. Rogers y Tibben-lembke [30] dieron una amplia definición en torno al tema: “La logística inversa comprende el proceso de planificar, implementar y controlar eficientemente el flujo de materias primas, inventario en curso, productos terminados e información relacionada, desde el punto de consumo hacia el punto de origen con el propósito de recapturarlos, crearles valor, o desecharlos”.

Consecuente con lo anterior, la investigación actual surge con el objetivo de articular 2 grandes ejes en torno a este tema: **(a)** el diseño de los sistemas y **(b)** su medición de robustez. En conjunto proporcionan una herramienta que permite a la organización tomar decisiones en cualquiera de los 3 niveles: estratégico, táctico y operativo. A continuación, se relacionan las investigaciones realizadas.

4.1. DISEÑO DE REDES DE LOGÍSTICA INVERSA

Los elementos que pueden ser considerados en el diseño de una red de logística inversa son múltiples, por esta razón, a continuación, se realiza una revisión bibliográfica de parte de la literatura existente, la cual permitió determinar las características consideradas en el presente trabajo.

Autores como Giuntini y Andel [31], Rogers y Tibben-Lembke [32], Stock y Lambert [33], Schwartz [34], Marcoux, Riopel y Langevin [35] y Stock, Speh y Shear [36] proponen un sistema de logística inversa cuyos elementos comunes entre todos permiten agruparlo en 4 actividades principales:

- **Control del acceso:** inicia con el reconocimiento de la devolución de un producto; surge una vez un cliente declara la necesidad de realizar el retorno a la empresa. En esta etapa se evalúan cuáles son los productos que se les permite ingresar al sistema logístico inverso, y cuáles han de ser rechazados por su falta de funcionalidad. Los sistemas de logística inversa que no implementan controles de entrada dificultan el proceso posterior, situación que se traduce en acciones y costos adicionales, y desentendimiento entre proveedores y clientes como consecuencia de falta de confianza sobre las causas de los retornos.

- **Recolección:** consiste en consolidar y movilizar los productos a retornar; este segundo paso es fundamental para tener éxito en la gestión del sistema y

controlar los costos. Esta actividad consta de dos etapas: recogida de los productos devueltos y su transporte. La responsabilidad recae en la empresa, un tercero o el cliente; la elección depende de diversos factores: complejidad de los productos, razón de la devolución, localización, etc.

- **Clasificación:** determina el destino de cada uno de los artículos devueltos; en ese momento, la compañía puede decidir qué hacer con el producto, sea objeto de inspección, prueba, u otras manipulaciones. El proceso de clasificación está generalmente presente en los sistemas de logística inversa que involucran muchos sitios y procesos. Una clasificación preliminar se realiza tras la recepción del producto devuelto por la empresa; la siguiente tarea es llevar a cabo una verificación del artículo devuelto. Además de estas decisiones, la empresa debe determinar los criterios para aceptar una devolución, decidir cuáles productos pueden ser almacenados, y tener en cuenta las complejidades del proceso de clasificación.

- **Tratamiento:** el destino del producto. Thierry, Salomon, Nunen y col. [37] proponen 5 opciones para agregar valor a aquellos que han cumplido con su ciclo de vida: reparación, reacondicionamiento, refabricación, canibalismo y reciclaje. En comparación con los demás elementos, el tratamiento puede generar ingresos, de hecho, es el objetivo principal de esta actividad para recuperar el mayor valor posible de los productos devueltos.

La eficacia del proceso de logística inversa dependerá de la manera en la que éste se planee, controle y administre. Así pues, a continuación, se detallan algunos puntos críticos que deben ser tenidos en cuenta para lograr lo anterior según Betancur y col. [38]:

- **Procesos estandarizados y mapeados:** el diseño e implementación de redes de logística inversa no deben ser tratados como procesos y actividades esporádicas o espontáneas; las organizaciones deben tener procesos correctamente mapeados y procedimientos formalizados a fin de establecer actividades regulares, que garanticen el control y la consecución de mejoras en el mediano y largo plazo.

- **Tiempos de ciclo reducidos:** en los procesos de logística inversa, el tiempo de ciclo comprende el período que transcurre entre la identificación de la necesidad de la recolección, disposición o retorno de los productos y su efectivo reprocesamiento, remanufactura o desecho; tiempos de ciclo muy largos conllevan que la organización incurra en costos innecesarios, esfuerzos adicionales, lo que compromete el capital de trabajo. Entre los factores que generan tal situación resulta conveniente destacar: controles ineficaces de entrada, insuficiencia de estructura dedicada al proceso logístico reversivo, y falta de procedimientos claros sobre actividades a realizar.

- **Sistemas de información:** la eficacia de las redes de logística inversa está también determinada por la capacidad que tienen las organizaciones de medir sus procesos: rastreando los retornos, midiendo los tiempos de ciclo, el desempeño de los proveedores, etc.; se hace necesario, por tal razón, contar con herramientas que permitan obtener información en tiempo real, de manera tal, que se pueda mejorar el desempeño de la red.

- **Planeación y diseño de la red de logística:** la implementación de redes de RL requiere, por parte de la organización y de cada uno de sus colaboradores, una definición de una infraestructura adecuada que permita ejecutar tareas relacionadas con el proceso: instalaciones de recolección, consolidación, inspección, almacenamiento, reprocesamiento, así como los sistemas de transporte relacionados deben ser dispuestos a fin de garantizar la eficacia de las operaciones planeadas previamente.

- **Relaciones colaborativas entre clientes y proveedores:** en las redes de logística inversa existen minoristas e industrias que retornan productos a la planta con el fin de extender su ciclo de vida útil. Son comunes los conflictos relacionados con la interpretación sobre a quién corresponde la responsabilidad de aspectos como: causas en averías, recolección, almacenamiento provisional mientras el producto es recolectado, entre otros; se debe, así pues, propiciar relaciones colaborativas entre las partes participantes en el proceso logístico reversivo, a fin de garantizar eficiencia y eficacia en las operaciones.

Debido a que las actividades tácticas y operativas se implementan después de establecer las decisiones estratégicas, la configuración de la red de logística se convertirá en una restricción para las decisiones de ambos niveles; dado que el cambio de la configuración no es una tarea fácil, puesto que implica consumo de tiempo y costos, este debe ser optimizado para el funcionamiento eficiente en el largo plazo de toda la cadena de suministro.

Con el objetivo de estructurar el criterio de relevancia que permite seleccionar los elementos que se incluyen en el presente trabajo, a continuación, se presenta en la Tabla 2 el resumen de la revisión de distintas investigaciones de los últimos 10 años (ver notación en la Tabla 1), tarea que se ha realizado de manera sistemática, identificando aspectos como: tipo y eslabones de la red, características, decisiones y objetivos del modelo.

Tabla 1: Notación elementos redes de logística consignados en la Tabla 2.

Categoría	Sigla	Descripción
Tipo de red	**LI**	Logística inversa
	IT	Logística tradicional/inversa
Eslabones de la red	**PR**	Proveedores
	CM	Plantas de producción
	CD	Centros de distribución
	CHB	Centros híbridos
	CR	Centros de recolección
	CI	Centros de inspección
	CRP	Centros de remanufactura
	CDP	Centros de disposición
	MS	Mercado secundario
Características del modelo	**MP**	Multiperíodo
	UP	Único período
	MPr	Multiproducto
	UPr	Único producto
	Cp	Capacidad predeterminada
	Nc	No capacidad predeterminada
	DE	Demanda estocástica
	D	Demanda determinística
	TRE	Tasa retorno estocástica
	TR	Tasa retorno determinística
	OT	Otros
Decisiones del modelo	**La**	Localización
	Sd	Satisfacción de la demanda
	I	Inventario
	Ru	Ruteo
Objetivos del modelo	**C**	Costos
	U	Utilidades
	Ns	Nivel de servicio
	Ma	Impactos ambientales
	Sc	Impactos sociales
	Ca	Calidad

Tabla 2: Elementos redes de logística inversa identificados.

#	Artículo	Tipo		Eslabones									Características											Decisiones				Objetivos					
		LI	IT	PR	CM	CD	CHB	CR	CI	CRP	CDP	MS	MP	UP	MPr	Upr	Cp	Nc	D	DE	TR	TRE	OT	La	Sd	I	Ru	C	U	Ns	Ma	Sc	Ca
1	[39]	•			•			•		•	•			•		•	•		•		•			•	•			•			•		
2	[40]		•		•	•				•	•		•		•					•				•	•	•			•				
3	[41]	•			•	•								•		•	•		•					•	•			•			•		
4	[42]		•	•	•		•	•		•	•			•	•		•			•		•		•	•			•		•			•
5	[43]	•						•	•	•	•	•		•	•		•					•		•	•			•	•				
6	[44]		•	•	•	•				•	•	•	•		•		•			•				•	•			•					
7	[45]	•						•	•	•	•			•		•	•		•			•		•	•				•				
8	[46]	•				•				•				•	•							•		•	•				•				
9	[47]	•								•	•	•		•		•	•		•					•	•				•				
10	[48]	•						•		•	•			•		•	•							•	•			•			•		
11	[49]	•		•	•	•								•		•	•		•					•	•			•					
12	[18]		•		•	•			•				•			•	•								•		•	•					
13	[50]		•	•	•	•		•			•		•		•		•			•				•	•				•	•			
14	[51]		•	•	•	•		•		•	•	•		•	•		•		•		•		•	•	•				•				
15	[52]		•		•				•	•			•			•	•							•	•				•				
16	[53]		•		•	•		•		•	•		•		•				•					•	•				•			•	
17	[54]	•						•		•				•	•		•			•				•	•			•		•	•		
18	[55]	•							•	•	•			•		•	•			•				•	•				•				
19	[56]		•		•			•			•			•		•		•		•		•		•	•				•				
20	[57]		•	•	•	•		•	•	•	•	•	•			•	•							•	•			•					
21	[58]	•								•	•			•		•	•							•				•					
22	[59]	•		•					•	•	•			•		•				•				•	•			•					
23	[60]	•						•		•	•	•	•			•	•							•	•			•					
24	[61]		•		•	•		•	•	•		•		•	•		•		•						•				•		•	•	
25	[62]	•				•		•	•	•	•		•			•	•			•		•		•	•	•		•					
26	[63]		•	•	•		•				•			•		•	•			•			•	•	•		•		•		•	•	
27	[64]	•							•	•	•			•		•	•							•	•		•						
28	[65]		•					•						•		•				•					•		•	•					
29	[66]		•		•	•		•		•	•			•		•	•		•			•		•	•			•					
30	[20]		•	•	•	•	•	•		•			•		•		•		•			•		•	•	•		•					
Proyecto			•	•	•	•	•	•	•		•		•		•		•			•		•		•	•	•		•					

Como se puede observar en dicha revisión, la mitad de las fuentes consultadas plantean el diseño de una red únicamente en sentido inverso, el otro 50% replantea la estructura original de la red al incluir ambos flujos. La decisión de integrarlos se da principalmente debido al hecho de que diseñar cadenas de logística tradicional y de logística inversa por separado, genera diseños sub-óptimos con respecto a los objetivos a los que debe atender la cadena de suministro [67], [68].

En cuanto a los objetivos del modelo, se puede identificar que el 57% de las investigaciones se enfoca en disminuir costos mientras que el 43% en maximizar utilidades; otros aspectos como nivel de servicio, impactos ambientales o sociales son también considerados en una proporción menor al 10%.

Tal como lo evidencian Ramezani, Bashiri y Tavakkoli-Moghaddam [42], el desafío para los encargados de tomar decisiones en los negocios de logística inversa no es solo la creación de una red eficiente económicamente, sino que los productos sean recibidos por los clientes en el momento esperado, al precio negociado y en las cantidades que se demandan, además de administrar correctamente el nivel de inventario a mantener, con el objetivo de no comprometer el capital de trabajo o la imagen de la empresa. Todo lo anterior fortalece la capacidad de respuesta al cliente, al tiempo que permite a las empresas mantenerse vigentes en el mercado [22]. Una de las oportunidades de investigación consiste, entonces, en analizar la cantidad y los costos asumidos por las empresas debido al backorder de productos no entregados al consumidor, así como el inventario de material recuperado y producto terminado existente en cada período (10% de las investigaciones referenciadas).

En cuanto a la estocasticidad del sistema se puede observar que el 37% considera la demanda, así como el 30% la tasa de retorno desde el mercado, aspectos que no se pueden dejar de lado en la investigación. De igual manera, las características multiperíodo y multiproducto son tenidas en cuenta tan solo en un 17% de las investigaciones revisadas, lo cual lo convierten en potencial de investigación, debido a que la naturaleza dinámica del problema de diseño no puede ser descartada, principalmente cuando se considera la posibilidad de realizar futuros ajustes en la configuración de la red para permitir cambios graduales en la estructura y/o en las capacidades de las instalaciones [69].

4.2. ROBUSTEZ DEL SISTEMA

Ali, Maciejewski, Siegel y col. [23] definen la robustez como: “la conservación de ciertas características deseadas del sistema, a pesar de que se presenten fluctuaciones en el comportamiento de sus partes, componentes o del ambiente”. Este concepto se halla transversalmente en diferentes disciplinas, por ejemplo, en

biología, economía, arquitectura, informática, matemáticas, logística y naturalmente ciencias de sistemas y control [70].

Dentro de estos últimos grupos es pertinente reconocer el adelanto que se ha logrado, así como múltiples las aplicaciones que se han podido desarrollar, siendo la *asignación de recursos* y el *análisis de redes de logística y eléctricas* algunas de ellas. Precisamente la similitud existente, en términos del comportamiento y los elementos existentes, entre los circuitos eléctricos y las redes de logística, constituye un punto de partida para la presente investigación. Son dichos estudios los que se explorarán a continuación, con el objetivo de seleccionar la metodología a adaptar e implementar en la medición de robustez en la cadena de suministro propuesta:

4.2.1. Asignación de recursos

Ali, Maciejewski, Siegel y col. [23] desarrollaron *FePIA*, una metodología que se puede resumir, de acuerdo con sus siglas, en los siguientes pasos:

- ***Fe**ature:* Identificar los requerimientos de robustez, características de operación y de desempeño.

- ***P**erturbation:* Identificar los parámetros de perturbación.

- ***I**mpact:* Identificar el impacto que tienen los parámetros de perturbación sobre las características de desempeño.

- ***A**nalysis:* Establecer la escala de variación de las características generadas por variación de los parámetros de robustez.

Los investigadores desarrollaron esta metodología inicialmente en trabajos cuyos parámetros de perturbación tienen las mismas unidades [23], posteriormente se extendió a diferentes unidades mediante la normalización en un solo vector adimensional [71], y finalmente el estudio incluyó la covarianza y correlación existente entre estas perturbaciones [72]. Dichos estudios se convirtieron en la base para desarrollar distintas aplicaciones en la asignación de recursos en sistemas paralelos y distribuidos; para mayor profundización remitirse a los siguientes proyectos: [73], [74], [75], [76], [77], [78].

4.2.2. Optimización robusta y métricas de robustez en cadenas de suministro

Las investigaciones publicadas con respecto a las cadenas de suministro han permitido caracterizar los sistemas como una red que consta de nodos y enlaces. Así, un modelo típico consta de nodos, que pueden representar eslabones individuales (proveedores, fabricantes, distribuidores y minoristas), y enlaces, que

hacen referencia a las interacciones entre dichos nodos (intercambio de información, transporte de material y transacciones financieras). De igual manera, las publicaciones realizadas sobre medición de robustez en cadenas de suministro, en su mayoría, han abordado el problema desde una perspectiva topológica al cuantificar la resistencia de la red utilizando un conjunto de medidas globales o simulando la pérdida de componentes como fallas aleatorias o ataques dirigidos, y muy pocas se han centrado en su aspecto dinámico, como la importancia del rol de cada una de las instalaciones. Es por esto por lo que, a continuación, se relacionan algunas investigaciones en torno a las características anteriormente mencionadas.

Costa, Rodrigues, Travieso y col. [79] así como Rubinov y Sporns [80] brindan una descripción completa de la mayoría de las métricas utilizadas para caracterizar redes complejas: una de las más fundamentales para un nodo i es el número de enlaces $k(i)$ que pertenecen a determinado grado. La probabilidad $p(k)$ de que un nodo tenga grado k se calcula mediante la relación entre el número de nodos de grado k y el número total de nodos, y el conjunto de valores $p(k)$ para todos los grados posibles k forman lo que se llama la distribución probabilística de grados. Esta distribución implica que existen pocos agentes con un gran número de conexiones y un gran número de agentes con pocas conexiones. El objetivo de la métrica es someter a la red a remociones aleatorias de varios nodos con el objetivo de evaluar su conectividad, ya que existe una alta probabilidad de que se eliminen aquellos de bajo grado, es decir, los que rara vez juegan un papel vital en el mantenimiento de la conectividad de la red.

Zhao, Kumar y Yen [81] abordan la robustez desde el componente más grande conectado (*conectividad de la red*), en el que se tiene en cuenta que al menos un nodo de suministro (productores que desarrollan un bien) esté presente en cada componente (aquellos componentes sin nodos de suministro o llamados nodos de demanda, son ignorados en el cálculo); esta última es una medida del tamaño de la subred funcional más grande (LFSN, por sus siglas en inglés), es decir, la métrica permite determinar el número de nodos en la LFSN en los que hay una ruta entre cualquier par de nodos y existe al menos un nodo de suministro; con esta metodología la robustez se define como el tamaño del componente más grande que posea un nodo de suministro. En dicha investigación también se caracteriza la *tasa de disponibilidad de suministro*, como la proporción de nodos de demanda que se comunican, como mínimo, a un nodo de suministro, así como dos métricas adicionales: *longitud máxima de ruta* y *longitud promedio de ruta*; la primera hace referencia al recíproco del promedio del camino más corto hacia algún nodo de suministro, mientras que la segunda al valor medio de la ruta hacia cada nodo de demanda.

Chen y Lin [82] abordan la métrica de robustez aplicada a un conjunto de datos de una cadena de suministro real, proponiendo un método de análisis de invulnerabilidad basado en la teoría de redes complejas. En su investigación

analizaron la estructura topológica y las características dinámicas de la cadena de suministro. El resultado muestra que la confiabilidad de la red depende de la estabilidad de los nodos críticos (es decir, empresas centrales). Por lo tanto, es vital garantizar que este tipo de empresas operen con normalidad y eficiencia. La investigación, si bien proporciona un análisis completo del conjunto de datos descritos, el hecho de que solo estudie un tipo de red limita la medida en que las conclusiones extraídas en el estudio puedan ser extrapolables a otro tipo de cadenas. Enfocan su proyecto también en el *rango*, cuya noción es importante para medir la complejidad en el cambio de ruta en el caso de una interrupción en el flujo de mercancías entre nodos adyacentes, ya que se puede considerar como una medida de la eficiencia en la comunicación entre dos nodos en caso de falla. Es así como plantean que, en algunos casos, es útil clasificar los nodos por tipo y analizar su *asortatividad*, o en otras palabras, la tendencia de los nodos a enlazarse con otros del mismo tipo. En su planteamiento caracterizan el *grado vecino promedio*, una métrica para analizar la propiedad de asortatividad de los nodos y que permite concluir que aquellos que obtienen una puntuación baja en esta medida son los más críticos para mantener la red unida.

Hatefi y Jolai [83] proponen un modelo robusto y confiable de programación lineal entera mixta para el diseño de una red de flujo directo e inverso, con el objetivo de hacer frente a la incertidumbre de algunos parámetros e interrupciones de envío entre instalaciones; la modelación se realiza utilizando el enfoque de optimización robusta, en el cual se adicionan restricciones *p-robustas* para controlar la confiabilidad del modelo propuesto entre escenarios de disrupción. Tres experimentos numéricos se consideran para estudiar el desempeño del modelo propuesto. No se consideran características multiproducto ni multiperíodo.

Perera, Bell y col. [84] en su proyecto resumen distintas perspectivas desde las cuales se pueden analizar la robustez de una red de logística: 1) *tamaño del componente conectado más grande (LCC)*, entendido como el subconjunto de nodos en la red, tal que existe un camino entre dos pares cualesquiera de nodos en dicho subconjunto, a medida que los nodos se eliminan secuencialmente, el gráfico se desintegra en sub gráficos, siendo el número de nodos en el LCC (o el sub gráfico más grande) de una red fragmentada el que proporciona información sobre su conectividad general; 2) *diámetro de la red*, conceptualizado como la mayor distancia entre dos nodos cualquiera y, 3) *longitud de camino promedio*, definida como el valor medio de todas las distancias entre todos los pares de nodos. Estos conceptos permiten estudiar la robustez desde la óptica de la distancia geodésica promedio inversa o *eficiencia (global) de la red*, cuya métrica cuantifica cuán eficiente es la cadena de suministros en la transmisión de información, asumiendo que dicha eficiencia a la que se intercambia información entre dos nodos es inversamente proporcional a la distancia que los separa. Estas métricas consideran que los roles de cada eslabón dentro de la red son homogéneos, lo cual está lejos de la realidad, ya que las entidades dentro de la cadena de suministro del mundo real desempeñan diferentes papeles y cuentan con variedad de características: por

ejemplo, la distancia entre dos nodos de suministro o dos nodos de demanda no es tan importante como la distancia entre un suministro y una demanda. Es por lo anterior, por lo que los autores destacan el desarrollo de nuevas métricas que representan de manera realista los roles heterogéneos de los nodos dentro de la red. Así pues, plantean otras métricas locales de robustez que buscan determinar hasta qué punto los nodos que concentran una mayor cantidad de enlaces pueden resistir perturbaciones (*centralidad de intermediación*). Esta última métrica permite analizar las cadenas de suministro con una alta centralidad de intermediación, ya que son aquellas que podrían comprometer la comunicación de una gran fracción de la red. Finalmente, reseñan la robustez de una red de logística desde la formación de clusters, o subconjuntos de nodos que están altamente conectados a otros miembros de la comunidad, pero mal conectados a nodos fuera de su propia comunidad (robustez basada en el *coeficiente de agrupamiento de un nodo i*).

Por su parte, Rueda [85] evalúa la robustez de diversas redes mediante la simulación de *eliminaciones de nodos priorizados por rango, centralidad de carga, y grado promedio de nodo vecino*. El análisis se realiza en dos redes de suministro del mundo real, y diez generadas por cinco modelos de crecimiento diferentes y parametrizadas por las propiedades topológicas básicas de conjuntos de datos del mundo real. Los resultados obtenidos muestran que los nodos con altos valores de grado, centralidad de intermediación y de carga son críticos para mantener la conectividad y la eficiencia de la red.

Los autores Zhao, Scheibe, Blackhurst y col. [86] se enfocan en los componentes aguas abajo de una red de cadena de suministro relacionada con la distribución de bienes (desde proveedores hasta clientes). Toman elementos de investigaciones anteriores, tales como los efectos de modificar los enlaces en la red para abordar interrupciones (*modelado basado en enlaces o centrado en enlaces*), así como *modelado basado en nodos*. El enfoque de los enlaces no radica en aspectos como la carretera o el transporte entre instalaciones, sino que abordan la salud y el bienestar de cada eslabón como proveedores, centros de distribución y almacenes. En otras palabras, analizan modificaciones centradas en nodos para mejorar o equilibrar la solidez de la red de suministros. La arquitectura del modelo consta de un analizador de escenarios, un generador de red, un simulador de disrupción y un evaluador de desempeño: el generador de red produce diferentes topologías de redes y estrategias de ajuste y el simulador de disrupción aplica diferentes tipos de interrupciones aleatorias y dirigidas a una red de cadena de suministro. Finalmente, la robustez de la cadena de suministro se puede medir mediante dos módulos en el evaluador de rendimiento: 1) el solucionador de optimización encuentra la forma óptima de enrutar las mercancías antes y después de la interrupción mediante la solución de un modelo de optimización, cuyos resultados proporcionan métricas operativas clave, como el total de unidades entregadas, el costo promedio de entrega y el flujo de bienes entre nodos y 2) el analizador de topología encuentra eficientemente métricas de rendimiento a través de topologías de la red y roles heterogéneos de los nodos.

Finalmente, Liu, Zhou, Wang y col. [87] desarrollan en su investigación un índice local y un conjunto de índices globales con el objetivo de medir la robustez de una cadena de suministros que cuente con múltiples conexiones entre los mismos nodos. Su objetivo es desarrollar una metodología que supere los métodos tradicionales basados en la matriz de conectividad. Para finalizar, los resultados obtenidos se contrastan con los índices tradicionales de conectividad y robustez de la red en diversas redes simuladas que varían topológicamente, así como en un conjunto de sistemas ferroviarios representativos de los Estados Unidos.

4.2.3. Análisis de estructura u operatividad de redes eléctricas

Las investigaciones iniciales sobre medidas de robustez se remontan a los años 70 con el estudio de la conectividad como eje principal. Después de esto, numerosos autores presentaron su aporte alrededor del tema; es así como en esta sección se resumirán las principales medidas de robustez agrupadas en 4 ejes [88]:

- **Robustez basada en la conectividad:** las primeras investigaciones [89] analizaron la capacidad de supervivencia de las redes recurriendo al concepto básico de conectividad gráfica. Sin embargo, este análisis refleja, solo en parte, la capacidad (gráficamente) para mantener cierto grado de conexión bajo perturbaciones. Ante esto, años después los autores involucraron las nociones de *superconectividad* [90] y *conectividad condicional* [91], las cuáles traían consigo tiempos excesivos de computación; *conectividad de bordes y de nodo* fue presentada como extensión en el análisis de robustez [92].

- **Robustez basada en la teoría de grafos aleatorios:** medidas estadísticas como la *fracción de eliminación crítica de vértices* [93], el *radio armónico* [94], el *tamaño del componente conectado más grande* [95], y el *índice de Kirchhoff* [96], son propuestas para evaluar la desintegración de la red (en términos de su rendimiento) así como su robustez estructural; en otras palabras, el componente aleatorio en el análisis de robustez consiste en desaparecer algunos arcos o nodos.

- **Robustez basada en un eigenvalor:** pertenecen a este grupo la *conectividad algebraica* [97] y la *conectividad natural* [98]: la primera se basa en el valor propio de la matriz laplaciana, mientras que la segunda se basa en el valor propio de la matriz adyacente. La conectividad algebraica es el segundo mínimo valor propio de la matriz laplaciana y su magnitud muestra qué tan bien está conectada una red; por su parte, la conectividad natural cuantifica el número de caminos cerrados de todas las longitudes, caracterizando la redundancia de rutas alternativas.

- **Medida de robustez “R” y sus extensiones:** surgen como una respuesta a los 2 primeros grupos en los cuales la robustez, medida en términos de la

fracción crítica de ataques en los que el sistema colapsa por completo, no es una medida confiable en su totalidad. Inició como una *medida de la fracción más larga de nodos conectada* [99], extendiéndose al incluir *ataques en los enlaces* [100], para finalizar en el *análisis de eficiencia integral de la red* [101].

Sin embargo, estas métricas, por sí solas, no captan las características físicas y operativas específicas de las redes de transmisión de energía. Consecuente con lo anterior, las métricas topológicas convencionales fueron modificadas para tener en cuenta el comportamiento físico/operativo de las redes eléctricas en términos de asignación de flujo de energía real sobre las líneas y límites de flujo de línea. Es así como surgieron estudios que analizan la *estructura de la red eléctrica*: [102], [103], [104], al desarrollar una metodología basada en la medición del nivel de entropía en cada uno de los nodos de la red para calcular su robustez.

Años después se extendió la metodología al determinar que las vulnerabilidades del sistema se pueden evaluar con referencia no solo a la *estructura de la red eléctrica* (tipos de nodos, número de líneas y conexiones), sino también integrando su *estado operativo* (niveles de carga, generación y distribución): [105], [106]. Para ilustrar mejor: considérese una taza con un agujero a cierta altura por encima del fondo; esta tiene una vulnerabilidad estructural. Sin embargo, si el nivel del agua (estado operativo) está por debajo de la altura del agujero, no es una condición crítica. Por otro lado, si la vulnerabilidad va acompañada de un mayor nivel de agua en la taza, el agua se derramará provocando una situación crítica.

5. METODOLOGÍA PROPUESTA PARA LA MEDICIÓN DE ROBUSTEZ EN CADENAS DE SUMINISTRO

Después de detallar el sistema logístico directo e inverso, en este capítulo se aborda el modelo de programación lineal entera mixta elaborado por los autores, con sus respectivos supuestos y consideraciones, así como la caracterización de la metodología de medición de robustez utilizada en sistemas eléctricos, para realizar la adaptación del método en la medición de robustez en sistemas logísticos. El capítulo finaliza con la descripción del modelo estocástico y la forma como se contrastará con el determinístico.

5.1. SUPUESTOS DEL MODELO DE PROGRAMACIÓN Y CARACTERÍSTICAS PROPIAS DEL CASO DE PRUEBA

A continuación, se enumeran los supuestos bajo los cuales se desarrolla el modelo, así como las características particulares del caso de prueba:

- La ubicación y la capacidad de las instalaciones son conocidas: en el caso del centro híbrido se diferencian las capacidades correspondientes al flujo directo e inverso.

- Solo se puede localizar un tipo de instalación en una localización candidata y existe un límite de instalaciones abiertas.

- Se consideran backorders teniendo en cuenta que la demanda no servida del período inmediatamente anterior es parte de la demanda del período actual.

- La demanda es conocida. Así mismo, como se describió previamente, el modelo cuenta con características multiperíodo y multiproducto para obtener un caso más cercano a la realidad.

- En el primer período se decide cuáles de las instalaciones deben ser abiertas para atender las necesidades de los clientes e implementar el proceso reversivo, de acuerdo con la minimización de costos formulada; en los períodos posteriores se determina la cantidad de demanda servida y, por ende, los flujos que circulan en cada uno de los nodos (integración de decisiones estratégicas y tácticas).

- Tanto en las plantas propias como en los centros híbridos se considera existencia de inventario. En este sentido, para las primeras el almacenamiento corresponde a estibas de madera y big bags (flujo inverso), mientras que para

los segundos se almacena producto terminado (flujo directo). Para el resto de las instalaciones no se analiza el inventario, dado que las existencias permanecen menos de la duración del período “t”: todo lo que llega a cada centro abierto se despacha tan pronto como sea posible, con el objetivo de no incurrir en costos de almacenamiento.

- Se permite abastecimiento múltiple a cada uno de los nodos de la red. En otras palabras, las instalaciones o los clientes pueden ser surtidos por diversas fuentes. Así mismo, las plantas pueden enviar directamente a los clientes o indirectamente, por medio de los centros híbridos.

- A excepción de los centros híbridos –con producto terminado-, el flujo solo está permitido entre dos nodos consecutivos, lo que quiere decir que no se permiten envíos entre dos instalaciones iguales, sino solamente con aquella que esté inmediatamente después.

- La proporción de disposición y de retorno de las estibas de madera y big bags es conocida, así como el estado en el cual se encuentran en el cliente una vez han sido utilizadas.

- Los costos considerados (transporte, manejo, apertura, compra, penalización, mantenimiento de inventario, etc.) son conocidos.

- La ubicación de los clientes, centro de disposición y de las plantas es fija y predefinida.

- Se cuenta con una planta subcontratada para poder cumplir con los requerimientos de demanda. Esta participa en el flujo directo (se abastece de estibas de madera o big bags y envía producto terminado), pero no en el inverso (retorno de material).

- El costo de transporte entre instalaciones es asignado proporcionalmente a la distancia recorrida.

- Las instalaciones sobre las cuales decide el modelo ya están construidas (tienen capacidad definida) y no se pueden expandir.

- Se asume que el lead time de los proveedores que suministran el material recuperable (estibas y big bags) comprado es cero, por lo que, al generarse la necesidad, este llega de inmediato.

- En el primer período no existe demanda no servida anterior, ni inventario de material recuperable o de producto terminado.

- Debido a su naturaleza, no es necesario que los materiales desechados experimenten labores de disposición que requieran algún cuidado especial, por tal razón, los centros de disposición son cercanos a los híbridos y de recolección, luego no requieren la asignación de costos adicionales (son despreciables).

- El material recuperable que retorna puede ser utilizado infinitas veces dentro de la red, teniendo en cuenta la proporción de disposición y recuperación.

- El tiempo de recuperación del material que retorna a los centros híbridos y de recolección es despreciable, sucede en el mismo período "t", pero solo se utilizan para las necesidades del período siguiente.

- Todo lo que llega en estado reparable se puede recuperar.

5.2. MODELO DETERMINÍSTICO

A continuación, se relaciona el modelo base propuesto por los autores:

5.2.1. Conjuntos

MP = $\{1,\dots,p,\dots,P\}$, Ubicaciones fijas para plantas de producción p, donde P es el máximo número de estas.

IC = $\{1,\dots,i,\dots,I\}$, Posibles ubicaciones para centros de recolección i, donde I es el máximo número de estos.

HC = $\{1,\dots,j,\dots,J\}$, Posibles ubicaciones para centros híbridos j, donde J es el máximo número de estos.

MC = $\{1,\dots,k,\dots,K\}$, Ubicaciones fijas para clientes del mercado k, donde K es el máximo número de estos.

PC = $\{1,\dots,l,\dots,L\}$, Tipos de producto l, donde L es el máximo número de estos.

RC = $\{1,\dots,r,\dots,R\}$, Tipos de material recuperable r, donde R es el máximo número de estos.

PE = $\{1,\dots,t,\dots,T\}$, Horizonte de planeación t, donde T es el máximo número de este.

ST = $\{1,\dots,o,\dots,O\}$, Estados del material recuperable que retorna o, donde O es el máximo número de estos.

5.2.2. Subconjuntos

PP = $\{1,\ldots,p',\ldots,P'\}$, Plantas de producción propias p', donde P' es el máximo número de estas y $PP \subseteq MP$.

PS = $\{1,\ldots,p'',\ldots,P''\}$, Plantas de producción subcontratadas p'', donde P'' es el máximo número de estas y $PS \subseteq MP.$

5.2.3. Parámetros

Costos de transporte:

$\boldsymbol{tmp_{rp}}$**:** Costo unitario de transportar el material recuperable r nuevo desde el proveedor hasta la planta p [USD/Ton. estiba], [USD/Ton. big bag].

$\boldsymbol{tpm_{lpk}}$**:** Costo unitario de transportar el producto l desde la planta p hasta el cliente k [USD/Ton. alimento].

$\boldsymbol{tph_{lpj}}$**:** Costo unitario de transportar el producto l desde la planta p hasta el centro híbrido j [USD/Ton. alimento].

$\boldsymbol{thh_{ljm}}$**:** Costo unitario de transportar el producto l desde el centro híbrido j hasta centro híbrido m $(j <> m)$ [USD/Ton. alimento].

$\boldsymbol{thm_{ljk}}$**:** Costo unitario de transportar el producto l desde el centro híbrido j hasta el cliente k [USD/Ton. alimento].

$\boldsymbol{tmr_{rki}}$**:** Costo unitario de transportar el material recuperable r desde el cliente k hasta el centro de recolección i [USD/Ton. estiba], [USD/Ton. big bag].

$\boldsymbol{tmh_{rkj}}$**:** Costo unitario de transportar el material recuperable r desde el cliente k hasta el centro híbrido j [USD/Ton. estiba], [USD/Ton. big bag].

$\boldsymbol{trp_{rip'}}$**:** Costo unitario de transportar el material recuperado r desde el centro de recolección i hasta la planta de producción propia p' [USD/Ton. estiba], [USD/Ton. big bag].

$\boldsymbol{thp_{rjp'}}$**:** Costo unitario de transportar el material recuperado r desde el centro híbrido j hasta la planta de producción propia p' [USD/Ton. estiba], [USD/Ton. big bag].

Costos operativos:

$\boldsymbol{pes_{rl}}$**:** Precio de compra del material recuperable r para el producto l [USD/Ton. estiba], [USD/Ton. big bag].

$\boldsymbol{cpp_{lp}}$**:** Costo unitario de producción del producto l en la planta p [USD/Ton. alimento].

$\boldsymbol{crm_{ljk}}$**:** Costo unitario de redistribuir el producto l desde el centro híbrido j al mercado k [USD/Ton. alimento].

$\boldsymbol{ces_{rk}}$**:** Costo unitario de manejar el material recuperable r por parte del cliente k [USD/Ton. estiba], [USD/Ton. big bag].

$\boldsymbol{crr_{ri}}$**:** Costo unitario de reparar el material recuperable r en el centro de recolección i [USD/Ton. estiba], [USD/Ton. big bag].

$\boldsymbol{crh_{rj}}$**:** Costo unitario de reparar el material recuperable r en el centro híbrido j [USD/Ton. estiba], [USD/Ton. big bag].

$\boldsymbol{mnteb_{rp'}}$**:** Costo de mantener inventario de material recuperable r almacenado en la planta propia p' [USD/Ton. estiba], [USD/Ton. big bag].

$\boldsymbol{mntpt_{lj}}$**:** Costo de mantener inventario de producto l almacenado en el centro híbrido j [USD/Ton. alimento].

Costos fijos de apertura:

$\boldsymbol{cfr_i}$**:** Costo fijo de abrir el centro de recolección i [USD].

$\boldsymbol{cfh_j}$**:** Costo fijo de abrir el centro híbrido j [USD].

Número de instalaciones:

$\boldsymbol{nmi}$**:** Número máximo de centros de recolección y/o centros híbridos que pueden ser abiertos [cantidad de instalaciones].

Capacidad de instalaciones:

$\boldsymbol{cprn_{lp}}$**:** Capacidad de producción de producto l en la planta p [Ton. alimento].

$\boldsymbol{cenv_{lp}}$**:** Capacidad de envío de producto l desde la planta p [Ton. alimento].

$\boldsymbol{cmhd_{lj}}$**:** Capacidad de manejo de producto l en el centro híbrido j [Ton. alimento].

$\boldsymbol{cmr_{ri}}$**:** Capacidad de manejo de material recuperable r retornado al centro de recolección i [Ton. estiba], [Ton. big bag].

$\boldsymbol{cmhi_{rj}}$**:** Capacidad de manejo de material recuperable r retornado al centro híbrido j [Ton. estiba], [Ton. big bag].

$\boldsymbol{cmd_{r}}$**:** Capacidad de manejo de material no recuperado r desechado en el centro de disposición [Ton. estiba], [Ton. big bag].

$\boldsymbol{cmp_{rp'}}$**:** Capacidad de manejo de material recuperable r enviado a la planta propia p' proveniente del retorno de clientes [Ton. estiba], [Ton. big bag].

Otros parámetros:

$\boldsymbol{cpn_{lk}}$**:** Costo unitario de penalización por no satisfacer la demanda del producto l del cliente k [USD/Ton. alimento].

$\boldsymbol{dem_{lkt}}$**:** Demanda del producto l del cliente k en el período t [Ton. alimento].

$\boldsymbol{prt_{r}}$**:** Proporción de retorno del material recuperable r [%].

$\boldsymbol{pem_{rok}}$**:** Proporción del material recuperable r en estado o suministrado por el cliente k [%].

$\boldsymbol{rep_{rl}}$**:** Relación unidad de material recuperable r por producto l [Ton. estiba/Ton. alimento], [Ton. big bag/Ton. alimento].

$\boldsymbol{npr}$**:** Número de períodos del horizonte de planeación [mes].

5.2.4. Variables de decisión

$\boldsymbol{QPM_{lpkt}}$**:** Cantidad de producto l enviado desde la planta p hasta el cliente k en el período t [Ton. alimento].

$\boldsymbol{QPH_{lpjt}}$**:** Cantidad de producto l enviado desde la planta p hasta el centro híbrido j en el período t [Ton. alimento].

$\boldsymbol{QHH_{ljmt}}$**:** Cantidad de producto l enviado desde el centro híbrido j hasta el centro híbrido m en el período t $(j <> m)$ [Ton. alimento].

$\boldsymbol{QHM_{ljkt}}$**:** Cantidad de producto l enviado desde el centro híbrido j hasta el cliente k en el período t [Ton. alimento].

$\boldsymbol{QIMR_{rokit}}$**:** Cantidad de material recuperable r en estado o enviado desde el cliente k hasta el centro de recolección i en el período t [Ton. estiba], [Ton. big bag].

$\boldsymbol{QIMH_{rokjt}}$**:** Cantidad de material recuperable r en estado o enviado desde el cliente k hasta el centro híbrido j en el período t [Ton. estiba], [Ton. big bag].

$\boldsymbol{QIRP_{roip't}}$**:** Cantidad de material r en estado o enviado desde el centro de recolección i hasta la planta propia p' en el período t [Ton. estiba], [Ton. big bag].

$\boldsymbol{QIRD_{roit}}$**:** Cantidad de material r en estado o enviado desde el centro de recolección i hasta el centro de disposición en el período t [Ton. estiba], [Ton. big bag].

$\boldsymbol{QIHP_{rojp't}}$**:** Cantidad de material r en estado o enviado desde el centro híbrido j hasta la planta propia p' en el período t [Ton. estiba], [Ton. big bag].

$\boldsymbol{QIHD_{rojt}}$**:** Cantidad de material r en estado o enviado desde el centro híbrido j hasta el centro de disposición en el período t [Ton. estiba], [Ton. big bag].

$\boldsymbol{DNS_{lkt}}$**:** Cantidad demandada de producto l no satisfecha del cliente k en el período t [Ton. alimento].

$\boldsymbol{NCEB_{rpt}}$**:** Cantidad de material recuperable r comprado enviado a la planta p en el período t [Ton. estiba], [Ton. big bag].

$\boldsymbol{NPEB_{rpt}}$**:** Necesidad de material recuperable r en la planta p en el período t [Ton. estiba], [Ton. big bag].

$\boldsymbol{INVEB_{rp't}}$**:** Inventario de material recuperable r en la planta propia p' en el período t [Ton. estiba], [Ton. big bag].

$\boldsymbol{INVPT_{ljt}}$**:** Inventario de producto l en el centro híbrido j en el período t [Ton. alimento].

$\boldsymbol{BAR_i}$**:** **1,** si el centro de recolección *i* es abierto.

0, de lo contrario.

$\boldsymbol{BAH_j}$**:** **1,** si el centro híbrido *j* es abierto.

0, de lo contrario.

5.2.5. Función objetivo

A continuación, se desarrolla la función de desempeño que minimiza los costos de operación de la red (Ecuación 1), los cuales son desagregados en cada uno de sus distintos componentes (transporte, apertura, manejo, penalización, compra, almacenamiento) y de acuerdo con el flujo (directo e inverso):

Costo de transporte de material recuperable:

Compuesto por el costo de transporte de las toneladas de material recuperable adquiridas y enviadas desde el proveedor hasta las plantas:

$$\sum_{r \in RC} \sum_{p \in MP} \sum_{t \in PE} tmp_{rp} * NCEB_{rpt}$$

Costo de transporte flujo directo, instalaciones híbridas como destino:

Compuesto por los costos de transporte de las toneladas de producto terminado enviadas desde las plantas de producción hasta los centros híbridos, así como el movimiento de mercancías únicamente entre estas últimas instalaciones:

$$+ \sum_{l \in PC} \sum_{p \in MP} \sum_{j \in HC} \sum_{t \in PE} tph_{lpj} * QPH_{lpjt}$$

$$+ \sum_{l \in PC} \sum_{(j \in HC,\ m \neq j)} \sum_{(m \in HC,\ m \neq j)} \sum_{t \in PE} thh_{ljm} * QHH_{ljmt}$$

Costo de transporte flujo directo, clientes del mercado como destino:

Compuesto por los costos de transporte de las toneladas de producto terminado enviadas desde los centros híbridos y las plantas de producción hasta los clientes del mercado:

$$+ \sum_{l \in PC} \sum_{j \in HC} \sum_{k \in MC} \sum_{t \in PE} thm_{ljk} * QHM_{ljkt}$$

$$+ \sum_{l \in PC} \sum_{p \in MP} \sum_{k \in MC} \sum_{t \in PE} tpm_{lpk} * QPM_{lpkt}$$

Costo de transporte flujo inverso, clientes del mercado como origen:

Compuesto por los costos de transporte de las toneladas de material recuperable enviadas desde el mercado hasta los centros de recolección y las instalaciones híbridas:

$$+\sum_{r\in RC}\sum_{o\in ST}\sum_{k\in MC}\sum_{i\in IC}\sum_{t\in PE} tmr_{rki} * QIMR_{rokit}$$

$$+\sum_{r\in RC}\sum_{o\in ST}\sum_{k\in MC}\sum_{j\in HC}\sum_{t\in PE} tmh_{rkj} * QIMH_{rokjt}$$

Costo de transporte flujo inverso, plantas propias como destino:

Compuesto por los costos de transporte de las toneladas de material recuperable enviadas desde los centros de recolección y los híbridos hasta las plantas de producto terminado propias:

$$+\sum_{r\in RC}\sum_{o\in ST}\sum_{i\in IC}\sum_{p\in PP}\sum_{t\in PE} trp_{rip} * QIRP_{roipt}$$

$$+\sum_{r\in RC}\sum_{o\in ST}\sum_{j\in HC}\sum_{p\in PP}\sum_{t\in PE} thp_{rjp} * QIHP_{rojpt}$$

Costo de producción y manejo de producto flujo directo:

Compuesto por el costo de producción de las toneladas de producto terminado en cada una de las plantas, así como de su manejo como producto terminado en los centros híbridos:

$$+\sum_{l\in PC}\sum_{p\in MP}\sum_{j\in HC}\sum_{t\in PE} cpp_{lp} * QPH_{lpjt} + \sum_{l\in PC}\sum_{p\in MP}\sum_{k\in MC}\sum_{t\in PE} cpp_{lp} * QPM_{lpkt}$$

$$+\sum_{l\in PC}\sum_{j\in HC}\sum_{k\in MC}\sum_{t\in PE} crm_{ljk} * QHM_{ljkt}$$

Costo de manejo de producto flujo inverso:

Compuesto por el valor a cancelar al cliente por las toneladas de estiba de madera y big bag que se retorne a los centros de recolección e híbridos, así como el costo de inspeccionar y reparar en estas instalaciones los materiales que así lo requieran (subíndice 2, necesitan reparación):

$$+\sum_{r\in RC}\sum_{o\in ST}\sum_{k\in MC}\sum_{i\in IC}\sum_{t\in PE} ces_{rk} * QIMR_{rokit}$$

$$+\sum_{r\in RC}\sum_{o\in ST}\sum_{k\in MC}\sum_{j\in HC}\sum_{t\in PE} ces_{rk} * QIMH_{rokjt}$$

$$+ \sum_{r \in RC} \sum_{i \in IC} \sum_{p \in PP} \sum_{t \in PE} crr_{ri} * QIRP_{r2ipt} + \sum_{r \in RC} \sum_{j \in HC} \sum_{p \in PP} \sum_{t \in PE} crh_{rj} * QIHP_{r2jpt}$$

Costo de apertura de instalaciones:

Compuesto por los costos de apertura para la operación de los centros híbridos y de recolección:

$$+ \sum_{i \in IC} cfr_i * BAR_i + \sum_{j \in HC} cfh_j * BAH_j$$

Costo de penalización por demanda no servida:

Compuesto por el costo de no satisfacer la demanda de los clientes en determinado período:

$$+ \sum_{l \in PC} \sum_{k \in MC} \sum_{t \in PE} cpn_{lk} * DNS_{lkt}$$

Costo de compra de material recuperable:

Compuesto por el costo de adquisición de nuevo material recuperable a ser consumido en cada una de las plantas:

$$+ \sum_{r \in RC} \sum_{l \in PC} \sum_{p \in MP} \sum_{t \in PE} pes_{rl} * NCEB_{rpt}$$

Costo de mantener inventario:

Compuesto por el costo de almacenamiento de inventario de material que se pudo recuperar exitosamente y que puede ser almacenado en cada planta propia para suplir la demanda de períodos siguientes (flujo inverso), así como de las toneladas de producto terminado que se almacenan en los centros híbridos para satisfacer las necesidades de los clientes en períodos futuros (flujo directo):

$$+ \sum_{r \in RC} \sum_{p \in PP} \sum_{t \in PE} mnteb_{rp} * INVEB_{rpt} + \sum_{l \in PC} \sum_{j \in HC} \sum_{t \in PE} mntpt_{lj} * INVPT_{ljt}$$

5.2.6. Restricciones

A continuación, se desarrollan las restricciones del modelo (Ecuaciones 2 - 27), las cuales comprenden limitación de instalaciones, capacidad, balance e inventario, no negatividad y binarias:

Número máximo de instalaciones:

La Ecuación 2 garantiza que no se abran en el horizonte de planeación más centros de recolección e híbridos que el número máximo permitido:

$$\sum_{i \in IC} BAR_i + \sum_{i \in HC} BAH_i \leq nmi \qquad (2)$$

Capacidad:

La Ecuación 3 asegura que las toneladas de producto terminado que se envían a todos los centros híbridos y directamente a los clientes del mercado no superen la capacidad máxima de producción de cada una de las plantas:

$$\sum_{j \in HC} QPH_{lpjt} + \sum_{k \in MC} QPM_{lpkt} \leq cprn_{lp}$$

$$\forall l \in PC, \qquad \forall p \in MP, \qquad \forall t \in PE \qquad (3)$$

La Ecuación 4 cerciora que los envíos de producto terminado desde las plantas de producción no superen la capacidad de despachos:

$$\sum_{k \in MC} QPM_{lpkt} \leq cenv_{lp}$$

$$\forall l \in PC, \qquad \forall p \in MP, \qquad \forall t \in PE \qquad (4)$$

La Ecuación 5 garantiza que la cantidad de producto terminado que llega a un centro híbrido proveniente de alguna planta de producción u otro centro híbrido no supere su capacidad de manejo en dicha instalación:

$$\sum_{p \in MP} QPH_{lpjt} + \sum_{m \in HC,\ m \neq j} QHH_{lmjt} \leq BAH_j * cmhd_{lj}$$

$$\forall l \in PC, \qquad \forall j \in HC, \qquad \forall t \in PE \qquad (5)$$

La Ecuación 6 garantiza que la cantidad de material recuperable en cualquier estado que retorna desde el mercado no supere la capacidad de manejo de cada uno de los centros de recolección que han sido abiertos:

$$\sum_{o \in ST} \sum_{k \in MC} QIMR_{rokit} \leq BAR_i * cmr_{ri}$$

$$\forall r \in RC, \qquad \forall i \in IC, \qquad \forall t \in PE \qquad (6)$$

La Ecuación 7 asegura que la cantidad de material recuperable en cualquier estado que retorna desde el mercado no supere la capacidad de manejo de cada uno de los centros híbridos que han sido abiertos:

$$\sum_{o \in ST} \sum_{k \in MC} QIMH_{rokjt} \leq BAH_j * cmhi_{rj}$$

$$\forall r \in RC, \qquad \forall j \in HC, \qquad \forall t \in PE \qquad (7)$$

La Ecuación 8 garantiza que la cantidad de material recuperable que se despacha hacia las plantas propias y centros de disposición no supere la capacidad de manejo de cada uno de los centros de recolección que han sido abiertos:

$$\sum_{o \in ST \setminus \{3\}} \sum_{p \in PP} QIRP_{roipt} + QIRD_{r3it} \leq BAR_i * cmr_{ri}$$

$$\forall r \in RC, \qquad \forall i \in IC, \qquad \forall t \in PE \qquad (8)$$

La Ecuación 9 cerciora que la cantidad de material no recuperable (subíndice 3, no se pueden reparar) enviada desde los centros de recolección e híbridos hasta el centro de disposición no supere su capacidad de manejo:

$$\sum_{i \in IC} QIRD_{r3it} + \sum_{i \in HC} QIHD_{r3it} \leq cmd_r$$

$$\forall r \in RC, \qquad \forall t \in PE \qquad (9)$$

La Ecuación 10 permite que la cantidad de material recuperado (subíndices 1, apto para reutilizar sin necesidad de reparación y 2, requieren reparación) enviado desde los centros de recolección e híbridos hasta las plantas de producción propias no supere la capacidad de manejo de cada una de estas últimas instalaciones:

$$\sum_{o \in ST \setminus \{3\}} \sum_{i \in IC} QIRP_{roipt} + \sum_{o \in ST \setminus \{3\}} \sum_{j \in HC} QIHP_{rojpt} \leq cmp_{rp}$$

$$\forall r \in RC, \qquad \forall p \in PP, \qquad \forall t \in PE \qquad (10)$$

De balance e inventario:

Las cantidades enviadas desde los centros híbridos y las plantas hacia cada cliente del mercado se definen como la demanda del período en curso sin incluir aquella que no va a ser atendida, teniendo en cuenta, además, los faltantes del período anterior (Ecuación 11). Esta demanda no servida se considera como 0 al inicio del período t (t = 0) (Ecuación 12):

$$\sum_{j \in HC} QHM_{ljkt} + \sum_{p \in MP} QPM_{lpkt} = (dem_{lkt} + DNS_{lkt-1}) - DNS_{lkt}$$

$$\forall l \in PC, \quad \forall k \in MC, \quad \forall t \in PE \qquad (11)$$

$$DNS_{lk0} = 0, \quad \forall\, l \in PC, \forall\, k \in MC \qquad (12)$$

La Ecuación 13 asegura que las toneladas de producto terminado que llegan hasta los clientes provenientes de un centro híbrido sean iguales a lo enviado desde la planta a estas últimas instalaciones, así como el inventario existente al inicio del período, más lo que le llega desde otra instalación híbrida, restando lo que se envió desde esta locación a otra de su mismo tipo y el inventario final que se desea mantener al terminar dicho período. Cabe resaltar que no se inicia con inventario de producto terminado en las instalaciones híbridas (Ecuación 14):

$$\sum_{k \in MC} QHM_{ljkt} =$$

$$\sum_{p \in MP} QPH_{lpjt} + \sum_{m \in HC,\ m \neq j} QHH_{lmjt} - \sum_{m \in HC,\ m \neq j} QHH_{ljmt} - INVPT_{ljt} + INVPT_{ljt-1}$$

$$\forall l \in PC, \quad \forall j \in HC, \quad \forall t \in PE \qquad (13)$$

$$INVPT_{lj0} = 0, \quad \forall l \in PC, \quad \forall j \in HC \qquad (14)$$

La Ecuación 15 asegura que lo que se envía desde los centros híbridos y plantas de producción hacia el cliente (flujo directo), se conviertan en el flujo de retorno desde este último eslabón hacia los centros híbridos y de recolección (flujo inverso), solo en términos de material a recuperar y teniendo en cuenta cualquiera de los 3 estados en el que se encuentra el mismo (óptimo, reparable y no reutilizable):

$$\sum_{i \in IC} QIMR_{rokit} + \sum_{i \in HC} QIMH_{rokit} =$$

$$\left(\sum_{l \in PC} \sum_{i \in HC} QHM_{likt} * rep_{rl} + \sum_{l \in PC} \sum_{p \in MP} QPM_{lpkt} * rep_{rl} \right) * prt_r * pem_{rok}$$

$$\forall r \in RC, \quad \forall o \in ST, \quad \forall k \in MC, \quad \forall t \in PE \qquad (15)$$

La Ecuación 16 asegura que se envíen desde los clientes a las plantas propias – pasando por los centros de recolección - solo material que se encuentre en buen estado o que sea reparable:

$$\sum_{k \in MC} QIMR_{rokit} = \sum_{p \in PP} QIRP_{roipt}$$

$$\forall r \in RC, \quad \forall o \in ST \setminus \{3\}, \quad \forall i \in IC, \quad \forall t \in PE \qquad (16)$$

La Ecuación 17 asegura que se envíen desde los clientes a las plantas propias – pasando por los centros híbridos - solo material que se encuentre en buen estado o que sea reparable:

$$\sum_{k \in MC} QIMH_{rokjt} = \sum_{p \in PP} QIHP_{rojpt}$$

$$\forall r \in RC, \quad \forall o \in ST \setminus \{3\}, \quad \forall j \in HC, \quad \forall t \in PE \qquad (17)$$

La Ecuación 18 asegura que se envíen desde los clientes a los centros de disposición – pasando por los centros de recolección - todo material que no se encuentre en buen estado o que no sea reparable:

$$\sum_{k \in MC} QIMR_{r3kit} = QIRD_{r3it}$$

$$\forall r \in RC, \quad \forall i \in IC, \quad \forall t \in PE \qquad (18)$$

La Ecuación 19 asegura que se envíen desde los clientes a los centros de disposición – pasando por los centros híbridos - todo material que no se encuentre en buen estado o que no sea reparable:

$$\sum_{k \in MC} QIMH_{r3kjt} = QIHD_{r3jt}$$

$$\forall r \in RC, \quad \forall j \in HC, \quad \forall t \in PE \qquad (19)$$

En la Ecuación 20 se involucra la necesidad de big bags y estibas de madera en planta, que será igual a la cantidad de producto que se está enviando desde cada una de estas instalaciones a los centros híbridos y al mercado, teniendo en cuenta la relación material recuperable-producto para realizar la respectiva equivalencia:

$$NPEB_{rpt} = \sum_{l \in PC} \sum_{j \in HC} QPH_{lpjt} * rep_{rl} + \sum_{l \in PC} \sum_{k \in MC} QPM_{lpkt} * rep_{rl}$$

$$\forall r \in RC, \quad \forall p \in MP, \quad \forall t \in PE \qquad (20)$$

Las Ecuaciones 21 y 25 son de inventario de material recuperado y comprado: por un lado, la (Ecuación 21) garantiza que la necesidad del período actual para las

plantas propias – en materia de big bags y estibas de madera - tenga en cuenta el inventario existente, lo que se debe adquirir al proveedor y aquello que se pudo recuperar y, por lo tanto, llegó a estas instalaciones (diferente del estado 3, no recuperable) en el período inmediatamente anterior, restando el inventario que se desea mantener para ser utilizado en períodos futuros para satisfacer las necesidades del cliente. Para el período 1, esta restricción no tiene en cuenta existencia de inventario inicial (Ecuación 22) ni envíos desde los centros híbridos (Ecuación 23) y/o recolección (Ecuación 24), esto debido a que no se consideran existencias ni retornos en períodos anteriores. Por su parte, la Ecuación 25 aplica el mismo concepto para las plantas subcontratadas, pero debido a que no se consideran retornos de ningún tipo ni existencias de inventario en estas, se simplifica la ecuación:

$$INVEB_{rpt} + NPEB_{rpt} = INVEB_{rpt-1} + NCEB_{rpt} + \sum_{o \in ST \setminus \{3\}} \sum_{i \in HC} QIHP_{roipt-1} + \sum_{o \in ST \setminus \{3\}} \sum_{i \in IC} QIRP_{roipt-1}$$

$$\forall r \in RC, \quad \forall p \in PP, \quad \forall t \in PE \qquad (21)$$

$$INVEB_{rp0} = 0, \quad \forall r \in RC, \quad \forall p \in PP \qquad (22)$$

$$QIHP_{roip0} = 0, \quad \forall r \in RC, \quad \forall o \in ST \setminus \{3\}, \quad \forall i \in HC, \quad \forall p \in PP \qquad (23)$$

$$QIRP_{roip0} = 0, \quad \forall r \in RC, \quad \forall o \in ST \setminus \{3\}, \quad \forall i \in IC, \quad \forall p \in PP \qquad (24)$$

$$NPEB_{rpt} = NCEB_{rpt}$$

$$\forall r \in RC, \quad \forall p \in PS, \quad \forall t \in PE \qquad (25)$$

No negatividad y binarias:

La Ecuación 26 determina las variables binarias que condicionan la apertura de los centros de recolección e híbridos:

$$BAR_i, BAH_j \in \{0,1\} \qquad (26)$$

La Ecuación 27 garantiza que las demás variables de decisión sean mayores o iguales a cero (nulas o de no negatividad).

$$QIMR_{rokit}, QIMH_{rokjt}, QIRP_{roip't}, QIRD_{roit}, QIHP_{rojp't}, QIHD_{rojt}, QPH_{lpjt},$$

$$QPM_{lpkt}, QHH_{ljmt}, QHM_{ljkt}, DNS_{lkt}, NCEB_{rpt}, NPEB_{rpt}, INVEB_{rp't}, INVPT_{ljt} \geq 0 \quad (27)$$

Una vez se ha descrito la función objetivo y cada una de las restricciones que hacen parte del modelo propuesto, a continuación, estas se presentan de forma consolidada (Ecuaciones 1 - 27):

$$\boldsymbol{Z_{min}} = \sum_{r \in RC} \sum_{p \in MP} \sum_{t \in PE} tmp_{rp} * NCEB_{rpt}$$

$$+ \sum_{l \in PC} \sum_{p \in MP} \sum_{j \in HC} \sum_{t \in PE} tph_{lpj} * QPH_{lpjt}$$

$$+ \sum_{l \in PC} \sum_{(j \in HC,\ m \neq j)} \sum_{(m \in HC,\ m \neq j)} \sum_{t \in PE} thh_{ljm} * QHH_{ljmt}$$

$$+ \sum_{l \in PC} \sum_{j \in HC} \sum_{k \in MC} \sum_{t \in PE} thm_{ljk} * QHM_{ljkt} + \sum_{l \in PC} \sum_{p \in MP} \sum_{k \in MC} \sum_{t \in PE} tpm_{lpk} * QPM_{lpkt}$$

$$+ \sum_{r \in RC} \sum_{o \in ST} \sum_{k \in MC} \sum_{i \in IC} \sum_{t \in PE} tmr_{rki} * QIMR_{rokit}$$

$$+ \sum_{r \in RC} \sum_{o \in ST} \sum_{k \in MC} \sum_{j \in HC} \sum_{t \in PE} tmh_{rkj} * QIMH_{rokjt}$$

$$+ \sum_{r \in RC} \sum_{o \in ST} \sum_{i \in IC} \sum_{p \in PP} \sum_{t \in PE} trp_{rip} * QIRP_{roipt}$$

$$+ \sum_{r \in RC} \sum_{o \in ST} \sum_{j \in HC} \sum_{p \in PP} \sum_{t \in PE} thp_{rjp} * QIHP_{rojpt}$$

$$+ \sum_{l \in PC} \sum_{p \in MP} \sum_{j \in HC} \sum_{t \in PE} cpp_{lp} * QPH_{lpjt} + \sum_{l \in PC} \sum_{p \in MP} \sum_{k \in MC} \sum_{t \in PE} cpp_{lp} * QPM_{lpkt}$$

$$+ \sum_{l \in PC} \sum_{j \in HC} \sum_{k \in MC} \sum_{t \in PE} crm_{ljk} * QHM_{ljkt}$$

$$+ \sum_{r \in RC} \sum_{o \in ST} \sum_{k \in MC} \sum_{i \in IC} \sum_{t \in PE} ces_{rk} * QIMR_{rokit}$$

$$+ \sum_{r \in RC} \sum_{o \in ST} \sum_{k \in MC} \sum_{j \in HC} \sum_{t \in PE} ces_{rk} * QIMH_{rokjt}$$

$$+ \sum_{r \in RC} \sum_{i \in IC} \sum_{p \in PP} \sum_{t \in PE} crr_{ri} * QIRP_{r2ipt} + \sum_{r \in RC} \sum_{j \in HC} \sum_{p \in PP} \sum_{t \in PE} crh_{rj} * QIHP_{r2jpt}$$

$$+\sum_{i \in IC} cfr_i * BAR_i + \sum_{j \in HC} cfh_j * BAH_j$$

$$+\sum_{l \in PC}\sum_{k \in MC}\sum_{t \in PE} cpn_{lk} * DNS_{lkt} + \sum_{r \in RC}\sum_{l \in PC}\sum_{p \in MP}\sum_{t \in PE} pes_{rl} * NCEB_{rpt}$$

$$+\sum_{r \in RC}\sum_{p \in PP}\sum_{t \in PE} mnteb_{rp} * INVEB_{rpt} + \sum_{l \in PC}\sum_{j \in HC}\sum_{t \in PE} mntpt_{lj} * INVPT_{ljt}$$

(1)

SUJETO A:

$$\sum_{i \in IC} BAR_i + \sum_{i \in HC} BAH_i \leq nmi \qquad (2)$$

$$\sum_{j \in HC} QPH_{lpjt} + \sum_{k \in MC} QPM_{lpkt} \leq cprn_{lp}$$

$$\forall l \in PC, \quad \forall p \in MP, \quad \forall t \in PE \qquad (3)$$

$$\sum_{k \in MC} QPM_{lpkt} \leq cenv_{lp}$$

$$\forall l \in PC, \quad \forall p \in MP, \quad \forall t \in PE \qquad (4)$$

$$\sum_{p \in MP} QPH_{lpjt} + \sum_{m \in HC,\ m \neq j} QHH_{lmjt} \leq BAH_j * cmhd_{lj}$$

$$\forall l \in PC, \quad \forall j \in HC, \quad \forall t \in PE \qquad (5)$$

$$\sum_{o \in ST}\sum_{k \in MC} QIMR_{rokit} \leq BAR_i * cmr_{ri}$$

$$\forall r \in RC, \quad \forall i \in IC, \quad \forall t \in PE \qquad (6)$$

$$\sum_{o \in ST}\sum_{k \in MC} QIMH_{rokjt} \leq BAH_j * cmhi_{rj}$$

$$\forall r \in RC, \quad \forall j \in HC, \quad \forall t \in PE \qquad (7)$$

$$\sum_{o \in ST \setminus \{3\}} \sum_{p \in PP} QIRP_{roipt} + QIRD_{r3it} \leq BAR_i * cmr_{ri}$$

$$\forall r \in RC, \quad \forall i \in IC, \quad \forall t \in PE \qquad (8)$$

$$\sum_{i \in IC} QIRD_{r3it} + \sum_{i \in HC} QIHD_{r3it} \leq cmd_r$$

$$\forall r \in RC, \quad \forall t \in PE \qquad (9)$$

$$\sum_{o \in ST \setminus \{3\}} \sum_{i \in IC} QIRP_{roipt} + \sum_{o \in ST \setminus \{3\}} \sum_{j \in HC} QIHP_{rojpt} \leq cmp_{rp}$$

$$\forall r \in RC, \quad \forall p \in PP, \quad \forall t \in PE \qquad (10)$$

$$\sum_{j \in HC} QHM_{ljkt} + \sum_{p \in MP} QPM_{lpkt} = (dem_{lkt} + DNS_{lkt-1}) - DNS_{lkt}$$

$$\forall l \in PC, \quad \forall k \in MC, \quad \forall t \in PE \qquad (11)$$

$$DNS_{lk0} = 0, \quad \forall l \in PC, \forall k \in MC \qquad (12)$$

$$\sum_{k \in MC} QHM_{ljkt} =$$

$$\sum_{p \in MP} QPH_{lpjt} + \sum_{m \in HC,\ m \neq j} QHH_{lmjt} - \sum_{m \in HC,\ m \neq j} QHH_{ljmt} - INVPT_{ljt} + INVPT_{ljt-1}$$

$$\forall l \in PC, \quad \forall j \in HC, \quad \forall t \in PE \qquad (13)$$

$$INVPT_{lj0} = 0, \quad \forall l \in PC, \quad \forall j \in HC \qquad (14)$$

$$\sum_{i \in IC} QIMR_{rokit} + \sum_{i \in HC} QIMH_{rokit} =$$

$$\left(\sum_{l \in PC} \sum_{i \in HC} QHM_{likt} * rep_{rl} + \sum_{l \in PC} \sum_{p \in MP} QPM_{lpkt} * rep_{rl} \right) * prt_r * pem_{rok}$$

$$\forall r \in RC, \quad \forall o \in ST, \quad \forall k \in MC, \quad \forall t \in PE \qquad (15)$$

$$\sum_{k \in MC} QIMR_{rokit} = \sum_{p \in PP} QIRP_{roipt}$$

$$\forall r \in RC, \quad \forall o \in ST \setminus \{3\}, \quad \forall i \in IC, \quad \forall t \in PE \qquad (16)$$

$$\sum_{k \in MC} QIMH_{rokjt} = \sum_{p \in PP} QIHP_{rojpt}$$

$$\forall r \in RC, \quad \forall o \in ST \setminus \{3\}, \quad \forall j \in HC, \quad \forall t \in PE \qquad (17)$$

$$\sum_{k \in MC} QIMR_{r3kit} = QIRD_{r3it}$$

$$\forall r \in RC, \quad \forall i \in IC, \quad \forall t \in PE \qquad (18)$$

$$\sum_{k \in MC} QIMH_{r3kjt} = QIHD_{r3jt}$$

$$\forall r \in RC, \quad \forall j \in HC, \quad \forall t \in PE \qquad (19)$$

$$NPEB_{rpt} = \sum_{l \in PC} \sum_{j \in HC} QPH_{lpjt} * rep_{rl} + \sum_{l \in PC} \sum_{k \in MC} QPM_{lpkt} * rep_{rl}$$

$$\forall r \in RC, \quad \forall p \in MP, \quad \forall t \in PE \qquad (20)$$

$$INVEB_{rpt} + NPEB_{rpt} =$$

$$INVEB_{rpt-1} + NCEB_{rpt} + \sum_{o \in ST \setminus \{3\}} \sum_{i \in HC} QIHP_{roipt-1} + \sum_{o \in ST \setminus \{3\}} \sum_{i \in IC} QIRP_{roipt-1}$$

$$\forall r \in RC, \quad \forall p \in PP, \quad \forall t \in PE \qquad (21)$$

$$INVEB_{rp0} = 0, \quad \forall r \in RC, \quad \forall p \in PP \qquad (22)$$

$$QIHP_{roip0} = 0, \quad \forall r \in RC, \quad \forall o \in ST \setminus \{3\}, \quad \forall i \in HC, \quad \forall p \in PP \qquad (23)$$

$$QIRP_{roip0} = 0, \quad \forall r \in RC, \quad \forall o \in ST \setminus \{3\}, \quad \forall i \in IC, \quad \forall p \in PP \qquad (24)$$

$$NPEB_{rpt} = NCEB_{rpt}$$

$$\forall r \in RC, \qquad \forall p \in PS, \qquad \forall t \in PE \qquad (25)$$

$$BAR_i, BAH_j \in \{0,1\} \qquad (26)$$

$$QIMR_{rokit}, QIMH_{rokjt}, QIRP_{roip't}, QIRD_{roit}, QIHP_{rojp't,}\ QIHD_{rojt,}\ QPH_{lpjt},$$

$$QPM_{lpkt}, QHH_{ljmt}, QHM_{ljkt}, DNS_{lkt}, NCEB_{rpt}, NPEB_{rpt}, INVEB_{rp't}, INVPT_{ljt} \geq 0 \quad (27)$$

5.3. METODOLOGÍA DE ROBUSTEZ EN CIRCUITOS ELÉCTRICOS

En esta sección se describe la metodología que se utilizará como guía para ser adaptada a la medición de robustez en cadenas de suministro. La característica integradora de la estructura y el estado operativo de la red [105], [106] constituye un punto de inflexión a la hora de analizar la robustez en los sistemas eléctricos, esto debido a que al tiempo involucra en el análisis aspectos estáticos y dinámicos de los circuitos. Lo anterior, sumado a su estrecha relación con conceptos y elementos que también son aplicables a las redes de logística, permiten establecer una metodología que resulta fácilmente adaptable y altamente confiable para el análisis de robustez de las cadenas de suministro; es así como en este apartado se describe el método base de este proyecto.

Como sucede en los circuitos eléctricos, los escenarios de fallas debido a sobrecargas de línea son muy comunes, situación que trae consigo un cambio en el equilibrio del flujo de energía y origina una redistribución global de esta a través de toda la red, lo que a su vez puede desencadenar una nueva sobrecarga y, por lo tanto, nuevas fallas. Este proceso en cascada puede detenerse después de algunos pasos, pero también puede propagarse y dejar una parte considerable de la red sin energía. Para simular una falla en determinada red, la línea a ser atacada es suprimida de la topología, y su flujo se distribuye entre los demás enlaces existentes y que están disponibles en función de su carga inicial [107]. Esta distribución del exceso de energía puede originar la sobrecarga de los demás enlaces y, de esta manera, provocar la desconexión de dichas líneas. Análogamente, esta situación se puede presentar en el campo de la logística cuando en las cadenas de suministro surge una alteración en la demanda como consecuencia de la ruptura del flujo de información, producto o recursos que afecten una fracción o la red entera, lo que puede desencadenar en un desabastecimiento de materias primas, producto en proceso o terminado a nivel local o global.

La metodología propuesta en este documento busca dar solución a las anteriores situaciones y por ello incluye en el análisis de redes de suministro no solo sus **(a) aspectos estructurales**, los cuales definen la interconexión de los componentes (topología) junto con sus atributos específicos (número y tipos de nodos), sino también su **(b) estado operativo**, el cual está relacionado con cuán homogéneamente se distribuye el flujo de carga en la red y que tan cargada está. La estructura de una red es principalmente estática, mientras que el estado operativo cambia continuamente dependiendo del perfil de carga en la misma; este carácter dinámico del estado operativo hace que la robustez también sea dinámica [106]. En otras palabras, la red puede ser estable durante un período "t", pero en un nuevo estado operativo, en determinado período "t+1", ser críticamente vulnerable.

Realizando el símil con el campo de la logística, por un lado, se tiene que el **(a)** *aspecto estructural* obedece a la topología de la red misma, es decir, el conjunto de eslabones o tipos de instalaciones que están operando con funciones y flujos previamente determinados; al ser estático, este nivel responde a decisiones ubicadas en el plano estratégico. Por otro lado, el **(b)** *estado operativo* se ubica un escalón más abajo, al responder a decisiones tácticas y operativas que abarcan períodos de tiempo más cortos; es así como en este nivel se abordan temas relacionados con el servicio al cliente (satisfacción de la demanda versus faltantes), almacenamiento de inventario o necesidades de compra de materiales, todo ello para cada uno de los períodos del horizonte de planeación.

Varias de las metodologías abordadas en el capítulo 4, y que han sido utilizadas en sistemas eléctricos, se han implementado y adaptado con éxito en la medición de robustez de sistemas logísticos, incluyendo a su vez distintas técnicas gráficas o analíticas. Se pueden destacar así algunas investigaciones que calculan la robustez para este tipo de cadenas: en [81] se retoman conceptos como *conectividad de la red, disponibilidad de suministro y eficiencia de entrega*, en [108], se involucra metodología Fuzzy para el análisis logístico, por su parte [109] y [110]*,* miden la *distancia entre puntos o el camino promedio más corto*, y finalmente en [111]*,* los autores calculan el *índice de cadena de suministro* teniendo en cuenta las conexiones entre nodos. Todas estas investigaciones tienen en cuenta la **topología** de la red para el análisis, la cual muestra como los nodos de la cadena bajo estudio están conectados entre sí por arcos o enlaces; en otras palabras, este concepto hace referencia a toda la estructura de la red de logística. Muchos de estos indicadores previos de robustez topológica han asumido que los nodos en las redes son homogéneos en el sentido de que no se consideran los diferentes roles de cada uno. Sin embargo, las cadenas de suministro son esencialmente heterogéneas con diferentes tipos de participantes que desempeñan distintas actividades [112]: proveedores de materias primas, fabricantes, distribuidores, almacenes, minoristas, clientes, etc. Incluso en los problemas de optimización de la red de suministro, a menudo se hacen suposiciones que no reflejan la realidad de estas; por ejemplo, puede que no siempre existan rutas desde el nodo de origen hasta el final debido a

fallas en los puntos intermedios, o si alguno de esta falla, la red no puede simplemente ser redirigida alrededor del mismo porque ese nodo específico es esencial para agregar valor al producto o en el manejo de información importante.

Así pues, en esta investigación se integran ambos aspectos en una métrica que evalúa la robustez en cadenas de suministros que presentan fallas, haciendo uso de una metodología que ha sido utilizada anteriormente en la medición de sistemas eléctricos. Esta fue abordada en documentos como [105], [106], [113], [114] y se articula en torno a dos conceptos principales:

5.3.1. Cálculo de robustez del nodo

En esta sección se cuantifica la capacidad de un nodo para resistir fallas por sobrecarga. Dicho proceso requiere que se tenga en cuenta el *aspecto estructural de la red* (dinámica del flujo y topología), e involucra 3 elementos fundamentales, los cuales son aplicables a cada uno de los nodos: **a)** homogeneidad de la distribución de carga en los flujos de salida, **b)** nivel de carga en estos y **c)** grado de salida en los mismos.

Para calcular la robustez de los nodos eléctricos se recurre principalmente a dos conceptos:

- El primero es el de la entropía *(H)*, que hace posible capturar importantes dinámicas de falla de la red. La entropía de una distribución de carga de un nodo aumenta a medida que los flujos sobre las líneas se distribuyen de manera más homogénea y el grado de salida del nodo aumenta; lo anterior debido a que, al existir mayor cantidad de enlaces entre dos nodos y estos ser lo más equitativos posibles en cuanto a la carga transportada, mayor será el desorden existente: no se tiene certidumbre en el comportamiento del sistema en términos de cuál es el orden en que podrían fallar, o también, si colapsa alguno de estos, existe una probabilidad de ocurrencia más uniforme de las consecuencias inmediatas (no es fácilmente predecible).

- El segundo concepto es el de tolerancia de la red *(α)*, que describe cuan cargada se encuentra esta y, de igual manera, involucra la capacidad de cada uno de los nodos. En conjunto ambos conceptos permiten calcular la robustez nodal, definida como el producto de ambos factores y cuya interpretación es: mayores valores en nodos con entropía y capacidad disponible más alta, y menores con parámetros de entropía más bajos y poca disponibilidad de carga en el nodo.

Para conceptualizar lo anterior, a continuación, se presenta un ejemplo tomado de los artículos [105], [106] (Figura 8 y Figura 9). Nótese que la homogeneidad/heterogeneidad de la distribución de la carga hace referencia a la

cantidad de flujo enviada en cada arco –siendo A el origen-, el nivel de carga es la potencia que ingresa al respectivo nodo, y el grado de salida corresponde al número de arcos formados –siendo los destinos B, C y D-.

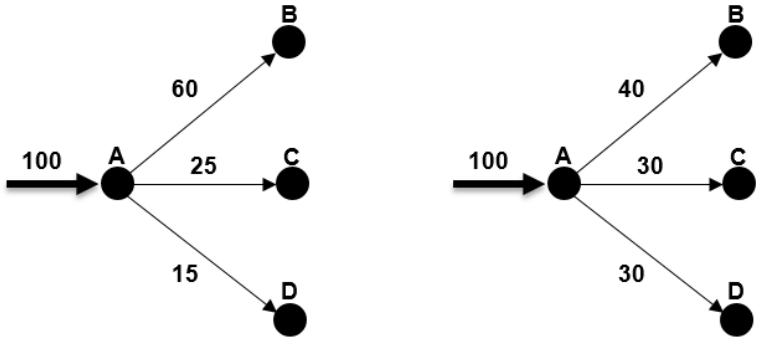

Figura 8: Ejemplo diferentes homogeneidades de distribución de carga – Igual grado de salida del nodo.

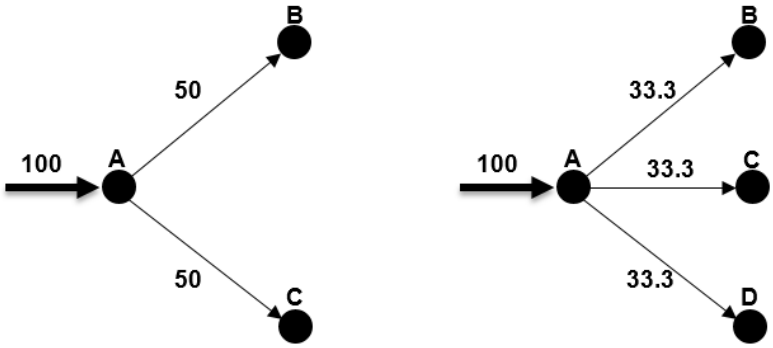

Figura 9: Ejemplo iguales homogeneidades de distribución de carga – Diferente grado de salida del nodo.

Con el objetivo de presentar la respectiva formulación del método, como primera medida se calcula la entropía de cada nodo j de acuerdo con la Ecuación 28:

$$H_j = \sum_{i=1}^{L} p_i \, log_{10}(p_i), \qquad \forall j \in \{1, \ldots, N\} \qquad (28)$$

Donde L es el grado de salida o número de flujos de salida de determinado nodo, p_i la normalización de los valores para cada línea i o flujo de salida f_i, y es calculado según la Ecuación 29 así:

$$p_i = \frac{f_i}{\sum_{k=1}^{L} f_k}, \qquad \forall i \in \{1, \ldots, L\} \qquad (29)$$

Aplicando la formulación anterior en los ejemplos de la Figura 8 se obtienen los valores de entropía de 0.4072 y 0.4729 en los casos 1 y 2, respectivamente. De igual manera, para los gráficos de la Figura 9 se obtienen los valores de 0.3010 y 0.4772 en los casos 1 y 2, respectivamente. En ambos ejemplos, estos valores permiten evidenciar que el segundo caso tiene más entropía, debido a que un nodo con mayor valor de H será más robusto con respecto a fallas por sobrecarga. Esto ilustra cómo el concepto de entropía captura los efectos de homogeneidad de la distribución de carga y la topología en la medida de robustez frente a fallas por sobrecarga.

Caso seguido se incluye el efecto del nivel de carga de la red sobre la robustez utilizando el concepto de capacidad de la línea C_i, la cual involucra su carga L_i y el parámetro de tolerancia de la red α, según la Ecuación 30:

$$C_i = \alpha_i L_i, \qquad \forall i \in \{1, \ldots, L\} \qquad (30)$$

Ahora bien, considerando que la capacidad de la línea es definida como la máxima carga que puede ser transportada por esta, mientras que el nivel de carga LL_i de una línea arbitraria es la relación entre la carga L_i y su capacidad correspondiente C_i, entonces existe una relación inversa entre el nivel de carga y el parámetro de tolerancia de una línea, situación que se puede interpretar según la Ecuación 31:

$$\alpha_i = \frac{1}{LL_i}, \qquad \forall i \in \{1, \ldots, L\} \qquad (31)$$

Retomando la Figura 8 se puede evidenciar que el nodo A distribuye 100 unidades de potencia a los puntos B, C y D. Suponiendo un parámetro de tolerancia de la red α de 2, se tiene en el primer caso una distribución de carga *L* de 60, 25 y 15 unidades de potencia, con una capacidad *C* de los arcos en los tramos A – B, A – C y A – D de 60*2 = 120, 25*2 = 50 y 15*2 = 30, respectivamente. Si se genera una falla en la línea A – B y este arco sale de funcionamiento, se tiene entonces un aumento de carga de la línea A – C a 62.5 y A – D a 37.5 unidades (el excedente del nodo desconectado se distribuye equitativamente entre aquellos que quedan operando). Así pues, los nuevos valores de flujo exceden las capacidades máximas de la línea A – C (es decir, 50) y A – D (es decir, 30), provocando una falla por sobrecarga en ambas líneas: A – C y A – D. Sin embargo, si se analiza el caso 2, en el que la carga se distribuye de forma relativamente más homogénea entre las líneas (capacidades de 40*2=80, 30*2=60 y 30*2=60, respectivamente), cuando uno de los arcos falla, ninguno de los enlaces vecinos se sobrecarga debido a que no se excede ninguna de las capacidades de la línea. Lo anterior permite reafirmar la conclusión de que una distribución de carga más homogénea a través de las líneas aumenta la robustez nodal, mientras que una distribución de carga relativamente heterogénea aumenta la posibilidad de que se extienda la sobrecarga a otros arcos.

Para el caso de la Figura 9, se tiene que en ambos casos el flujo se distribuye uniformemente sobre los arcos disponibles. Sin embargo, el caso 2 es más tolerante a algún tipo de falla comparado con el caso 1. Lo anterior refleja el efecto del grado de salida en la robustez del nodo eléctrico: cuanto mayor grado de salida posea un nodo, mayor robustez nodal existirá.

Finalmente, en la Ecuación 32, se combinan las ecuaciones (28) y (31) para calcular la robustez nodal j; el signo menos (-) se utiliza para conservar la magnitud de la entropía, compensando el valor negativo producto del logaritmo.

$$R_j = -\sum_{i=1}^{L} \alpha_i \, p_i \log_{10}(p_i) \,, \qquad \forall j \in \{1, \ldots, N\} \qquad (32)$$

5.3.2. Cálculo de importancia del nodo

Este proceso involucra el *estado operativo de la red*; es una medida de centralidad que cuantifica la importancia de cada nodo en el contexto de las perturbaciones. Es la potencia distribuida por cada uno de los nodos, ya que unos manejan una cantidad de energía relativamente mayor, mientras que otros distribuyen una cantidad de energía relativamente menor. Como ya se dijo, cuando ocurre una perturbación en un flujo que se origina en uno de los nodos dejándolo inhabilitado, se debe redistribuir la energía en el resto de los eslabones de la red. Dicho proceso eventualmente causa más fallas por sobrecarga en el sistema, lo que potencialmente puede dar como resultado un colapso a gran escala de toda la cadena. Sin embargo, si ocurre una deficiencia en un enlace que está conectado a un nodo menos importante, su energía se redirige inmediatamente a los componentes adyacentes y la perturbación puede, por lo general, mitigarse.

La importancia de los nodos eléctricos es una medida de centralidad que permite determinar su peso relativo y, por lo tanto, la criticidad de cada uno. Por tal razón, un ataque al nodo con mayor importancia origina, muy probablemente, un mayor efecto en la red. Esto sugiere que los nodos tienen diferentes impactos, los cuales dependen de la cantidad de energía distribuida por cada uno (Ecuación 33):

$$\delta_j = \frac{P_j}{\sum_{k=1}^{N} P_k} \,, \qquad \forall j \in \{1, \ldots, N\} \qquad (33)$$

Donde δ_j es la importancia del nodo j, P_j representa el parámetro de la potencia total distribuida por el nodo j, y N el número de nodos en la red. Cabe resaltar que entre mayor sea el valor de δ, mayor será el valor de robustez.

Después de calcular el valor de robustez del nodo eléctrico j y sus valores de importancia, finalmente se calcula el producto de ambos para determinar la

contribución individual de cada nodo a la robustez de la red. La métrica de robustez R es la integración de los conceptos presentados en las secciones 5 y 5.3.2, al sumar las contribuciones individuales de cada nodo en la Ecuación 34*:*

$$R = \sum_{j=1}^{N} R_j \, \delta_j \qquad (34)$$

5.4. ADAPTACIÓN DE METODOLOGÍA EN LA MEDICIÓN DE ROBUSTEZ PARA REDES DE LOGÍSTICA

Con el objetivo de adaptar la metodología descrita en la sección anterior en la medición de robustez para cadenas de suministro, se recurre a los conceptos abordados previamente: entropía *(H)*, tolerancia *(α),* e importancia *(δ_i)* de cada una de las instalaciones. Así mismo, se realizan algunas variaciones y consideraciones particulares que serán descritas a continuación.

El método propuesto se basa también en el cálculo de robustez de cada uno de los nodos para alcanzar la robustez total del sistema, siendo la importancia de las instalaciones las que juegan un papel determinante en el cálculo del parámetro final. Esta metodología se aplica por separado a instalaciones que desempeñen el mismo rol o que realicen iguales actividades, es decir, se calcula inicialmente un parámetro de robustez para cada una de las bodegas, otro para las plantas, etc., y finalmente, se logra un valor de robustez total por tipo de instalación. El objetivo de la metodología es ser una herramienta que permita la toma de decisiones en los 3 niveles (estratégico, táctico y operativo), razón por la cual, se sugiere calcular el parámetro sobre los centros a abrir (variables binarias en los modelos de programación). De igual manera, se debe tener en cuenta que, mientras en los sistemas de control lo que se transporta es electricidad y en ocasiones se maneja un solo sentido, en la adaptación sugerida la cantidad de elementos aumenta dado que se pueden movilizar diferentes elementos: toneladas o unidades de producto terminado, por ejemplo, y adicionalmente pueden existir mayor variedad de flujos (directo e inverso). Así pues, en esta sección se relaciona la respectiva formulación e interpretación de la métrica, para concluir con una comparación entre ambas metodologías (la utilizada en sistemas eléctricos y la adaptada en cadenas de suministro).

Para contextualizar, inicialmente se desarrolla un ejemplo práctico de una red que involucra 4 bodegas (A, B, C y D), las cuales abastecen a 6 clientes (E, F, G, H, I y J) con un total de 8.000 toneladas (Figura 10).

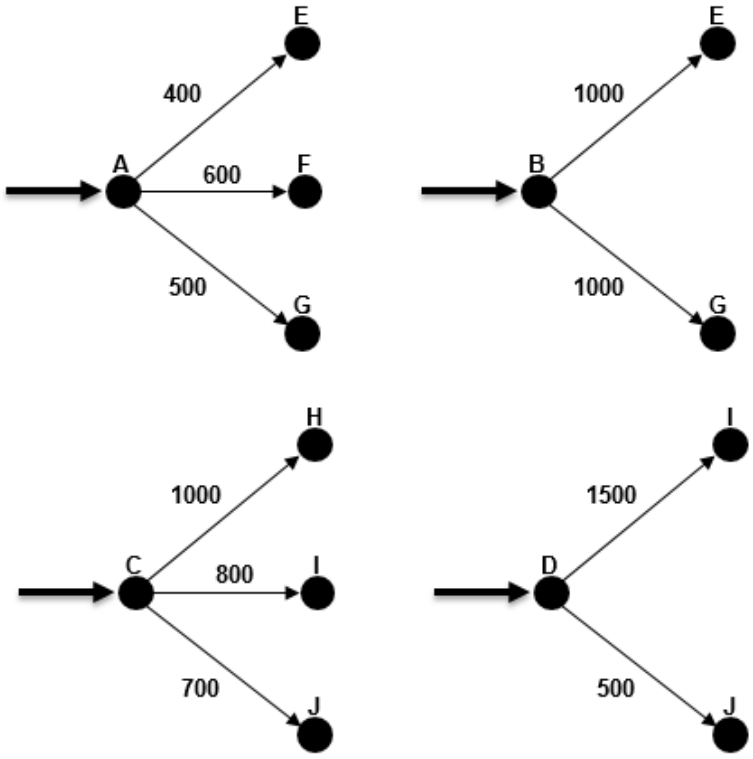

Figura 10: Flujo (ton) desde bodegas A, B, C y D hasta clientes E, F, G, H, I y J.

5.4.1. Cálculo de robustez del nodo

En primera instancia se calcula la normalización de los flujos (p_i) para cada una de las 4 bodegas, de acuerdo con la Ecuación 35:

$$p_i = \frac{\sum_{j=1}^{C} f_{ij}}{\sum_{k=1}^{B}\sum_{j=1}^{C} f_{kj}}, \qquad \forall i \in \{1,\ldots,B\} \qquad (35)$$

Donde f_{ij} hace referencia al flujo distribuido desde cada instalación i al cliente j, B el número total de bodegas y C el de clientes. Se tienen entonces para cada nodo o bodega los siguientes resultados:

- **Nodo A:** 1500/8000 = 0.1875
- **Nodo B:** 2000/8000 = 0.25
- **Nodo C:** 2500/8000 = 0.3125
- **Nodo D:** 2000/8000 = 0.25

Nótese que una de las diferencias en la adaptación consiste en que en la metodología propuesta en este trabajo se realiza la normalización de los flujos teniendo en cuenta la totalidad movilizada por las 4 instalaciones, que en este caso

es de 8000 toneladas, a diferencia de la métrica aplicada en sistemas eléctricos en la cual la normalización se realizaría para cada uno de los arcos: por ejemplo, en la bodega A sería 400/1500, 600/1500 y 500/1500, y así sucesivamente para las restantes bodegas. Trabajar con el valor global (consolidando por instalación o nodos) en vez de arcos se realiza debido a que en las redes de logística la uniformidad de envíos desde cada centro a cada cliente no es tan relevante, como si lo es la homogeneidad en la distribución desde todas las instalaciones, esto para determinar la proporción de utilización de cada una de las instalaciones. Este concepto también aplica para el análisis de entropía del sistema: en las cadenas de suministro es más efectiva medirla comparando el flujo total desde cada nodo (instalación), más que un análisis revisando arco por arco: la solución del modelo de programación puede sugerir no enviar desde algunas instalaciones a determinados clientes o pueden existir restricciones de envío determinadas por la realidad propia del sistema, situaciones que generarían un dato erróneo en la métrica de robustez. En cambio, un dato más agregado permitiría determinar el verdadero “desorden” del sistema dependiendo de la utilización consolidada de cada instalación.

De acuerdo con [5] la entropía en las organizaciones hace referencia al nivel de desorganización y es un concepto que se encuentra estrechamente relacionado con la complejidad y diversidad de la información, factores que conducen inevitablemente a la incertidumbre. Es por lo anterior por lo que una mayor entropía puede traer consigo más interrupciones en el flujo –información, recursos, etc.- y, de esta manera, mayor incertidumbre en el sistema, originando obstáculos que hacen que las operaciones de la cadena de suministros sean menos predecibles. Al existir dicha incertidumbre, la resiliencia de la red desempeña un papel fundamental a la hora de evitar las interrupciones. Existe entonces un vínculo entre la entropía, resiliencia e incertidumbre, conceptos que se encuentran relacionados con la existencia de una cadena de suministros sostenible: resulta conveniente etiquetar la entropía como una némesis de la sostenibilidad de la cadena de suministro; por lo tanto, las organizaciones deben implementar estrategias para fomentar la generación de entropía negativa, con el objetivo de aumentar la sostenibilidad. La entropía negativa se refiere a información útil y relevante y es inversamente proporcional a la entropía. Así, se puede deducir que la generación de entropía negativa en las cadenas de suministro puede actuar como catalizador de la sostenibilidad y es, por tanto, a lo que deben apuntar las organizaciones de la actualidad.

Tomando como punto de partida la conceptualización anterior, se presenta a continuación la Ecuación 36, la cual permite calcular la entropía de la red:

$$H = \sum_{i=1}^{B} p_i \, log_{10}(p_i) \qquad (36)$$

Desagregando cada componente de la Ecuación 36, se tiene que:

- **Nodo A:** $0.1875\, log_{10}(0.1875) = -0.1363$
- **Nodo B:** $0.25\, log_{10}(0.25) = -0.1505$
- **Nodo C:** $0.3125\, log_{10}(0.3125) = -0.1579$
- **Nodo D:** $0.25\, log_{10}(0.25) = -0.1505$

Así pues, se tiene entonces que la entropía total del sistema es de -0.5952.

El planteamiento anterior permite determinar que, en la medida en que se incluyan más bodegas en la red y los envíos no dependan más de un centro que de otro (uniformidad en la participación), el valor de entropía incrementará. Lo anterior debido a que, al existir mayor cantidad de enlaces entre dos nodos y estos ser lo más equitativos posibles en cuanto a la carga transportada, mayor será el desorden existente: no se tiene certidumbre en el comportamiento del sistema en términos de cuál es el orden en que podrían fallar, o también, si colapsa alguno de estos, existe una probabilidad de ocurrencia más uniforme de las consecuencias inmediatas (no es fácilmente predecible). Así pues, si se desconecta un centro que tenga una carga menor, la red estará en capacidad de resistir la falla más fácilmente, pues el resto de las instalaciones podrán asumir esta carga. Así por ejemplo si se pasa de 4 a 8 bodegas, cada una con 1000 toneladas enviadas homogéneamente, el valor de entropía final sería de -0.9031.

A continuación, para calcular el parámetro de tolerancia de la red α, se inicia haciendo uso de la Ecuación 37:

$$LL_i = \frac{\sum_{j=1}^{C} f_{ij}}{C_i}, \qquad \forall i \in \{1, \ldots, B\} \qquad (37)$$

Donde LL_i hace referencia al nivel de carga de la instalación i y C_i a la capacidad disponible de manejo de cada una; se tiene así que para cada centro:

- **Nodo A:** 1500/1500 = 1
- **Nodo B:** 2000/2000 = 1
- **Nodo C:** 2500/5000 = 0.5
- **Nodo D:** 2000/4000 = 0.5

Aplicando la Ecuación 31 para el cálculo del parámetro de tolerancia α se obtiene:

$$\alpha_i = \frac{1}{LL_i}, \qquad \forall i \in \{1, \ldots, B\} \qquad (31)$$

- **Nodo A:** 1
- **Nodo B:** 1

- **Nodo C:** 2
- **Nodo D:** 2

En otras palabras, en la adaptación realizada de la métrica de robustez, el parámetro de tolerancia de la red α se origina desde el análisis de la capacidad utilizada de cada instalación: un valor de α cercano a 1 se traduce en que la bodega está trabajando a su máximo de capacidad, mientras que un valor de α lejos de 1, significa que dicho centro se encuentra subutilizado. Es de resaltar que en este caso el análisis también debe realizarse por nodos y no por arcos, debido a que predomina un análisis con base en la proporción de utilización de toda la instalación, en vez de un estudio de la capacidad disponible de cada envío realizado a cada cliente por separado.

Finalmente, se calcula la robustez R_i de cada nodo de acuerdo con la Ecuación 38. El signo menos se utiliza con el objetivo de contrarrestar el efecto de la entropía (desorden del sistema):

$$R_i = -\alpha_i \, p_i \, log_{10}(p_i), \qquad \forall i \in \{1, \ldots, B\} \qquad (38)$$

Los resultados obtenidos, de manera desagregada, son:

- **Nodo A:** -(-0.1363 * 1) = 0.1363
- **Nodo B:** -(-0.1505 * 1) = 0.1505
- **Nodo C:** -(-0.1579 * 2) = 0.3157
- **Nodo D:** -(-0.1505 * 2) = 0.3010

Si se totalizan los resultados obtenidos hasta este punto, se obtiene una robustez de la red de 0.9036.

Lo anterior permite evidenciar que tener instalaciones que no operen al límite de su capacidad incrementa la robustez del sistema, esto porque si se desconecta algún elemento de la red, aquellas que cuenten con disponibilidad pueden asumir más fácilmente, ya sea de manera parcial o total, el flujo redistribuido. Realizando una comparación con otro escenario en el cual los 4 nodos tuvieran un parámetro de tolerancia de 2, la robustez de la red se incrementaría a 1.1904, lo que reafirmaría el anterior planteamiento.

5.4.2. Cálculo de importancia del nodo

En este punto se hace necesario asignar la importancia δ_i a cada una de las instalaciones encargadas de enviar el producto al cliente. Por un lado, en la métrica aplicada a sistemas eléctricos esta se determina de acuerdo a la potencia distribuida por cada nodo, por otro lado, para los sistemas logísticos la importancia de la instalación se asigna de acuerdo a diversos criterios: utilidades generadas, ahorros

percibidos, nivel de servicio al cliente. Para el caso del presente proyecto esta se define teniendo en cuenta el flujo así:

- **Flujo directo:** se calcula teniendo en cuenta la proporción de utilidad que aporta cada instalación al total de la compañía, esto es, el margen de la mezcla de productos que se manejan en cada una de las instalaciones de acuerdo con la Ecuación 39:

$$\delta_i = \frac{U_i}{\sum_{k=1}^{B} U_k}, \qquad \forall i \in \{1, \dots, B\} \qquad (39)$$

  Donde U_i hace referencia a la utilidad aportada por la instalación i y B el número total de bodegas.

- **Flujo inverso:** se calcula teniendo en cuenta la proporción de ahorro que aporta cada instalación al total de la compañía, esto es, aquellos materiales que se pudieron recuperar exitosamente y no fueron desechados en cada una de las instalaciones de acuerdo con la Ecuación 40:

$$\delta_i = \frac{A_i}{\sum_{k=1}^{B} A_k}, \qquad \forall i \in \{1, \dots, B\} \qquad (40)$$

  Donde A_i hace referencia al ahorro generado por la instalación i y B el número total de bodegas.

Se resalta que al asignar la importancia esta debe normalizarse para poder conservar la magnitud de la robustez. Continuando con el ejemplo se tiene entonces que:

- **Nodo A:** 0.20: Normalizando se tiene: (0.20/1) * 4 = 0.8
- **Nodo B:** 0.25: Normalizando se tiene: (0.25/1) * 4 = 1.0
- **Nodo C:** 0.30: Normalizando se tiene: (0.30/1) * 4 = 1.2
- **Nodo D:** 0.25: Normalizando se tiene: (0.25/1) * 4 = 1.0

De esta manera es posible establecer que, entre mayor cantidad de ingresos o ahorro aporte cada instalación dentro de la proporción total, mayor será la importancia de la misma.

Para finalizar, se calcula la robustez total del sistema según la Ecuación 41:

$$R = \sum_{i=1}^{B} R_i \, \delta_i \qquad (41)$$

Los resultados obtenidos, de manera desagregada, son:

- **Nodo A:** 0.1363 * 0.8 = 0.1090
- **Nodo B:** 0.1505 * 1.0 = 0.1505
- **Nodo C:** 0.3157 * 1.2 = 0.3788
- **Nodo D:** 0.3010 * 1.0 = 0.3010

Lo que daría un valor de robustez total del sistema de 0.9395. Nótese que la instalación C, la cual tiene la mayor robustez nodal, igualmente presenta la mayor importancia, por lo que potencializa el valor total de robustez del sistema al pasar de 0.9036 a 0.9395.

De toda la metodología anterior se concluye que tener mayor cantidad de instalaciones puede ser recomendable en el sentido de que si se cierra alguna, las otras pueden asumir el trabajo, sin embargo, es contraproducente cuando dichos centros operan al máximo de su capacidad y no hay disponibilidad que permita ser flexible. Finalmente, existe una relación directamente proporcional entre la robustez del sistema y la importancia de las instalaciones: aquellas que tengan alta robustez e importancia mejoran el sistema, mientras que las que presentan una robustez e importancia bajas la desmejoran; si todas las instalaciones tienen la misma importancia, la robustez permanece igual. Lo anterior indica que, en la robustez de una red, son 3 los elementos que deben ser tenidos en cuenta: 1) cantidad de carga movilizada, 2) capacidad disponible y 3) importancia de cada instalación dentro de la cadena.

A continuación, se presenta un resumen y comparación de la formulación existente en la medición de robustez en sistemas eléctricos con respecto a la métrica adaptada en las cadenas de suministro:

Entropía del nodo:

$$H_j = \sum_{i=1}^{L} p_i \, log_{10}(p_i), \qquad \forall j \in \{1, \dots, N\} \quad (1)$$

Entropía de las instalaciones:

$$H = \sum_{i=1}^{B} p_i \, log_{10}(p_i) \qquad (36)$$

Normalización flujo (arco):

$$p_i = \frac{f_i}{\sum_{k=1}^{L} f_k}, \qquad \forall i \in \{1, \dots, L\} \quad (2)$$

Normalización flujo (nodos):

$$p_i = \frac{\sum_{j=1}^{C} f_{ij}}{\sum_{k=1}^{B} \sum_{j=1}^{C} f_{kj}}, \qquad \forall i \in \{1, \dots, B\} \quad (35)$$

Tolerancia de la red (arco):

$$C_i = \alpha_i L_i, \qquad \forall i \in \{1, \dots, L\} \quad (3)$$

$$\alpha_i = \frac{1}{LL_i}, \qquad \forall i \in \{1, \dots, L\} \quad (4)$$

Tolerancia de la red (nodos):

$$LL_i = \frac{\sum_{j=1}^{C} f_{ij}}{C_i}, \qquad \forall i \in \{1, \dots, B\} \quad (37)$$

$$\alpha_i = \frac{1}{LL_i}, \qquad \forall i \in \{1, \dots, B\} \quad (4)$$

Robustez del nodo:

$$R_j = -\sum_{i=1}^{L} \alpha_i \, p_i \log_{10}(p_i) \, , \forall j \in \{1, \ldots, N\} \quad (5)$$

Importancia del nodo en términos de potencia distribuida:

$$\delta_j = \frac{P_j}{\sum_{k=1}^{N} P_k} \, , \qquad \forall j \in \{1, \ldots, N\} \quad (6)$$

Robustez total:

$$R = \sum_{j=1}^{N} R_j \, \delta_j \qquad (7)$$

Robustez del nodo:

$$R_i = \, -\alpha_i \, p_i \, log_{10}(p_i) \, , \forall i \, \in \{1, \ldots, B\} \quad (38)$$

Importancia del nodo (flujo directo e inverso) en términos de utilidades generadas y ahorros percibidos:

$$\delta_i = \frac{U_i}{\sum_{k=1}^{B} U_k}, \qquad \forall i \, \in \{1, \ldots, B\} \quad (39)$$

$$\delta_i = \frac{A_i}{\sum_{k=1}^{B} A_k}, \qquad \forall i \, \in \{1, \ldots, B\} \quad (40)$$

Robustez total:

$$R = \sum_{i=1}^{B} R_i \, \delta_i \qquad (41)$$

5.5. CASO DE ESTUDIO

Con el objetivo de validar el desempeño del modelo descrito brevemente en el capítulo 2 y detallado en la sección 5.2, a continuación, se presenta un caso de estudio tomando como referencia una empresa productora de alimento balanceado del territorio colombiano. Este será el insumo requerido para elaborar tanto el modelo determinístico (también denominado “caso base”), como el estocástico.

De igual manera, los datos y parámetros empleados hacen parte de la realidad propia de una empresa del sector de alimento balanceados que tiene conformada su red solamente en sentido directo; por otro lado, los parámetros relacionados con el flujo inverso fueron estimados por diversas áreas como mercadeo, costos y presupuestos y logística de producto terminado; esto debido a que todo el proceso recuperador de material aún no se tiene operando en la compañía.

A continuación, se relacionan las características del caso de estudio del presente proyecto:

- Todos los costos son presentados en dólares (USD).

- La demanda tiene una tendencia de leve crecimiento durante el cuatrimestre 1 (reposición de inventarios por altas ventas al cierre del año anterior), más

agresiva durante el 2 (preparación para mitad de año), de decrecimiento durante el 3 (agotando saldos) y nuevamente de crecimiento durante el 4 (preparación para cierre de año), esto como consecuencia del comportamiento del mercado de alimento balanceado en el sector.

- El horizonte de planeación está constituido por un total de 12 meses.

En la Figura 11, se ilustra la ubicación geográfica de cada una de las instalaciones.

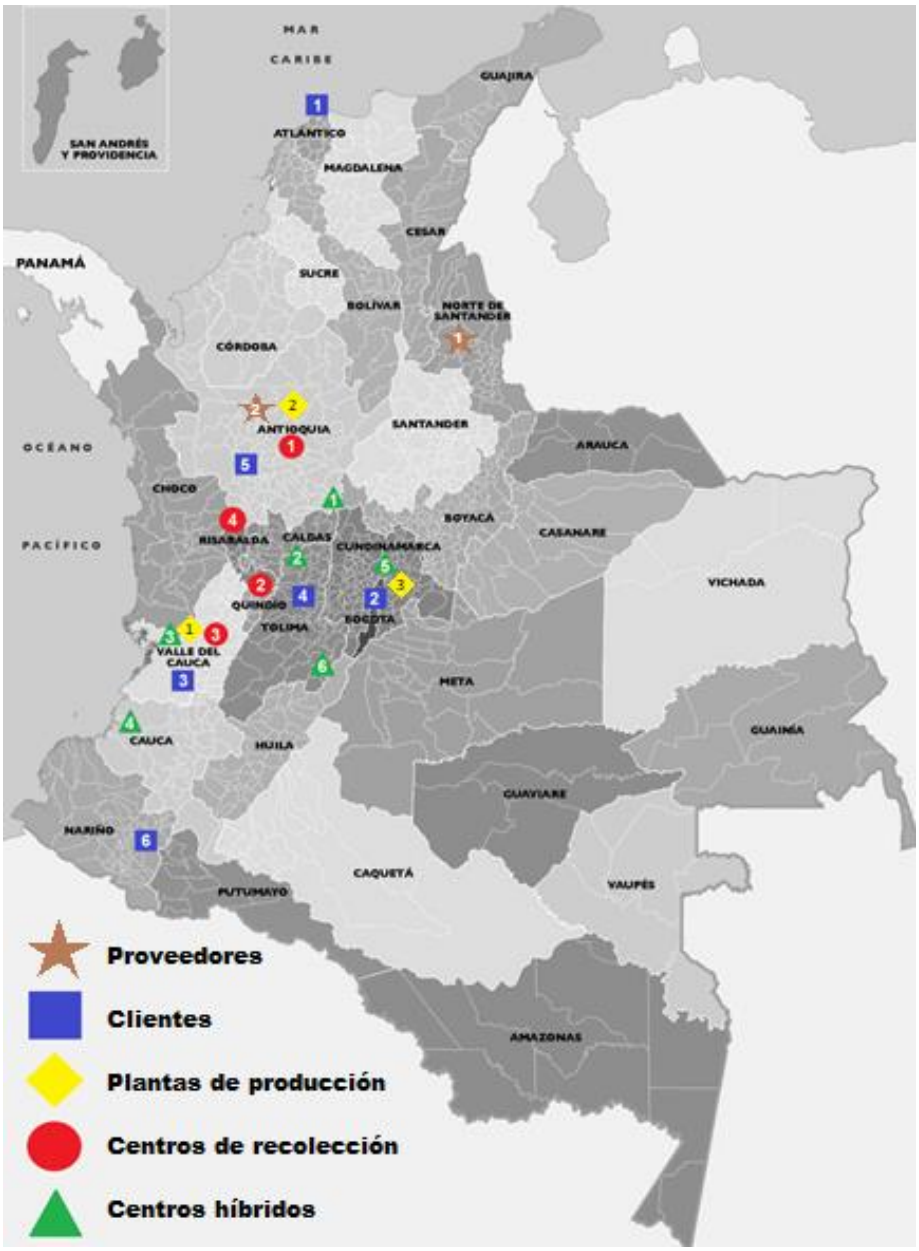

Figura 11: Localización de proveedores, clientes, plantas de producción, centros híbridos y de recolección – caso de estudio.

- Existen 2 proveedores: 1 para big bags ubicado en Antioquia y 1 para estibas ubicado en Norte de Santander.

- Existen 6 clientes ubicados en los departamentos de Atlántico, Cundinamarca, Valle del Cauca, Ibagué, Antioquia y Nariño.

- Existen 4 posibles centros de recolección ubicados en Antioquia, Quindío, Valle del Cauca y Risaralda.

- Existen 6 posibles centros híbridos ubicados en Boyacá, Caldas, Valle del Cauca, Cauca, Cundinamarca y Huila.

- Las 2 plantas de producción propias se encuentran localizadas en el Valle del Cauca y Antioquia, mientras que la subcontratada en Cundinamarca.

- Los centros de recolección tienen una mayor capacidad de manejo de material recuperable que los centros híbridos. Esto debido a su especialización en dicha actividad, adicional permiten disminuir algunos componentes del costo, ya que también son utilizados para el manejo de producto terminado en el flujo directo.

- Las 2 plantas propias se han especializado en un tipo de producto con el objetivo de disminuir costos asociados; así, el producto 1 tiene un menor costo de producción en la planta 2, mientras que el producto 3 lo tiene en la planta 1. El producto 2 tiene igual costo si se fabrica en cualquiera de las 2 plantas.

- Cada consumidor demanda 3 diferentes tipos de productos, los cuales son relacionados en la Tabla 3 mostrada a continuación:

Tabla 3: Tipos de producto, peso neto e identificación de utilización de material recuperable - caso de estudio.

Producto	Peso neto (Kg.)	Estiba de madera	Big bag
P1	500	Si	No
P2	1.000	Si	Si
P3	1.500	No	Si

- El mix de ventas se distribuye en promedio así: 40% producto 1, 45% producto 2 y 15% producto 3.

- Los big bags (cuyo peso oscila entre 2 y 4 Kg.) se transportan en camiones dos ejes (sencillos) con capacidades entre 8.5 y 10 ton., mientras que las

estibas de madera (cuyo peso promedio es de 25 Kg.) lo hacen en camiones tres ejes (doble troques) con capacidades de 17 ton. Por su parte, el producto terminado se transporta en tracto camiones tres ejes o tracto mulas con semirremolque de tres ejes con capacidad de 34 ton.

5.6. MODELO ESTOCÁSTICO

En esta sección se describirá el modelo estocástico propuesto para resolver el problema de localización de instalaciones para la recuperación de material. Para esto se debe diferenciar la solución obtenida inicialmente (sección anterior), denominada “Solución Determinista (SD)”, y la que se encontrará con la metodología que se describe en esta sección, a la cual se le denomina “Solución Estocástica (SE)”. Aunque ambas soluciones son independientes, se compararán en un conjunto de escenarios para determinar la validez de incluir el modelo estocástico en el análisis.

Los componentes estocásticos son la *demanda de producto terminado* y la *tasa de retorno de los materiales a recuperar*. Para la estimación de las funciones de distribución de probabilidad de las demandas se contactó con el área de mercadeo, costos y presupuesto, y logística de producto terminado, para solicitar datos. Sin embargo, estos presentaban problemas de sesgos y mediciones. Así, las estimaciones se realizaron basadas en juicios de expertos en la empresa. Consolidando esta información, en este modelo se considerará que las variables de demanda tienen una función de distribución normal, donde el parámetro de media corresponde al valor del parámetro del modelo determinista y cuya variabilidad está determinada por los parámetros respecto a su media, datos que son presentados en la Tabla 4. En cuanto a la tasa de retorno, debido a la constante manipulación y características propias del material, se ha podido determinar que las estibas se averían en una mayor proporción que los big bags, lo que se traduce en mayor variabilidad en la proporción de recuperación de este tipo de material. El comportamiento estadístico según la empresa obedece a una distribución uniforme, los detalles se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4: Parámetros estocásticos de sistema objeto de estudio

Variabilidad de la demanda de producto terminado (dem_{lkt})		**Variabilidad de la tasa de retorno de producto a recuperar (prt_r)**	
Cliente 1	+/- 20%	**Estibas de madera**	Entre 60% y 90%
Cliente 2	+/- 20%		
Cliente 3	+/- 10%		
Cliente 4	+/- 15%	**Big bags**	Entre 85% y 97.5%
Cliente 5	+/- 15%		
Cliente 6	+/- 20%		

La cantidad de escenarios a analizar inicialmente (500) se establece como un número representativo de posibles valores de las variables aleatorias que permitan identificar y definir los aspectos comunes en las distintas corridas.

Una vez identificadas las instalaciones abiertas en cada escenario, se realiza una agrupación de las configuraciones sugeridas; esta se realiza de acuerdo con las soluciones obtenidas por el modelo respecto a la apertura de centros que se repiten. Se identificaron en total 16 configuraciones distintas (ver sección 6.2). Con base en la experimentación que se realizó, se pudo identificar que a partir de 500 escenarios no se conseguían configuraciones nuevas, e igual manera, la distribución de configuraciones se lleva a condición de estado estable, es decir, las proporciones de ocurrencia de las 16 configuraciones identificadas se mantienen. Caso seguido, para cada uno de los escenarios se calcula su respectiva entropía, importancia nodal y parámetro de robustez, tanto en el flujo directo como en el inverso.

Para finalizar, en la validación se generará una simulación independiente de 5000 escenarios en la que se evaluará la SE y la SD. Esta propuesta se basa en un modelo estocástico de optimización lineal en dos etapas (Two-Stage Stochastic Linear Programming Model), dividiendo el problema en dos decisiones: la primera independiente (referente a la construcción de instalaciones) y la segunda dependiente de la primera (los flujos directos e inversos de producto). Este método agrupa ambas decisiones en un solo modelo con sus restricciones respectivas y con la relación entre variables. Para ello se agregan como nuevas restricciones al modelo de programación las variables de localización, dejando fijas las instalaciones abiertas y las que no, tanto en el SD como en el SE, por separado; se trata entonces de comparar, a la luz de los mismos escenarios, cada una de las configuraciones obtenidas en el SE al igual que el SD, determinando la configuración que permite obtener mayor robustez.

Considerar la demanda y la tasa de retorno variables, garantiza que en total se tengan 216 variables normales (6 clientes, 3 productos, 12 períodos de tiempo) y 2 uniformes (big bags y estibas de madera), interactuando entre sí. Por tanto, no se podrían estructurar todos los escenarios posibles de forma enumerativa. Es por esto por lo que se prone diseñar una simulación Montecarlo, generando así 5.000 de estos para cada una de las 16 configuraciones identificadas. Posteriormente, se resuelve cada uno, teniendo en cuenta las variaciones en los parámetros de acuerdo con los rangos anteriormente descritos, obteniendo diferentes soluciones óptimas. Se analizarán los resultados teniendo en cuenta las variables de la primera etapa y los valores según la medición de robustez.

Una vez concluido lo anterior, entre todas las configuraciones posibles se elige aquella que brinda la mayor robustez promedio, teniendo en cuenta los flujos directo e inverso, ya que es la que mayor seguridad brinda al tomador de decisiones para responder de mejor manera a la variabilidad de los parámetros objeto de estudio (demanda y tasa de retorno).

6. RESULTADOS

En la primera sección de este documento se consigna el análisis de la solución óptima (caso base) desde el punto de vista de algunas medidas de desempeño operativas y la aplicación de la metodología de robustez. Caso seguido se presenta el desarrollo del modelo estocástico con el objetivo de identificar las distintas configuraciones de la red que se sugieren adoptar; finalmente, una simulación con 5.000 escenarios para cada configuración, con el objetivo de elegir aquella que sea mejor entre todas en términos de robustez y costos.

6.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS – CASO BASE

Una vez se estructuró el caso de estudio en conjunto con el modelo propuesto, se recurrió al lenguaje de programación AMPL y al solver Gurobi 9.1.2 como herramienta para hallar la solución óptima de la red de logística inversa propuesta. El modelo base presentó 10306 variables (10 binarias y 10296 continuas), y 2509 restricciones.

6.1.1. Medidas de desempeño operativas

La solución óptima permite dar apertura a las siguientes instalaciones:

- **Centros híbridos (CH):** 1 – 3 – 4.
- **Centros recolección (CR):** 1 – 3 – 4.

Estas 6 instalaciones son elegidas teniendo en cuenta la mejor combinación de diversos criterios: menores costos de apertura (CR 4, CH 1), mayores capacidades de manejo (CR 3, CH 4), menores costos de reparación (CR 3, CH 3), y de distancia por sus ubicaciones estratégicas de cara al mercado y a la red en general.

Si se evalúa la proporción de entregas correctas - definidas como el número de unidades satisfechas por total de pedido - se concluye que, para cada uno de los 12 períodos, con la configuración de esta cadena se logra un nivel de servicio al cliente promedio del 96%. De esta total resulta conveniente destacar que los clientes 1 y 6 son los más afectados: 91% y 95%, respectivamente; lo anterior como consecuencia de su lejana ubicación de las instalaciones que la atienden: el primero en la Costa Caribe, mientras el segundo en el sur del país. Dicha situación pone en evidencia que, así como es más costoso procesar y enviar el producto terminado a dichos sitios, representa de igual manera, un aspecto de desventaja a la hora de retornar el material a recuperar desde estos al centro del país. Caso contrario sucede con los clientes 2 y 4, los cuales presentan un nivel de servicio promedio del 100% y 99%, respectivamente, como resultado de su ubicación centralizada en los

departamentos de Ibagué y Cundinamarca, lo que los pone en ventaja al contar con diversas opciones tanto para el abastecimiento de su demanda como para el envío de material a recuperar.

En la Tabla 5, se consolida el nivel de servicio promedio para cada cliente por tipo de producto. Se puede inferir que los productos 2 y 3 poseen el más alto nivel de servicio, comparados con el 1, lo que permite concluir que la empresa debe apostar por ser más eficiente en costos (producción, transporte y manejo), o debe reevaluar la idea de continuar con la comercialización de este producto principalmente a los clientes 1, 3 y 5, para no perder credibilidad o afectar su imagen.

Tabla 5: Nivel de servicio promedio por cliente y tipo producto - caso base.

Cliente / Producto	Producto 1	Producto 2	Producto 3
Cliente 1	91%	91%	91%
Cliente 2	100%	100%	100%
Cliente 3	91%	100%	100%
Cliente 4	100%	100%	97%
Cliente 5	91%	100%	97%
Cliente 6	95%	91%	97%

A continuación, en la Tabla 6, se detalla el porcentaje de utilización de capacidad promedio de cada una de las instalaciones abiertas durante todo el horizonte de planeación de 12 meses; se evidencia así que la utilización promedio es del 83% de los centros híbridos, esto como consecuencia de 2 factores: por un lado, se realiza el envío directamente desde las plantas a los clientes, evitando costos de transporte, de almacenamiento y de manipulación adicionales -un promedio cada período de casi 3.000 toneladas en envío sin intermediarios versus 3.249 por medio de las instalaciones abiertas-, por otro lado, resulta económicamente beneficioso para la compañía incurrir en costos de penalización de demanda no servida y tener capacidad ociosa antes de garantizar el 100% de cobertura de sus pedidos.

Al analizar el flujo inverso resulta conveniente destacar el incremento en la utilización de las instalaciones: en su totalidad la proporción promedio es del 92%, donde los centros de recolección operan en un 90%, mientras que los híbridos en un 94%. Cabe destacar que en este sentido se logran retornar en promedio cada mes 10.2 toneladas de big bags y 166.5 toneladas de estibas de madera.

Tabla 6: % Utilización de capacidad instalaciones abiertas – caso base.

Flujo directo			**Flujo inverso**					
CH1	**CH3**	**CH4**	**CR1**	**CR3**	**CR4**	**CH1**	**CH3**	**CH4**
97%	88%	65%	95%	99%	77%	96%	92%	94%

Ahora bien, con el caso de estudio propuesto la función de desempeño posee un costo total de U$ 9.919.847, cifra que resulta conveniente desagregar en cada uno de los componentes propuestos en las gráficas relacionadas a continuación:

En la Figura 12 se observa el porcentaje de composición de los costos logísticos totales, evaluando principalmente los originados por el transporte entre cada par de nodos, manejo de material recuperado en el flujo inverso y de producto terminado en el directo en todas las instalaciones, así como la compra de material recuperable nuevo y el almacenamiento de inventario. En este gráfico se observa que el mayor porcentaje corresponde principalmente a los costos de compra (64%) en los que incurre la empresa durante los 12 meses del horizonte de planeación, lo que se traduce en que este es el principal factor para intervenir; de ahí radica la importancia de ser más eficientes en el proceso recuperador de material, esto con el objetivo de disminuir las cantidades a adquirir a los proveedores.

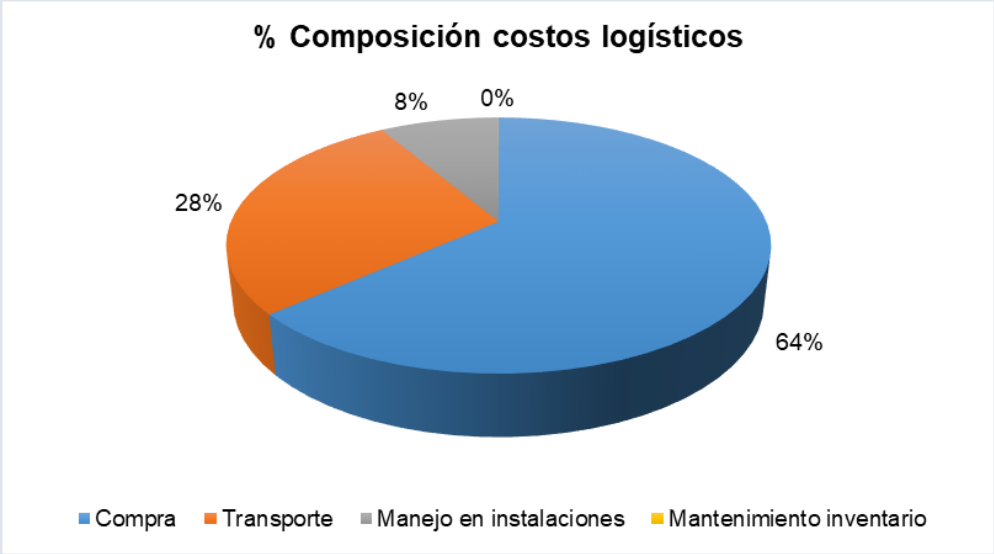

Figura 12: % composición costos logísticos – caso base.

De igual manera, si ahora se analizan los costos totales que son tenidos en cuenta en el presente trabajo: logísticos, producción, demanda no servida y apertura de nuevas instalaciones se obtiene la Figura 13. Según esta gráfica el mayor componente del costo asumido por la empresa es el de producción en las respectivas plantas - los cuales son amplios por la cantidad de insumos, mano de obra y demás actividades demandadas para producir una unidad terminada -, seguido de los logísticos y finalizando con el de la demanda no servida y apertura de centros.

Los resultados obtenidos además permitieron evidenciar que la mayor cantidad de dinero que la empresa debe asumir se encuentra en el flujo directo con respecto al inverso (97% versus 3%, respectivamente del total del costo); lo anterior debido a

que, para extender el ciclo de vida del producto a procesos recuperadores, solo se requiere adicionalmente abrir centros de recolección, operarlos y transportar el respectivo material a lo largo de toda la cadena inversa. De igual manera, si se analiza solo el componente del costo de transporte en ambos flujos, la proporción también resulta favorable en el inverso: en el directo se transportan toneladas de producto terminado, mientras que en el inverso retornan estibas y big bags cuyo peso es inferior y cuyo factor de relación en unidades de material por tonelada de producto es muy bajo, situación que contribuye a no afectar en mayor medida la función de desempeño.

Figura 13: % composición costos totales – caso base.

Al evaluar el inventario de material recuperado almacenado en planta, se resalta la no existencia de este para cada uno de los períodos del horizonte de planeación. La situación anterior obedece a dos características: como la función objetivo está penalizada por un costo de mantener inventario, no se comprará más que lo estrictamente necesario para satisfacer las necesidades de los clientes, por lo que no resulta factible adquirir material a almacenar para suplir demandas de períodos posteriores; además en ninguno de los 12 períodos lo que queda disponible en planta proveniente de los centros de recolección e híbridos (aquello que se pudo recuperar) supera las necesidades a suplir de los clientes, por lo que todo aquello que retorna y es reparado, es utilizado inmediatamente para satisfacer la demanda.

Si se analiza la compra de toneladas de big bags y estibas de madera se evidencia que es inferior si se compara con un pedido que no tuviera en cuenta las cantidades que retornan y logran ser remanufacturadas para continuar en la operación (no existencia de procesos logísticos inversos). En la Figura 14 y Figura 15, mostradas a continuación, se realiza tal comparación:

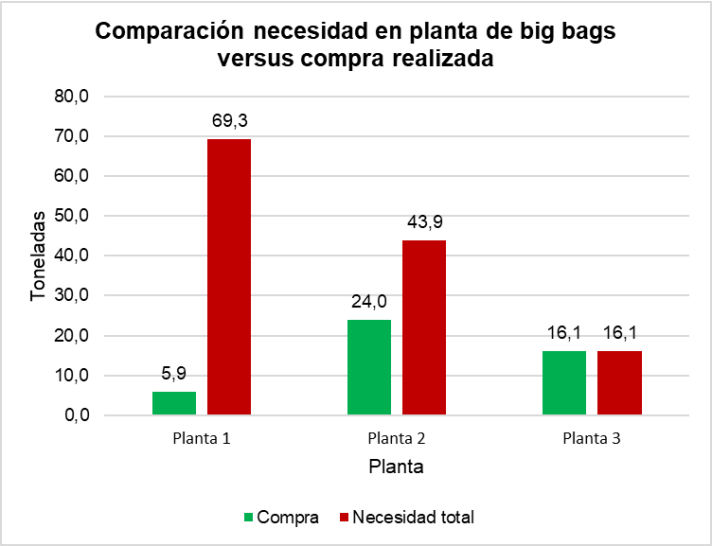

Figura 14: Necesidad de big bags en planta vs compra real – caso base.

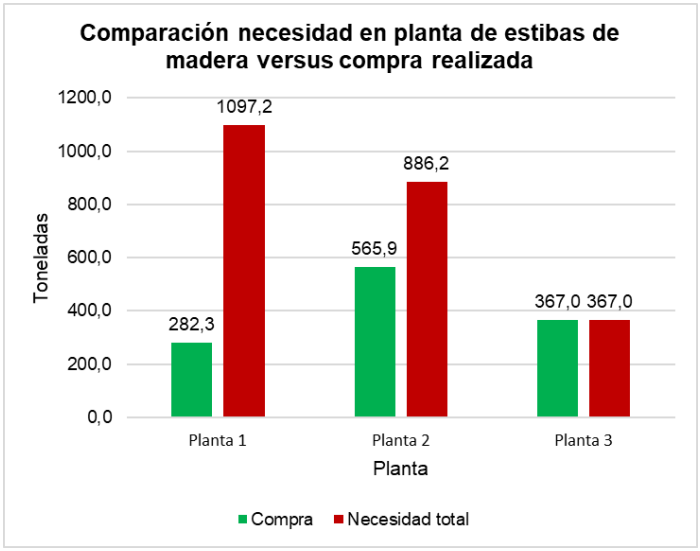

Figura 15: Necesidad de estibas de madera en planta vs compra real – caso base.

Según estas gráficas, el ahorro que se presenta por recuperación de material es representativo: una reducción de más del 70% en el caso de los big bags y de casi el 60% en el de las estibas de madera (como se dijo anteriormente en la planta 3 no aplican los procesos recuperadores). Si bien es cierto que el material que logra retornar a las plantas 1 y 2, producto de un proceso de remanufactura exitoso, no es gratuito, el costo que debe asumir la empresa por tal actividad es más bajo que el de adquirir una unidad nueva; así pues, por cada tonelada que retorne la compañía se está ahorrando capital que puede invertir en otras actividades.

A continuación, se compara el costo de compra de una tonelada de estiba de madera y de big bags nueva con el de una recuperada. El valor de esta última se calculó teniendo en cuenta la combinación de costo más alto que incluya transporte en sentido inverso entre cada uno de los nodos y reparación del material; en otras palabras, este es el máximo costo en el que la empresa incurriría por recuperación, lo que significa el mínimo ahorro que la organización percibiría por tonelada.

En la Tabla 7 se relacionan los costos en los que se debe incurrir por cada tonelada comprada versus el costo máximo de recuperación en un centro híbrido que ha sido previamente abierto. Por otro lado, en la Tabla 8 se compara la misma situación, pero teniendo en cuenta que la actividad es desarrollada en los centros de recolección.

Tabla 7: Comparación por tonelada costo de recuperación en centros híbridos versus de compra - caso base.

Material	Costo máximo recuperación por tonelada (U$/Ton)	Costo compra material nuevo por tonelada (U$/Ton)	Ahorro por tonelada (U$/Ton)	Ahorro (%)
Big bags	1.364,52	6.182,82	4.818,30	78
Estibas	317,91	445,16	127,26	29

Tabla 8: Comparación por tonelada costo de recuperación en centros recolección versus de compra - caso base.

Material	Costo máximo recuperación por tonelada (U$/Ton)	Costo compra material nuevo por tonelada (U$/Ton)	Ahorro por tonelada (U$/Ton)	Ahorro (%)
Big bags	1.051,53	6.182,82	5.131,30	83
Estibas	273,21	445,16	171,95	39

Así pues, al introducir el proceso recuperador, la compañía se está ahorrando en promedio con esta configuración U$2.628.398, cifra que corresponde a comparar los U$12.548.245 en los que se incurre si no existe flujo de retorno y, por tanto, actividades de recuperación, situación que implica la compra todo el material big bag y estibas requerido durante los 12 períodos, versus U$ 9.919.847, que corresponde al modelo actual que incluye actividades en inversa y sus costos asociados; en otras palabras, existe un ahorro de más del 20% en los costos de operación totales.

6.1.2. Métrica de robustez adaptada

Aplicando la metodología adaptada en el capítulo 5, se obtienen los siguientes resultados presentados en las Tabla 9 y Tabla 10. La primera hace referencia a la métrica desarrollada para el flujo directo, mientras la segunda para el inverso.

Tabla 9: Cálculo de indicador de robustez en flujo directo - caso base.

Centro	f_{ij}	p_i	H_i	C_i	LL_i	α_i	R_i	δ_i	Norm δ_i	R_{TOTAL}
CH 1	1104	0,34	-0,1593	1144	0,97	1,04	0,1650	0,34	1,03	0,1702
CH 3	1452	0,45	-0,1563	1658	0,88	1,14	0,1785	0,45	1,36	0,2430
CH 4	693	0,21	-0,1431	1068	0,65	1,54	0,2206	0,20	0,61	0,1339
Total	**3249**		**-0,4587**				**0,5641**	**1,00**	**3**	**0,5472**

Tabla 10: Cálculo de indicador de robustez en flujo inverso - caso base.

Centro	f_{ij}	p_i	H_i	C_i	LL_i	α_i	R_i	δ_i	Norm δ_i	R_{TOTAL}
CH 1	19	0,11	-0,1037	19,65	0,96	1,04	0,1081	0,01	0,03	0,0035
CH 3	22	0,12	-0,1124	23,85	0,92	1,09	0,1224	0,08	0,48	0,0586
CH 4	15	0,09	-0,0910	16,00	0,94	1,07	0,0969	0,07	0,40	0,0391
CR 1	40	0,23	-0,1463	42,50	0,95	1,06	0,1547	0,25	1,47	0,2279
CR 3	50	0,28	-0,1553	51,00	0,99	1,02	0,1576	0,42	2,55	0,4014
CR 4	31	0,17	-0,1317	39,75	0,77	1,30	0,1716	0,18	1,07	0,1831
Total	**177**		**-0,7404**				**0,8113**	**1,00**	**6**	**0,9135**

Los resultados obtenidos permiten identificar que la red en sentido inverso presenta una entropía absoluta (H) mayor que en el sentido directo (0.7404 versus 0.4587), situación que conlleva a afirmar que la robustez (R_{TOTAL}) en el primer caso es mayor que en el segundo (0.9135 versus 0.5472); esto debido a que en el flujo de retorno existen mayor cantidad de instalaciones abiertas, lo que se traduce en mejor respaldo si surge determinada interrupción en el suministro desde alguna de estas: las instalaciones restantes podrán responder de mejor manera ante una eventual alteración en los envíos. En otras palabras, en la red sentido directo se cuenta solo con 3 instalaciones operando (p_i con una tendencia menos uniforme), mientras que en el inverso con 6 centros (p_i con una tendencia más uniforme). Si de estas 3 se cierra alguna, la empresa se vería en más problemas para sostener su nivel de servicio al cliente, que si de las 6 colapsa alguna. Es válido destacar, además, que el cierre de una instalación con mayor R_{TOTAL}, como el caso del centro híbrido 3 (flujo directo) o el de recolección 3 (flujo inverso), perjudicaría en mayor proporción la cadena de suministros que si cerraran centros como el híbrido 4 o el 1 que tienen un indicador menor. Dicho planteamiento permite identificar que aquellos centros con mayor robustez dejarían en una posición vulnerable a la cadena si colapsan, por lo que lo más recomendable es de no depender de un número limitado de centros, sino apostar a la uniformidad de distribución de cargas.

Caso contrario sucede si se analiza la capacidad utilizada (LL_i) de las instalaciones abiertas: esta medida de desempeño tiene mayor impacto en la robustez en el flujo directo con respecto al inverso: se puede detallar así que en el primer caso se pasa de una entropía absoluta (H) de 0.4587 a una robustez (R_i) de 0.5641, es decir, una variación de 0.1054 (23%), mientras que en el segundo se logra un cambio de entropía absoluta (H) de 0.7404 a una robustez (R_i) de 0.8113, es decir, un crecimiento de 0.0709 (9.6%). Dicha situación obedece a que, como se enunció en la sección anterior, la capacidad disponible de las instalaciones híbridas en el flujo directo (17%) es mayor a la existente en el inverso (8%), lo que pone en evidencia que, ante alguna desconexión o cierre de centros, con la capacidad disponible de los híbridos es más fácil asumir trabajo adicional que los de recolección. Dicho en otras palabras: un sistema con el 100% de capacidad ocupada no tendrá disponibilidad de reaccionar ante algún cierre abrupto de determinada instalación (entre más cercano a 1 sea el valor de α_i, menor será la robustez del sistema, ya que significa que los centros operan a su máxima capacidad).

La importancia de cada centro también juega un papel fundamental para ambos flujos: en el directo se puede observar cómo ocasiona una disminución en la robustez (R_{TOTAL}) al pasar de 0.5641 a 0.5472 mientras que en el inverso la incrementa de 0.8113 a 0.9135. En el primer caso la situación se presenta debido a que los centros híbridos con menor robustez (R_i) (1 y 3) son los que mayor importancia (δ_i) tienen por encima del 4, el cual tiene a su vez la mayor robustez (R_i). Este "desbalance" en la relación entre robustez e importancia nodal ocasiona que el parámetro decaiga ligeramente, algo que no sucede en el flujo inverso, ya que aquellos centros con mayor robustez (R_i) (los de recolección 1, 3 y 4) tienen a su vez la mayor importancia (δ_i) dentro de la cadena, lo que potencializa el parámetro final. En este punto cabe destacar también la diferencia que existe entre las importancias de las instalaciones: en el flujo directo esta se distribuye más uniformemente, puesto que todos los centros tienen un aporte representativo al margen de la compañía, es decir, en cada uno se manejan desde el producto que menos rentabilidad aporta (el número 1) hasta el de mayor (el número 3); por su parte, en el flujo inverso la situación es más notoria: los centros de recolección tienen una importancia mucho más grande que los híbridos (85% versus 15%). Si se observa el porcentaje de ocupación de todas las instalaciones abiertas, esta es superior al 90%, pero la diferencia radica en que los primeros son los que tienen prioridad a la hora de realizar actividades de recuperación y, por tanto, son los que aportan más "ahorros" a la compañía; en otras palabras, a los centros de recolección llega más material con estado "1" – se puede reutilizar sin reparación - y "2" – se puede reutilizar con reparación -, que el "3" – no se puede reutilizar -, ya que en estas instalaciones se poseen más bajos costos de manejo y manipulación en comparación con los híbridos. Esta situación es beneficiosa en la medida en que contar instalaciones que sean mucho más importantes que las demás potencializa la robustez total, pero a su vez, el cierre de una de estas vuelve inmediatamente más frágil la red, ya que se disminuye drásticamente la robustez de la misma.

6.2. RESOLUCIÓN MODELO ESTOCÁSTICO

6.2.1. Identificación de configuraciones de la red

De acuerdo con lo descrito la sección 5.6, se realizó un análisis de 500 escenarios de acuerdo con la variabilidad de la *demanda* y la *tasa de retorno*; es de resaltar que los datos presentan una distribución normal y uniforme, respectivamente. Analizando la totalidad de datos obtenidos en los respectivos escenarios, estos se pueden agrupar hasta en 16 posibles soluciones o propuestas de configuraciones de la red para poder dar respuesta a la problemática de la compañía. El criterio de agrupación es la configuración sugerida por la solución, es decir, las instalaciones que fueron abiertas en cada escenario, si se tienen dos soluciones que compartan la apertura, se pueden agrupar en una sola configuración, aunque los flujos sean diferentes. El análisis inicial también permitió identificar que, cuando se abren los mismos centros, los diferentes indicadores y parámetros –robustez, nivel de servicio, costos, etc.- presentan un comportamiento similar, por lo cual, es válido trabajar con promedios en este caso. (Tabla 11).

Tabla 11: Sugerencia de escenarios/configuraciones de instalaciones a abrir.

Config.	Instalaciones abiertas										Total centros abiertos	% configuración en escenarios
	Híbridos						Recolección					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4		
1	X		X	X			X	X		X	**6**	**51,8%**
2	X		X	X			X		X	X	**6**	**14,8%**
3	X		X	X				X	X		**5**	**14,4%**
4	X		X	X			X	X	X		**6**	**12,6%**
5	X		X	X	X		X	X			**6**	**1,6%**
6	X		X	X	X				X	X	**6**	**1,0%**
7	X		X	X	X			X		X	**6**	**0,6%**
8	X		X	X	X			X	X		**6**	**0,6%**
9	X		X	X	X		X		X		**6**	**0,6%**
10	X		X	X	X		X	X		X	**7**	**0,6%**
11	X		X	X				X	X	X	**6**	**0,4%**
12	X		X	X			X		X		**5**	**0,2%**
13	X	X	X	X				X	X		**6**	**0,2%**
14	X	X	X	X			X		X		**6**	**0,2%**
15	X		X	X	X		X	X	X		**7**	**0,2%**
16	X		X	X			X	X	X	X	**7**	**0,2%**

Al remitirse a dicha tabla se destaca que las sugerencias oscilan entre 5 y 7 instalaciones abiertas, sin embargo, se resalta que más de la mitad de la proporción sugiere la apertura de 6 instalaciones en específico (3 híbridos y 3 de recolección), para hacer frente a la variabilidad de la demanda y de la tasa de retorno, mientras que con una proporción de casi el 15% se propone abrir una instalación menos, representada en un centro de recolección.

Realizando un análisis vertical por tipo de instalaciones se establecen aquellas que tienen mayor participación en la apertura durante los 500 escenarios. Los respectivos datos se consignan en la Tabla 12:

Tabla 12: % apertura de instalaciones en 500 escenarios.

Centro abierto	**CH1**	**CH2**	**CH3**	**CH4**	**CH5**	**CH6**	**CR1**	**CR2**	**CR3**	**CR4**
% de veces abierto	100%	0.4%	100%	100%	5.2%	0%	82.8%	83.2%	45.4%	69.4%

Según la tabla anterior, en el flujo directo los centros híbridos 1, 3 y 4 también operan casi en la totalidad de escenarios, mientras que el 2 y el 6 son los menos tenidos en cuenta, esto último debido a que, si bien pueden ser atractivos al brindar mayores capacidades de manejo que los demás, su ubicación algo descentralizada y alejada del resto de elementos de la red, hacen que no sean viables en lo que a apertura concierne. Por su parte, el centro híbrido 5 logra una participación ligeramente superior al 5%, opción que surge cuando la demanda presenta un crecimiento con respecto al caso base, lo que significa una necesidad de mayor capacidad. De hecho, siempre que se abre la instalación 5, también se da apertura a la 1, 3 y 4. De acuerdo con la metodología adaptada esta situación mejora la robustez (R_i), ya que durante los 500 escenarios, en los que se abren 3 híbridos, se alcanza un promedio de 0.6061 y de 1.0483 con 4 instalaciones.

Al analizar el flujo inverso se puede observar cómo no existe una tendencia dominante y como se presentan variaciones en las 16 propuestas: si bien el centro de recolección 1 sigue abriéndose en una alta proporción al igual que el 2, el número 3 ya no lo es tanto y pierde participación notablemente. En su lugar, la instalación 4 - que es con la cual esta última compite - logra crecer sugiriéndose la mayor cantidad de veces (de hecho, en la configuración que más ocurre esta es la que se abre); se tiene así una situación de exclusividad en la mayoría de los casos: se abre la número 3 o la 4, pero no ambas. Esto se debe a que las dos gozan de una buena ubicación y, por lo tanto, de costos de transporte favorables con respecto a las demás, pero cuando se tienen tasas de retorno bajas (mayor cantidad de desperdicio en el material a recuperar), se abre un centro con capacidad ligeramente menor (el 3) y no incurrir en subutilizaciones excesivas.

6.2.2. Evaluación de configuraciones de la red identificadas

Una vez identificadas las distintas configuraciones que se pueden obtener debido a la estocasticidad del sistema, se realiza una evaluación de cada una en 5000 escenarios, los cuales obedecen a la variabilidad de la *tasa de retorno desde el mercado* y la *demanda de producto terminado*. El objetivo es comparar el nivel de robustez de cada una de las soluciones, todo esto teniendo en cuenta las mismas condiciones.

Cabe destacar que el tiempo de computación de las 16 configuraciones fue de 64 horas: 8 horas optimizando cada configuración en sus 5000 escenarios en el software *ampl* y 56 horas calculando los diferentes indicadores (entropía, robustez, flujos de material, costos, etc.) de cada solución obtenida.

Una vez realizado lo anterior, como primera medida se evalúa la entropía del sistema (H). Para ello considérese la Figura 16 en la cual se detallan, para el caso base y las 16 configuraciones previamente enunciadas, algunos datos relevantes; leyendo el gráfico de arriba hacia abajo: por cada barra se tiene el número de la respectiva configuración (texto color negro), seguido del total de instalaciones que fueron abiertas (texto color negro), sobre la barra rosada las toneladas movilizadas de producto terminado (texto color azul) e inmediatamente debajo la respectiva entropía del flujo directo (H), y sobre la barra verde las toneladas de material a recuperar que circularon en promedio por cada centro (texto color azul) y, debajo, la respectiva entropía del flujo inverso (H).

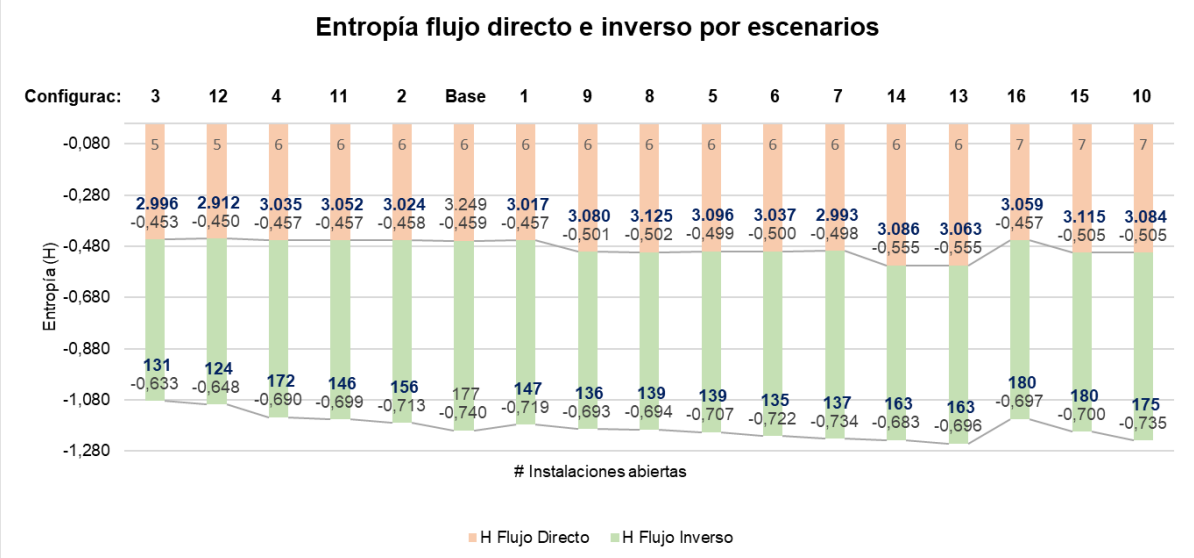

Figura 16: Entropía y toneladas movilizadas flujos directo e inverso por configuración.

Nótese que entre menos instalaciones abiertas se tengan (por ejemplo, configuración 3 con 5 centros) la entropía en ambos flujos es menor que al dar apertura a un mayor número (por ejemplo, configuración 10 con 7 centros). Sin embargo, la metodología también permite determinar que abrir instalaciones excesivamente no necesariamente mejorará la robustez (por ejemplo, la configuración 16). Con esta gráfica se reafirma uno de los planteamientos pilares de la metodología de robustez adaptada al demostrar que existe una relación directamente proporcional entre la cantidad de instalaciones y el nivel de robustez de la red, esto debido a que existe una entropía altamente negativa. Entre más alta sea esta última, mayor robustez brindará al sistema.

Ahora bien, la relación inversamente proporcional que existe entre la capacidad ocupada y la robustez (R_i) del sistema también es un aspecto a analizar. En la Figura 17, la cual corresponde al flujo directo, se evidencia para cada una de las 16 configuraciones (números en color azul) entre más disponibilidad de manejo exista en los centros abiertos, mayor será la robustez (R_i) del sistema: por ejemplo, en la número 7 se cuenta con una capacidad ocupada promedio del 57% y una robustez de 1.13, mientras que en la 11 una ocupación del 77% y una robustez de 0.60. Cabe resaltar el caso base, el cual tiene la mayor proporción de ocupación, lo cual se ve reflejado en el indicador de robustez (R_i) más bajo en el flujo directo.

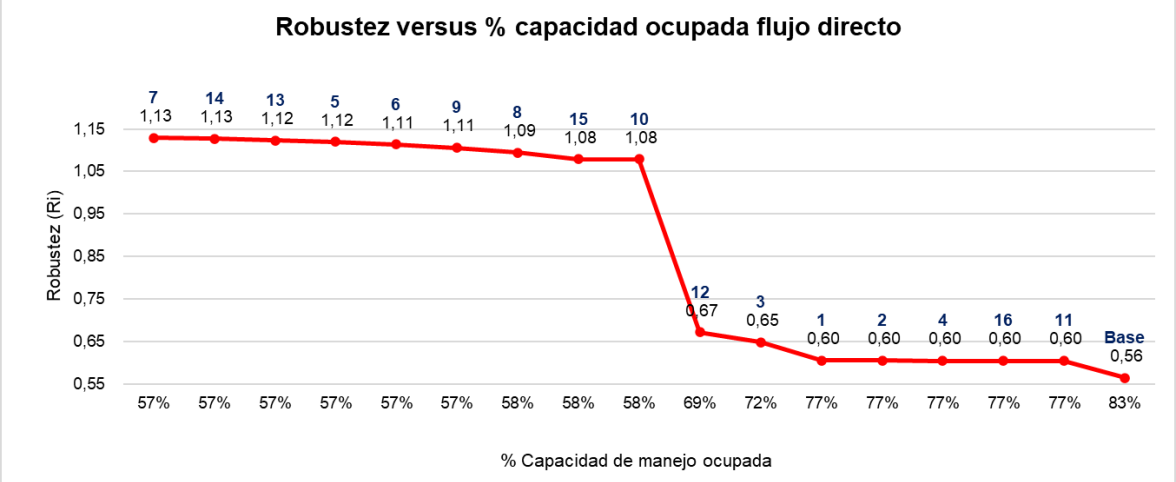

Figura 17: Comparación entre Robustez (Ri) y % capacidad ocupada de instalaciones abiertas por configuración flujo directo.

Similar comportamiento se presenta en la Figura 18, evidenciándose que la tendencia es más pronunciada que en el flujo directo; es así como se observa que los más altos parámetros de robustez (por encima de 1.00) corresponden a redes cuya capacidad ociosa es mayor, mientras que los más bajos (entre 0.73 y 0.95) se logran con las proporciones más altas de ocupación. En este flujo el caso base presenta una leve mejora con respecto al sentido directo, ya que, si bien posee la mayor proporción de ocupación (92%), no tiene el indicador de robustez más bajo.

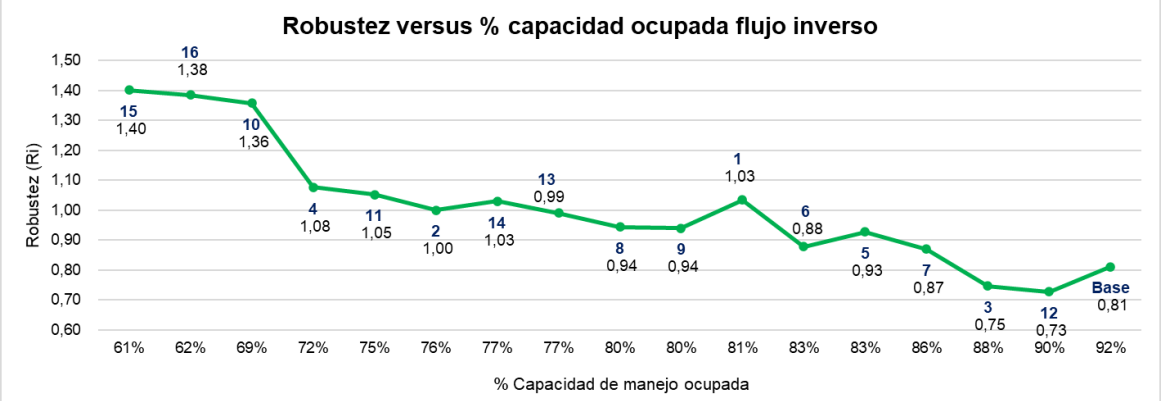

Figura 18: Comparación entre Robustez (Ri) y % capacidad ocupada de instalaciones abiertas por configuración flujo inverso.

Al realizar una comparación entre la robustez total (R_{TOTAL}) del sistema y los costos de la red se obtienen las Figura 19 y Figura 20 para los flujos directo e inverso, respectivamente. En la primera se puede observar un comportamiento similar para varias instalaciones: en un primer sector, ubicado en la parte inferior izquierda del gráfico, se hallan las configuraciones (2, 4, 1, 11, 16, base) que brindan la menor robustez en el flujo directo, sin embargo, garantizan menor costo total; en un segundo bloque, ubicado en la parte media izquierda, se localizan aquellas instalaciones que ofrecen robustez media (entre 0.85 y 0.9) a costos más bajos, siendo las configuraciones 10 y 15 las mejores de este segmento; por otro lado, hacia la zona derecha de la gráfica, se ubican las instalaciones 3 y 12, las cuales presentan un parámetro de robustez muy bajo (inferior a 0.65) pero a costos más altos (las menos recomendables). Finalmente, en la franja superior izquierda se localizan aquellas configuraciones que brindan mayor robustez a un costo bajo (13 y 14).

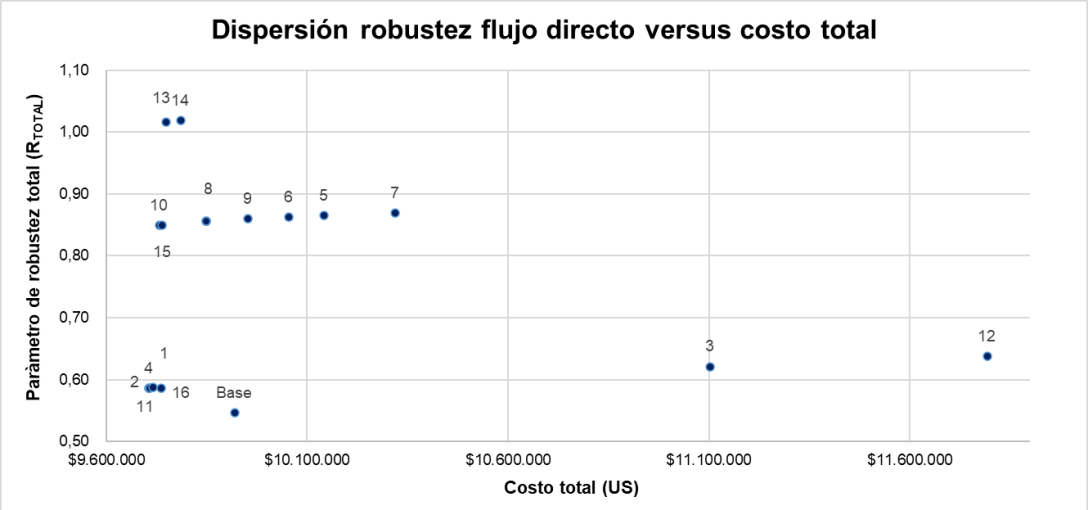

Figura 19: Robustez total (RTOTAL) versus costos totales flujo directo por configuración.

Por otro lado, al analizar el flujo inverso la dispersión de los gráficos cambia y los 4 grupos ya no son tan fácilmente identificables; sin embargo, se puede notar como las configuraciones 3 y 12 continúan siendo excesivamente costosas para el nivel de robustez que brindan (inferior a 0.85), así como las 8, 9, 6, o el caso base, que brindan niveles bajos de robustez, aunque a costos más bajos. Llama la atención que las número 13 y 14, que se caracterizaban como oferentes de alta robustez en el flujo directo, en el inverso no tengan el mismo impacto, y por el contrario, tengan un bajo indicador. Caso contrario, resulta conveniente destacar el número 16 que, si bien no garantizaba un alto parámetro para el flujo directo, si lo hace en el inverso. Pero finalmente, son los tipos de configuración 10 y 15 los que continúan brindando en ambos flujos la mayor robustez, siendo más destacado este último.

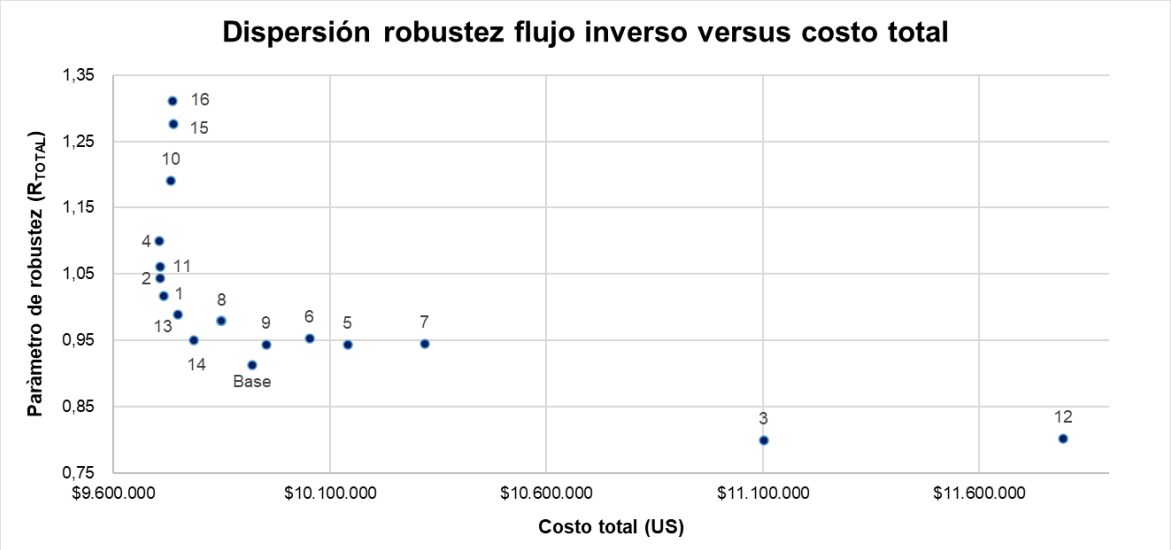

Figura 20: Robustez total (RTOTAL) versus costos totales flujo inverso por configuración.

Si se analiza, por un lado, el costo total y la robustez conjunta promedio tanto del flujo directo como inverso (Figura 21), aquellas configuraciones más destacadas serían las número 10 y 15, esto debido a que poseen la mayor robustez con respecto al resto de soluciones a los más bajos costos (mayor relación costo por unidad de robustez). Caso contrario sucede con el caso base, el cual, aunque tiene un menor costo de operación si se compara con configuraciones como la 3 o la 12, presenta también una muy baja robustez.

Establecer la mejor alternativa de configuración de la red es una decisión estratégica que implica el análisis de diversos aspectos desde la realidad de la propia empresa, es decir, determinar, por un lado, hacia donde se dirige la compañía en un futuro (¿qué es más probable que ocurra?), y por el otro, responder qué flujo se interesa por tener más robusto, o si en complemento se apostará por el fortalecimiento de ambos (¿vale la pena crecer en robustez, pero también en costo? ¿O solo potencializar uno?).

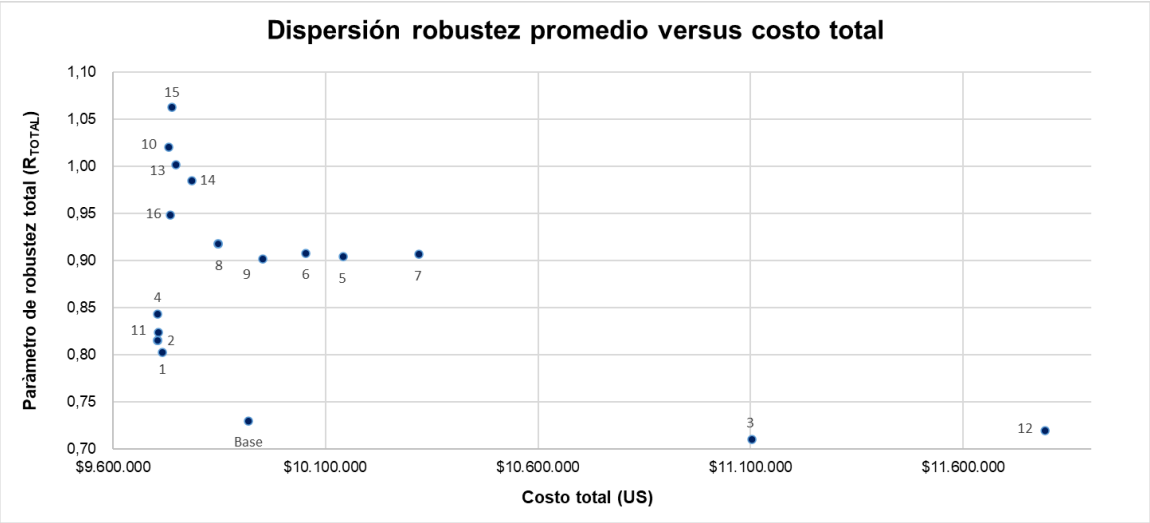

Figura 21: Robustez promedio versus costo total por configuración.

6.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS – CONFIGURACIÓN SUGERIDA

Una vez se identifican y analizan las 16 configuraciones existentes, se elige la mejor para dar solución a la situación objeto de estudio. La sugerencia de esta se realiza teniendo en cuenta lo evidenciado en la Figura 21, en la cual se logra alcanzar la máxima robustez posible en ambos flujos (directo e inverso). Para ello, considérese la Tabla 13 en la que se consigna la configuración base de la SD, al igual que los dos mejores candidatos obtenidos en la SE (configuración 15 y 10). Se puede observar como la SD queda descartada inicialmente, debido a que posee el más alto costo al igual que la más baja robustez conjunta de las 3 opciones. Ahora bien, si se analiza la SE, se evidencia que, aunque la opción 15 es más costosa que la 10 (U$ 7.108 adicionales), representa una mayor robustez conjunta (0,04 puntos de robustez adicional). En otras palabras, la configuración 15 es la mejor opción, debido a que posee un 3,92% más robustez que la 10, a cambio de un incremento de tan solo 0,073% en el costo total.

Tabla 13: Solución determinista: caso base (SD) y mejores soluciones estocásticas (SE).

Tipo soluc.	Configurac.	Costo total (U$)	Robustez total Flujo directo	Robustez total Flujo indirecto	Robustez conjunta
SE	**10**	$ 9.731.828	0,85	1,19	1,02
	15	$ 9.738.936	0,85	1,28	1,06
SD	**Caso Base**	$ 9.919.847	0,56	0,81	0,69

A continuación, se realiza el análisis desde las medidas de desempeño operativas y la adaptación de la métrica de robustez para validar esta configuración.

6.3.1. Medidas de desempeño operativas

Esta solución permite dar apertura a las siguientes instalaciones:

- **Centros híbridos (CH):** 1 – 3 – 4 – 5.
- **Centros recolección (CR):** 1 – 2 – 3.

Como se puede observar, con respecto al caso base, existen algunos ajustes: en primer lugar, se abre una instalación adicional híbrida (la 5), y, en segundo, se mantiene el número centros de recolección, pero cambia la configuración, ya que en su lugar se cierra el 4 y se abre el 2. Lo anterior se debe principalmente a que los esfuerzos se deben intensificar en el flujo directo más que en el inverso; se requieren manipular en promedio 3.026 toneladas de producto terminado por dichas instalaciones -una de las cifras más altas de todos los escenarios-, producto de un comportamiento creciente de la demanda. Consecuencia de lo anterior, se necesita retornar para recuperación y disposición alrededor de 150 toneladas de material big bag y estibas de madera, producto de esta alta demanda, una cifra también representativa con respecto a las demás configuraciones. El esfuerzo entonces se centra en movilizar las toneladas en el flujo directo y, debido a que la tasa de retorno presenta un comportamiento alto, existe necesidad de operar con 3 centros de recolección para la revisión. Cabe destacar que se abren los centros de recolección con mayor capacidad de manejo, y aunque son los de mayor costo de apertura, también son los de menor costo de operación (existencia de economías a escala) y de transporte a los clientes (ubicación centralizada), lo que los convierte en una opción muy interesante.

Si se evalúa la proporción de entregas correctas - definidas como el número de unidades satisfechas por total de pedido - se concluye que, para cada uno de los 12 períodos, con la configuración de esta cadena se logra un nivel de servicio al cliente igual al caso base del 96%. De este total hay que destacar que, de nuevo, los clientes 1 y 6 son los más afectados: 91% y 92% (este último resulta más afectado), respectivamente; lo anterior como consecuencia de su lejana ubicación de las instalaciones que la atienden. Caso contrario sucede con los clientes 2 y 4 los cuales, nuevamente, presentan un nivel de servicio promedio del 100% en ambos casos como resultado de su ubicación centralizada.

Al analizar el nivel de servicio promedio por cliente y por tipo de producto, se puede inferir que los productos 2 y 3 continúan siendo aquellos con el más alto nivel de servicio, comparados con el 1, lo que permite reafirmar que la empresa debe apostar por ser más eficiente en costos (producción, transporte y manejo), o debe reevaluar la idea de continuar con la comercialización de este producto principalmente a los clientes 1, 5 y 6, para no perder credibilidad o afectar su imagen (Tabla 14). Sin

embargo, resulta conveniente destacar que, con la configuración propuesta, esta proporción aumenta y se garantiza a cada cliente un nivel de servicio de mínimo el 95%.

Tabla 14: Nivel de servicio promedio por cliente y tipo producto - configuración sugerida.

Cliente / Producto	Producto 1	Producto 2	Producto 3
Cliente 1	97%	95%	95%
Cliente 2	100%	100%	100%
Cliente 3	97%	100%	100%
Cliente 4	100%	100%	97%
Cliente 5	95%	100%	98%
Cliente 6	95%	95%	97%

A continuación, en la Tabla 15, se detalla el porcentaje de utilización de capacidad promedio de cada una de las instalaciones abiertas durante todo el horizonte de planeación de 12 meses; se evidencia que la utilización promedio de los centros híbridos decae 23 puntos porcentuales hasta llegar al 60%, esto como consecuencia de 2 factores: por un lado, continua prevaleciendo el envío directamente desde las plantas a los clientes evitando costos adicionales y, adicionalmente, se movilizan en promedio cada período 223 toneladas menos al caso base (disminución de 6.9%), sin embargo, se da apertura a una instalación adicional híbrida, para poder soportar picos o variaciones altas en la demanda, sin operar al máximo los centros.

Al analizar el flujo inverso resulta conveniente destacar el incremento en la utilización de las instalaciones: en su totalidad la proporción promedio pasa del 92% en la SD al 61% con esta configuración, siendo los centros de recolección los que operan a mayor capacidad, si se comparan con los híbridos.

Tabla 15: % Utilización de capacidad instalaciones abiertas – configuración sugerida.

Flujo directo				**Flujo inverso**						
CH1	**CH3**	**CH4**	**CH5**	**CR1**	**CR2**	**CR3**	**CH1**	**CH3**	**CH4**	**CH5**
81%	83%	58%	11%	74%	81%	90%	5%	19%	86%	71%

En cuanto a la proporción de composición de los costos logísticos totales, el orden de estos es similar a la Figura 12 al igual que los costos totales visualizados en la Figura 13, obedeciendo a las razones expuestas anteriormente. De igual manera, los resultados obtenidos además permitieron evidenciar que la mayor cantidad de dinero que la empresa debe asumir se encuentra en el flujo directo con respecto al inverso (97% versus 3%, respectivamente del total del costo). Caso similar sucede con el inventario de material recuperado almacenado en planta, aspecto en el que vale la pena resaltar la no existencia de este para cada uno de los períodos del horizonte de planeación.

Si se analiza la compra de big bags y estibas de madera, en toneladas, se evidencia que esta es inferior si se compara con las necesidades totales de las plantas. En la Figura 22 y Figura 23, mostradas a continuación, se realiza tal comparación:

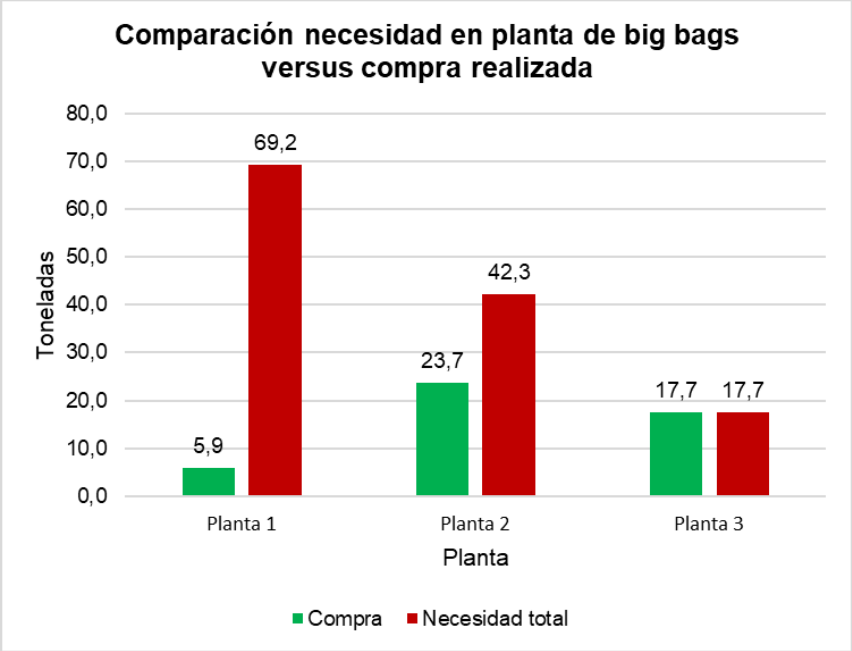

Figura 22: Necesidad de big bags en planta vs compra real - configuración sugerida.

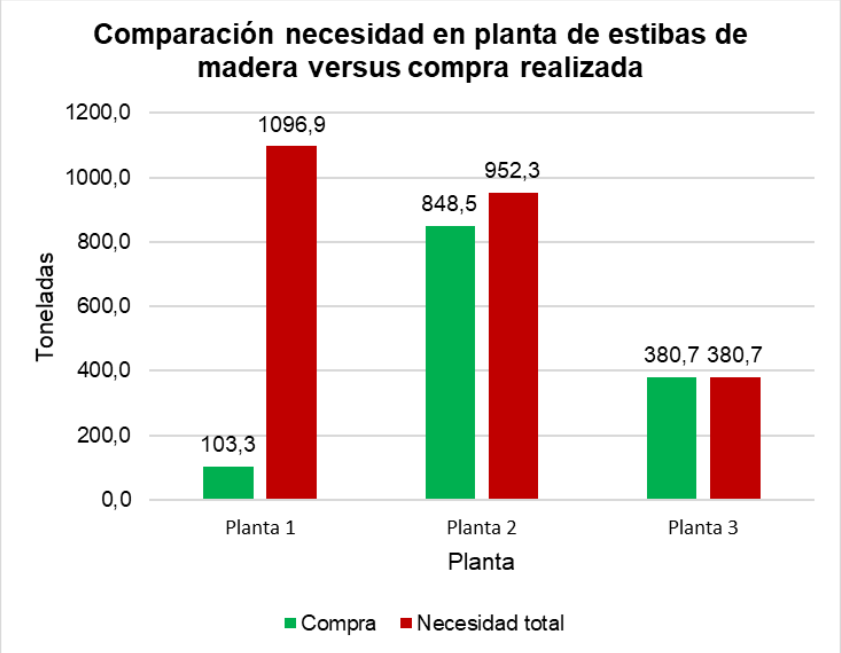

Figura 23: Necesidad de estibas de madera en planta vs compra real - configuración sugerida.

Según estas gráficas, se mantiene el ahorro que se presenta por recuperación de material: una reducción de más del 70% en el caso de los big bags y de casi el 55% en el de las estibas de madera; este último material tiene una disminución de casi 5 puntos porcentuales debido a la reducción en el retorno del material en cuestión, impacto que se presenta en la planta número 2, debido a los menores costos de transporte desde el proveedor.

Si se compara la compra de una tonelada de estiba de madera y de big bags nueva con el de una recuperada, los costos en los que se debe incurrir por cada tonelada comprada versus el costo máximo de recuperación en un centro híbrido que ha sido previamente abierto conservan la proporción evidenciada en la Tabla 7. De igual manera, si se analiza la misma situación, pero teniendo en cuenta que la actividad es desarrollada en los centros de recolección, se evidencia la Tabla 8. De estas se concluye que el ahorro en un centro de recolección es menor al presentado en un híbrido: en los primeros el ahorro es de más del 80% para los big bags y de 35% para las estibas de madera mientras, que en las instalaciones híbridas es menor al 80% para los primeros y del 25% para las segundas.

Finalmente, al introducir el proceso recuperador, la compañía se está ahorrando en promedio con esta configuración U$2.578.610, cifra que corresponde a comparar los U$12.317.546 en los que se incurre si no existe flujo de retorno y, por tanto, actividades de recuperación, situación que implica la compra todo el material big bag y estibas requerido durante los 12 períodos, versus U$ 9.738.936, que corresponde al modelo actual que incluye actividades en inversa y sus costos asociados; en otras palabras, aunque existe un aumento en los costos totales de operación con respecto al caso base, también lo hay en el ahorro percibido, el cual se mantiene en más del 20% con respecto a los costos de operación totales.

6.3.2. Métrica de robustez adaptada

Aplicando la metodología adaptada en el capítulo 5, se obtienen los siguientes resultados presentados en la Tabla 16 y Tabla 17. La primera hace referencia a la métrica desarrollada para el flujo directo, mientras la segunda para el inverso.

Tabla 16: Cálculo de indicador de robustez en flujo directo - configuración sugerida.

Centro	f_{ij}	p_i	H_i	C_i	LL_i	α_i	R_i	δ_i	Norm δ_i	R_{TOTAL}
CH1	931	0,31	-0,1575	1144	0,81	1,23	0,1935	0,32	1,27	0,2463
CH3	1370	0,45	-0,1558	1658	0,83	1,21	0,1886	0,44	1,75	0,3301
CH4	619	0,20	-0,1410	1068	0,58	1,73	0,2432	0,20	0,80	0,1952
CH5	106	0,04	-0,0510	932	0,11	8,79	0,4483	0,04	0,17	0,0781
Total	**3026**		**-0,5053**				**1,0736**	**1,00**	**4**	**0,8496**

Tabla 17: Cálculo de indicador de robustez en flujo inverso - configuración sugerida.

Centro	f_{ij}	p_i	H_i	C_i	LL_i	α_i	R_i	δ_i	Norm δ_i	R_{TOTAL}
CH1	1	0,01	-0,0139	19,65	0,05	20,84	0,2891	0,00	0,03	0,0084
CH3	4	0,03	-0,0454	23,85	0,19	5,36	0,2434	0,06	0,42	0,1026
CH4	14	0,09	-0,0954	16,00	0,86	1,16	0,1108	0,08	0,55	0,0609
CH5	16	0,10	-0,1024	22,00	0,71	1,41	0,1444	0,00	0,00	0,00
CR1	31	0,21	-0,1424	42,50	0,74	1,35	0,1923	0,21	1,48	0,285
CR2	37	0,25	-0,1506	46,50	0,81	1,24	0,1869	0,26	1,85	0,3451
CR3	46	0,31	-0,1574	51,00	0,90	1,11	0,1750	0,38	2,67	0,4674
Total	**150**		**-0,7075**				**1,3419**	**1,00**	**7**	**1,2694**

Los resultados obtenidos permiten identificar que, al igual que el caso base, la red en sentido inverso presenta una entropía absoluta (H) mayor que en el sentido directo (0.7075 versus 0.5053), situación que se repite al analizar la robustez (R_{TOTAL}): 1.2694 versus 0.8496, en flujo inverso y directo, respectivamente. En la Figura 24 se compara el caso base y la configuración 15 en lo que a entropía, robustez (R_i) y robustez total (R_{TOTAL}) por cada flujo (directo e inverso) concierne:

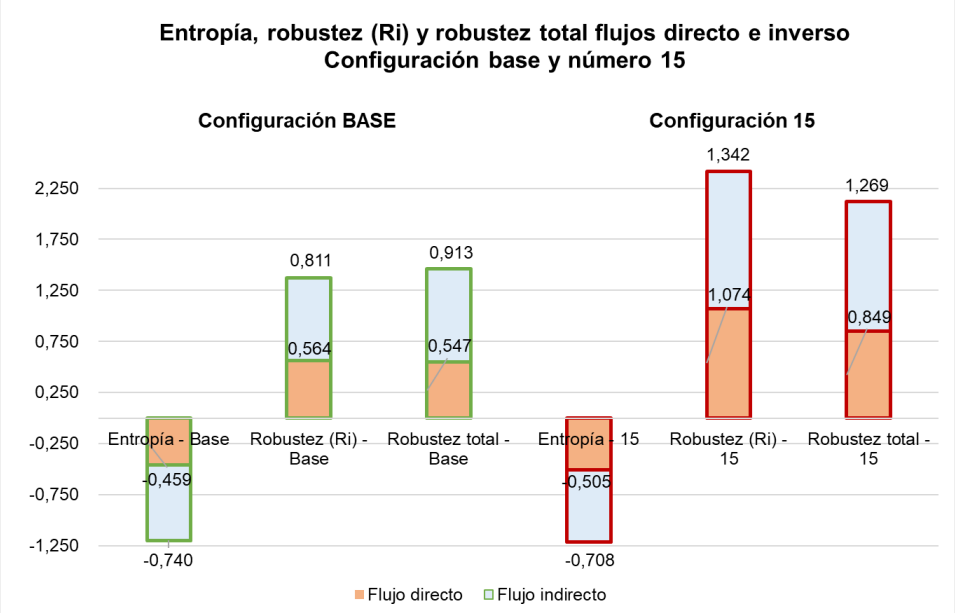

Figura 24: Comparación case base y configuración 15 en términos de entropía y robustez.

Como se puede observar, los parámetros calculados en la configuración base son menores a los de la número 15 (solo en la entropía conservan similitud), reflejando la variabilidad en el cambio de robustez en ambos flujos a la hora de compararlos; esto debido a que en la configuración # 15 se opera con una instalación adicional

(7 en total), se distribuyen mejor las cargas y aprovechan de mejor manera las instalaciones, lo que se traduce en mejor respaldo si surge determinada interrupción en el suministro desde alguno de estos: las instalaciones restantes podrán responder de mejor manera ante una eventual alteración en los envíos. Esta acción de abrir 1 centro adicional incrementa la entropía del sistema en el flujo directo, debido al crecimiento del "desorden" de la cadena de suministros. Caso contrario sucede en el sentido inverso en el cual disminuye si se compara la configuración 15 con el caso base (Figura 24), lo anterior debido a que, aunque se tiene una instalación adicional, el flujo proveniente por cada centro es menos homogéneo (p_i más variable, teniendo en varios casos un valor inferior a 10%).

De acuerdo con la Figura 25, al analizar la configuración 15 se detalla que, en el sentido directo, se cuenta solo con 4 instalaciones operando (p_i con mayor dispersión), mientras que en el inverso con 7 centros (p_i con menor dispersión). Si de las 4 se cierra alguna, la empresa se vería en más problemas para sostener su nivel de servicio al cliente, que si de las 7 colapsa alguna. Se observa, de igual manera, que las instalaciones de menor ocupación generan una entropía más baja, esto debido a que no representan suficiente "desorden" y, por lo tanto, un riesgo para el sistema; es decir, dejar inoperativos estos centros no impactará de manera representativa la robustez de la red.

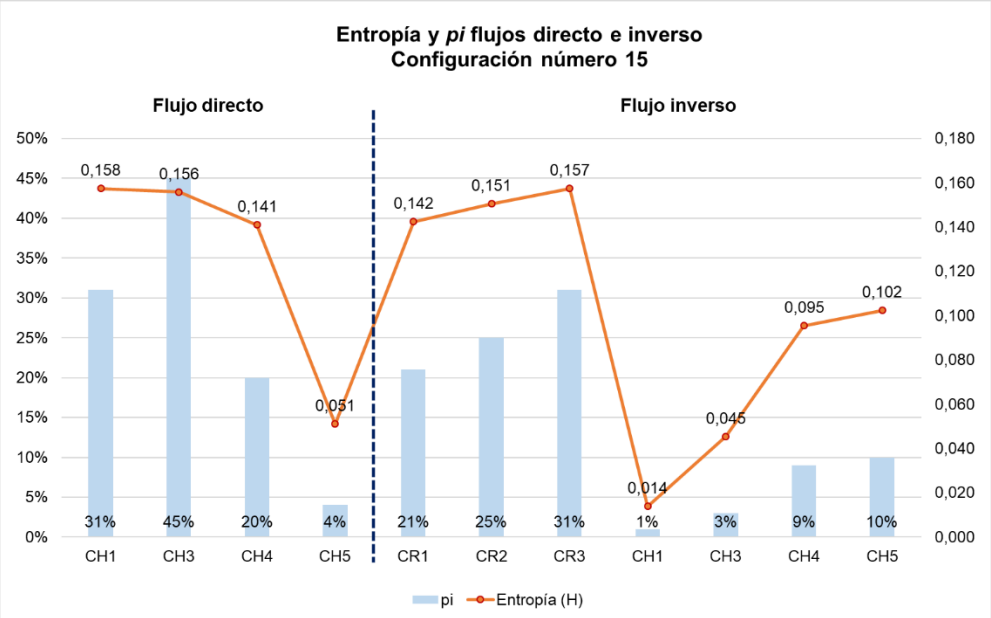

Figura 25: Entropía y flujo pi por centro - configuración 15.

Algo similar sucede si se analiza la capacidad utilizada (LL_i) de las instalaciones abiertas: esta medida de desempeño tiene alto impacto en la robustez tanto en el flujo inverso como en el directo, sin embargo, la proporción de crecimiento es ligeramente mayor en este último. Continuando con la Figura 24, se puede detallar así que en el primer caso se pasa de una entropía absoluta (H) de 0.7075 a una

robustez (R_i) de 1.3419, es decir, una variación de 0.6344 (89.7%), mientras que en el segundo se logra un cambio de entropía absoluta (H) de 0.5053 a una robustez (R_i) de 1.0736, es decir, un crecimiento de 0.5683 (112.5%). Dicha situación obedece a que la capacidad disponible de las instalaciones (Tabla 15) tanto en el flujo directo (42%) como en el inverso (39%) son altas, razón por la cual se potencializa el parámetro de robustez, casi duplicándose. Lo anterior se presenta debido a que, ante alguna desconexión o cierre de centros, con la capacidad disponible de las instalaciones restantes es más fácil asumir trabajo adicional. Dicho en otras palabras: un sistema con el 100% de capacidad ocupada no tendrá disponibilidad de reaccionar ante algún cierre abrupto de determinada instalación (entre más cercano a 1 sea el valor de α_i, menor será la robustez del sistema, ya que significa que los centros operan a su máxima capacidad).

Según la Figura 26, cabe destacar que los centros híbridos 1 y 3 son los que mayor ocupación presentan (mayor al 80%) en el flujo directo, situación que se ve reflejada en un menor aporte a la robustez del sistema, contrario a lo que sucede con el 4 y 5, que, al tener un indicador de capacidad ocupada menor, potencializan en mayor medida la robustez total. Al detallar el flujo inverso, se observa que los 3 centros de recolección tienen una ocupación alta (mayor al 70%), por lo que no aportan significativamente a la robustez, mientras que los híbridos 1 y 3, que son muy utilizados en el flujo directo, en el inverso ya no lo son tanto, por lo que son destinados a absorber posibles variaciones o perturbaciones en el sistema (ocupación del 5% y 19%, respectivamente). En otras palabras, cuando existe un porcentaje alto de utilización de la instalación, el *gap* entre la entropía y la robustez (R_i) es más bajo, mientras que si la tasa de ocupación es baja, el *gap* aumenta.

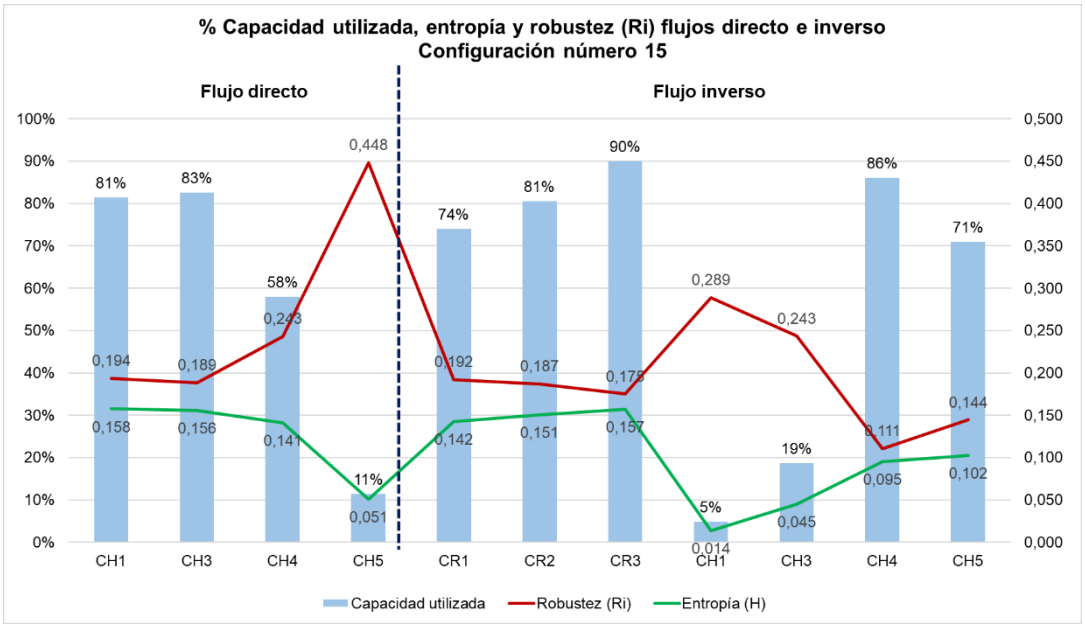

Figura 26: % capacidad utilizada, entropía y robustez (Ri) por centro - configuración 15.

La importancia de cada instalación también juega un papel fundamental para ambos flujos: al remitirse a la Figura 24 se observa que en el directo existe una disminución en la robustez (R_{TOTAL}) al pasar de 1.0736 a 0.8496, mientras que en el inverso de 1.3419 a 1.2694. Ampliando de acuerdo a la Figura 27**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, en el primer caso la situación se presenta debido a que los centros híbridos con menor robustez (R_i) (1 y 3) son los que mayor importancia tienen (δ_i) (32% y 44%, respectivamente), por encima del 5 (4%), el cual tiene a su vez la mayor robustez (R_i). Este "desbalance" en la relación entre robustez e importancia nodal ocasiona que el parámetro decaiga ligeramente en esta última instalación, algo que también sucede en el flujo inverso, ya que aquellos centros con mayor robustez (R_i) (los híbridos 1 y 3) tienen una importancia menor (δ_i) dentro de la cadena (0% y 6%, respectivamente), lo que disminuye el parámetro final. En otras palabras, cuando existe un porcentaje alto de importancia de la instalación, al igual que del valor de robustez R_i, la robustez total incrementa en mayor proporción; caso contrario sucede con una instalación con mucha importancia y un parámetro de robustez R_i bajo, el cual afectará la robustez total, y aunque crecerá, este aumento será más pequeño.

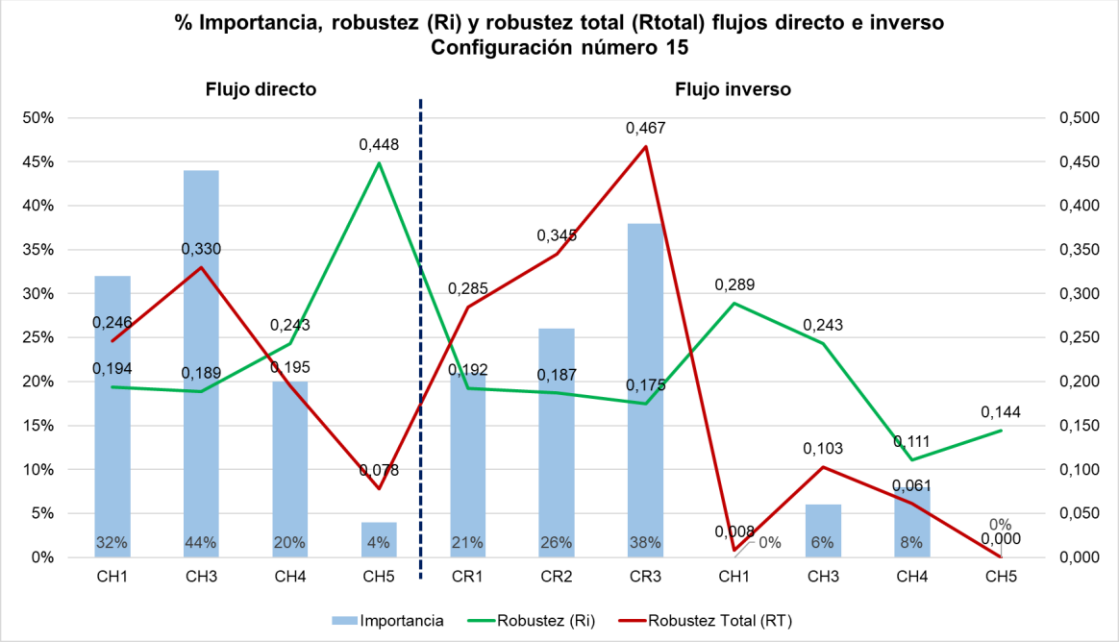

Figura 27: % importancia, robustez (Ri) y total (Rtotal) por centro - configuración

En este punto cabe destacar también la diferencia que existe entre las importancias de las instalaciones: en el flujo directo esta se distribuye más uniformemente, puesto que todos los centros tienen un aporte representativo al margen de la compañía, es decir, en cada uno se manejan desde el producto que menos rentabilidad aporta (el número 1) hasta el de mayor (el número 3). La única excepción es el centro híbrido 5, que debido a su baja utilización (solo se activa en momentos de altas demandas o altos retornos), presenta la más baja importancia, lo que impacta negativamente

el parámetro de robustez final. Por su parte, en el flujo inverso la situación es más notoria: los centros de recolección tienen una importancia mucho más grande que los híbridos (85% versus 15%), conservando la tendencia dominante que también se visualizó en el caso base. De igual manera, resulta pertinente poner en evidencia que algunas instalaciones, como el centro híbrido 1, que posee la robustez (R_i) más alta (0.2891), tiene menos del 1% de importancia, esto debido a que es una instalación que se utiliza más para el flujo directo que inverso; o el de recolección 2, que tiene una robustez (R_i) de 0.1869 y a su vez la segunda mayor importancia (26%). En otras palabras: los centros híbridos se aprovechan más en el sentido directo que en el inverso, en este último, se destinan más a movilizar material que va a los centros de disposición que a recuperar, ya que los que verdaderamente agregan valor, extendiendo el ciclo de vida del material, son los de recolección, producto de su competitividad en materia de costos.

De acuerdo con todo lo anterior, se pueden identificar 4 grupos de centros, siendo las 2 últimas clases las más recomendadas tener:

- Instalaciones que movilizan alta cantidad de material (sin capacidad ociosa) que no agrega mucho valor a la compañía: centro híbrido 5 en el flujo inverso, por ejemplo.

- Instalaciones que movilizan poca cantidad de material (con capacidad ociosa) que no agrega mucho valor a la compañía: centro híbrido 1 en el flujo inverso, por ejemplo.

- Instalaciones que movilizan alta cantidad de material (sin capacidad ociosa) que si agrega mucho valor a la compañía: centros híbridos 1 y 3 en el flujo directo o centros de recolección 1 y 2 en el flujo inverso, por ejemplo.

- Instalaciones que movilizan poca cantidad de material (con capacidad ociosa) que si agrega mucho valor a la compañía: no existe un centro con estas características en esta configuración.

Bajo esta premisa, si se desea optimizar la robustez del sistema, se debe propiciar 2 acciones: 1) no copar ni operar al máximo los centros, pues se pone a la cadena en una posición desventajosa al depender altamente de estos o se deja poca capacidad disponible para asumir trabajo adicional (si otro centro es cerrado), y 2) convertirlos en instalaciones que consoliden la mayor proporción de material movilizado dentro de la red, ya sea de cara al cliente con producto terminado o hacia las plantas productoras con estibas de madera y big bags a recuperar, es decir, que sean instalaciones que agreguen valor. Es válido destacar, además, que el cierre de una instalación con mayor R_{TOTAL}, como el caso del centro híbrido 3 o el de recolección 3, perjudicaría en mayor proporción la cadena de suministros que si cerraran centros como el híbrido 5 que tiene un indicador menor.

7. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se pudo integrar en un mismo problema, un sistema, en el que se realizan todas las actividades claves de un proceso recuperador exitoso (control de acceso, recolección, clasificación y tratamiento), con un modelo de programación lineal entera mixta dotado de características multiperíodo, estocasticidad en la demanda y en la tasa de retorno, así como optimización de la red, minimizando los costos, e instalaciones que funcionan en ambos flujos (centros híbridos).

Al evaluar los resultados obtenidos, se observa que entre más lejos esté ubicado un cliente más restrictivo resultará satisfacer sus necesidades, dado que los costos (principalmente los de transporte) son más altos que los de los demás, por lo que no serán prioridad en la solución obtenida y se incurre en demanda no servida. El modelo permite al tomador de la decisión cuestionarse si debe reevaluar su estrategia de venta negociando con algunos clientes aspectos como quién asume los costos o como impacta lo menos posible el nivel de servicio. Si se recurre a autores como C. Vidal [115], quienes establecen un fill rate aceptable de mínimo el 95%, es claro que en productos con un indicador inferior a este se debe enfocar el esfuerzo para que su venta sea más eficiente.

Analizando la configuración base y propuesta, se evidencia que los híbridos fueron utilizados en una proporción menor, debido a que se utilizaron en primera instancia los centros de recolección. Lo anterior debido a que por uno de estos últimos resulta más económico recuperar el material: si se realiza en un centro híbrido el ahorro es de más del 70%, mientras que si es en uno de recolección esta proporción es superior al 80% en el caso de big bags y de casi el 30% versus el 40% para estibas de madera, respectivamente. Claro está, el ahorro depende de los parámetros sugeridos por los autores, por lo que se recomienda que, para determinada aplicación, estos sean validados y actualizados de manera tal que, con la estructura del modelo propuesto en este documento, se tomen las mejores decisiones.

Al considerar las cantidades que retornan y logran ser reparadas para continuar en la operación, la compra de big bags se redujo en un 70% y de estibas de madera en casi un 60%; dicha proporción representa un ahorro de 20% en los costos totales de operación de la red. De igual manera, si se profundiza en los costos logísticos se evidencia que la mayor cantidad de dinero que la empresa debe asumir se encuentra en el flujo directo con respecto al inverso (97% versus 3%).

En el presente proyecto se logró adaptar exitosamente la metodología de robustez utilizada para la evaluación de sistemas eléctricos, ahora en cadenas de suministro e involucrando dos tipos de flujos: directo e inverso. La similitud de conceptos en ambos campos permitió elaborar una métrica para la evaluación de robustez en las redes de logística: medición de entropía, porcentaje de capacidad ocupada e importancia de los nodos –asignando diversos criterios-; el parámetro evalúa la

situación actual de la red frente a posibles perturbaciones que se presenten en algunas instalaciones próximas a abrir.

Al analizar la estocasticidad del sistema se pudieron evidenciar distintas configuraciones posibles de la red: uno de ellos presentó más de la mitad de probabilidad de ocurrencia, uno la mayor robustez en el flujo directo, otro en el inverso, y finalmente, otro el mayor parámetro promedio en ambos sentidos. Establecer el más favorable será una decisión que implique el análisis de diversos aspectos: hacia dónde va la empresa, cuál es el flujo que desea potencializar, etc. Debido a la naturaleza del presente proyecto de investigación se seleccionó el que mayor robustez ofrecía en ambos flujos, esto debido al potencial que brinda a la empresa de absorber más fácilmente las perturbaciones que se puedan presentar. Esta configuración, la 15, poseía además un costo muy bajo con respecto a las demás opciones.

Tanto en el caso base como en los distintos escenarios generados, la entropía fue mayor en el flujo inverso con respecto al directo. Lo anterior debido a que en el primero operaron una mayor cantidad de instalaciones (centros híbridos y de recolección) que en el segundo, lo que se traduce en mejor respaldo si surge interrupción del flujo desde alguna de estas: las instalaciones restantes podrían responder de mejor manera ante un eventual corto en el suministro. Se evalúa así, hasta cuando resulta conveniente tener un mayor número de instalaciones abiertas, que incrementen la robustez del sistema, para poder cubrir rupturas en la red.

Existe una relación directamente proporcional entre la capacidad disponible de las instalaciones y la robustez del sistema. En la presente investigación la proporción de capacidad disponible de los híbridos en el flujo directo fue mayor a la existente en el inverso, lo que pone en evidencia que, ante algún cierre de centros, con la capacidad disponible de los primeros sería más fácil asumir trabajo adicional que los segundos (entre más cercano a 1 sea el valor de α, menor será la robustez del sistema, ya que significa que los centros operan a su máxima capacidad).

Si existe un “desbalance” en la relación entre robustez e importancia nodal, el parámetro de R_i decae ligeramente, pero si se da un escenario donde los centros con mayor robustez (R_i) tienen a su vez la mayor importancia (δ_i) dentro de la cadena, entonces se potencializa el parámetro final. Asignando un criterio de importancia para cada tipo de flujo - en el directo la utilidad obtenida y en el inverso los ahorros generados -, en este trabajo se identificó la diferencia existente entre las importancias de las instalaciones: en el flujo directo esta se distribuyó más uniformemente, ya que todos los centros realizaron un aporte representativo al margen de la compañía, mientras que en el flujo inverso la situación estuvo más sesgada, puesto que los centros de recolección tuvieron una importancia mucho más grande que los híbridos, esto debido a que en los primeros se priorizaron las actividades de recuperación y, por tanto, fueron los que aportaron mayor cantidad de ahorros.

8. RECOMENDACIONES

- Tradicionalmente los problemas de diseño de redes se enfocan en un sólo objetivo, por lo general minimizar los costos o maximizar las ganancias. Sin embargo, las soluciones obtenidas al considerar múltiples objetivos representan una herramienta robusta para apoyar el proceso de toma de decisiones; entre los objetivos a considerar a futuro se pueden destacar: maximización del nivel de servicio, minimización de los desperdicios o no conformes, minimización del impacto ambiental, maximización de robustez, minimización del riesgo, maximización del valor presente neto, entre otros.

- Al hablar de procesos reversivos un factor a tener en cuenta es la incertidumbre, principalmente cuando se habla de la cantidad y calidad de los productos que retornan; por esta razón, se recomienda seguirla teniendo en cuenta en parámetros adicionales para futuras investigaciones – datos basados en históricos, sin obviar su respectiva distribución - tales como: proporción del estado en el que retorna el material a recuperar, tiempos de entrega y reparación, ampliaciones de capacidad, entre otros.

- Dado que el material que retorna puede ser utilizado varias veces, se sugiere rastrear la cantidad de vueltas que permanece este en el proceso, así como aquel que va siendo desechado, con el propósito de mantener mejor control sobre el inventario y conocer a ciencia cierta su disponibilidad y ciclo de vida.

- Para determinar el impacto económico que tiene la implementación del proceso de logística inversa, se aconseja evaluar la factibilidad de la red, incluyendo el tiempo que tomará recuperar la inversión realizada.

- Con el objetivo de ampliar el alcance de la nueva métrica de robustez, se sugiere incluir más aspectos para el cálculo de esta; por ejemplo, una ponderación de nuevas características que permitan determinar la importancia de las instalaciones abiertas: nivel de servicio y cobertura a clientes, ocupación del personal, entre otros, o el análisis de la resiliencia de la cadena de suministros.

- Debido a que la métrica de robustez es universal y aplicable en cualquier punto de la cadena de suministro, se sugiere integrar este parámetro con nuevos cálculos realizados a lo largo de los distintos eslabones; este proceso, en conjunto con nuevas decisiones estratégicas, tales como: negociaciones con nuevos proveedores, ampliaciones de capacidades de producción y almacenamiento o apertura de nuevas plantas productoras, permitirá a la compañía contar con una herramienta que le permita evaluar satisfactoriamente su situación actual, de cara a satisfacer las necesidades del cliente de la manera más rentable posible.

BIBLIOGRAFÍA

[1] R. Ballou, *Logística: Administración de la cadena de suministro*. 2004. doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.

[2] V. D. R. Guide and L. N. van Wassenhove, “The evolution of closed-loop supply chain research,” *Operations Research*, vol. 57, no. 1, pp. 10–18, 2009, doi: 10.1287/opre.1080.0628.

[3] C. M. Charles W. Lamb, Joseph F. Hair, *Marketing*, 6th ed. 2002.

[4] CLM, “Council of Supply Chain Management Professionals,” 1985. http://www.clm1.org/sites/default/files/user_uploads/resources/downloads/glossary-2013.pdf

[5] A. Durmaz, H. Demir, and B. Sezen, “The role of negative entropy within supply chain sustainability,” *Sustainable Production and Consumption*, vol. 28, pp. 218–230, 2021, doi: 10.1016/j.spc.2021.04.014.

[6] J. J. Bravo, J. P. Orejuela, and Z. Menduiña, “Aproximación a la medición del impacto del Backorder en sistemas de manufactura flexible,” *Revista Facultad de Ingenieria*, no. 65, pp. 99–111, 2012.

[7] R. S. Rogers, D.S.; Tibben-Lembke, “An overview of reverse logistics practices,” *Journal of Business Logistics 22*, pp. 129–149, 2001.

[8] J. L. Ruiz, J.A.; Gaitán, J.; Morato, *Logística Comercial*. 2020.

[9] A. Peris, “Slimstock,” 2013. http://www.slimstock.com/es/noticias/item/146-el-nivel-de-servicio-en-la-cadena-de-suministro-de-la-distribucion-farmaceutica

[10] L. Hitt; Michael, A.; Black, J.; Stewart; Porter; W., *Administración*. México, 2006.

[11] L. von Bertalanffy, *Teoría General de los Sistemas*. México, 1976.

[12] B. Macedo, “UNESCO,” *Oficina Regional de Educación para América Latina y el Caribe UNESCO Santiago*, 2005. http://unesdoc.unesco.org/images/0016/001621/162177S.pdf

[13] R. Borja, “Enciclopedia de la política.” http://www.enciclopediadelapolitica.org/Default.aspx?i=&por=v&idind=1552&termino

[14] M. E. Porter, *Competitive Advantage: Creating and Sustaining Superior Performance*. New York, 1985.

[15] A. Darmawan, H. Wong, and A. Thorstenson, “Supply chain network design with coordinated inventory control,” *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 145, no. 2, p. 102168, 2021, doi: 10.1016/j.tre.2020.102168.

[16] K. Govindan and H. Soleimani, “A review of reverse logistics and closed-loop supply chains: a Journal of Cleaner Production focus,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 142, pp. 371–384, 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.03.126.

[17] F. Schultmann, M. Zumkeller, and O. Rentz, “Modeling reverse logistic tasks within closed-loop supply chains: An example from the automotive industry,” *European Journal of Operational Research*, vol. 171, no. 3, pp. 1033–1050, 2006, doi: 10.1016/j.ejor.2005.01.016.

[18] R. G. Dondo and C. A. Méndez, “Operational planning of forward and reverse logistic activities on multi-echelon supply-chain networks,” *Computers and Chemical Engineering*, vol. 88, pp. 170–184, 2016, doi: 10.1016/j.compchemeng.2016.02.017.

[19] H. Baumgarten, C. Butz, A. Fritsch, and T. Sommer-Dittrich, “Supply chain management and reverse logistics-integration of reverse logistics processes into supply chain management approaches,” *IEEE International Symposium on Electronics and the Environment*, pp. 79–83, 2003, doi: 10.1109/isee.2003.1208051.

[20] S. Pazhani, A. Mendoza, R. Nambirajan, T. T. Narendran, K. Ganesh, and E. Olivares-Benitez, “Multi-period multi-product closed loop supply chain network design: A relaxation approach,” *Computers and Industrial Engineering*, vol. 155, no. July 2018, p. 107191, 2021, doi: 10.1016/j.cie.2021.107191.

[21] H. Prajapati, R. Kant, and R. Shankar, “Bequeath life to death: State-of-art review on reverse logistics,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 211, pp. 503–520, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.11.187.

[22] A. Mutha and S. Pokharel, “Strategic network design for reverse logistics and remanufacturing using new and old product modules,” *Computers and Industrial Engineering*, vol. 56, no. 1, pp. 334–346, 2009, doi: 10.1016/j.cie.2008.06.006.

[23] S. Ali, A. A. Maciejewski, H. J. Siegel, and J. K. Kim, “Measuring the robustness of a resource allocation,” *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 15, no. 7, pp. 630–641, 2004, doi: 10.1109/TPDS.2004.24.

[24] A. Polo, N. Peña, D. Muñoz, A. Cañón, and J. W. Escobar, “Robust design of a closed-loop supply chain under uncertainty conditions integrating financial criteria,” *Omega (United Kingdom)*, vol. 88, pp. 110–132, 2019, doi: 10.1016/j.omega.2018.09.003.

[25] Departamento Nacional de Planeación (DNP) - Dirección de Infraestructura y Energía Sostenible, *Encuesta nacional logística*. Bogotá D.C.: Zetta Comunicadores, 2020.

[26] B. Mundial, "Índice de desempeño logístico," 2018. https://datos.bancomundial.org/indicator/LP.LPI.OVRL.XQ?view=map

[27] K. Govindan, H. Soleimani, and D. Kannan, "Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future," *European Journal of Operational Research*, vol. 240, no. 3, pp. 603–626, 2015, doi: 10.1016/j.ejor.2014.07.012.

[28] "Base de datos SCOPUS©," 2021. https://www.scopus.com/home.uri

[29] G. Easwaran and H. Üster, "Tabu search and Benders decomposition approaches for a capacitated closed-loop supply chain network design problem," *Transportation Science*, vol. 43, no. 3, pp. 301–320, 2009, doi: 10.1287/trsc.1090.0267.

[30] D. S. Rogers and R. Tibben-lembke, "An examination of reverse logistics practices," *Journal of Business Logistics*, vol. 22, no. 2, pp. 129–148, 2001.

[31] R. Giuntini y T Andel, "Master the six R's of reverse logistics - Part 2," *Transportation and Distribution 36*, vol. 2, no. pags. 93-98, 1995.

[32] D. Rogers y R Tibben-Lembke, *Going Backwards: Reverse Logistics Trends and Practices*, Pittsburgh. 1999.

[33] J. Stock y D. Lambert, *Strategic Logistics Management 4th ed.* 2004.

[34] B. Schwartz, "Reverse logistics strengthens supply chains," *Transportation and Distribution*, vol. 36, p. pags. 95-100, 2000.

[35] N. Marcoux, D. Riopell, and A. Langevin, "Reverse logistics and electronic commerce," *5th International conference on engineering design and automation*, p. pags. 54-59, 2001.

[36] J. Stock, T. Speh, and H. Shear, "Managing product returns for competitive advantage," *MIT Sloan Management Review*, vol. 48, pp. 57–62, 2006.

[37] M. Thierry, M. Salomon, J. van Nunen, and L. van Wassenhove, "Strategic Issues in Product Recovery Management," *California Management Review*, vol. 37, no. 2, pp. 114–135, 1995, doi: 10.2307/41165792.

[38] L. A. Betancur, J. D. Guerra, N. A. Pérez, and E. A. Uribe, "Logística a la inversa en almacenes Éxito S.A. Conformación y transporte de las devoluciones desde el almacén," *Institución Universitaria Ceipa*, 2006.

[39] M. S. Pishvaee and J. Razmi, “Environmental supply chain network design using multi-objective fuzzy mathematical programming,” *Applied Mathematical Modelling*, vol. 36, no. 8, pp. 3433–3446, 2012, doi: 10.1016/j.apm.2011.10.007.

[40] S. R. Cardoso, A. P. F. D. Barbosa-Póvoa, and S. Relvas, “Design and planning of supply chains with integration of reverse logistics activities under demand uncertainty,” *European Journal of Operational Research*, vol. 226, no. 3, pp. 436–451, 2013, doi: 10.1016/j.ejor.2012.11.035.

[41] M. S. Pishvaee, S. A. Torabi, and J. Razmi, “Credibility-based fuzzy mathematical programming model for green logistics design under uncertainty,” *Computers and Industrial Engineering*, vol. 62, no. 2, pp. 624–632, 2012, doi: 10.1016/j.cie.2011.11.028.

[42] M. Ramezani, M. Bashiri, and R. Tavakkoli-Moghaddam, “A new multi-objective stochastic model for a forward/reverse logistic network design with responsiveness and quality level,” *Applied Mathematical Modelling*, vol. 37, no. 1–2. pp. 328–344, 2013. doi: 10.1016/j.apm.2012.02.032.

[43] C. Serrano, W. Aggoune-Mtalaa, and N. Sauer, “Dynamic models for green logistic networks design,” *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 46, no. 9, pp. 736–741, 2013, doi: 10.3182/20130619-3-RU-3018.00101.

[44] H. Soleimani, M. Seyyed-Esfahani, and M. A. Shirazi, “A new multi-criteria scenario-based solution approach for stochastic forward/reverse supply chain network design,” *Annals of Operations Research*, vol. 242, no. 2, pp. 399–421, 2016, doi: 10.1007/s10479-013-1435-z.

[45] B. Ayvaz, B. Bolat, and N. Aydin, “Stochastic reverse logistics network design for waste of electrical and electronic equipment,” *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 104, pp. 391–404, 2015, doi: 10.1016/j.resconrec.2015.07.006.

[46] W. Chen, B. Kucukyazici, V. Verter, and M. Jesús Sáenz, “Supply chain design for unlocking the value of remanufacturing under uncertainty,” *European Journal of Operational Research*, vol. 247, no. 3, pp. 804–819, 2015, doi: 10.1016/j.ejor.2015.06.062.

[47] V. Simic, “A two-stage interval-stochastic programming model for planning end-of-life vehicles allocation under uncertainty,” *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 98, pp. 19–29, 2015, doi: 10.1016/j.resconrec.2015.03.005.

[48] H. Yu and W. D. Solvang, “A general reverse logistics network design model for product reuse and recycling with environmental considerations,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 87, no. 9–12, pp. 2693–2711, 2016, doi: 10.1007/s00170-016-8612-6.

[49] K. Shaw, M. Irfan, R. Shankar, and S. S. Yadav, “Low carbon chance constrained supply chain network design problem: a Benders decomposition based approach,” *Computers and Industrial Engineering*, vol. 98, pp. 483–497, 2016, doi: 10.1016/j.cie.2016.06.011.

[50] S. H. Amin and F. Baki, “A facility location model for global closed-loop supply chain network design,” *Applied Mathematical Modelling*, vol. 41, pp. 316–330, 2017, doi: 10.1016/j.apm.2016.08.030.

[51] M. Jeihoonian, M. Kazemi Zanjani, and M. Gendreau, “Closed-loop supply chain network design under uncertain quality status: Case of durable products,” *International Journal of Production Economics*, vol. 183, pp. 470–486, 2017, doi: 10.1016/j.ijpe.2016.07.023.

[52] N. Ndhaief, O. Bistorin, and N. Rezg, “A modelling approach for city locating logistic platforms based on combined forward and reverse flows,” vol. 50, no. 1, pp. 11701–11706, 2017, doi: 10.1016/j.ifacol.2017.08.1691.

[53] A. Pedram, P. Pedram, N. bin Yusoff, and S. Sorooshian, “Development of closed-loop supply chain network in terms of corporate social responsibility,” *PLoS ONE*, vol. 12, no. 4, pp. 1–20, 2017, doi: 10.1371/journal.pone.0174951.

[54] M. Feitó-Cespón, W. Sarache, F. Piedra-Jimenez, and R. Cespón-Castro, “Redesign of a sustainable reverse supply chain under uncertainty: A case study,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 151, pp. 206–217, 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.03.057.

[55] E. Masoudipour, H. Amirian, and R. Sahraeian, “A novel closed-loop supply chain based on the quality of returned products,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 151, pp. 344–355, 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.03.067.

[56] H. Ma and X. Li, “Closed-loop supply chain network design for hazardous products with uncertain demands and returns,” *Applied Soft Computing Journal*, vol. 68, pp. 889–899, 2018, doi: 10.1016/j.asoc.2017.10.027.

[57] E. Pourjavad and R. v. Mayorga, “An optimization model for network design of a closed-loop supply chain: a study for a glass manufacturing industry,” *International Journal of Management Science and Engineering Management*, vol. 14, no. 3, pp. 169–179, 2019, doi: 10.1080/17509653.2018.1512387.

[58] X. Wang, M. Zhao, and H. He, “Reverse Logistic Network Optimization Research for Sharing Bikes,” *Procedia Computer Science*, vol. 126, pp. 1693–1703, 2018, doi: 10.1016/j.procS.2018.08.108.

[59] J. Trochu, A. Chaabane, and M. Ouhimmou, “Reverse logistics network redesign under uncertainty for wood waste in the CRD industry,” *Resources,*

Conservation and Recycling, vol. 128, no. July 2017, pp. 32–47, 2018, doi: 10.1016/j.resconrec.2017.09.011.

[60] A. O. Kuşakcı, B. Ayvaz, E. Cin, and N. Aydın, “Optimization of reverse logistics network of End of Life Vehicles under fuzzy supply: A case study for Istanbul Metropolitan Area,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 215, pp. 1036–1051, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.01.090.

[61] N. Safdar, R. Khalid, W. Ahmed, and M. Imran, “Reverse logistics network design of e-waste management under the triple bottom line approach,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 272, p. 122662, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122662.

[62] V. Azizi, G. Hu, and M. Mokari, “A two-stage stochastic programming model for multi-period reverse logistics network design with lot-sizing,” *Computers and Industrial Engineering*, vol. 143, no. September 2019, p. 106397, 2020, doi: 10.1016/j.cie.2020.106397.

[63] X. Gao and C. Cao, “A novel multi-objective scenario-based optimization model for sustainable reverse logistics supply chain network redesign considering facility reconstruction,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 270. 2020. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122405.

[64] C. Yang and J. Chen, “Robust design for a multiechelon regional construction and demolition waste reverse logistics network based on decision Maker’s conservative attitude,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 273, no. 09596526, 2020.

[65] S. Cao, W. Liao, and Y. Huang, “Heterogeneous fleet recyclables collection routing optimization in a two-echelon collaborative reverse logistics network from circular economic and environmental perspective,” *Science of the Total Environment*, vol. 758, p. 144062, 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144062.

[66] S. Shahparvari, H. Soleimani, K. Govindan, B. Bodaghi, M. T. Fard, and H. Jafari, “Closing the Loop: Redesigning Sustainable Reverse Logistics Network in Uncertain Supply Chains,” *Computers & Industrial Engineering*, p. 107093, 2021, doi: 10.1016/j.cie.2020.107093.

[67] M. Fleischmann, P. Beullens, J. M. Bloemhof-Ruwaard, and L. N. van Wassenhove, “The impact of product recovery on logistics network design,” *Production and Operations Management*, vol. 10, no. 2, pp. 156–173, 2001, doi: 10.1111/j.1937-5956.2001.tb00076.x.

[68] S. Sven Verstrepen, F. Cruijssen, and W. Dullaert, “An exploratory analysis of reverse logistics in Flanders,” *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, vol. 4, no. 4, pp. 301–316, 2007, doi: 10.18757/ejtir.2007.7.4.3401.

[69] S. Alumur and B. Y. Kara, “A new model for the hazardous waste location-routing problem,” *Computers and Operations Research*, vol. 34, no. 03050548, pp. 1406–1423, 2007.

[70] J. Monostori, “Supply chains robustness: Challenges and opportunities,” *Procedia CIRP*, vol. 67, pp. 110–115, 2018, doi: 10.1016/j.procir.2017.12.185.

[71] B. Eslamnour and S. Ali, “A measure of robustness against multiple kinds of perturbations,” *Proceedings - 19th IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium, IPDPS*, 2005, doi: 10.1109/IPDPS.2005.43.

[72] B. Eslamnour and S. Ali, “Measuring robustness of computing systems,” *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 17, no. 9, pp. 1457–1467, 2009, doi: 10.1016/j.simpat.2009.06.004.

[73] A. Polo, D. Muñoz, A. Cañon, and J. W. Escobar, “Methodology for robustness analysis to supply chain disruptions,” *International Journal of Logistics Systems and Management*, vol. 36, no. 4, pp. 547–588, 2020, doi: 10.1504/IJLSM.2020.108952.

[74] J. M. Cope, N. Trebon, H. M. Tufo, and P. Beckman, “Robust data placement in urgent computing environments,” *IPDPS 2009 - Proceedings of the 2009 IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium*, 2009, doi: 10.1109/IPDPS.2009.5160914.

[75] J. Smith, H. J. Siegel, and A. A. Maciejewski, “A stochastic model for robust resource allocation in heterogeneous parallel and distributed computing systems,” *IPDPS Miami 2008 - Proceedings of the 22nd IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium, Program and CD-ROM*, 2008, doi: 10.1109/IPDPS.2008.4536431.

[76] S. U. Khan, A. A. Maciejewski, and H. J. Siegel, “Robust CDN replica placement techniques,” *IPDPS 2009 - Proceedings of the 2009 IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium*, 2009, doi: 10.1109/IPDPS.2009.5160908.

[77] P. Sugavanam *et al.*, “Robust static allocation of resources for independent tasks under makespan and dollar cost constraints,” *Journal of Parallel and Distributed Computing*, vol. 67, no. 4, pp. 400–416, 2007, doi: 10.1016/j.jpdc.2005.12.006.

[78] P. v. Sugavanam *et al.*, “Processor allocation for tasks that is robust against errors in computation time estimates,” *Proceedings - 19th IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium, IPDPS 2005*, vol. 2005, pp. 1–15, 2005, doi: 10.1109/IPDPS.2005.362.

[79] L. D. F. Costa, F. A. Rodrigues, G. Travieso, and P. R. V. Boas, “Characterization of complex networks: A survey of measurements,” *Advances in Physics*, vol. 56, no. 1, pp. 167–242, 2007, doi: 10.1080/00018730601170527.

[80] M. Rubinov and O. Sporns, “Complex network measures of brain connectivity: Uses and interpretations,” *Neuroimage*, vol. 52, no. 3, pp. 1059–1069, 2010, doi: 10.1016/j.neuroimage.2009.10.003.

[81] K. Zhao, A. Kumar, and J. Yen, “Achieving high robustness in supply distribution networks by rewiring,” *IEEE Transactions on Engineering Management*, vol. 58, no. 2, pp. 347–362, 2011, doi: 10.1109/TEM.2010.2095503.

[82] H. H. Chen and A. M. Lin, “Complex network characteristics and invulnerability simulating analysis of supply Chain,” *Journal of Networks*, vol. 7, no. 3, pp. 591–597, 2012, doi: 10.4304/jnw.7.3.591-597.

[83] S. M. Hatefi and F. Jolai, “Robust and reliable forward-reverse logistics network design under demand uncertainty and facility disruptions,” *Applied Mathematical Modelling*, vol. 38, no. 9–10, pp. 2630–2647, 2014, doi: 10.1016/j.apm.2013.11.002.

[84] S. Perera, M. G. H. Bell, and M. C. J. Bliemer, “Network science approach to modelling the topology and robustness of supply chain networks: a review and perspective,” *Applied Network Science*, vol. 2, no. 1, 2017, doi: 10.1007/s41109-017-0053-0.

[85] C. Science, “Robustness of Complex Supply Chain Networks to Targeted Attacks María Ximena Rueda Guerrero,” 2018.

[86] K. Zhao, K. Scheibe, J. Blackhurst, and A. Kumar, “Supply Chain Network Robustness Against Disruptions: Topological Analysis, Measurement, and Optimization,” *IEEE Transactions on Engineering Management*, vol. 66, no. 1, pp. 127–139, 2019, doi: 10.1109/TEM.2018.2808331.

[87] J. Auerbach and H. Kim, “Measuring Robustness and Coverage of Transportation Networks with Multiple Routes and Hubs,” *Ann Am Assoc Geogr*, vol. 0, no. 0, pp. 1–20, 2021, doi: 10.1080/24694452.2021.2000357.

[88] J. Liu, M. Zhou, S. Wang, and P. Liu, “A comparative study of network robustness measures,” *Frontiers of Computer Science*, vol. 11, no. 4, pp. 568–584, 2017, doi: 10.1007/s11704-016-6108-z.

[89] H. Frank and I. T. Frisch, “Analysis and Design of Survivable Networks,” *IEEE Transactions on Communication Technology*, vol. 18, no. 5, pp. 501–519, 1970, doi: 10.1109/TCOM.1970.1090419.

[90] D. H. Smith, “Optimally reliable networks,” *Annals of Operations Research*, vol. 33, no. 2, pp. 107–112, 1991, doi: 10.1007/BF02073595.

[91] F. Harary, “Conditional connectivity,” *Networks*, vol. 13, no. 3, pp. 347–357, 1983, doi: 10.1002/net.3230130303.

[92] F. Boesch and T. Frisch, “On the smallest disconnecting set in a graph,” *IEEE Transactions on Circuit Theory*, vol. 3, p. pags. 286-288, 1968.

[93] V. Latora and M. Marchiori, “Efficient behavior of small-world networks,” *Physical Review Letters*, vol. 87, no. 19, pp. 198701-1-198701–4, 2001, doi: 10.1103/PhysRevLett.87.198701.

[94] M. Marchiori and V. Latora, “Harmony in the small-world,” *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 285, no. 3, pp. 539–546, 2000, doi: 10.1016/S0378-4371(00)00311-3.

[95] H. J. Herrmann, C. M. Schneider, A. A. Moreira, J. S. Andrade, and S. Havlin, “Onion-like network topology enhances robustness against malicious attacks,” *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, vol. 2011, no. 1, 2011, doi: 10.1088/1742-5468/2011/01/P01027.

[96] Y. Peng, J. Li, and W. He, “Estimating Robustness through Kirchhoff Index in Mesh Graphs,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 111822–111828, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3003318.

[97] M. Fiedler, “Algebraic connectivity of graphs,” *Czechoslovak Mathematical Journal*, vol. 98, pp. 408–426, 1973.

[98] J. Wu, M. Barahona, Y. J. Tan, and H. Z. Deng, “Spectral measure of structural robustness in complex networks,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part A: Systems and Humans*, vol. 41, pp. 1244–1252, 2011, doi: 10.1109/TSMCA.2011.2116117.

[99] C. M. Schneider, A. A. Moreira, J. S. Andrade, S. Havlin, and H. J. Herrmann, “Mitigation of malicious attacks on networks,” *Proc Natl Acad Sci U S A*, vol. 108, no. 10, pp. 3838–3841, 2011, doi: 10.1073/pnas.1009440108.

[100] A. Zeng and W. Liu, “Enhancing network robustness against malicious attacks,” *Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, vol. 85, no. 6, pp. 1–6, 2012, doi: 10.1103/PhysRevE.85.066130.

[101] V. H. P. Louzada, F. Daolio, H. J. Herrmann, and M. Tomassini, “Generating robust and efficient networks under targeted attacks,” *Intelligent Systems Reference Library*, vol. 85, pp. 215–224, 2015, doi: 10.1007/978-3-319-15916-4_9.

[102] E. Bompard, R. Napoli, and F. Xue, “Analysis of structural vulnerabilities in power transmission grids,” *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, vol. 2, no. 1–2, pp. 5–12, 2009, doi: 10.1016/j.ijcip.2009.02.002.

[103] Z. J. Bao, Y. J. Cao, G. Z. Wang, and L. J. Ding, “Analysis of cascading failure in electric grid based on power flow entropy,” *Physics Letters, Section A: General, Atomic and Solid State Physics*, vol. 373, no. 34, pp. 3032–3040, 2009, doi: 10.1016/j.physleta.2009.06.058.

[104] Y. Jiang, A. Q. Hu, and Y. B. Song, “The evaluation of complex networks’ robustness based on entropy measure,” *IET Conference Publications*, vol. 2014, no. CP653, 2014, doi: 10.1049/cp.2014.0726.

[105] Y. Koc, M. Warnier, R. E. Kooij, and F. M. T. Brazier, “A robustness metric for cascading failures by targeted attacks in power networks,” *2013 10th IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, ICNSC 2013*, pp. 48–53, 2013, doi: 10.1109/ICNSC.2013.6548709.

[106] Y. Koç, M. Warnier, R. E. Kooij, and F. M. T. Brazier, “An entropy-based metric to quantify the robustness of power grids against cascading failures,” *Safety Science*, vol. 59, pp. 126–134, 2013, doi: 10.1016/j.ssci.2013.05.006.

[107] L. L. Wang, J.W., Rong, “Cascade-based attack vulnerability on the us power grid,” *Safety Science*, vol. 47, pp. 1332–1336, 2009.

[108] S. Oh, K. Ryu, and M. Jung, “Framework for evaluating robustness of a supply network on the supply network risks,” *40th International Conference on Computers and Industrial Engineering: Soft Computing Techniques for Advanced Manufacturing and Service Systems, CIE40 2010*, 2010, doi: 10.1109/ICCIE.2010.5668275.

[109] K. Wang, Z. Zeng, and D. Sun, “Structure analysis of supply chain networks based on complex network theory,” *Proceedings of the 4th International Conference on Semantics, Knowledge, and Grid, SKG 2008*, pp. 493–494, 2008, doi: 10.1109/SKG.2008.71.

[110] L. Wen, L. Xu, and L. Wang, “Research on the robustness of the complex supply chain network,” *Proceedings - 2012 3rd International Conference on Digital Manufacturing and Automation, ICDMA 2012*, pp. 719–722, 2012, doi: 10.1109/ICDMA.2012.170.

[111] É. E. Plagányi *et al.*, “A quantitative metric to identify critical elements within seafood supply networks,” *PLoS ONE*, vol. 9, no. 3, 2014, doi: 10.1371/journal.pone.0091833.

[112] K. Zhao, A. Kumar, T. P. Harrison, and J. Yen, “Analyzing the resilience of complex supply network topologies against random and targeted disruptions,”

IEEE Systems Journal, vol. 5, no. 1, pp. 28–39, 2011, doi: 10.1109/JSYST.2010.2100192.

[113] W. Sun, Y. Li, and L. Shi, “The Performance Evaluation and Resilience Analysis of Supply Chain Based on Logistics Network,” *Chinese Control Conference, CCC*, vol. 2020-July, pp. 5772–5777, 2020, doi: 10.23919/CCC50068.2020.9189234.

[114] D. Liu, Y. Ren, and D. Yang, “A robustness optimization method of network based on load entropy,” *2017 2nd International Conference on Reliability Systems Engineering, ICRSE 2017*, no. Icrse, 2017, doi: 10.1109/ICRSE.2017.8030812.

[115] C. J. Vidal, *Fundamentos de control y gestión de inventarios*. Santiago de Cali: Programa Editorial Universidad del Valle, 2010.