



Universidad de la República
Facultad de Ingeniería

Proyecto de Grado – Ingeniería de Producción

RECUPERACIÓN DE PRODUCTOS USADOS
Y UNA APLICACIÓN EN LA INDUSTRIA
URUGUAYA

Autores:

CAROLINA DEVOTO
EMILIA FERNÁNDEZ

Tutor:

ING. PEDRO PIÑEYRO

Montevideo, Uruguay

Abril 2019

Agradecimientos

La realización de un proyecto de grado suele ser un largo recorrido donde se deben superar obstáculos continuamente. Afortunadamente, también resulta ser un camino de encuentro con personas que guían y animan a seguir. Para la realización de este proyecto han contribuido directa o indirectamente muchas personas, algunas de las cuales nos gustaría mencionar especialmente.

En primer lugar, agradecerle a nuestro tutor, Pedro Piñeyro, por su interés y dedicación en el proyecto, por habernos dado todas las herramientas necesarias y proporcionarnos sugerencias muy valiosas para la correcta realización del mismo. Su contribución ha permitido, de forma decisiva, que este proyecto llegara a buen término.

Nuestro agradecimiento a los integrantes de la empresa Rivomark, quienes estuvieron al servicio de nuestro proyecto y a todos aquellos dentro de la empresa que de una forma u otra han colaborado con nosotras en la recolección y análisis de datos. Un especial agradecimiento a Enzo Vidoni, administrador de Rivomark, quien ha estado a nuestra completa disposición evacuando nuestras dudas constantemente.

Gracias al Ing. Mauricio Ohanian e Ing. Marcos Fernández, quienes se interesaron en nuestro proyecto y se vieron dispuestos a brindarnos su apoyo y conocimiento en la búsqueda de información sobre la recuperabilidad de los calefones. También al Ing. Carlos Briozzo del MIEM, quien nos brindó información sumamente útil sobre el mercado de calefones en Uruguay.

Asimismo, agradecer a todas aquellas empresas que estuvieron disponibles para reunirse con nosotras y contestar nuestras comunicaciones; y pese a no formar parte de nuestro caso de estudio fueron de suma utilidad para el desarrollo del estado del arte y aportaron a nuestro conocimiento general en la temática de recuperación de productos usados en Uruguay.

A todos los profesores que tuvimos a lo largo de la carrera, que desde su lugar nos transmitieron sus experiencias y conocimientos, ayudándonos a crecer como estudiantes y futuras profesionales.

Por último, pero no menos importante, nos resta agradecerle profundamente a nuestra familia y amigos, por el apoyo incondicional en toda nuestra trayectoria estudiantil.

Resumen

En la actualidad la recuperación de productos usados es vista como una alternativa económicamente viable para el desarrollo sustentable de la industria. Este fenómeno surge como respuesta a los impactos negativos en el medioambiente debidos en gran medida a la generación masiva de residuos, consecuencia del modelo tradicional de producción de producir-usar-desechar. En Uruguay, al igual que en muchas partes del mundo, el estudio sobre la recuperación de productos usados viene en aumento tanto en el ámbito gubernamental, así como el industrial y el académico.

En este informe se presenta el trabajo realizado sobre la problemática de la recuperación de productos usados. Para ello, se realizó inicialmente un estudio de la normativa existente sobre recuperación de productos usados tanto a nivel internacional, como regional y local. Posteriormente se tomó como caso de estudio una empresa de la industria uruguaya, fabricante de calefones o más precisamente calentadores de agua eléctricos de acumulación (CAEs), con el fin de explorar la viabilidad económica de la recuperación de calefones usados y devueltos al origen. Para dicho estudio, se realizó un relevamiento y análisis de datos, para representar su sistema de producción actual mediante un modelo matemático de planificación de la producción sin retornos. A continuación, se estudiaron las opciones de recuperación de los CAEs, determinando la viabilidad de la remanufacturación y sugiriendo potenciales mejoras en el diseño actual de los mismos para facilitar su remanufacturación. Con el objetivo de obtener una planificación de la producción con remanufacturación de costo mínimo, se llevó a cabo la extensión del modelo matemático propuesto inicialmente para el sistema de producción actual sin retornos. Además de las actividades mencionadas anteriormente, se entendió necesario incluir al modelo una actividad de habilitación, a través de la cual se realiza la inspección y clasificación de los retornos en ciertos niveles de calidad predefinidos. Esta actividad representa el hecho de que en la realidad los retornos que arriban en un cierto momento son de calidad heterogénea y no se puede priorizar la recuperación solamente de los de mejor calidad.

De los resultados obtenidos de la resolución de los modelos propuestos, se pudieron verificar los beneficios económicos de considerar la recuperación de productos usados. Se realizó además un análisis de sensibilidad al modelo con opciones de retornos, para analizar el sistema bajo diferentes escenarios en ciertos parámetros. De este análisis, entre otros resultados, surge que en una solución de costo mínimo cada vez que se habilitan retornos en un período, también se realiza alguna operación de recuperación sobre los mismos, aunque probablemente en una menor proporción. Asimismo, se puede concluir que para mejorar los resultados obtenidos es fundamental cambiar el diseño con miras en la remanufacturación, incentivar el buen uso y mantenimiento de los CAEs por parte del usuario, así como promover la devolución de los productos al final de su vida útil.

Palabras claves: Planificación de la Producción, Programación Lineal Entera Mixta, Calentadores de Agua Eléctricos, Remanufacturación, Optimización.

Trabajos relacionados

El desarrollo de este proyecto de grado ha dado lugar a la presentación de un artículo completo en la conferencia "*International Conference on Remanufacturing*" (ICOR):

- Título del artículo: Analysis of a hybrid production-remanufacturing system with inspection and grading of returns
- Autores: Carolina Devoto, Emilia Fernández y Pedro Piñeyro
- Lugar de presentación: Amsterdam, Holanda, junio 23-25, 2019

Índice general

1	Introducción	10
2	Marco teórico	13
2.1.	Recuperación de productos usados	13
2.2.	Planificación de la producción	14
2.2.1.	Sistemas sin opciones de retorno	14
2.2.2.	Sistemas con opciones de retorno	16
2.3.	Calentadores de agua eléctricos de acumulación (CAEs).....	20
2.3.1.	Características, componentes y diseño	20
2.3.2.	Industria y mercado de CAEs en Uruguay	25
3	Caso de estudio.....	27
3.1.	Introducción	27
3.2.	Características de la empresa relevada	27
3.3.	Planificación de la producción sin opciones de retorno.....	30
3.3.1.	Modelo matemático	31
3.3.2.	Relevamiento y análisis de datos.....	34
3.3.3.	Validación del modelo.....	35
3.3.4.	Ejecución del modelo.....	35
3.3.5.	Interpretación de los resultados	43
3.4.	Análisis de recuperabilidad de CAEs	55
3.4.1.	Recomendaciones de diseño de CAEs.....	65
3.5.	Planificación de la producción con opciones de retorno.....	69
3.5.1.	Modelo matemático	71
3.5.2.	Relevamiento y análisis de datos.....	75
3.5.3.	Validación del modelo.....	76
3.5.4.	Ejecución del modelo.....	78
3.5.5.	Interpretación de los resultados: sin y con opciones de retornos	82
4	Análisis de sensibilidad.....	91
4.1.	Introducción	91
4.2.	Casos analizados	92
4.2.1.	Proporción de calidades de los retornos	93
4.2.2.	Cantidad de retornos	95
4.2.3.	Tiempo disponible en la línea de recuperación	98
4.2.4.	Costos fijos de preparación de remanufacturación	100
4.2.5.	Costo fijo de habilitación.....	101

4.2.6. Costos de mantener inventario de retornos	102
4.3. Combinación de casos y conclusiones	103
5 Conclusiones	106
Referencias	109
Anexo I: Estado del arte.....	114
Anexo II: Datos del caso de estudio.....	187
Anexo III: Validación de los modelos	208

Índice de Figuras

Figura 2.2-1: Flujo de los productos en el sistema con remanufacturación planteado por Teunter et al. (2006) [2]	17
Figura 2.3-1: Esquema del corte transversal de un CAE que muestra sus principales componentes [25]	21
Figura 2.3-2: Posibles ubicaciones de la resistencia en un CAE: (a) en la tapa inferior, (b) en la superficie cilíndrica o (c) en la tapa superior	22
Figura 2.3-3: Aislantes y sus respectivas conductividades térmicas [33].....	24
Figura 3.2-1 Representación esquemática del proceso productivo de los CAEs con tanques de cobre.	28
Figura 3.2-2: Representación esquemática del proceso productivo de los CAEs con tanque interior de acero.	29
Figura 3.3-1: Evolución de tiempos de ejecución insumidos para la obtención de soluciones óptimas para el modelo sin opciones de retorno	36
Figura 3.3-2: Capacidad de producción en minutos para los últimos dos meses del año, sin la restricción (24) de capacidad máxima de producción	38
Figura 3.3-3: Capacidad de producción en minutos para los últimos dos meses del año, sin las restricciones (33), (34) y (35) de producción de la planta.....	39
Figura 3.3-4: Evolución del gap de dualidad y del valor objetivo en 24 horas en la resolución del último subproblema de la heurística	40
Figura 3.3-5: Evolución del gap de dualidad y del valor objetivo en la resolución exacta del problema en 24 horas	42
Figura 3.3-6: Grafico de torta que representa la distribución de los costos incurridos con la planificación dada por la resolución heurística del problema	43
Figura 3.3-7: Cantidad de CAEs almacenados en el horizonte de planificación de un año, para la resolución heurística	44
Figura 3.3-8: Cantidad de materia prima ocupada (en m^2) en el horizonte de planificación de un año, para la resolución heurística	45
Figura 3.3-9: Capacidad de producción en minutos en el horizonte de planificación de un año, para la resolución heurística	45
Figura 3.3-10: Grafico de torta que representa la distribución de los costos incurridos con la planificación dada por la resolución exacta del problema	48
Figura 3.3-11: Cantidad de materia prima ocupada (en m^2) en el horizonte de planificación de un año, para la resolución exacta	48
Figura 3.3-12: Cantidad de CAEs almacenados en el horizonte de planificación de un año, para la resolución exacta	49
Figura 3.3-13: Cantidad de CAEs tipo TCP30L almacenados en el horizonte de planificación de un año y su inventario de seguridad a satisfacer. Las barras en color naranja representan el período en el que se produce y la cantidad	50
Figura 3.3-14: Capacidad de producción en minutos en el horizonte de planificación de un año, para la resolución exacta	51
Figura 3.4-1: Gráfica de Pareto de la materia prima y la cantidad requerida para la producción del CAE más grande de cobre, ponderada por costo	56
Figura 3.4-2: Gráfica de Pareto de la materia prima y la cantidad requerida para la producción del CAE más grande de acero, ponderada por costo	57
Figura 3.4-3 Extracción de la base metálica del CAE [45].....	58

Figura 3.4-4: (a) Resistencia y ánodo calcificados extraídos de un CAE con 5 años de uso (b) Resistencia descalcificada luego de realizarle la limpieza [45].....	59
Figura 3.4-5: Separación de la envolvente exterior del aislante de espuma de poliuretano expandido [46].....	60
Figura 3.4-6: (a) Desprendimiento del poliuretano del depósito de acumulación, para un CAE cuyo diseño no incluye film [48] y (b) para uno que si lo incluye [47]	61
Figura 3.4-7: (a) Tanque de acero tras haber desprendido todo el aislante [49] y (b) tanque de cobre tras haber desprendido todo el aislante [47]	62
Figura 3.4-8: Rutas de recuperación de los CAEs retornados.....	63
Figura 3.4-9: Ubicación normal del ánodo de sacrificio [50]	66
Figura 3.4-10: Proceso de calcificación [51].....	66
Figura 3.4-11: Colocación del ánodo de sacrificio separado de la resistencia [41].....	67
Figura 3.4-12: Doble sistema de protección anódica anticorrosión [42]	68
Figura 3.5-1: Flujo de productos en el sistema con opciones de retornos	70
Figura 3.5-2: Gráfico de torta que representa la distribución de los costos incurridos con la planificación dada para el mes de setiembre para el modelo sin opciones de retorno (no se incluye la gestión de compra).	83
Figura 3.5-3: Inventario de producto terminado para el problema sin opciones de retorno para el mes de setiembre	84
Figura 3.5-4: Capacidad de producción en minutos para el problema sin opciones de retorno para el mes de setiembre	84
Figura 3.5-5: Gráfico de torta que representa la distribución de los costos incurridos con la planificación dada para el mes de setiembre para el modelo con opciones de retorno	85
Figura 3.5-6: Inventario de productos retornados durante el mes de setiembre según los retornos estimados.....	86
Figura 3.5-7: Inventario de productos retornados y habilitados durante el mes de setiembre.....	86
Figura 3.5-8: Inventario de producto terminado el cual se obtiene de la producción y de la remanufacturación, durante el mes de setiembre.....	89
Figura 3.5-9: Capacidad de producción y de remanufacturación en minutos para el mes de setiembre	89
Figura 3.5-10: Gráfico de torta que representa el destino de los productos retornados en el horizonte de planificación.....	90
Figura 4.1-1: Evolución de tiempos de ejecución insumidos para la obtención de soluciones óptimas para el modelo con opciones de retorno	92
Figura 4.2-1: Cumplimiento de la demanda a partir de remanufacturación y producción para el análisis de la proporción de la calidad de los retornos; (a) corresponde al escenario favorable y (b) al desfavorable.....	95
Figura 4.2-2: Cumplimiento de la demanda a partir de productos remanufacturados conforme aumenta la media de los retornos (eje x)	97
Figura 4.2-3: Capacidad de producción y recuperación en minutos en el escenario favorable al aumentar el tiempo disponible de la línea de recuperación	99
Figura 4.2-4: Capacidad de producción y recuperación en minutos en el escenario desfavorable al aumentar el tiempo disponible de la línea de recuperación.....	99

Índice de Tablas

Tabla 3.3-1: Resolución del problema mediante método heurístico	41
Tabla 3.3-2: Resolución del problema mediante método exacto	42
Tabla 3.3-3: Diagrama de Gantt que muestra en qué período se producen los distintos modelos de CAE, para la resolución heurística.....	47
Tabla 3.3-4: Diagrama de Gantt que muestra en qué período se producen los distintos modelos de CAE, para la resolución exacta.....	52
Tabla 3.3-5: Diagrama de Gantt que muestra en qué período se pide cual materia prima para el mes de enero	53
Tabla 3.3-6: Comparación entre los métodos de resolución exacta y heurística. Para el caso de la resolución heurística se sumaron los valores objetivos y tiempos de cada subproblema.....	54
Tabla 3.5-1: Tamaños de los modelos sin y con opciones de retorno para 261 períodos	78
Tabla 3.5-2: Tamaños de los modelos sin y con opciones de retorno para el mes de setiembre (21 períodos).....	81
Tabla 3.5-3: Ejecución de las políticas en el modelo con opciones de retornos para el mes de setiembre	82
Tabla 3.5-4: Cantidad de retornos habilitados en el mes de setiembre	87
Tabla 4.2-1: Ejecución e indicadores de las distintas formulaciones para el escenario base.....	93
Tabla 4.2-2: Ejecución e indicadores de las distintas formulaciones para el escenario favorable de la proporción de las calidades de los retornos	94
Tabla 4.2-3: Ejecución e indicadores de las distintas formulaciones para el escenario desfavorable de la proporción de las calidades de los retornos	94
Tabla 4.2-4: Ejecución e indicadores de las distintas formulaciones del escenario favorable de la cantidad de retornos	96
Tabla 4.2-5: Ejecución e indicadores de las distintas formulaciones del escenario desfavorable de la cantidad de retornos	96
Tabla 4.2-6: Ejecución e indicadores de las distintas formulaciones del escenario favorable del tiempo disponible en la línea de recuperación	98
Tabla 4.2-7: Ejecución e indicadores de las distintas formulaciones del escenario desfavorable del tiempo disponible en la línea de recuperación	98
Tabla 4.2-8: Ejecución e indicadores de las distintas formulaciones del escenario desfavorable de los costos fijos de remanufacturación	100
Tabla 4.2-9: Ejecución e indicadores de las distintas formulaciones del escenario muy desfavorable de los costos fijos de remanufacturación	101
Tabla 4.2-10: Ejecución e indicadores de las distintas formulaciones del escenario desfavorable del costo fijo de habilitar retornos	101
Tabla 4.2-11: Ejecución e indicadores de las distintas formulaciones del escenario muy desfavorable del costo fijo de habilitar retornos	102
Tabla 4.2-12: Ejecución e indicadores de las distintas formulaciones del escenario favorable de los costos de inventario de producto retornado y habilitado.....	102
Tabla 4.3-1: Ejecución e indicadores de las distintas formulaciones para el escenario favorable combinado.....	104
Tabla 4.3-2: Ejecución e indicadores de las distintas formulaciones para el escenario desfavorable combinado.....	105

1 Introducción

La recuperación hace referencia al conjunto de actividades de reacondicionamiento de un producto usado y devuelto al origen o a un tercero, con el fin de satisfacer la demanda de ese producto o eventualmente otro. Suele ser una alternativa económicamente atractiva para las empresas, ya que trae asociada la reducción de materias primas, energía y mano de obra, generando por lo tanto un impacto positivo en el medio ambiente y también en los consumidores al poder obtener un producto eventualmente con las mismas prestaciones que uno nuevo, pero a menor precio [1] [2]. Existen distintas prácticas de recuperación de productos usados. El reciclaje es una de ellas y consiste en la recuperación del valor residual de las materias primas. Otras como el reúso, el reacondicionamiento y la remanufacturación, se enfocan en la recuperación del valor del producto y sus componentes, ahorrando recursos y energía [3] [4] [5]. Es importante destacar que el reciclaje se considera menos beneficioso desde el punto de vista medioambiental, ya que implica la destrucción de la estructura del producto para recapturar el valor del material, utilizando muchas veces procedimientos que tienen un impacto negativo en el medioambiente, como la emisión de CO₂ [1].

El primer objetivo de este proyecto consistió en realizar un relevamiento sobre la recuperación de productos usados tanto de la literatura, como de la realidad normativa e industrial, a nivel global y local. Como resultado del relevamiento se realizó un estado del arte (ver Anexo I) realizando un abordaje de cómo surgió la problemática ambiental de recuperación, su importancia y cuáles son sus características principales. Para ello, se consultaron diferentes artículos científicos y se contrastaron las realidades presentadas por los autores. Se constató en términos generales que existe una tendencia creciente en la cantidad de estudios realizados en esta temática, y por lo tanto un interés cada vez mayor por la relación entre los sistemas de producción y el medio ambiente. Según varios autores de la literatura relevada, para no comprometer los estándares de vida y salud de las personas se requieren mejoras sustanciales en las emisiones generadas y por esta razón los fabricantes encuentran necesario evaluar estrategias competitivas que incluyan la recuperación de productos usados [6] [7]. Se incluye también en el estado del arte lo relevado sobre el marco normativo internacional y nacional y la situación actual de las industrias uruguayas con relación a la utilización de prácticas de recuperación de productos usados. A partir de este relevamiento se desprende que, en Uruguay, como en el mundo, existen esfuerzos crecientes en el ámbito regulatorio y un interés en la industria y la academia en la temática. De todas formas, es importante destacar que actualmente la forma predominante de recuperación en Uruguay es el reciclaje debido a que la mayoría de los productos comercializados son importados, con lo cual no existe un proceso de fabricación en el país.

El segundo objetivo del proyecto fue tomar un caso de estudio de una industria local en donde se realice recuperación de productos usados o exista potencial para practicarlo, con el fin de planificar la producción a través de la formulación y la resolución de un modelo matemático. La industria nacional seleccionada es un fabricante de múltiples tipos de Calentadores de Agua Eléctricos de acumulación (CAEs), la cual no cuenta hoy en día con opciones de retorno, pero dadas las características particulares de los productos se halló potencial para plantear este escenario. Para interiorizarse en la temática de los CAEs, se estudiaron artículos científicos, normativa nacional, folletos e

informes técnicos, así como también fueron consultados expertos y profesionales de la industria y la academia quienes aportaron información sumamente útil. De esta forma fue posible estudiar la recuperabilidad de los CAEs y evaluar la viabilidad de la remanufacturación en dicha industria. A partir de este estudio se pudo concluir que estos productos se encuentran bien posicionados para la remanufacturación y se plantearon posibles rutas de recuperación, las cuales dependen del estado de los retornos, el cual puede ser diverso. Además, conociendo el diseño actual del producto, se hallaron recomendaciones a realizar sobre el mismo, con el fin de facilitar y beneficiar aún más la remanufacturación.

Obtenido el caso de estudio, se desarrolló en primer lugar un modelo de programación lineal entera mixta (MILP, por sus siglas en inglés) para la planificación de la producción actual de la planta, es decir, sin opciones de retorno. Para ello fue necesaria la recolección, análisis y estimación de datos. El objetivo del modelo es poder determinar una solución que minimice los costos involucrados, satisfaciendo la demanda diaria sin retrasos. A raíz de la complejidad y magnitud asociada al problema fue necesario resolverlo de forma heurística, estudiándose diferentes alternativas y escogiendo finalmente la partición en subproblemas de menor tamaño. De esta forma se pudo obtener una planificación de la producción día por día para satisfacer los requerimientos de demanda de un año, en las condiciones actuales de la planta. Si bien se logró luego acceder a una computadora con mayores prestaciones que permitió resolver el problema del tamaño original de forma exacta, se obtuvo una solución de peor calidad en un tiempo de cómputo similar al requerido en la ejecución de la heurística.

En segundo lugar, se planteó la aplicación de la recuperación de los CAEs mediante un modelo de planificación de la producción con opciones de retorno. En este caso la demanda puede satisfacerse a partir de productos nuevos o remanufacturados y se formuló como una extensión del caso sin retornos. Debido a la heterogeneidad en la calidad de los retornos se incluye en el modelo una actividad que consiste en inspeccionarlos para clasificarlos en sus respectivas calidades. El objetivo de este modelo extendido es determinar las cantidades a inspeccionar, producir, remanufacturar y descartar en cada período para satisfacer la demanda sin retrasos y minimizando la suma de todos los costos involucrados. Al ser el modelo con opciones de retorno aún más complejo que el sin retornos, no fue posible resolverlo en un tiempo razonable acorde a los requerimientos de demanda establecidos para el horizonte de planificación de un año. Por lo tanto, se ejecutó para un horizonte de planificación menor, para el cual se pudiera resolver con el software y hardware disponibles. Además de los beneficios medioambientales asociados a este tipo de sistemas de producción, de los resultados obtenidos se pudieron comprobar también beneficios económicos si se implementara la recuperación de productos usados en la planta.

En base al modelo con opciones de retorno, se realizan diversos análisis de sensibilidad para evaluar el impacto de la solución ante cambios en ciertos parámetros del problema. A partir del análisis surgió que para aumentar los beneficios económicos se debe diseñar el producto con miras en la remanufacturación, incentivar el buen uso y el mantenimiento de los mismos por parte del usuario, así como su devolución al final de su vida útil (EoL, por sus siglas en inglés).

El resto del informe está organizado de la siguiente manera. La Sección 2 brinda un marco teórico sobre la temática de recuperación de productos usados, los problemas de planificación de la producción con y sin opciones de retorno, y las características de los CAEs, así como también se presenta una descripción del mercado y la industria uruguaya de estos productos. En la Sección 3 se presenta el caso de estudio donde se describen las características de la empresa seleccionada, la descripción del problema sin opciones de retorno, el modelo matemático, el relevamiento y análisis de datos, la validación y ejecución, y una interpretación de los resultados obtenidos. Luego se estudia la recuperabilidad de los CAEs, sugiriendo mejoras en el diseño actual para facilitar su recuperabilidad. Por último, se presenta el problema con opciones de retorno, el modelo matemático, el relevamiento y análisis de datos, la validación y ejecución, y finalmente la interpretación de los resultados. En la Sección 4 se realiza un análisis de sensibilidad sobre el modelo matemático con opciones de retornos donde se analiza el comportamiento del modelo bajo diferentes escenarios. Se busca identificar cuáles son las características con mayor impacto en las soluciones de buena calidad para el problema, es decir de bajo costo, y así sugerir medidas para el apoyo en la toma de decisiones de la planta. El documento termina con las conclusiones y posibles direcciones de trabajo futuro en la Sección 5.

2 Marco teórico

En la presente sección se busca acercar al lector a la problemática del proyecto, introduciendo los principales temas en los que se basó el mismo. El marco teórico incluye un contexto sobre recuperación de productos usados, planificación de la producción y finalmente una síntesis sobre calentadores de agua eléctricos de acumulación (CAEs) y, la industria y mercado de los mismos en Uruguay.

2.1. Recuperación de productos usados

El modelo tradicional de consumo se basa en la cultura de “usar y tirar”, una estructura de flujo lineal de producción que causa serios daños al medio ambiente. En este escenario, se presenta la economía circular como un cambio de paradigma de este modelo lineal. A diferencia de la disposición final y del reciclado tradicional, la economía circular está orientada a la reutilización, remanufacturación, reacondicionamiento y reparación, entre otras prácticas de recuperación de productos usados [8]. Existen múltiples formas de recuperación, el objetivo principal de estas es recuperar el valor residual del producto al EoL, cuando el mismo ya no cumple con las necesidades para las cuales fue creado [1].

La remanufacturación es la única forma de recuperación en la cual necesariamente se igualan o mejoran las condiciones del producto nuevo [4]. El proceso de remanufacturación a menudo involucra el desmontaje, inspección, clasificación, limpieza, reprocesamiento, prueba y reensamblaje, para garantizar un producto recuperado con al menos la misma calidad y características funcionales que el producto nuevo [2] [4]. Esta práctica de recuperación permite obtener productos generalmente a menor precio para los consumidores, al mismo tiempo que los fabricantes ahorran materias primas y energía, obtienen mayores ganancias y mejoran su imagen ambiental [9] [10] [11]. Se pueden identificar tres requisitos necesarios para que sea posible la remanufacturación de un producto. El primero es que los productos al finalizar su vida útil tengan un valor residual, el segundo es que la empresa que realiza la remanufacturación pueda capturar efectivamente el valor del producto retornado y el tercero que el producto pueda restaurarse a condición de nuevo con una inversión moderada [5]. Según Tessa Vlaanderen, la remanufacturación siempre que sea técnicamente factible, y no sea posible el reuso, debe considerarse primera dentro de las estrategias de recuperación; ya que maximiza la generación de valor para el consumidor y para las empresas, por lo tanto, de la productividad global de los recursos [12].

La recuperación de productos usados presenta múltiples beneficios que justifican su aplicación, sin embargo, también presenta varias dificultades y desafíos como son la incertidumbre de la cantidad, calidad y tiempo de los retornos [13] [10] [5]. La consideración de los retornos ocasiona dos complejidades adicionales en los enfoques de gestión de inventario tradicionales. En primer lugar, se agrega incertidumbre debido a los retornos de productos inciertos. En segundo lugar, existe una necesidad de coordinación entre el reaprovisionamiento de productos usados y el modo regular de adquisición de materiales [6].

Es importante destacar que se puede diseñar un producto de forma de simplificar al EoL, su recuperación. Por lo tanto, el diseño es un factor decisivo a la hora de decidir si recuperar un producto usado. En algunos casos es necesario rediseñar todo el proceso de fabricación desde cero, teniendo en cuenta que este cambio podría resultar en beneficios económicos y ambientales a largo plazo. Si bien el diseño es importante para todas las formas de recuperación, es crucial para la remanufacturación ya que en muchos casos supone la viabilidad técnica de la misma. La manera más efectiva de impulsar la remanufacturación es a través de un enfoque de diseño de productos y procesos [14].

Para incorporar la recuperación de productos usados sin problemas en las cadenas de suministro existentes, los fabricantes prefieren diseñar y desarrollar productos de forma modular. Los productos modulares son aquellos que se han ensamblado con componentes o módulos que se pueden utilizar una y otra vez. Esto permite que los productos usados se puedan recuperar sin daños y evitar que sean desechados [9]. Por el contrario, es importante tener en cuenta que también es posible diseñar productos para garantizar que no puedan ser remanufacturados. Algunos fabricantes de equipos originales (OEM, por sus siglas en inglés) que desean evitar que terceros remanufacturen sus productos pueden hacerlo mediante técnicas de ensamblaje que imposibiliten el desmontaje de un producto sin destruirlo [14].

2.2. Planificación de la producción

La planificación de la producción supone un ahorro económico a las empresas que se encargan de dicha gestión, ofreciendo una mayor competitividad. Como parte de la planificación se encuentra la optimización de inventarios, la cual ha tomado gran importancia durante los últimos años dadas las tendencias del mercado y la competitividad. La planificación de inventarios puede ocasionar excesivas cantidades y costos o, por el contrario, inexistencias, lo que puede acarrear inesperados impactos operacionales [15].

La planificación de la producción también incluye la organización de los recursos y las actividades necesarias para transformar insumos atendiendo la demanda de forma eficiente. Existe un compromiso entre minimizar los costos asociados a los procesos y atender la demanda con cierto nivel de satisfacción. En general se obtiene una ventaja competitiva si estas actividades se apoyan en adecuados modelos de optimización que permitan la obtención de los mejores resultados [15].

2.2.1. Sistemas sin opciones de retorno

Los problemas de dimensionamiento de lotes abordan la problemática de planificación de la producción con el objetivo de hallar cuánto y cuándo producir. Los modelos propuestos en la literatura se pueden clasificar con respecto a las suposiciones tomadas sobre la demanda en determinísticos y estocásticos. Los modelos determinísticos se basan en la suposición de que la demanda es conocida en todo el horizonte de

planificación. Si en los periodos de tiempo la demanda es siempre la misma, se dice que es estática, si cambia de un periodo a otro se dice que es dinámica. Estos modelos intentan encontrar un equilibrio óptimo entre los costos fijos de preparación y los costos variables de mantener inventario. En cambio, los modelos estocásticos son aquellos que toman en cuenta la incertidumbre presente en la demanda y pueden ser representados comúnmente por una distribución de probabilidad [6].

Una de las primeras aproximaciones a la planificación de la producción fue desarrollada por Ford W. Harris en 1913 [16] y se conoce como el modelo del Tamaño Económico de Pedido (EOQ, por sus siglas en inglés). El modelo incluye la gestión de inventarios y maneja una escala de tiempo continua, una demanda estática y un horizonte de tiempo infinito. Dicho modelo busca determinar el tamaño óptimo de pedido Q , que permita satisfacer la demanda D minimizando los costos totales de compra y de inventario z . La siguiente expresión vincula estos tres parámetros:

$$z(Q) = pD + \frac{sD}{Q} + \frac{hQ}{2} \quad (1)$$

Donde p representa el costo de cada unidad comprada, s el costo de cada orden realizada, y h el costo unitario de mantener inventario. La expresión D/Q representa el total de pedidos realizados, mientras que $Q/2$ es la cantidad de inventario promedio. Se quiere hallar el valor de Q que minimiza la expresión anterior. El mismo se ubica donde se anula la derivada parcial respecto a Q . Por lo tanto, se quiere determinar el tamaño de pedido Q tal que:

$$\frac{dz(Q)}{dQ} = -\left(\frac{sD}{Q^2}\right) + \frac{h}{2} = 0 \quad (2)$$

Finalmente podemos establecer la siguiente expresión para determinar el valor del tamaño de lote económico Q :

$$Q = \sqrt{\frac{2sD}{h}} \quad (3)$$

Debido a que dicho modelo supone demanda estática, en general no se adapta para modelar problemas realistas. Por lo tanto, varias décadas más tarde, Wagner y Whitin en 1958 [17], presentan una extensión natural y dinámica al problema EOQ, donde la demanda durante el horizonte de planificación presenta variabilidad. Se conoce como el Problema de Dimensionado del Lote Económico (ELSP, por sus siglas en inglés). El modelo busca determinar el punto de equilibrio entre los costos de producción y los costos de mantener inventario, asumiendo capacidad ilimitada. El problema se formula mediante programación matemática y se consideran los siguientes parámetros y variables de decisión.

Parámetros:

- T : Largo del horizonte finito de planificación
- D_t : Cantidad de productos demandados en el período t
- c : Costo unitario de pedir
- K : Costo fijo de pedir
- h : Costo unitario de mantener inventario

Variables:

- x_t : Cantidad de productos a pedir en el período t
- I_t : Cantidad de productos a almacenar al final del período t
- $\delta_t = 1$ si $x_t > 0$, 0 en caso contrario

Formulación matemática del modelo propuesto por Wagner y Whitin para el ELSP:

$$\text{Min} \quad \sum_{t=1}^T [K\delta_t + cx_t + hI_t] \quad (4)$$

s.a:

$$I_t = I_{t-1} + x_t - D_t, \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (5)$$

$$I_0 = 0 \quad (6)$$

$$I_t, x_t \geq 0, \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (7)$$

La restricción (5) es la ecuación de equilibrio de inventario, mientras que la (6) simplemente establece el inventario inicial en cero.

Wagner y Whitin (1958) observaron que, existe una solución óptima en la que se produce solamente si el nivel de inventario precedente es cero. A esto le llamaron propiedad de inventario cero, es decir, se produce si y solo si la cantidad de inventario entrante es cero.

Wagner y Whitin (1958) observaron que, existe una solución óptima en la que se produce solamente si el nivel de inventario precedente es cero. A esto le llamaron propiedad de inventario cero, es decir, se produce si y solo si la cantidad de inventario entrante es cero. Para hacer frente a la demanda dinámica, distintos autores realizaron modificaciones al problema clásico de Wagner y Whitin basado en programación dinámica. Estudios más recientes desarrollan algoritmos más eficientes para encontrar valores óptimos de cantidad a producir en cada período, los cuales se pueden consultar en el artículo de Ilgin y Gupta (2010) [6].

2.2.2. Sistemas con opciones de retorno

El objetivo de los problemas de dimensionamiento de lotes con opciones de retorno es encontrar cuánto y cuándo producir, recuperar y/o disponer finalmente. Estos modelos, de la misma forma que los modelos sin opciones de retorno pueden clasificarse según los valores de la demanda y retornos en determinísticos y estocásticos. Los modelos determinísticos se basan en la suposición de que la demanda y los retornos son conocidos en todo el horizonte de planificación. La demanda y los retornos son estáticos si son siempre los mismos, en cambio sí varían período a período se conocen como dinámicos.

A partir del año 2000 distintos autores propusieron extensiones del problema de Wagner y Whitin [17] considerando las opciones de retorno. Según nuestro mejor conocimiento, la primera extensión al modelo fue desarrollada por Richter y Sombrutzki (2000) [18] y suponen que la cantidad de retornos en el primer período es suficiente para satisfacer toda la demanda a tiempo en el horizonte de planificación. Pocos años después, Teunter

et al. (2006) [2] estudian el llamado Problema de Dimensionamiento del Lote Económico con Remanufactura (ELSR, por sus siglas en inglés), sin restricciones en la cantidad de retornos. La principal diferencia entre el ELSR y el ELSP es que la remanufactura de productos usados también puede satisfacer la demanda.

La secuencia de eventos que se esquematiza en la Figura 2.2-1 muestra la llegada de los retornos, luego la producción y/o remanufactura para cumplir con la demanda y finalmente el almacenamiento de los productos terminados, en el caso que esto ocurra. No se incluye la opción de disposición final para los productos retornados.

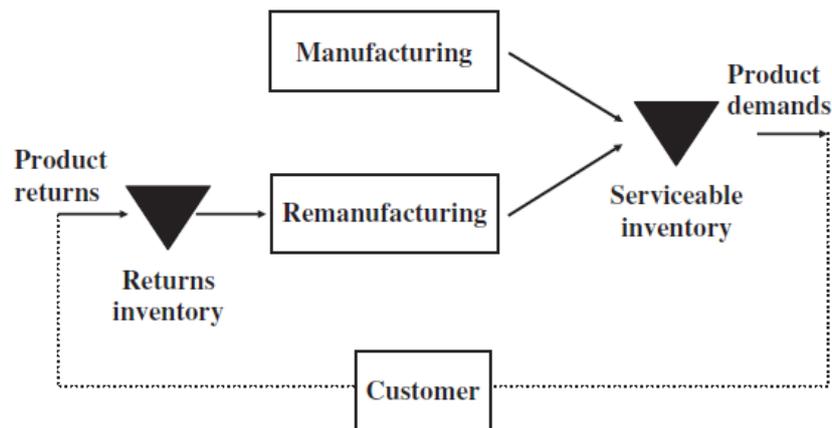


Figura 2.2-1: Flujo de los productos en el sistema con remanufactura planteado por Teunter et al. (2006) [2]

En el estudio de Teunter et al. se consideran dos esquemas de costos de preparación diferentes. Por un lado, el que tanto la producción como la remanufactura se realizan en la misma línea y tiene un costo en conjunto. Por otro lado, el que cuenta con líneas de producción y costos separados. Se presenta debajo la formulación del problema para el segundo esquema en el cual se consideran los siguientes parámetros y variables de decisión.

Parámetros:

- T : Largo del horizonte finito de planificación
- D_t : Cantidad de productos demandados en el período t
- R_t : Cantidad de productos retornados en el período t
- K^r : Costo fijo de preparación de remanufactura
- K^p : Costo fijo de preparación de producción
- h^u : Costo unitario de mantener inventario de productos retornados
- h^s : Costo unitario de mantener inventario de productos terminados

Variables:

- x_t^r : Cantidad de productos a remanufacturar en el período t
- x_t^p : Cantidad de productos a producir en el período t
- I_t^u : Cantidad de productos retornados a almacenar en el período t

- I_t^s : Cantidad de productos terminados a almacenar en el período t
- δ_t^r : $\delta_t^r = 1$ si $x_t^r > 0$, 0 en caso contrario
- δ_t^p : $\delta_t^p = 1$ si $x_t^p > 0$, 0 en caso contrario

Formulación matemática del modelo propuesto por Teunter et al. (2006) para el ELSR:

$$\text{Min} \quad \sum_{t=1}^T \{K^r \delta_t^r + K^p \delta_t^p + h^u I_t^u + h^s I_t^s\} \quad (8)$$

s.a:

$$I_t^u = I_{t-1}^u + R_t - x_t^r, \forall t = 1, \dots, T \quad (9)$$

$$I_t^s = I_{t-1}^s + x_t^r + x_t^p - D_t, \forall t = 1, \dots, T \quad (10)$$

$$x_t^r \leq M_t \delta_t^r, \forall t = 1, \dots, T \quad (11)$$

$$x_t^p \leq M_t \delta_t^p, \forall t = 1, \dots, T \quad (12)$$

$$\delta_t^r, \delta_t^p \in \{0,1\}, x_t^r, x_t^p, I_t^r, I_t^s \geq 0 \text{ y } M_t = \sum_{i=t}^T D_i, \forall t = 1, \dots, T \quad (13)$$

Las restricciones (9) y (10) aseguran el balance de inventario de retornos y de productos terminados, respectivamente. Mientras que las restricciones (11) y (12) son las restricciones de activación de las variables binarias de remanufacturación y de producción, respectivamente.

El esquema con líneas de producción separadas para la remanufacturación y producción es un problema NP-difícil, esto significa que es más complejo computacionalmente de resolver que el problema con líneas de producción conjuntas. Además, consideran que los retornos son homogéneos, es decir que la calidad de los mismos es uniforme y que todos pueden ser remanufacturados bajo las mismas condiciones. Estos requisitos pueden no ser ciertos para muchas realidades, al contar con productos con más desgaste que otros se clasificarán los retornos en un número finito de niveles de calidades y los productos retornados de peor calidad demandarán una remanufacturación más costosa. A partir de esta realidad, existen otros estudios de planificación de la producción con opciones de retorno en la literatura que consideran retornos heterogéneos, como son los de Ferguson et al. (2009) [19], Mahapatra et al. (2012) [20] y Piñeyro (2016) [21].

A modo de ejemplo se describe el problema estudiado por Piñeyro [21], el llamado Problema de Dimensionamiento del Lote Económico con Remanufacturación y Retornos con Calidad Heterogénea (ELSR-HQ, por sus siglas en inglés) bajo los supuestos de valores dinámicos de demanda y retornos conocidos, costos de preparación y de inventario invariantes en el tiempo y sin costos unitarios de producir. Los retornos se clasifican en diferentes niveles de calidad según la dificultad para obtener un producto remanufacturado. El objetivo es determinar las cantidades a producir y remanufacturar en cada período para cumplir con los requisitos de demanda a tiempo y minimizar la suma de todos los costos involucrados. El ELSR-HQ puede considerarse como una extensión de la formulación de Teunter et al. (2006). En definitiva, este problema es una generalización del ELSR ya que, si la cantidad de calidades es uno, los problemas son equivalentes. Por lo tanto, resolver el ELSR-HQ es al menos tan difícil como resolver el ELSR, que ya es un problema NP-difícil. El problema se puede modelar como un MILP con los siguientes parámetros y variables.

Parámetros:

- T : Largo del horizonte finito de planificación
- D_t : Cantidad de productos demandados en el período t
- R_{qt} : Cantidad de productos retornados en el período t
- K_q^r : Costo fijo de preparación de remanufactura de productos con calidad $q \in Q$
- K^p : Costo fijo de preparación de producción
- h_q^u : Costo unitario de mantener inventario de productos retornados con calidad $q \in Q$
- h^s : Costo unitario de mantener inventario de productos terminados

Variables:

- x_{qt}^r : Cantidad de productos con calidad $q \in Q$ a remanufacturar en el período t
- x_t^p : Cantidad de productos a producir en el período t
- I_{qt}^u : Cantidad de productos retornados con calidad $q \in Q$ a almacenar en el período t
- I_t^s : Cantidad de productos terminados a almacenar en el período t
- δ_{qt}^r : $\delta_{qt}^r = 1$ si $x_{qt}^r > 0$, 0 en caso contrario
- δ_t^p : $\delta_t^p = 1$ si $x_t^p > 0$, 0 en caso contrario

Formulación matemática del modelo propuesto por Piñeyro (2016) para el ELSR-HQ:

$$\text{Min} \quad \sum_{t=1}^T (K^p \delta_t^p + h^s I_t^s) + \sum_{t=1}^T \sum_{q=1}^Q (K_q^r \delta_{qt}^r + h_q^u I_{qt}^u) \quad (14)$$

s.a:

$$I_{qt}^u = I_{(q,t-1)}^u - x_{qt}^r + R_{qt}, \quad \forall q = 1, \dots, Q, \forall t = 1, \dots, T \quad (15)$$

$$I_t^s = I_{t-1}^s + \sum_{q=1}^Q x_{qt}^r + x_t^p - D_t, \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (16)$$

$$x_{qt}^r \leq M \delta_{qt}^r, \quad \forall q = 1, \dots, Q, \forall t = 1, \dots, T \quad (17)$$

$$x_t^p \leq M \delta_t^p, \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (18)$$

$$I_0^s = I_{q,0}^u = 0, \quad \forall q = 1, \dots, Q \quad (19)$$

$$\delta_{qt}^r, \delta_t^p \in \{0,1\}, x_{qt}^r, x_t^p, I_{qt}^u, I_t^s \geq 0, \quad \forall q = 1, \dots, Q, \forall t = 1, \dots, T \quad (20)$$

Las restricciones (15) y (16) corresponden a los balances de inventario de productos retornados y productos terminados, respectivamente. Mientras que las restricciones (17) y (18) permiten la activación de las variables binarias de remanufactura y de producción, respectivamente. La ecuación (19) establece el inventario inicial de productos terminados y productos retornados en cero.

Se debe observar que los modelos presentados anteriormente corresponden a problemas de plantas de un solo producto. Sin embargo, también son comunes las plantas multi-producto por lo tanto todos estos modelos podrían extenderse para considerar más de un producto.

2.3. Calentadores de agua eléctricos de acumulación (CAEs)

Se puede encontrar en la literatura una gran variedad de términos que refieren a los Calentadores de Agua de Acumulación (CAEs en adelante). En España se conoce como “termo eléctrico de acumulación”; en México se conocen como “terma”; en Uruguay, Argentina, Bolivia y Paraguay se conoce como “calefón” [22]. En la jerga habitual uruguaya también se los conoce como “termotanque” o “termofón”. En Canadá y EE.UU. se conoce como Electric Water Heater (EWH) [23]. La norma UNIT-IEC 60335-2-21-2006 define un calentador de agua cerrado como “un calentador de agua de acumulación no abierto a la atmósfera, previsto para funcionar a la presión del sistema de alimentación de agua, estando la salida del agua comandada por una o varias válvulas colocadas en el circuito de salida” [24].

El principio de funcionamiento de los CAEs consiste en tomar agua fría de la red de suministro y calentarla a través de una resistencia eléctrica situada en el interior del depósito de acumulación. La resistencia se activa mediante un termostato de regulación que permite programar y mantener constante la temperatura del agua. Cuando el agua acumulada alcanza la temperatura fijada, la resistencia se apaga y el agua permanece dentro del tanque hasta que existe una demanda por parte del usuario [23]. El agua se calienta a una cierta temperatura durante un tiempo que depende de la capacidad del depósito, de la potencia de la resistencia eléctrica y de la temperatura de entrada del agua [25].

2.3.1. Características, componentes y diseño

Los CAEs cuentan con diversos componentes como son tornillos, tuercas, remaches, arandelas, nipples, platinas, foco, perilla, tubos anillados, tapón fusible, tapa de servicio o cables. Sin embargo, en la presente sección se destacan solamente los principales componentes y la función que estos cumplen.

Los componentes principales comunes a casi todos los tipos de CAEs se muestran en la Figura 2.3-1 y se describen brevemente a continuación.

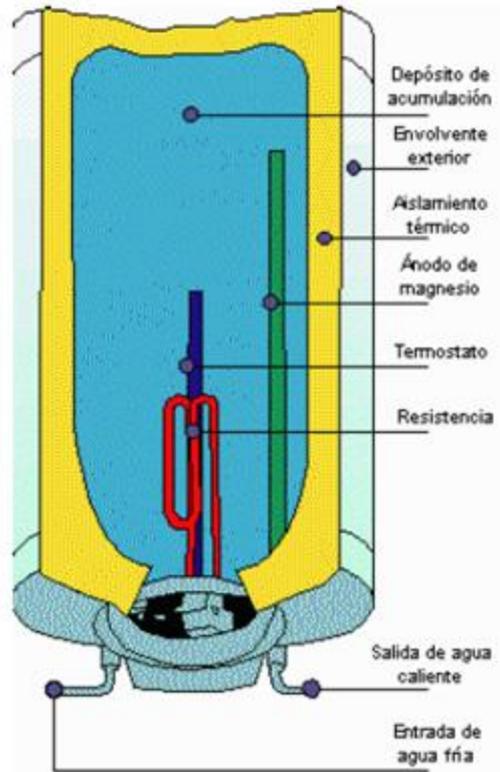


Figura 2.3-1: Esquema del corte transversal de un CAE que muestra sus principales componentes [25]

Depósito de acumulación:

Los depósitos de acumulación constan de un tanque que almacena el agua para su posterior uso. Pueden ser de acero, de cobre o de algún material plástico. Dependiendo del material, se cuenta con una vida útil distinta, en el caso del cobre puede llegar a ser hasta de 30 años mientras que para el acero es aproximadamente de 5 años [25].

El tratamiento de la superficie interior suele ser un aspecto importante a tener en cuenta para los tanques de acero, ya que lo protege frente a la corrosión y el deterioro, y en base a esto puede variar significativamente la vida útil del CAE [25].

Envolvente exterior:

La envolvente exterior es la que encierra y cubre todos los demás componentes y generalmente se fabrica en chapa de acero pintada [25].

Resistencia:

La resistencia eléctrica se encarga de calentar el agua contenida en el tanque. Hay dos tipos de resistencias eléctricas, las resistencias blindadas o las resistencias de cerámica envainada. La elección depende de la cantidad de carbonato de calcio ($CaCO_3$) y de la dureza del agua de alimentación. La resistencia blindada va sumergida en el tanque de modo que permite una transmisión directa de calor al agua. En cambio, la resistencia envainada no se encuentra en contacto directo con el agua ya que posee un

recubrimiento que suele ser de cerámica, por lo tanto, es recomendada para aguas duras ya que evita el efecto corrosivo de la cal. En consecuencia, las resistencias blindadas calientan el agua más rápido que las envainadas.

Según las bibliografías consultadas existen distintas ubicaciones de las resistencias dentro del tanque de acumulación, tal como se muestra en la Figura 2.3-2.

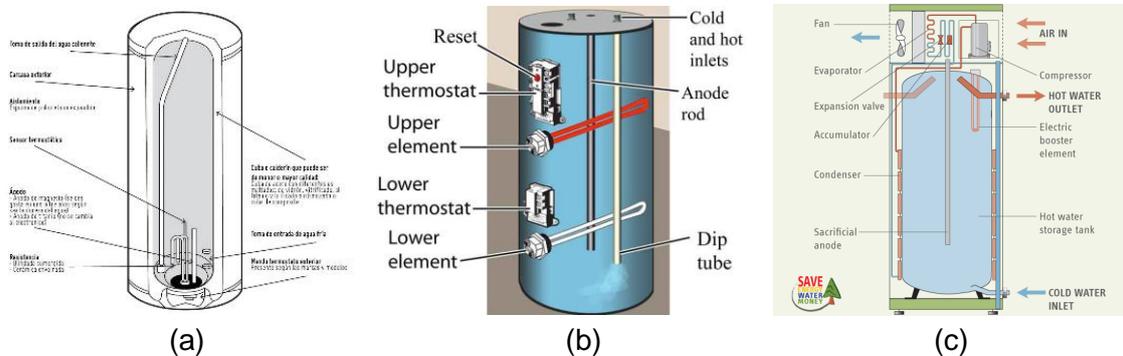


Figura 2.3-2: Posibles ubicaciones de la resistencia en un CAE: (a) en la tapa inferior, (b) en la superficie cilíndrica o (c) en la tapa superior

Ánodo de sacrificio:

El método más común para proteger los CAEs de la corrosión en el interior del tanque es la protección catódica. La misma consiste en obligar a la estructura a funcionar como un cátodo en una celda de corrosión, mediante la manipulación y/o modificación de factores electroquímicos. El ánodo de sacrificio es el componente principal en un sistema de protección catódica galvánica ya que cuando se conecta eléctricamente a la estructura sumergida descarga una corriente que fluye a través del electrolito hasta la estructura metálica que se pretende proteger contra la corrosión. Por lo tanto, el material utilizado para el ánodo debe tener mayor tendencia a la oxidación que el metal de la estructura que se desea proteger. En los CAEs el ánodo que cumple la función de sacrificio garantizando la protección catódica suele ser de magnesio, titanio o zinc. El mismo se va consumiendo a medida que pasa el tiempo, por lo que conviene revisarlo regularmente para ver si existe un deterioro y eventualmente cambiarlo. Adicionalmente, deben cumplir con ciertas características de peso, dimensiones y forma geométrica [25] [26] [27].

Para el diseño del sistema de protección catódica con ánodo se deben considerar varios factores, entre los cuales se encuentra el tipo de estructura, la resistividad del electrolito en el que operará (agua, en este caso), el tipo de recubrimiento y la vida útil deseada. Si se emplea muy poco material solo proporcionará protección por un tiempo corto y deberá ser sustituido muy a menudo. En contrapartida, un exceso de material podría proporcionar mayor protección, pero a un costo innecesario. La masa requerida en kg viene dada por la siguiente ecuación:

$$Masa = \frac{Corriente\ eléctrica\ necesaria \times Tiempo\ de\ protección(en\ años) \times 8760}{Factor\ de\ Uso \times Capacidad\ del\ ánodo}$$

En donde:

- La vida útil o tiempo de protección se expresa en años ($1 \text{ año} = 8760 \text{ horas}$)
- El factor de uso del ánodo es un valor constante que depende de su forma y del modo en que se conecta; lo que influye en la cantidad de material del ánodo que puede consumirse antes de que deje de ser eficaz.
- La capacidad del ánodo es una indicación de la cantidad de material que se consume mientras la corriente fluye con el tiempo y esta depende del material del ánodo.

Asimismo, la disposición del ánodo debe ser planificada con el fin de que pueda proporcionar una distribución uniforme de la corriente eléctrica en toda la estructura. En cuanto a la ubicación del ánodo dentro del CAE, según nuestro mejor conocimiento, puede estar junto a la resistencia o separado de ella.

Aislamiento térmico:

Un aislante térmico es un material que establece una barrera al paso del calor entre dos medios que naturalmente tenderían a igualarse en temperatura. La aislación térmica se encuentra entre el tanque interior y la envolvente exterior. Su función es mantener la temperatura del tanque interior, evitando pérdidas de calor a través de la superficie del mismo, reduciendo así el consumo de energía.

Para elegir un aislante térmico se tienen en cuenta diversos factores, entre ellos se encuentran la superficie del tanque, la temperatura ambiente, la conductividad térmica del material y su espesor. Cuanto menor es la conductividad térmica, mejor es el material aislante. En el caso de los CAEs se suele utilizar espuma de poliuretano expandido (conductividad térmica $0,032 \text{ W/mK}$) o lana de vidrio ($0,035 \text{ W/mK}$). A modo de comparación, en la Figura 2.3-3 se muestran distintos aislantes térmicos con sus respectivas conductividades térmicas.

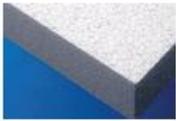
MATERIAL	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA : λ W/(mK)	
Poliestireno expandido (EPS)	0,032	
Poliuretano (PUR)	0,032	
Lana mineral de vidrio	0,035	
Lana mineral de roca	0,035	
Paja	1,55	

Figura 2.3-3: Aislantes y sus respectivas conductividades térmicas [33]

Los CAEs con aislación de espuma de poliuretano expandido ahorran un 35% en calentamiento de agua en comparación con la aislación de lana de vidrio, para un mismo espesor [28]. A su vez, la espuma de poliuretano tiene la propiedad de selladora, ya que permite la unión y estabilidad de las superficies a tratar y al sellar logra formar una barrera que impide el pasaje del agua. Por lo tanto, además de aislar forma una pared muy resistente para mejorar la mecánica estructural del tanque. A pesar de sus muchas ventajas, el aislamiento de espuma de poliuretano cuenta con varios problemas debido a que sus componentes contienen aditivos que pueden resultar altamente nocivos para la salud [25] [29].

Termostato y fusible térmico:

El termostato controla la temperatura del agua en el depósito de acumulación. La temperatura puede ser controlada según un valor elegido por el usuario, dentro de cierto rango de temperaturas, o prefijado por el fabricante. Sólo algunos modelos cuentan con una perilla exterior para que el usuario pueda regular la temperatura. Una vez que se utiliza el agua caliente y penetra agua fría en el tanque, el termostato se enfría y pone en funcionamiento la resistencia. El agua fría se calienta hasta que se alcanza la temperatura fijada en el termostato. Asimismo, el termostato establece seguridad térmica, evitando sobrecalentamientos que puedan causar daños en el CAE.

El fusible térmico es un dispositivo de protección que responde a temperatura, interrumpiendo la corriente eléctrica cuando la temperatura excede un valor fijado. Por lo tanto, proporciona una protección en caso de sobrecalentamiento por mal

funcionamiento. Al cortar la corriente, el CAE queda desconectado evitando el suceso de problemas mayores como podría ser la explosión del CAE [30] [25] [23].

Válvula de alivio y retención:

Esta válvula está diseñada para aliviar la presión del agua en el depósito de acumulación cuando se supera un límite preestablecido. A su vez, tiene la función de retención, ya que no permite el vaciado del depósito de acumulación en caso de falta de agua en la red [31] [23].

Caños de entrada y salida:

El depósito de acumulación se encuentra siempre lleno de agua. Los caños de entrada y salida permiten que fluya el agua caliente hacia afuera y penetre el agua fría al interior del tanque respectivamente [31].

2.3.2. Industria y mercado de CAEs en Uruguay

Existen diversas formas de abastecerse de agua caliente. A nivel doméstico, las más comunes son el calentador solar, el calentador eléctrico instantáneo, el calentador eléctrico de acumulación (CAE) y el calentador a gas. En los hogares uruguayos el CAE es el método más popular para satisfacer el consumo de agua caliente, alcanzando un 80% frente a los otros métodos, según SEG Ingeniería, consultora de reducción de costos energéticos de Uruguay [32]

Si bien los CAEs tienen bajo costo de mantenimiento y una larga vida útil, su consumo de energía es alto ya que deben estar encendidos para mantener caliente el depósito. De acuerdo con datos de la Dirección Nacional de Energía (DNE), el calentamiento de agua representa el 37% del consumo de energía eléctrica en un hogar promedio. En el mundo existe una amplia gama de planes, programas, proyectos y acciones tendientes al ahorro y la eficiencia energética. Estas iniciativas pueden cubrir el territorio uruguayo, como es el caso del Programa Energy Star, una asociación entre la Agencia de Protección Ambiental y el Departamento de Energía de los Estados Unidos que abarca desde electrodomésticos hasta la certificación [33].

A nivel país es la Unidad Reguladora de Servicios de Energía y Agua (URSEA) quien controla actividades relacionadas al uso eficiente de la energía de CAEs. A su vez, la empresa generadora y distribuidora de energía eléctrica, UTE, realiza regularmente esfuerzos con el objetivo de disminuir el consumo de energía por medio de un uso más racional y eficiente de los recursos energéticos. En 2014, UTE lanzó el Plan Recambio de CAEs para todos los hogares del país, el mismo consiste en recibir una bonificación al adquirir un aparato de 60 litros o más con una clasificación "A" de desempeño energético. Durante el 2015, UTE otorgó 6000 bonificaciones [34]. Este hecho aumentó la venta de CAEs de forma global en todo el país. La información y los datos que se presentan a continuación en esta sección fueron brindados por la DNE. Se destaca que a partir de la iniciativa de UTE aumentaron las ventas de CAEs: en 2013 se comercializaron 121.508 unidades de CAEs, en 2014 fueron 144.610, en 2015 144.931 y durante el 2016 se comercializaron 130.722.

En el mercado uruguayo se dispone de una gran variedad de tipos de CAEs. Con relación al volumen, en el mercado se comercializan CAEs domésticos de entre 12 y 120 litros, y los más populares son los de 30 litros. Con respecto a la aislación, en su gran mayoría son de espuma de poliuretano, ya que son los que logran un mayor porcentaje de rendimiento energético, mientras que los CAEs con aislación de lana de vidrio están tendiendo a desaparecer. A pesar de las ventajas térmicas del poliuretano, como todo elemento tóxico puede tener un efecto perjudicial sobre el medio ambiente. Los gases de poliuretano tienen efecto invernadero y por lo tanto tienen efecto negativo sobre la atmósfera.

Uruguay cuenta con pocas industrias dedicadas a la producción de CAEs, las cuales diseñan y producen CAEs de una amplia gama de tamaños, todos con aislación de espuma de poliuretano. Sin embargo, la producción nacional satisface aproximadamente el 70% de las ventas de CAEs, y el restante 30% corresponde a productos importados. Por reglamentación de la URSEA, es obligatorio para la comercialización que los CAEs estén certificados por la norma de seguridad eléctrica correspondiente. Por lo tanto, para satisfacer este requisito, la producción de CAEs debe estar preparada para que los ensayos de verificación den resultados conformes a la norma.

De lo anterior se desprende que el CAE es un electrodoméstico que resulta de gran importancia para el país, dado su popularidad como abastecedor de agua caliente en los hogares y por su alto consumo de energía eléctrica. El uso eficiente de la energía es una práctica que favorece a los consumidores de energía, al medio ambiente y a la sociedad en general.

3 Caso de estudio

En la presente sección se exponen las distintas etapas del caso de estudio. En primer lugar, se introduce cómo fue el relevamiento de la empresa que sirvió como base para el desarrollo del caso de estudio y se detallan las características de la misma. En segundo lugar, se desarrolla el problema sin opciones de retorno con su respectivo modelo matemático, la resolución y los resultados del mismo. Luego se realiza un análisis de recuperabilidad de CAEs con recomendaciones de diseño que benefician la remanufacturación. Finalmente, se desarrolla el problema con opciones de retornos a través de una extensión del modelo original incorporando una línea de recuperación.

3.1. Introducción

Para abordar el caso de estudio se buscó una empresa local en donde se realice recuperación de productos usados. Para ello, se relevaron empresas uruguayas que realizan algún tipo de recuperación. Un listado de estas empresas se encuentra en el Anexo del estado del arte (Anexo I) y a raíz de este se observó que la gran mayoría de las empresas realizan actividades de reciclaje.

Según datos brindados por la DNE, la mayoría de los productos comercializados en Uruguay son importados, lo cual dificulta la aplicación de formas de recuperación más beneficiosas como la remanufacturación. Se realizaron grandes esfuerzos por comunicarse con empresas remanufacturadores, pero dado que no es una práctica común en Uruguay, no se obtuvieron respuestas, o en caso de tenerlas, no fueron proclives a oficiar de contraparte para el presente proyecto. Finalmente, se optó por buscar empresas locales que no realicen recuperación, pero se encuentre potencial para aplicar la remanufacturación.

En dicha búsqueda se entabló comunicación con la empresa Rivomark, líder en la fabricación de CAEs, quienes se mostraron interesados en el estudio a realizar sobre la recuperabilidad de sus productos, así como también aceptaron compartir datos de su empresa para contribuir con el proyecto. En concreto, el caso de estudio se centra en una empresa uruguaya de producción de CAEs, en la cual se observa que, dadas las características particulares del producto, puede ser posible la instauración de una línea de remanufacturación.

3.2. Características de la empresa relevada

Rivomark es una planta multi-producto que fabrica CAEs con tanque interior de cobre y de acero. Actualmente se encuentran produciendo ocho tipos distintos de CAEs, cinco de cobre y tres de acero. Los procesos productivos de los CAEs de cobre y acero se muestran en la Figura 3.2-1 y Figura 3.2-2 respectivamente.

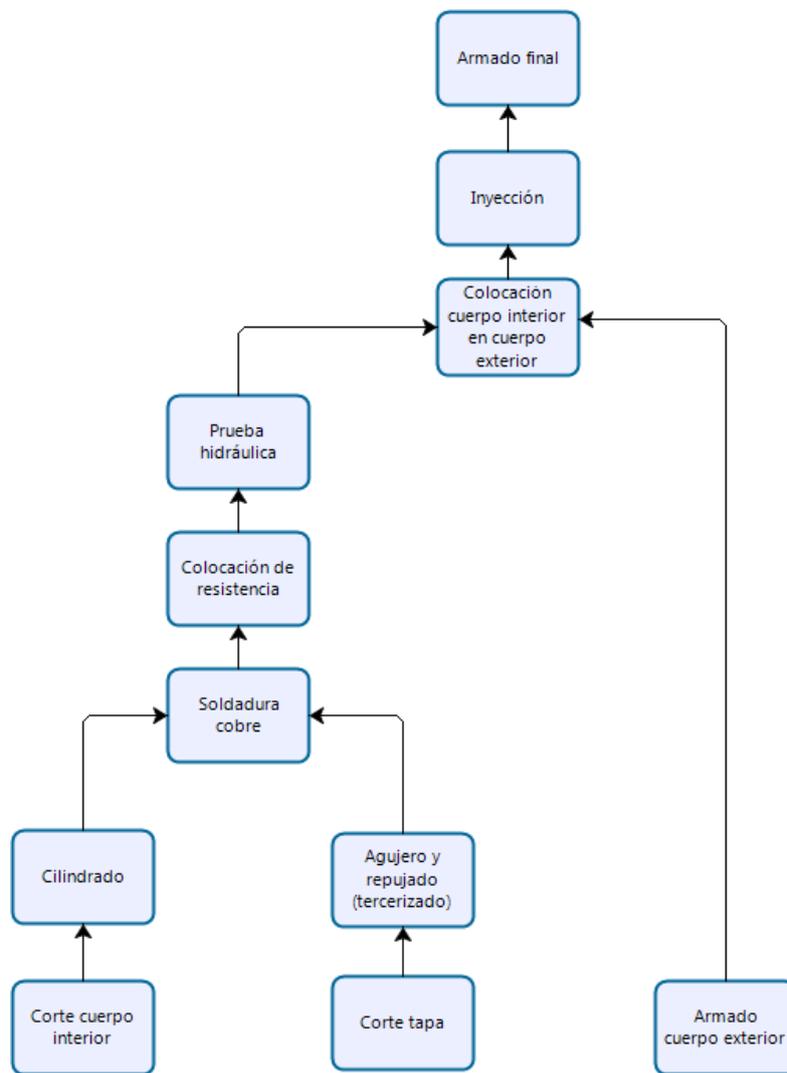


Figura 3.2-1 Representación esquemática del proceso productivo de los CAEs con tanques de cobre.

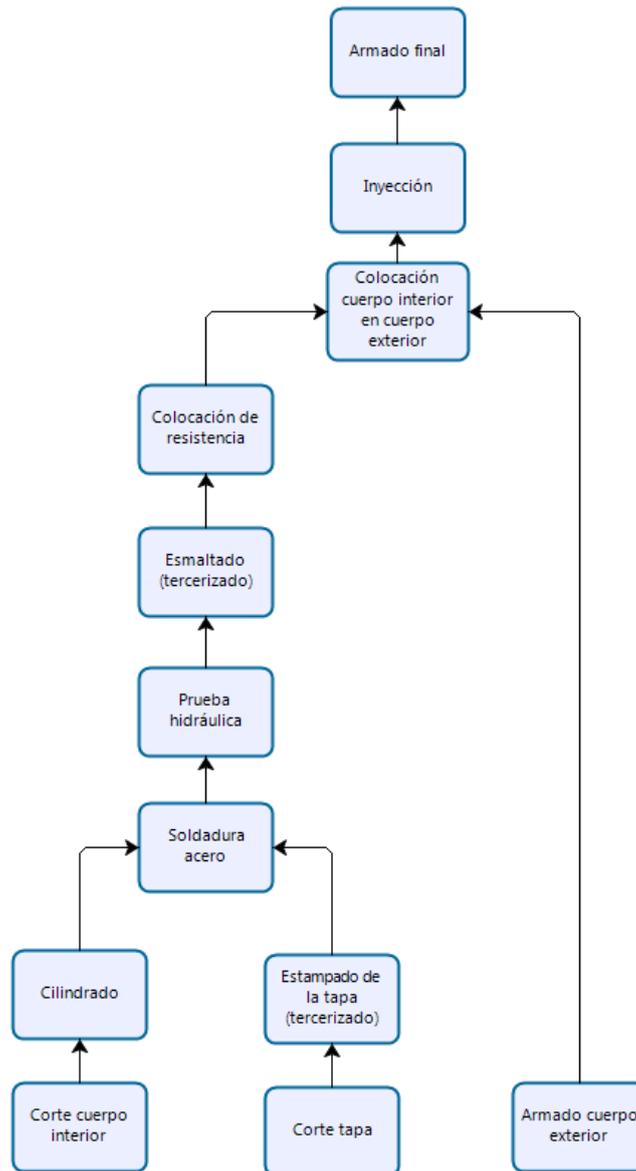


Figura 3.2-2: Representación esquemática del proceso productivo de los CAEs con tanque interior de acero.

Como se puede observar en la Figura 3.2-1 y Figura 3.2-2, el proceso productivo consta de algunas etapas que se realizan en empresas tercerizadas. Las tercerizaciones implican que los productos en proceso se saquen de la línea, sin embargo, la producción no se interrumpe al llegar a la etapa de tercerización, sino que los componentes ya fueron tercerizados previamente y se encuentran prontos para usarse.

Con respecto a las características de los componentes, el material de la envolvente exterior es chapa de hierro pintada de blanco, en todos los casos. El depósito de acumulación de acero se protege de la corrosión mediante un tratamiento anticorrosivo de esmaltado en la parte interior del tanque. Tanto el tanque interior de acero como el de cobre tienen un espesor de 1,5 centímetros. La resistencia es blindada y se introduce

sumergida en la parte inferior centrada dentro del tanque junto con un ánodo de magnesio de 40 centímetros de largo, el cual se utiliza para proteger el interior del tanque de la corrosión y es el mismo para todos los tipos y tamaños de CAEs. La aislación utilizada en todos los casos es espuma de poliuretano expandido de 10 cm de espesor. Los elementos de seguridad que utilizan para la producción de los CAEs son termostato, fusible térmico, cámara de aire, válvula de alivio y de retención, y tapón fusible.

La empresa cuenta con cuatro clientes fijos que realizan sus pedidos con un mes de anticipación. Cada cliente tiene los días de entrega ya estipulados y son ellos quienes recogen los pedidos en la planta de Rivomark. La empresa planifica su producción a partir de la demanda histórica y los pedidos de los clientes.

3.3. Planificación de la producción sin opciones de retorno

Se aborda un problema de planificación de la producción a mediano plazo de CAEs de una industria uruguaya. Se trata de una planta multi-producto con capacidades de producción y almacenamiento de producto terminado y de materia prima. Este tipo de plantas suele regirse por políticas de producción que dictan el modo de producir. En el caso de Rivomark, se rigen por la política que consta en producir los distintos lotes de manera intercalada con la intención de conseguir un mejor aprovechamiento del equipamiento [35].

La demanda se puede pronosticar con un alto grado de certeza en un horizonte de planificación de un año, por trabajar en base a pedidos. Los CAEs se producen a partir de ciertas materias primas, suministradas por distintos proveedores. Se puede obtener más de una materia prima por cada proveedor, pero no trabajan con más de un proveedor por materia prima y cada proveedor tiene asignado un costo fijo de realizar el pedido.

Los costos asociados al problema son estacionarios, es decir, no varían período a período. El modelo contempla los siguientes costos: costos fijos de preparación de producción, costos unitarios de producción, costos unitarios de mantener inventario de materia prima y de producto terminado, y costos de pedir la materia prima asociados a cada proveedor.

Las principales particularidades y restricciones que caracterizan al problema sin opciones de retorno se detallan a continuación.

Capacidad de producción: La capacidad de producción depende de la infraestructura de la planta y de la cantidad de trabajadores operándola. La cantidad de CAEs producidos por período no puede superar la capacidad máxima disponible en cada período.

Restricciones de producción: Cada línea de producción de la planta se rige por la política que consta en la producción de un tipo de producto antes de comenzar con el procesamiento de otro. Dada la infraestructura de la planta solo se puede producir un tipo de CAE de acero y/o un tipo de CAE de cobre por día. A su vez, existen algunas combinaciones permitidas de CAEs de acero con CAEs de cobre que se pueden

producir en el mismo día, dependiendo de sus tamaños. En líneas generales, los CAEs de tamaño intermedio de acero y de cobre pueden producirse en el mismo día, y los CAEs de acero pequeños pueden producirse en el mismo día que los CAEs de cobre grandes, y viceversa. Esta limitación en la planta se estableció por los dueños de la empresa para nivelar el esfuerzo diario de los operarios, ya que al ser productos grandes la manipulación no es sencilla.

Capacidad de almacenamiento: Se tiene una capacidad de almacenamiento limitada. En la planta se cuenta con determinado espacio para almacenar la materia prima y otro para el producto terminado.

Inventario de seguridad de producto y de materia prima: Se requiere siempre en la planta una cierta cantidad de producto terminado que amortigüe los efectos de una circunstancia no prevista que podría deberse a causas imposibles de conocer con antelación. Es necesario contar con una cierta cantidad de inventario mínimo para cada modelo de CAE en cada período, así como también de materia prima. Incluir este inventario agrega cierta holgura en caso de que la demanda real de algún período supere la estimada.

Dimensionamiento discreto de lotes de materia prima: En algunos casos el tamaño del lote de materia prima a pedir necesariamente debe ser un múltiplo de cierta cantidad fija como puede ser la capacidad del tanque o de la caja. En este caso concreto, el hierro, cobre y acero se venden en múltiplos de cierta cantidad de flejes, fijada por el proveedor. Asimismo, el poliuretano y la pintura se pide en tanques.

Tiempo de entrega de materia prima: Cada materia prima está asociada a un proveedor, y cada proveedor demora un determinado tiempo entre que se le realiza el pedido y lo entrega.

3.3.1. Modelo matemático

Se desea planificar una secuencia de lotes de producción dinámica en donde el dimensionamiento de los mismos varía entre cero y la capacidad máxima de producción. El problema de la planta multi-producto se modela como un MILP con demanda dinámica, la cual se debe satisfacer sin retrasos. Debido a la importancia de la restricción de producción de Rivomark detallada en la Sección 3.3 el horizonte de planificación del problema es de un año discretizado en días.

El proceso de construcción del modelo se llevó a cabo junto a la recolección y análisis de los datos recabados en la empresa. Durante la construcción se realizaron diversas pruebas de verificación hasta lograr la conformidad con el modelo planteado.

3.3.1.1. Objetivo

El objetivo es determinar las cantidades a producir de cada tipo de CAE y a pedir de materia prima en cada período durante el horizonte de planificación, satisfaciendo la demanda sin retrasos y minimizando los costos.

3.3.1.2. Conjuntos

- TC : Conjunto de productos de cobre
- TA : Conjunto productos de acero
- $T = TC \cup TA$: Conjunto de todos los productos
- TP : Conjunto que asigna a cada producto de acero $ta \in TA$ los productos de cobre $tc \in TC$ que pueden realizarse en el mismo período de acuerdo a las restricciones de producción de la planta
- MP : Conjunto de materia prima
- $MPD \subset MP$: Conjunto de materias primas que su pedido debe ser múltiplo de cierta cantidad fija
- PR : Conjunto que corresponde a los proveedores
- PRM : Conjunto que asigna a cada proveedor $p \in PR$ la materia prima suministrada $m \in MP$
- I : conjunto que corresponde a los períodos

3.3.1.3. Parámetros

- CF_t : Costo unitario de producción del producto $t \in T$
- K_t : Costo fijo de preparación de producción del producto $t \in T$
- HP : Costo unitario de mantener inventario de producto
- HM_m : Costo unitario de mantener inventario de materia prima $m \in MP$
- KM_p : Costo fijo del proveedor $p \in PR$
- D_{ti} : Cantidad del producto $t \in T$ demandado en el período $i \in I$
- R_{tm} : Cantidad de materia prima $m \in MP$ requerida para el producto $t \in T$
- TN_t : Tiempo necesario para producir el producto $t \in T$
- TD : Tiempo disponible para producir en un período
- QP : capacidad máxima de almacenamiento de productos
- QA : capacidad máxima de almacenamiento de materia prima
- ST_t : Inventario de seguridad del producto $t \in T$
- SM_m : Inventario de seguridad de la materia prima $m \in MP$
- YM_m : Cantidad mínima de materia prima $m \in MP$ a pedir
- Io_t : Inventario inicial del producto $t \in T$
- Imo_m : Inventario inicial de materia prima $m \in MP$
- N : Parámetro de activación de β_{mi}
- E_m : Múltiplo del pedido de la materia prima $m \in MPD$
- A : Número de activación de las variables binarias $\delta_{ti}^p, \delta_{qti}^r, \delta_{qti}^d$ y ε_i el cual se define $A = \sum_{t \in T} \sum_{i \in I} D_{ti}$

3.3.1.4. Variables

- x_{ti} : Cantidad de producto $t \in T$ a producir en el período $i \in I$
- y_{mi} : Cantidad de materia prima $m \in MP$ a comprar en el período $i \in I$
- s_{ti} : Cantidad de producto $t \in T$ a almacenar en el período $i \in I$

- z_{mi} : Cantidad de materia prima $m \in MP$ a almacenar en el período $i \in I$
- n_{mi} : Variable entera de dimensionamiento del pedido de materia prima $m \in MP$ en el período $i \in I$
- δ_{ti} : Variable binaria que vale 1 cuando se produce un producto $t \in T$ en el período $i \in I$, 0 de lo contrario
- β_{mi} : Variable binaria que vale 1 cuando se compra la materia prima $m \in MP$ en el período $i \in I$, 0 de lo contrario
- γ_{pi} : Variable binaria que vale 1 cuando se compra al proveedor $p \in PR$ en el período $i \in I$, 0 de lo contrario

3.3.1.5. Formulación matemática

$$\text{Min } \sum_{i \in I} \{ \sum_{t \in T} (CF_t x_{ti} + K_t \delta_{ti} + HPS_{ti}) + \sum_{m \in MP} HM_m z_{mi} + \sum_{p \in PR} KM_p \gamma_{pi} \} \quad (21)$$

s.a:

$$x_{ti} \leq A \delta_{ti}, \quad \forall t \in T, \forall i \in I \quad (22)$$

$$\delta_{ti} \leq x_{ti}, \quad \forall t \in T, \forall i \in I \quad (23)$$

$$\sum_{t \in T} x_{ti} TN_t \leq TD, \quad \forall i \in I \quad (24)$$

$$y_{mi} \geq YM_m \beta_{mi}, \quad \forall m \in MP, \forall i \in I \quad (25)$$

$$y_{mi} \leq N \beta_{mi}, \quad \forall m \in MP, \forall i \in I \quad (26)$$

$$s_{ti} = s_{(t,i-1)} - D_{ti} + x_{ti}, \quad \forall t \in T, \forall i \in I \quad (27)$$

$$s_{ti} \geq ST_t, \quad \forall t \in T, \forall i \in I \quad (28)$$

$$s_{t,0} = Io_t, \quad \forall t \in T \quad (29)$$

$$z_{mi} = z_{(m,i-1)} - \sum_{t \in T} R_{tm} x_{ti} + y_{mi}, \quad \forall m \in MP, \forall t \in T, \forall i \in I \quad (30)$$

$$z_{mi} \geq SM_m, \quad \forall m \in MP, \forall i \in I \quad (31)$$

$$z_{m,0} = Imo_m, \quad \forall m \in MP \quad (32)$$

$$\sum_{tc \in TC} \delta_{tc,i} \leq 1, \quad \forall i \in I \quad (33)$$

$$\sum_{ta \in TA} \delta_{ta,i} \leq 1, \quad \forall i \in I \quad (34)$$

$$\sum_{tx \in TA \setminus \{ta\}} \sum_{tp \in TP[tx]} \delta_{tp,i} \leq 1 - \delta_{ta,i}, \quad \forall ta \in TA, \forall i \in I \quad (35)$$

$$y_{mi} = E_m n_{mi}, \quad \forall m \in MPD, \forall i \in I \quad (36)$$

$$\gamma_{pi} \geq \beta_{mi}, \quad \forall p \in PR, \forall m \in PRM[p], \forall i \in I \quad (37)$$

$$\gamma_{pi} \leq \sum_{m \in MP} \beta_{mi}, \quad \forall p \in PR, \forall m \in PRM[p], \forall i \in I \quad (38)$$

$$\sum_{t \in T} s_{ti} \leq QP, \quad \forall i \in I \quad (39)$$

$$\sum_{m \in MP} \left(\frac{z_{mi}}{MA_m} \right) \leq QA, \quad \forall i \in I \quad (40)$$

$$x_{ti}, s_{ti} \geq 0, \delta_{ti} \in \{0,1\}, \quad \forall t \in T, \forall i \in I \quad (41)$$

$$y_{mi}, z_{mi} \geq 0, \beta_{mi} \in \{0,1\}, \quad \forall m \in MP, \forall i \in I \quad (42)$$

$$n_{mi} \in \mathbb{N}^+ \cup \{0\}, \quad \forall m \in MPD, \forall i \in I \quad (43)$$

Como se muestra en (21), la función objetivo se define como la suma de los costos asociados a la producción, al almacenamiento y a la compra de materia prima. Las familias de ecuaciones (22) y (23) corresponden a la activación de la variable binaria de producir. La familia de restricciones (24) acota superiormente la capacidad de producción de la planta. La familia de restricciones (25) asegura que, en el caso de comprar materia prima en un período, se satisfaga la cantidad mínima de pedido. La familia de ecuaciones (26) permite la activación de la variable binaria de compra de materia prima. Las ecuaciones (27) y (30) corresponden al balance de inventario de productos y de materia prima respectivamente. Las restricciones (28) y (31) aseguran que se satisfaga el inventario de seguridad de productos y materia prima, respectivamente. Las restricciones (29) y (32) inicializan el inventario de productos y de materia prima respectivamente. La familia de restricciones (33), (34) y (35) garantizan que se cumpla con las restricciones de producción de la planta la cual consta a grandes rasgos en producir hasta dos tipos de productos por día. La familia de restricciones (36) corresponde a los casos en que el tamaño del lote de materia prima a pedir debe ser un múltiplo de una cantidad fija. Las restricciones (37) y (38) establecen el correcto funcionamiento de la variable binaria de compra a los proveedores. Las restricciones (39) y (40) representan las limitaciones de capacidad máxima de almacenamiento de producto terminado y de materia prima respectivamente. Las restricciones (41), (42) y (43) son la no negatividad de las variables, las variables binarias y la variable entera.

Sin pérdida de generalidad y debido a que no es un término optimizable, no se modeló el tiempo de entrega de los proveedores de materia prima. Estos valores son conocidos, por lo tanto, para la correcta planificación de la producción simplemente se deberá tener en cuenta este dato e incorporarlo a los resultados arrojado por el modelo.

3.3.2. Relevamiento y análisis de datos

Para la resolución del modelo es necesario conocer los valores de los parámetros. Algunos de los datos fueron analizados e interpretados, y otros fueron suministrados por la empresa y se utilizaron tal como fueron dados, como por ejemplo la capacidad máxima de producción, la cantidad de materia prima requerida para cada producto, la cantidad mínima de pedido de cada proveedor y el tamaño de los pedidos que deben ser múltiplos de una cierta cantidad preestablecida. Aquellos para los que fue necesario un análisis e interpretación fueron la demanda, la cantidad de producto que entra en un

metro cúbico, el inventario de seguridad, los tiempos necesarios de producción y los costos. Todos los datos y análisis se encuentran detallados en la Sección 1 del Anexo II.

3.3.3. Validación del modelo

Si las pruebas de validación son debidamente seleccionadas y realizadas garantizan el correcto funcionamiento del modelo y además permiten corroborar que el modelo represente la realidad deseada. Los casos fueron desarrollados de forma que todas las características del problema queden incluidas. Las principales funcionalidades consideradas en los casos de prueba son:

- Demanda satisfecha a tiempo
- Restricciones de producción
- Restricciones de almacenamiento de producto y de materia prima
- Balances de inventario de producto y materia prima
- Dimensionamiento discreto de lotes de materia prima
- Relación de variables enteras con sus respectivas variables binarias
- Relación variable binaria de comprar materia prima con variable binaria de comprar al proveedor

Todas las pruebas realizadas se encuentran documentadas en la Sección 1 del Anexo III. Los casos que se documentaron son tan solo algunos de los realizados a modo de ejemplificar la validación realizada. Otros tantos se llevaron a cabo en la etapa de construcción del modelo. Gracias a estas pruebas se detectaron algunos errores que permitieron la corrección del modelo a tiempo. Las pruebas se llevaron a cabo con GLPSOL – GLPK LP/MIP v4.65 ya que las dimensiones de las mismas son pequeñas. La configuración de software y hardware sobre la que se realizaron las pruebas fue con sistema operativo de 64 bits Windows 7 Home Basic, procesador Intel Core i5-480M CPU @ 2.67, GHz 2.66 GHz, 4 GB RAM.

3.3.4. Ejecución del modelo

Las formulaciones de los problemas de dimensionamiento de lote con capacidad limitada, como es este el caso, pueden ser problemas NP-difíciles. Con el fin de obtener una solución exacta, el modelo se intenta resolver mediante el solver GLPSOL – GLPK LP/MIP v4.65. Para conocer la complejidad computacional del problema, en la Figura 3.3-1 se grafican los tiempos de ejecución a medida que se añaden períodos en una computadora con sistema operativo de 64 bits Windows 7 Home Basic, procesador Intel Core i5-480M CPU @ 2.67, GHz 2.66 GHz, 4 GB RAM. De la figura se observa que,

para el conjunto de datos dado, los tiempos de ejecución insumidos para alcanzar una solución óptima aumentan exponencialmente conforme aumentan los períodos.

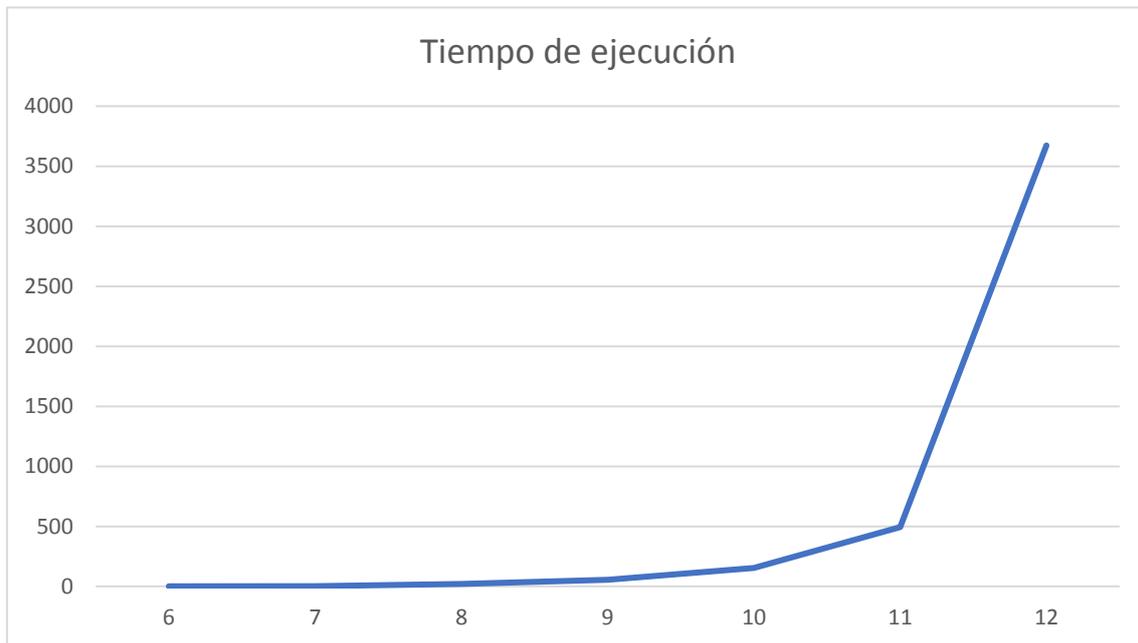


Figura 3.3-1: Evolución de tiempos de ejecución insumidos para la obtención de soluciones óptimas para el modelo sin opciones de retorno

De la Figura 3.3-1 se observa que para 12 períodos el tiempo de ejecución para alcanzar una solución óptima es de 3673 segundos. Por lo tanto, es de esperar que el tiempo de ejecución para obtener una solución óptima en esta computadora para los 261 períodos sea muy elevado, de tal vez varios días. Para comprobarlo, se llevó a cabo la ejecución y al cabo de 24 horas el solver no logró encontrar solución.

Con miras a simplificar el modelo e intentar resolverlo de forma exacta para 261 períodos, se realizaron ciertos ajustes relacionados con la manera de modelar. Inicialmente la relación de producción de los CAEs de cobre con los CAEs de acero, y la relación de la materia prima con los proveedores se habían plasmado mediante matrices indicatrices. Estas matrices son dispersas, es decir, de gran tamaño y la mayor parte de sus elementos son cero, estos ocupan mucho espacio de memoria lo que podría resultar en una resolución ineficiente computacionalmente. Por lo tanto, se procedió a realizar una nueva versión (y última) del modelo utilizando conjuntos de pares para plasmar estas relaciones.

A raíz de las dificultades encontradas en la resolución del modelo con GLPK, se busca la utilización de otros solvers más eficientes como, por ejemplo, CPLEX 12.8.0.0 y Gurobi 8.1.0. En cuanto a las formas de resolución del modelo es posible escoger dos opciones. Por un lado, acceder a una computadora con mejor procesador que las que poseemos ya que los tiempos de resolución disminuyen conforme mejora la configuración del hardware que se utiliza. O, por otro lado, recurrir a métodos heurísticos que, aunque no garantizan soluciones óptimas se obtienen soluciones que podrían estar cercanas al óptimo, en tiempos de ejecución considerablemente menores.

Para poder resolver el problema en las computadoras personales a las que se tiene fácil acceso se decide en primer lugar utilizar algún método heurístico. Luego, con el fin de comparar ambos métodos y de evaluar el desempeño de la heurística, se logró acceder una computadora de mejor procesador que las personales, para resolver el modelo de forma exacta.

3.3.4.1. Resolución mediante método heurístico

Una heurística natural que surge para resolver un problema de planificación de la producción es dividirlo en subproblemas con horizontes de planificación menores. Para ello, se debe tener en cuenta que los datos de la demanda diaria dependen fuertemente de la demanda mensual, ya que los pedidos se entregan a los clientes en días de semana ya programados. Por ejemplo, los pedidos de uno de los clientes deben ser entregados el primer y el tercer lunes de cada mes, independientemente de cuántos días tenga el mes. Debido a esta fuerte dependencia, se decide realizar pruebas para verificar la cantidad de períodos para la cual se puede llegar a una solución de buena calidad en unas pocas horas. Estas pruebas se llevaron a cabo por el tutor del proyecto, quien se ofreció a hacerlas en una computadora del Instituto de Computación (INCO) de la Facultad de Ingeniería con sistema operativo de 64 bits CentOS Linux 7, procesador de 8 CPUs Intel Core i7-6700 @ 3.40GHz, 24 GB de RAM. De las mismas se constató que un problema de 33 períodos se podía resolver de forma exacta en una hora con una diferencia porcentual entre la mejor cota obtenida y la mejor solución que podría llegar a encontrarse (gap de dualidad) de 10%. Por lo tanto, se decide resolver seis subproblemas, cada uno de los cuales tendrá un horizonte de planificación de dos meses (entre 43 y 45 períodos dependiendo del mes que se esté resolviendo). Para la ejecución, se evaluó mediante pruebas el compromiso entre los costos de cómputo para obtener soluciones factibles y la calidad de éstas, optándose por un gap de dualidad del 10%.

Resolver el problema con esta heurística trae beneficios con respecto a los tiempos de ejecución, pero también trae aparejadas algunas dificultades prácticas. A continuación, se enumeran estas dificultades:

1. Los subproblemas no se pueden resolver simultáneamente ya que se debe traspasar el inventario final de materia prima de cada subproblema al siguiente como inventario inicial
2. Debido a la restricción de producción de la planta, no se pueden producir más de dos modelos de CAE por día. Por lo tanto, para conseguir una solución factible es necesario añadir CAEs al inventario inicial de producto terminado. La cantidad a agregar se obtiene planificando manualmente la producción de los primeros períodos (al ser ocho modelos distintos y poder producir de a dos a la vez, se necesita disponibilidad de inventario para satisfacer la demanda de los primeros cuatro períodos). Por lo tanto, se añade esa misma cantidad a la demanda del último período del subproblema anterior, para conocer si es posible producirlos anticipadamente y obtener la planificación los costos correspondientes.

Los modelos se resolvieron en una computadora personal con sistema operativo de 64 bits Windows 10 Home, procesador Intel Core i5-4210U CPU @ 1.7 GHz, 1.7 GHz, 6 GB RAM, mediante Gurobi 8.1.0. En la ejecución, se detectó que el subproblema correspondiente a noviembre y diciembre no contaba con solución factible, por lo tanto, la heurística planteada ha fallado para el conjunto de datos y restricciones dado y se deben tomar acciones para corregirla.

Existen diversas maneras de solucionar la no factibilidad de la heurística: agregar más capacidad de producción, disminuir la demanda, relajar la restricción de producción de la planta, entre otras posibles combinaciones. Sin embargo, si los recursos no se pueden modificar y se desea satisfacer la demanda a tiempo en todo el horizonte de planificación, se puede corregir la heurística agregando manualmente la demanda que no pudo ser satisfecha en el último subproblema, en los subproblemas anteriores, hasta encontrar (si la hay) una solución factible. Es decir, adelantar la demanda de los períodos en los que se excede la capacidad hasta conseguir una solución factible.

Con el fin de tener una idea inicial acerca de cuánta capacidad de producción adicional necesita el subproblema correspondiente a noviembre y diciembre, se ejecuta el mismo en dos diferentes instancias. En primer lugar, se resuelve sin la restricción (24) de capacidad máxima de producción y en segundo lugar sin las restricciones (33) (34) y (35) de producción de la planta, considerando el caso en que la planta pudiera producir cualquier producto cualquier día, bajo ningún criterio específico.

- Primera instancia: relajar la restricción (24) de capacidad máxima de producción del subproblema noviembre y diciembre

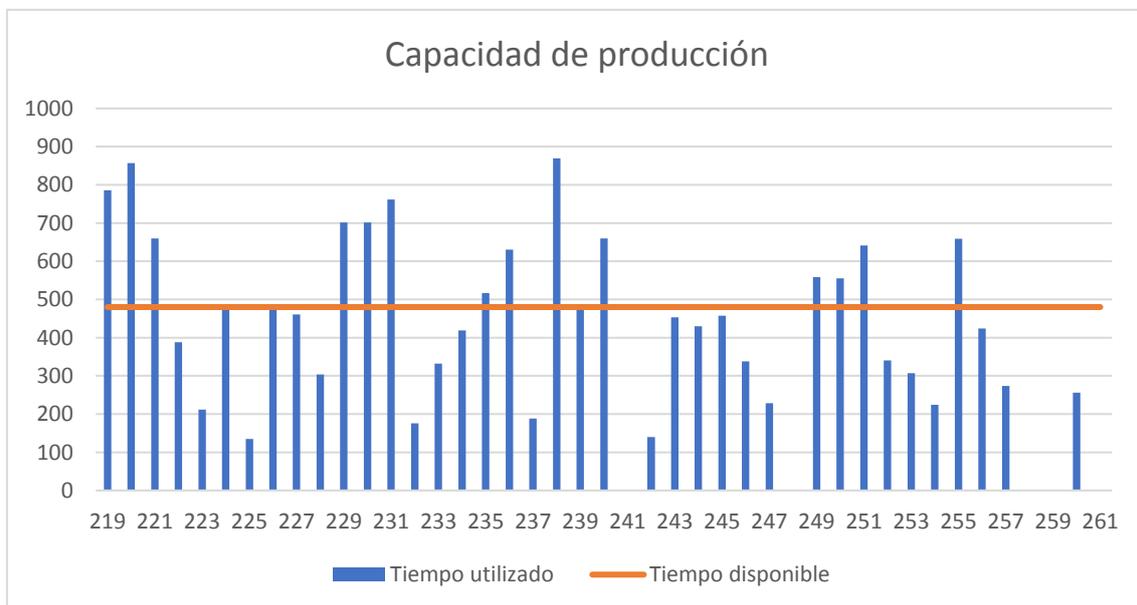


Figura 3.3-2: Capacidad de producción en minutos para los últimos dos meses del año, sin la restricción (24) de capacidad máxima de producción

De la Figura 3.3-2 se aprecia que relajando la restricción (24), en 14 de los 42 períodos la producción sobrepasa la capacidad máxima actual de la planta y que en cinco no se produce. El costo asociado de este subproblema resultó en 2.762.743 con un gap de

dualidad del 10% (además del costo de incurrir en las horas extras de producción diarias).

- Segunda instancia: relajar las restricciones (33), (34) y (35) de producción de la planta del subproblema noviembre y diciembre

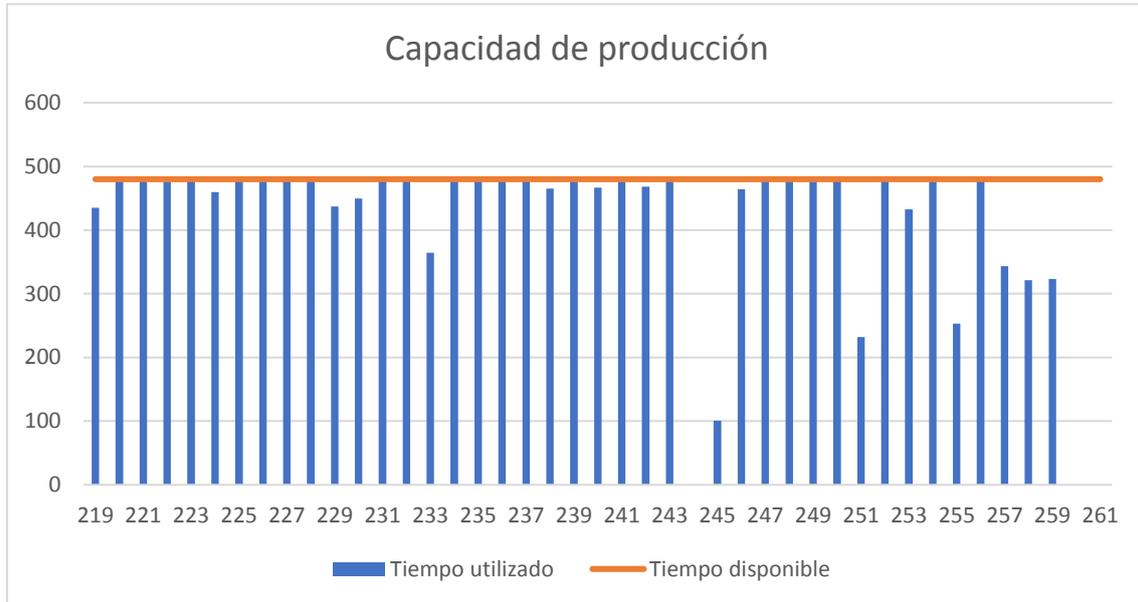


Figura 3.3-3: Capacidad de producción en minutos para los últimos dos meses del año, sin las restricciones (33), (34) y (35) de producción de la planta

De la Figura 3.3-3 se aprecia que, relajando las restricciones de producción de la planta, en casi todos los períodos se produce a capacidad máxima, y en dos no se produce. El costo asociado de este subproblema es de 2.765.245 con un gap de dualidad del 10%. La primera instancia es económicamente más conveniente.

De las gráficas de la Figura 3.3-2 y Figura 3.3-3 se puede observar que si bien en la primera figura se nota que se supera la capacidad de producción en algunos períodos, son en la minoría y además en otros no se produce. Esto da un buen indicio de que se puede encontrar una solución factible si se produjera de forma anticipada y se almacenara para poder cumplir con la demanda de los últimos dos meses en los que se excede la capacidad de producción.

Por lo tanto, se calculó manualmente la cantidad de demanda no satisfecha en noviembre y diciembre, resultando esta en 47 CAEs del modelo TA30L, 62 del modelo TA45L, 9 del modelo TCP40L y 12 del modelo TCP50L. Se hace hincapié en que esta verificación se realizó manualmente, por lo tanto, podría sugerirse otra combinación de CAEs no satisfechos en el último subproblema. Se comprobó que esta combinación de CAEs puede ser producido en el tiempo ocioso de octubre, sin embargo, para confirmar la existencia de solución factible, se debería también corroborar que es posible almacenar los CAEs y que en esos días se cuenta con la materia prima necesaria para la producción, o en caso contrario que puede comprar y almacenar lo requerido.

Para comprobar la factibilidad se separa el quinto y sexto subproblema de la siguiente manera: el quinto contendría solo a setiembre, y el sexto contendría a octubre, noviembre y diciembre. Al realizar la ejecución se constata que el sexto no tiene solución factible. Es decir, no fue posible producir en octubre y almacenarlo hasta el día que se efectúa la venta de noviembre. Por lo tanto, como siguiente alternativa se intenta resolver un último subproblema que contenga a setiembre, octubre, noviembre y diciembre. Este problema consta de 87 períodos por lo cual a priori no se tiene certeza de poder ejecutarlo en la misma computadora personal que se venía trabajando, para un gap de dualidad de 10% en un tiempo razonable. Se ejecutó lo anterior y se comprobó que dicho subproblema cuenta con solución factible, sin embargo, tal como se intuía no fue posible lograr un gap de dualidad del 10% en 24 horas de ejecución. La evolución del gap de dualidad y del valor objetivo durante 24 horas de ejecución se presentan en la Figura 3.3-4.

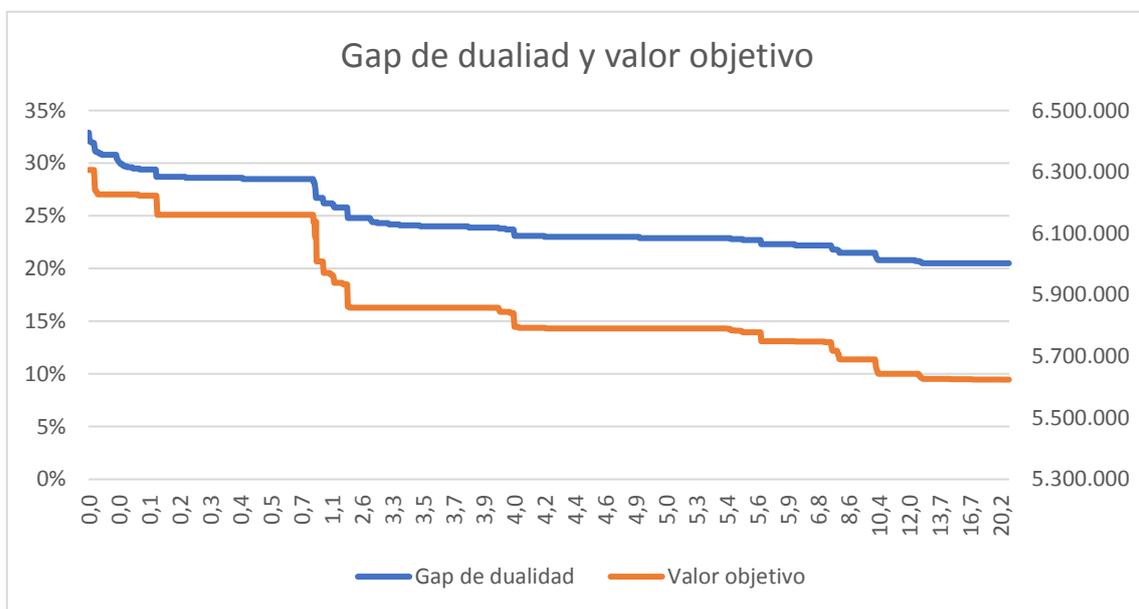


Figura 3.3-4: Evolución del gap de dualidad y del valor objetivo en 24 horas en la resolución del último subproblema de la heurística

De la gráfica se desprende que el valor objetivo disminuyó un 11% en las 24 horas de ejecución con respecto a la primera solución encontrada a los 10 segundos. Por lo tanto, se considera que el valor objetivo no hubiera prácticamente disminuido ni siquiera si se lo permitiera ejecutar algunas horas más. Finalmente, se logró un gap de dualidad de 20,1% con un valor objetivo de 5.603.324.

En la Tabla 3.3-1 se presentan a modo de resumen los tamaños de los subproblemas crudos, los tiempos de resolución, el gap de dualidad obtenido y el valor objetivo logrado en cada subproblema.

N° subproblema de la heurística	Meses	Tamaño	Tiempo de resolución	Gap de dualidad	Valor objetivo
1	enero y febrero	<ul style="list-style-type: none"> 4.782 variables (1.730 binarias, 652 enteras no binarias y 2.400 continuas) 23.641 entradas de parámetros distintos de cero 	1.074 segundos (17,9 minutos)	10%	2.640.624
2	marzo y abril	<ul style="list-style-type: none"> 4.907 variables (1.806 binarias, 688 enteras no binarias y 2.413 continuas) 24.991 entradas de parámetros distintos de cero 	13.249 segundos (220,8 minutos)	10%	2.628.263
3	mayo y junio	<ul style="list-style-type: none"> 4.802 variables (1754 son binarias, 656 enteras no binarias y 2.392 continuas) 23.839 entradas de parámetros distintos de cero 	11.827 segundos (197,1 minutos)	10%	2.645.637
4	julio y agosto	<ul style="list-style-type: none"> 5.021 variables (1.825 son binarias, 684 enteras no binarias y 2.512 continuas) 24.851 entradas de parámetros distintos de cero 	37.520 segundos (625,3 minutos)	10%	2.712.988
5	setiembre, octubre, noviembre y diciembre	<ul style="list-style-type: none"> 9.803 variables (3.592 son binarias, 1.354 enteras no binarias y 4.857 continuas) 49.254 entradas de parámetros distintos de cero 	86.400 segundos (24 horas)	20,1%	5.603.324

Tabla 3.3-1: Resolución del problema mediante método heurístico

3.3.4.2. Resolución mediante método exacto

De modo de obtener una planificación mediante método exacto, se consigue prestada una computadora con mejor procesador que las personales.

Se ejecutó en primer lugar sin las restricciones de almacenamiento de producto terminado y de materia prima, presumiendo que la ejecución sería más ágil. En 24 horas se obtuvo un gap de dualidad de 46,55% y un valor objetivo de 25.644.499. Posteriormente, se ejecutó con las restricciones de almacenamiento y se obtuvo en 24 horas una solución notoriamente mejor de 24,3% de gap de dualidad y un valor objetivo de 17.751.974. Se concluye entonces que las restricciones de almacenamiento, en vez

de complejizar el problema como se supuso, acotaron el espectro de soluciones, encontrando una mejor solución en el mismo tiempo de ejecución.

Las ejecuciones se realizaron en una computadora con sistema operativo Intel Core i7-4710HQ CPU @ 2.50 GHz, 16 Gb RAM, mediante Gurobi 8.1.0 y se obtuvo un gap de dualidad de 24,3%. Las características del modelo y de la ejecución se presentan en la Tabla 3.3-2.

Método	Meses	Tamaño	Tiempo de resolución	Gap de dualidad	Valor objetivo
Método de resolución exacta	de enero a diciembre	<ul style="list-style-type: none"> 29.629 variables (10.886 binarias, 4.140 enteras no binarias y 14.603 continuas) 135.478 entradas de parámetros distintos de cero 	24 horas	24,3%	17.751.974

Tabla 3.3-2: Resolución del problema mediante método exacto

En la siguiente figura se grafica el gap de dualidad y el valor objetivo conforme transcurre el tiempo, hasta llegar a 24 horas.

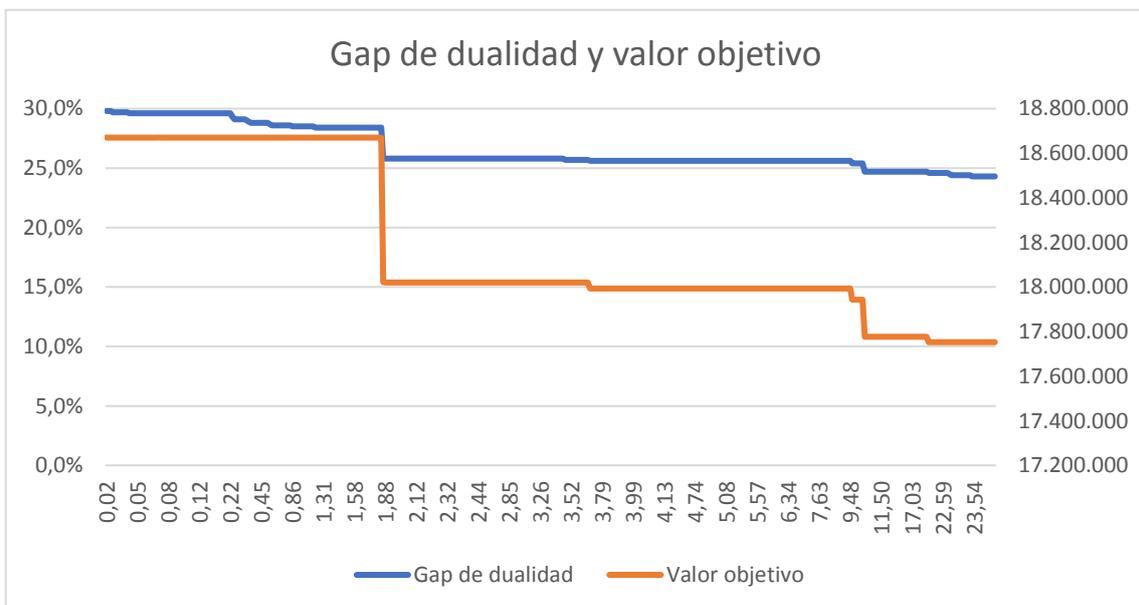


Figura 3.3-5: Evolución del gap de dualidad y del valor objetivo en la resolución exacta del problema en 24 horas

De la Figura 3.3-5 se observa que en la hora 1,88 se obtiene una mejora significativa, y que, transcurridas nueve horas más, se obtiene otra disminución del valor objetivo. En las últimas 13 horas de ejecución no se obtienen prácticamente mejoras con respecto al valor objetivo y además se puede calcular que transcurridas las 24 horas el valor objetivo solo disminuye un 5% con respecto a la primera solución encontrada a los 71 segundos. Por lo tanto, se concluye que el gap de dualidad obtenido de 24,3% es un resultado apropiado que no podría mejorarse significativamente en algunas horas más

de ejecución. Como el gap resultó en 24,3%, se puede presumir que la mejor solución que podría llegar a encontrarse sería de 13.438.244.

3.3.5. Interpretación de los resultados

En esta sección se presentan e interpretan los resultados arrojados por el modelo mediante resolución heurística y exacta.

3.3.5.1. Método heurístico

La solución encontrada tiene un valor objetivo de 16.230.836. A partir de los resultados obtenidos se hallan los costos de cada término de la función objetivo y posteriormente se presenta la distribución de los mismos en la gráfica de torta de la Figura 3.3-6.

$$\sum_{i \in I} \sum_{t \in T} CF_t x_{ti} = USD 2.455.710$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{t \in T} K_t \delta_{ti} = USD 321.900$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{t \in T} HPS_{ti} = USD 2.355.040$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{m \in MP} HM_m z_{mi} = USD 10.471.786$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{p \in PR} KM_p \gamma_{pi} = USD 626.400$$

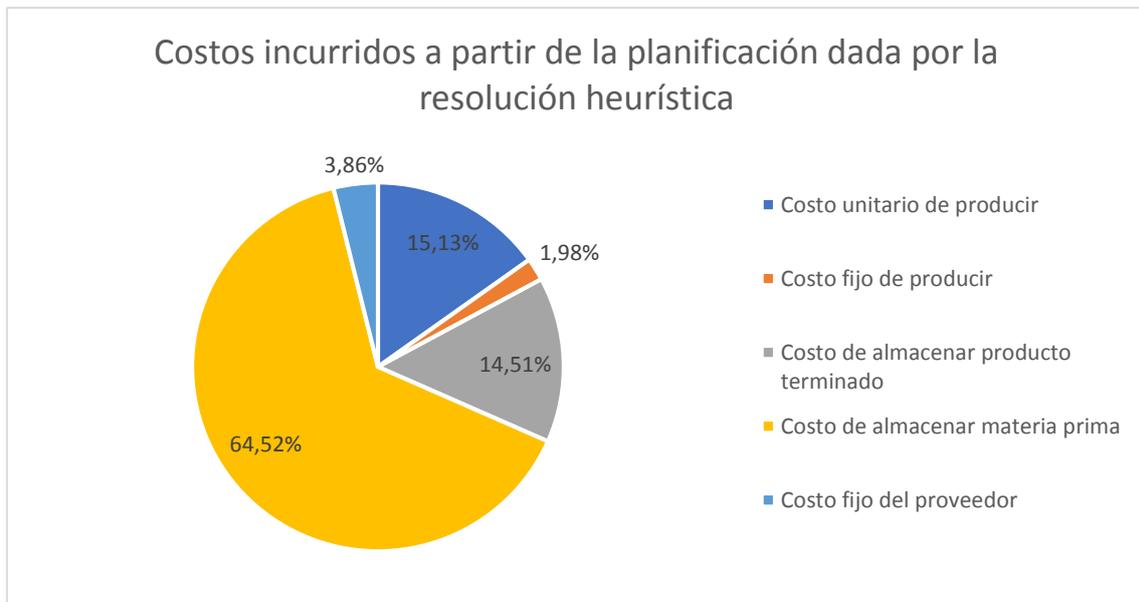


Figura 3.3-6: Gráfico de torta que representa la distribución de los costos incurridos con la planificación dada por la resolución heurística del problema

El mayor costo en el que se incurre es en el de mantener el inventario de materia prima, y se debe principalmente al requisito de cantidad mínima a pedir que cada proveedor establece. En algunos casos, esta cantidad es muy elevada en relación al insumo que se requiere para la producción diaria de CAEs. Por ejemplo, el proveedor de los caños de entrada y salida exige que se compren de a mínimo 5.000 unidades de cada uno para ofrecerles el mejor costo, y cada producto requiere de un tanque de entrada y de uno de salida. Por lo tanto, si se producen 100 CAEs diarios, se deben comprar como mínimo para 50 días de producción y lo que no se use se debe inventariar. El segundo costo más alto en el que se incurre también representa el almacenaje, pero en este caso, el relativo al mantenimiento de inventario de producto terminado. El tercer, cuarto y quinto costo más alto en los que se incurre representa el costo unitario de producción, el costo de pedirles a los proveedores y el costo fijo de producción, respectivamente. Se observa que el balance que el solver realiza entre los costos fijos de producir y los de mantener inventario en la mayoría de los casos se inclina por producir anticipadamente y almacenar a que incurrir el día que se demanda en el costo fijo de producir. Este comportamiento en gran parte se debe a que existe una capacidad máxima de producción en la planta y a que no se puede producir más de dos tipos de CAEs por día.

En la Figura 3.3-7 y Figura 3.3-8 se muestra el almacenamiento de producto terminado y de materia prima respectivamente, en todo el horizonte de planificación de un año.

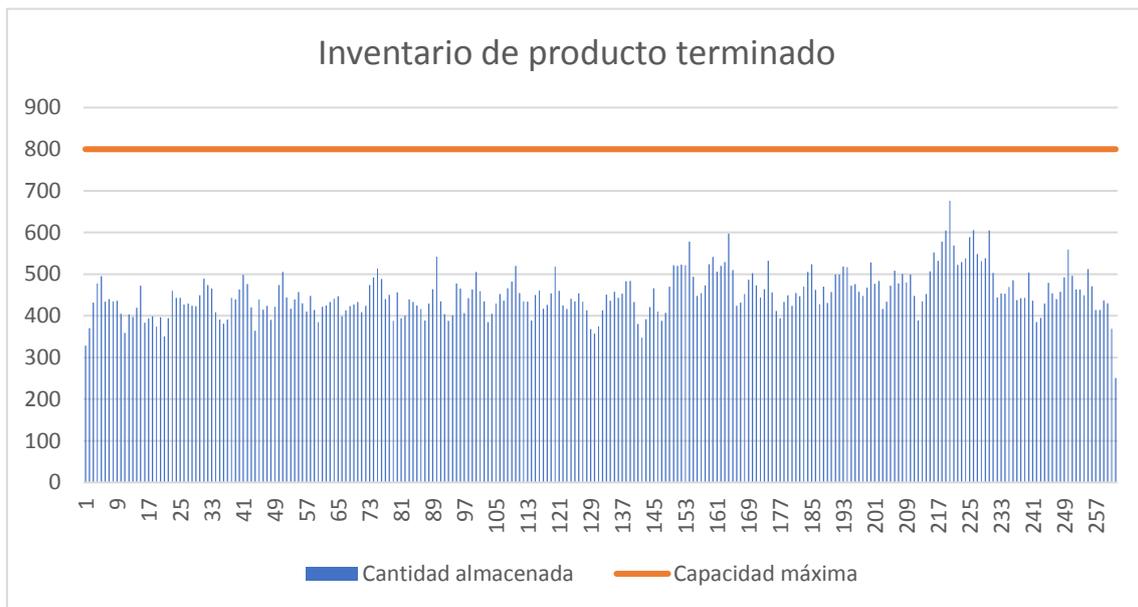


Figura 3.3-7: Cantidad de CAEs almacenados en el horizonte de planificación de un año, para la resolución heurística

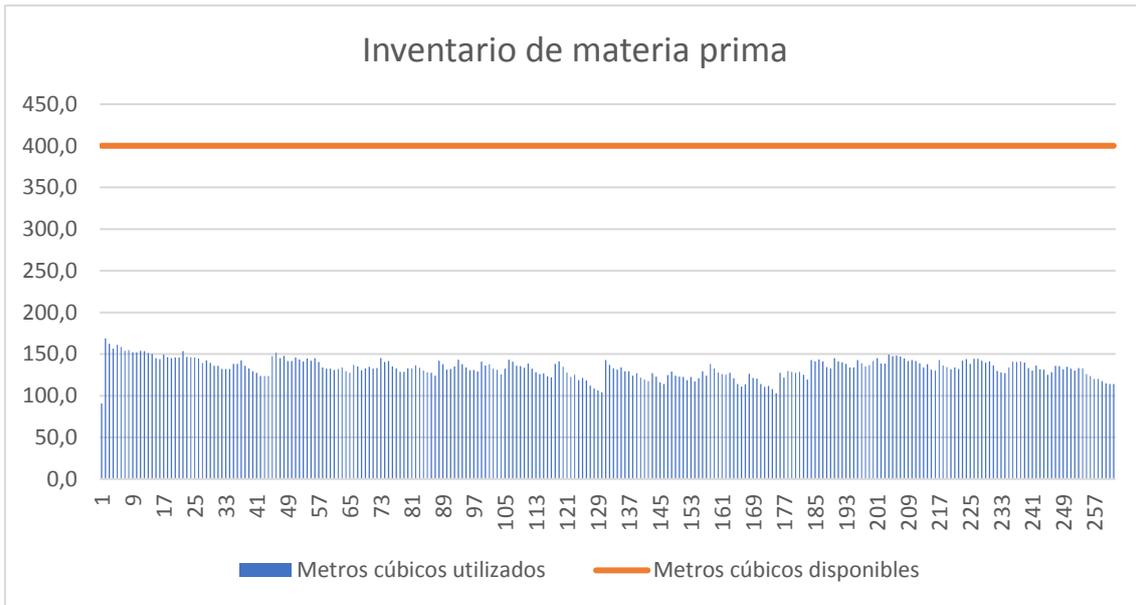


Figura 3.3-8: Cantidad de materia prima ocupada (en m^2) en el horizonte de planificación de un año, para la resolución heurística

De la Figura 3.3-7 y la Figura 3.3-8 se desprende que el mayor espacio ocupado por materia prima en todo el horizonte de planificación es de 169 metros cúbicos en el período dos, mientras que el de producto terminado es de 676 CAEs en el período 220. En ambos casos la cantidad almacenada es bastante menor que la capacidad máxima (la cual se representa con una línea horizontal naranja).

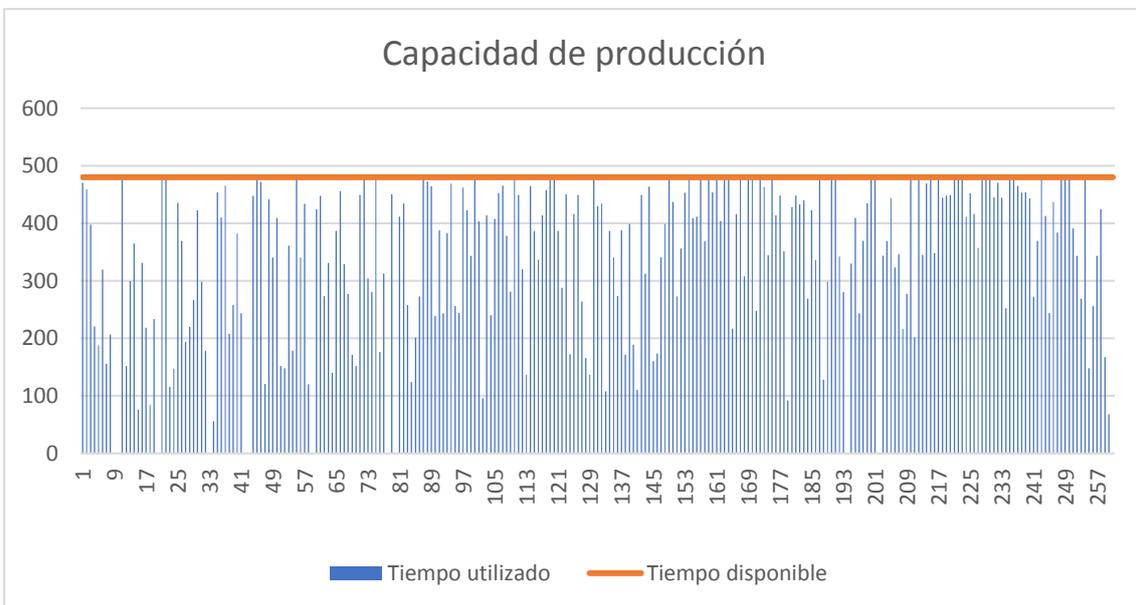
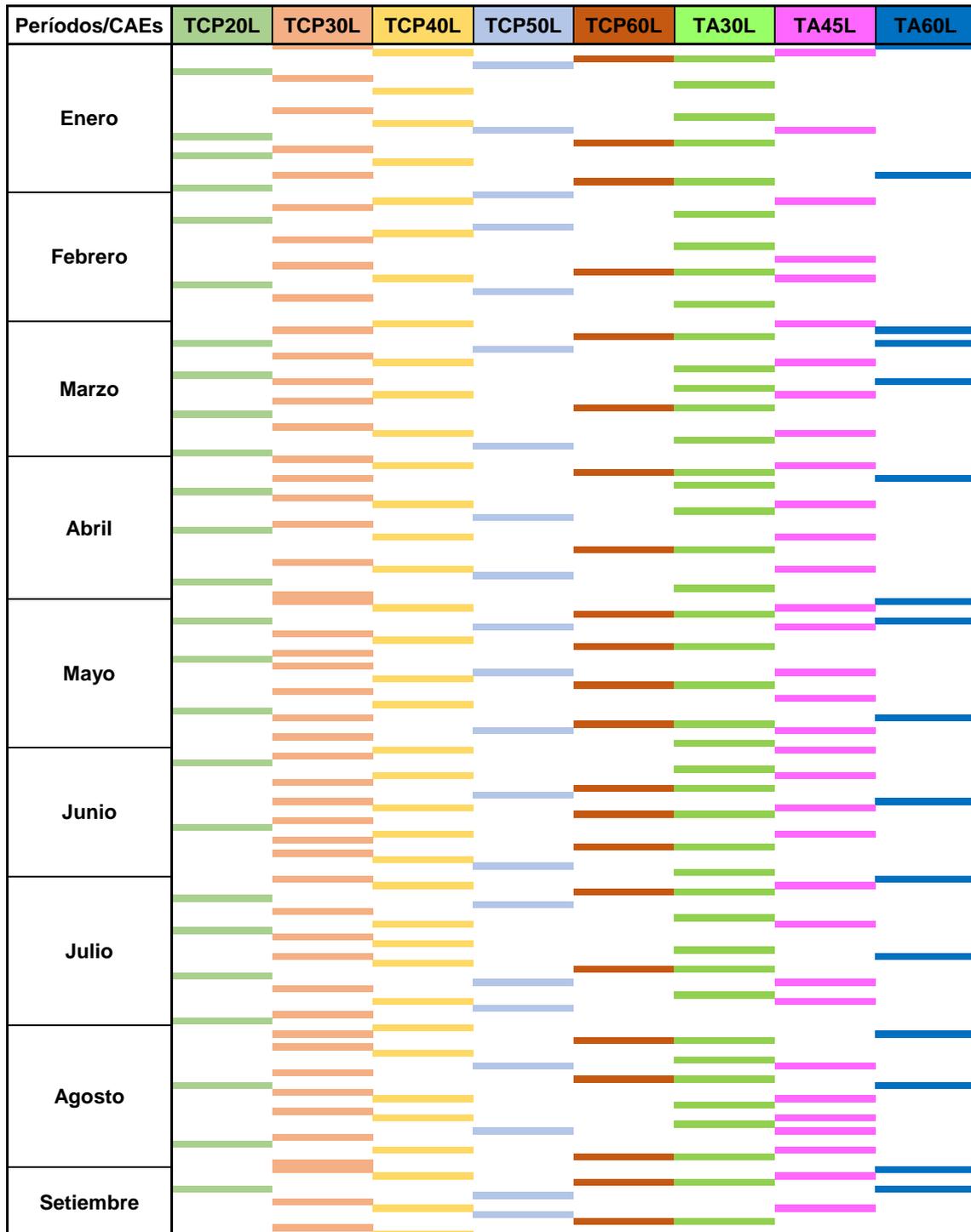


Figura 3.3-9: Capacidad de producción en minutos en el horizonte de planificación de un año, para la resolución heurística

A partir de la Figura 3.3-9 se puede evaluar si existe tiempo ocioso en la planta y cuándo se trabaja a capacidad máxima. La gráfica muestra el cumplimiento de la capacidad

máxima de producción de la planta y se observa que en 12 de ellos no se produce mientras que en 47 se produce a capacidad máxima. Al haber dividido el problema en subproblemas, se observa que en los últimos períodos de cada uno no se produce y que se cumple la demanda a partir del inventario. Se observa que en todos los subproblemas se produce lo mínimo indispensable para satisfacer la demanda diaria, ya que en el último período de cada uno de los subproblemas el inventario de producto terminado se corresponde con el inventario de seguridad.

En la Tabla 3.3-3 se presenta un diagrama de Gantt en donde se presenta la planificación sugerida por el método de resolución exacta.



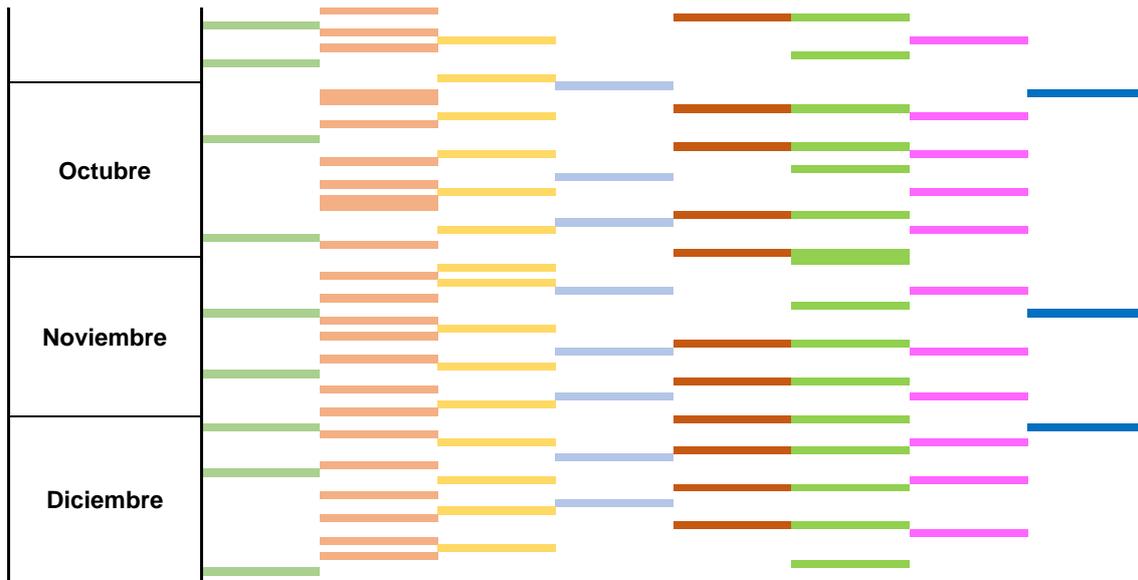


Tabla 3.3-3: Diagrama de Gantt que muestra en qué período se producen los distintos modelos de CAE, para la resolución heurística

En la Tabla 3.3-3 se representa en colores los modelos de CAEs que se deben producir en cada período. A través de este diagrama se puede verificar que se cumplen las restricciones (33), (34) y (35) de producción de la planta. A su vez, se observa que los modelos TCP30L y TCP40L son los que se deben producir en más períodos.

3.3.5.2. Método exacto

La solución encontrada tiene un valor objetivo de 17.751.974. A partir de los resultados obtenidos se hallan los costos de cada término de la función objetivo:

$$\sum_{i \in I} \sum_{t \in T} CF_t x_{ti} = USD 2.455.848$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{t \in T} K_t \delta_{ti} = USD 313.700$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{t \in T} HP s_{ti} = USD 2.508.400$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{m \in MP} HM_m z_{mi} = USD 11.806.826$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{p \in PR} KM_p \gamma_{pi} = USD 667.200$$

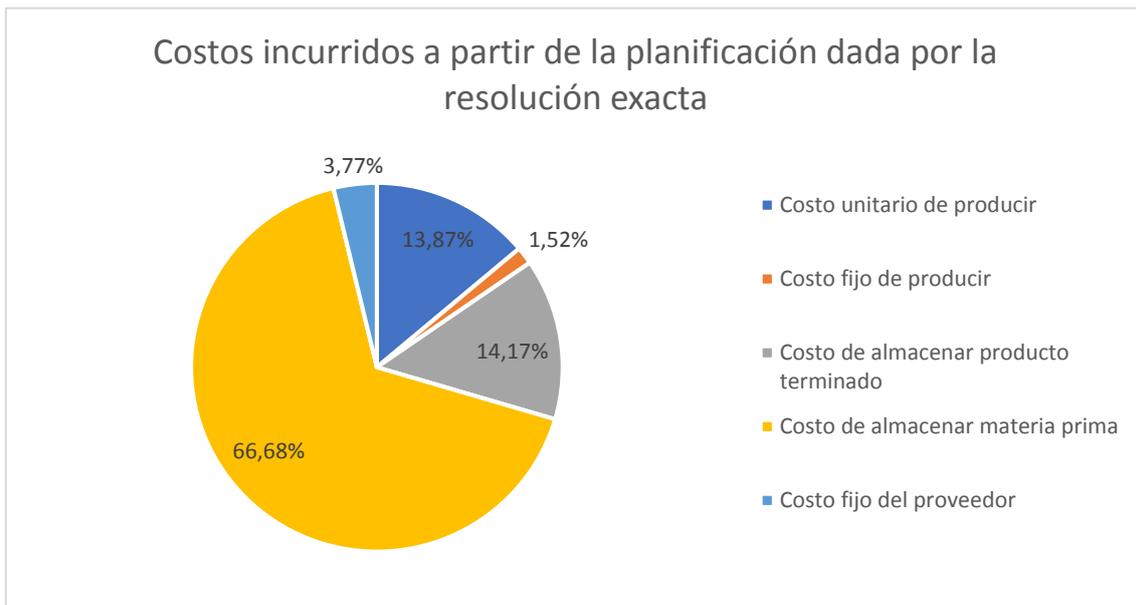


Figura 3.3-10: Grafico de torta que representa la distribución de los costos incurridos con la planificación dada por la resolución exacta del problema

Se observa de la Figura 3.3-10 que la distribución de costos es muy similar a la obtenida mediante el método heurístico. A continuación, en la Figura 3.3.-11 y Figura 3.3-12 se muestra el almacenamiento de materia prima y de producto respectivamente, en todo el horizonte de planificación de un año.

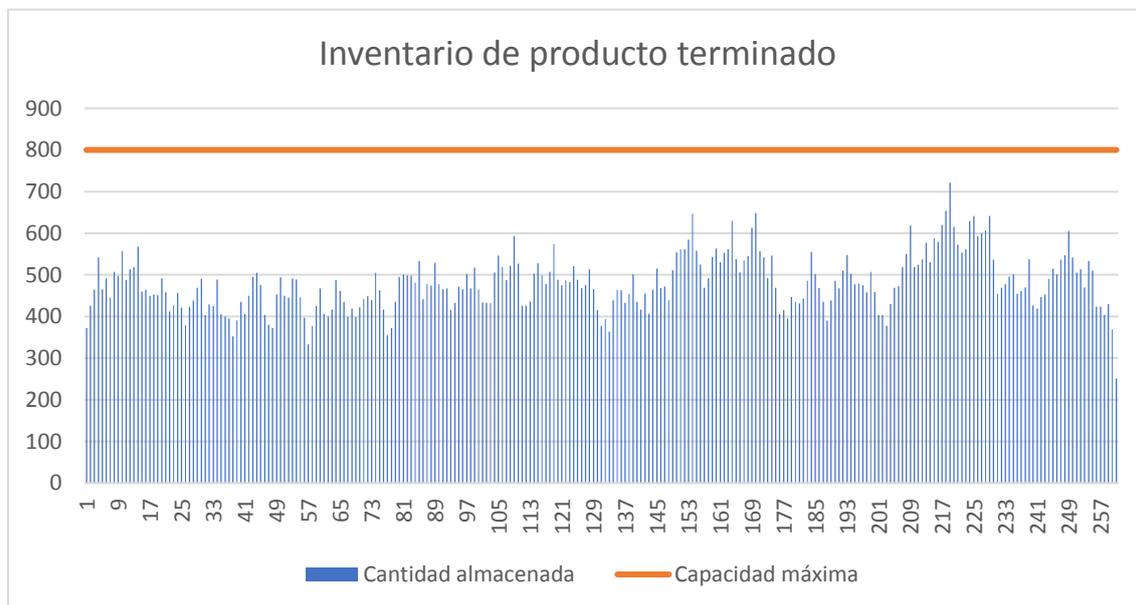


Figura 3.3-11: Cantidad de materia prima ocupada (en m^2) en el horizonte de planificación de un año, para la resolución exacta

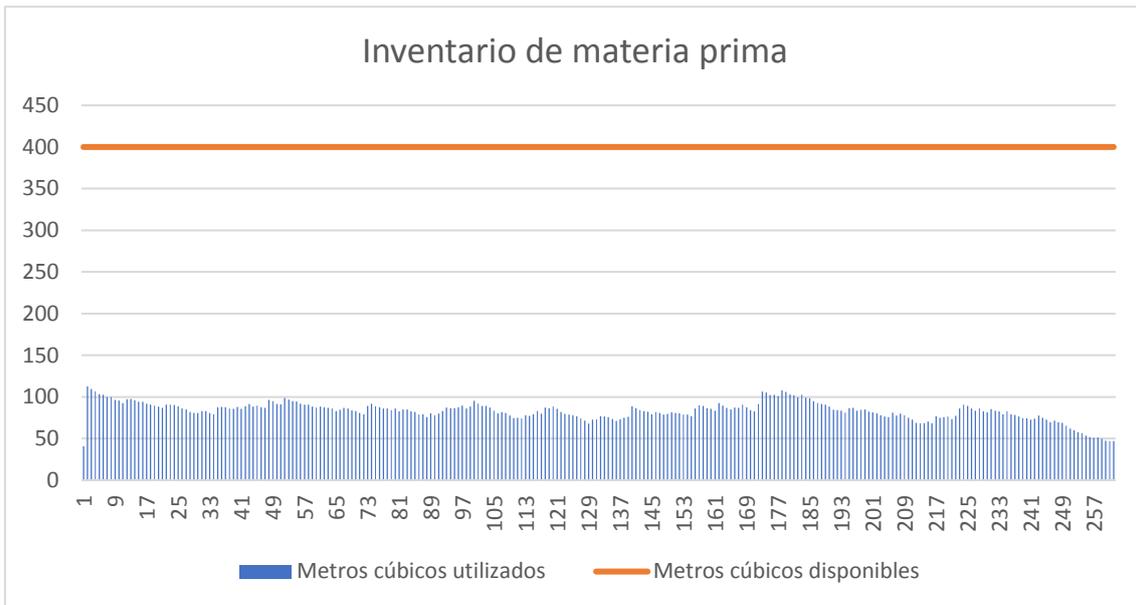


Figura 3.3-12: Cantidad de CAEs almacenados en el horizonte de planificación de un año, para la resolución exacta

De la Figura 3.3-11 y Figura 3.3-12 se desprende que el mayor espacio ocupado por materia prima en todo el horizonte de planificación es de 112,7 metros cúbicos en el período 2, mientras que el de producto terminado es de 721 CAEs en el período 219. Al igual que la solución obtenida mediante la resolución heurística, la cantidad máxima almacenada tanto de materia prima como de producto terminado es mucho menor que la capacidad máxima de la planta.

A continuación, se grafica en la Figura 3.3-13 la cantidad de CAEs del tipo TCP30L almacenado y su inventario de seguridad a mantener, el cual es invariante en el tiempo. Se realiza la presente gráfica con el fin de mostrar el comportamiento que tiene el inventario de los productos.

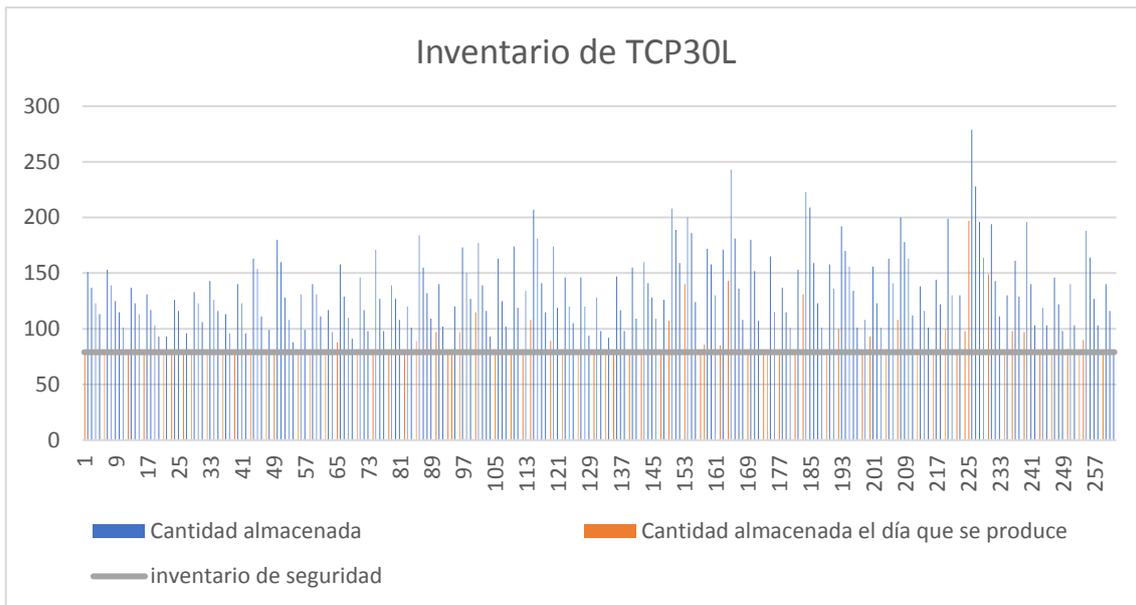


Figura 3.3-13: Cantidad de CAEs tipo TCP30L almacenados en el horizonte de planificación de un año y su inventario de seguridad a satisfacer. Las barras en color naranja representan el período en el que se produce y la cantidad

En los primeros 152 períodos se observa que en la mayoría de los días el inventario de producto almacenado es menor que el del período anterior, debido a que se incurre en el costo fijo de producir un determinado día y luego se satisface la demanda a partir del inventario. Este comportamiento es el concluido por Wagner y Within [17] para problemas no capacitados, detallado en la Sección 2.2.1, basado en la propiedad de inventario-cero. Sin embargo, esta conducta se debe a que las restricciones de capacidad no son limitantes en estos períodos. Ni el conjunto de datos, el tiempo de producción, la restricción de producción de la planta ni la capacidad máxima de almacenamiento restringen el problema. Contrariamente, se observa que a partir del período 153, las restricciones de capacidad comienzan a limitar, por ejemplo, en el período 153 se produce mientras que en el período 152 aún mantenía inventario de producto terminado de ese tipo de producto.

Se observa también de la Figura 3.3-13 que, al existir un compromiso entre los costos fijos de la producción y los costos de mantenimiento del inventario, la demanda puede ser satisfecha con producción del período, o a partir del inventario de períodos anteriores. Cualquier excedente en la producción es arrastrado al siguiente período como inventario.

A continuación, se grafica la capacidad de producción en minutos durante el horizonte de planificación.

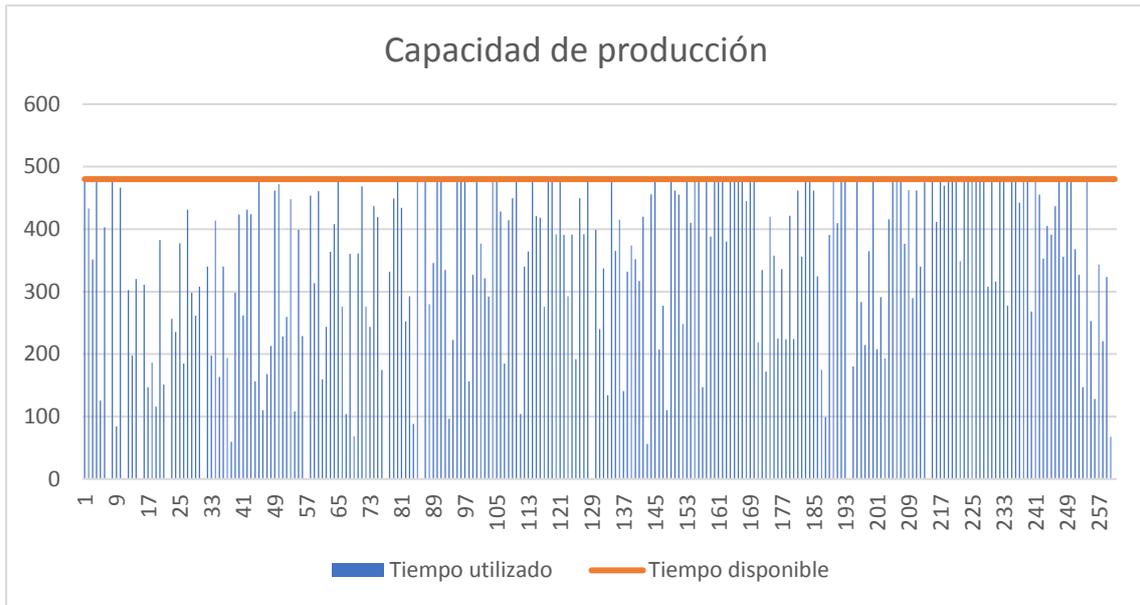


Figura 3.3-14: Capacidad de producción en minutos en el horizonte de planificación de un año, para la resolución exacta

De la Figura 3.3-14 se observa que, de los 261 períodos solo en 12 no se produce y que en 71 de ellos se produce a capacidad máxima.

En la Tabla 3.3-4 se presenta un diagrama de Gantt en donde se muestra la planificación sugerida por el método de resolución exacta.

Meses/CAEs	TCP20L	TCP30L	TCP40L	TCP50L	TCP60L	TA30L	TA45L	TA60L
Enero	Green bar	Orange bar	Yellow bar	Blue bar	Brown bar	Light green bar	Pink bar	Dark blue bar
	Green bar	Orange bar	Yellow bar	Blue bar	Brown bar	Light green bar	Pink bar	Dark blue bar
	Green bar	Orange bar	Yellow bar	Blue bar	Brown bar	Light green bar	Pink bar	Dark blue bar
Febrero	Green bar	Orange bar	Yellow bar	Blue bar	Brown bar	Light green bar	Pink bar	Dark blue bar
	Green bar	Orange bar	Yellow bar	Blue bar	Brown bar	Light green bar	Pink bar	Dark blue bar
	Green bar	Orange bar	Yellow bar	Blue bar	Brown bar	Light green bar	Pink bar	Dark blue bar
Marzo	Green bar	Orange bar	Yellow bar	Blue bar	Brown bar	Light green bar	Pink bar	Dark blue bar
	Green bar	Orange bar	Yellow bar	Blue bar	Brown bar	Light green bar	Pink bar	Dark blue bar
	Green bar	Orange bar	Yellow bar	Blue bar	Brown bar	Light green bar	Pink bar	Dark blue bar
Abril	Green bar	Orange bar	Yellow bar	Blue bar	Brown bar	Light green bar	Pink bar	Dark blue bar
	Green bar	Orange bar	Yellow bar	Blue bar	Brown bar	Light green bar	Pink bar	Dark blue bar
	Green bar	Orange bar	Yellow bar	Blue bar	Brown bar	Light green bar	Pink bar	Dark blue bar
Mayo	Green bar	Orange bar	Yellow bar	Blue bar	Brown bar	Light green bar	Pink bar	Dark blue bar
	Green bar	Orange bar	Yellow bar	Blue bar	Brown bar	Light green bar	Pink bar	Dark blue bar
	Green bar	Orange bar	Yellow bar	Blue bar	Brown bar	Light green bar	Pink bar	Dark blue bar

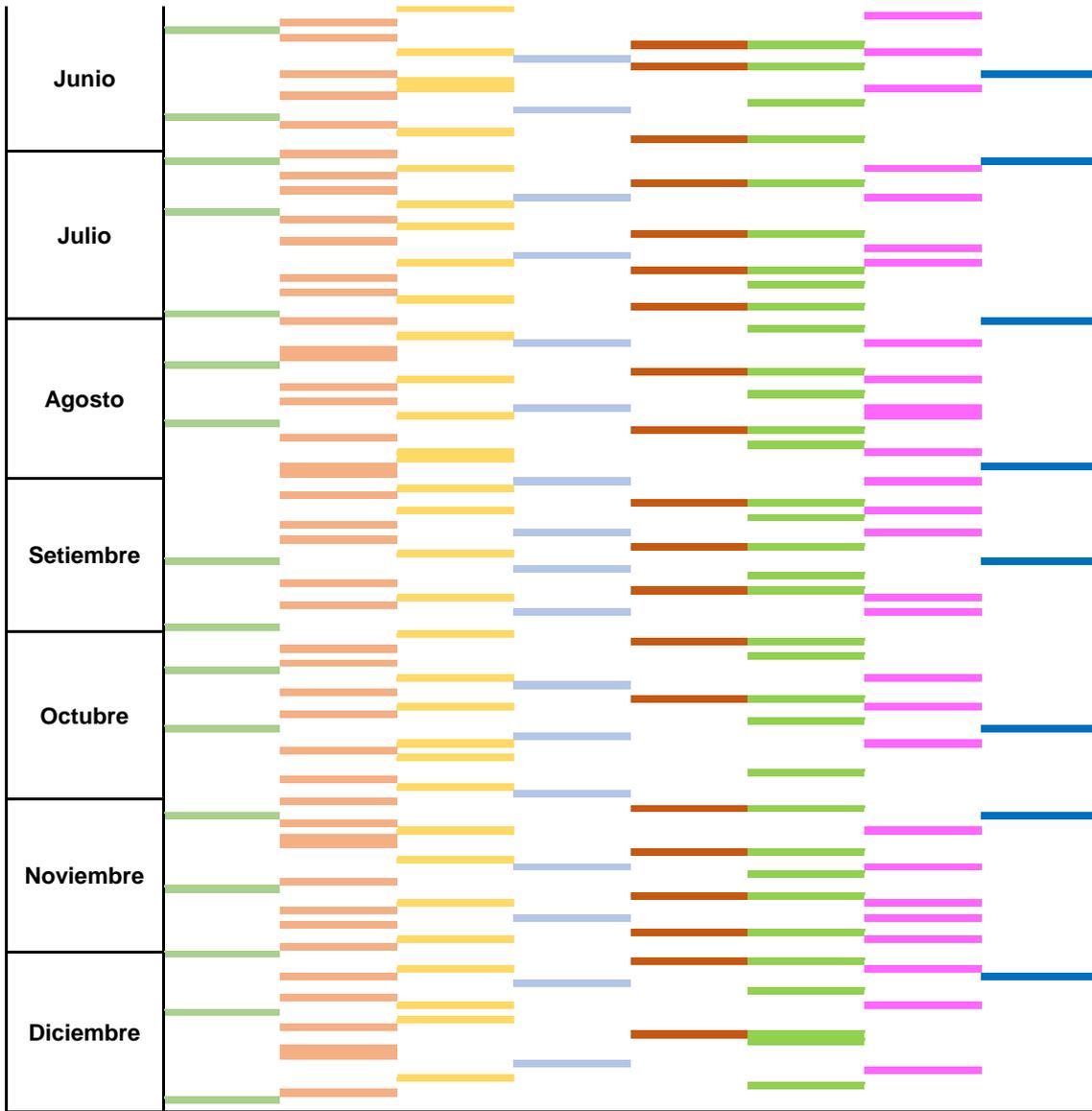


Tabla 3.3-4: Diagrama de Gantt que muestra en qué período se producen los distintos modelos de CAE, para la resolución exacta

Se verifica de la Tabla 3.3-4 el cumplimiento de las restricciones (33), (34) y (35) de producción de la planta. Adicionalmente se realiza un diagrama de Gantt del mes de enero para mostrar el comportamiento del costo del proveedor.

		P1				P2			P3				P4			P5	P6					P7	P8	P9	P10				
Periodos/Materia Prima		M1	M2	M5	M6	M3	M4	M9	M7	M8	M10	M11	M12	M13	M23	M14	M15	M16	M17	M18	M19	M20	M21	M22	M23				
Enero	1	█				█			█				█			█	█					█	█	█	█				
	2																												
	3																												
	4																												
	5																												
	6																												
	7																												
	8																												
	9																												
	10																												
	11	█	█	█	█	█																							
	12																												
	13																												
	14																												
	15																												
	16																												
	17																												
	18																												
	19																												
	20																												
	21	█	█																					█	█				
	22																												
	23																												

Tabla 3.3-5: Diagrama de Gantt que muestra en qué período se pide cual materia prima para el mes de enero

De la Tabla 3.3-5 se observa el comportamiento buscado al introducir un costo fijo de pedir a cada proveedor. Tal como se puede ver en los datos del problema en la Sección 1 del Anexo II, cada materia prima se obtiene de un solo proveedor. Por lo tanto, el solver evalúa el compromiso entre pedir las materias primas a un mismo proveedor en distintos períodos e incurrir en varios costos fijos del proveedor, o pedir de forma anticipada las materias primas en un mismo período e incurrir en el costo fijo del proveedor una sola vez, pero en mayores costos de almacenamiento. Se puede ver que en la mayoría de los casos pide en conjunto las materias primas del mismo proveedor.

Se debe tener en cuenta que cada proveedor tiene un plazo de entrega conocido (tal como se muestra en la Sección 1 del Anexo II), y por lo tanto, a los días de pedido mostrados en el diagrama de Gantt de la Tabla 3.3-5, se les debe restar el plazo de entrega del proveedor.

3.3.5.3. Conclusiones y sugerencias

Por un lado, se concluye acerca de los métodos de resolución utilizados, y por otro lado se exponen algunas sugerencias para la empresa basados en los resultados obtenidos del problema en cuestión.

Si bien los modelos se pueden implementar en computadoras con procesadores promedio, se constató que el tiempo que demora en dar una solución disminuye considerablemente con la velocidad del procesador que se utilice. En primer lugar, se intentó resolver el modelo mediante resolución exacta en las computadoras personales que poseemos, pero se constató que se necesitaba una capacidad de cómputo que excedía la disponible ya que no se logró obtener ninguna solución en 24 horas. Se optó entonces por un método de resolución heurística que requiere una capacidad de cómputo menor, asumiendo el costo de no tener garantías de encontrar una solución factible.

Finalmente se logró acceder a una computadora de mejor procesador y se resolvió exactamente en 24 horas. A continuación, se presenta una tabla que resume las características principales de ambos métodos de resolución utilizados para el problema con un horizonte de planificación de un año, discretizado en días (261 períodos).

Método de resolución	Software	Hardware	Valor de la función objetivo	Tiempo de ejecución
Exacta	AMPL - Gurobi 8.1.0	Sistema operativo Intel Core i7-4710HQ CPU @ 2.50 GHz, 16 Gb RAM	17.751.974	86.400 segundos (24 horas)
Heurística	AMPL - Gurobi 8.1.0	Sistema operativo Intel Core i5-4210U CPU @ 1.7 GHz, 6 Gb RAM	16.320.863	150.070 segundos (casi 42 horas)

Tabla 3.3-6: Comparación entre los métodos de resolución exacta y heurística. Para el caso de la resolución heurística se sumaron los valores objetivos y tiempos de cada subproblema

De la Tabla 3.3-6 se observa que el valor objetivo de la heurística es un 8,1% inferior al obtenido por el método de resolución exacta. Este valor está dentro del gap de dualidad obtenido de la resolución exacta (24,3%), por lo tanto, se concluye que el valor obtenido por la heurística es coherente. Es importante destacar que los resultados obtenidos mediante el método heurístico se consiguieron bajo las condiciones de software y hardware que se tenían al alcance. Adicionalmente, se acota que realizar una planificación de la producción con un horizonte de un año en 42 horas no se considera excesivo.

Para resolver el modelo mediante la heurística seleccionada, fue necesario en los primeros períodos de cada subproblema realizar una planificación manual de la

producción. Además, debido a la infactibilidad encontrada, se requirió un considerable esfuerzo para encontrar la raíz de la infactibilidad, encontrándose que había demanda que no podía ser satisfecha en noviembre y diciembre por las restricciones de capacidad de producción. No obstante, la planificación obtenida del método heurístico es económicamente más conveniente. Por todo lo anterior expuesto, se concluye que el desempeño de la heurística seleccionada fue bueno.

Con respecto a los resultados obtenidos del problema, se observa que los costos de almacenar materia prima son los más elevados. Este costo proviene del alto valor de tamaño mínimo de pedido que exigen los proveedores actuales de la planta, en comparación con los tamaños de los lotes diarios de Rivomark. Para disminuir estos costos se puede optar por proponerles a los proveedores reducir los tamaños mínimos de pedido, bajo las mismas condiciones de costos, o de lo contrario buscar otro proveedor con requisitos de venta más favorables.

En la planta hoy en día cuentan con 400 metros cúbicos para almacenar materia prima en racks, y usualmente tienen ocupado más de dos tercios del espacio total. Se desprende de este análisis que la planta hoy en día, previo a esta planificación sugerida, no está aprovechando su espacio de tan buena manera como la que se propone, incurriendo en costos muy altos de almacenamiento de materia prima.

En cuanto a la capacidad de producción diaria de la planta, se observa que para las dos planificaciones obtenidas, se tienen 12 períodos en los que no se produce. De los resultados de la heurística se observa que la mayoría de ellos son al final de cada mes y varios de ellos son en días consecutivos, mientras que la resolución exacta los sugiere más desperdigados en el tiempo y en ningún caso son en días consecutivos. Los días ociosos pueden servir de respaldo para prevenir algún eventual imprevisto, ya sea de aumento de la demanda o de algún día de producción que no se haya podido satisfacer el lote planificado.

3.4. Análisis de recuperabilidad de CAEs

En teoría, cualquier producto puede ser remanufacturado, pero ciertas características del producto pueden tener un efecto positivo o negativo en el proceso de remanufacturación, por lo que ciertos tipos de productos son más adecuados para remanufacturar que otros. Mediante el análisis realizado para este proyecto se puede concluir que los CAEs son productos aptos para la remanufacturación, ya que: 1) son lo suficientemente duraderos como para soportar múltiples ciclos de vida, 2) tienen un ritmo de evolución tecnológica lento, 3) un valor residual relativamente alto, 4) no están sujetos a decisiones de compra relacionadas con la moda y 5) son productos modularizados. Al ser productos modulares cuentan con componentes que se han ensamblado y que por lo tanto pueden desensamblarse y volverse a utilizar, recapturando el valor del producto.

Los procesos de remanufacturación modularizados permiten que la recuperación del producto sea más eficiente y rentable, y la cantidad de productos remanufacturados depende de los módulos críticos y más valiosos [36]. Por esta razón, se estudia cuáles

son los módulos críticos y más valiosos de los CAEs en Rivomark. Para lograr este cometido se analizan los módulos de los CAEs teniendo en cuenta los costos de las materias primas que se utilizan para su fabricación. Se eligen los módulos críticos tomando los CAEs de mayor tamaño, de cobre por un lado y de acero por otro, y listando ponderadamente los módulos con respecto a su costo. Para cada caso se realiza un diagrama de Pareto, es decir, una gráfica de columnas para organizar datos de forma que estos queden en orden descendente, de izquierda a derecha. Dicha gráfica permite asignar un orden de prioridad y muestra de acuerdo con el principio de Pareto que existen muchos componentes que cuestan poco frente a unos pocos que cuestan mucho. En la Figura 3.4-1 y Figura 3.4-2 se ilustran las gráficas de Pareto para el CAE más grande de cobre y de acero, respectivamente. De estas se pueden observar los pocos componentes críticos a la izquierda y la gran cantidad de no críticos a la derecha.

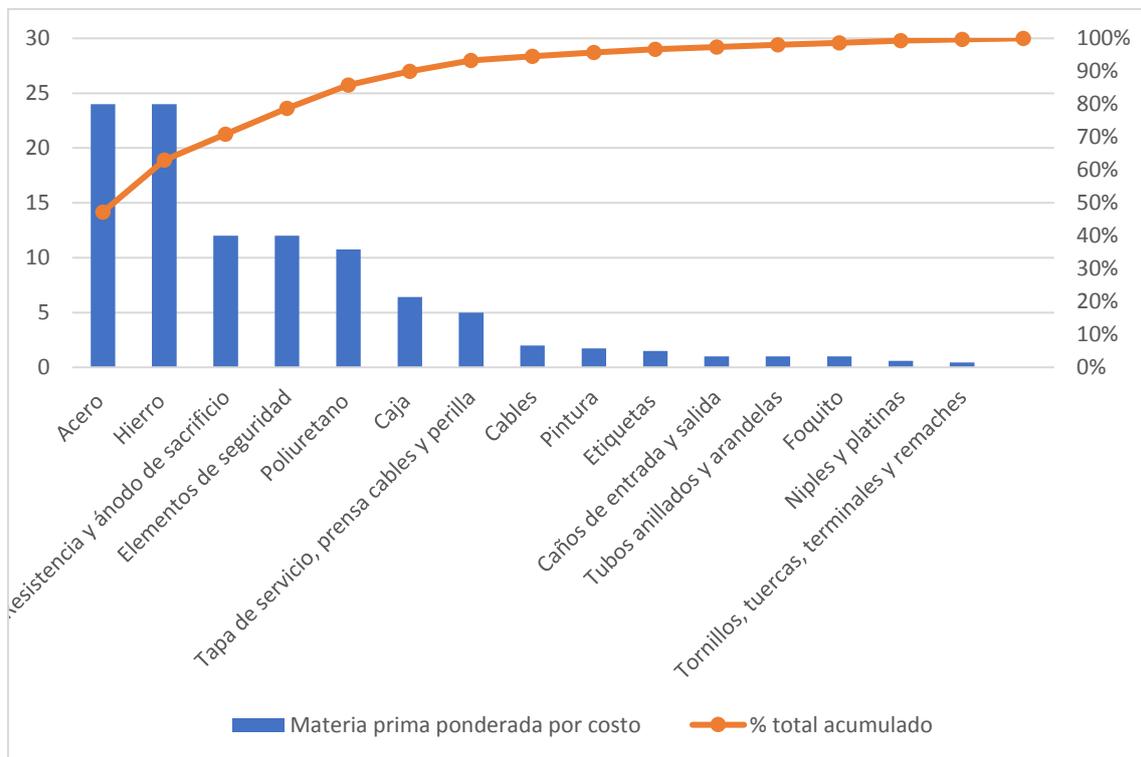


Figura 3.4-1: Gráfica de Pareto de la materia prima y la cantidad requerida para la producción del CAE más grande de cobre, ponderada por costo

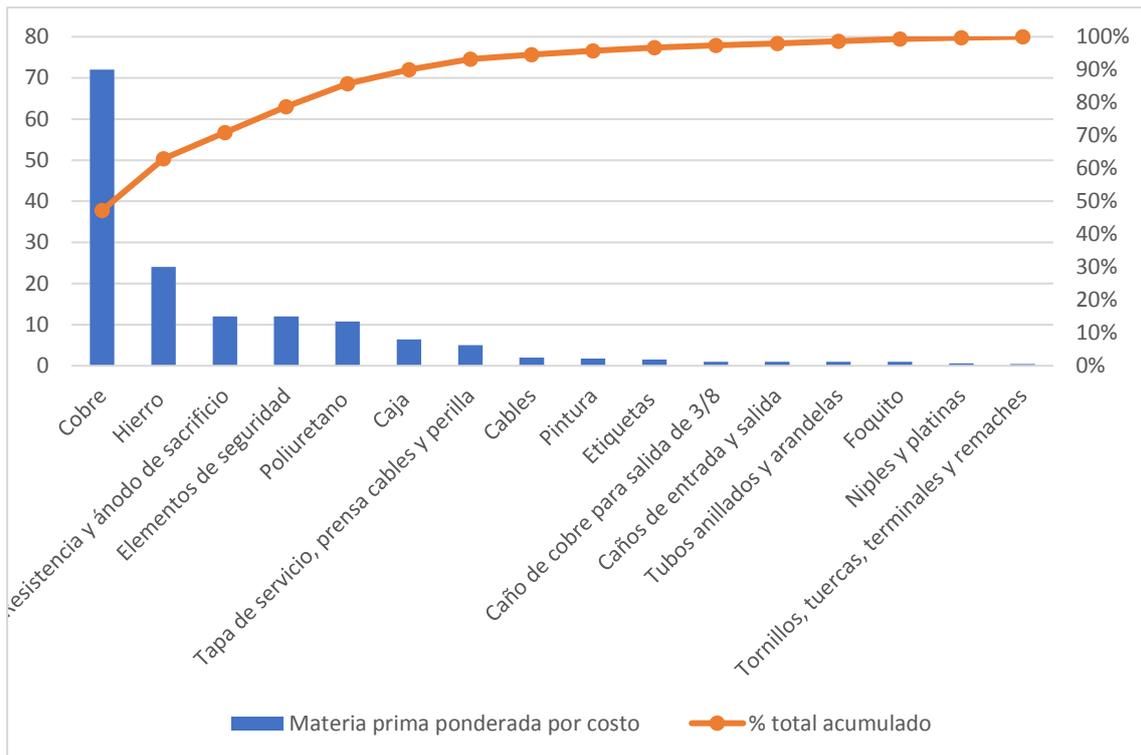


Figura 3.4-2: Gráfica de Pareto de la materia prima y la cantidad requerida para la producción del CAE más grande de acero, ponderada por costo

De la Figura 3.4-1 se desprende que las cuatro materias primas de la izquierda corresponden a 24% del total, y las mismas representan el 79% del costo de un CAE de cobre. Mientras que de la Figura 3.4-2 se observa que las tres materias primas de la izquierda corresponden al 20% del total, y las mismas representan el 71% del costo de un CAE de acero.

Por lo tanto, se consideran los módulos críticos o más valiosos de un CAE aquellos que contienen a las materias primas más costosas, es decir:

- Depósito de acumulación de cobre
- Depósito de acumulación de acero
- Envoltente exterior de chapa de hierro
- Resistencia y ánodo de sacrificio
- Elementos de seguridad

Se abordan distintos enfoques para estudiar la recuperabilidad de los módulos críticos.

Primeramente, se analiza la recuperabilidad de los elementos de seguridad en conjunto con los operarios de Rivomark. Estos elementos están constituidos por el termostato, el fusible térmico, la cámara de aire, la válvula de alivio y de retención, y el tapón fusible. El termostato es el primer elemento de seguridad que controla que la temperatura dentro del depósito de acumulación permanezca cercano a un valor prefijado. En segundo lugar, el fusible térmico actúa como respaldo del termostato en una temperatura máxima

de corte, por si falla el primero. Si ambos elementos fallaran, y el CAE no apagara su resistencia cuando la temperatura sea mayor a la de corte, el agua alcanzaría una temperatura cuya presión de vapor superaría a la presión de alimentación, por lo tanto, la presión que se generaría dentro del tanque sería muy elevada y podría rajarlo. Existe más de un mecanismo para que esto no ocurra. Uno de ellos es colocar en la parte superior del CAE una cámara de aire para absorber la dilatación. Otro es la colocación de una válvula de alivio la cual está diseñada con el fin de dejar escapar el exceso de presión. Esta válvula normalmente se encuentra cerrada y abre automáticamente cuando la presión que actúa sobre el asiento excede a la fuerza que le hace el resorte. Como tercer mecanismo se coloca una válvula de retención en la entrada de agua, estas sirven para regular la dirección de la corriente, es decir, impide que retroceda el agua de entrada. Usualmente la válvula de retención se encuentra en conjunto con la de alivio siendo una misma válvula que cumple ambas funciones [37]. Adicionalmente, es necesaria la colocación de un último elemento de seguridad, el tapón fusible, el cual funde y deja escapar el agua presurizada en exceso en caso de ser necesario.

Por todo lo anteriormente mencionado se considera que los elementos de seguridad son de suma importancia ya que, de aumentarse la presión por calor dentro del tanque, la consecuencia podría ser una explosión; pudiendo causar daños materiales o lesiones graves a individuos que se encuentren cerca. Un mantenimiento periódico de los elementos de seguridad es imprescindible para asegurar el correcto funcionamiento del CAE; en general los fabricantes recomiendan un mantenimiento anual para efectuar el reemplazo de estas piezas. Se concluye que no deben recuperarse los elementos de seguridad, en todos los casos deberán colocarse nuevos.

Para el estudio de la recuperabilidad del depósito de acumulación de cobre y de acero, de la envolvente exterior de chapa de hierro y de la resistencia; se analiza el desmontaje de un CAE con los mismos componentes y diseño que uno producido por Rivomark. El primer paso para desmontar un CAE es desatornillar la base metálica donde se encuentra la resistencia con el ánodo y el termostato y retirar la pieza en su totalidad. En la Figura 3.4-3 y Figura 3.4-4 se pretende mostrar la base metálica y el estado en el que se encuentra la resistencia y ánodo luego de 5 años de uso.

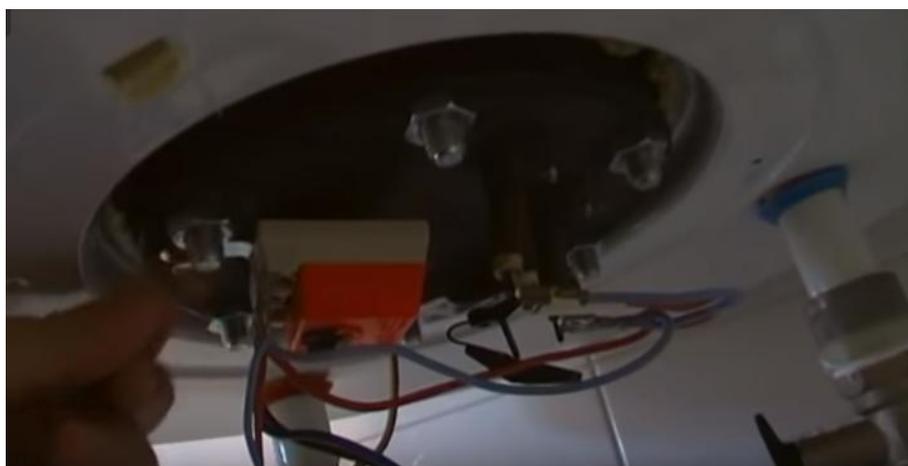


Figura 3.4-3 Extracción de la base metálica del CAE [45]



(a)



(b)

Figura 3.4-4: (a) Resistencia y ánodo calcificados extraídos de un CAE con 5 años de uso (b) Resistencia descalcificada luego de realizarle la limpieza [45]

En el territorio uruguayo, además de la normativa vigente sobre la calidad del agua, se adopta la Norma UNIT 833:2008 en donde se establecen rangos para considerar el agua apta para su distribución al consumidor. Entre otros parámetros, se define el valor máximo permitido para la Dureza Total en 500 mg/L (expresado en CaCO_3). Según dicha norma, las aguas que superen este valor se conocen como extremadamente duras. Según un análisis realizado por OSE en el 2013 y publicado en su sitio web, el grado de dureza de una muestra de agua bruta en Montevideo (aquella que no ha recibido ningún tratamiento) es de $86 \text{ mg/L de CaCO}_3$. Esta concentración en el agua se conoce como agua blanda. La generación de costras de carbonato de calcio (también costras de cal) aumenta conforme el agua es más dura. Dichas costras se pueden quitar de la resistencia con la ayuda de un martillo, de un cepillo metálico y de agua, y al cabo de aproximadamente 30 minutos se obtiene la resistencia sin las costras, pero aún con algunos restos de cal adheridos. Para culminar el proceso se puede limpiar la resistencia con ácido clorhídrico, ya que el ion cloruro libre en disolución reacciona rápidamente con metales como el calcio. En la resistencia blindada y en consecuencia en el ánodo de sacrificio, por estar situado a su lado, se obtienen las capas más gruesas de cal, ya

que se calientan directamente. Sin embargo, en el fondo del depósito de acumulación también se encuentran costras que deben ser quitadas para mantener la eficiencia del CAE.

En segundo lugar, en la Figura 3.4-5 se muestra la separación de la envolvente exterior de la espuma de poliuretano, lo cual resultaría imposible sin cortar la envolvente debido a la propiedad selladora del poliuretano. Por lo tanto, la chapa se corta y se dobla al desmontar el CAE lo que imposibilita la recuperación directa de la misma.



(a)



(b)

Figura 3.4-5: Separación de la envolvente exterior del aislante de espuma de poliuretano expandido [46]

Luego, para obtener al depósito de acumulación se debe romper el aislante de espuma de poliuretano, esto se puede realizar simplemente con la ayuda de un martillo ya que en el proceso productivo del CAE, previo a inyectar el poliuretano entre el depósito de acumulación y la envolvente exterior, se coloca un nylon tipo film recubriendo el tanque interior. Dicho nylon facilita enormemente el desprendimiento del aislante, tal como se observa en la Figura 3.4-6 (b), estimándose que se requiere un tiempo de un operario que, aunque aumenta con el tamaño de los tanques, ronda en un lapso de 15 a 20 minutos. Es importante observar que si no tuviera el nylon tipo film el trabajo de desprendimiento sería mucho más trabajoso, se estima que el triple de tiempo, tal como se muestra en la Figura 3.4-6 (a).



(a)



(b)

Figura 3.4-6: (a) Desprendimiento del poliuretano del depósito de acumulación, para un CAE cuyo diseño no incluye film [48] y (b) para uno que si lo incluye [47]

En la Figura 3.4-7 se muestra el tanque de acero y de cobre respectivamente, luego de haber desprendido todo el aislante de espuma de poliuretano.



(a)



(b)

Figura 3.4-7: (a) Tanque de acero tras haber desprendido todo el aislante [49] y (b) tanque de cobre tras haber desprendido todo el aislante [47]

La cantidad de óxido del tanque de acero depende del mantenimiento que se le haya realizado al CAE durante su vida útil, del tiempo que este haya estado en funcionamiento y a qué temperaturas trabajó. Existe una correlación directa entre la temperatura del agua y la formación de óxido; cuanto mayor es la temperatura del agua, mayor será el problema del óxido. Se ha observado que el óxido parece endurecerse y hacerse más difícil de limpiar a medida que pasa el tiempo [38]. La cal formada crea una capa aislante, la cual aísla el tanque del agua de refrigeración. Por lo tanto, el metal comienza a calentarse más y más a medida que se acumula la capa de cal. Esta temperatura excesivamente alta debilita el metal y acorta la vida útil del tanque [38]. Para el caso del tanque de cobre, como se observa en la Figura 3.4-7 (b), el mismo no resultó oxidado luego de ocho años de uso, debido a las propiedades intrínsecas de este metal. Los

tanques de cobre poseen una larga vida útil, una excelente resistencia a la corrosión y además no forma costras voluminosas de óxido [39].

Tras haber analizado el desmontaje de un CAE con las mismas características y diseño que uno fabricado por Rivomark y, teniendo en cuenta los módulos críticos y recuperables del CAE, se realiza un diagrama de flujo, tal como se muestra en la Figura 3.4-8, donde se detallan las distintas rutas posibles a seguir para remanufacturar o descartar un CAE usado y retornado.

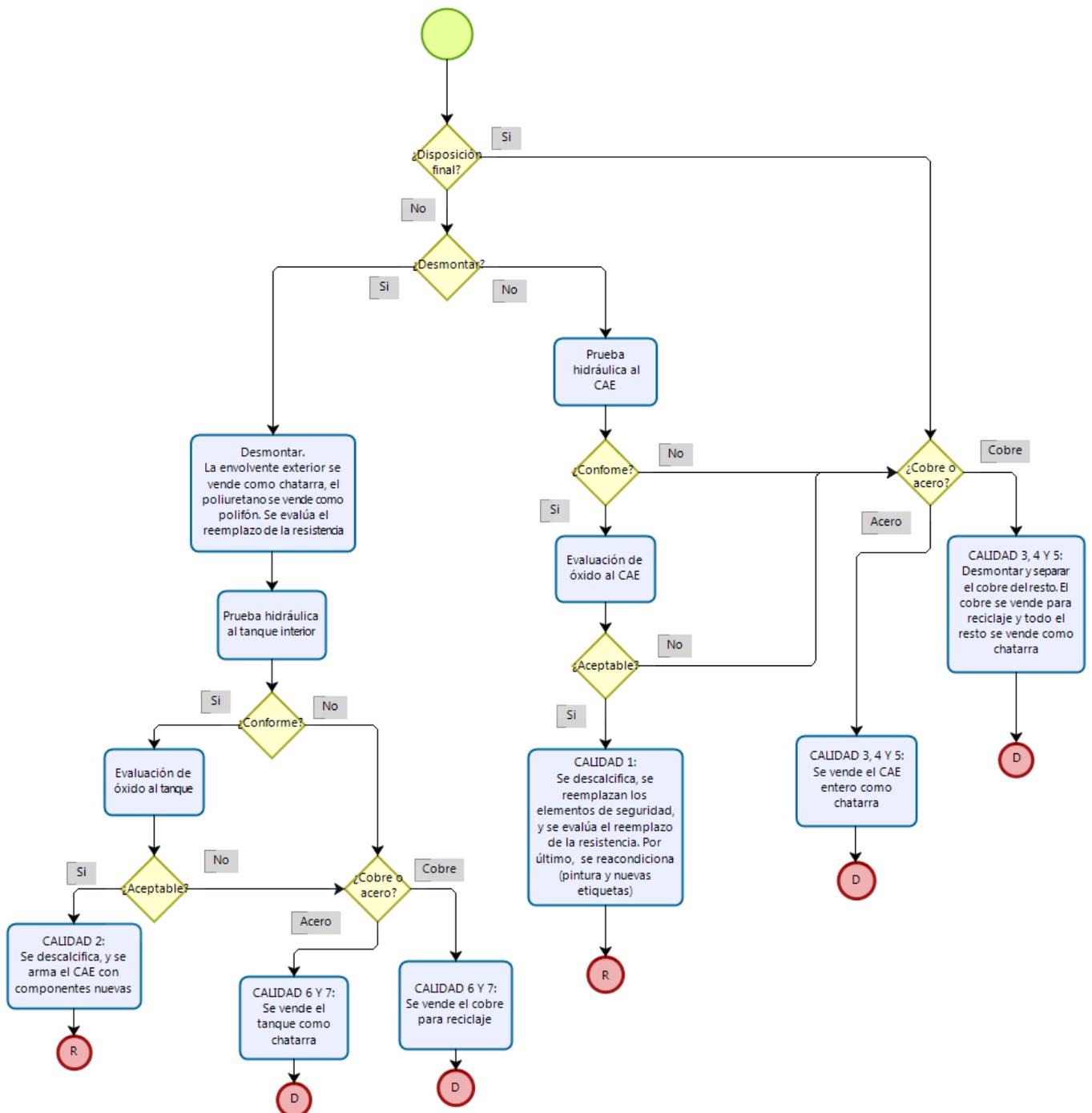


Figura 3.4-8: Rutas de recuperación de los CAEs retornados

Las distintas rutas en el diagrama se corresponden con las distintas calidades de los productos retornados que a su vez refieren a la dificultad para remanufacturar o descartar un retorno. Las calidades están ordenadas en forma ascendente de mejor a peor calidad. La calidad 1 y 2 se corresponden con las rutas que llevan a la remanufacturación mientras que las calidades 3, 4, 5, 6 y 7 son aquellas que llevan al descarte del producto. Dentro de las calidades de remanufacturación: la calidad 1 es la menos costosa mientras que la 2 la más costosa. De la misma forma para las calidades de descarte, 3 es la menos costosa y 7 la más costosa.

Todo CAE que es retornado a la planta debe someterse a una primera revisión visual minuciosa la cual incluye evaluación de corrosión, abollones y roturas de la parte exterior del CAE. A partir del resultado de esta inspección existen tres opciones posibles: el CAE debe ser desmontado, el CAE debe someterse a una prueba hidráulica y de funcionamiento o el CAE debe ser descartado.

Debido a que los CAEs retornados serían de las marcas que Rivomark fabrica, las presiones de diseño dadas por el fabricante son conocidas. Por lo tanto, la prueba hidráulica al CAE entero, es decir, sin desmontar, consistiría en llenarlo de agua y presurizarlo por la cañería de entrada con todo el resto de la instalación cerrada, hasta alcanzar una presión equivalente a dos veces la presión de diseño, según está establecido en la Norma UNIT-IEC 60335-2-21:2012 [24]. Con un manómetro instalado en la cañería de entrada se corrobora que no baje la presión en un tiempo establecido. La conformidad de la prueba hidráulica garantiza que el tanque no esté pinchado y a su vez mantiene la estructura original, es decir no está expandido, las paredes del tanque no se han deformado. La prueba de funcionamiento se lleva a cabo antes y después de la prueba hidráulica. La misma consiste en conectarlo a la tensión de red y verificar que encienda.

En el caso que la prueba hidráulica y de funcionamiento resulte no conforme, el retorno se corresponde con la calidad 4 y deberá ser descartado. En caso de realizarse prueba hidráulica y de funcionamiento a todo el CAE y que ambas resulten conformes, se realiza una evaluación de óxido del tanque interior. Esta evaluación consiste en primer lugar, y de forma cualitativa, en cotejar el estado del ánodo de sacrificio; si el ánodo se encuentra completamente consumido, esto será un indicador de que el tanque se encuentra oxidado, y, por el contrario, si el ánodo está en buenas condiciones significa que no hay una oxidación interna del tanque. Adicionalmente, debido al diseño y geometría de los CAEs fabricados por Rivomark, el deterioro del tanque no es uniforme en toda la superficie del tanque. Se verá más afectada la superficie que se encuentra más alejada del ánodo y esté en contacto con el agua. Por lo tanto, si del análisis cualitativo no se logra garantizar el estado del tanque, se pueden realizar otras evaluaciones de óxido de segundo nivel. Una de ellas consiste en medir la corriente de corrosión que circula entre el ánodo y la zona que se presume más afectada por el óxido, y mediante un estudio cuantitativo determinar la diferencia de potenciales, y así la corrosión interna. Otra alternativa es, una vez abierto el CAE, medir por dentro el espesor del tanque de la zona que se presume más afectada por el óxido con un medidor por ultrasonido y compararlo con el espesor nominal. Si finalmente la evaluación del óxido resulta aceptable, debe descalcificarse el CAE, reemplazarse los elementos de seguridad y el ánodo, y evaluar si es necesario reemplazar la resistencia o no. Este camino culmina en la calidad 1 que corresponde a la mejor calidad de remanufacturación. Si la evaluación del óxido no

resulta aceptable, el retorno refiere a la calidad 5 tal como se puede observar en la Figura 3.4-8 y deberá disponerse de distinta forma dependiendo si el tanque es de cobre o de acero.

En el caso de tener que descartar los CAEs, si el tanque interior es de cobre se desmonta para separar el tanque interior y venderlo para reciclarlo, y el resto venderlo como chatarra para otra industria. El cobre puede ser totalmente reciclado y reutilizado una y otra vez, sin que pierda ninguna de sus propiedades. Una de las grandes ventajas de reciclar cobre es que se ahorra hasta un 85% de energía en relación con la producción primaria [40]. Por el contrario, si el tanque interior es de acero se vende todo el CAE como chatarra. Por lo tanto, existe un valor de rescate al vender los descartes a otra industria que depende del tipo de CAE.

Si como resultado de la inspección visual se concluye que el CAE debe ser descartado, se trata de un retorno de calidad 3; este es el camino más sencillo con calidad de descarte. Se deberán desmontar los CAEs con tanque de cobre para reciclarlos en otra industria y el resto de los componentes venderlos como chatarra. Si el tanque es de acero, se vende en su totalidad como chatarra.

En el caso que deba desmontarse el CAE, la envolvente exterior de chapa de hierro no podrá ser reutilizada para la remanufacturación en ningún caso, ya que debe romperse, al igual que la espuma de poliuretano. La chapa de hierro se recomienda venderla como chatarra y el picadillo de espuma de poliuretano expandido puede utilizarse como polifón en otra industria. Luego del desmontaje, se evalúa el reemplazo de la resistencia y se realiza una prueba hidráulica al tanque interior. En el caso que la prueba hidráulica resulte no conforme se llega a la calidad 6 por lo que el CAE deberá ser descartado. Si ésta resulta conforme, se realiza una evaluación de óxido al tanque interior. Al resultar en un valor aceptable se culmina en una calidad 2 de remanufacturación, para esto se deberá descalcificar el tanque, y rearmar el CAE con componentes nuevos. Mientras que, si la evaluación de óxido resulta en un valor inaceptable, la ruta se corresponde con la calidad 7 de descarte y refiere al retorno de peor calidad.

3.4.1. Recomendaciones de diseño de CAEs

De acuerdo con lo mencionado en la Sección 2.1 se considera de suma importancia diseñar un producto teniendo en cuenta su futura recuperación, considerando los beneficios económicos y ambientales a largo plazo. Adicionalmente, se considera la operación de desmontaje un factor muy importante para la recuperación de productos usados ya que puede ser el proceso que determina la viabilidad de su recuperación [3].

Teniendo en cuenta lo anterior y en base al diseño actual de los CAEs de Rivomark, se detallan a continuación algunas recomendaciones que se consideran importantes para beneficiar la remanufacturación.

Recomendaciones dentro del depósito de acumulación:

Uno de los componentes más importantes que influye en la vida útil del CAE es el ánodo de sacrificio, ya que el mismo evita la corrosión de los componentes metálicos sumergidos. Tal como se muestra en la Figura 3.4-9, la ubicación normal del ánodo es junto a la resistencia. Por lo que la cal acumulada en torno al ánodo se deposita a su vez alrededor de la resistencia, como se puede ver en la Figura 3.4-10, lo que provoca varios inconvenientes como la disminución en el rendimiento del CAE. Este diseño impide que el ánodo pueda ser revisado o sustituido fácilmente sin realizar un mantenimiento de la resistencia; retirándola y realizándole una limpieza o en algunos casos debiendo sustituirla por una nueva. La vida útil del CAE termina reduciéndose notablemente. La ubicación del ánodo en el CAE es, pues, un factor que se debe tener en cuenta al elegir el diseño óptimo del producto.

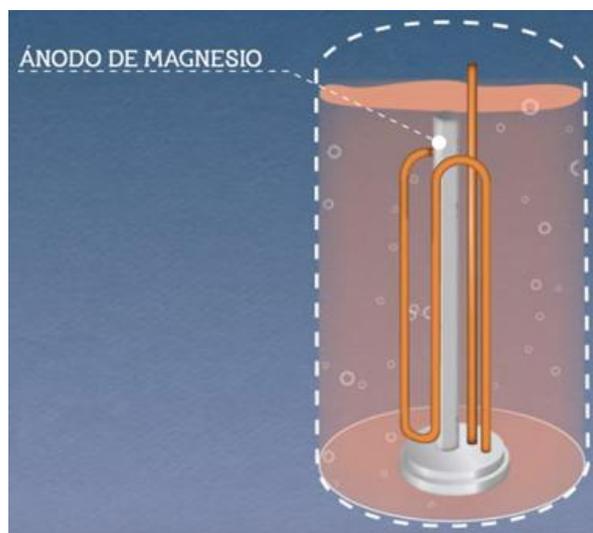


Figura 3.4-9: Ubicación normal del ánodo de sacrificio [50]

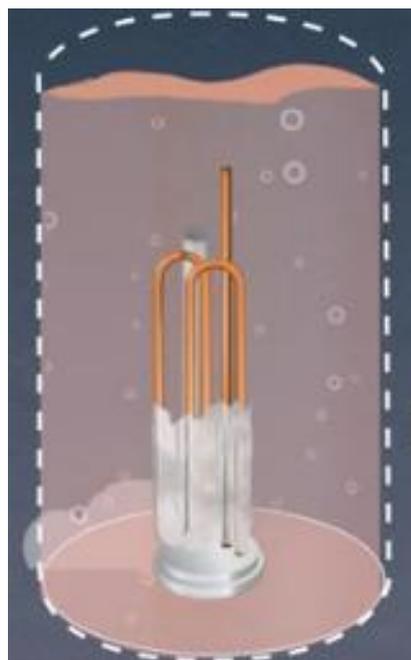


Figura 3.4-10: Proceso de calcificación [51]

Una empresa española fabricante de CAEs, Cointra [41], realizó un rediseño de sus productos considerando estos inconvenientes. Tal como se muestra en la Figura 3.4-11, el rediseño consiste en colocar el ánodo de sacrificio separado de la resistencia, lo que evita el problema de la aparición de costras de cal alrededor de la resistencia. Con este nuevo diseño la resistencia permanece siempre en contacto directo con el agua y garantiza la eficacia en la transmisión de calor al agua. Asimismo, el ánodo puede ser revisado y sustituido periódicamente de una forma sencilla sin necesidad de realizarle un mantenimiento a la resistencia

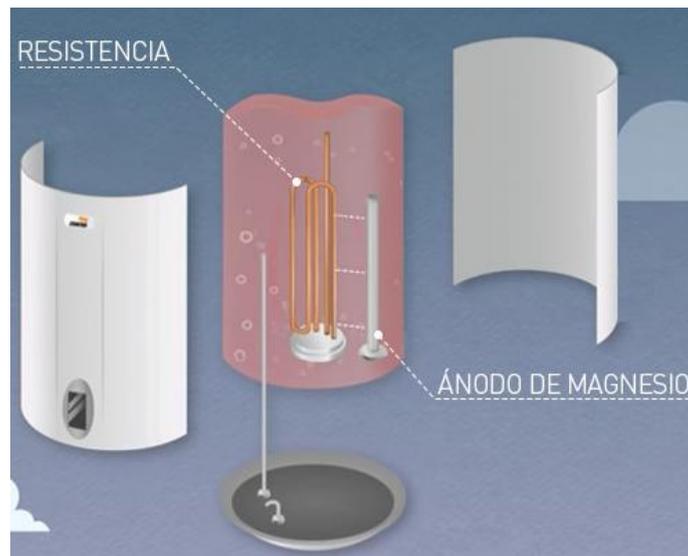


Figura 3.4-11: Colocación del ánodo de sacrificio separado de la resistencia [41]

Otra alternativa que considera Cointra en el diseño del CAE para mejorar la protección catódica en el depósito de acumulación es la colocación de dos ánodos, como se muestra en la Figura 3.4-12. Los mismos van enroscados de forma independiente en la parte superior e inferior en esquinas opuestas del depósito y no se encuentran junto con la resistencia. Las ventajas de disponer de dos ánodos de sacrificio es que maximiza la protección anticorrosiva en el depósito, prolongando la vida útil del CAE. A su vez, simplifica la operación de revisión y/o sustitución de las barras anódicas al no encontrarse juntas a la resistencia, ya que evita el mantenimiento de descalcificación de esta última. Otro beneficio es que para la revisión del ánodo superior no es necesario el vaciado del tanque [42].



Figura 3.4-12: Doble sistema de protección anódica anticorrosión [42]

Existen otras alternativas para prevenir o disminuir la gran costra de cal que se adhiere a la resistencia y a otras partes metálicas dentro del depósito de acumulación. Una opción es utilizar un ablandador de agua que elimina el bicarbonato de calcio y magnesio del agua antes de permitir que el agua ingrese al tanque. Sin embargo, esta solución no es del todo conveniente cuando se usan grandes cantidades de agua; y a menudo resultan inoperables debido a la falta de un servicio y mantenimiento apropiado [27]. Otra alternativa posible es la colocación de un recubrimiento especial anti calcáreo que proporciona a la resistencia una propiedad que evita la adhesión de la cal en su superficie, asegurando de este modo su larga duración y adecuado funcionamiento durante toda la vida útil del CAE [43].

Laars, una empresa fabricante de CAE estadounidense, encontró una solución innovadora para el problema de la calcificación dentro del depósito de acumulación. La empresa realizó un diseño en el que todas las superficies de calentamiento se limpian mecánica y automáticamente para evitar la formación de cal. El diseño se basa en una premisa relativamente simple: las velocidades adecuadas del agua se mantienen en todas las superficies calientes para evitar la acumulación de cal. A medida que la cal se forma en la superficie, el agua la erosiona simultáneamente. Sin embargo, esto requiere un equilibrio bastante delicado, ya que, si la velocidad es demasiado baja para la cantidad de cal que se está formando, la capa de cal se seguirá acumulando en las paredes de los elementos metálicos. Por lo tanto, cuanto más dura es el agua, mayor debe ser la velocidad que debe mantenerse [27].

Los CAEs dependen del revestimiento de las paredes del tanque interior y de la protección catódica para evitar la corrosión. Si el ánodo no se comprueba y/o reemplaza regularmente, se pierde la protección contra la corrosión. Asimismo, la eficiencia disminuye drásticamente a medida que las superficies internas comienzan a acumular

una capa de cal. La solución que encontró Laars ante estos inconvenientes fue eliminar la protección catódica dentro del depósito de acumulación, colocando una resistencia totalmente de cobre, ya que el cobre es uno de los metales disponibles más resistentes a la corrosión. El beneficio es que la protección no depende de que alguien inspeccione y reemplace las barras anódicas periódicamente [27].

Se concluye que existen diversas formas de evitar la calcificación de la resistencia y la corrosión dentro del depósito de acumulación. Se considera que aplicando una o varias de estas alternativas se puede mejorar no solo el rendimiento energético sino también la calidad de los CAEs al EoL.

Recomendaciones con respecto al aislante:

Desde el punto de vista de la recuperación, la lana de vidrio trae consigo más beneficios que la espuma de poliuretano. La propiedad de sellante de la espuma provoca que al desmontar la capa aislante del tanque, la espuma se rompa y por lo tanto se incurra en mayores tiempos y costos de desmontaje. Si bien el poliuretano tiene mejor rendimiento energético, la lana de vidrio podría desmontarse más fácil.

3.5. Planificación de la producción con opciones de retorno

Luego de haber estudiado la recuperabilidad del CAE y de sus componentes, se describe el problema de planificación de la producción con opciones de retorno. En la presente sección se detallan las principales características y suposiciones que se establecieron para abordar el problema, así como el modelo matemático desarrollado y su resolución.

En líneas generales se mantienen para el problema con opciones de retorno las particularidades y restricciones del problema sin opciones de retorno de la Sección 3.3. Para facilitar la resolución del modelo no se consideran los parámetros, variables y restricciones relacionados con la gestión de suministro (compra, uso y almacenamiento de materia prima). Se considera que esta última agrega valor para el problema sin opciones de retorno, pero no para el objetivo que se desea alcanzar modelando el problema con opciones de retorno.

La implantación del sistema con opciones de retorno se llevaría a cabo en una línea de recuperación separada a la de producción y por ende se contaría con un tiempo disponible en la línea de recuperación independiente al de producción. Por lo tanto, se considera que, si bien es necesario contar con inventario de seguridad de producto terminado para amortiguar cualquier circunstancia no prevista, al contar con dos líneas separadas como funcionan una de respaldo de la otra, la cantidad necesaria es menor y depende de la cantidad de productos usados que sean retornados. Sin pérdida de generalidad, para el desarrollo del modelo, no se incorpora la restricción del inventario de seguridad de modo de facilitar la resolución, ya que esta no afecta la optimización. Sin embargo, si se tendrá en cuenta en la etapa de análisis de los resultados ya que implica un costo extra de almacenamiento.

La calidad de los retornos se asume heterogénea, y por lo tanto, se clasifican en diferentes niveles de calidad según la dificultad que implica la remanufacturación o el descarte del mismo. Los retornos remanufacturables serán considerados de mejor calidad en comparación con los retornos a descartar. A su vez, dentro de los retornos a remanufacturar y a descartar se pueden distinguir varias calidades. Cuanto menor sea la calidad del producto retornado más costosa será la remanufacturación o el descarte. A raíz de esto, se incorpora una actividad de habilitación de los retornos, la cual clasifica los retornos en una de las calidades predefinidas.

Los costos asociados al problema son unitarios y fijos de preparación, y consisten en costos de producir, de habilitar los retornos, de remanufacturar y de descartar. Adicionalmente se cuenta con costos unitarios de mantener inventario de productos retornados, retornados luego de habilitados y de productos terminados. Todos los costos se asumen estacionarios, es decir, igual para todos los períodos. A su vez, se asume un valor de rescate para los retornos descartables, que hace referencia a la ganancia que se tiene por deshacerse del CAE, el cual dependiendo si es de cobre o de acero puede reciclarse o venderse como chatarra respectivamente.

El problema planteado en esta sección puede considerarse como una extensión del problema con retornos de calidad heterogénea introducido en Piñeyro (2016) el cual se amplía en este proyecto con la actividad de disposición final y una actividad de habilitación de los retornos. En la Figura 3.5-1 se presenta un diagrama del flujo de artículos para el sistema de inventarios del problema considerado.

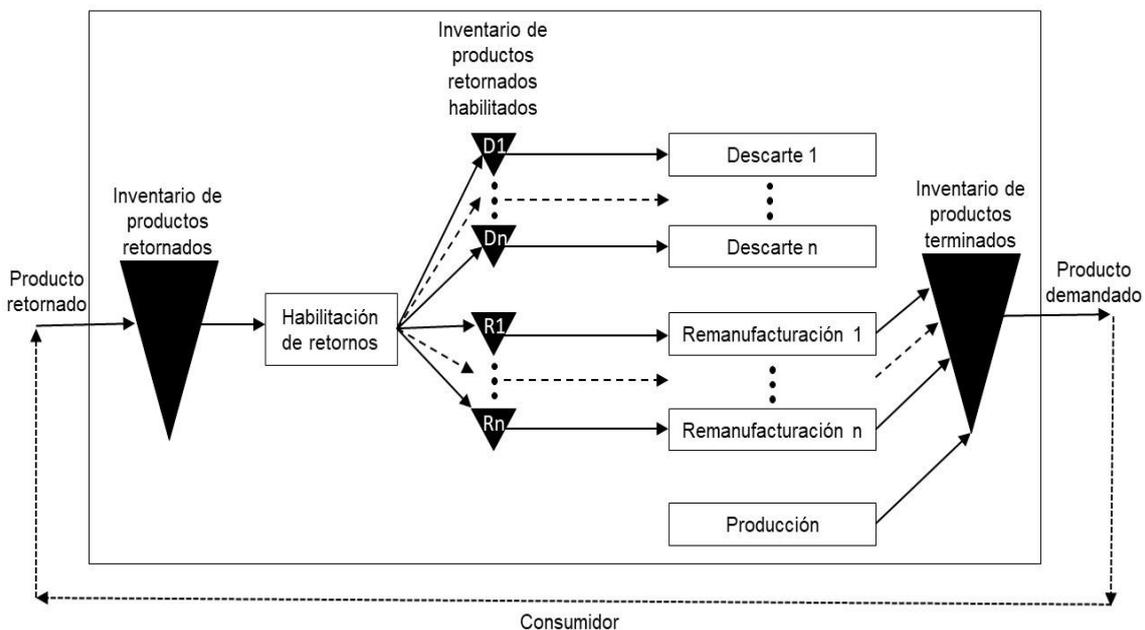


Figura 3.5-1: Flujo de productos en el sistema con opciones de retornos

Tal como se muestra en la Figura 3.5-1 a demanda se deberá satisfacer sin retrasos a partir de productos nuevos o remanufacturados. Asimismo, se observa que existen tres tipos de inventarios distintos, esquematizados con triángulos negros. El de la izquierda representa los productos retornados y el de la derecha el inventario de productos

terminados. Los del medio refieren a los productos retornados habilitados y clasificados en las distintas calidades. Una vez que se incurre en el costo de habilitación de retornos, se conoce el porcentaje de cada calidad, es decir, cada producto retornado queda definido por su calidad. Dependiendo de la cantidad a habilitar de cada tipo de CAE, se tendrán diferentes cantidades de cada calidad, según los valores del porcentaje conocido.

3.5.1. Modelo matemático

Al igual que el problema sin opciones de retornos, el problema se describirá mediante un modelo determinístico con demanda y retornos dinámicos en un horizonte de planificación de un año, discretizado en días.

3.5.1.1. Objetivo

El objetivo es determinar las cantidades a inspeccionar, producir, remanufacturar y descartar en cada período durante el horizonte de planificación para satisfacer la demanda a tiempo, minimizando la suma de todos los costos involucrados.

3.5.1.2. Conjuntos

- TC : Conjunto de productos de cobre
- TA : Conjunto productos de acero
- $T = TC \cup TA$: Conjunto de todos los productos
- TP : Conjunto que asigna a cada producto de acero $ta \in TA$ los productos de cobre $tc \in TC$ que pueden realizarse en el mismo período de acuerdo a las restricciones de producción de la planta
- I : conjunto que corresponde a los períodos
- Q : conjunto que corresponde a las distintas calidades de los productos retornados
- QR : conjunto que corresponde a las distintas calidades de los productos retornados a remanufacturar
- QD : conjunto que corresponde a las distintas calidades de los productos retornados a descartar
- QB : conjunto que corresponde a una calidad cualquiera
- $QA = Q \setminus QB$

3.5.1.3. Parámetros

- C_t^p : Costo unitario de producción del producto $t \in T$
- C_{qt}^r : Costo unitario de remanufacturación del producto $t \in T$ retornado con calidad $q \in QR$
- C_{qt}^d : Costo unitario de descarte del producto $t \in T$ retornado con calidad $q \in QD$
- G_{qt}^d : Valor de rescate del descarte del producto $t \in T$ retornado con calidad $q \in QD$

- K_t^p : Costo fijo de preparación de la producción del producto $t \in T$
- K_{qt}^r : Costo fijo de preparación de la remanufactura del producto $t \in T$ retornado con calidad $q \in QR$
- K_{qt}^d : Costo fijo de preparación del descarte del producto $t \in T$ retornado con calidad $q \in QD$
- K^e : Costo fijo de habilitar los productos retornados
- C_t^e : Costo unitario de habilitar el producto $t \in T$ retornado
- H^u : Costo unitario de mantener inventario de producto retornado
- H_q^e : Costo unitario de mantener inventario de producto retornado con calidad $q \in Q$ luego de ser habilitado
- H^s : Costo unitario de mantener inventario de producto terminado
- D_{ti} : Cantidad del producto $t \in T$ demandado en el período $i \in I$
- U_{ti} : Cantidad del producto $t \in T$ retornado en el período $i \in I$
- α_{qt} : Proporción del producto $t \in T$ retornado con calidad $q \in Q$
- QP : capacidad máxima de almacenamiento de productos
- TN_t^p : Tiempo necesario para producir el producto $t \in T$
- TN_{qt}^r : Tiempo necesario para remanufacturar el producto $t \in T$ con calidad $q \in QR$
- TN_{qt}^d : Tiempo necesario para descartar el producto $t \in T$ con calidad $q \in QD$
- TD^p : Tiempo disponible en un período en la línea de producción
- TD^u : Tiempo disponible en un período en la línea de recuperación
- Io_t : Inventario inicial del producto $t \in T$
- θ : Valor cercano a 1 que sirve para la correcta definición de w_{qti}^{int}
- B : Valor de redondeo (ejemplo: 0,5)
- A : Número de activación de las variables binarias $\delta_{ti}^p, \delta_{qti}^r, \delta_{qti}^d$ y ε_i el cual se define $A = \sum_{t \in T} \sum_{i \in I} D_{ti}$

3.5.1.4. Variables

- x_{ti}^p : Cantidad de producto $t \in T$ a producir en el período $i \in I$
- x_{qti}^r : Cantidad de producto $t \in T$ retornado con calidad $q \in QR$ a remanufacturar en el período $i \in I$
- x_{qti}^d : Cantidad de producto $t \in T$ retornado con calidad $q \in QD$ a descartar en el período $i \in I$
- s_{ti}^s : Cantidad de producto terminado $t \in T$ a almacenar en el período $i \in I$
- s_{ti}^u : Cantidad de producto $t \in T$ retornado con calidad $q \in Q$ a almacenar en el período $i \in I$
- s_{qti}^e : Cantidad de producto $t \in T$ retornado con calidad $q \in Q$ habilitado a almacenar en el período $i \in I$
- w_{ti} : Cantidad de producto $t \in T$ retornado a habilitar en el período $i \in I$
- w_{qti}^{int} : Cantidad de producto $t \in T$ retornado con calidad $q \in Q$ habilitado en el período $i \in I$
- δ_{ti}^p : Variable binaria que vale 1 cuando se produce un producto $t \in T$ en el período $i \in I$, 0 de lo contrario

- δ_{qti}^r : Variable binaria que vale 1 cuando se remanufactura un producto $t \in T$ con calidad $q \in QR$ en el período $i \in I$, 0 de lo contrario
- δ_{qti}^d : Variable binaria que vale 1 cuando se descarta un producto $t \in T$ con calidad $q \in QD$ en el período $i \in I$, 0 de lo contrario
- ε_i : Variable binaria que vale 1 cuando se habilitan productos retornados en el período $i \in I$, 0 de lo contrario

3.5.1.5. Formulación matemática

$$\text{Min} \quad \sum_{i \in I} \left\{ \sum_{t \in T} (C_t^p x_{ti}^p + K_t^p \delta_{ti}^p + \sum_{q \in QR} (C_{qt}^r x_{qti}^r + K_{qt}^r \delta_{qti}^r) + \sum_{q \in QD} ((C_{qt}^d - G_{qt}^d) x_{qti}^d + K_{qt}^d \delta_{qti}^d) + H^u s_{ti}^u + \sum_{q \in Q} (H_q^e s_{qti}^e) + H^s s_{ti}^s + C_t^e w_{ti}) + K^e \varepsilon_i \right\} \quad (44)$$

s.a:

$$x_{ti}^p \leq A \delta_{ti}^p, \quad \forall t \in T, \forall i \in I \quad (45)$$

$$x_{qti}^r \leq A \delta_{qti}^r, \quad \forall q \in QR, \forall t \in T, \forall i \in I \quad (46)$$

$$x_{qti}^d \leq A \delta_{qti}^d, \quad \forall q \in QD, \forall t \in T, \forall i \in I \quad (47)$$

$$w_{ti} \leq A \varepsilon_i, \quad \forall t \in T, \forall i \in I \quad (48)$$

$$\sum_{t \in T} x_{ti}^p TN_t^p \leq TD^p, \quad \forall i \in I \quad (49)$$

$$\sum_{t \in T} (\sum_{q \in QR} x_{qti}^r TN_{qt}^r + \sum_{q \in QD} x_{qti}^d TN_{qt}^d) \leq TD^u, \quad \forall i \in I \quad (50)$$

$$s_{ti}^u = s_{(t,i-1)}^u + U_{ti} - w_{ti}, \quad \forall t \in T, \forall i \in I \quad (51)$$

$$s_{qti}^e = s_{(q,t,i-1)}^e + w_{qti}^{int} - x_{qti}^r, \quad \forall q \in QR, \forall t \in T, \forall i \in I \quad (52)$$

$$s_{qti}^e = s_{(q,t,i-1)}^e + w_{qti}^{int} - x_{qti}^d, \quad \forall q \in QD, \forall t \in T, \forall i \in I \quad (53)$$

$$s_{ti}^s = s_{(t,i-1)}^s - D_{ti} + x_{ti}^p + \sum_{q \in QR} x_{qti}^r, \quad \forall t \in T, \forall i \in I \quad (54)$$

$$s_{t,0}^u = 0, \quad \forall t \in T \quad (55)$$

$$s_{q,t,0}^e = 0, \quad \forall q \in Q, \forall t \in T \quad (56)$$

$$s_{t,0}^s = I o_t, \quad \forall t \in T \quad (57)$$

$$\sum_{t \in T} s_{t,i}^s \leq QP, \quad \forall i \in I \quad (58)$$

$$\sum_{tc \in TC} \delta_{tc,i}^p \leq 1, \quad \forall i \in I \quad (59)$$

$$\sum_{ta \in TA} \delta_{ta,i}^p \leq 1, \quad \forall i \in I \quad (60)$$

$$\sum_{tx \in TA \setminus \{ta\}} \sum_{tp \in TP[tx]} \delta_{tp,i}^p \leq 1 - \delta_{ta,i}^p, \quad \forall ta \in TA, \forall i \in I \quad (61)$$

$$w_{qti}^{int} \leq \alpha_{qt} w_{ti} + B, \quad \forall q \in Q, \forall t \in T, \forall i \in I \quad (62)$$

$$w_{qti}^{int} \geq \alpha_{qt} w_{ti} + B - \theta, \quad \forall q \in Q, \forall t \in T, \forall i \in I \quad (63)$$

$$w_{qti}^{int} = w_{ti} - \sum_{q \in QA} w_{qti}^{int}, \quad \forall q \in QB, \forall t \in T, \forall i \in I \quad (64)$$

$$s_{ti}^s, s_{ti}^u, s_{qti}^e, x_{ti}^p \geq 0, w_{ti}, w_{qti}^{int} \in \mathbb{N}^+ \cup \{0\}, \delta_{ti}^p, \varepsilon_i \in \{0,1\}, \quad \forall q \in Q, t \in T, \forall i \in I \quad (65)$$

$$x_{qti}^r \geq 0, \delta_{qti}^r \in \{0,1\}, \quad \forall q \in QR, t \in T, \forall i \in I \quad (66)$$

$$x_{qti}^d \geq 0, \delta_{qti}^d \in \{0,1\}, \quad \forall q \in QD, t \in T, \forall i \in I \quad (67)$$

Como se muestra en (44), la función objetivo se define como la suma de los costos asociados a la producción, remanufacturación, descarte, habilitación y a los costos de inventario. Las familias de ecuaciones (45) a (48) corresponden a la activación de las variables binarias de producir, remanufacturar, descartar y de habilitar retornos. Las familias de restricciones (49) y (50) acotan superiormente el tiempo de producción de la planta, de remanufacturación y de descarte. Las ecuaciones (51) a (54) corresponden a los balances de inventario de producto retornado, habilitado, y terminado, respectivamente. Las restricciones (55), (56) y (57) inicializan el inventario de producto retornado, habilitado y terminado, respectivamente. La familia de restricciones (58) representa la limitación de capacidad máxima de almacenamiento de producto terminado. Es importante observar que para el inventario de producto retornado y para el inventario de producto habilitado no se consideraron capacidades máximas de almacenamiento. Al no contar hoy en día con estos almacenes se prefiere dejar al solver encontrar el óptimo y que este sirva de referencia para la empresa. La familia de restricciones (59), (60) y (61) garantizan que se cumpla con las restricciones de producción de la planta la cual consta, a grandes rasgos, en producir hasta dos tipos de productos por día, uno de acero y uno de cobre.

Las restricciones (62) y (63) definen la variable entera w_{qti}^{int} , donde θ toma el valor más cercano a 1 que el solver maneje teniendo en cuenta su precisión. El parámetro θ sirve para definir inequívocamente a w_{qti}^{int} cuando el producto $\alpha_{qt} w_{ti}$ es entero.

Es necesaria la definición de w_{qti}^{int} para que las variables w_{ti} , x_{qti}^r , x_{qti}^d y s_{qti}^e tomen valores enteros. El parámetro α_{qt} , al ser un número decimal (el cual representa el porcentaje de retornos con determinada calidad) puede producir valores no enteros del término $\alpha_{qt} w_{ti}$, lo que produciría que las variables x_{qti}^r , x_{qti}^d y s_{qti}^e no sean enteras. Exigirle mediante una restricción al producto $\alpha_{qt} w_{ti}$ que sea entero no es una opción ya que de esa forma w_{ti} probablemente tome valores no enteros. Esta dificultad fue subsanada mediante la definición de (62) y (63), sin embargo, trajo aparejada otra complejidad con respecto a la suma de enteros positivos. Resultaría conveniente definir $\sum_{q \in Q} w_{qti}^{int} = w_{ti} \quad \forall t \in T, \forall i \in I$ para que la cantidad de retornos habilitados coincida con los productos usados que efectivamente estaban almacenados para ser habilitados, es decir, que no se "pierdan" o "ganen" retornos al activarse ε_i . Sin embargo, la cantidad total de productos habilitados ($\sum_{q \in Q} w_{qti}^{int} \quad \forall t \in T, \forall i \in I$) podría tomar solo ciertos valores por ser suma de enteros positivos. Por lo tanto, no resulta beneficioso imponer dicha igualdad. Pero la cantidad máxima de retornos habilitados que se podrían "perder"

o “ganar” en un período es $Q - 1$, siendo Q la cantidad de calidades y el impacto de la “pérdida” o “ganancia” podría ser muy grande. Según nuestro conocimiento y estudio del caso, no hay manera de solucionar este problema exactamente, por lo tanto, se intenta aproximarse lo más posible. La forma de aproximación que se consideró más conveniente tras una profunda investigación fue mediante la restricción (64) (en la Sección 3.5.3 se analizan otras alternativas). Esta ecuación consiste en calcular los retornos habilitados de cierta calidad como la diferencia entre la cantidad total de retornos habilitados y la suma de los retornos habilitados del resto de las calidades. La limitación de tomar la diferencia para una calidad determinada es que se puede perder la proporción entre las diferentes calidades. Para disminuir este efecto, se agrega en las restricciones (62) y (63) el parámetro B el cual vale 0,5 para redondear los valores. Se explica este comportamiento a través de un ejemplo:

Si no se redondeara, dado el CAE \hat{T} , el período \hat{I} , el conjunto de calidades $Q = \{1, \dots, 10\}$, $\alpha_{1,\hat{T}} = \alpha_{2,\hat{T}} = \dots = \alpha_{10,\hat{T}} = 0.1$, $QB = 10$ y si $w_{\hat{T},\hat{I}}$ valiera 19 para cierto producto, entonces:

$$w_{10,\hat{T},\hat{I}}^{int} = 19 - 9 * 1 = 10$$

$$w_{1,\hat{T},\hat{I}}^{int} = \dots = w_{9,\hat{T},\hat{I}}^{int} = 1$$

Esto significa que la calidad 10 representa el 53% del total de los retornos habilitados, y el resto de las calidades el 5,3% cada una, cuando todas intentan representar el mismo porcentaje. Debido a esta desproporcionalidad, se redondea y resulta lo siguiente:

$$w_{10,\hat{T},\hat{I}}^{int} = 19 - 9 * 2 = 1$$

$$w_{1,\hat{T},\hat{I}}^{int} = \dots = w_{9,\hat{T},\hat{I}}^{int} = 2$$

Las calidades 1 a 9 representan el 10,5% del total de los retornos habilitados y la calidad 10 el 5,3%, lo cual resulta más apropiado. Este efecto será evaluado en la interpretación de resultados de la Sección 3.5.5.

Tras una experimentación numérica para varios conjuntos de datos, se concluye que la calidad a seleccionar para el conjunto QB puede ser cualquiera de las definidas en Q .

Las restricciones (65), (66) y (67) son la no negatividad de las variables, las variables binarias y las variables enteras.

3.5.2. Relevamiento y análisis de datos

Los datos que corresponden a la empresa y al proceso productivo actual de Rivomark son los mismos que los obtenidos para el problema sin opciones de retorno. Los datos adicionales se pudieron estimar en conjunto con la empresa y en base a conocimientos adquiridos en la investigación del caso de estudio. Los fundamentos de las estimaciones se encuentran detallados en la Sección 2 del Anexo II.

Las estimaciones más difíciles de realizar, dada la incertidumbre en la cantidad y calidad de los retornos, fueron: 1) la cantidad de retornos recibidos por período, 2) el inventario de seguridad de producto terminado y 3) la proporción de calidades de los retornos. A raíz de una encuesta pública realizada en el marco de este proyecto, se desprende que un 60% de las personas que cuentan con CAE estarían dispuestas a retornarlo al final de su vida útil (ver Sección 2 del Anexo II). Por lo tanto, se estimó que la cantidad de productos retornados puede ser aproximadamente del 60% de los productos demandados. Por lo que los valores de los retornos en todo el horizonte de planificación se generaron de forma aleatoria utilizando una distribución normal, considerando como media el 60% de la media de la demanda y una desviación estándar del 20% para cada tipo de CAE. Considerando lo anterior y sabiendo que es necesario contar con inventario de seguridad de producto terminado para amortiguar cualquier circunstancia no prevista se estima que será necesario un inventario de seguridad tres veces más chico que la cantidad que se mantenía en el problema sin opciones de retornos. Asimismo, es importante destacar que para definir la proporción de las calidades de los retornos se tuvo en cuenta que los CAEs de acero son menos probables de ser remanufacturados que los CAEs de cobre, por ser más propensos a la oxidación.

3.5.3. Validación del modelo

La mayoría de las pruebas se llevaron a cabo durante la etapa de implementación y ejecución del modelo. En la Sección 2 del Anexo III se documentan solo algunas de las pruebas realizadas, a modo de ejemplificar la validación realizada. Las pruebas se llevaron a cabo en AMPL, utilizando el solver Gurobi. La configuración de software y hardware sobre la que se realizaron las pruebas fue Windows 7 Home Basic, procesador i5 CPU M480 @ 2.67 GHz 2.66 GHz, 4 GB RAM

Se considera de interés documentar algunas de las pruebas realizadas. En primer lugar, se analizan las distintas alternativas con respecto a la “pérdida” o “ganancia” de productos retornados habilitados al imponer (62) y (63).

Se probó el modelo de la Sección 3.5.1 sin la restricción (64) para probar si en lo grandes números (cientos de retornos) el efecto de las “pérdidas” o “ganancias” era considerable o no. Resultando que cuando los datos de demanda son bajos, los retornos “perdidos” alcanzan hasta el 38% del total de retornos. Se observa que cuanto más alta la demanda, más retornos habilita, y por consiguiente menos retornos se “pierden”. En conclusión, esta alternativa de imponer solamente (61) y (62) depende en gran medida de los datos utilizados para resolver el problema, y por esta razón se descarta.

Luego, se observa en las distintas pruebas que si en el período I para la calidad \hat{Q} $\alpha_{\hat{Q},t}w_{t,I} < 1$, esos retornos habilitados se “perderán”, es decir, no los remanufacturará, descartará ni almacenará en el período I , simplemente desaparecerán, ya que (62) y (63) definirán en el período I a $w_{\hat{Q},t,I}^{int}$ en $0 \forall t \in T$. Se probó disminuyendo la cantidad de calidades del conjunto Q para que el número decimal α_{qt} sea más grande (ya que $\alpha_{1,t} + \alpha_{2,t} + \dots + \alpha_{Q,t} = 1 \forall t \in T$) y que haya menos opciones de que $\alpha_{qt}w_{ti}$ sea menor a 1. Sin embargo, esta alternativa no fue exitosa, ya que la cantidad de retornos “perdidos”

continúa siendo muy elevada y además depende mucho del conjunto de datos que se utilice para resolver el problema.

Otra alternativa fue agregar una restricción que obligue a que la “pérdida” de retornos habilitados sea menor a determinado porcentaje, por ejemplo, menor al 1% de todos los retornos habilitados en todo el horizonte de planificación. Al probarlo se observó que w_{ti} podía tomar solo ciertos valores, ya que no se puede satisfacer que para todos los w_{ti} y α_{qt} , no se pierdan retornos habilitados. Incluso para algún conjunto de datos sucede que no le es posible una “pérdida” tan pequeña y por lo tanto no habilita ningún retorno. Por lo que esta alternativa tampoco resultó beneficiosa.

Por último, se evaluó resolver el problema en un horizonte de planificación de un año, pero discretizado en meses, por lo que tendría 12 períodos, y con los datos de demanda y retornos mensuales, los cuales resultan mucho más grandes que los diarios, para así lograr menos “pérdidas” ya que el producto $\alpha_{qt}w_{ti}$ sería más grande. Es decir, se impondría (62) y (63), pero no (64). Luego de resuelto este problema y obtenidos los resultados, se resolvería otro con los resultados del anterior como datos, en un horizonte de planificación de un año, pero discretizado en días, o sea en 261 períodos. De esta forma se podría obtener la planificación diaria de producción, remanufacturación y descarte, pero sería una tarea muy laboriosa y además dependería mucho de los datos. A modo de ejemplo, para un cierto conjunto de datos, se “perdió” un 3,3% de los retornos habilitados.

Finalmente, se probó añadiendo la ecuación (64) y se constató que, si bien calcular los retornos habilitados de una cierta calidad evita la “pérdida” de retornos habilitados, se pierde la proporción de los retornos entre las diferentes calidades. Tal como se mostró en el ejemplo de la Sección 3.5.1, la pérdida de proporcionalidad es baja, además que al ser un dato estimado, una leve modificación no resulta un inconveniente. Se concluye que no hay manera de solucionar este problema exactamente, pero se aproxima lo más posible para obtener un modelo de interés. Por eso se prefirió perder la proporción a perder una gran cantidad de retornos habilitados.

Los casos seleccionados para documentar fueron desarrollados de forma de abarcar todas las características del problema. Las principales funcionalidades consideradas en los casos de prueba fueron:

- Demanda satisfecha a tiempo por producto nuevo o remanufacturado
- Restricción (58) de almacenamiento de producto
- Restricciones (59), (60) y (61) de producción
- Funcionamiento de la habilitación de productos retornados: restricciones (62), (63) y (64)
- Balances de inventario
- Relación de variables enteras con sus respectivas variables binarias

3.5.4. Ejecución del modelo

Se representa el problema a través de un modelo determinístico con demanda y retornos dinámicos. Este modelo es aún más complejo que el que representa el problema sin retornos. En la Tabla 3.5-1 se especifican los tamaños de ambos modelos crudos.

Modelo	Tamaño
Del problema sin opciones de retornos	<ul style="list-style-type: none">• 29.629 variables (10.886 binarias, 4.140 enteras no binarias y 14.603 continuas)• 135.478 entradas de parámetros distintos de cero
Del problema con opciones de retornos	<ul style="list-style-type: none">• 69.039 variables (17.119 binarias, 33.159 enteras no binarias y 18.761 continuas)• 265.760 entradas de parámetros distintos de cero

Tabla 3.5-1: Tamaños de los modelos sin y con opciones de retorno para 261 períodos

Para poder compararlos y corroborar el beneficio de la remanufacturación para los datos estimados, se intenta resolver el problema con retornos para 261 períodos, así como se hizo con el sin retornos. La importancia de la resolución redonda en apreciar los beneficios de la remanufacturación en forma cuantitativa en términos de costos. Se recurre entonces a la misma computadora prestada en la que se resolvió de forma exacta el problema sin retornos, y se ejecutó durante 48 horas, constatándose que no se logra encontrar solución factible. Por lo tanto, se intenta también resolver en la computadora del INCO, que cuenta con un procesador aún mejor, durante 24 horas, pero tampoco se obtuvo una solución. Por lo que se procede a probar con diferentes heurísticas que, aunque no garantizan soluciones óptimas, llegan a soluciones que usualmente resultan ser de buena calidad, en tiempos de ejecución razonables.

Heurísticas experimentadas:

Primero se probaron las siguientes cinco heurísticas conocidas como “de sentido común”, es decir, las que pretenden explotar aspectos específicos del problema:

1. Dividir el problema por tipo de producto
2. Relajar las restricciones de capacidad de producción, de remanufacturación y de descarte

Las pruebas de las heurísticas se realizaron de forma independiente y también combinando las mismas, para así corroborar si existen mejoras en los tiempos de cómputo. Luego, se implementó la siguiente heurística basada en métodos de programación matemática clásica. La misma supone que las variables binarias pueden partitionarse en R conjuntos separados y resolverse secuencialmente R problemas de Programación Entera Mixta (MIP, Mixed-Integer Programming), denominados MIP^r con $1 \leq r \leq R$, para encontrar una solución heurística al problema MIP original [44].

3. Relax-and-Fix

Todas las heurísticas se implementaron en una computadora personal, con sistema operativo de 64 bits Windows 10 Home, procesador Intel Core i5-4210U CPU @ 1.7 GHz, 6 GB RAM.

Para llevar a cabo la heurística 1) fue necesario dividir el problema en ocho subproblemas e introducir la salida de cada uno como insumo del siguiente, de modo de no sobrepasar las capacidades de producción diarias y de cumplir con las restricciones de la planta (59), (60) y (61). Por lo tanto, la ejecución de los subproblemas no se puede realizar simultáneamente y además es muy probable que al ejecutar el último (o uno de los últimos) subproblemas no se encuentre solución factible y se deba realizar un gran esfuerzo para corregir la infactibilidad. Se resolvió el primer subproblema, encontrándose una solución factible con un gap de dualidad del 44,4%, no obteniéndose mejoras significativas en dos horas de ejecución. La calidad de la solución no es la deseada y, además, el procedimiento para completar la heurística resulta muy engorroso y con altas probabilidades de falla, por lo tanto no se culmina el procedimiento.

Posteriormente se probó la heurística 2) combinada con la 1). Primero se ejecutó un subproblema conteniendo un tipo de CAE con las restricciones de capacidad y luego sin estas, constatándose que al quitarlas los tiempos de ejecución aumentaban. A raíz de este resultado se descarta la resolución del problema para 261 períodos mediante esta heurística, por no aportar beneficios con respecto a la dificultad computacional.

Ya que no se logró resolver el problema entero con ninguna de las heurísticas antes mencionadas, se procede a implementar la heurística Relax-and-Fix. Las variables binarias pueden ser particionadas en R conjuntos disjuntos Q^1, \dots, Q^R de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} Q^1 &= \{1, \dots, t_1\} \\ Q^2 &= \{t_1 + 1, \dots, t_2\} \\ &\vdots \\ Q^R &= \{t_{R-1} + 1, \dots, t_R\} \end{aligned}$$

Y los subconjuntos $U^r \subseteq \cup_{u=r+1}^R Q^u$ para $r = 1, \dots, R - 1$ de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} U^1 &= \{t_1 + 1, \dots, u_1\} \\ U^2 &= \{t_2 + 1, \dots, u_2\} \\ &\vdots \\ U^{R-1} &= \{u_{R-2} + 1, \dots, u_{R-1}\} \end{aligned}$$

Se deben resolver secuencialmente R problemas de MIPs, denominados MIP^r con $1 \leq r \leq R$. Los problemas MIP^r se pueden escribir de la siguiente manera:

(MIP^r)

$$\text{Min } cx + fy: Ax + By \geq b \quad (68)$$

s.a:

$$x \in R_+^n \quad (69)$$

$$y_j = y_j^{r-1} \in \{0,1\}, \quad \forall j \in Q^1 \cup \dots \cup Q^{r-1} \quad (70)$$

$$y_j \in \{0,1\}, \quad \forall j \in Q^r \cup U^r \quad (71)$$

$$y_j \in [0,1], \quad \forall j \in Q \setminus (Q^1 \cup \dots \cup Q^r \cup U^r) \quad (72)$$

Siendo (x^r, y^r) una solución óptima del problema de MIP^r .

El primer problema MIP^1 , se construye utilizando los conjuntos Q^1 y U^1 . Luego se corrigen las variables en Q^1 a sus valores en y^1 y se resuelve el MIP^2 .

En el subsecuente MIP^r para $2 \leq r \leq R$, adicionalmente se corrigen los valores de las variables y con subíndice en Q^{r-1} al valor óptimo del MIP^{r-1} , y se agrega la restricción de integralidad para las variables en $Q^r \cup U^r$.

Para definir el tamaño de los conjuntos para los cuales resolver la heurística, se realizaron diversas pruebas para hallar el tamaño de los $MIPs$ teniendo en cuenta los tiempos de ejecución y la calidad de las soluciones. Como resultado, se establecieron los siguientes datos: $R = 261$, $t_1 = 3$ y $u_1 = 6$. Por lo tanto, se deberían resolver 86 problemas MIP .

El MIP^1 consta de nueve períodos, con seis periodos de variables binarias y tres períodos de variables binarias relajadas, o sea, reales entre 0 y 1. La ejecución de este problema tardó 38 minutos en obtener una solución óptima. Para el MIP^2 se corrigen las variables binarias de tres periodos, es decir, se establecen como datos las variables binarias obtenidas de los primeros tres periodos del MIP^1 . Habrá otros seis periodos de variables binarias y tres más de variables relajadas. O sea, el MIP^2 tiene en total doce periodos y se obtuvo una solución óptima en casi dos horas. Siguiendo la misma lógica, el MIP^3 consta de quince períodos, con seis períodos de variables corregidas, seis binarias y tres relajadas. La resolución del mismo para obtener una solución óptima tardó dos horas y media.

Se analiza el compromiso entre los tiempos de cómputo requeridos para resolver los subproblemas y las soluciones obtenidas de cada uno. Siendo que se trata de una solución heurística, se desea obtener soluciones óptimas de cada subproblema. Se observa de la resolución de los primeros tres MIP que conforme aumentan los períodos, los tiempos de ejecución aumentan considerablemente. Si se quiere obtener una solución óptima de cada MIP , el tiempo total de ejecución de los 86 problemas superaría ampliamente las 200 horas, teniendo en cuenta además que para la resolución de cada MIP son necesarios los resultados del MIP anterior, lo que también insume un esfuerzo considerable. Adicionalmente y debido a que el problema cuenta con capacidad de producción y de almacenamiento, podría resultar que el problema MIP^R sea no factible y por lo tanto la heurística fallara. Debido al gran esfuerzo computacional y a la baja

calidad de la solución, se decide no proseguir con el proceso de ejecución de la heurística.

Tras haber probado varias heurísticas para resolver el problema completo y sin tener éxito debido a la complejidad computacional, se opta por particionar el problema en horizontes de planificación menores, tal como se realizó en la resolución heurística del modelo sin opciones de retornos. Para decidir en cuántos períodos particionarlos se realizaron diversas pruebas desde seis meses hasta uno, constatándose que recién para un solo mes (23 períodos, correspondientes al mes de enero) se obtiene una solución factible con un gap de dualidad del 12% en cinco horas. Al ejecutar el segundo mes, en 24 horas no se logró encontrar ninguna solución factible, por lo tanto, no se pudo proseguir con el procedimiento. Se descarta entonces la posibilidad de resolver el modelo para los 261 períodos.

En su lugar, se decide recurrir a la computadora anteriormente prestada (procesador i7-4710HQ CPU @ 2.50 GHz, 16 Gb RAM), y resolver ambos problemas, con y sin opciones de retornos, pero solamente para el mes de setiembre, ya que es un mes representativo según la demanda pronosticada. De esta forma se pueden comparar los valores objetivos logrados para ambos problemas. En la Tabla 3.5-2 se especifican los tamaños de cada modelo crudo.

Modelo	Mes	Tamaño
Del problema sin opciones de retornos	Setiembre	<ul style="list-style-type: none"> • 2.260 variables (806 binarias, 298 enteras no binarias y 1.156 continuas) • 9.041 entradas de parámetros distintos de cero
Del problema con opciones de retornos	Setiembre	<ul style="list-style-type: none"> • 5.430 variables (1.495 binarias, 2.453 enteras no binarias y 1.482 continuas) • 20.676 entradas de parámetros distintos de cero

Tabla 3.5-2: Tamaños de los modelos sin y con opciones de retorno para el mes de setiembre (21 períodos)

Para ejecutar el modelo con opciones de retornos para el conjunto de datos dados y obtener la mejor solución posible en un cierto tiempo, se ejecuta el modelo para distintas políticas proclives a la remanufacturación. Se espera que una solución de costo mínimo cumpla alguna de estas políticas ya que la forma de los costos estimados pretende favorecer la remanufacturación. Las políticas son las siguientes:

1. Una vez que habilita, remanufacturar al menos una calidad de cualquier tipo de CAE:

$$\varepsilon_i \leq \sum_{t \in T} \sum_{q \in QR} \delta_{qti}^r, \quad \forall i \in I \quad (73)$$

2. Cada vez que remanufactura un retorno habilitado de cierto tipo de CAE y calidad, que remanufacture todos los habilitados con estas mismas características:

$$N * (1 - \delta_{qti}^r) \geq s_{qti}^e, \quad \forall q \in QR, \forall t \in T, \forall i \in I \quad (74)$$

3. Habilitar en todos los períodos:

$$\varepsilon_i = 1, \quad \forall i \in I \quad (75)$$

Los resultados de las ejecuciones se presentan a continuación en la Tabla 3.5-3.

Formulación	Tiempo de ejecución	Gap de dualidad	Valor objetivo
Original	4 horas	9,59%	319.195
Con política 1	4 horas	13,0%	327.674
Con política 2	4 horas	9,34%	317.928
Con política 3	4 horas	9,29%	318.665

Tabla 3.5-3: Ejecución de las políticas en el modelo con opciones de retornos para el mes de setiembre

De los resultados de la Tabla 3.5-3 se aprecia que dos de las políticas ejecutadas logran un menor valor objetivo en las cuatro horas de ejecución, con respecto a la formulación original. Por lo tanto, las políticas pueden ser convenientes al obtener en el mismo tiempo una solución de mejor calidad. En este caso, la solución más económica corresponde a la segunda política, por lo tanto, se decide ejecutar este modelo por un lapso más prolongado.

Se ejecutó por un lapso de 17 horas, ya que se constató que a partir de la hora 12, por un lapso de cinco horas, no se obtuvieron mejoras del valor objetivo mayores al 0,09%. Finalmente se obtuvo un valor objetivo de 315.803 con un gap de dualidad del 8,59%. La ejecución del modelo correspondiente al problema sin opciones de retornos también se llevó a cabo durante 17 horas y se obtuvo un gap de dualidad del 1,23% con un valor objetivo de 1.315.793.

3.5.5. Interpretación de los resultados: sin y con opciones de retornos

En esta sección se presentan e interpretan los resultados arrojados por el modelo sin y con opciones de retornos para el mes de setiembre el cual fue tomado como mes representativo según la demanda pronosticada del año 2019. Los resultados del problema con opciones de retornos como se mencionó en la Sección 3.5.4 se obtuvieron mediante la resolución con la segunda política, por ser la que logró un mejor valor objetivo en un mismo tiempo de ejecución.

3.5.5.1. Problema sin opciones de retorno para el mes de setiembre

El problema sin opciones de retornos, a diferencia del problema con retornos, incluye la gestión de compra de materia prima. Por lo tanto, además de los costos unitarios y fijos de preparación de producción y del costo de mantener inventario de producto terminado

(incluyendo el inventario de seguridad), incluye el costo de mantener inventario de materia prima y el costo fijo de los proveedores. Por ende, se desglosan estos costos, resultando los correspondientes a la producción y almacenamiento de producto terminado en 378.162, representando un 28,7% del costo total. El restante 71,3% corresponde al costo de almacenar materia prima y al costo fijo de pedirle al proveedor. En la Figura 3.5-2 se ilustra la forma que se distribuyen los 378.162, correspondientes a los costos de producción y de mantener inventario de producto terminado.

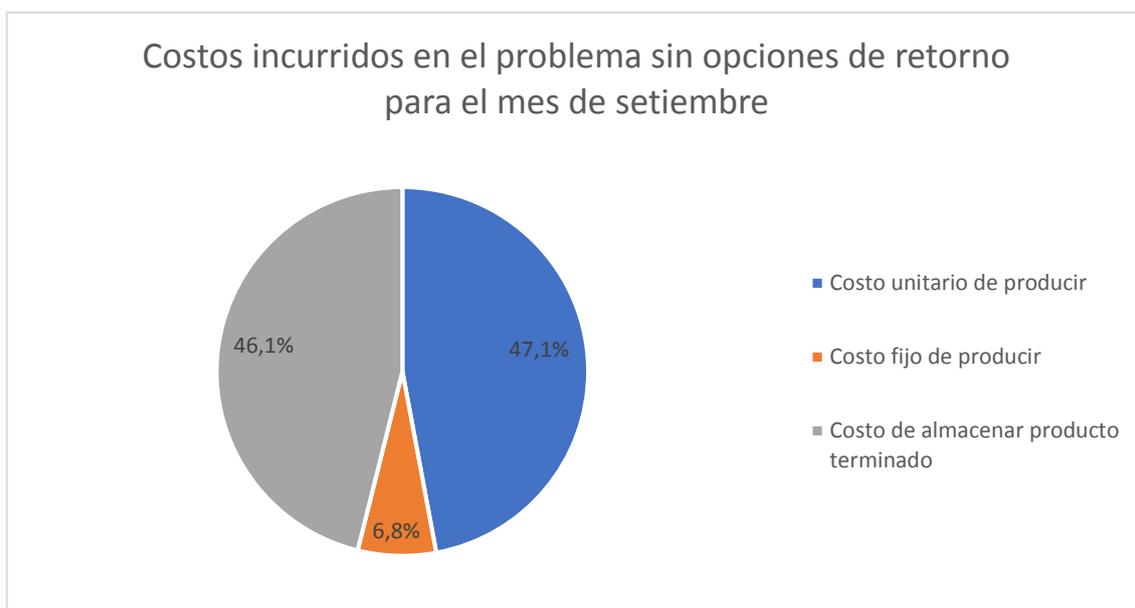


Figura 3.5-2: Gráfico de torta que representa la distribución de los costos incurridos con la planificación dada para el mes de setiembre para el modelo sin opciones de retorno (no se incluye la gestión de compra)

El mayor costo en el que se incurre es el unitario de producir, siguiéndole muy cercano en valor el costo de mantener inventario de producto terminado. Por último, en cantidad, se tiene el costo fijo de producir. Es interesante observar que la distribución de los costos en el mes de setiembre es muy similar que la que se obtuvo para todo el año en la interpretación de resultados de la Sección 3.3.5.

A partir de los resultados obtenidos se grafica en primer lugar el inventario de productos terminados en la Figura 3.5-3 y en segundo lugar en la Figura 3.5-4 la capacidad de producción de la planta para el mes de setiembre. La línea en color gris horizontal representa la capacidad máxima diaria actual de la planta.

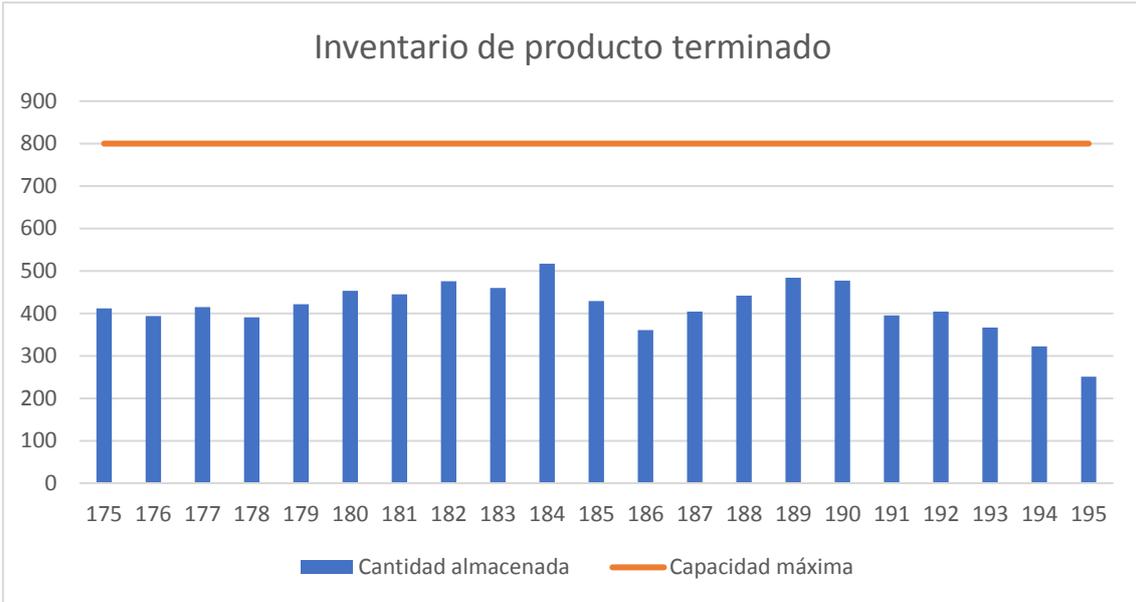


Figura 3.5-3: Inventario de producto terminado para el problema sin opciones de retorno para el mes de setiembre

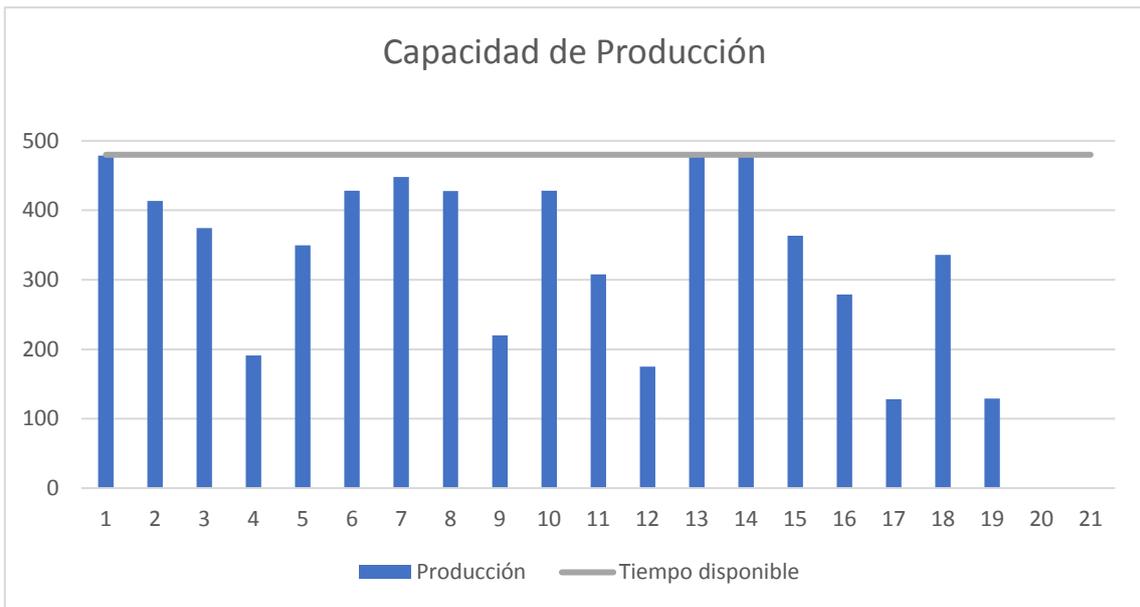


Figura 3.5-4: Capacidad de producción en minutos para el problema sin opciones de retorno para el mes de setiembre

La gráfica de la Figura 3.5-3 muestra el inventario de producto terminado y el cumplimiento con la capacidad máxima de almacenamiento instalada en la planta y en la Figura 3.5-4 se muestra el cumplimiento de la capacidad máxima de producción de y se observa que en los últimos dos períodos no se produce mientras que en tres se trabaja a capacidad máxima.

3.5.5.2. Problema con opciones de retorno para el mes de setiembre

El costo del problema con opciones de retorno para el mismo horizonte de planificación que el ejecutado sin opciones de retorno resultó en un valor objetivo de 315.803. A este valor hay que sumarle el costo de mantener el inventario de seguridad en los 21 períodos el cual no fue incluido en el modelo debido a que no es un costo optimizable, pero que se estimó en un tercio de la cantidad que se mantenía para el problema sin opciones de retorno. Este valor resultó en 35.140, por lo tanto, el costo total del problema con opciones de retorno para setiembre es de 350.943. Si se compara este valor con el obtenido en el problema sin opciones de retornos se observa un beneficio al recuperar productos usados de USD 27.219, lo cual representa un ahorro del 7,20%. Además, el gap de dualidad obtenido para el problema con opciones de retornos fue mayor que el del sin retornos, por lo que se presume que el beneficio podría ser aún mayor.

En la Figura 3.5-5 se ilustra la forma que se distribuyen los costos para este problema.

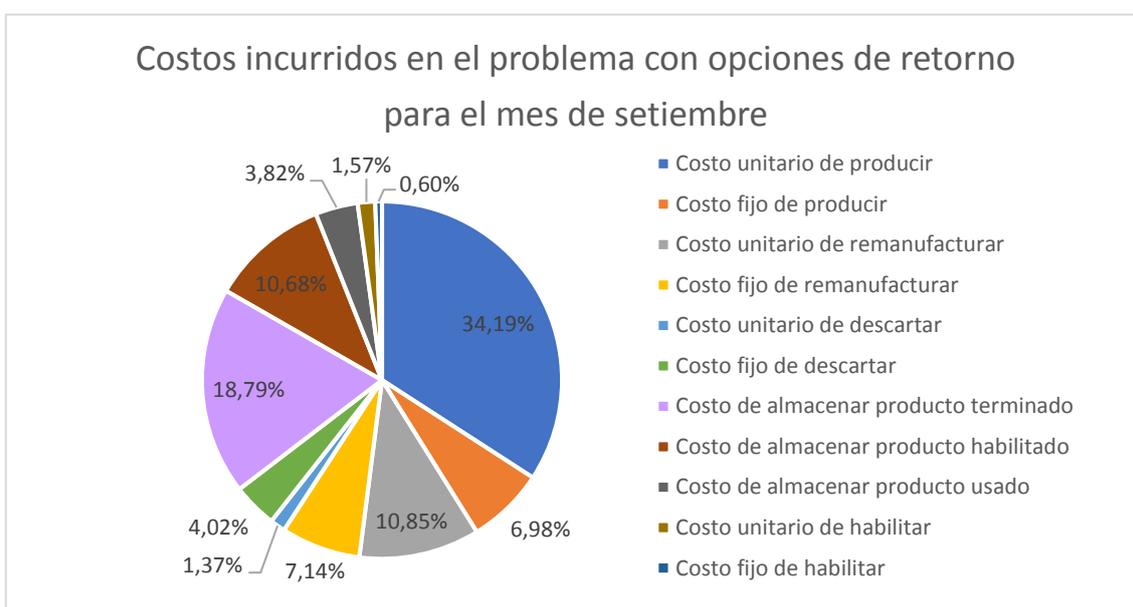


Figura 3.5-5: Gráfico de torta que representa la distribución de los costos incurridos con la planificación dada para el mes de setiembre para el modelo con opciones de retorno

Según se desprende de la Figura 3.5-5 el mayor costo en el que se incurre es en el unitario de producir el cual está directamente relacionado con los productos demandados. Siguiéndole el costo de mantener inventario de producto terminado, y luego muy cercanos entre sí, el costo unitario de remanufacturar y el de mantener inventario de producto habilitado.

A partir de los resultados obtenidos se grafica el inventario de producto retornado, producto habilitado, producto terminado y por último la capacidad de producción y de recuperación. En la Figura 3.5-6 y Figura 3.5-7 se muestran el inventario de productos retornados y habilitados, respectivamente, a lo largo del mes de setiembre.

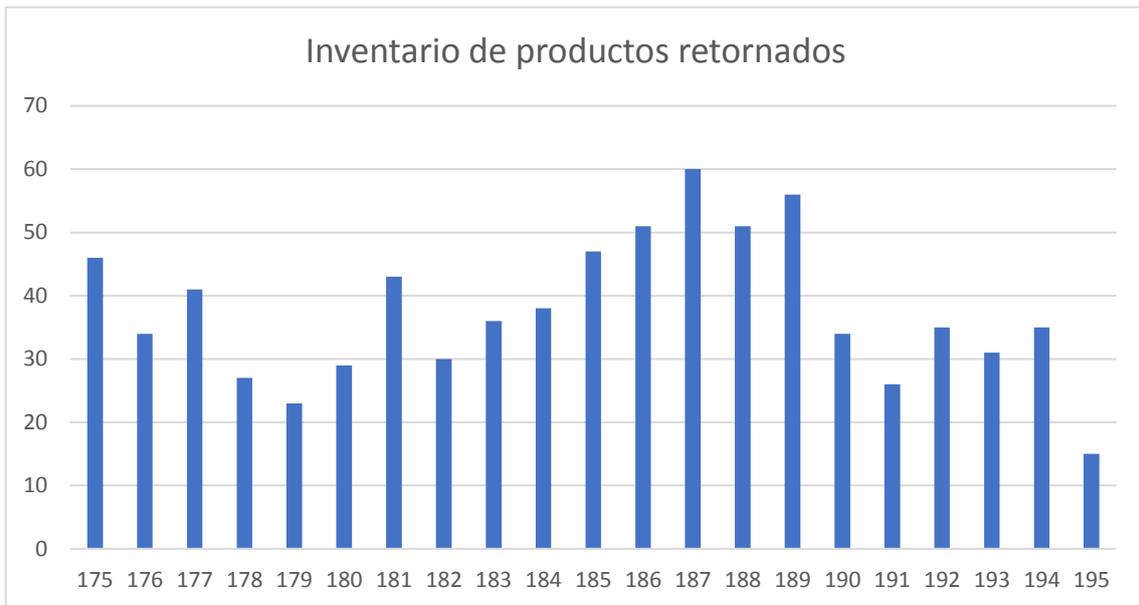


Figura 3.5-6: Inventario de productos retornados durante el mes de setiembre según los retornos estimados

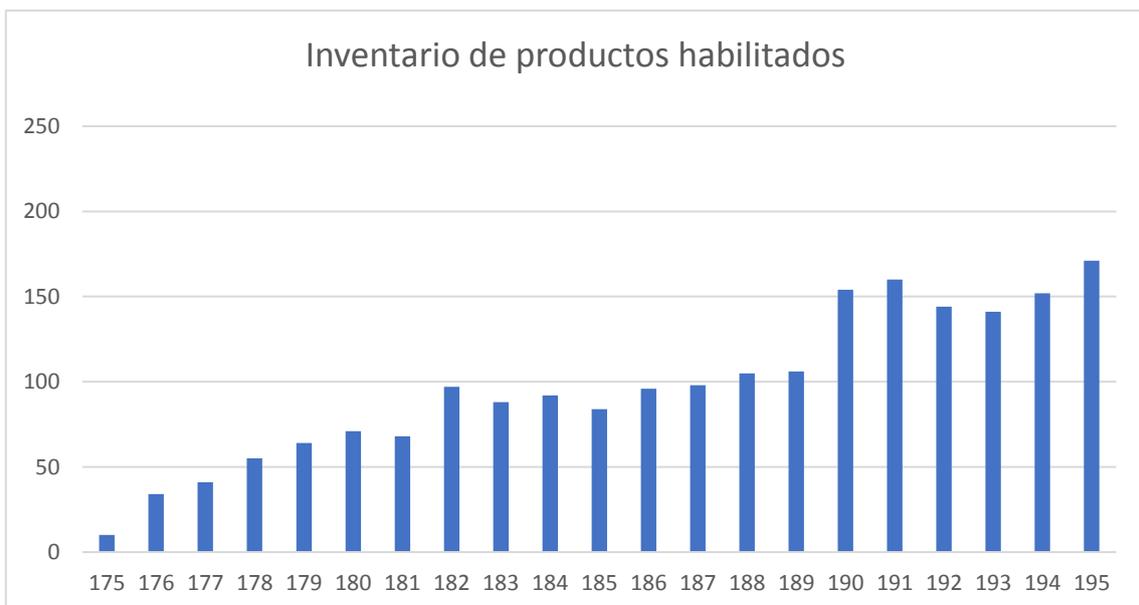


Figura 3.5-7: Inventario de productos retornados y habilitados durante el mes de setiembre

No se agregó capacidad máxima de almacenamiento para el inventario de productos retornados ni para el inventario de habilitados ya que el escenario de recuperación de productos usados no está aún implantado por lo que no se cuenta con una limitación de capacidad. De esta forma, a partir de la Figura 3.5-6 y Figura 3.5-7 se obtienen los valores óptimos referentes al almacenaje, y en caso de ser necesario limitar por capacidad de almacenamiento estos resultados dan una idea de los valores que se deben utilizar para minimizar los costos. En la Figura 3.5-6 se observa que si en un período se cuenta con menos retornos que en el período anterior significa que en ese período habilitó productos usados. Asimismo, el inventario de producto retornado no supera los 60 CAEs, por lo tanto, para los datos estimados no sería necesario una gran

capacidad de almacenamiento. De la Figura 3.5-7 se observa se observa que el máximo almacenado es de 171 CAEs. Por lo tanto, el inventario de producto habilitado es mayor que el de producto retornado, sin embargo, sigue siendo poco en comparación con la capacidad máxima disponible para producto terminado.

Tal como se mencionó en la Sección 3.5.1.5, el modelo matemático planteado tiene una limitación en cuanto a la pérdida de proporciones de calidades de los retornos. Dados los valores estimados de α_{qt} , se observa que si la cantidad habilitada de cierto CAE en un período es menor a 10 para el caso de los retornos de cobre y a 20 para el caso de los retornos de acero, las proporciones de las calidades se pueden perder en mayor o menor medida, ya que no se puede obtener un valor mayor a uno al hacer el 10% o el 5%. Cuánto más chico y lejano a 10 y 20 sean los retornos habilitados, más se notará este efecto. Resuelto el modelo, se verificó esto para todos los tipos de CAEs.

Período	TCP20L	TCP30L	TCP40L	TCP50L	TCP60L	TA30L	TA45L	TA60L
175	2	2	2	0	0	0	6	0
176	2	42	2	2	2	12	0	0
177	11	22	2	2	2	18	0	0
178	2	22	22	2	2	6	6	0
179	2	22	2	11	11	6	0	0
180	2	9	11	2	2	18	6	6
181	11	9	9	2	2	6	0	0
182	2	29	20	9	2	6	6	0
183	2	20	2	0	2	12	6	0
184	2	11	22	11	2	0	0	0
185	11	2	2	2	2	12	6	0
186	2	22	11	2	2	12	6	6
187	2	22	22	2	2	0	0	0
188	2	22	2	2	2	18	6	0
189	2	11	22	11	2	0	0	0
190	11	31	2	2	22	18	6	0
191	2	2	22	11	2	0	6	6
192	2	22	2	2	2	0	0	0
193	0	11	2	2	2	23	6	0
194	0	11	2	11	11	12	6	0
195	20	2	22	9	2	12	0	0

Tabla 3.5-4: Cantidad de retornos habilitados en el mes de setiembre

De la Tabla 3.5-4 se desprende que en todos los períodos habilita retornos, siendo dos la cantidad que más se repite de habilitados por período para los CAEs de cobre y seis para los de acero. Se muestra a continuación la proporción de las calidades para el caso en que se habilitan solo dos de cobre y luego, solo seis de acero, entendiéndose que estos serían los casos en que más afectaría la pérdida de proporciones.

$$w_{1,TCP60L,180}^{int} = 1 \approx 50\%$$

$$w_{2,TCP60L,180}^{int} = 1 \approx 50\%$$

$$w_{3,TCP60L,180}^{int} = w_{4,TCP60L,180}^{int} = w_{5,TCP60L,180}^{int} = w_{6,TCP60L,180}^{int} = w_{7,TCP60L,180}^{int} = 0 \cong 0\%$$

Las proporciones deberían ser 25% para la calidad 1 y 2, y 10% para el resto de las calidades correspondientes a descarte, según los datos estimados. Si bien se observa una pérdida de proporcionalidades, se destaca que no existen pérdidas de retornos al habilitar. Además, la pérdida en la proporcionalidad es más notoria cuando la cantidad de retornos habilitados es pequeña en comparación con la cantidad de calidades. Tal como se mencionó en la Sección 3.5.1.5, según nuestro mejor conocimiento, es imposible eliminar este efecto totalmente.

A continuación, se calculan las proporciones de los retornos habilitados para un CAE de acero, para un período en que habilita seis de ellos.

$$w_{1,TA60L,180}^{int} = 0 \approx 0\%$$

$$w_{2,TA60L,180}^{int} = 1 \approx 16,7\%$$

$$w_{3,TA60L,180}^{int} = w_{4,TA60L,180}^{int} = w_{5,TA60L,180}^{int} = w_{6,TA60L,180}^{int} = w_{7,TA60L,180}^{int} = 1 \cong 16,7\%$$

Tal como fue estimado, las proporciones deberían ser 5% para la calidad 1, 10% para la calidad 2 y 17% para las cinco calidades restantes. En este caso el efecto de la pérdida de las proporciones de las calidades no es tan grande como en el caso anterior. Sin embargo, cuando la habilitación de retornos es mayor, se observa que las proporciones de calidades se mantienen prácticamente iguales a lo deseado (5% para la calidad 1, 10% para la calidad 2 y 17% para el resto de las cinco calidades). Tal como se muestra en el siguiente ejemplo:

$$w_{1,TA30L,183}^{int} = 1 \approx 4,35\%$$

$$w_{2,TA30L,183}^{int} = 2 \approx 8,7\%$$

$$w_{3,TA30L,183}^{int} = w_{4,TA30L,183}^{int} = w_{5,TA30L,183}^{int} = w_{6,TA30L,183}^{int} = w_{7,TA30L,183}^{int} = 4 \cong 17,39\%$$

A continuación, se grafica el inventario de producto terminado, el cual se abastece de producto nuevo y de producto remanufacturado.

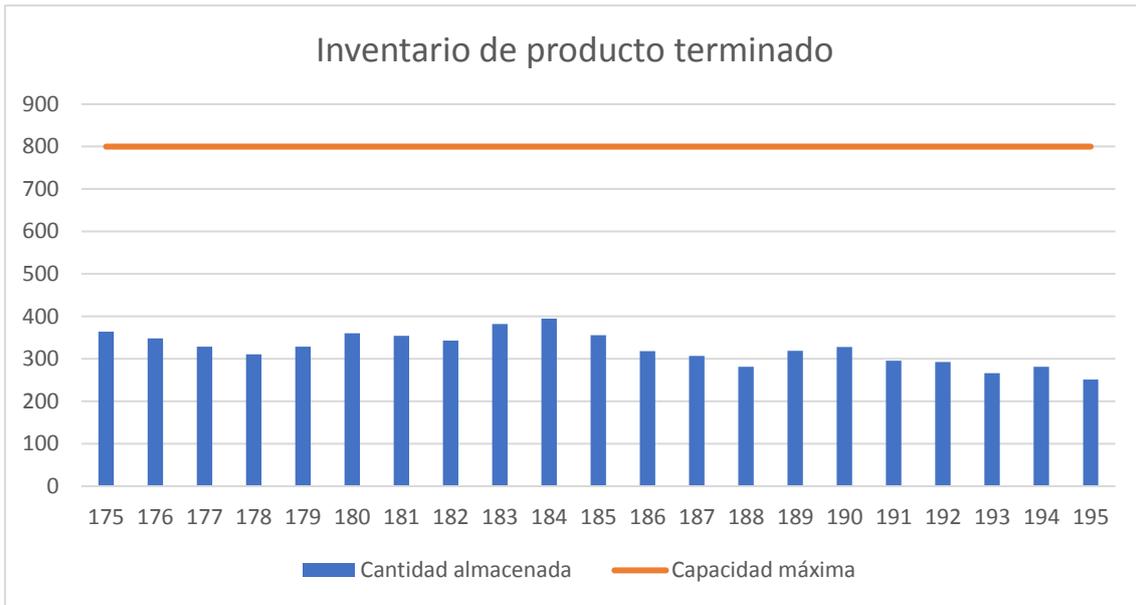


Figura 3.5-8: Inventario de producto terminado el cual se obtiene de la producción y de la remanufactura, durante el mes de setiembre

La gráfica de la Figura 3.5-8 incluye el inventario de seguridad equivalente a un tercio de lo que se mantenía en el problema sin opciones de retornos. Se observa que en el período que se mantiene más inventario es de 395 CAEs, cuando en el problema sin opciones de retorno la cantidad máxima era de 517 (ver Figura 3.5-3).

En la siguiente figura se ilustra la planificación de las líneas de producción y de recuperación para el mes de setiembre. Para ambas líneas se tiene un tiempo disponible de 480 minutos.

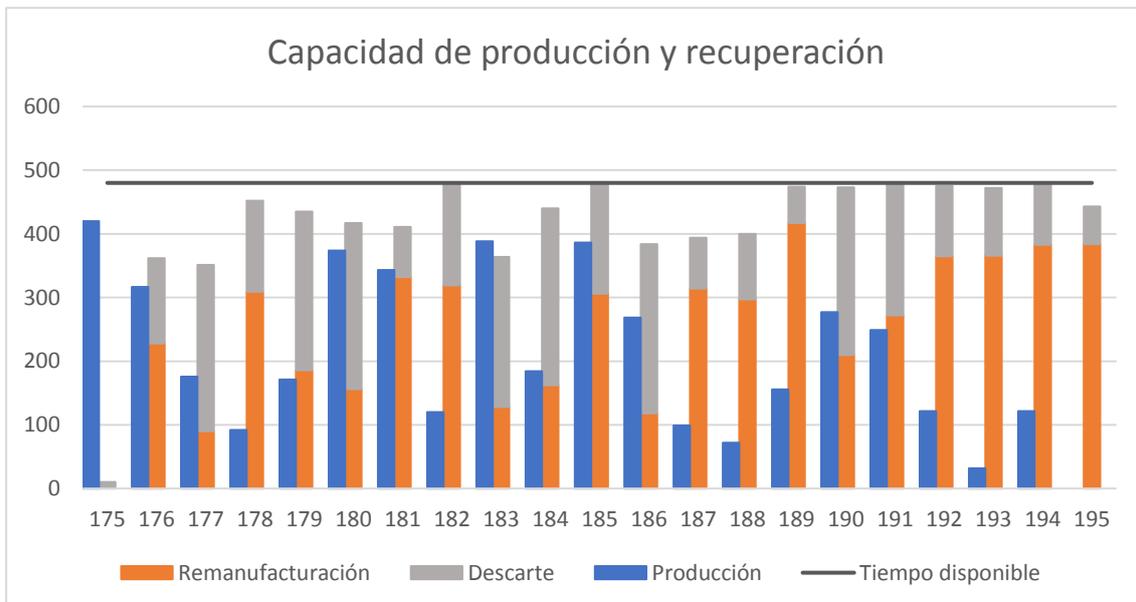


Figura 3.5-9: Capacidad de producción y de remanufactura en minutos para el mes de setiembre

Se desprende de los resultados obtenidos que se habilitan retornos en todos los períodos, y se ve en la Figura 3.5-9 que en todos se remanufactura, menos en el período 175 que se descarta. Además, se observa que en ningún período se produce a capacidad máxima, sin embargo, en varios períodos la línea de recuperación se encuentra trabajando a capacidad máxima. Dentro de la línea de recuperación se ve que se dedica más tiempo a la remanufacturación que al descarte.

Los productos retornados a la planta en todo el mes de setiembre fueron 1228, de los cuales 515 fueron remanufacturados y 413 fueron descartados. Los restantes 300 permanecieron almacenados. Se muestra este comportamiento en la Figura 3.5-10.

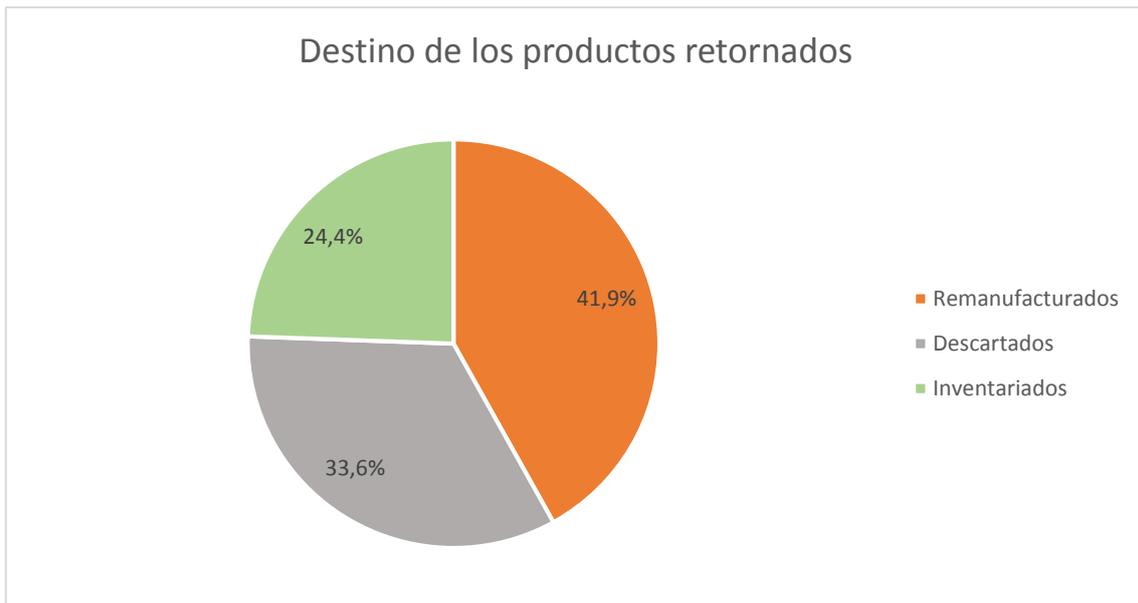


Figura 3.5-10: Gráfico de torta que representa el destino de los productos retornados en el horizonte de planificación

Se concluye que, bajo las hipótesis y datos estimados, es económicamente beneficioso remanufacturar CAEs usados y que la remanufacturación juega un papel clave en la resolución del modelo. Mientras que la producción afecta solo el nivel de inventario de productos terminados, la remanufacturación y el descarte afectan también al inventario de productos retornados y el de productos habilitados.

4 Análisis de sensibilidad

En la presente sección se presentan los resultados del análisis de sensibilidad realizado. En primer lugar, se introducen consideraciones que se tomarán en cuenta para todos los casos analizados, así como también se fundamenta la cantidad de períodos utilizados para tal fin. En segundo lugar, se definen los casos que se analizarán, los indicadores aplicados y se realiza un análisis de los mismos. Por último, se combinan casos y se presentan conclusiones.

4.1. Introducción

En esta sección se realiza un análisis de sensibilidad al modelo con opciones de retorno. Este análisis consiste en observar el comportamiento de las soluciones óptimas ante cambios en los parámetros. El análisis de sensibilidad es particularmente necesario cuando los parámetros no se pueden estimar con un alto grado de precisión como sucede en problemas con opciones de retorno dada la incertidumbre en la cantidad y condición de los productos usados devueltos al origen. Por lo tanto, es importante en estos casos estudiar el comportamiento de las soluciones óptimas ante variaciones en los valores de los parámetros estimados para poder sugerir acciones beneficiosas a la empresa comprometida con la recuperación de productos usados.

Para llevar a cabo el análisis se plantearon algunos casos de prueba para la formulación original del problema y para las siguientes políticas, (las ya utilizadas en la Sección 3.5.3):

1. Una vez que habilita, remanufacturar al menos una calidad de cualquier tipo de CAE
2. Cada vez que remanufactura un retorno habilitado de cualquier tipo de CAE y calidad, que remanufacture todos los habilitados con estas mismas características
3. Habilitar en todos los períodos

Para conocer la complejidad computacional del problema y elegir la cantidad de períodos a utilizar para el análisis de sensibilidad, en la Figura 4.1-1 se grafican los tiempos de ejecución a medida que se añaden períodos en una computadora con sistema operativo Intel Core i7-4710HQ CPU @ 2.50 GHz, 16 Gb RAM, mediante Gurobi 8.1.0.

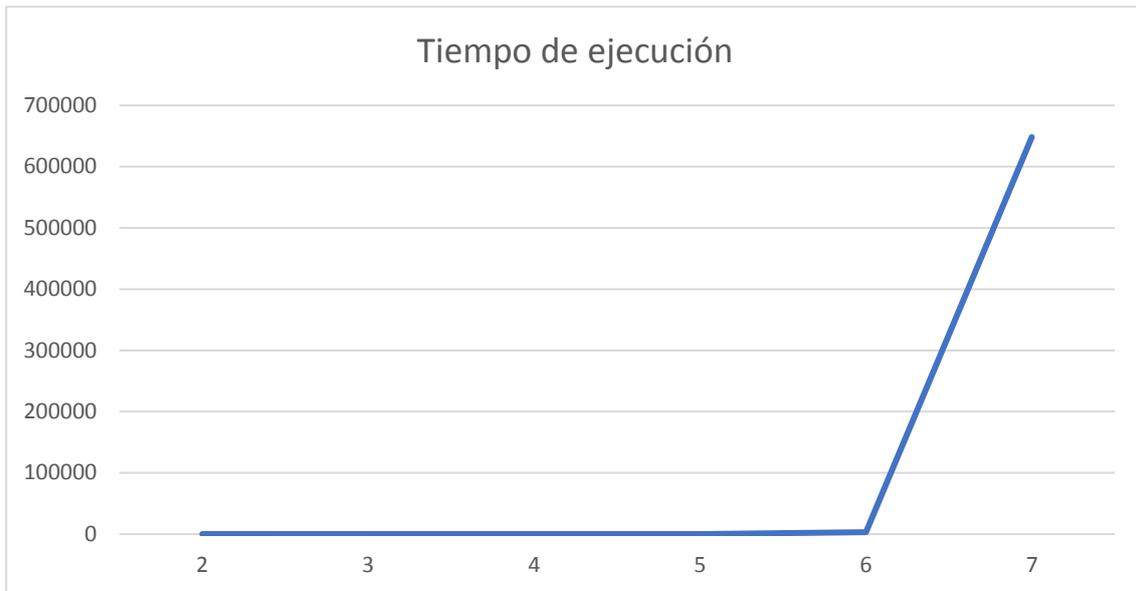


Figura 4.1-1: Evolución de tiempos de ejecución insumidos para la obtención de soluciones óptimas para el modelo con opciones de retorno

De la Figura 4.1-1 se observa que los tiempos de ejecución insumidos para alcanzar una solución óptima aumentan exponencialmente conforme aumentan los períodos. Para seis períodos el tiempo de ejecución es de más de 45 minutos mientras que para cinco el tiempo es de menos de dos minutos, por lo tanto, se elige ejecutar las pruebas para el análisis de sensibilidad con un horizonte de planificación de cinco períodos.

4.2. Casos analizados

Se proponen análisis ante cambios en los siguientes parámetros:

- Proporción de calidades de los retornos: parámetro α_{qt}
- Cantidad de retornos: parámetro U_{ti}
- Tiempo disponible en la línea de recuperación: parámetro TD^u
- Costo fijo de preparación de remanufacturación: parámetro K_{qt}^r
- Costo fijo de habilitar los retornos: parámetro K^e
- Costo de inventario de productos retornados y de productos retornados luego de habilitados: parámetros H^u y H_q^e respectivamente

Además del valor objetivo, los indicadores considerados en el análisis de sensibilidad por su relevancia y que se calcularon para todos los casos analizados son:

- $Tasa\ de\ habilitación = \frac{Total\ de\ retornos\ habilitados}{Total\ de\ retornos}$
- $Tasa\ de\ rem = \frac{Total\ de\ retornos\ remanufacturados}{Total\ de\ retornos\ remanufacturables}$
- $Tasa\ de\ rem\ de\ los\ habilitados = \frac{Total\ de\ retornos\ remanufacturados}{Total\ de\ retornos\ remanufacturables\ habilitados}$
- $Cumplimiento\ de\ la\ demanda\ a\ partir\ de\ productos\ rem = \frac{Total\ de\ retornos\ rem}{Total\ prod\ demandados}$

En la Tabla 4.2-1 se muestra la ejecución y los indicadores para las distintas formulaciones del modelo con los “datos base” para cinco períodos. Los “datos base” son los estimados en la Sección 2 del Anexo II. A este escenario se le llamará de aquí en adelante “escenario base”.

Formulación	Tiempo de ejecución	Valor objetivo	Tasa de habilitación	Tasa de remanufacturación	Tasa remanufacturación de los habilitados	Cumplimiento de la demanda a partir de productos rem
Original	68,98 segundos	65.478	78,5%	75,5%	78,5%	18,3%
Con política 1	278,50 segundos	65.960	76,7%	74,6%	81,4%	18,0%
Con política 2	61,10 segundos	65.478	78,5%	75,5%	78,5%	18,3%
Con política 3	36,02 segundos	65.478	78,5%	75,5%	78,5%	18,3%

Tabla 4.2-1: Ejecución e indicadores de las distintas formulaciones para el escenario base

En escala de colores con codificación tipo semáforo para cada indicador se representa en verde, amarillo y rojo las formulaciones de más a menos convenientes. Esta codificación se utiliza para todos los casos analizados de forma de visualizar fácilmente la opción más conveniente entre las distintas formulaciones para cada uno de los indicadores.

Tal como se puede observar en la Tabla 4.2-1 la solución óptima para el escenario base cumple que cada vez que remanufactura un retorno habilitado de cierto tipo de CAE y calidad, remanufactura todos los habilitados con estas mismas características (política 2). En la solución óptima se habilitan retornos en todos los períodos (política 3), sin embargo, no se remanufactura siempre que se habilita (política 1).

Se observa de los resultados obtenidos que se descarta en los periodos que se habilita y no se remanufactura. La actividad de habilitación consiste en traspasar productos al inventario de habilitados el cual es más costoso, por lo tanto, cada vez que se habilita es lógico que se realice alguna actividad de recuperación.

En la interpretación de resultados del problema con opciones de retorno (Sección 3.5.5.2) se logró concluir que la recuperación de productos usados es al menos un 7,2% más económica que el caso en que no se aceptan retornos. Por lo tanto, si se traslada este porcentaje a los valores objetivos aquí obtenidos se deduce que el problema sin opciones de retornos costaría 70.559 (con respecto a la formulación original).

De aquí en adelante, los escenarios “favorable”, “desfavorable” y “muy desfavorable” son comparados con el escenario base y están referidos en términos de la remanufacturación (y no de costos).

4.2.1. Proporción de calidades de los retornos

Se plantean dos escenarios, uno favorable y otro desfavorable en comparación con el escenario base para la proporción de calidades de los retornos. El caso favorable puede

representar un escenario donde al mejorar el diseño del producto mejore la calidad de este con respecto a la planteada en el escenario base.

- Escenario base:
 - 50%/50%: retornos de cobre remanufacturables/descartables
 - 15%/85%: retornos de acero remanufacturables/descartables
- Escenario favorable:
 - 70%/30%: retornos de cobre remanufacturables/descartables
 - 30%/70%: retornos de acero remanufacturables/descartables
- Escenario desfavorable:
 - 30%/70%: retornos de cobre remanufacturables/descartables
 - 7%/93%: retornos de acero remanufacturables/descartables

Formulación	Tiempo de ejecución	Valor objetivo	Tasa de habilitación	Tasa de remanufacturaación	Tasa de remanufacturaación de los habilitados	Cumplimiento de la demanda a partir de productos rem
Original	8,83 segundos	63.926	71,5%	64,9%	82,0%	22,8%
Con política 1	11,27 segundos	64.132	68,1%	66,1%	89,9%	23,3%
Con política 2	5,86 segundos	63.926	71,5%	64,9%	82,0%	22,8%
Con política 3	3,45 segundos	63.926	71,5%	64,9%	82,0%	22,8%

Tabla 4.2-2: Ejecución e indicadores de las distintas formulaciones para el escenario favorable de la proporción de las calidades de los retornos

Formulación	Tiempo de ejecución	Valor objetivo	Tasa de habilitación	Tasa de remanufacturaación	Tasa de remanufacturaación de los habilitados	Cumplimiento de la demanda a partir de productos rem
Original	311,87 segundos	68.902	65,9%	62,7%	85,4%	8,91%
Con política 1	92,26 segundos	69.068	73,7%	68,9%	83,3%	9,04%
Con política 2	131,22 segundos	68.902	65,9%	62,7%	85,4%	8,91%
Con política 3	73,66 segundos	69.087	65,9%	62,7%	85,4%	8,91%

Tabla 4.2-3: Ejecución e indicadores de las distintas formulaciones para el escenario desfavorable de la proporción de las calidades de los retornos

En la Figura 4.2-1 se muestra el cumplimiento de la demanda a partir de productos remanufacturados y productos nuevos para el escenario favorable y desfavorable.

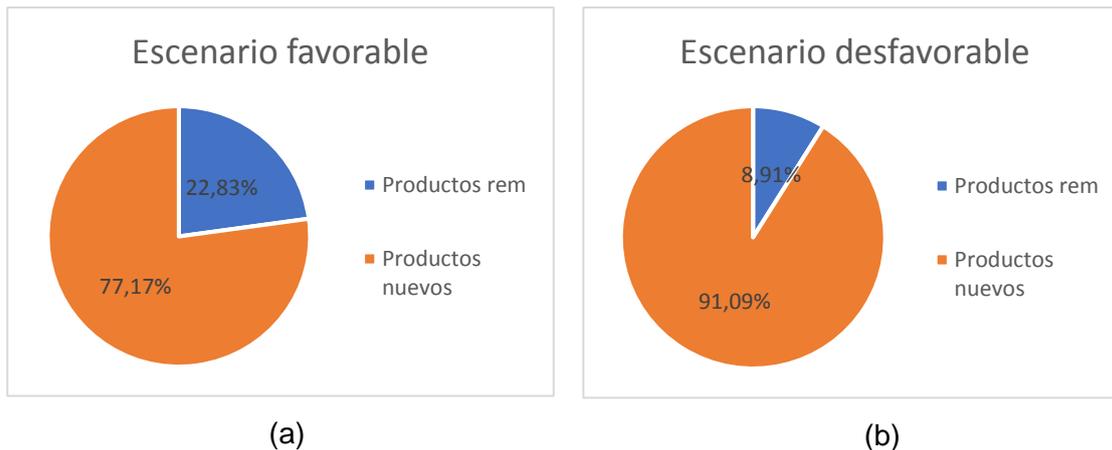


Figura 4.2-1: Cumplimiento de la demanda a partir de remanufactura y producción para el análisis de la proporción de la calidad de los retornos; (a) corresponde al escenario favorable y (b) al desfavorable

A partir de mejoras que se puedan implementar en el diseño de los CAEs producidos por Rivomark, (por ejemplo, las mencionadas en la Sección 3.4.1), es posible obtener retornos con mejor calidad que los estimados a partir del diseño actual. Para ello se requiere de un cambio en el proceso productivo el cual según se puede observar en la Tabla 4.2-2 redundaría en beneficios económicos y en un aumento en la cantidad de productos remanufacturados.

De los resultados obtenidos del escenario base se observa que solo el 18,3% de la demanda es satisfecha a partir de productos remanufacturados, mientras que en el caso favorable podría aumentar a 22,8%. Por el contrario, si los productos usados retornan con peor calidad que la estimada (escenario desfavorable), debido a un mal mantenimiento por parte del usuario o a un diseño del producto sin miras en la remanufactura, no solo aumentarían los costos, sino que también disminuiría en gran medida el cumplimiento de la demanda a partir de productos remanufacturados (a 8,91%), es decir, el compromiso con el medio ambiente, tal como se observa de la Tabla 4.2-3.

4.2.2. Cantidad de retornos

En la estimación de datos los valores de los retornos se generaron de forma aleatoria con una distribución normal, considerando como media el 60% de la media de la demanda para cada tipo de CAE y una desviación estándar de 20%. Para este análisis se plantea un escenario favorable y otro desfavorable en comparación con la estimación realizada. A su vez, se entendió conveniente que si aumenta la cantidad de retornos disminuye el inventario de seguridad de producto terminado y, de forma recíproca, si disminuye la cantidad de retornos aumenta dicho inventario. Esto último se supone ya que la amortiguación necesaria para cubrirse frente a imprevistos depende en gran parte del flujo de entrada de los retornos.

- Escenario base:
 - Media de los retornos de 60% de la media de la demanda

- Inventario de seguridad de producto terminado 1/3 del utilizado en el modelo sin opciones de retornos
- Escenario favorable:
 - Media de los retornos de 90% de la media de la demanda
 - Inventario de seguridad de producto terminado 1/6 del utilizado en el modelo sin opciones de retornos
- Escenario desfavorable:
 - Media de los retornos de 30% de la media de la demanda
 - Inventario de seguridad de producto terminado 1/2 del utilizado en el modelo sin opciones de retornos

El escenario favorable en el cual aumentan la cantidad de retornos podría producirse si se aumentarían los esfuerzos para incentivar a los consumidores a devolver los productos al EoL. Mientras que el desfavorable corresponde a un escenario pesimista en el cual no se incentiva a los usuarios a retornar los productos al EoL o hay poca respuesta por parte de los mismos.

Formulación	Tiempo de ejecución	Valor objetivo	Tasa de habilitación	Tasa de remanufacturación	Tasa de remanufacturación de los habilitados	Cumplimiento de la demanda a partir de productos rem
Original	1880,75 segundos	62.776	68,2%	73,2%	84,6%	22,6%
Con política 1	6302,39 segundos	63.073	68,5%	73,9%	84,7%	22,8%
Con política 2	4137,65 segundos	62.853	68,2%	73,2%	84,6%	22,6%
Con política 3	1800,22 segundos	62.776	68,2%	73,2%	84,6%	22,6%

Tabla 4.2-4: Ejecución e indicadores de las distintas formulaciones del escenario favorable de la cantidad de retornos

Formulación	Tiempo de ejecución	Valor objetivo	Tasa de habilitación	Tasa de remanufacturación	Tasa de remanufacturación de los habilitados	Cumplimiento de la demanda a partir de productos rem
Original	0,91 segundos	66.176	53,6%	71,3%	75,0%	7,17%
Con política 1	1,45 segundos	66.472	55,5%	73,4%	73,9%	7,39%
Con política 2	0,62 segundos	66.178	53,6%	71,3%	75,0%	7,17%
Con política 3	0,92 segundos	66.176	53,6%	71,3%	75,0%	7,17%

Tabla 4.2-5: Ejecución e indicadores de las distintas formulaciones del escenario desfavorable de la cantidad de retornos

En primera instancia, se observa de la Tabla 4.2-4 y la Tabla 4.2-5 cambios drásticos en los tiempos de ejecución. El escenario desfavorable, al contar con menos cantidad de retornos, resulta más sencillo de resolver computacionalmente, ya que al remanufacturar menos el problema se asemeja al problema clásico de planificación de

la producción. Al ir aumentando la cantidad de retornos la dificultad computacional crece considerablemente.

En el escenario desfavorable al disminuir la cantidad de producto retornado disminuye el inventario de retornos, pero aumenta el inventario de seguridad de producto terminado. Este comportamiento deriva en mayores costos ya que el costo de mantener inventario de producto terminado es el mayor de los costos de inventario. El razonamiento para el escenario favorable es recíproco al anterior y resulta en menores costos de inventario. Del análisis se concluye que cuantos más retornos se reciban, menor es el valor objetivo.

Por otra parte, se destaca que, al aumentar la cantidad de retornos también aumenta el cumplimiento de la demanda a partir de productos remanufacturados (de 18,3% a 22,6%); y que, al disminuir los retornos, el cumplimiento de la demanda a partir de productos remanufacturados baja considerablemente (de 18,3% a 7,17%). De cualquier forma, la solución óptima de ambos escenarios habilita en todos los períodos. Se grafica en la Figura 4.2-2 el cumplimiento de la demanda a partir de productos remanufacturados a medida que aumenta la cantidad de productos retornados. Los valores son tomados de los resultados de la formulación original. De la gráfica se desprende que el cumplimiento de la demanda aumenta hasta 23% cuando la media de los retornos es del 90% de la media de la demanda

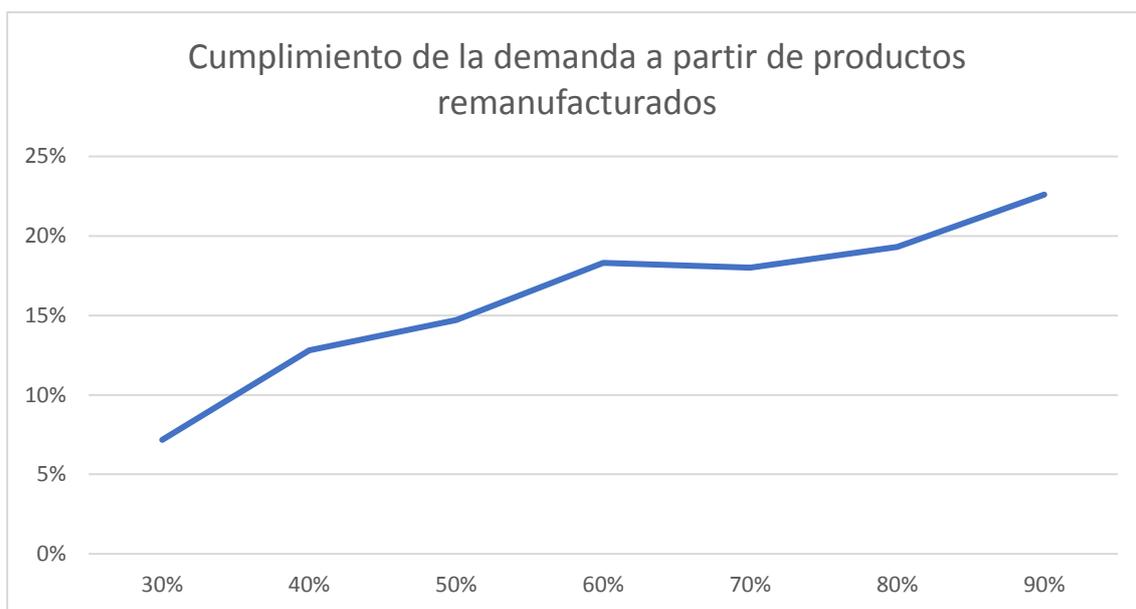


Figura 4.2-2: Cumplimiento de la demanda a partir de productos remanufacturados conforme aumenta la media de los retornos (eje x)

De todo lo mencionado se concluye que un aumento en la cantidad de retornos resulta en beneficios económicos por lo que es de gran utilidad hacer hincapié en la devolución del producto al EoL.

4.2.3. Tiempo disponible en la línea de recuperación

Se experimentan dos escenarios alternativos al planteado en el caso base para el tiempo disponible en la línea de recuperación:

- Escenario base: $TD^u = 8 \text{ hs}$
- Escenario favorable: $TD^u = 10 \text{ hs}$
- Escenario desfavorable: $TD^u = 6 \text{ hs}$

Formulación	Tiempo de ejecución	Valor objetivo	Tasa de habilitación	Tasa de remanufacturación	Tasa de remanufacturación de los habilitados	Cumplimiento de la demanda a partir de productos rem
Original	53,81 segundos	65.436	80,0%	80,9%	81,1%	19,6%
Con política 1	488,51 segundos	65.924	79,3%	80,9%	82,6%	19,6%
Con política 2	51,69 segundos	65.441	79,3%	80,9%	82,6%	19,6%
Con política 3	46,55 segundos	65.436	80,0%	80,9%	81,1%	19,6%

Tabla 4.2-6: Ejecución e indicadores de las distintas formulaciones del escenario favorable del tiempo disponible en la línea de recuperación

Formulación	Tiempo de ejecución	Valor objetivo	Tasa de habilitación	Tasa de remanufacturación	Tasa de remanufacturación de los habilitados	Cumplimiento de la demanda a partir de productos rem
Original	23,17 segundos	65.653	73,7%	71,9%	80,8%	17,4%
Con política 1	187,69 segundos	66.126	71,9%	66,5%	78,7%	16,1%
Con política 2	23,99 segundos	65.653	73,7%	71,9%	80,8%	17,4%
Con política 3	17,92 segundos	65.653	73,7%	71,9%	80,8%	17,4%

Tabla 4.2-7: Ejecución e indicadores de las distintas formulaciones del escenario desfavorable del tiempo disponible en la línea de recuperación

Tal como se observa de la Tabla 4.2-6, para el escenario favorable los valores objetivos disminuyen muy levemente con respecto a los valores del escenario base, pero se observan beneficios en la tasa de remanufacturación y en el cumplimiento de la demanda a partir de productos remanufacturados. Por lo tanto, podría resultar conveniente para la planta implementar este escenario a costa de aumentar el tiempo disponible en la línea de recuperación ya sea mediante más recursos humanos o de maquinaria.

En el escenario desfavorable, Tabla 4.2-7, los valores objetivos aumentan muy levemente con respecto al base, pero este cambio podría implicar pagar menos horas de mano de obra lo que redundaría en menores costos. Sin embargo, con esta planificación se reduce la tasa de remanufacturación y el cumplimiento de la demanda a partir de productos remanufacturados.

A continuación, en la Figura 4.2-3 y en la Figura 4.2-4 se grafican para el escenario favorable y desfavorable respectivamente los tiempos utilizados en la línea de producción y recuperación, y los tiempos disponibles para el escenario base y para el experimentado.

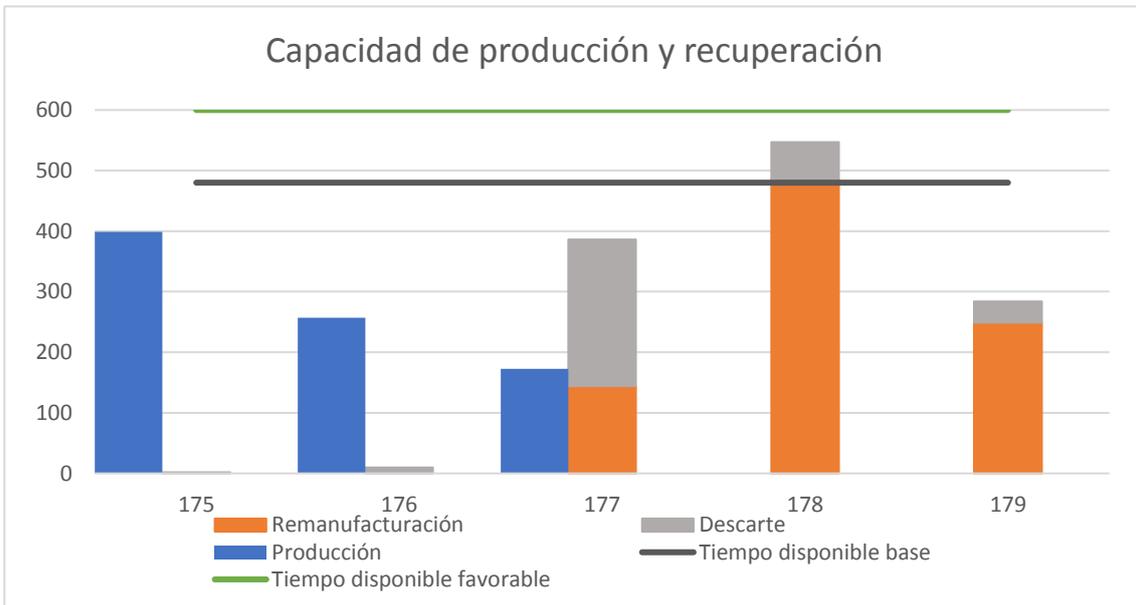


Figura 4.2-3: Capacidad de producción y recuperación en minutos en el escenario favorable al aumentar el tiempo disponible de la línea de recuperación

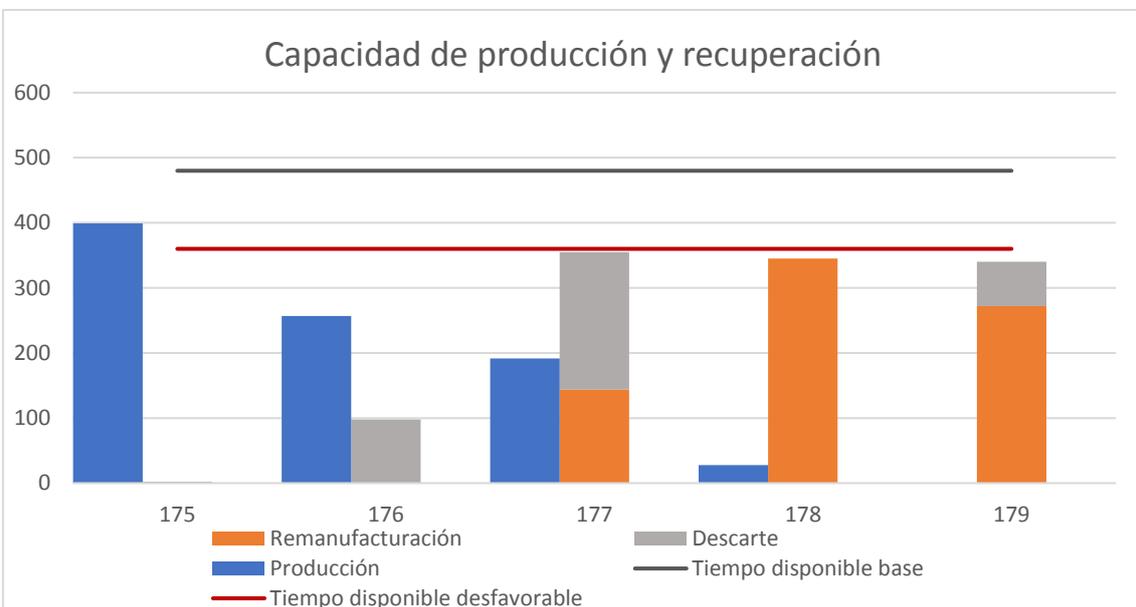


Figura 4.2-4: Capacidad de producción y recuperación en minutos en el escenario desfavorable al aumentar el tiempo disponible de la línea de recuperación

De la Tabla 4.2-7 se observa que la solución óptima cumple la política 3, es decir, que se habilita en todos los períodos, sin embargo, no se remanufactura en todos. De los resultados obtenidos se aprecia que cada vez que se habilitan retornos, se realiza

alguna operación de recuperación. Aunque esta operación puede ser poco visible en la Figura 4.2-3 y la Figura 4.2-4 por ejemplo en los períodos 175 o 176, al requerir mucho menos tiempo que el disponible.

De la Figura 4.2-3 se observa que al aumentar la capacidad máxima de la línea de recuperación solamente en el período 178 utiliza parte de las dos horas aumentadas (67 minutos). Es decir, en el escenario base la capacidad máxima de recuperación limita la solución óptima del problema. Además, de la Figura 4.2-4 se observa que, al disminuir la capacidad máxima de recuperación a seis horas, la planificación afecta también la línea de producción ya que al remanufacturar menos debe producir más. Esto redundará en una disminución del cumplimiento de la demanda a partir de productos remanufacturados y de la tasa de remanufactura.

4.2.4. Costos fijos de preparación de remanufactura

La media de los costos fijos de preparación de la remanufactura estimados en el caso base corresponde a la mitad de la media de los costos fijos de preparación de producción estimados. Es decir, la estimación de costos realizada se considera favorable a la recuperación. Por lo tanto, se plantean dos escenarios menos favorables que la estimación realizada de la siguiente forma:

- Escenario base: relación 0,5/1 costos remanufactura/producción
- Escenario desfavorable: relación 0,75/1 costos remanufactura/producción
- Escenario muy desfavorable: relación 1/1 costos remanufactura/producción

Formulación	Tiempo de ejecución	Valor objetivo	Tasa de habilitación	Tasa de remanufactura	Tasa de remanufactura de los habilitados	Cumplimiento de la demanda a partir de productos rem
Original	23,46 segundos	67.105	68,9%	68,3%	83,5%	16,5%
Con política 1	15,31 segundos	67.489	66,3%	55,8%	73,8%	13,5%
Con política 2	17,94 segundos	67.105	68,9%	68,3%	83,5%	16,5%
Con política 3	8,80 segundos	67.105	68,9%	68,3%	83,5%	16,5%

Tabla 4.2-8: Ejecución e indicadores de las distintas formulaciones del escenario desfavorable de los costos fijos de remanufactura

Formulación	Tiempo de ejecución	Valor objetivo	Tasa de habilitación	Tasa de remanufacturación	Tasa de remanufacturación de los habilitados	Cumplimiento de la demanda a partir de productos rem
Original	12,51 segundos	68.222	64,1%	56,7%	75,9%	13,7%
Con política 1	6,69 segundos	68.492	61,5%	52,2%	76,3%	12,6%
Con política 2	11,63 segundos	68.222	64,1%	56,7%	75,9%	13,7%
Con política 3	6,60 segundos	68.222	64,1%	56,7%	75,9%	13,7%

Tabla 4.2-9: Ejecución e indicadores de las distintas formulaciones del escenario muy desfavorable de los costos fijos de remanufacturación

Para todas las relaciones de costos de preparación de remanufacturación ejecutadas se cumple que la solución óptima habilita en todos los períodos (política 3) y que cada vez que remanufactura un tipo de CAE de cualquier calidad, remanufactura todos los habilitados de esas mismas características (política 2).

De los resultados obtenidos y, de la Tabla 4.2-8 y Tabla 4.2-9, se repara que al aumentar la relación de costos la tasa de remanufacturación disminuye en gran medida pero que aún con una relación 1/1 sigue remanufacturando un 56,7% de los retornos remanufacturables. Adicionalmente se observa de la Tabla 4.2-9 que en caso de ser necesario incurrir en costos de remanufacturación más elevados, sigue sin ser conveniente remanufacturar al menos una calidad de un tipo de CAE (política 1).

4.2.5. Costo fijo de habilitación

El costo fijo de habilitación estimado para el escenario base se considera favorable a la recuperación, por lo tanto, se planten dos escenarios menos favorables:

- Escenario base: $K^e = 100$
- Escenario desfavorable: $K^e = 300$
- Escenario muy desfavorable: $K^e = 500$

Formulación	Tiempo de ejecución	Valor objetivo	Tasa de habilitación	Tasa de remanufacturación	Tasa de remanufacturación de los habilitados	Cumplimiento de la demanda a partir de productos rem
Original	91,43 segundos	66.478	78,5%	75,5%	78,5%	18,3%
Con política 1	37,86 segundos	66.560	76,7%	74,6%	81,4%	18,0%
Con política 2	228,90 segundos	66.478	78,5%	75,5%	78,5%	18,3%
Con política 3	30,76 segundos	66.478	78,5%	75,5%	78,5%	18,3%

Tabla 4.2-10: Ejecución e indicadores de las distintas formulaciones del escenario desfavorable del costo fijo de habilitar retornos

Formulación	Tiempo de ejecución	Valor objetivo	Tasa de habilitación	Tasa de remanufacturación	Tasa de remanufacturación de los habilitados	Cumplimiento de la demanda a partir de productos rem
Original	31,73 segundos	67.160	76,7%	74,6%	81,4%	18,0%
Con política 1	37,25 segundos	67.160	76,7%	74,6%	81,4%	18,0%
Con política 2	47,54 segundos	67.179	76,7%	70,1%	76,5%	17,0%
Con política 3	31,81 segundos	67.478	78,5%	75,5%	78,5%	18,3%

Tabla 4.2-11: Ejecución e indicadores de las distintas formulaciones del escenario muy desfavorable del costo fijo de habilitar retornos

Se observa de los resultados de la Tabla 4.2-10, que al aumentar el costo fijo de habilitar de 100 a 300 la solución óptima es la misma pero el valor objetivo aumenta, acorde al costo fijo de habilitar. Sin embargo, de la Tabla 4.2-11, vemos que al subir el costo de 300 a 500, tal como se intuía, deja de ser conveniente habilitar en todos los períodos, pero cada vez que habilita remanufactura (política 1).

4.2.6. Costos de mantener inventario de retornos

Se plantea un escenario donde el costo de inventario de producto retornado es menor al estimado en el escenario base.

- Escenario base:
 - $H^u = 17$
 - $H_q^e = 18, \quad \forall q \in QD$
 - $H_q^e = 19, \quad \forall q \in QR$
- Escenario desfavorable:
 - $H^u = 15$
 - $H_q^e = 16, \quad \forall q \in QD$
 - $H_q^e = 17, \quad \forall q \in QR$

Formulación	Tiempo de ejecución	Valor objetivo	Tasa de habilitación	Tasa de remanufacturación	Tasa de remanufacturación de los habilitados	Cumplimiento de la demanda a partir de productos rem
Original	42,80 segundos	65.337	71,5%	71,9%	81,6%	17,4%
Con política 1	14,20 segundos	65.397	71,9%	66,5%	78,7%	16,1%
Con política 2	44,52 segundos	65.337	71,5%	71,9%	81,6%	17,4%
Con política 3	6,19 segundos	65.337	71,5%	71,9%	81,6%	17,4%

Tabla 4.2-12: Ejecución e indicadores de las distintas formulaciones del escenario favorable de los costos de inventario de producto retornado y habilitado

De la Tabla 4.2-12 se observa que el comportamiento de la solución óptima, al disminuir los costos de mantener inventario de retornos, sigue cumpliendo las políticas 2 y 3, y no la política 1. Por otro lado, aunque el escenario analizado es favorable en términos de costo, resulta desfavorable para la remanufacturación: la tasa de habilitación disminuye, también se ve afectada la tasa de remanufacturación y el cumplimiento de la demanda a partir de productos remanufacturados.

4.3. Combinación de casos y conclusiones

De todos los casos analizados, se concluye que aún en los menos beneficiosos, se aprecia un ahorro económico en comparación con el escenario sin opciones de retorno. Asimismo, se corrobora que la solución de costo mínimo siempre cumple con alguna de las políticas elegidas. Se observa que la solución óptima de la formulación original generalmente cumple con la política 3 de habilitar retornos en todos los períodos, con excepción de dos casos experimentados. Por lo tanto, se considera que esta es una buena recomendación para apoyar la toma de decisiones en la planta, salvo que el costo de habilitar sea muy alto, o que el porcentaje de retornos remanufacturables sea bajo. Por otra parte, la solución óptima de la formulación original solo cumple la política 1 para el caso desfavorable del costo de habilitación. Es decir, en general es recomendable habilitar en todos los períodos, no necesariamente remanufacturando cada vez que se habilita, pero sí realizando alguna actividad de recuperación.

De los casos estudiados, el escenario con mejor valor objetivo y que a su vez tiene una tasa de remanufacturación y un cumplimiento de la demanda a partir de productos remanufacturados alto es el de aumentar la cantidad de retornos. El caso que le sigue con mejor valor objetivo y también con el mayor cumplimiento de la demanda a partir de productos remanufacturados es el de aumentar la proporción de retornos remanufacturables. Adicionalmente, aquel con mejor tasa de remanufacturación es el escenario de aumentar el tiempo disponible en la línea de recuperación a 10 horas. A raíz de lo anterior se presume que se obtendrá una mejor solución en términos de costos y de remanufacturación con estos tres escenarios en conjunto, por lo tanto, se ejecutará una combinación de los casos con las siguientes características:

- Escenario base
 - 50%/50%: retornos de cobre remanufacturables/descartables
 - 15%/85%: retornos de acero remanufacturables/descartables
 - Media de los retornos de 60% de la media de la demanda
 - Inventario de seguridad de producto terminado 1/3 del utilizado en el modelo sin opciones de retornos
 - $TD^u = 8 \text{ hs}$
- Escenario favorable combinado
 - 70%/30%: retornos de cobre remanufacturables/descartables
 - 30%/70%: retornos de acero remanufacturables/descartables
 - Media de los retornos de 90% de la media de la demanda
 - Inventario de seguridad de producto terminado 1/6 del utilizado en el modelo sin opciones de retornos
 - $TD^u = 10 \text{ hs}$

Formulación	Tiempo de ejecución	Valor objetivo	Tasa de habilitación	Tasa de remanufacturación	Tasa de remanufacturación de los habilitados	Cumplimiento de la demanda a partir de productos rem
Original	4,69 segundos	55.145	75,6%	86,4%	73,0%	38,7%
Con política 1	5,38 segundos	55.145	75,6%	86,4%	73,0%	38,7%
Con política 2	6,63 segundos	55.263	79,4%	85,4%	69,8%	38,3%
Con política 3	5,96 segundos	55.245	75,6%	86,4%	73,0%	38,7%

Tabla 4.3-1: Ejecución e indicadores de las distintas formulaciones para el escenario favorable combinado

De la Tabla 4.3-1 se observan grandes mejoras en términos de costos y remanufacturación. La tasa de remanufacturación y el cumplimiento de la demanda a partir de productos remanufacturados aumentó sustancialmente en comparación con los escenarios anteriores. La solución óptima alcanzó un valor objetivo 15,8% menor que el del escenario base y 21,8% menor que el del modelo sin opciones de retorno. Además, se desprende que la solución óptima cumple solamente la política 1 por lo tanto cuando se tienen casos muy optimistas con gran cantidad de retornos y proporción de remanufacturables alta es conveniente que una vez que habilite, remanufacture. A diferencia de lo que se esperaba dados los resultados anteriores, la solución óptima no cumple que habilite retornos en todos los períodos.

Se concluyen tres aspectos claves para disminuir los costos y a la vez ser proclives a la remanufacturación. Por un lado, es importante realizar un esfuerzo en mejorar el diseño con miras en la remanufacturación e incentivar el buen uso y mantenimiento de los CAEs por parte del usuario para que el porcentaje de retornos remanufacturables aumente. Asimismo, incentivar la devolución de los productos al EoL para aumentar la cantidad de retornos recibidos. Por último, aumentar la capacidad disponible de la línea de recuperación en la medida que sea necesario.

Finalmente, se prueban los casos más desfavorables en términos de costos y de remanufacturación en conjunto de forma de evaluar el peor escenario posible y ver en qué medida se vería perjudicada la planta. Los casos que se combinan son los más desfavorables de la Sección 4.2.1, 4.2.4 y 4.2.5:

- Escenario base:
 - 60%/40%: retornos de cobre remanufacturables/descartables
 - 15%/85%: retornos de acero remanufacturables/descartables
 - $K^e = 100$
 - relación 0,5/1 costos remanufacturación/producción
- Escenario desfavorable combinado:
 - 30%/70%: retornos de cobre remanufacturables/descartables
 - 7%/93%: retornos de acero remanufacturables/descartables
 - $K^e = 500$
 - relación 1/1 costos remanufacturación/producción

Formulación	Tiempo de ejecución	Valor objetivo	Tasa de habilitación	Tasa de remanufacturación	Tasa de remanufacturación de los habilitados	Cumplimiento de la demanda a partir de productos rem
Original	26,36 segundos	72.170	45,6%	49,0%	97,0%	7,0%
Con política 1	17,35 segundos	72.294	49,3%	45,9%	90,9%	6,5%
Con política 2	23,74 segundos	72.170	45,6%	49,0%	97,0%	7,0%
Con política 3	37,58 segundos	73.345	54,8%	55,1%	94,7%	7,8%

Tabla 4.3-2: Ejecución e indicadores de las distintas formulaciones para el escenario desfavorable combinado

De la Tabla 4.3-2 se observa que pese a combinar los casos más desfavorables en términos de costos y de forma de perjudicar la remanufacturación, la solución obtenida muestra que, aunque en menor medida (tasa de remanufacturación de 49%), sigue siendo conveniente remanufacturar. Este escenario pesimista es 2,3% más costoso que el escenario sin opciones de retorno, por lo que podría resultar desalentador para la empresa aplicar la línea de recuperación en un caso como este. Sin embargo, una organización comprometida con la recuperación de productos puede lograr considerables beneficios ambientales y sociales, y priorizarlos frente a los posiblemente bajos beneficios económicos.

5 Conclusiones

En el presente informe se describe el trabajo realizado en el marco del proyecto de grado, sobre la planificación de la producción con opciones de recuperación de productos usados y su aplicación en una industria uruguaya. Se presentó en primer lugar un marco teórico que incluye la revisión bibliográfica sobre los problemas de producción con recuperación de productos usados, así como de normativa y regulaciones existentes, con el fin de contextualizar al lector. El mismo se realizó principalmente a partir de los conocimientos adquiridos en la elaboración del estado del arte. A partir de esto fue posible cumplir con el primer objetivo del proyecto el cual era realizar un relevamiento sobre la recuperación de productos usados tanto de la literatura, como de la realidad normativa e industrial, a nivel global y local.

Al ser la remanufacturación una de las prácticas más beneficiosas dentro de las estrategias de recuperación de productos usados, se tomó como caso de estudio una planta multi-producto de CAEs, la cual no recupera hoy en día productos usados, pero dada las características de sus productos se encuentra un gran potencial para aplicar la remanufacturación. Uruguay no se caracteriza por tener fabricación nacional de productos, pero en los casos que si existe se considera provechoso instaurar la recuperación debido a todos los beneficios ambientales que esta conrae.

Una vez elegido el caso de estudio se elaboró en primer lugar un modelo de la planificación de la producción actual, es decir, sin opciones de retorno. Dada la magnitud y complejidad del problema abordado fue necesaria la utilización de un método de resolución eficiente, como Gurobi o CPLEX. Adicionalmente, fue necesario recurrir a métodos de resolución heurísticos o a computadoras con mayores prestaciones con las que se contaba en un primer momento para poder aplicar un método de resolución exacto. Las principales heurísticas que se llevaron a cabo fueron las llamadas de “sentido común”, optando finalmente por particionar el problema en horizontes de planificación bimensuales. Al implementar la heurística no se encontró solución factible para el último subproblema. Por lo tanto, la forma que consideramos más conveniente para encontrar la factibilidad fue unificando los últimos dos subproblemas que, si bien no se logró la calidad de la solución deseada dado el tamaño del problema, se encontró una solución factible. Finalmente, la heurística logró un valor objetivo menor que el obtenido por el método exacto, concluyéndose que el desempeño de la heurística fue bueno. De esta forma se logró obtener un plan de compras y producción acorde a los requerimientos de demanda establecidos.

Previo a la elaboración del modelo con opciones de retorno fue necesario estudiar la recuperabilidad de los CAEs. Al evaluar tanto los costos como el potencial de recuperación de los componentes principales, se concluyó que el tanque de almacenamiento es el módulo más crítico y valioso; y que los tanques de cobre son más recuperables que los de acero, dado que por sus propiedades intrínsecas son menos propensos a la oxidación. El estudio de recuperabilidad determinó la viabilidad de la remanufacturación y a partir del mismo fue posible proponer rutas de recuperación las cuales dependen de la calidad de los retornos, cuyos estados se asumen diversos. Adicionalmente se sugirieron mejoras en el diseño actual de los CAEs para facilitar y beneficiar la remanufacturación.

El modelo con opciones de retorno planteado fue motivado en base al caso de estudio relevado siendo una extensión del modelo original, pero quitando las restricciones relacionadas con la gestión de suministros. El mismo incluye una actividad de habilitación la cual clasifica los retornos en un conjunto de calidades predefinidas. La importancia de esta actividad es que en la realidad no se conoce la calidad de los retornos previo a la habilitación, por lo que no se puede decidir habilitar de una cierta calidad determinada y no de otras. Dada una cantidad habilitada de un cierto tipo de CAE se tendrán las cantidades de cada calidad según los valores de las proporciones de las calidades establecidas. Para poder modelar esta actividad nos enfrentamos al problema de que la multiplicación de la cantidad a habilitar por la proporción de las calidades debe ser un número entero (por representar la cantidad de un retorno habilitado), lo cual no siempre se cumple al multiplicar por un número decimal. Se estudiaron varias alternativas para resolver este obstáculo, concluyéndose que no hay manera de solucionarlo completamente. La limitación de la opción que se consideró más conveniente es que puede existir una pérdida de las proporciones de las calidades de los retornos habilitados. Resuelto el modelo y analizados los resultados se constató que la pérdida depende fuertemente de algunos datos del problema: cuánto menos retornos se habilitan más se percibe este efecto indeseado. Por lo tanto, se concluye que una solución del modelo tendrá menos pérdidas para aquellas instancias del problema con un mayor volumen de retornos y/o menos calidades, es decir, en donde el estado de los retornos sea menos diverso.

El MILP formulado para el problema con opciones de retorno representa un problema complejo el cual se intentó resolver para un horizonte de planificación de un año, pero no fue posible bajo las condiciones de hardware y software dadas. Finalmente, se procedió a resolverlo para un mes y se constataron beneficios económicos al implementar la línea de recuperación en la planta. Tras un análisis de sensibilidad surge que una solución óptima siempre que se habilitan retornos, también se realiza alguna operación de recuperación sobre los mismos en menor o mayor medida. A partir del mismo también se constataron aspectos claves para maximizar las ganancias y favorecer la remanufacturación: mejorar el diseño con miras en la remanufacturación, incentivar el buen uso y el mantenimiento del producto por parte del usuario, así como su devolución al EoL.

Se destaca que, si bien el modelo con opciones de retorno cuenta con ciertas particularidades de la empresa, se considera relativamente genérico y puede ser fácilmente adaptado a una amplia gama de OEMs que practiquen o estén interesados en practicar la remanufacturación.

Así como la recuperación de CAEs resultó viable, no se requirió un rediseño total y además redundó en beneficios económicos, se desea a través de este proyecto inspirar a otras industrias uruguayas a que estudien la viabilidad de incorporar la recuperación en sus empresas. Sobre todo, aquellas cuyos productos sean modulares, no estén sujetos a rápidos cambios tecnológicos ni a decisiones de compra relacionados con tendencias de la moda, entre otros. De esta forma las empresas apuestan por la responsabilidad social empresarial, fomentan la concientización ambiental y contribuyen con la calidad de vida del país.

Dado que el proyecto cuenta con un alcance predefinido se mencionan algunas de las posibles líneas de trabajo para extender y complementar el estudio realizado, incluyendo aspectos del modelado del problema como de la resolución y análisis de los resultados obtenidos. En cuanto al modelado matemático, ahondar en otras posibilidades para incluir la actividad de habilitación minimizando, o eliminando si fuera posible, la pérdida de las proporciones de las calidades de los retornos. Con respecto a la resolución del modelo sería de gran interés estudiar formas heurísticas más eficientes computacionalmente que permitieran encontrar una solución factible para el modelo en todo el horizonte de planificación de un año discretizado en días. Por otro lado, para el análisis de los resultados podría ser provechoso realizar una experimentación numérica más extensa, generando una mayor cantidad de instancias cruzando los casos analizados en este informe, con el fin de sacar conclusiones más certeras del problema para el apoyo en la toma de decisiones de la empresa. Adicionalmente, para complementar este estudio sería deseable planear la logística inversa que incluya las localizaciones donde se recibirían los productos usados, así como también un plan para incentivar a los usuarios a devolverlos al final de su vida útil. Finalmente, podría ser interesante extender al análisis de recuperabilidad para otros tipos de productos modulares que cuenten con características similares a los CAEs o se encuentre potencial para aplicar la remanufacturación.

Referencias

- [1] M. Lindahl, E. Sundin, J. Östlin y M. Björjman, 2006, Concepts and definitions for product recovery: analysis and clarification of the terminology used in academia and industry, in *Innovation in Life Cycle Engineering and Sustainable Development*, The Netherlands, ISBN: 978-1-4020-4601-8, 123-138.
- [2] R. H. Teunter, Z. P. Bayindir y W. Van Den Heuvel, 2006, Dynamic lot sizing with product returns and remanufacturing, *International Journal of Science and Research*, 44(20), 4377-4400.
- [3] A. Priyono, 29 Setiembre 2017, Identifying Unique Characteristics of Disassembly for Various Products, *MATEC Web of Conference*. Disponible en: https://www.matec-conferences.org/articles/matecconf/pdf/2017/38/matecconf_ictte2017_08001.pdf. Último acceso: 12 Agosto 2018.
- [4] S. Zhou y Y. Yu, 2011, Optimal product acquisition, pricing, and inventory management for systems with remanufacturing, *Operations Research*, 59(2), 514-521.
- [5] T. G. Gutowski, S. Sahni, A. Boustani y S. C. Graves, 2011, Remanufacturing and energy savings, *Environmental Science & Technology*, 45(1), 4540-4547.
- [6] M. A. Ilgin y S. M. Gupta, 2010, Environmentally conscious manufacturing and product recovery (ECMPRO): A review of the state of the art, *Journal of Environmental Management*, 91(3), 563-568.
- [7] M. L. Bentaha, O. Battaia, A. Dolgui y S. J. Hu, 2014, Dealing with uncertainty in disassembly line design, *CIRP Annals*, 63(1), 21-24.
- [8] J. Korhonen, A. Honkasalo y J. Seppälä, Circular Economy: The Concept and its Limitations, *Ecological Economics*, 143(1), 37-46, 2017.
- [9] Y. Li, D. Kannan, P. C. Jha, G. Kiran, J. Darbari y N. Agarwal, 2018, Design of a multi echelon product recovery embeded reverse logistics network for multi products and multi periods, *Annals of Operations Research*, en impresión, 1-22.
- [10] M. A. Ilgin, S. M. Gupta y O. Battaia, 2015, Use of MCDM techniques in environmentally conscious manufacturing and product recovery: State of the art, *Journal of Manufacturing Systems*, 37(1), 746-758.
- [11] P. Piñeyro y O. Viera, 2009, Inventory policies for the economic lot-sizing problem with remanufacturing and final disposal options, *Journal of Industrial and Management Optimization*, 5(1), 217-238

- [12] A sense of urgency and opportunity, 11 Abril 2018, *ReMaTec*. Disponible en: <https://www.rematec.com/news/news-articles/a-sense-of-urgency-and-opportunity/>. Último acceso: 26 Julio 2018.
- [13] M. Fleischmann, P. Beullens, J. M. Bloemhof-Ruwaard y L. N. Van Wassenhove, 2001, The impact of product recovery on logistics network design, *Production and Operations Management*, 10(1), 156-173.
- [14] C. Gray y M. Charter, Remanufacturing and Product Design, *The Center for Sustainable Design*, University College for the Creative Arts, Farnham, UK.
- [15] H. Jianfeng, Z. Jingying y W. Xiaodong, 2011, Research on the optimization strategy of maintenance spare parts inventory management for petrochemical vehicle, *Int. Conf. Inf. Manag. Innov. Manag. Ind. Eng.*, 45-48.
- [16] F. W. Harris, 1990 (reimpresión 1913), How Many Parts to Make at Once, *Operations Research*, 38(6), 947-950.
- [17] H. M. Wagner y T. M. Whitin, 1958, Dynamic Version of the Economic Lot Size Model, *Management Science*, 5(1), 89-96.
- [18] K. Richter y M. Sombrutzki, 2000, Remanufacturing planning for the reverse Wagner/Whitin models, *European Journal of Operational Research*, 121(2), 304-315.
- [19] M. Ferguson, V. D. Guide, E. Koka y G. C. Souza, 2009, The Value of Quality Grading in Remanufacturing, *Production and Operations Management Society*, 18(3), 300-314.
- [20] S. Mahapatra, R. Pal y R. Narasimhan, 2012, Hybrid (re)manufacturing: manufacturing and operational implications, *International Journal of Production Research*, 50(14), 3786-3808
- [21] P. Piñeyro, 2016, Inventory policies for the economic lot-sizing problem with remanufacturing and heterogeneous returns, *Latin Iberoamerican Conference on Operations Research CLAIO*, Santiago de Chile.
- [22] Real Academia Española Diccionario de la lengua española, 2001. Disponible en: <https://dle.rae.es/?w=calef%C3%B3n>. Último acceso: 23 Marzo 2019.
- [23] S. Wong, W. Muneer, M. Nazir y A. Prieur, 2013, Designing, Operating, and Simulating Electric Water Heater Populations for the Smart Grid, *CanmetENERGY*, Canadá.
- [24] Norma UNIT-IEC 60335-2-21:2012: Seguridad de los aparatos electrodomésticos y similares – Parte 2: Requisitos particulares para calentadores de agua de acumulación.

- [25] F. J. Reguera, 2007, Comportamiento energético de termos eléctricos, *Escuela Superior de Ingenieros Industriales*, Sevilla.
- [26] S. R. Francia, 2004, Protección catódica-diseño de ánodos de sacrificio, *Revista del Instituto de Investigación FIGMMG*, 7(13), 37-44.
- [27] L. H. S. Company, A Discussion of Water Heater Design. An Analysis of Tank-Type Water Heaters & Commercial Water Heaters, *Document 5009D*, U.S.A.
- [28] Rheem Termotanques Eléctricos. Disponible en: <http://www.rheem.com.ar/productos/termotanques-electricos>. Último acceso: 23 Marzo 2019.
- [29] Rivomark - Fabricantes uruguayos de termotanques. Disponible en: <https://rivomark.com/>. Último acceso: 23 Marzo 2019.
- [30] V. Blázquez, 2019, Características Eléctricas y Mecánicas de los Fusibles. Disponible en: http://www.fusibles.cl/files/memorias/mem_1_1252620101.pdf. Último acceso: 23 Marzo 2019.
- [31] Componentes del Termo Eléctrico Tradicional, 2014, *Colegio de Ingenieros Graduados e Ingenieros Técnicos Industriales*. Disponible en: https://www.construmatica.com/construpedia/Componentes_del_Termo_El%C3%A9ctrico_Tradicional#Manguitos_diel.C3.A9ctricos. Último acceso: 23 Marzo 2019.
- [32] E. Elenter, 2018, *Conferencia: Seminario Regional sobre Eficiencia Energética OLADE-BID-CEPAL*, Montevideo.
- [33] Ministerio de industria Energía y Minería (MIEM), 2016, Manual de Eficiencia Energética y Energía Renovable Para Viviendas Sociales. Disponible en: https://www.miem.gub.uy/sites/default/files/folleto_manual_de_eficiencia_energetica_para_viviendas.pdf. Último acceso: 23 Marzo 2019.
- [34] ¿Cómo funciona el plan recambio de calefones de UTE?. Disponible en: <https://www.elobservador.com.uy/nota/-como-funciona-el-plan-recambio-de-calefones-de-ute--201667500>. Último acceso: 23 Marzo 2019.
- [35] O. A. Iglesias y C. N. Paniagua, 2014, Elementos de diseño óptimo, La Plata, Argentina: Editorial de la Universidad de la Plata.
- [36] T.-Y. Liao, 2018, Reverse logistics network design for product recovery and remanufacturing, *Applied Mathematical Modelling*, 60(1), 145-163.
- [37] R. W. Greene, 1989, Válvulas, selección, uso y mantenimiento, ISBN: 9789684220331: McGraw-Hill.

- [38] L. H. SYSTEMS, A Discussion of Water Heater Design. An Analysis of Tank-Type Water Heaters. Disponible en: <https://www.laars.com/images/uploads/products/5009D-NH.pdf>. Último acceso: 23 Marzo 2019.
- [39] C. E. Housecroft y A. G. Sharpe, 2012, Inorganic Chemistry, Harlow, Great Britain: *Pearson Educational Limited*.
- [40] Cobre Filmetal S.A. Disponible en: <http://filmetal.com.uy/productos/productos-cobre/>. [Último acceso: 23 Marzo 2019].
- [41] Cointra, Ventajas de tener el ánodo de magnesio separado de la resistencia. Disponible en: <https://www.cointra.es/ventajas-anodo-magnesio-separado-la-resistencia/>. Último acceso: 23 Marzo 2019.
- [42] Calex, Termos Electrónicos y programables. Disponibole en : <https://www.calex.es/wp-content/uploads/pdf/termos/cointra.pdf>. Último acceso: 23 Marzo 2019.
- [43] Cointra, ¿Qué es una resistencia? Resistencia anticalcárea Blue Forever: larga vida al termo. Disponible en: <https://www.cointra.es/una-resistencia-resistencia-anticalcare-blue-forever-larga-vida-al-termo/>. Último acceso: 23 Marzo 2019.
- [44] Y. Pochet y L. A. Wolsey, 2006, Production Planning by Mixed Integer Programming, ISBN: 978-0-387-29959-4: *Springer Series in Operation Research and Financial Engineering*.
- [45] Mantenimiento y descalcificación termo eléctrico, Enero 2015. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=NP8zMOwBiNU>. Último acceso: 23 Marzo 2019.
- [46] What's inside a hot water heater?, Junio 2012. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=PaFt9rCzsyY>. Último acceso: 23 Marzo 2019.
- [47] How to scrap hot water heater, Abril 2012. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=GKjJRAQ6Fpk>. Último acceso: 23 Marzo 2019.
- [48] Removing The Rigid Foam From A Hot Water Tank - Quick And EASY!!, Marzo 2016. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=dz3GEIsnR58>. Último acceso: 23 Marzo 2019.
- [49] Scrap Copper Tank 2, Mayo 2018. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=H-4cB9V292c>. Último acceso: 23 Marzo 2019.
- [50] Cointra, Eficacia del Ánodo de Magnesio según su ubicación. Disponible en: <https://www.cointra.es/articulo-2/>. Último acceso: 23 Marzo 2019.

- [51] Cointra, Termos eléctricos COINTRA Eficacia del ánodo de magnesio según su ubicación, 2015 Diciembre. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=sKvArpDclAo>. Último acceso: 23 Marzo 2019.

Anexo I: Estado del arte

Páginas 115 a 187

Recuperación de productos usados en la industria y su aplicación en Uruguay

ESTADO DEL ARTE

Estudiantes:

Carolina Devoto, CI: 4.724.813-2

Emilia Fernández, CI: 4.817.836-2

Tutor:

Ing. Pedro Piñeyro

Índice

Índice	1
Glosario de siglas	3
Resumen	5
1. Introducción	6
2. Problemática de la recuperación de productos usados	8
2.1. Conceptos claves	8
2.1.1. Economía Circular	8
2.1.2. Logística Inversa	9
2.1.3. Formas de recuperación	9
2.2. Contexto normativo ambiental	10
2.2.1. Contexto internacional	11
2.2.2. Contexto regional	12
2.2.3. Contexto nacional	13
2.3. Situación actual en Uruguay	14
2.4. Actores involucrados y su rol en la recuperación de productos usados	18
2.5. Razones para recuperar productos usados	19
2.6. Dificultades de la recuperación de productos usados	20
2.7. Importancia del diseño del producto para su recuperación	22
3. Estudios relevados sobre recuperación de productos usados	24
3.1. Problemática ambiental de los residuos	24
3.1.1. Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos	25
3.1.2. Neumáticos Fuera de Uso	26
3.1.3. Residuos plásticos	28
3.2. Modelo de costos para la remanufactura	29
3.3. Planificación de la producción para sistemas con opciones de retorno	33
3.3.1. Remanufactura vs. ahorro de energía	34
3.3.2. Toma de decisiones de disposición para seleccionar la configuración de recuperación de productos	35
3.3.3. Gestión de inventario para sistemas con opciones de retorno	39
3.3.3.1. Modelos determinísticos	40
3.3.3.2. Modelos estocásticos	48

3.4. Diseño y planificación de la red de la cadena de suministro para sistemas con opciones de retorno	50
3.4.1. Diseño de la red de logística inversa	51
3.4.2. Diseño de la red de la cadena de suministro de circuito cerrado	56
4. Conclusiones	60
Referencias	62
Anexo: Ejemplo de empresas con opciones de retornos en Uruguay	69

Glosario de siglas

BTS: Búsqueda Tabú Básica (Basic Tabú Search)

CE: Economía Circular (Circular Economy)

CEMPRE: Compromiso Empresarial Para El Reciclaje, Uruguay

CLSC: Cadena de Suministro de Circuito Cerrado (Closed-Loop Supply Chain)

CRC: Centro de Recolección Centralizado (Centralized Collection Center)

DC: Centro de Distribución (Distribution Center)

DMC: Centro de Desmontaje (Dismantling Center)

DP: Programación Dinámica (Dynamic Programming)

ECMPRO: Producción y Recuperación de Productos Ambientalmente Conscientes (Environmentally Conscious Manufacturing and Product Recovery)

ELSP: Problema de Dimensionamiento del Lote Económico (Economic Lot Sizing Problem)

ELSR: Problema de Dimensionamiento del Lote Económico con Remanufacturaación (Economic Lot-Sizing Problem with Remanufacturing)

EOQ: Tamaño Económico de Pedido (Economic Order Quantity)

EPR: Responsabilidad Ampliada del Productor (Extended Producer Responsibility)

GA: Algoritmo Genético (Genetic Algorithm)

ICP: Punto de Recolección Inicial (Initial Collecting Point)

IR: Remanufacturador Independiente (Independent Remanufacturer)

LUC: Least Unit Cost

MILP: Modelo de Programación Entera Mixta (Mixed-Integer Lineal Programming)

MINLP: Modelo de Programación Entera Mixta No Lineal (Mixed-Integer NonLineal Programming)

MVOTMA: Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente,
Uruguay

NCFU: Neumáticos y Cámaras Fuera de Uso

NSGA-II: Algoritmo Genético de Clasificación No Dominado II

OEM: Fabricante de Equipo Original (Original Equipment Manufacturer)

PPB: Part Period Balancing

RAEE: Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos

RC: Centro de Retornos (Return Center)

RCC: Centro de Reciclaje (Recycling Center)

RFC: Centro de Reacondicionamiento (Refurbishing Center)

RL: Logística Inversa (Reverse Logistic)

SCND: Diseño de Red de la Cadena de Suministro (Supply Chain Network Design)

SM: Silver Meal

UE: Unión Europea

URWW: Useful Reverse Wagner-Whitin

VNS: Búsqueda de Vecindad Variable (Variable Neighborhood Search)

Resumen

A nivel mundial, los grandes volúmenes de residuos sólidos generados por la industria y por los ciudadanos han desencadenado el problema de cómo tratar los mismos. Si el manejo de éstos no es el adecuado, puede afectar la salud de los ciudadanos, de la vegetación, de los animales y del medio ambiente.

En los últimos 150 años, el mundo ha estado dominado por un modelo de producción y consumo masivo, en el que los bienes se producen a partir de materias primas, se utilizan y son desechados como residuos. A lo largo de los años, las sociedades han aumentado constantemente el consumo de bienes, lo que ha llevado también a un aumento constante de la generación de residuos.

Ante este escenario surge la necesidad de describir la situación actual del manejo de los productos fuera de uso, la realidad normativa y las estrategias que se están empleando en el mundo y en Uruguay para afrontar este problema.

Dentro de las estrategias para el tratamiento de los residuos, se encuentra la recuperación de productos usados, una alternativa económicamente viable para el desarrollo sustentable de la industria ya que se reduce el uso de materias primas, de energía y de mano de obra. Debido al consumo masivo de productos de corta vida útil, la recuperación de productos genera un impacto positivo tanto en el medio ambiente como en los consumidores, al obtener a veces un producto con las mismas prestaciones que uno nuevo, pero a menor precio.

Muchos países están adoptando marcos regulatorios que obligan a las empresas a hacerse cargo de sus productos puestos en el mercado luego de haber terminado su vida útil. Uruguay no es ajeno a esta tendencia, está queriendo avanzar hacia una gestión sostenible de residuos en la que se priorice minimizar su generación y promover su valorización. Recientemente se ha presentado ante el Parlamento un proyecto de ley de gestión integral de residuos sólidos, el cual está alineado a una estrategia de Economía Circular. Dicho círculo consiste en optimizar el uso de materiales, para darle una segunda vida a los residuos y potenciar el desarrollo de nuevas formas de negocios mediante la recuperación y valorización de materiales.

La recuperación de productos usados se puede llevar a cabo de diferentes maneras, como son el reuso, la remanufacturación y el reciclaje. En particular, la remanufacturación es un proceso industrial de recuperación de los productos usados para que estos tengan al menos la misma condición que un producto nuevo. De esta manera, permite a los consumidores tener productos generalmente a menor costo y también les permite a los fabricantes ahorrar materias primas y energía, entre otros beneficios. La remanufacturación puede potencialmente lograr considerables beneficios económicos, ambientales y sociales.

1. Introducción

El objetivo del presente documento es contribuir a la literatura mediante el desarrollo de un estado del arte sobre la recuperación de productos usados en la industria uruguaya y así aportar al estudio de la industria manufacturera de Uruguay. De esta forma, se podrá conocer qué tanto se ha investigado sobre el tema, qué logros se han conseguido, qué aspectos faltan abordar y qué vacíos existen, entre otras interrogantes que se intentan responder.

El origen de esta investigación reside en la existencia de un interés cada vez mayor por la relación entre las empresas y el medio ambiente. Se requieren mejoras sustanciales en el uso de los recursos en la producción, en la reducción de los desechos y en las emisiones generadas para no comprometer los estándares de vida y salud de las personas [1] [2].

Los avances tecnológicos y las estrategias competitivas obligan a los fabricantes a actualizar regularmente sus productos. Una ligera variación en el producto atrae a los consumidores a reemplazar su producto anterior por uno nuevo antes de que el producto inicial haya perdido funcionalidad. Este rápido cambio genera un mayor consumo de recursos y un mayor número de residuos. Para lidiar con el problema de aumentar el desperdicio los fabricantes de todo el mundo están integrando cada vez más operaciones de logística inversa en su cadena de suministro existente [3].

Con el aumento en los costos de combustible, metales, minerales y otras materias primas, más empresas ven la logística inversa no sólo como el cumplimiento normativo o una iniciativa "verde", sino como una actividad estratégica que puede reducir los costos de producción e inventario, aumentar ingresos, mejorar la rentabilidad e incrementar los niveles de servicio al consumidor [4].

La Logística Inversa (RL, por sus siglas en inglés) involucra todas las actividades asociadas con la recolección y recuperación o eliminación de productos usados. Las estrictas regulaciones ambientales y la disminución de los recursos de materias primas han intensificado la importancia de la RL a un ritmo creciente. Además de ser amigable con el medio ambiente, la administración efectiva de las operaciones de RL conduce a una mayor rentabilidad al reducir los costos de transporte, inventario y almacenamiento [1].

El aumento en el uso de electrodomésticos ha recibido una atención considerable por parte de los gobiernos y las empresas, en gran parte debido a la eliminación inadecuada de estos productos después de su uso. La escasez de espacio en los vertederos y los materiales peligrosos contenidos en estos aparatos obligan a los gobiernos a tratar adecuadamente estos productos una vez descartados [5]. Estos dispositivos son ricos en materiales valiosos que se pueden extraer si el producto tiene una buena ingeniería. Por lo tanto, la posibilidad de obtener valor económico de los productos que ya no se utilizan, atrae a los fabricantes a reconsiderar la responsabilidad de todo el ciclo de vida de sus productos [3].

Como respuesta al desafío social, a las regulaciones ambientales más estrictas y a los nuevos requisitos de los consumidores, las empresas se están viendo obligadas a invertir en la llamada Producción y Recuperación de Productos Ambientalmente Conscientes (ECMPRO, por sus siglas en inglés) [6]. La ECMPRO consiste en la evaluación del desempeño ambiental de todas las fases en el ciclo de vida del producto, desde la selección de los materiales hasta el Final de la Vida Útil (EoL, por sus siglas en inglés). Debido a sus beneficios sociales, ambientales y económicos, la recuperación de productos a través de cadenas de suministro inversas también está ganando cada vez más interés industrial [7] [2]. Los fabricantes están viendo la necesidad de desarrollar procedimientos, modelos y software para abordar el diseño, el reciclaje, la RL, el desmontaje y la remanufacturación para un número cada vez mayor de productos [1]. Para comenzar con la recuperación de productos, se alienta a los consumidores a que retornen sus productos al finalizar su vida útil [3].

Para la elaboración del estado del arte, se estudió el marco normativo internacional y nacional y los diferentes proyectos asociados a la gestión de residuos sólidos en Uruguay. Asimismo, se realizó una investigación de artículos científicos y se contrastaron las realidades presentadas por los distintos autores en el manejo de la recuperación de productos usados. Para ello, se presentan distintos análisis cuantitativos de sistemas relacionados a la recuperación con foco en la remanufacturación.

En este documento se hace hincapié en la remanufacturación ya que varios autores centran sus investigaciones en esta estrategia de recuperación. Según Tessa Vlaanderen, la remanufacturación siempre que sea técnicamente factible, y no sea posible el reúso, debe considerarse primera dentro de las estrategias de recuperación. Esto se debe a que se maximiza la generación de valor para el consumidor y para las empresas, por lo tanto, de la productividad global de los recursos [8]. A su vez, la remanufacturación es la única forma de recuperación en la cual necesariamente se igualan o mejoran las condiciones del producto nuevo [4].

El resto de este documento está organizado de la siguiente manera. En la Sección 2, se realiza un abordaje sobre la problemática de la recuperación de productos usados, brindando un marco normativo ambiental e informando sobre la situación actual en Uruguay en relación a la recuperación de productos usados. Luego se presentan los aspectos que caracterizan a la recuperación como los actores involucrados, las ventajas y desventajas, y la importancia del diseño en estas actividades. En la Sección 3, se presentan los estudios más relevantes en el tema, clasificándolos en la problemática ambiental de los residuos; seguido de la planificación de la producción para sistemas con opciones de retornos; luego el diseño y planificación de la cadena de suministro; y por último el modelo de costos para la remanufacturación. Se termina con las conclusiones en la Sección 4.

2. Problemática de la recuperación de productos usados

En la presente sección se presentan los conceptos claves de Economía Circular (CE, por sus siglas en inglés), RL y las posibles formas de recuperación de productos usados. Luego, se presenta el marco normativo ambiental desde el nivel internacional al nacional, y por último, se exhibe la situación actual de Uruguay con respecto a la aplicación de la normativa ambiental y a cómo se aplica la recuperación en la industria manufacturera.

Además, se presentan los principales actores involucrados y su rol en la recuperación de productos usados focalizado en remanufacturación. Finalmente, se exponen las razones por las cuales recuperar un producto usado es beneficioso, las dificultades para llevar el procedimiento a cabo y la importancia del diseño del producto para su recuperación.

2.1. Conceptos claves

Es importante evitar confusión en los distintos términos utilizados ya que algunos conceptos se asemejan entre sí y/o pueden diferir a lo largo de la literatura. A su vez, los diferentes sectores de la industria fueron desarrollando su propia terminología informal en el sector de recuperación de productos, provocando diferencias entre la industria y la academia [9]. Por lo tanto, se considera pertinente realizar una sección especial que aborde las definiciones y los conceptos claves del tema en cuestión.

2.1.1. Economía Circular

El modelo tradicional de consumo se basa en una estructura de flujo lineal de producción que en general domina el desarrollo industrial causando daños serios al medio ambiente. En este escenario, la CE se presenta como un cambio de paradigma, ya que es una alternativa a este modelo lineal. A diferencia del reciclado tradicional, la CE está orientada a la reutilización, remanufacturación, reacondicionamiento, reparación y mejoramiento de productos, componentes y materiales, así como a la utilización de energía solar, eólica, de biomasa y de desechos en toda la cadena de valor y ciclo de vida del producto [10]. La CE facilita el desarrollo sostenible promoviendo un flujo cíclico para la extracción, transformación, distribución, uso y recuperación de los materiales y la energía [11].

2.1.2. Logística Inversa

La RL se puede definir como la gestión e implementación de las actividades relacionadas con el flujo de retorno de productos, desde el punto de consumo hacia el punto de origen, con el objetivo de recapturar el valor del producto y sus materiales o asegurar su correcta disposición final; las mismas están en contraste con las actividades de la logística tradicional, con su flujo hacia adelante, desde punto de origen del producto al consumidor [12].

2.1.3. Formas de recuperación

La recuperación de productos usados puede llevarse a cabo de diferentes formas y en distintos niveles. Existen múltiples formas de recuperación, como son reuso, reparación, renovación, reacondicionamiento, remanufactura y reciclaje. El objetivo principal de la recuperación es recuperar el valor residual del producto al final de su vida útil, cuando el mismo ya no cumple con las necesidades para las cuales fue creado [9] [13].

El reuso es la reutilización del producto sin ninguna modificación o tarea compleja. Un ejemplo de un proceso simple de reuso es realizarle una limpieza básica al producto [13]. Keoleian y Menery (1993) [14] definen el reuso en su guía como "el uso adicional de un componente o producto luego que fue removido de un ciclo de servicio definido".

La remanufactura es "el proceso de devolver a un producto usado, al menos la especificación de performance del fabricante del equipo original desde la perspectiva de los consumidores y otorgando al producto resultante una garantía que es al menos igual a la de un fabricante del producto nuevo equivalente" [15]. La remanufactura se considera una actividad funcional importante de la RL. Tiene como objetivo procesar, recuperar y vender productos retornados como si fueran productos nuevos [4]. La remanufactura se compone generalmente de las operaciones de desmontaje, limpieza, prueba, reemplazo y/o reparación de componentes y remontaje, en la cual la calidad final del producto remanufacturado debe ser igual o mayor a la del producto manufacturado. Esto último distingue la remanufactura de otros tipos de recuperación [16] [4]. Es importante tener en cuenta que, aunque los productos remanufacturados son por definición tan buenos como los nuevos no siempre se consideran idénticos y muchas veces se venden a menor precio [16]. Se pueden identificar tres requisitos necesarios para que sea posible remanufacturar un producto. El primero es que los productos al finalizar su vida útil tengan un valor residual, el segundo es que la empresa que realiza la remanufactura pueda capturar efectivamente el valor del producto retornado y el tercero que el producto pueda restaurarse a condición de nuevo con una inversión moderada [17]. Por otro lado, dado que se debe al menos igualar la calidad de los productos originales, el desmontaje total es obligatorio. Esto ocurre ya que se deben probar los componentes y aquellos que no cumplen con los estándares mínimos deben reemplazarse por componentes nuevos.

Esto no es siempre económicamente eficiente ya que exige a veces el desmontaje innecesario de componentes [18]. Por lo general, se afirma que los productos remanufacturados ahorran energía, sin embargo, si se incluye la fase de uso del producto, esto no siempre se logra. Existe un grupo de productos que puede proporcionar grandes ahorros de energía al ser remanufacturados y otro grupo que no, por ejemplo, mobiliario de oficina y ropa [17].

La reparación consiste en devolver la funcionalidad a un producto o componente que ha dejado de funcionar. Por ejemplo, arreglar una falla mecánica o electrónica, pero sin garantía para todo el producto [13]. A diferencia de la remanufactura, no es obligatorio el desmontaje total de los componentes. Los componentes son desmontados solamente si están relacionados con la falla del producto [18].

La renovación es corregir una falla, limpiar el producto para que parezca nuevo y reemplazar algunos componentes desgastados [13].

El reacondicionamiento es el proceso de restauración de componentes o productos a condiciones funcionales y con un estado satisfactorio, pero no superior al original [9]. Consiste en la reparación y prevención de fallas, la limpieza del producto para que parezca un producto nuevo, el cambio de componentes estéticos y la actualización de funciones [13]. El nivel de desmontaje en el reacondicionamiento es menor al de la remanufactura ya que no es obligatorio el mismo y sólo son desmontados aquellos componentes que no están en condiciones aceptables [18].

El reciclaje se puede definir como el sometimiento de materiales usados o desperdicios a un proceso de transformación con el fin de utilizarlos nuevamente como materia prima para el mismo producto o cualquier otro producto, o como fuente de energía [13]. También se puede ver como el proceso en donde la estructura del producto es destruida para recapturar el valor del material [9]. En el reciclaje, las empresas intentan recuperar el valor de los materiales, independientemente de cuán alto sea el potencial valor del proceso de producción. Por esta razón, en el reciclaje a diferencia de la remanufactura se pueden utilizar métodos de desmontaje destructivos y no destructivos [18].

2.2. Contexto normativo ambiental

En atención a la protección de los recursos naturales, muchos gobiernos están incrementando la adopción de marcos regulatorios que potencian la implementación de actividades de recuperación de productos usados. Esto puede realizarse a través de medidas que obligan a sectores de la industria a hacerse cargo de sus productos puestos en el mercado al finalizar la vida útil de sus productos. En particular, Uruguay está progresando hacia una gestión sostenible de residuos en la que se prioriza minimizar su generación y promover su valorización [19].

En la presente sección, se presenta el contexto internacional, regional y nacional sobre la normativa ambiental.

2.2.1. Contexto internacional

En 1972, en Estocolmo, Suecia, se realizó la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente Humano, donde asistieron 113 países y se debatió por primera vez la problemática del medio ambiente, resaltando la importancia del mismo para el ser humano y los demás seres vivos.

Las discusiones de la Conferencia fueron plasmadas en un documento llamado “Declaración de Estocolmo” la cual contiene 106 recomendaciones y 24 principios a seguir para la conservación y protección del medio ambiente. Dicho evento fue el punto de partida del Derecho Medioambiental, es decir, del principio sistematizado de principios y normas jurídicas, nacionales e internacionales, que regulan la actividad humana en cuanto al aprovechamiento sostenible del medio ambiente.

Más adelante, en 1992, se celebró la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo en Río de Janeiro (Cumbre de Río), donde asistieron 178 países. En la misma se estableció una alianza mundial nueva y equitativa mediante la creación de nuevos niveles de cooperación entre los Estados y se reafirmó la Declaración de Estocolmo.

El Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF, por sus siglas en inglés) se estableció en la víspera de la Cumbre de Río de 1992, para ayudar a abordar los problemas ambientales más urgentes de nuestro planeta. Los países donantes aportan fondos para apoyar los proyectos. Los fondos del GEF están disponibles para los países en desarrollo para cumplir los objetivos de los convenios y acuerdos ambientales internacionales.

Muchos fueron los países que desde entonces elaboraron herramientas prácticas de mejora ambiental con el fin de que se desarrollen esfuerzos individuales y colectivos en la búsqueda del desarrollo sostenible presente y futuro de nuestros bienes naturales. La prevención de la contaminación y el uso eficiente de los recursos son elementos centrales de un programa de desarrollo sostenible y los proyectos se deben adherir a las buenas prácticas internacionales que existen al respecto.

A su vez, se desarrollaron una serie de normas internacionales, las ISO 14000, las cuales forman un conjunto de normas que cubre aspectos del ambiente, de productos y de organizaciones. Entre ellas se destaca la ISO 14001, un estándar internacional de gestión ambiental publicado en 1996. Tiene como finalidad proporcionar a las organizaciones elementos para implantar un sistema medioambiental efectivo.

La multinacional British Standards Institution (BSI), cuyo fin es la creación de normas para la estandarización de procesos, con el fin de ayudar a mejorar la comprensión e

implementación de la CE a nivel organizacional, estableció en 2014 un comité con más de 60 expertos técnicos de todo el mundo. El objetivo del comité consistió en el desarrollo de un estándar para ayudar a mejorar la comprensión e implementación de la CE a nivel organizacional y lograr una guía que sea el inicio para que en el futuro se desarrollen normas de apoyo derivadas. La guía es llamada BS 8001:2017 y es producto de casi dos años y medio de trabajo. Es considerada el primer estándar del mundo para implementar los principios de la economía circular en las organizaciones [20].

En 2018, tuvo lugar en Montreal, Canadá, una conferencia del G7, grupo de los 7 países con más peso político, económico y militar a nivel internacional. Se aprovechó esta oportunidad para tratar algunos de los problemas globales de la industria, entre ellos se debatió las posibles formas de fomentar en mayor medida la remanufacturación [21]. En esta conferencia se trató la investigación del Panel Internacional de Recursos (IRP, por sus siglas en inglés) lanzado en 2007 por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP, por sus siglas en inglés). El panel está formado por científicos eminentes de diferentes partes del mundo, altamente capacitados en cuestiones de gestión de recursos y tiene como objetivo crear y compartir los conocimientos para mejorar el uso de recursos, teniendo en cuenta que este tema debe ser una prioridad en la toma de decisiones a nivel mundial. El tema de la investigación tratado en la conferencia fue la evaluación de la eficiencia de los recursos e innovación en la temática de CE mediante remanufacturación, reacondicionamiento, reparación y reúso. [21].

2.2.2. Contexto regional

Los aspectos fundamentales del marco normativo regional se dan a través de la Ley 17.712, denominada Acuerdo Marco sobre Medio Ambiente del MERCOSUR.

Bajo este acuerdo, los países miembros del MERCOSUR, la República Argentina, la República Federativa del Brasil, la República del Paraguay y la República Oriental del Uruguay, acuerdan reafirmar su compromiso con los principios enunciados en el convenio Declaración de Río sobre Medio Ambiente y Desarrollo.

Los países miembros resaltan la necesidad de cooperar para la protección del medio ambiente y la utilización sustentable de los recursos naturales, con vistas a alcanzar una mejor calidad de vida y un desarrollo económico, social y ambiental sustentable.

Asimismo, resaltan la importancia de la cooperación entre los cuatro miembros con el objetivo de apoyar y promover la implementación de sus compromisos internacionales en materia ambiental, observando la legislación y las políticas nacionales vigentes y convencidos de la importancia de un marco jurídico que facilite la efectiva protección del medio ambiente y el uso sustentable de los recursos naturales de los cuatro miembros [22].

2.2.3. Contexto nacional

El marco legal uruguayo relacionado a la gestión ambiental apoya las tendencias globales del desarrollo sostenible, concepto oficializado en la Cumbre de Río de 1992.

A lo largo de la historia, Uruguay se ha adherido a múltiples convenios, entre los cuales se destaca la Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y Desarrollo, cuyo objetivo es establecer una alianza mundial equitativa, mediante la creación de nuevos niveles de cooperación entre los Estados, los sectores clave de las sociedades y las personas, procurando alcanzar acuerdos internacionales en los que se respeten los intereses y se proteja la integridad del sistema ambiental [22].

Desde hace 25 años, Uruguay viene desarrollado un marco normativo y legal que desde el punto de vista ambiental deben cumplir las actividades productivas que se desarrollen en el ámbito nacional.

En primer lugar, en la Constitución de la República [23], en su Artículo 47 dispone: “La protección del medio ambiente es de interés general. Las personas deberán abstenerse de cualquier acto que cause depredación, destrucción o contaminación graves al medio ambiente. La ley reglamentará esta disposición y podrá prever sanciones para los transgresores”.

Por la Ley N° 16.112 de 1990 [24], se crea el Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente (MVOTMA), el cual define en Uruguay la política relativa al manejo ambiental, considerando este elemento como regulador del desarrollo económico y social, en el concepto de crecimiento sostenible del País.

En 1994 se sancionó la Ley N° 16.466 denominada “Evaluación de Impacto Ambiental” [25]. Dicha ley declara de interés general y nacional la protección del medio ambiente, la prevención del impacto ambiental negativo y, en su caso, la recomposición del medio ambiente dañado por actividades humanas.

En cumplimiento de lo previsto en la constitución, en el año 2000 se sancionó la Ley N° 17.283 denominada Ley General de Protección del Ambiente [26]. Algunos idóneos en el tema [27] clasifican a esta Ley como la primera ley general en materia ambiental en nuestro país, sin perjuicio de otras normas ambientales particulares.

En 2004 se sancionó la Ley N° 17.849 [28], denominada “Uso de envases no retornables”. El objetivo de la misma es minimizar la generación de residuos de envases, promover su reutilización, reciclaje y demás formas de valorización, evitando que se incluyan como parte de los residuos sólidos domiciliarios y logrando disminuir los efectos ambientales de su disposición incontrolada. La Ley tiene asociado el Decreto 260/007 reglamentario.

En el artículo 2 del Decreto 182/013 de 2013, denominado Reglamento de gestión de residuos sólidos industriales y asimilados, se mencionan seis criterios rectores de gestión integral de los residuos sólidos industriales. Entre ellos, se encuentra priorizar la minimización de la generación de residuos a través de, por ejemplo, la eficacia de los

procesos productivos; en forma subsidiaria, la promoción de los procesos de reúso, reciclado y la valorización energética; las alternativas de tratamiento y disposición final se considerarán como opciones de última instancia, minimizando los efectos ambientales que de ellas puedan derivarse; la gestión de los residuos tenderá a la búsqueda de los mejores resultados ambientales de alcance general, mediante soluciones integrales, viables y sustentables, desde el punto de vista económico, social y ambiental [29].

A partir de la problemática del mal manejo de los neumáticos en su ciclo de vida, en diciembre de 2015, se aprueba el Decreto 358/2015 [30] sobre la gestión ambientalmente adecuada de los Neumáticos y Cámaras Fuera de Uso (NCFU). El decreto busca establecer destinos adecuados a aquellos neumáticos y cámaras que ya no pueden ser utilizados para su uso normal, el rodamiento, y por lo tanto se deben encontrar nuevos fines sustentables para los mismos. El decreto establece que los importadores y fabricantes deben disponer obligatoriamente de planes maestros de gestión para la recepción y derivación de los neumáticos hacia instalaciones para su reutilización, reciclado, valorización o como última opción su disposición final adecuada [30].

En los últimos años, Uruguay ha transitado una importante renovación en materia ambiental, tanto por las leyes, los decretos y las ordenanzas que se han aprobado, como por los que se han tratado para su próxima aprobación [31]. El más reciente es el proyecto de Ley de Gestión Integral de Residuos [32], el que aún está en proceso de aprobación por parte del Parlamento. El proyecto prioriza la minimización de la generación en origen frente a cualquier otra alternativa. Promueve en segundo término el reúso y la valorización del residuo a través del reciclado, y en tercera instancia otras formas de valorización de residuos.

La ley pretende ser un instrumento normativo que marque, oriente y regule la gestión de residuos a nivel nacional y departamental, a través de lineamientos de políticas de gestión integrados con la política ambiental. Busca, además, establecer nuevos instrumentos económicos que permitan avanzar hacia una gestión sostenible de residuos adaptada a cada realidad.

2.3. Situación actual en Uruguay

En Uruguay, al igual que en muchas partes del mundo, hay una tendencia creciente en la temática de recuperación de productos en el ámbito legislativo, industrial y académico. Cada vez son más las organizaciones que apuestan por la Responsabilidad Social Empresarial y que se certifican con la norma ISO 14001 de Sistemas de Gestión Ambiental, buscando formas de revalorizar los productos al final de su vida útil. En base a nuestro conocimiento, en Uruguay hoy en día la forma predominante de recuperación de productos usados es el reciclaje. Se incluye en el Anexo 1 del documento un listado

de las empresas recuperadoras en Uruguay que se pudieron recabar dentro de esta búsqueda.

Un pilar importante en los aportes para la recuperación de productos usados es el esfuerzo de asociaciones gubernamentales. La Agencia Nacional de Desarrollo (ANDE) es un ejemplo de institución gubernamental, la cual promueve el desarrollo del país por medio de programas que buscan mejorar la competitividad empresarial y territorial, con énfasis en las Micros, Pequeñas y Medianas Empresas (MIPYMES). Por otra parte, los Ministerios de Industria, Energía y Minería (MIEM), Vivienda y Ordenamiento Territorial (MVOTMA) y de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP) lanzaron BIOVALOR, un proyecto cuyo objetivo principal es la transformación de residuos generados a partir de actividades agroindustriales y de pequeños centros poblados, convirtiéndolos en energía y/o subproductos, con el fin de desarrollar un modelo sostenible de bajas emisiones. Conjuntamente, ANDE y BIOVALOR están coordinando acciones para promover la generación e implementación de proyectos productivos sustentables, en el marco de la CE a través del Programa de Oportunidades Circulares. Dicho programa identifica e impulsa la validación de ideas e implementación de proyectos que promuevan una transición eficaz hacia la CE, contribuyendo al desarrollo productivo sostenible.

Por otro lado, la creación de asociaciones no gubernamentales, que buscan fomentar la cultura de recuperación de productos usados y disminuir el impacto ambiental de los residuos, contribuyó al crecimiento de esta temática en Uruguay. Algunas de ellas son Uruguay Recicla y el Compromiso Empresarial Para El Reciclaje (CEMPRE). Uruguay Recicla es una cooperativa comprometida con el cuidado del ambiente, fomentando la clasificación y recuperación de residuos, y la educación ambiental en la comunidad. Mientras que CEMPRE es una asociación civil sin fines de lucro, creada por un sector de empresas uruguayas con el fin de promover la reducción y el reciclaje de residuos en Uruguay. La misma busca concientizar a la comunidad e impulsar proyectos de investigación.

A pesar del aumento en la cantidad de residuos en el país, una investigación realizada por CEMPRE revela que si hace diez años se reciclaba el 55% del papel, ahora es el 40%; si antes se reciclaba el 75% del plástico PET, ahora es el 10%. Esta baja se debe a que el precio del petróleo disminuyó a nivel mundial, y como consecuencia, las materias primas que derivan de él. Por ende, el precio de la materia prima reciclada bajó porque el material virgen es cada vez más barato, siendo el más afectado el plástico. Por ello, ha disminuido el costo-beneficio de reciclar plástico [33].

Desde 1990 está en funcionamiento el relleno sanitario Felipe Cardoso donde se trabaja con tecnologías para minimizar el impacto ambiental que generan los desechos, capturando y quemando los gases. Las empresas deben pagar dos unidades reajustables por tonelada o metro cúbico de residuos si quiere depositarlos en el relleno. Además de los vertederos regulados por la Intendencia de Montevideo, existen otros 200 informales que no tienen ningún tipo de control. Las empresas también pueden

destinar sus desechos en una planta de reciclaje, sin embargo, muchas eliminan sus residuos ya que es una opción menos costosa [33]. Dentro de las plantas de reciclaje se encuentra Uruplac, la cual cobra por tonelada recibida de residuo. Distintas empresas envían a Uruplac desechos de medicamentos, residuos plásticos, aluminios, tetra y nylon. Lo que hace único a Uruplac es la combinación adecuada de residuos, la cual mediante un prensado en caliente brinda una placa con características constructivas útiles, para usarse principalmente como parideras y en la industria de la construcción.

Las opciones de reciclado a nivel del hogar son mediante contenedores de residuos secos y húmedos ubicados en la vía pública y a través de la iniciativa de la Intendencia de Montevideo “Tu envase sirve”, la cual consiste en contenedores ubicados en supermercados para depositar envases de plástico, vidrio, cartón, nylon, aluminio, etc. “Tu envase sirve” es un sistema de gestión de envases que busca su recuperación y reciclaje según lo establecido en la Ley N° 17.849 y su Decreto reglamentario.

Los residuos secos son llevados a cuatro plantas clasificadoras donde los residuos valorizables se llevan a industrias recicladoras y el descarte se lleva a vertederos. Los residuos húmedos son llevados a la planta Tesor, la cual convierte los residuos orgánicos en compost. El compost que se obtiene luego de todo el proceso es utilizado por la División de Áreas Verdes de la Intendencia de Montevideo para el abono de espacios públicos en general, por Montevideo Rural y también se vende al público [34].

Pese a estas iniciativas, los planes de reciclaje no han tenido suficiente adhesión por parte de la población debido a la falta de difusión y a que no se ha incorporado aún una cultura de clasificación y reciclaje. A nivel nacional el volumen promedio de generación de residuos sólidos diarios por habitante ronda los 900 gramos, totalizando 2800 toneladas diarias. Sólo un 1,5% del total generado en los hogares llega a las plantas de reciclaje [35].

Con respecto a los residuos de papel y cartón, en Uruguay se generan cerca de 500 toneladas por día, de las cuales solo 150 se reciclan, mientras que las restantes 350 se eliminan. La fracción de papel y cartón que no se recuperaba se enviaba a China hasta el 2017. A comienzos del 2018, China prohibió las importaciones de ciertos residuos sólidos desde el extranjero. La prohibición afecta a 24 materiales entre papel, cartón, plástico, textiles y metales. Dicha prohibición perjudicó fuertemente a Uruguay, por lo que se están analizando otros destinos para exportar el excedente de residuo [33].

Con respecto al vidrio, puede reciclarse como vidrio roto o reutilizarse si el envase se encuentra en buen estado. Existen diversos lavaderos de vidrio, que se dedican a acondicionar determinados envases de vidrio para su posterior venta a los envasadores de bebidas. El reciclaje disminuyó fuertemente al cerrarse la única fábrica de vidrio en la década del 90. En el año 2008, abre una nueva planta de reciclaje de vidrio, Envidrio, construida en el Parque Tecnológico Industrial del Cerro y operada hasta el año 2016. Actualmente la planta Envidrio se encuentra en inactividad ya que el horno de vidrio cumplió con su vida útil y es necesario su reconstrucción o inversión en un nuevo horno

para reiniciar su actividad. La planta de Alenvidrio es una ampliación de la planta de la empresa Envidrio, está en proceso de construcción y se estima que comenzará su funcionamiento en un año. Esta planta producirá el mismo producto a través de un proceso productivo análogo. Hoy en día se encuentran solicitando ante el MVOTMA la Autorización Ambiental Especial para la reapertura de la planta de reciclado y producción de vidrio [36] [37].

En cuanto a los Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE), Uruguay es uno de los países de la región que más genera, estimándose 9,5 kilos al año por habitante, de los cuales solo se recupera el 1,5%. Se estima que más del 90% de los materiales de estos aparatos pueden ser recuperados, como el cobre, el hierro y el plástico. También contienen otros elementos tóxicos para el medioambiente, y por lo tanto su correcta manipulación es fundamental. Actualmente, no existe normativa que legisle el uso de los RAEE. Sin embargo, la empresa pública ANTEL, mediante el plan "Antel Integra", recibe equipamientos informáticos en desuso, los cuales clasifican, desarmar y limpian, obteniendo computadoras con requerimientos mínimos para navegar en Internet, las cuales donan [38].

Adicionalmente, la Cooperativa para el Reciclaje de Componentes Electrónicos (Crecoel), recolecta mensualmente de 100 a 400 computadoras. Esos materiales los comercializan a Werba, una de las empresas que se dedica al reciclaje en Uruguay. El desmontaje lo realizan de forma manual, separándolos en sus diferentes componentes metálicos y plásticos para luego proceder a la valorización de los mismos en el mercado local y en el exterior [39].

Referente a los NCFU, cada año se importan aproximadamente 16000 toneladas de neumáticos y se eliminan alrededor de 10000. Gran parte de los neumáticos desechados se almacenan en depósitos clandestinos, techos, patios, ríos, calles, etc., y aproximadamente un 70% se encuentran en barrios marginales [33] [40]. En 2015, al haberse sancionado el decreto 358/2015 que regula la gestión y el manejo de estos residuos, la DINAMA aprobó dos planes de gestión, uno de la Cámara de Importadores (RECICLO NFU) y otro del Centro de Comerciantes de Neumáticos (GENEU). Ambos planes abarcan la recolección a nivel nacional, el acondicionamiento, la clasificación y la revalorización de los NCFU. GENEU revaloriza mediante la trituración, generando el denominado "granulado" o "polvo de caucho", útil para mezclas asfálticas, relleno de canchas de césped artificial, pistas de atletismo, pisos para parques infantiles, etc. Mientras que el principal destino de RECICLO NFU es la valorización energética, por eso luego de su recolección y procesamiento por triturado se trasladan a una cementera [41].

Del total de los residuos sólidos generados en Uruguay, el 16% corresponde a residuos plásticos. El volumen estimado de material plástico recuperado representa cerca del 9,5% de los plásticos que llegan a los sitios de disposición final [42]. ATMA es el ejemplo de una empresa uruguaya que desarrolló una línea de productos con materia prima reciclada. La iniciativa se llevó a cabo junto al Grupo Disco, quien compra plástico a sus

clientes en los distintos supermercados y luego lo entrega a ATMA para su recuperación.

2.4. Actores involucrados y su rol en la recuperación de productos usados

Los grandes beneficios que implica la recuperación de productos usados, en particular la remanufacturación, y las inquietudes crecientes en esta temática, abarcan a una creciente cantidad de partes involucradas [8].

El Gobierno es un actor importante para el desarrollo potencial de todas las formas de recuperación de productos usados. El Gobierno es quien estimula las compras gubernamentales, establece regulaciones para el mercado interno e internacional, así como estimula la demanda o aumenta la disponibilidad y el acceso a productos usados [8]. Los gobiernos están cada vez más involucrados en la regulación de la recuperación de productos, ya que esta puede servir como un mecanismo eficaz para la sustentabilidad¹ medio ambiental. Por ejemplo, la legislación para RAEE en la Unión Europea (UE), que entró en vigor en febrero de 2014, exige a los fabricantes establecer procesos de recuperación ambientalmente racionales, incluida la remanufacturación de equipos eléctricos y electrónicos usados [43].

Los consumidores y la sociedad en general impulsan a muchas organizaciones a recuperar sus productos luego de usados [8]. Aunque las regulaciones legislativas sean poco restrictivas, las expectativas de los consumidores imponen fuertes presiones en las organizaciones para que tengan en cuenta los aspectos ambientales a la hora de diseñar sus procesos. Crear una imagen “verde” se ha convertido en un elemento importante de marketing en las organizaciones, estimulando así la inclusión de recuperación de productos usados en sus procesos [44].

Por otro lado, las organizaciones académicas son quienes pueden catalizar el desarrollo y la investigación, aumentando el conocimiento de las oportunidades y las tecnologías en progreso en el área de recuperación de productos usados [8].

Los grupos de interés comercial son quienes aumentan la alineación y visibilidad de la industria de recuperación. Estos, articulan las necesidades y oportunidades de la industria, lo que contribuye a la eficacia de las acciones de los gobiernos [8].

Los actores principales en la industria de la remanufacturación son los Remanufacturados Independientes (IR, por sus siglas en inglés) y los Fabricantes de Equipos Originales (OEM, por sus siglas en inglés). Los IRs son un actor clave, a menudo son los primeros en remanufacturar una línea específica de productos ya que, a diferencia de los OEMs, no se ven obstaculizados por una amenaza percibida a la

¹ La sustentabilidad consiste en satisfacer las necesidades de la actual generación sin sacrificar la capacidad de futuras generaciones de satisfacer sus propias necesidades

venta de productos nuevos. Los OEMs se consideran un factor clave para el desarrollo de la remanufacturaación ya que su adhesión impulsa la economía de escala, aumenta los volúmenes de productos remanufacturados, desbloquea mercados extranjeros y contribuye al progreso global de la remanufacturaación. Sin embargo, muchas OEMs eligen no remanufacturar sus productos y tienden simplemente a reciclar o reacondicionar, por ejemplo, productos en garantía [8].

No obstante, el hecho de que un producto tenga un valor residual significativo al final de su vida útil presenta un dilema para los OEMs. Al no remanufacturar sus productos, los OEMs podrían encontrarse compitiendo con sus propios productos remanufacturados por otra empresa. Para evitar ser colocado en esta situación, un OEM puede emplear una variedad de estrategias. Estas estrategias pueden incluir hacer inoperables los productos usados, cambios de diseño rápidos de forma que los productos no sean aptos para la remanufacturaación o volver a comprar los productos usados. Una posición alternativa es adoptar la remanufacturaación y hacerla parte de la estrategia comercial del OEM [17]. En este caso, los OEMs se deben esforzar para motivar a los consumidores a retornar los productos al final de su vida útil, por ejemplo, proporcionando incentivos financieros, como sistemas de depósito, crédito para un nuevo producto, o el efectivo [4].

Al contrario de lo que se podría creer, los principales impulsores para que los OEMs adopten la remanufacturaación no son ni los beneficios económicos, ni ambientales, ni tampoco los aspectos legislativos. En muchos casos, los principales impulsores son la seguridad, la protección de la marca y el futuro recambio de componentes de repuesto. En primer lugar, los OEM pretenden controlar el mercado, evitando que los IR aprovechen el know-how de su diseño, sus materiales e insumos de energía invertidos en sus productos. En segundo lugar, es muy importante para ellos cuidar la imagen de la empresa y su reputación por lo tanto deben evitar que mercados secundarios remanufacturen sus productos a menores precios y con menor calidad. En tercer lugar, la constante innovación de algunos productos provoca que después de un tiempo los componentes remanufacturados sean la única forma de suministrar repuestos a nuestros consumidores, como es el caso de los vehículos que se encuentran muchos años en el mercado [45].

2.5. Razones para recuperar productos usados

Existen varias motivaciones que llevan a las empresas a decidir recuperar sus productos como pueden ser presiones gubernamentales, sociales u oportunidades económicas. A su vez, la recuperación trae ventajas medioambientales [46].

Además, la recuperación de productos usados, y en especial la remanufacturaación, ofrece oportunidades intrínsecas que se deben aprovechar de la mejor manera posible. La remanufacturaación es una forma industrial estratégica para recuperar el valor

perdido, crear empleos, reducir el desperdicio y, potencialmente, cambiar la relación entre los consumidores y los fabricantes [13].

Desde el punto de vista de los consumidores, los productos remanufacturados ofrecen la misma calidad que los productos nuevos y suelen venderse a precios menores [12] [47]. Incluso, muchas empresas que remanufacturan argumentan que los productos remanufacturados pueden tener una calidad mayor, ya que los sistemas de control de calidad suelen ser más altos que los de los nuevos productos. De esta forma, el consumidor recibirá un mejor servicio posventa. Además, con un ciclo de servicio de 3 a 5 años, el consumidor tiene acceso a la última tecnología o diseño con más frecuencia que el ciclo de vida habitual de 10 a 15 años de los productos. Adquiriendo productos remanufacturados, el consumidor tiene acceso a productos o servicios que son “más ecológicos” que los productos producidos nuevos [13].

La recuperación eficiente y efectiva del producto ofrece diversos beneficios para los fabricantes, que incluyen ahorros de energía y materiales, mayores ganancias y una imagen ambiental mejorada. Los costos pueden reducirse porque las empresas pueden reducir la cantidad de material que compran y almacenan [3] [12] [7].

A su vez, estos ahorros juegan un papel clave en la minimización de la cantidad de desechos enviados a los vertederos y la disminución de la contaminación del aire y el agua [7]. Por lo tanto, desde el punto de vista del medio ambiente, la remanufactura promueve la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, contaminantes atmosféricos tóxicos y el uso de materia prima y de energía [12] [13].

Otros grandes beneficios que aporta la remanufactura para los fabricantes se mencionan a continuación. Los fabricantes pueden proponer nuevos productos o servicios a los consumidores creando nuevas gamas de los mismos. Adicionalmente, al remanufacturar evitan que otra compañía externa capture sus propios productos, tales como revendedores de productos dañados o comerciantes de materiales de desecho. A su vez, mejoran la productividad ya que al diseñar los productos específicamente para el proceso de remanufactura, por ejemplo, para el desmontaje, se optimiza la ingeniería inversa. Desde el punto de vista de los empleos, se generan nuevos puestos de trabajo ya que, por lo general, la remanufactura requiere una mayor proporción de hora-hombre que la producción desde cero [13]. La remanufactura generalmente reduce costos de transporte cuando los materiales primarios para producir los productos nuevos provienen de muy lejos [17]. Sin embargo, los productos remanufacturados aún son una porción relativamente pequeña en comparación con los productos nuevos [48].

2.6. Dificultades de la recuperación de productos usados

Como se mencionó en la Sección 2.5, la recuperación de productos usados presenta múltiples beneficios y razones que justifican su aplicación, sin embargo, también

presenta varias dificultades y desafíos que se deben tener en cuenta a la hora de recuperar.

La incertidumbre presente en los sistemas de RL es una de las características principales de estos sistemas como por ejemplo la incertidumbre en el tiempo, cantidad y calidad de los retornos [44] [7]. Es por esto que los investigadores desarrollan nuevos enfoques de pronóstico para predecir las características de los retornos de productos usados [1]. Asimismo, las operaciones de RL son más complejas que las de logística hacia adelante a causa de los retornos individualizadas, pequeñas cantidades de retornos y la gran ventana de tiempo en la recolección de productos retornados por los consumidores [3]. Es importante que las organizaciones tengan prevista una forma efectiva para la recuperación de los productos usados [17]. Por otro lado, es importante evaluar la cantidad adicional de transporte inducido por los flujos de retorno como un factor decisivo al momento de decidir recuperar un producto [44].

En particular, la remanufactura presenta varios desafíos. Se complejiza la tarea de hacer coincidir la oferta con la demanda, ya que la variabilidad de la cantidad y condiciones de los retornos son cambiantes [17]. La consideración de los retornos ocasiona dos complejidades adicionales en los enfoques de gestión de inventario tradicionales. En primer lugar, se agrega incertidumbre debido a los retornos de productos inciertos. En segundo lugar, existe una necesidad de coordinación entre el reaprovisionamiento de productos usados y el modo regular de adquisición de materiales [1]. Asimismo, los primeros pasos hacia la remanufactura suponen una inversión ya que consisten en recuperar el producto retornado, limpiarlo y probarlo. Para capturar el valor de la inversión y protegerse contra fluctuaciones en el suministro central es necesario mantener inventario de los productos retornados limpios y probados, lo que implica mayores costos de inventario. Por otro lado, la remanufactura requiere de mucha mano de obra, pero no tan capacitada como la mano de obra para manufactura [17].

La variabilidad de los productos retornados implica que las operaciones de remanufactura deban ser flexibles [17]. Y a su vez, la alta variabilidad de las operaciones de remanufactura dificulta el uso de las técnicas tradicionales de administración de operaciones. Es por eso que los investigadores desarrollaron nuevas metodologías para tratar diversos problemas de gestión de operaciones en la remanufactura, incluida la planificación y programación de la producción, la planificación de la capacidad, la gestión de inventario y el efecto de la incertidumbre [1].

Por ejemplo, Zhou y Yu [4] muestran que los OEMs pueden realizar un esfuerzo para controlar la incertidumbre de los retornos mediante la implementación de estrategias óptimas de producción, remanufactura, adquisición de productos y fijación de precios [4]. Los esfuerzos se pueden realizar mediante incentivos para motivar a los consumidores a que retornen al OEM los productos al finalizar su vida útil, por ejemplo, la empresa Kodak controla activamente la cantidad de retornos de las cámaras de foto de un solo uso mediante incentivos económicos. Para tratar adecuadamente la gestión

de inventario, y debido al desarrollo de tecnología de la información y al comercio electrónico, diferentes empresas han comenzado a utilizar estrategias de precios innovadoras. Un ejemplo puede ser ajustar dinámicamente los precios en el tiempo en función de los niveles de inventario y así adecuar mejor la oferta y la demanda, y mejorar significativamente las eficiencias de su cadena de suministro. Un OEM que utiliza esta estrategia es la empresa Dell Computers, cambiando el precio de venta del mismo producto en su sitio web a lo largo del tiempo [49].

2.7. Importancia del diseño del producto para su recuperación

El diseño es un factor decisivo a la hora de decidir si recuperar un producto usado. Si bien es importante para todas las formas de recuperación, es crucial para la remanufacturación ya que en muchos casos supone la viabilidad técnica de la misma, al ser necesario el desmontaje total.

Como se mencionó en la Sección 2.4, los OEMs ante la amenaza de que los IRs remanufacturen sus productos, pueden decidir diseñarlos de forma que no sean aptos para la remanufacturación [17]. De la misma forma, se puede decidir diseñar un producto de forma de simplificar, al final de su vida útil, la remanufacturación. En algunos casos se debe rediseñar todo el proceso de producción desde cero lo que implica un cambio de paradigma para algunas organizaciones. Se debe tener en mente que este cambio resultará en beneficios a largo plazo para la empresa y el medio ambiente [50].

Para incorporar la recuperación de productos sin problemas en las cadenas de suministro existentes, los fabricantes diseñan y desarrollan productos de forma modular. Los productos modulares son aquellos que se han ensamblado con componentes y módulos pequeños y que se pueden utilizar una y otra vez. Esto permite que los productos se puedan recuperar sin daños y evitar que sean desechados. El diseño modular es ampliamente aplicable para productos tales como vehículos, computadoras, equipos eléctricos y electrónicos, máquinas fotocopadoras, teléfonos celulares y equipos médicos, entre otros [3].

El desmontaje es un elemento crítico de las actividades de recuperación de productos, ya que es un proceso clave que conecta el retorno del producto con la recuperación del producto. El desmontaje es un requisito previo para el reprocesamiento y la remanufacturación ya que en general, los restantes procesos no pueden llevarse a cabo mientras los componentes estén ensamblados [18]. Muchos productos producidos en masa utilizan pegamento lo cual dificulta enormemente su reutilización. El pegamento no permite separar los componentes sin romperlos o degradarlos. En cambio, los fabricantes que utilizan tornillos para unir los componentes de los productos facilitan la tarea de remanufacturación simplificando la separación de los componentes. Sin embargo, los tornillos no se adaptan a todos los productos [50].

Considerando esta problemática, DSM-Niaga, empresa conjunta establecida en 2014 que se basa en el rediseño total enfocado en la remanufactura de productos cotidianos, desarrolló un pegamento reversible que funciona como un tornillo. El pegamento posee la función adhesiva convencional, pero al exponerlo a una señal se despegue y permite la separación de los componentes en su estado puro. Este pegamento se utilizó en el rediseño total de alfombras, colchones, y paneles para la construcción y decoración. Otros potenciales mercados son la industria automovilística (interior de los autos) y la industria electrónica [50].

3. Estudios relevados sobre recuperación de productos usados

En los últimos años, los comités medioambientales europeos están más centrados en la política de Responsabilidad Ampliada del Fabricante (EPR, por sus siglas en inglés). Esta política se refiere principalmente a los impactos ambientales para el tratamiento de un producto al final de su vida útil, al producir productos remanufacturados por parte de los fabricantes. La aplicación de la EPR tiene como objetivo alentar a los fabricantes mundiales a lograr un mayor valor de utilización de los procesos de recuperación de productos [51]. Como forma de afrontar las regulaciones ambientales más estrictas, los fabricantes se están viendo obligados a invertir en la ECMPRO.

Los estudios que se presentan en esta sección se clasifican en la problemática ambiental de los residuos; seguido de un modelo de costos para la remanufactura; luego la planificación de la producción para sistemas con opciones de retornos; y por último el diseño y planificación de la cadena de suministro.

3.1. Problemática ambiental de los residuos

En los últimos años se ha puesto especial foco en las actividades de recuperación de productos en especial en la remanufactura. Bajo la presión de grupos ambientales y de la sociedad en general, los gobiernos se están involucrando cada vez más en la regulación de recuperación de productos. Muchas veces estas regulaciones responsabilizan a los productores del ciclo total del producto, esto puede servir como un mecanismo para la sostenibilidad ambiental. Los aspectos legislativos no son los únicos a tener en cuenta, muchas veces la presión de los consumidores y de la sociedad en general obliga a las empresas a tomar en cuenta aspectos ambientales [44].

Un número cada vez mayor de empresas ha estado implementando programas integrales de recuperación de productos con el fin de obtener los beneficios potenciales de la remanufactura. Según el informe de la Comisión de Comercio Internacional de Estados Unidos de octubre de 2012 [52], Estados Unidos fue el país que más remanufacturó durante el período 2009-2011 y el valor total de los productos remanufacturados superó los 43 billones de dólares. Las industrias más desarrolladas en remanufactura en Estados Unidos comprenden equipos aeroespaciales, eléctricos y electrónicos, locomotoras, maquinaria, dispositivos médicos, componentes de vehículos motorizados, muebles de oficina y neumáticos recauchutados [43].

A continuación, se presenta el tratamiento de los residuos con mayor impacto negativo para el medio ambiente y que se encuentran más presentes en la literatura relacionada con la recuperación de productos.

3.1.1. Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos

Con el progreso de la tecnología y la mejora de los niveles de vida, la cantidad de RAEE ha aumentado dramáticamente. Según las estadísticas, la cantidad total de RAEE mundial fue de 41800 mil toneladas en 2017, y se espera que alcance los 50 millones de toneladas en 2018 [53]. Los RAEE son el flujo de residuos de más rápido crecimiento en muchos países del mundo. Tienen una naturaleza peligrosa y tóxica y menos del 20% de ellos se maneja de una manera correcta [54] [46]. Esto se debe a la falta de conocimiento de estrategias de recuperación de productos sostenibles, como puede ser la importancia en el diseño del producto [46], tal como se mencionó en la Sección 2.7.

El objetivo general de las prácticas de recuperación es prevenir la contaminación del medio ambiente y prolongar la vida útil del producto, ya sea recuperando el valor del material (reciclaje) o recuperando el valor del componente (reparación, reacondicionamiento o remanufacturación) [46] [55].

Entre estas medidas, la remanufacturación está ganando popularidad debido a su valor intrínseco de los componentes y la garantía de calidad de los productos remanufacturados. La remanufacturación ha sido reconocida por varios gobiernos dado que puede reducir efectivamente la cantidad de desechos y reutilizar el material viejo [55].

Long et al. (2016) [46] evalúan los enfoques de gestión de los RAEE en la UE y en China, ya que se cree que son los representantes tanto de economías desarrolladas como de emergentes, respectivamente. Se estudian políticas de vertederos y objetivos de recolección y recuperación.

Los objetivos de recolección chinos son más altos que los de la UE para la mayoría de los productos. Para el caso de los RAEE en China, se alcanza una tasa de recolección del 70%. A nivel de la UE, se desarrollan directivas para combatir la propagación de los RAEE con un objetivo específico y en un tiempo determinado. Con eso se busca que luego se implementen directivas nacionales y que sea cada gobierno quien determina cómo alcanzar los objetivos. A raíz de ello se espera que la tasa de recolección aumente hasta un porcentaje de entre 50% y 80% [46].

Un aspecto fundamental de la política de gestión de los RAEE de la UE es que estos residuos tienen prohibido ser enviados al vertedero y, en su lugar, deben someterse a algún tipo de tratamiento al final de la vida útil [56] [46]. Por el contrario, la política china no prohíbe explícitamente la entrada de RAEE en el vertedero [46].

Los autores [46] realizaron una actividad práctica con el objetivo de identificar barreras técnicas en el desmontaje de teléfonos móviles. La actividad consistió en desmontar cinco teléfonos móviles de distintos años. La decisión de qué componentes recuperar y qué estrategia es más rentable para los RAEE, se realiza considerando el tiempo que requiere el desmontaje, la facilidad de desmontar, los métodos de unión, los materiales utilizados y el peso del componente.

Al desmontar el teléfono móvil más nuevo y moderno, la primera impresión fue que los teléfonos inteligentes son complejos y que contienen muchos subconjuntos que podrían desmontarse en una gran cantidad de componentes. El desmontaje tomó mucho tiempo y fue complejo, ya que algunas uniones, como las de plásticos fundidos y soldaduras, son casi imposibles de desmontar sin romper la unión. Los autores concluyen que el desmontaje se podría facilitar si en el diseño del producto se consideraran tornillos estandarizados para todos los componentes de un teléfono [46].

Del desmontaje de los teléfonos móviles de distintos años, los autores llegan a las siguientes conclusiones. La carcasa de los teléfonos móviles podría reutilizarse si el tamaño y la forma de los teléfonos móviles estuviera estandarizado y si el material no fuera propenso a rayones. Desafortunadamente, esto no es fácil de realizar ya que la moda dicta cambios en la forma y en el tamaño del teléfono regularmente. Los parlantes podrían reutilizarse ya que su tecnología está estancada. Las cámaras y los flashes de las cámaras se pueden reutilizar en teléfonos reacondicionados. También podrían ser reutilizadas en otros dispositivos que necesitan una cámara o venderlas por separado. Esto podría realizarse si todas las cámaras estuvieran disponibles como módulos discretos en lugar de integradas. Las pantallas LCD podrían reutilizarse y usarse junto con los digitalizadores táctiles. El “vidrio gorila” es valioso y puede reciclarse o reutilizarse si está en buenas condiciones. Los cables de datos en buenas condiciones pueden redirigirse a otros dispositivos. Se pueden reciclar cables de datos de tamaño poco común o cables rotos. El vibrador es mejor reciclarlo porque es una parte mecánica. Debido a la ubicuidad del USB, los nuevos cargadores podrían ser innecesarios. Esto podría ahorrar miles de toneladas de plástico, metales conductores y circuitos componentes. Estandarizar los módulos basados en USB, tarjeta SD y SIM para usar en teléfonos móviles, cámaras, discos duros externos, etc. Por lo tanto, la mejora podría ser que el módulo USB, SD o SIM sea reutilizado y no reciclado [46].

Como conclusión, los autores [46] manifiestan que la remanufacturación brinda la mayor cantidad de valor agregado a un producto, pero para los productos eléctricos y electrónicos no es viable debido al rápido cambio de tecnología y moda. Tampoco es una opción viable la reasignación de componentes debido a la naturaleza singular de la mayoría de los productos electrónicos. Posiblemente, el reúso es una de las opciones más sostenibles para los RAEE, ya que amplía el ciclo de vida de un producto y puede repetirse varias veces.

3.1.2. Neumáticos Fuera de Uso

Surge una problemática importante a partir del mal manejo de los neumáticos en su ciclo de vida ya que gran parte de los mismos, una vez utilizados, son desechados informalmente en lugares inadecuados. Los neumáticos desechados tardan entre 500 y 3000 años en descomponerse naturalmente y son un entorno de proliferación de vectores de diversas enfermedades. Asimismo, para su producción demandan gran cantidad de materias primas y recursos por lo que desecharlos es un desperdicio de

materiales que podrían ser reutilizados, reciclados o revalorizados [41]. Dadas estas características particulares es muy importante establecer una gestión final adecuada de los mismos.

Las tecnologías actualmente disponibles para la transformación de neumáticos fuera de uso se dividen en procesos de calor o físicos. Los procesos físicos comprenden procesos de trituración donde se obtienen granos de distinto tamaño de los componentes de los neumáticos. Los procesos de calor comprenden la incineración y la pirolisis (combustión en ausencia de oxígeno), y su principal producto es la energía, esta forma de recuperación se denomina revalorización energética. En particular el caucho obtenido del triturado puede utilizarse como combustible en fábricas de cemento, componente en materiales asfálticos, materia prima para pisos, relleno para canchas de césped artificial. [41].

Gutowski et al. (2011) estudiaron un caso real para poder decidir qué conviene más en términos de ahorro de energía en el caso de un neumático usado de un camión, si reemplazarlo por uno recauchutado o desecharlo y reemplazarlo por uno nuevo. El recauchutado agrega material nuevo a la carcasa anterior y es en sí mismo un proceso que consume mucha energía. Si bien es cierto que una operación de recauchutado puede restaurar un neumático a un rendimiento casi original, hay evidencia de que el recauchutado puede no lograr un rendimiento similar al nuevo [17].

Conducir el camión a 50 mph, 8 horas al día, 5 días a la semana durante 50 semanas, suma hasta 100.000 millas en un año, lo que equivale al total de la vida útil del neumático. Por lo tanto, reemplazar uno usado por uno nuevo o recauchutado se fundamenta principalmente por los kilómetros recorridos, más que por una decisión de diseño [17].

Una dificultad de la remanufacturación de neumáticos es que debido a que estas operaciones pueden tener lugar en muchas empresas pequeñas, puede haber una variación significativa en la calidad del trabajo de recauchutado. Si bien es cierto que una operación de recauchutado de neumáticos puede restaurar un neumático a un rendimiento casi original, a partir de datos disponibles hay evidencia de que el recauchutado a veces puede no lograr un rendimiento del producto similar al nuevo. Por ejemplo, las mediciones de Michelin muestran que la resistencia a la rodadura de los neumáticos radiales recauchutados puede aumentar entre un 7% y un 9% en comparación con los radiales nuevos [17].

De todas formas, existe un ahorro para la opción de recauchutado de alrededor del 0,1% de la energía del ciclo de vida del neumático nuevo (no se incluyó la posible pérdida de rendimiento del neumático recauchutado). Esta diferencia está claramente dentro del margen de error para la metodología energética del ciclo de vida. No hay un aumento ni una disminución medible en la energía total consumida entre las dos opciones. Por lo tanto, para este caso no se puede dar una respuesta clara a la simple pregunta: ¿la remanufacturación ahorra energía? La respuesta depende de muchos factores [17].

3.1.3. Residuos plásticos

En el siglo pasado, la industria del plástico creció considerablemente y los plásticos se convirtieron en un material barato, fuerte y duradero. Actualmente, los plásticos se utilizan universalmente en múltiples aplicaciones y se han vuelto esenciales para la economía moderna [57]. En 2014, la producción global de plásticos sobrepasó los 300 millones de toneladas por año [58]. A raíz de este crecimiento se han encontrado evidencias que el enfoque actual de producción, uso, transporte y eliminación de materiales plásticos causa efectos dañinos para los ecosistemas. Debido a las frecuentes prácticas inadecuadas de gestión de residuos se han introducido en el medio ambiente grandes cantidades de materiales plásticos [59].

Durante la última década, las industrias de reciclaje han mostrado una tendencia alentadora, un crecimiento anual del 7% en Europa occidental. Desafortunadamente, la tasa de reciclaje varía a nivel regional y global, y solo un pequeño porcentaje del total de residuos plásticos se recicla actualmente [57]. Las tasas de reciclado de plástico son mayores en Europa, pero aun así alcanzaron sólo el 30% en 2014. Incluso en los países más desarrollados, con mayor apoyo de la ciudadanía, existen múltiples obstáculos en todo el proceso de reciclaje. Algunos de los obstáculos que se enfrentan los recicladores son la falta de disponibilidad de puntos de recolección, la contaminación de la materia prima de reciclado, la limitada comerciabilidad del material reciclado, la variedad en la simbología utilizada para describir la reciclabilidad del producto entre países y regiones, y la mezcla de diferentes tipos de plástico en un mismo producto [58] [57]. A raíz de algunos de estos problemas es que en la mayoría de los países todo tipo de desechos plásticos se recolectan juntos y se clasifican en estaciones especiales antes de ser reciclados. El reciclaje de productos de plástico es, por lo tanto, más difícil que el reciclaje de papel o vidrio. Por lo tanto, la mayoría de los recicladores recolectan todo tipo de plásticos, lo derriten o lo trituran y lo convierten en un nuevo producto de plástico [57].

Los residuos plásticos se presentan en una gran variedad de tamaños y composiciones y se han encontrado en todos los océanos del mundo, transportados por las corrientes oceánicas y los vectores biológicos. Se estima que entre el 60 y 80% de los desechos marinos son plásticos. Y de estos, según datos de Greenpeace, se cree que el 80% proviene de actividades terrestres y el 20% de actividades en los océanos [57].

Recién a finales de 1960 y principios de 1970 es que se expresaron las primeras preocupaciones por los desechos marinos y sus consecuencias en la fauna marina. A partir de este momento se estimularon nuevas investigaciones sobre el alcance y consecuencias de la contaminación de los plásticos en el medio marino [58]. El problema de los residuos plásticos en los océanos surge a partir de la falta de estrategias globales y regionales para prevenir la introducción de desechos en el medio ambiente. En las últimas décadas varios países han tomado medidas legislativas a nivel

nacional para regular el problema de la basura marina y la cooperación entre países ha permitido tomar medidas reguladoras y preventivas a nivel internacional [59].

Aunque los desechos plásticos son una de las formas más extendidas de contaminación marina, también se encuentra entre los problemas de contaminación más resolubles que afectan a los océanos del mundo. No obstante, a menudo se subestima el alcance y el impacto de los desechos plásticos en el medio marino, y por lo tanto el problema requiere de mucha más atención por parte de los gobiernos y de los fabricantes. Para esto se necesita una amplia variedad de enfoques y estrategias para producir un entorno marino significativamente más limpio y más seguro [59]. Varios actores han participado activamente en una serie de iniciativas locales, nacionales, regionales y mundiales para abordar el problema de los desechos marinos de plástico y buscar soluciones realistas. Sin embargo, el problema persiste y crece año a año [57].

La respuesta más eficaz y eficiente al problema de la basura plástica en el medio marino es prohibir la entrada de plásticos en los océanos a través de regulaciones legislativas que obliguen a los consumidores a responsabilizarse por sus desechos. Otras opciones son la introducción y el uso de alternativas como los plásticos biodegradables, y el desarrollo de la industria de reciclado. El reciclaje no solo evita el descarte de los plásticos si no que ahorra energía y materiales. Asimismo, es necesaria la eliminación de los plásticos presentes en los océanos que, aunque muchas organizaciones ambientales contribuyen con esta meta no es suficiente. Por otra parte, la educación es muy importante ya que es la base para concientizar a las próximas generaciones de las consecuencias de descartar plásticos y otros desechos en el medio marino [59].

3.2. Modelo de costos para la remanufacturación

La remanufacturación puede lograr considerables beneficios económicos, ambientales y sociales en muchas aplicaciones. Sin embargo, su beneficio económico varía para diferentes productos y procesos de remanufacturación [48].

Xu y Feng (2014) [48] desarrollan un modelo de costos para evaluar cuantitativamente los beneficios de las técnicas de remanufacturación para colaborar en la toma de decisiones sobre estrategias de productos usados al finalizar su vida útil.

Se modela el proceso de remanufacturación basado en la Fabricación Aditiva (FA). Este proceso de remanufacturación consta de cuatro fases: la RL, el procesamiento de datos, el depósito y la molienda (grinding).

El desarrollo del modelo de costos consta de los siguientes seis pasos claves:

1. Selección de una metodología de estimación de costos. Las metodologías de estimación de costos disponibles son: la estimación de costos paramétrica, la estimación de costos de construcción de ingeniería, la estimación de costos basada en la analogía, y la estimación de costos de las cotizaciones del proveedor.

Las cuatro metodologías se comparan según las siguientes características: tiempo requerido, recursos requeridos, datos requeridos y alcance de las aplicaciones. Para el proceso de remanufactura basado en la FA, se selecciona el método de estimación de costos de “construcción de ingeniería”. Este método es el que representa altos niveles de las cuatro características.

2. Desarrollo de la estructura de desglose de costos. El primer paso es definir el primer nivel de la estructura de desglose de costos. Este nivel cubre todos los elementos principales del costo total de remanufactura y no tiene dependencia entre ellos. Después de eso, los niveles más bajos se desarrollan hasta el nivel donde el valor de costo se puede recopilar directamente o calcular a través de la información detallada del proceso de remanufactura. En la Figura 3.2.1 se puede observar la estructura de desglose de costos desarrollada para la técnica de FA.

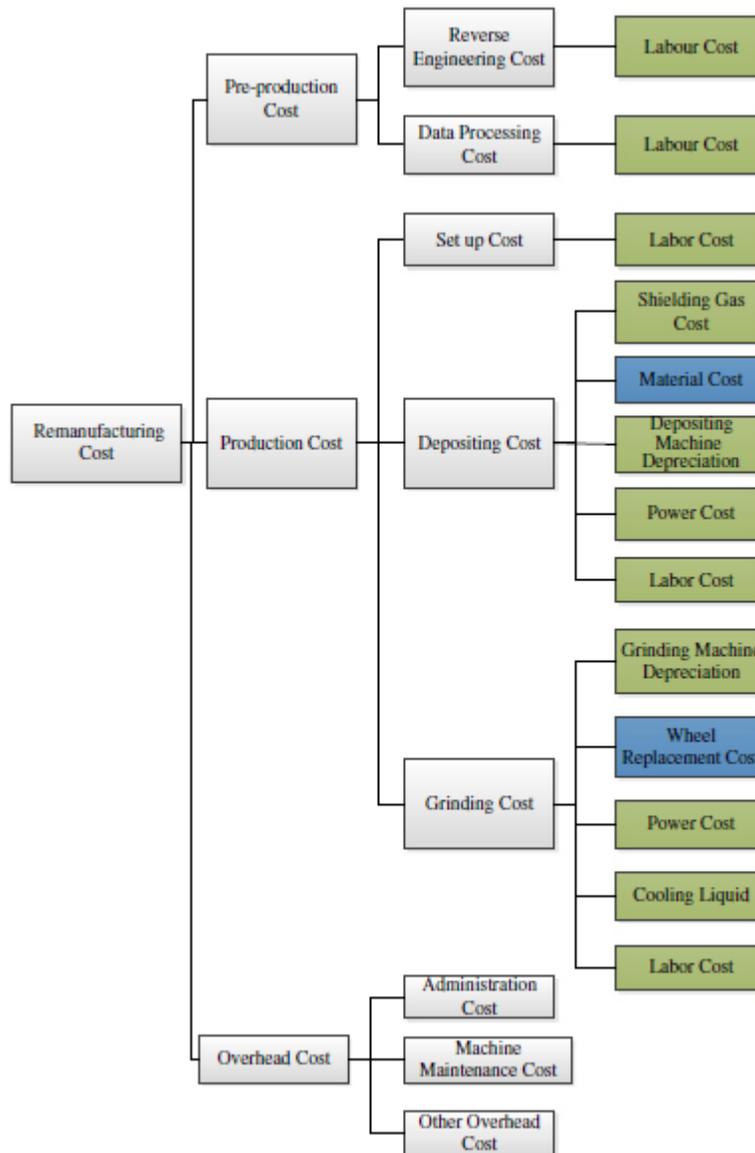


Figura 3.2.1: Estructura de desglose de costos para el proceso de remanufactura. Incluye tres elementos de costo en el primer nivel: costo de preproducción, costo de producción y costo general [48].

3. Identificación de conductores de costos. Los conductores de costos son aquellos atributos del proceso de remanufactura que afectan el costo de las actividades en el proceso de remanufactura. Por ejemplo, para la fase del proceso RL, un conductor de costos es la complejidad de la forma de remanufactura; y para la fase de depósito, un conductor es el volumen del componente para la remanufactura.

4. Desarrollo de relaciones de estimación de costos. Las relaciones de estimación de costos deben desarrollarse para cada elemento usando los conductores de costo

identificados. Cada elemento de costo se expresa como una función de los conductores de costo. Por ejemplo, el costo laboral del proceso de depósito y molienda se calcula de la siguiente manera:

$$C_l = R_l \cdot (T_w + T_g) \quad (1)$$

Donde C_l es el costo de mano de obra, R_l es la tarifa por hora de trabajo, y T_w y T_g son los tiempos para el proceso depósito y el proceso de molienda, respectivamente.

$$T_w = \frac{T_d}{1-i_w} = \frac{M_d}{D \cdot (1-i_w)} \quad (2)$$

$$T_g = \frac{T_{rm}}{1-i_g} = \frac{M_g}{R \cdot (1-i_g)} \quad (3)$$

Donde T_d y T_{rm} son el tiempo de depositar en el proceso de depósito y el tiempo de eliminación del material en el proceso de molienda, i_w e i_g son las tasas de depositar y los procesos de molienda, D es la tasa de depositar de la máquina de depósito, R es la velocidad de eliminación de la rectificadora.

En resumen, el costo total de la remanufacturación se calcula agregando todos los elementos de costo:

$$C_{total} = C_{pre} + C_{set} + C_w + C_s + C_g + C_d + C_l + C_p + C_o \quad (4)$$

Donde C_{total} es el costo total de la remanufacturación, C_{pre} es el costo de la preproducción, C_{set} es el costo de preparación en la etapa de producción, C_w , C_s y C_g son los costos de depositar material, costo de protección del gas, y costo de consumición de molienda, en la fase de producción. C_d , C_l , C_p , C_o son el costo de depreciación de la máquina, el costo de mano de obra, el costo de energía en la etapa de producción, y el costo general, respectivamente.

5. Identificación de parámetros de proceso. Los parámetros del proceso de remanufacturación dependen de los parámetros de entrada para la remanufacturación y están determinados por una base de conocimiento que almacena la relación entre estos dos conjuntos de parámetros. Por ejemplo, los parámetros de entrada pueden ser: tipo de material, volumen, superficie, complejidad de la geometría. La base de conocimiento está diseñada previamente en función de los resultados de los experimentos y las experiencias de los expertos. Los parámetros de proceso pueden ser: corriente, voltaje, tasa de flujo de gas.

6. Validación e implementación del modelo de costos. El modelo de costos ha sido validado conceptualmente en la metodología de estimación de costos, estructura de desglose de costos, relaciones de estimación de costos y proceso de estimación de costos por tres expertos. Uno de los expertos es el gerente del proyecto de FA con más de tres años de experiencia en el campo. Y los otros dos son expertos en ingeniería de costos.

Además, los datos recopilados en el modelo de estimación de costos también se han validado inicialmente. La validación ha confirmado que los datos utilizados en el modelo de costos se encuentran dentro de los rangos razonables; el modelo de costos se desarrolla lógicamente y es válido para cumplir con el propósito de evaluar el beneficio económico de la remanufacturación basada en técnicas específicas.

Xu et al. (2014) [48] realizan un caso de estudio utilizando el modelo de costos desarrollado para comparar el beneficio de remanufacturar un componente específico o crear uno nuevo. Se seleccionó una pista de listones de alas de aeronaves en el final de su vida útil para evaluar si esta pista de listones es económicamente viable para la remanufacturación en comparación con la producción de una nueva.

El resultado muestra que al utilizar la técnica de FA para remanufacturar la pista de listones, se puede lograr más del 90% del ahorro de costos en comparación con la creación de una nueva pista de listones. Este importante ahorro de costos se consigue gracias al ahorro de materia prima en la remanufacturación.

Este modelo de costos tiene como objetivo evaluar el beneficio económico del proceso de remanufacturación basado en técnicas específicas, por lo que en este trabajo sólo se consideran los costos incurridos por la remanufacturación. Sin embargo, para apoyar la toma de decisiones sobre la estrategia de final de la vida útil a alto nivel (incluida la remanufacturación), es necesario realizar una estimación de costos de todo el sistema de remanufacturación, es decir, incluyendo los costos de logística inversa, inventario, etc.

3.3. Planificación de la producción para sistemas con opciones de retorno

En la presente sección se estudian los problemas de planificación de la producción para sistemas con opciones de retornos. Tal como se expuso al comienzo de la Sección 3, la aplicación de la EPR tiene como objetivo alentar a los fabricantes mundiales a lograr un mayor valor de utilización de los procesos de recuperación de productos [51]. Es por esto y debido al alto costo de la disposición final, que existe una preocupación por parte de los fabricantes para mejorar la gestión de recuperación de productos.

Por lo tanto, se expone en primer lugar, un análisis del ahorro de energía asociado a la remanufacturación. En segundo lugar, se encuentra un análisis para guiar a los OEMs en la toma de decisiones de la configuración más adecuada de recuperación de productos usados. En tercer lugar, se estudian los modelos de gestión de inventario para sistemas con opciones de retorno.

3.3.1. Remanufacturaación vs. ahorro de energíaa

El mayor ahorro originado por la remanufacturaación proviene de evitar la produccióón de nuevos materiales. Los productos remanufacturados generalmente se venden a un precio equivalente al 50 a 80% del producto nuevo. Por lo tanto, como se especificó en la Sección 2.5, la remanufacturaación se puede ver como un ahorro de dinero para el consumidor que a su vez beneficia el medio ambiente [17].

Por lo general, se afirma que los productos remanufacturados que sustituyen los productos nuevos ahorran energíaa. Esta afirmación se basa en estudios que miran principalmente las diferencias en la produccióón de materiales. Sin embargo, cuando se incluye la fase de uso del producto, la situacióón puede cambiar radicalmente [17].

Tal como se argumentó en la Sección 2.6, no todo son buenas noticias para la remanufacturaación. Gutowsky et al. (2011) [17] estudian distintos casos para responder a la siguiente pregunta. Para ahorrar energíaa, ¿deberíaa el consumidor adquirir una versióón remanufacturada del producto o deberíaa comprar un producto nuevo?

El análisis de los autores para responder a su pregunta consistió en evaluar la decisióón de reemplazar un producto por uno nuevo o por uno remanufacturado para un consumidor de Estados Unidos. Se realizó un análisis de energíaa del ciclo de vida para las dos opciones de adquisicióón del producto. Un aspecto a considerar en los estudios del ciclo de vida del producto es que, para la mayoría, el requerimiento de energíaa para la produccióón de materiales domina ampliamente los requisitos de energíaa para la produccióón del producto. Y para productos que requieren de una fuente de energíaa para funcionar (por ejemplo, electrodomésticos), es muy común que la fase de uso domine el uso de energíaa. Incluso pequeños cambios en la energíaa de la fase de uso pueden producir resultados significativamente diferentes.

Los autores estudiaron el caso de un refrigerador que luego de unos años de uso se le rompe el compresor. Todas las demás funciones para el refrigerador funcionan al mismo nivel que cuando estaba recién nuevo. Las opciones consideradas son reemplazar el compresor por uno remanufacturado y usar el refrigerador por más años, o eliminar el refrigerador y comprar uno nuevo. El análisis realizado calcula los requisitos de energíaa del ciclo de vida por metro cúbico de espacio refrigerado para las fases de materiales, produccióón y uso. Resultó que antes del año 1974, la energíaa de uso aumentaba, entonces se favorecía la opción de remanufacturaación, sin embargo, después del año 1974, las mejoras en la eficiencia de la fase de uso favorecieron la compra de refrigeradores nuevos.

Adicionalmente al estudio del refrigerador, los autores analizaron 25 casos de ocho categorías: muebles, ropa, computadoras, motores eléctricos, neumáticos, electrodomésticos, motores y cartuchos de tóner.

La respuesta a la pregunta que pretenden responder los autores está dividida. Hay un grupo de productos que puede proporcionar grandes ahorros de energíaa relativos y hay un grupo de productos que favorecen fuertemente comprar nuevos, por ejemplo,

mobiliario de oficina y ropa, y también hay un grupo en el medio que están más matizados.

Los autores concluyen que históricamente, cuando algunos productos no se alimentaban de energía eléctrica, la remanufacturación ahorra energía y materiales. Por ejemplo, los rastrillos, palas de nieve y martillos ahora son sopladores de hojas, sopladores de nieve y herramientas eléctricas. Actualmente hacer afirmaciones de la existencia de un ahorro de energía general para la remanufacturación no es aconsejable.

Se observó en este estudio que las principales mejoras de eficiencia son debido a las grandes transformaciones en la arquitectura del producto. Por ejemplo, de las computadoras de escritorio a computadoras portátiles. La actualización de componentes podría lograrse si estuvieran estandarizados.

3.3.2. Toma de decisiones de disposición para seleccionar la configuración de recuperación de productos

Kuik et al. (2016) [51] presentan un modelo integrado de optimización para la toma de decisiones en el rediseño al final de la vida útil de los productos. Es un modelo integrado ya que, además de maximizar el valor de recuperación cuando se remanufactura un producto, considera limitaciones prácticas. Las restricciones prácticas incluyen el tiempo de producción, el desperdicio y la calidad.

En este modelo, la recuperación de productos consiste en seleccionar componentes nuevos, reutilizados, reconstruidos y reciclados que se ensamblarán para producir un producto remanufacturado. A continuación, se resumen los parámetros y variables de decisión utilizadas para formular el modelo de optimización.

Parámetros:

- V_{REC} : Valor de recuperación alcanzable para un producto remanufacturado.
- Op : Costo asociado con el proceso operacional op^{th} para un producto.
- S : Costo asociado con la actividad relacionada S^{th} para un producto.
- TC_{REC} : Costo total de recuperación de un producto.
- TC_{VIR} : Costo total sin recuperación de un producto.
- $C_{1,i}$: Costo de adquisición de la materia prima para el componente i .
- $C_{2,i}$: Costo de producción para el componente i .
- $C_{3,i}$: Costo de ensamblaje par el componente i .
- $C_{4,i}$: Costo asociado a la reutilización directa para el componente i .
- $C_{5,i}$: Costo de desmontaje para el componente i .
- $C_{6,i}$: Costo de reconstruir para el componente i .
- $C_{7,i}$: Costo de reciclar para el componente i .
- $C_{8,i}$: Costo de disponer finalmente para el componente i .

- $TC_{collect}$: Costos relacionados a la recolección, con recuperación para un producto.
- $C_{1,collect}$: Incentivos financieros para un producto incurrido por el fabricante.
- $C_{2,collect}$: Costo administrativo para un producto incurrido por el fabricante.
- $C_{3,collect}$: Costo de clasificación para un producto incurrido por el fabricante.
- $C_{4,collect}$: Costo de transporte para un producto incurrido por el fabricante.
- MLT_{REC} : Tiempo de entrega de producción con recuperación de un producto.
- MLT_{VIR} : Tiempo de entrega de producción sin recuperación de un producto.
- g : Tiempo de entrega asociado con el proceso de operación g^{th} para un producto.
- μ_{MLT} : Ratio de tiempo de entrega en recuperación contra el objetivo del fabricante.
- $T_{1,i}$: Tiempo de entrega para producir el componente i .
- $T_{2,i}$: Tiempo de entrega para ensamblar el componente i .
- $T_{3,i}$: Tiempo de entrega para reusar el componente i .
- $T_{4,i}$: Tiempo de entrega para desmontar el componente i .
- $T_{5,i}$: Tiempo de entrega para reconstruir el componente i .
- $T_{6,i}$: Tiempo de entrega para reciclar el componente i .
- $T_{7,i}$: Tiempo de entrega de procesar la eliminación del componente i .
- W_{REC} : Proporción de peso de recuperación para un producto.
- W_{REC} : Proporción de peso para un producto.
- μ_w : Proporción de peso de recuperación contra el objetivo del fabricante.
- $Z_{r,i}$: Proporción de peso para componentes i vírgenes/reusados/reconstruidos/reiclados.
- QR_{REC} : Calidad en términos de características de confiabilidad con recuperación de un producto.
- QR_{VIR} : Calidad en términos de características de confiabilidad sin recuperación de un producto.
- μ_{QR} : Ratio del sistema de confiabilidad contra el objetivo del fabricante.
- $b_{r,i}$: Parámetro de Weibull para el componente i .
- θ_r : Vida característica del componente i .
- l : Ciclo de vida permitido antes del desgaste para el componente i reusado o reconstruido.
- $\delta_{r,i}$: Horas de funcionamiento promedio para el componente i .

Variables:

- n : Número de componentes
- i : Índice del componente del producto, donde $i = 1, 2, \dots, n$
- r : Índice del componente virgen $r = 1$; componente reutilizado $r = 2$; componente reconstruido $r = 3$ y componente reciclado $r = 4$.

- $X_{i,j} = 1$ si el componente i es virgen, reusado, reconstruido o reciclado; en otro caso es 0.

El problema se puede modelar como sigue:

$$\text{Max } V_{REC} = TC_{VIR} - TC_{REC} - TC_{Collect} \quad (5)$$

s.a

$$TC_{VIR} = \sum_{i \in I} [X_{1,i} (C_{8,i} + \sum_{op \in \{1..3\}} C_{op,i})] \quad (6)$$

$$TC_{REC} = \sum_{i \in I} \left[\left(X_{2,i} (\sum_{op \in \{3..5\}} C_{op,i}) + X_{3,i} (\sum_{op \in \{3..6\}} C_{op,i}) \right) + X_{4,i} (C_{7,i} + \sum_{op \in \{2..5\}} C_{op,i}) \right] \quad (7)$$

$$TC_{Collect} = \sum_{s \in \{1..4\}} C_{s,collect} \quad (8)$$

$$\frac{MLT_{REC}}{MLT_{VIR}} \leq \mu_{MLT} \quad (9)$$

$$\frac{W_{REC}}{W_{TOT}} \leq \mu_W \quad (10)$$

$$\frac{QR_{REC}}{QR_{VIR}} \leq \mu_{QR} \quad (11)$$

$$X_{2,i} + X_{3,i} + X_{4,i} = 1 \quad (12)$$

$$X_{1,i}, X_{2,i}, X_{3,i}, X_{4,i} \in \{0,1\} \quad (13)$$

$$MLT_{REC} = \sum_{i \in I} [X_{2,i} (\sum_{g \in \{2..4\}} T_{g,i}) + X_{3,i} (\sum_{g \in \{2..5\}} T_{g,i}) + X_{4,i} (T_{6,i} + \sum_{g \in \{1..4\}} T_{g,i})] \quad (14)$$

$$MLT_{VIR} = \sum_{i \in I} [X_{1,i} (T_{7,i} + \sum_{g \in \{1,2\}} T_{g,i})] \quad (15)$$

$$W_{REC} = \sum_{i \in I} [X_{2,i} (Z_{2,i}) + X_{3,i} (Z_{3,i}) + X_{4,i} (Z_{4,i})] \quad (16)$$

$$W_{TOT} = \sum_{i \in I} [Z_{1,i} + Z_{2,i} + Z_{3,i} + Z_{4,i}] \quad (17)$$

$$QR_{REC} = \prod_{i \in I} \left[X_{2,i} \left(e^{-\left(\frac{\delta_{2,i}}{\theta_{2,i}}\right)^{b_{2,i}}} \right) + X_{3,i} \left(e^{-\left(\frac{\delta_{3,i}}{\theta_{3,i}}\right)^{b_{3,i}}} \right) + X_{4,i} \left(e^{-\left(\frac{\delta_{4,i}}{\theta_{4,i}}\right)^{b_{4,i}}} \right) \right] \quad (18)$$

$$QR_{VIR} = \prod_{i \in I} \left[X_{1,i} \left(e^{-\left(\frac{\delta_{1,i}}{\theta_{1,i}}\right)^{b_{1,i}}} \right) \right] \quad (19)$$

Como se muestra en (5), la función objetivo se define como la diferencia de los costos asociados a la recuperación, incluyendo los costos de la recolección y los costos vírgenes de producción. En este modelo, la restricción (6) hace referencia al costo total sin recuperación y se expresa como la suma de los procesos operacionales secuenciales para producir un producto utilizando únicamente componentes vírgenes. Mientras que la restricción (7) se expresa como el costo total de recuperación para un

producto producido basado en los siguiente tres elementos, costos del proceso de reutilización, costos del proceso de reconstrucción y costos del proceso de reciclaje y los relacionados con la recolección. La restricción (8) refiere a los costos relacionados con la actividad de recolección para un producto producido. Además, las restricciones (9) y (10) se establecen en función de las limitaciones de producción, como el tiempo de producción, las proporciones recuperables de peso y la calidad en términos de características de confiabilidad para un producto remanufacturado.

Para resolver el problema, los autores [51] utilizan algoritmo genético (GA, por sus siglas en inglés). Los GA son algoritmos de optimización numérica inspirados en la selección natural y en la genética natural. Generalmente se utilizan para buscar espacios de búsqueda grandes, no lineales, donde falta conocimiento o es difícil codificar y donde los métodos tradicionales de optimización son insuficientes [1]. Los GA son la metaheurística más utilizada para resolver problemas relacionados con la ECMPRO [7].

Kuik et al. (2016) no consideran en su estudio el impacto social de la recuperación ni cómo el precio minorista afecta la decisión de recuperar un producto. Por lo tanto, Menga et al. (2017) [47] desarrollan un modelo de optimización multiobjetivo dependiente de la calidad para identificar la solución óptima, o recuperación de producto óptima, que mejor equilibre el desempeño económico, ambiental y social de la recuperación del producto para la sostenibilidad. Consideran en el modelo restricciones prácticas, condiciones de calidad de los productos al final de su vida útil, funciones de costos y precios minoristas.

Los componentes que no se pueden restaurar de manera factible a buena calidad se sugieren reemplazarlos por otros nuevos. La intención es que la calidad de un producto remanufacturado sea tan buena o incluso superior a la del producto original. Sin embargo, es fundamental que el costo del proceso y el precio minorista sean mucho más bajos que los de un producto nuevo.

Este fue el primer esfuerzo para proponer y resolver un modelo de toma de decisiones de optimización multiobjetivo en la remanufacturación frente al desmontaje desde la perspectiva de la sostenibilidad de la recuperación del producto.

En este estudio, la recuperación del producto implica al final de su vida útil, seleccionar entre la remanufacturación y el desmontaje. Para buscar la solución óptima desde una perspectiva de sostenibilidad, utilizan tres pilares de criterios para evaluar y comparar rendimientos sostenibles: beneficios de la recuperación, ahorro de energía e impactos sociales.

El impacto social es una preocupación importante del desempeño sostenible y se centra en los impactos de la recuperación de productos en la sociedad, la comunidad, los seres humanos y las condiciones de vida [47]. Los efectos sociales se pueden medir mediante los siguientes tres indicadores. La creación de empleo, los problemas de salud y los impactos intergeneracionales. Finalmente, se formula un factor de impacto social integral para considerar todos los efectos.

Las suposiciones técnicas más fuertes del estudio son, en primer lugar, que la distribución de calidad de cada componente se obtiene mediante un modelo estadístico y un análisis de datos del ciclo de vida del producto. La relación entre la calidad de los componentes y el costo de recuperación se captura mediante el análisis de regresión, que se supone lineal, cóncavo o convexo en este estudio. Los rendimientos sostenibles se correlacionan positivamente con las condiciones de calidad de cada componente al final de su vida útil porque los diferentes niveles de calidad llevarán a un costo de proceso diferente, consumo de energía diferente y emisión de residuos diferentes.

En segundo lugar, que consideran tres opciones de recuperación comunes para los componentes: la remanufacturación, la reutilización directa o el reciclaje de materiales. Los componentes que no pueden ser remanufacturados o reutilizados serán reciclados. Todos los componentes que se pretenden reciclar se consideran módulos de reciclaje, excepto aquellos que son peligrosos. Se pueden reciclar en su conjunto mediante técnicas de separación con una tasa de recuperación de material satisfactoria para evitar operaciones de desmontaje más costosas. El vertido y la incineración no se tratan en este documento debido a su impacto negativo en el medio ambiente.

El objetivo del modelo propuesto es identificar una solución de recuperación óptima, o casi óptima, para equilibrar mejor los beneficios económicos, el ahorro energético y los impactos sociales de la remanufacturación y el desmontaje.

El modelo propuesto es un típico problema de optimización multiobjetivo, que se considera NP-completo para buscar el compromiso óptimo global. Utilizan el algoritmo genético de clasificación no dominado II (NSGA-II, por sus siglas en inglés), uno de los algoritmos evolutivos multi-objetivo clásicos, para resolver los dos subproblemas respectivamente. NSGA-II ha demostrado ser robusto y se usa ampliamente para lograr el conjunto óptimo de Pareto.

Los autores [47] demostraron la eficacia del modelo de optimización multiobjetivo para lograr una solución de recuperación satisfactoria en un experimento con un motor de automóvil. Los resultados proporcionan ideas para las prácticas de recuperación de productos, que pueden ayudar a las empresas a adaptar sus prácticas para enfrentar los desafíos de la sostenibilidad.

3.3.3. Gestión de inventario para sistemas con opciones de retorno

En la presente sección se estudian los modelos de control de inventario en el que se contempla la existencia de un flujo de productos, desde el consumidor hasta el fabricante, que serán almacenados, producidos, remanufacturados, o dispuestos finalmente de una manera adecuada.

Los modelos propuestos en la literatura se pueden clasificar principalmente con respecto a las suposiciones tomadas sobre la demanda y los retornos [44]. Estos se pueden clasificar en modelos determinísticos y modelos estocásticos.

Los modelos determinísticos se basan en la suposición de que la demanda y los retornos son conocidos en todo el horizonte de planificación. Intentan encontrar un equilibrio óptimo entre los costos fijos de preparación y los costos variables de mantenimiento de inventario [1]. En cambio, los modelos estocásticos son aquellos que toman en cuenta la incertidumbre presente en la demanda y en los retornos, y pueden ser representados comúnmente por una distribución de probabilidad.

3.3.3.1. Modelos determinísticos

Los modelos determinísticos son aquellos donde se toma como supuesto que la demanda es conocida y certera, no contemplándose la incertidumbre en el proceso modelado. Si en los periodos de tiempo de igual duración la demanda es siempre la misma, se dice que es estática, si cambia de un periodo a otro se dice que es dinámica.

En el caso de la demanda estática, los modelos determinísticos aprovechan la lógica del Tamaño Económico de Pedido (EOQ, por sus siglas en inglés) para encontrar el equilibrio óptimo entre los costos fijos de preparación y los costos variables de mantenimiento de inventario. Varios autores han propuesto modificaciones a esta fórmula teniendo en cuenta los flujos de retornos [44].

Para hacer frente a la demanda dinámica, distintos autores realizaron modificaciones al problema clásico de Wagner-Whitin (1958) [60]. Estudios más recientes desarrollan algoritmos más eficientes que el de Wagner-Whitin basado en Programación Dinámica (DP, por sus siglas en inglés) para encontrar los valores óptimos de cantidad a producir en cada período [1].

Una adecuada planeación de inventarios debe incorporar factores cambiantes en el tiempo [61]. Por lo tanto, la presente sección se focaliza en los modelos determinísticos con demanda dinámica.

Wagner y Whitin (1958) [60] desarrollan una versión dinámica del Problema de Dimensionamiento del Lote Económico (ELSP, por sus siglas en inglés). Consiste en una extensión natural y dinámica al problema EOQ, donde la demanda durante el horizonte de planificación presenta variabilidad. El objetivo es minimizar los costos de producir y mantener el inventario durante el horizonte de planeación. Se considera que las demandas son conocidas en el horizonte de planificación finito, pero varía período a período. Se discretiza el tiempo en períodos de largo idéntico.

El problema se formula mediante programación matemática y se consideran los siguientes parámetros y variables de decisión.

Parámetros:

- T : Largo del horizonte finito de planificación
- D_t : Demanda del producto en el período t

- c : Costo unitario de ordenar
- K : Costo fijo de ordenar
- h : Costo unitario de mantener inventario

Variables:

- x_t : Cantidad de productos a ordenar en el período t
- I_t : Nivel de inventario de productos al final del período t
- $\delta_t = 1$ si $x_t > 0$, 0 en caso contrario

Usando estos parámetros y variables, se puede formular el problema como sigue:

$$\text{Min } \sum_{t=1}^T [K\delta_t + cx_t + hI_t] \quad (20)$$

s.a

$$I_t = I_{t-1} + x_t - D_t, \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (21)$$

$$I_0 = 0 \quad (22)$$

$$I_t, x_t \geq 0, \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (23)$$

La restricción (21) es la ecuación de equilibrio de inventario, mientras que la (22) simplemente especifica el inventario inicial. El inventario también puede reescribirse como $I_t = \sum_{i=1}^t (x_i - D_i)$, por lo tanto, las variables I_t se pueden eliminar de la formulación. La restricción (23) representa la no negatividad de las variables.

Wagner y Whitin (1958) realizan la siguiente observación:

“Existe una solución óptima en la que se produce solo si el nivel de inventario precedente es cero, es decir, si se cumple que $x_t I_{t-1} = 0$, para $t = 1, \dots, T$ ” [62].

Es decir, sólo se ordena cuando el nivel de inventario del periodo actual es cero [62].

A partir del año 2000, distintos autores estudiaron generalizaciones del problema de Wagner y Whitin (1958) con opciones de retorno. Según nuestro mejor conocimiento, la primera extensión al modelo fue desarrollada por Richter y Sombrutzki (2000) [63] y suponen que la cantidad de retornos en el primer período es suficiente para satisfacer toda la demanda en el horizonte de planificación a tiempo, es decir sin faltantes. Por lo tanto, su modelo sólo es aplicable para el caso de grandes cantidades de productos usados, o sea, grandes cantidades de productos remanufacturados. El segundo modelo fue desarrollado por [64] y sí consideran la opción de producción, aunque plantean que esta alternativa no es del todo necesaria ya que asumen que el número de retornos en el primer período supera la demanda total de todo el horizonte de planificación. Pero, en el caso que la retención de beneficios sea muy costosa, producir es una opción.

En los dos estudios mencionados arriba, los autores asumieron funciones de costos separadas para la producción y para la remanufacturación. Sin embargo, no estudian el caso más general que incluya a la vez costos fijos de preparación (costos de set-up,

según especifican los autores) y sin restricciones en el número de retornos. Así como tampoco sugieren técnicas de resolución heurísticas.

Teunter et al. (2006) [16] estudian el Problema de Dimensionamiento del Lote Económico con Remanufactura (ELSR, por sus siglas en inglés), sin restricciones en el número de retornos y con costos fijos de preparación. La principal diferencia entre el ELSR y el ELSP es que la remanufactura de productos usados también puede satisfacer la demanda. En el estudio se consideran dos esquemas de costos de preparación diferentes. En el primer esquema, existe un costo de preparación conjunto para la producción y la remanufactura, cuando ambas operaciones se realizan en la misma línea de producción. En el segundo esquema, existen costos de preparación por separado tanto para la producción como para la remanufactura y se aplica cuando las líneas de producción están separadas.

Los parámetros y variables que se consideran para formular el problema son los siguientes:

Parámetros:

- R_t : Productos retornados al comienzo del período t
- K : (conjunta) Costo de preparación
- K^r : (por separado) Costo fijo de remanufacturar
- K^m : (por separado) Costo fijo de producir
- h^r : Costo unitario de mantener productos retornados
- h^s : Costo unitario de mantener productos útiles
- M : Número entero grande

Variables:

- x_t^r : Cantidad de productos remanufacturados en el período t
- x_t^m : Cantidad de productos producidos en el período t
- I_t^r : Nivel de inventario de productos retornados al final del período t
- I_t^s : Nivel de inventario de productos utilizables al final del período t
- δ_t^r (por separado): $\delta_t^r = 1$ si $x_t^r > 0$, 0 en caso contrario
- δ_t^m (por separado): $\delta_t^m = 1$ si $x_t^m > 0$, 0 en caso contrario

En el primer esquema, el problema de dimensionamiento de lotes bajo el costo de preparación conjunto para la producción y la remanufactura se puede modelar como un Problema de Programación Lineal Entera Mixta (MILP, por sus siglas en inglés) de la siguiente manera:

$$\text{Min } \sum_{t=1}^T \{K\delta_t + h^r I_t^r + h^s I_t^s\} \quad (24)$$

s.a

$$I_{t-1}^r + R_t - x_t^r = I_t^r, \forall t = 1, \dots, T \quad (25)$$

$$I_{t-1}^s + x_t^r + x_t^m - D_t = I_t^s, \forall t = 1, \dots, T \quad (26)$$

$$x_t^r + x_t^m \leq M_t \delta_t, \forall t = 1, \dots, T \quad (27)$$

$$\delta_t \in \{0,1\}, x_t^r, x_t^m, I_t^r, I_t^s \geq 0 \text{ y } M_t \delta_t, \forall t = 1, \dots, T \quad (28)$$

Las restricciones (25) y (26) aseguran el saldo del inventario de retornos y de las existencias en servicio, respectivamente. La restricción (27) realiza un seguimiento de las configuraciones. Cada vez que un lote es producido, ya sea de productos remanufacturados o producidos, se realiza una configuración, y la producción en el período t nunca excederá la demanda total en los períodos t, \dots, T .

En el segundo esquema, la formulación de MILP es similar a la del caso del costo de preparación conjunta, excepto por la separación del costo de instalación. El problema se modela como sigue:

$$\text{Min } \sum_{t=1}^T \{K^r \delta_t^r + K^m \delta_t^m + h^r I_t^r + h^s I_t^s\} \quad (29)$$

s.a

$$I_{t-1}^r + R_t - x_t^r = I_t^r, \forall t = 1, \dots, T \quad (30)$$

$$I_{t-1}^s + x_t^r + x_t^m - D_t = I_t^s, \forall t = 1, \dots, T \quad (31)$$

$$x_t^r \leq M_t \delta_t^r, \forall t = 1, \dots, T \quad (32)$$

$$x_t^m \leq M_t \delta_t^m, \forall t = 1, \dots, T \quad (33)$$

$$\delta_t^r, \delta_t^m \in \{0,1\}, x_t^r, x_t^m, I_t^r, I_t^s \geq 0 \text{ y } M_t = \sum_{i=t}^T D_i, \forall t = 1, \dots, T \quad (34)$$

Para el segundo esquema, los autores conjeturan que "el problema con los costos de preparación por separado es NP-difícil" [16]. Esto se debe al haber separado los costos de preparación. El problema con el costo de preparación conjunto resultó ser menos complejo. Sobre la base de las llamadas propiedades de inventario cero y de remanufactura, se proporcionó un algoritmo de DP polinómico.

Aunque el algoritmo creado puede determinar una solución óptima de manera eficiente, se prefieren las heurísticas en la práctica porque son más rápidas, más fáciles de codificar e implementar, y más fáciles de entender para el consumidor. Por lo tanto, los autores proponen y prueban varias heurísticas. Estas heurísticas son versiones generalizadas de las conocidas heurísticas Silver Meal (SM, por sus siglas en inglés), Least Unit Cost (LUC, por sus siglas en inglés) y Part Period Balancing (PPB, por sus siglas en inglés) y las prueban para ambos esquemas de costos de preparación. Las tres heurísticas determinan simultáneamente la producción y los tamaños de orden de remanufactura.

Tras realizar extensos experimentos numéricos, calcularon la solución óptima para una gran cantidad de ejemplos en ambos modelos y llegaron a las mismas principales

conclusiones en los dos modelos. En primer lugar, un resultado contrario a la intuición fue que un aumento en la variabilidad de la demanda suele conducir a una disminución en el costo. Esto lo explican por existir mayor oportunidad de hacer pedidos en períodos con alta demanda y poder almacenar en períodos con baja demanda. Esto demuestra que, desde el punto de vista de los costos de dimensionamiento de lotes, es más importante mejorar la previsibilidad de la demanda que reducir su variación. Un segundo resultado con una explicación similar fue que una tendencia positiva en la demanda conduce a un mayor costo. Un tercer resultado fue que una tendencia negativa en los retornos generalmente aumenta los costos y que mantener excedente de retornos conduce a costos adicionales. Esto muestra que los retornos deben coincidir lo más posible con las demandas.

En los mismos experimentos, determinaron las soluciones heurísticas y su rendimiento se midió por el error de costo, es decir, el aumento en el costo en comparación con la solución óptima. Para ambos modelos de costo, resultó que SM tiene un desempeño ligeramente mejor que LUC y mucho mejor que PPB.

Se debe observar que el problema propuesto por Teunter et al. (2006) no incluye en el modelo la opción de eliminación para los productos retornados.

El modelo asume un horizonte finito, sin embargo, los retornos que no se hayan utilizado al final del horizonte de planificación no tienen que ser eliminadas. El algoritmo se modeló así debido a problemas de previsión y no porque el problema del tamaño del lote termine. Los propios autores observan que esta configuración no es apropiada ya que, como puede ser el caso de un comercio minorista estacional, los retornos no utilizados deben ser eliminados al final del horizonte de planificación finito.

Piñeyro y Viera (2009) [12] proponen un conjunto de métodos para resolver el ELSR con opción de disposición final. En este trabajo, a diferencia del propuesto por Teunter et al. (2006), se considera un problema con menos restricciones en la forma de los costos.

El objetivo es determinar las cantidades para producir, remanufacturar y disponer finalmente en cada período durante el horizonte de planificación para satisfacer la demanda y minimizar los costos totales.

El ELSR se puede expresar de la siguiente manera:

- El horizonte de planificación es finito.
- La demanda es conocida para un solo producto en cada período.
- La cantidad de productos retornados en cada período es conocida.
- La demanda en cada período puede satisfacerse produciendo nuevos productos y/o remanufacturando en el mismo período o períodos anteriores.
- No se permiten retrasos.
- Se supone que los productos remanufacturados son de la misma calidad que los productos nuevos.

- Los productos usados pueden desecharse de forma adecuada cuando no satisfacen ciertos requisitos mínimos para la remanufacturación.
- Siempre que se fabrique, remanufacture o elimine una cantidad positiva, se incurrirá en costos.
- Se incurre en costos fijos de mantenimiento por pasar productos útiles y usados de un período al siguiente.

Para describir el problema usan la siguiente notación de parámetros y variables:

- $D_{ij} \geq 0$: Demanda acumulada entre los períodos i y j
- $R_{ij} \geq 0$: Retornos acumulados entre los períodos i y j
- $r_{ij} \geq 0$: Cantidad acumulada de productos remanufacturados entre los períodos i y j
- $d_t \geq 0$: Productos dispuestos finalmente en el período t
- $K_t^p \geq 0$: Costo fijo de producción en el período t
- $K_t^r \geq 0$: Costo fijo de remanufacturación en el período t
- $K_t^d \geq 0$: Costo fijo de disponer finalmente en el período t
- $c_t^p \geq 0$: Costo unitario de producción en el período t
- $c_t^r \geq 0$: Costo unitario de remanufacturación en el período t
- $c_t^d \geq 0$: Costo unitario de disponer finalmente en el período t
- $h_t^s \geq 0$: Costo unitario de mantener productos útiles en el período t
- $h_t^r \geq 0$: Costo unitario de mantener productos retornados en el período t
- x_t^d : Productos dispuestos finalmente en el período t
- $\delta_t^d = 1$ si $x_t^d > 0$, 0 en caso contrario

El problema de dimensionamiento de lotes descrito anteriormente se puede modelar como el siguiente problema MILP:

$$\text{Min } \sum_{t=1}^T \{K_t^p \delta_t^p + c_t^p x_t^m + K_t^r \delta_t^r + c_t^r x_t^r + K_t^d \delta_t^d + c_t^d d_t + h_t^s I_t^s + h_t^r I_t^r\} \quad (35)$$

s.a

$$I_t^s = I_{t-1}^s + x_t^m + x_t^r - D_t, \forall t = 1, \dots, T \quad (36)$$

$$I_t^r = I_{t-1}^r + R_t - x_t^r - d_t, \forall t = 1, \dots, T \quad (37)$$

$$M \delta_t^p \geq x_t^m, \forall t = 1, \dots, T \quad (38)$$

$$M \delta_t^r \geq x_t^r, \forall t = 1, \dots, T \quad (39)$$

$$M \delta_t^d \geq d_t, \forall t = 1, \dots, T \quad (40)$$

$$I_0^s = I_0^r = 0, \forall t = 1, \dots, T \quad (41)$$

$$\delta_t^p, \delta_t^r, \delta_t^d \in \{0,1\}, x_t^m, x_t^r, d_t, I_t^s, I_t^r \geq 0, \forall t = 1, \dots, T \quad (42)$$

Las restricciones (36) y (37) son las ecuaciones de equilibrio de inventario para los productos útiles y usados, respectivamente. Las restricciones (38) a (40) indican que

cuando una actividad se lleva a cabo en un período para una cantidad positiva, se establece una configuración. La restricción (41) especifica el nivel de inventario inicial en cero para los productos útiles y usados. La restricción (42) establece las variables binarias y la no negatividad de las variables enteras.

El ELSR modelado anteriormente es un problema NP-difícil. Por lo que es poco probable que se pueda desarrollar un algoritmo de tiempo efectivo para resolver el problema de manera óptima. Por lo tanto, los autores proponen y evalúan un conjunto de políticas de inventario diseñadas especialmente para el ELSR y desarrollan una metaheurística para resolver el ELSR con una solución casi óptima, basada en una Búsqueda Tabú Básica (BTS, por sus siglas en inglés) [12].

Las políticas pueden implementarse mediante procedimientos de tiempo efectivo de como máximo $O(T^2)$. Para ello, aplican el principio conocido como “divide y vencerás”, en el cual descomponen el problema en subproblemas de producción, remanufacturación y disposición final. Cada uno de estos subproblemas se resuelve por separado. Por lo tanto, definen e investigan el problema de obtener un plan de remanufacturación efectivo de manera independiente. Para ello, presentan los conceptos de Retorno Útil y Remanufacturación Útil con el objetivo de encontrar el plan de remanufacturación lo más cercano posible al costo perfecto, maximizando los retornos, minimizando todos los costos involucrados y cumpliendo simultáneamente los objetivos ecológicos y económicos.

El problema se puede modelar como un problema MILP de la siguiente manera:

$$\text{Min } \sum_{t=1}^T \{K_t^r \delta_t^r + c_t^r x_t^r + h_t^s I_t^s + h_t^r I_t^r\} \quad (43)$$

s.a

$$I_t^s = I_{t-1}^s + \pi_t + x_t^r - D_t, \forall t = 1, \dots, T \quad (44)$$

$$I_t^r = I_{t-1}^r + R_t - x_t^r, \forall t = 1, \dots, T \quad (45)$$

$$r_{1T} = R_{1T} - \Delta_{1T} \quad (46)$$

$$r_{1T} \leq R_{tT}, \forall t = 1, \dots, T \quad (47)$$

$$M\delta_t^r \geq x_t^r, \forall t = 1, \dots, T \quad (48)$$

$$I_0^s = I_0^r = 0, \forall t = 1, \dots, T \quad (49)$$

$$\delta_t^r \in \{0,1\}, \pi_t, x_t^r, I_t^s, I_t^r \geq 0, \forall t = 1, \dots, T \quad (50)$$

Las restricciones (44) y (45) son las ecuaciones de equilibrio de inventario para los productos útiles y usados, respectivamente. Las variables π_t hacen referencia a la demanda periódica que no se puede satisfacer con la remanufacturación. No hay costos asociados con esta variable, ya que solo interesa la actividad de remanufacturación. La restricción (46) establece la cantidad máxima de retornos que se puede remanufacturar de forma útil, con $\Delta_{1T} = \Delta_1 + \Delta_2 + \dots + \Delta_T$. En esta expresión, Δ_T denota el exceso de rendimientos en el período t , es decir, la parte de los rendimientos que podemos

considerar eliminar del período t al período final T , con $1 < t < T$. Podemos usar la siguiente expresión para identificar el valor de Δ_T :

$$\begin{cases} \Delta_t = \max\{(R_{tT} - D_{tT} - \Delta_{t+1}), 0\}, t = 1, \dots, T \\ \Delta_{T+1} = 0 \end{cases} \quad (51)$$

Mediante esta última expresión, se puede identificar el período más temprano para el cual cierto número de retornos no es útil. La restricción (47) representa la remanufacturación útil. Las restricciones restantes del modelo son bastante similares a las presentadas anteriormente.

El plan de remanufacturación permite determinar los planes óptimos de producción y disposición final de una manera eficaz en el tiempo. A su vez, demuestran que el problema es NP-difícil. Debido a este último resultado, proponen dos extensiones del conocido algoritmo de Wagner-Whitin con el fin de obtener una solución en un tiempo de cálculo eficiente. Se refieren a este algoritmo como el “Useful Reverse Wagner-Whitin” (URWW), o “retornos útiles de Wagner-Whitin”. La solución obtenida por el algoritmo URWW es la óptima entre todas las soluciones que satisfacen la propiedad de inventario en cero [12].

Sifaleras et al. (2015) [65] proponen dos nuevos algoritmos metaheurísticos de Búsqueda de Vecindad Variable (VNS, por sus siglas en inglés) para resolver el ELSR NP-difícil introducido por Teunter et al. (2006). Luego, comparan este método de resolución con otros propuestos en la literatura y concluyen que el método que proponen es el más eficiente hasta ese momento. En este estudio los autores también desarrollan y publican un conjunto de instancias de referencia con una gran cantidad de períodos (52 períodos).

En Piñeyro y Viera (2015) [66] también se considera la formulación del ELSR introducido por Teunter et al. (2006) para el esquema de costos de preparación separados en producción y remanufacturación. Las contribuciones del estudio son varias. En primer lugar, consideran un nuevo resultado teórico sobre la forma de las soluciones óptimas del ELSR. Luego, utilizan este resultado teórico para mejorar el procedimiento basado en la BTS propuesto por Piñeyro y Viera (2009). También, evalúan la versión original con la versión optimizada del procedimiento en un conjunto de instancias de referencias de 52 períodos desarrollado por Sifaleras et al. (2015).

La formulación del problema y las suposiciones tomadas son las mismas que las de Teunter et al. (2006). A partir de esta formulación, Piñeyro y Viera (2015) demuestran que existe una solución óptima para la cual se sostiene que para cualquier par de períodos i y j de producción positiva o remanufacturación positiva, debe haber al menos un período con un nivel de inventario cero de productos reparables. Si no fuera el caso, se puede obtener una nueva solución factible transfiriendo al menos una unidad de producción (remanufacturación) del período i al siguiente período j , reduciendo el nivel de inventario de productos útiles. La proposición que plantean es la siguiente:

“Existe una solución óptima para la cual se cumple que para cualquier par de períodos i y j , $i < j$, hay al menos un período t tal que $x_i^m I_t^s x_j^m = 0$ y $x_i^r I_t^s x_j^r = 0$ ” [66]

Los parámetros son los mismos que utilizaron Piñeyro y Viera (2009), detallados anteriormente en esta misma sección.

De esta proposición se puede establecer que para determinar una solución óptima del ELSR se puede evitar aquellas soluciones en las cuales el nivel de inventario útil es positivo en cualquier par de períodos sucesivos con producción positiva o remanufacturación positiva. Adicionalmente, sugieren un corolario de la proposición que establece que la misma es válida también en el caso de que los costos varíen con el tiempo con motivos no especulativos, incluso con costos unitarios positivos. Motivos no especulativos en los costos significa que es provechoso producir o remanufacturar lo más tarde posible.

A partir de este nuevo resultado teórico sobre la forma de las soluciones óptimas se desarrolló una mejora en el procedimiento de BTS propuesto en Piñeyro y Viera (2009) para el ELSR. El experimento numérico llevado a cabo muestra que tanto la versión original como la optimizada del procedimiento BTS superan el procedimiento basado en VNS sugerido en Sifaleras et al. (2015) [65] en más del 90% de los casos probados y en aproximadamente el décimo del tiempo de cómputo en el peor de los casos. Además, la versión mejorada supera el procedimiento BTS original de Piñeyro y Viera (2009) en 64.81% de los casos. Ambos procedimientos pueden alcanzar una solución óptima para algunas de las instancias.

Piñeyro y Viera (2015) concluyen que sería de interés para futuras investigaciones evaluar estos procedimientos en un conjunto de instancias de referencias con una menor cantidad de períodos, ya que 52 períodos parecen ser poco realistas en la práctica bajo supuestos deterministas.

3.3.3.2. Modelos estocásticos

Los modelos de inventario estocásticos están diseñados para analizar sistemas de inventarios asumiendo la incertidumbre sobre los valores de demandas y los retornos. Estos se pueden clasificar en modelos de revisión periódica y modelos de revisión continua [44] [1].

Un modelo de revisión continua consiste en que los niveles del inventario son comprobados continuamente y cuando la posición del inventario disminuye hasta un nivel predeterminado, o punto de reorden, se pide una cantidad fija. Debido a que la cantidad de la orden es fija, el tiempo entre los pedidos varía de acuerdo con la naturaleza aleatoria de la demanda [67].

Un sistema de revisión periódica es aquel en el que la posición del inventario se revisa con base en intervalos fijos. Cuando se ejecuta una revisión, la posición del inventario

se pide en función de un inventario fijado como meta. El nivel fijado como meta se establece para cubrir la demanda hasta la siguiente revisión periódica más el tiempo de espera para la entrega. La cantidad de la orden depende de la cuantía que sea necesaria para volver a colocar la posición del inventario en su nivel fijado como [67].

La elección entre los modelos de revisión continua y periódica no es sencilla y puede dictarse por las prácticas de la administración o la economía. No obstante, existen algunas condiciones en las cuales puede preferirse uno de estos sistemas. Se suele preferir el sistema de revisión periódica frente al de revisión continua cuando un fabricante debe colocar órdenes a intervalos específicos; cuando se pide a un mismo proveedor varios productos y se entregan en el mismo momento, en este caso, el proveedor prefiere consolidar los productos en un solo pedido; o cuando los productos son poco costosos y no es necesario un control riguroso del nivel de inventario [67].

En resumen, el sistema de revisión periódica proporciona la ventaja de un reabastecimiento programado y de una menor cantidad de datos, aunque, requiere de un inventario de seguridad más grande que el sistema de revisión continua [67].

Debido a las características especiales de la remanufacturación, la cantidad y la calidad de los retornos es incierta, lo cual limita la efectividad de los métodos tradicionales de planificación y control en las empresas. La adquisición de productos usados es fundamental para el éxito de los programas de remanufacturación, por lo tanto, a pesar de que los retornos de los productos usados en cada período son aleatorios, las empresas pueden realizar un esfuerzo para controlarlos mediante la implementación de estrategias óptimas de producción, remanufacturación, adquisición de productos y fijación de precios [4]. Los esfuerzos generalmente consisten en brindar sistemas de depósito, créditos para un nuevo producto, o incentivos económicos. Algunos ejemplos prácticos de esto se presentaron en la Sección 2.6.

A continuación, se presenta un estudio estocástico de revisión periódica el cual busca políticas óptimas basadas en la minimización de los costos sobre un horizonte de planificación finito con N períodos [44]. Zhou y Yu (2011) [4] desarrollaron un sistema de inventario para una empresa de un solo producto, de revisión periódica, con una demanda de los consumidores que depende del precio. La empresa comercializa un producto que puede ser producido, pedido o remanufacturado a partir de productos retornados. El retorno de los productos es aleatorio en cada período, pero la empresa puede controlarlo activamente a través del esfuerzo de adquisición, cuanto mayor es el nivel de esfuerzo, más retornos puede recibir, pero también más costoso es.

Simpson (1978) [68] estudió un problema de inventario con un solo tipo de retorno, en donde supone que los plazos de producción y remanufacturación son cero y muestra que la política óptima está determinada por parámetros independientes del estado. La novedad del problema de Zhou y Yu (2011) con respecto al de Simpson (1978) es que incorporan dos decisiones adicionales para el sistema de inventario con remanufacturación: la adquisición de productos usados y el precio de venta.

El modelo de Zhou y Yu (2011) supone que los consumidores no distinguen entre un producto nuevo y uno remanufacturado. Por lo tanto, las empresas cobran el mismo precio por el producto, independientemente de si es nuevo o remanufacturado. La demanda del cliente es solo para productos que pueden ser producidos a partir de materias primas, o remanufacturados a partir de productos usados, es aleatoria y depende del precio de venta. También suponen que el costo de producción unitario es mayor que el costo de remanufactura del producto retornado; que cuesta mantener una unidad de producto retornado por período en el inventario; y que los núcleos se pueden desechar sin costo alguno. El inventario de productos al final de cada período incurre en un costo de mantenimiento, así como también la demanda insatisfecha acumulada.

Al comienzo de cada período, la empresa revisa el nivel del inventario de los productos nuevos y productos retornados. Luego, toma la decisión de remanufactura, producción o eliminación de productos retornados. El siguiente paso es el esfuerzo de la empresa por adquirir productos usados y establecer el precio de venta de los productos nuevos. Si la estrategia de la empresa es establecer un precio de venta exógeno para los productos, es decir la situación en la que el precio de venta del producto ha sido determinado por la competencia o el mercado está altamente regulado y la empresa toma precios sin flexibilidad, la política óptima de producción-remanufactura-eliminación es simple y se caracteriza por tres parámetros independientes del estado. Estos son: producir hasta el nivel máximo después de remanufacturar todos los productos retornados disponibles, remanufacturar hasta el nivel máximo y eliminar lo mínimo posible. El esfuerzo de adquisición óptimo disminuye con el aumento del nivel de inventario de productos nuevos y retornados.

Sin embargo, cuando el precio es una decisión endógena, encuentran que la política óptima se vuelve mucho más complicada, y sus parámetros dependen del estado. El precio de venta óptimo disminuye mientras que el esfuerzo de adquisición óptimo aumenta en el nivel de inventario de productos útiles.

3.4. Diseño y planificación de la red de la cadena de suministro para sistemas con opciones de retorno

El Diseño de Red de la Cadena de Suministro (SCND, por sus siglas en inglés) determina la configuración física y la infraestructura de la cadena de suministro. El SCND es una decisión estratégica muy importante en las organizaciones ya que son decisiones a largo plazo. Los problemas clásicos de SCND incluyen solamente los flujos hacia adelante, es decir, de las fábricas a los consumidores e involucran decisiones relacionadas con la ubicación y capacidad de todas las instalaciones. En la planificación de la red las variables de decisión más importantes son las cantidades de flujos entre las instalaciones de la red y son decisiones a mediano plazo. Algunos estudios

consideran las etapas de diseño y planificación simultáneamente, mientras que otros se concentran en uno de ellos en profundidad [69].

Hoy en día, muchas empresas tienen que gestionar flujos inversos que se mueven en el sentido opuesto al de los flujos tradicionales. Los retornos de consumidores pueden ser dirigidos de diferentes maneras dependiendo de su calidad y la posibilidad de reutilizarlos. El diseño se complejiza cuando se considera el flujo inverso [43].

El canal de distribución inverso debe incluir funciones como: recolección, inspección, clasificación, transporte, procesamiento. La red de distribución se debe diseñar para determinar ubicaciones convenientes para todas estas funciones. Un problema importante es la ubicación de las instalaciones en donde se realiza la clasificación y la inspección de los productos retornados. La inspección temprana en la cadena de suministro puede ahorrar costos en el transporte de productos irrecuperables. Por otro lado, las inspecciones sofisticadas que involucran equipos costosos solo podrían ofrecerse en algunas instalaciones [44]. Generalmente el manejo de flujos de retorno desde las zonas de los consumidores a las instalaciones de remanufacturación involucra el establecimiento y operación de Centros de Retornos (RC, por sus siglas en inglés). Estos RCs pueden estar ubicados en conjunto con los Centros de Distribución (DC, por sus siglas en inglés) o no. El concepto de RC, se puede ver como el espejo de un DC, pero en la red hacia atrás, es decir, centros que reciben los productos retornados provenientes de los consumidores [43].

La inclusión de flujos inversos en el SCND condujo al desarrollo de dos tipos de problemas: problemas de diseño de redes de RL y problemas de Cadena de Suministro de Circuito Cerrado (CLSC, por sus siglas en inglés). Los primeros apuntan a ubicar instalaciones inversas como RCs, considerando que las ubicaciones de instalaciones del flujo directo ya están establecidas. Los problemas de CLSC consideran los flujos directos e inversos en una misma red y deciden las ubicaciones de las instalaciones de distribución y de retornos de forma integral [43]. A continuación, se presenta un estudio de modelos de diseño de redes RL y luego de CLSC.

3.4.1. Diseño de la red de logística inversa

Liao (2018) [70] realiza un estudio donde diseña una red de RL y desarrolla un modelo de Programación Entera Mixta No Lineal (MINLP, por sus siglas en inglés) para resolver el diseño de redes estratégicas de RL. Este es un modelo de RL de múltiples niveles para definir la ubicación y la cantidad de instalaciones, y la asignación de productos y módulos retornados. Maximiza el beneficio total al manejar productos retornados para reparación, remanufacturación, reciclaje, reúso o incineración/eliminación.

La cantidad de productos remanufacturados depende de los módulos críticos y más valiosos, y los procesos de remanufactura modularizados hacen que la recuperación del producto sea más eficiente y rentable. Este modelo MINLP implica un procedimiento iterativo para la selección de ubicación e instalación que requiere un procedimiento de optimización computarizado, se conoce como un problema NP-difícil.

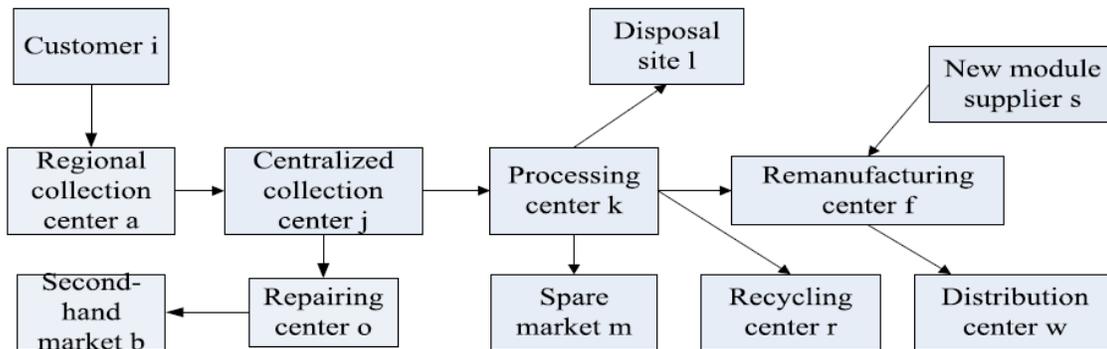


Figura 3.4.1.1. Diseño propuesto de la red de RL [70].

Como se muestra en la Figura 3.4.1.1. este es el diseño propuesto de la red de RL de múltiples niveles con sus correspondientes segmentos en cada capa.

Para la realización del modelo se realizaron algunas suposiciones:

1. Los centros regionales de recolección están instalados cerca de los consumidores.
2. Hay múltiples fuentes a través de todas las capas de red.
3. Las ubicaciones potenciales de los centros de todas las capas de la red están predefinidas
4. El flujo entre los niveles de la red está relacionado con los porcentajes máximos de los tipos de recuperación de productos. Los productos retornados pueden repararse o desmontarse en módulos.
5. Los módulos se pueden reutilizar de diferentes maneras, como la restauración para vender en los mercados de repuestos, el reciclaje para diversos fines o la remanufactura de productos mediante la composición de módulos.
6. El número de productos remanufacturados depende de qué módulos críticos están disponibles y qué módulos se comprarán nuevos a proveedores según sea necesario.
7. Se conocen la demanda de productos reparados y remanufacturados.
8. Las capacidades de las instalaciones de todos los centros son limitadas y conocidas.

Se propone un GA híbrido para resolver el problema. El modelo diseñado se valida y prueba utilizando un ejemplo real de reciclado de desechos a granel en la ciudad de Taoyuan, Taiwán. Además, se realizan análisis de sensibilidad sobre diversos parámetros para presentar las capacidades del modelo propuesto. El análisis y

comparación posterior muestra que el modelo propuesto funciona mejor que las operaciones logísticas inversas actuales.

El estudio tuvo varias contribuciones importantes en el diseño de redes logísticas inversas. En primer lugar, proporciona un diseño de red de RL bien estructurado. En segundo lugar, proporciona una recuperación de productos eficiente y rentable con procesos de remanufacturación modularizados y brindando la posibilidad de reducir las emisiones. Asimismo, el GA híbrido propuesto demostró ser eficiente y efectivo al resolver el complejo problema planteado.

Al identificar las actividades críticas y los requisitos involucrados en las operaciones de RL, el modelo puede determinar la optimización de las ubicaciones de las instalaciones, su estado de funcionamiento (abierto o cerrado), la utilización de la capacidad, y el flujo óptimo de productos retornados y módulos desmontados en la red inversa.

Generalmente, la demanda tiene un impacto importante en la operación de RL. Cuanto mayor sea la demanda de productos reparados, mayores serán los ingresos de las actividades inversas, aunque también depende de la cantidad de productos retornados reparables. La cantidad de productos que se pueden remanufacturar depende de las cantidades disponibles de los tipos de módulos críticos y más valiosos. Por esto, los procesos de remanufacturación modularizados hacen que la recuperación del producto sea más eficiente y rentable. Además, los resultados muestran que existe una combinación óptima de instalaciones abiertas en la red de RL en la que se puede lograr el máximo ahorro de costos. Con la configuración adecuada de los parámetros, el modelo puede servir como una herramienta valiosa para la toma de decisiones estratégicas en la RL.

Una carencia del modelo es no considerar la incertidumbre de la demanda y de los retornos. Por otra parte, se podría estimar una proporción más precisa de productos y módulos enviados para reparación y remanufacturación.

En Li et al. (2018) [3] se propone una red RL de múltiples niveles para una recuperación de productos rentable. Para capturar las condiciones del mundo real en una implementación eficiente del sistema de RL propuesto, formularon un modelo de programación no lineal de entero borroso en un entorno incierto y usaron la teoría de conjuntos borrosos para obtener los resultados del modelo. El objetivo del modelado matemático es favorecer el establecimiento del sistema propuesto maximizando los beneficios incurridos en la red a través de la recuperación del producto. El modelo está validado por un caso de empresa que pertenece a la producción de aparatos electrónicos. Para aumentar la aplicabilidad del proceso de recuperación de productos en la industria, propusieron un proceso de recuperación para el horizonte de planificación que consta de múltiples períodos y múltiples productos. Los resultados del modelo propuesto indican que, para la realización exitosa de dicha red, los consumidores deben ser legalmente forzados a retornar los productos usados al finalizar su vida útil en los canales establecidos para la recuperación de valor.

En la red propuesta, los productos retornados son recolectados en los Puntos de Recolección Inicial (ICP, por sus siglas en inglés). Las ubicaciones potenciales de los ICP pueden ser tiendas minoristas, centros de servicio privados o de propiedad de la empresa que se encuentran cerca de los consumidores. Los ICPs incurrirán en costos fijos de alquiler para el espacio designado para retornables "sin venta", y habrá costos variables por mantener inventario. Los productos retornados en el ICP deberían transportarse rápidamente a Centros de Recolección Centralizados (CRC, por sus siglas en inglés). La idea de establecer ICPs cerca de los consumidores erradica en cierta medida la incertidumbre. Asimismo, se utilizan números triangulares borrosos para representar la cantidad y calidad de los productos retornados.

Los productos que se alquilan por un cierto período y se intercambian bajo diversos esquemas entran dentro de la categoría de productos reparables; se envían al centro de reacondicionamiento (RFC, por su abreviatura en inglés) donde se reacondicionan a buenas condiciones. La recuperación de valor de los productos restantes en CRCs se puede adquirir después de desmontarlos. Por lo tanto, los productos restantes deben ser transportados a un Centro de Desmontaje (DMC, por su abreviatura en inglés). Los componentes obtenidos después de desmontados pueden estar en buen estado de funcionamiento y se pueden usar para satisfacer la demanda de componentes en el mercado de repuesto. El mercado de repuesto utiliza estos componentes en servicio o son utilizados por la casa de producción en el proceso de producción. Otros componentes se reciclan para recuperar el valor del material. Por lo tanto, los componentes de DMC se envían al Centro de Reacondicionamiento (RFC) o al Centro de Reciclaje (RCC, por su abreviatura en inglés). En el RFC, los componentes se reacondicionan y canibalizan para ser utilizados por el mercado secundario y la casa de producción de la compañía. La canibalización de componentes es el proceso en el cual un número limitado de componentes es extraído de un producto y usado para la recuperación de otra unidad del mismo producto [9]. En el RCC, el material es extraído durante el reciclaje y se vende al proveedor de materia prima.

La Figura 3.4.1.2. representa un diagrama esquemático de la red de RL propuesta. La red de múltiples niveles propuesta consiste en consumidores, ICPs, CRCs, DMCs, RFCs y RCCs. Otras instalaciones en la Figura 3.4.1.2. son el mercado secundario, la casa de producción y el proveedor de materia prima, los cuales comprenden la red de recuperación de valor.

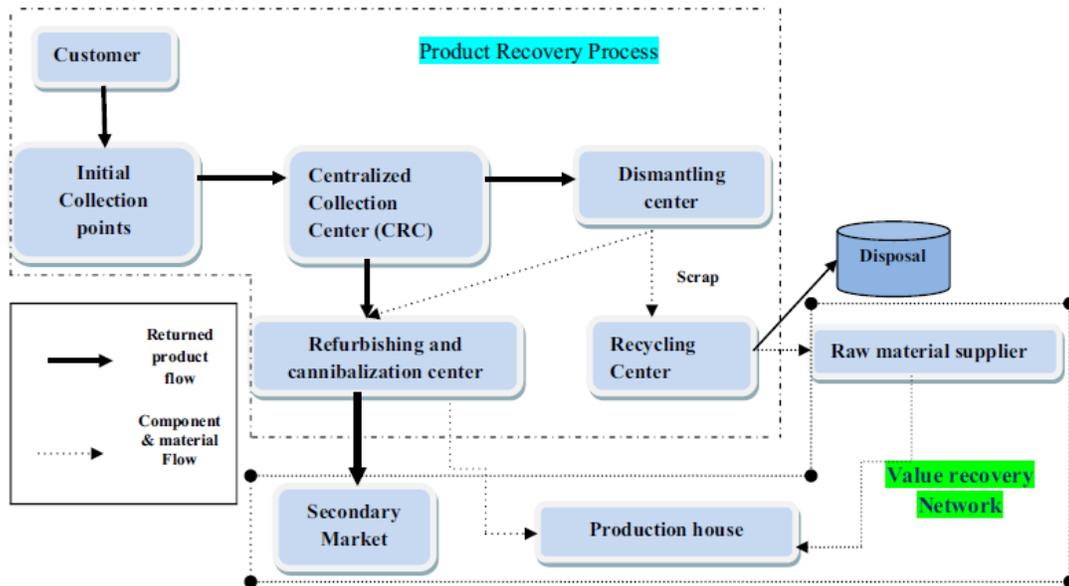


Figura 3.4.1.2. Diseño de la red de RL propuesta [3].

La implementación efectiva de la red RL propuesta significa que el responsable de la toma de decisiones debe determinar el número de instalaciones que se abrirán, su ubicación, la asignación de la cantidad de productos y material en la red, con el objetivo general de maximizar las ganancias. Para postular el problema anterior, se formula un modelo matemático no lineal de entero borroso.

El objetivo de diseñar una red RL es maximizar la ganancia total generada en presencia de incertidumbre para el horizonte de planificación. La ganancia se obtiene al restar el costo total asumido por la empresa durante la ejecución de la red RL de los ingresos generados por el uso de la producción del proceso de recuperación. Las fuentes de ingresos en la red propuesta son el mercado secundario (donde se produce la demanda de productos reparados y componentes de repuesto) y el contrato con la casa de producción y los proveedores de materias primas para reutilizar los componentes reacondicionados y el material reciclado.

La presente investigación contribuye a la literatura mediante el desarrollo de un diseño eficiente de la red de recolección en un entorno incierto para el establecimiento de una recuperación costo efectiva de los productos retornados. El estudio en lugar de estar enfocado en la remanufacturación enfatiza la reutilización de productos y componentes después de la canibalización y reacondicionamiento, ya que considera que la remanufacturación es una tarea costosa que requiere de mucho tiempo y estrictos controles de calidad en cada etapa de producción.

La novedad del artículo radica en diferenciar el proceso de recuperación de producto de la red de recuperación de valor de RL, desarrollando un modelo de programación no lineal de entero borroso para maximizar el beneficio económico. El estudio está limitado sólo a aquellos productos recolectados desde las zonas del consumidor final. El mismo no aborda la integración de un canal de retorno para productos no vendidos, eliminados

de los estantes debido a su obsolescencia. La integración de tales productos no afectaría significativamente el diseño de la red, pero podría disminuir significativamente el beneficio. Por otro lado, una mayor extensión del modelo sería integrar la logística hacia adelante en el mismo.

3.4.2. Diseño de la red de la cadena de suministro de circuito cerrado

Fleischmann et al. (2001) [71] comparan los enfoques secuenciales e integrados para las decisiones de diseño de red de CLSC y analiza dos ejemplos hipotéticos inspirados en casos industriales reales. Los autores concluyen que los flujos inversos tienen un impacto significativo en la estructura general de la red solo cuando los canales directo e inverso difieren de una manera considerable con respecto a la distribución geográfica o la estructura de costos. Por otra parte, señalan que los volúmenes de retornos constituyen un factor clave en las decisiones de diseño.

Easwaran y Üster (2010) [72] consideran el diseño de la red de CLSC y multiproducto con instalaciones híbridas de producción/remanufacturación y centros híbridos de distribución/retorno. Su objetivo es determinar la ubicación de los RCs y las instalaciones de remanufacturación junto con los flujos directos e inversos, de modo que se reduzca al mínimo la suma de los costos de procesamiento, transporte y ubicación de las instalaciones. Se utiliza MILP para determinar la solución óptima que caracteriza las ubicaciones de las instalaciones junto con los flujos integrados hacia adelante y hacia atrás. Al considerar centros híbridos de distribución/retorno en el caso que se quiera ubicar en conjunto un RC con una fábrica que remanufacturación también se tiene que ubicar el DC en el mismo lugar. Este supuesto puede considerarse bastante restrictivo [43].

Tomboş et al. (2017) [43] presentaron un modelo integrado para configurar un sistema de distribución con flujo inverso a fin de minimizar el costo total de satisfacer la demanda del consumidor y remanufacturar los productos retornados recuperables. El enfoque principal de este trabajo es la investigación de las propiedades estructurales de la red, como la co-ubicación de RCs con instalaciones de remanufacturación y la cuantificación de los beneficios de modelar los flujos directo e inverso simultáneamente en lugar de secuencialmente.

Dado un conjunto de fábricas existentes (con capacidad de remanufactura) y zonas de consumidores (con cantidades de demanda y retorno para un solo producto), el modelo básico identifica el número óptimo y la ubicación de los DCs y RCs. La cantidad de productos producidos y remanufacturados debe ser suficiente para satisfacer la demanda y la capacidad total de remanufacturación debe ser suficiente para procesar todos los retornos.

Usando el conjunto de índice i para las fábricas, j para los DCs y RCs, y k para las zonas de consumidores, se definen las variables de decisión:

- $Y_j = \begin{cases} 1 & \text{si un DC está ubicado en el lugar } j \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{cases}$
- $T_j = \begin{cases} 1 & \text{si un RC está ubicado en el lugar } j \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{cases}$
- X_{jk} : Cantidad anual transportada desde el DC j a la zona del consumidor k
- W_{kj} : Cantidad anual transportada desde la zona del consumidor k al RC j
- U_{ij} : Cantidad anual transportada desde la fábrica i al DC j
- V_{ji} : Cantidad anual transportada desde el RC j a la fábrica i

A continuación, se listan los parámetros, que también están detallados en la Figura 3.4.2.1.

- f_j : Costo fijo de abrir un DC en el lugar j (anualizado)
- g_j : Costo fijo de abrir un RC en el lugar j (anualizado)
- c_{ij} : Costo de transportar una unidad de la fábrica i al DC j
- e_{jk} : Costo de transportar una unidad del DC j a la zona del consumidor k
- c'_{ji} : Costo de transportar una unidad del RC j a la fábrica i
- e'_{kj} : Costo de transportar una unidad de la zona del consumidor k al RC j
- d_k : Demanda anual en la zona del consumidor k
- r_k : Retornos anuales en la zona del consumidor k
- α : Ratio de recuperación (fracción de retornos remanufacturables)
- s_i : Capacidad de producción de la planta i
- a_i : Capacidad de remanufactura de la planta i

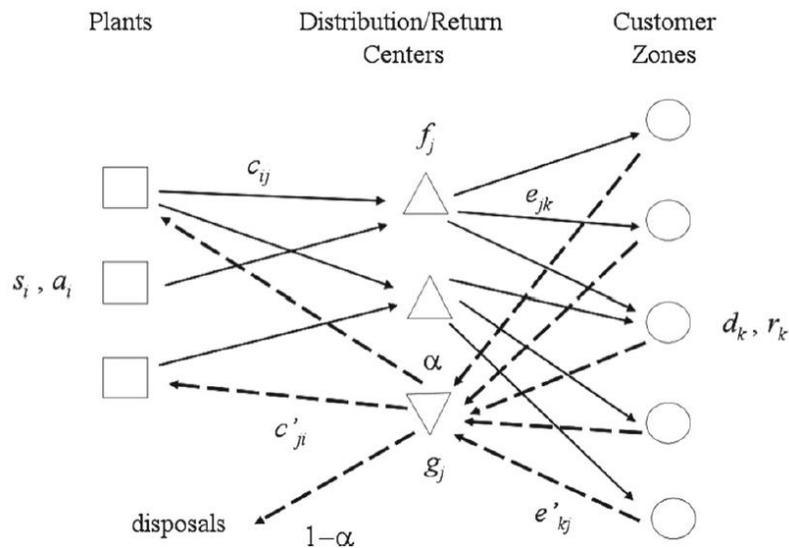


Figura 3.4.2.1 El modelo de red de CLSC y sus parámetros [43]

El problema se puede formular como un problema de MILP:

$$Z_p = \min \sum_j f_j Y_j + \sum_j g_j T_j + \sum_i \sum_j c_{ij} U_{ij} + \sum_j \sum_k e_{jk} X_{jk} + \sum_j \sum_i c'_{ji} V_{ji} + \sum_k \sum_j e'_{kj} W_{kj} \quad (52)$$

s.a

$$\sum_j X_{jk} = d_k \quad \forall k \quad (53)$$

$$\sum_j W_{kj} = r_k \quad \forall k \quad (54)$$

$$\sum_k X_{jk} = \sum_i U_{ij} \quad \forall j \quad (55)$$

$$\alpha \sum_k W_{kj} = \sum_i V_{ji} \quad \forall j \quad (56)$$

$$\sum_j U_{ij} - \sum_j V_{ji} \leq s_i \quad \forall i \quad (57)$$

$$\sum_j V_{ji} \leq \sum_j U_{ij} \quad \forall i \quad (58)$$

$$\sum_j V_{ji} \leq a_i \quad \forall i \quad (59)$$

$$X_{jk} \leq d_k Y_j \quad \forall j, k \quad (60)$$

$$W_{kj} \leq r_k T_j \quad \forall j, k \quad (61)$$

$$X_{jk}, W_{kj}, U_{ij}, V_{ji} \quad \forall i, j, k \quad (62)$$

$$Y_j, T_j \in \{0,1\} \quad \forall j \quad (63)$$

La función objetivo (52) incluye los costos de transporte del flujo directo y del flujo inverso y los costos fijos de abrir DCs y RCs. La restricción (53) asegura que la demanda de todos los consumidores sea satisfecha, mientras que la restricción (54) impone que todos los retornos sean recolectados. Las restricciones (55) y (56) son las ecuaciones de conservación del flujo para los DCs y RCs respectivamente. El ratio de recuperación no varía con la ubicación del RC. En consecuencia, la cantidad total desechada está predeterminada y asumiendo que los costos de disposición final son iguales en todos los RCs se dejan fuera del modelo. La restricción (57) asegura que la cantidad producida está limitada por la capacidad de producción, mientras que la restricción (59) asegura que la capacidad de remanufacturación no se excede en cada fábrica. La restricción (58) impide la acumulación de inventario de bienes remanufacturados en las fábricas. Las restricciones (60) y (61) garantizan que los consumidores estén asignados solamente a DCs y RCs abiertos, respectivamente. Las restricciones (62) y (63) son la no negatividad de las variables y las variables binarias del problema, respectivamente.

Es importante notar que el modelo permite ubicar conjuntamente un DC y un RC en el mismo lugar j , pero no hay un beneficio de costos asociado a la co-ubicación.

Se propone una heurística lagrangiana para resolver el modelo de diseño de red de la CLSC y se descompone en cuatro subproblemas, cada subproblema representa el flujo entre dos niveles consecutivos en la red directa o inversa.

Los experimentos computacionales realizados muestran que el procedimiento de relajación lagrangiana propuesto es eficiente para resolver problemas de tamaño considerable que encuentran los gerentes.

Se demuestran los beneficios del diseño integral de la función logística comparando los costos del mismo con los del diseño secuencial. Al comparar este enfoque integrado con el enfoque secuencial, descubrimos que las ventajas de costo de los primeros pueden alcanzar el 10 por ciento. La diferencia de costos se debe principalmente a la configuración de la red hacia adelante. Esto sugiere que la habilidad del flujo directo de adaptarse a la presencia del flujo inverso es la principal ventaja del enfoque de diseño integral. En el caso que la organización ya tenga establecida la red hacia adelante, la solución integrada puede servir como configuración objetivo a la cual converger a largo plazo.

Por otra parte, el nivel de utilización de la capacidad de remanufacturación resulta ser un factor determinante de los beneficios potenciales que se pueden lograr a través del enfoque integrado. Esto se relaciona con la capacidad de la organización para transportar los productos retornados recuperables a las fábricas con conexiones de distribución más baratas. Para valores altos del ratio de retornos, la diferencia de costos entre ambos enfoques se minimiza. El modelo integrado es más beneficioso para valores medios del ratio de retornos. También se observa que las empresas se pueden beneficiar conduciendo las operaciones de inspección y separación en las fábricas cuando la calidad de los retornos en la zona de los consumidores aumenta.

4. Conclusiones

En el presente estado del arte se buscó acercar al lector en la temática de recuperación de productos usados con foco en la remanufacturación, ya que varios autores basan sus investigaciones en esta. Se realizó un abordaje de cómo surgió la problemática ambiental de recuperación, por qué es importante y cuáles son sus características. Se introdujeron los conceptos de CE, RL y las distintas formas de recuperación de productos usados; el contexto normativo ambiental y la situación actual en Uruguay. Asimismo, se exhibió la problemática ambiental de los residuos focalizándose en los aparatos eléctricos y electrónicos, los neumáticos y los plásticos. También se trataron estudios relevados sobre planificación de la producción, diseño y planificación de la red de la cadena de suministro para sistemas con opciones de retorno y modelo de costos para la remanufacturación.

De la literatura relevada se infiere que existe una tendencia creciente en la cantidad de estudios que se realizaron en torno a recuperación de productos usados. Este fenómeno se debe a la creciente concientización ambiental de los impactos negativos que resultan de la generación masiva de residuos, consecuencia del sistema tradicional de producción.

Uruguay también muestra un interés creciente en la temática de recuperación, aunque la forma de recuperación que predomina ampliamente en la industria nacional es el reciclaje. Una gran cantidad de los productos comercializados en Uruguay son importados, lo cual dificulta la aplicación de formas de recuperación más beneficiosas, un ejemplo es el caso de los aparatos eléctricos y electrónicos. A su vez, diseñar un producto con miras en la remanufacturación muchas veces implica el rediseño total del proceso de producción y un cambio de paradigma en la organización. Es por esto que la remanufacturación en Uruguay no es aún una práctica común.

Por otra parte, es importante destacar los esfuerzos crecientes en el ámbito regulatorio nacional. Pese a que aumentó la cantidad de leyes, decretos y ordenanzas en aspectos ambientales, se dificulta la adopción de algunos de estos por falta de fiscalización y control. Sería deseable para el desarrollo de la industria manufacturera que la normativa ambiental incentive la adopción de otras formas de recuperación y que a su vez represente una oportunidad de rentabilidad económica para los OEMs en Uruguay. Como fue el caso del decreto 358/2015 que fue promulgado para reglamentar la gestión ambientalmente adecuada de los NCFU e impulsó nuevas formas de recuperación de estos productos.

Mundialmente, los OEMs son un pilar importante en el desarrollo de la industria de recuperación de productos usados y especialmente en el caso de la remanufacturación. La incorporación de actividades de remanufacturación por parte de los OEMs impulsaría la economía de escala, aumentaría el volumen de productos remanufacturados y contribuiría al progreso global de la remanufacturación. Asimismo, la no adhesión de los OEMs pondría en peligro el éxito de posibles prácticas de

remanufacturación por los IRs, ya que los primeros podrían diseñar sus productos de forma de evitar que sean remanufacturables y así impedir la retención de valor por parte de los IRs.

El rápido avance tecnológico, las estrategias competitivas y el consumo masivo de la sociedad capitalista exige a los OEMs a modernizar constantemente sus productos. El cambio constante genera un aumento de la cantidad de residuos. En el caso de los aparatos eléctricos y electrónicos como los celulares, el cambio de tecnología y moda hace muy difícil la aplicación de prácticas de remanufacturación, ya que los cambios en la forma y tamaños de los componentes dificultan su reutilización.

El compromiso de los fabricantes mundiales con la EPR tiene como objetivo alentarlos a lograr un mayor valor de utilización de los procesos de recuperación de productos. Es por esto y debido al alto costo de la disposición final, que existe una preocupación por parte de los fabricantes para mejorar la gestión de recuperación de productos usados. El diseño y desarrollo de sistemas de RL conlleva una importante carga de incertidumbre en cuanto al tiempo, cantidad y calidad de los retornos. Al mismo tiempo, implica la necesidad de coordinación entre el reaprovisionamiento de productos usados y el modo regular de adquisición de materiales. En consecuencia, resulta necesario profundizar en el diseño de modelos cuantitativos para la ECMPRO que ayuden a despejar estas incógnitas.

De lo relevado se encontró un modelo de costos el cual tiene como objetivo evaluar el beneficio económico del proceso de remanufacturación [48]. El modelo estudiado no tiene en cuenta una estimación de costos de todo el sistema de remanufacturación, es decir, incluyendo los costos de logística inversa, inventario, etc. Por lo tanto, para apoyar la toma de decisiones sobre la estrategia de final de la vida útil a alto nivel se debe tener en cuenta este vacío.

Los modelos de planificación de la producción en sistema con opciones de retorno propuestos en la literatura se pueden clasificar en determinísticos y estocásticos, estos difieren con respecto a las suposiciones tomadas sobre la demanda y los retornos. El objetivo es identificar una solución de recuperación óptima para equilibrar los beneficios económicos y/o el ahorro energético y/o los impactos ambientales.

En relación al diseño de la red de la cadena de suministro en la literatura se evidencia los beneficios económicos de considerar el enfoque integrado en lugar del enfoque secuencial. Sin embargo, muchas organizaciones ya tienen implantado sus instalaciones de logística hacia adelante, por lo que el diseño de la CLSC podría servir como un posible escenario futuro óptimo al cual la red debería converger a largo plazo.

La utilización de modelos cuantitativos es una forma de respaldar la toma de decisiones y lograr los objetivos propuestos por las organizaciones y parece ser un buen método para amortiguar la incertidumbre asociada a la RL. Sin embargo, no deberían constituirse por sí solos y ser el único criterio a tener en cuenta por las mismas.

Referencias

- [1] M. A. Ilgin y S. M. Gupta, 2010, Environmentally conscious manufacturing and product recovery (ECMPRO): A review of the state of the art, *Journal of Environmental Management*, 91(3), 563-568.
- [2] M. L. Bentaha, O. Battaia, A. Dolgui y S. J. Hu, 2014, Dealing with uncertainty in disassembly line design, *CIRP Annals*, 63(1), 21-24.
- [3] Y. Li, D. Kannan, P. C. Jha, G. Kiran, J. Darbari y N. Agarwal, 2018, Design of a multi echelon product recovery embeded reverse logistics network for multi products and multi periods, *Annals of Operations Research*, en impresión, 1-22.
- [4] S. Zhou y Y. Yu, 2011, Optimal product acquisition, pricing, and inventory management for systems with remanufacturing, *Operations Research*, 59(2), 514-521.
- [5] J. Heydari, K. Govindan y A. Jafari, 2017, Reverse and closed loop supply chain coordination by considering government role, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 52(1), 379-398.
- [6] A. Gungor y S. M. Gupta, 1999, Issues in environmentally conscious manufacturing and product recovery: a survey, *Computers & Industrial Engineering*, 36(1), 811-853.
- [7] M. A. Ilgin, S. M. Gupta y O. Battaia, 2015, Use of MCDM techniques in environmentally conscious manufacturing and product recovery: State of the art, *Journal of Manufacturing Systems*, 37(1), 746-758.
- [8] A sense of urgency and opportunity, 11 Abril 2018, *ReMaTec*. Disponible en: <https://www.rematec.com/news/news-articles/a-sense-of-urgency-and-opportunity/>. Último acceso: 26 Julio 2018.
- [9] M. Lindahl, E. Sundin, J. Östlin y M. Björjman, 2006, Concepts and definitions for product recovery: analysis and clarification of the terminology used in academia and industry, in *Innovation in Life Cycle Engineering and Sustainable Development*, The Netherlands, ISBN: 978-1-4020-4601-8, 123-138.

- [10] J. Korhonen, A. Honkasalo y J. Seppälä, Circular Economy: The Concept and its Limitations, *Ecological Economics*, 143(1), 37-46, 2017.
- [11] W. R. Stahel, 2016, The Circular Economy, *Nature*, 531(1), 6-9.
- [12] P. Piñeyro y O. Viera, 2009, Inventory policies for the economic lot-sizing problem with remanufacturing and final disposal options, *Journal of Industrial and Management Optimization*, 5(1), 217-238.
- [13] The technical value recovery cycles of the circular economy, *Reman*. Disponible en: <http://www.remanufacturing.fr/en/pages/basics-remanufacturing.html>.
- [14] G. A. Keoleian y D. Menery, 1993, Life Cycle Design Guidance Manual - Environmental Requirements and The Product System, Office of Research and Development, *United States Environmental Protection Agency*.
- [15] W. Ijomah, 2002, A model-based definition of the generic remanufacturing business process, *PhD Tesis, Universidad de Plymouth*, 136-137.
- [16] R. H. Teunter, Z. P. Bayindir y W. Van Den Heuvel, 2006, Dynamic lot sizing with product returns and remanufacturing, *International Journal of Science and Research*, 44(20), 4377-4400.
- [17] T. G. Gutowski, S. Sahni, A. Boustani y S. C. Graves, 2011, Remanufacturing and energy savings, *Environmental Science & Technology*, 45(1), 4540-4547.
- [18] A. Priyono, 29 Setiembre 2017, Identifying Unique Characteristics of Disassembly for Various Products, *MATEC Web of Conference*. Disponible en: https://www.matec-conferences.org/articles/matecconf/pdf/2017/38/matecconf_ictte2017_08001.pdf. Último acceso: 12 Agosto 2018.
- [19] Gobierno envió al Parlamento el proyecto de ley sobre gestión integral de residuos, 06 Junio 2018, *Presidencia*. Disponible en: <https://www.presidencia.gub.uy/comunicacion/comunicacionnoticias/proyecto-+ley-gestion-residuos-parlamento-analisis-ejecutivo>. Último acceso: 07 Setiembre 2018.
- [20] The rise of the Circular Economy - BS 8001, 2017, *BSIGroup*. Disponible en: <https://www.bsigroup.com/en-GB/standards/benefits-of-using-standards/becoming-more-sustainable-with-standards/BS8001-Circular-Economy/>. Último acceso: 16 Agosto 2018.
- [21] Finding the value, 2 Agosto 2018, *ReMaTec*. Disponible en: <https://www.rematec.com/news/news-articles/finding-the-value/>. Último acceso: 16 Agosto 2018.

- [22] G. L. Martínez y R. Calle, Marco Normativo Ambiental en los Países de la CIER, 2011. Disponible en: <https://sites.google.com/site/marconormativoambiental/uruguay>. Último acceso: 25 Julio 2018.
- [23] Constitución de la República, 1967. Disponible en: <https://legislativo.parlamento.gub.uy/temporales/3985697.HTML>. Último acceso: 26 Julio 2018.
- [24] Ley N° 16.112: Créase el Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente y fija sus competencias, 1990. Disponible en: <https://legislativo.parlamento.gub.uy/temporales/leytemp5911879.htm>. Último acceso: 25 Julio 2018.
- [25] Ley N° 16.466: Evaluación de Impacto Ambiental, 1994. Disponible en: <https://legislativo.parlamento.gub.uy/temporales/leytemp5310253.htm>. Último acceso: 25 Julio 2018.
- [26] Ley N° 17.283: Ley General de Protección del Ambiente, 2000. Disponible en: <https://legislativo.parlamento.gub.uy/temporales/leytemp3723641.htm>. Último acceso: 26 Julio 2018.
- [27] Las normas que protegen al medio ambiente en Uruguay, 22 Junio 2017, *Espectador*. Disponible en: <http://www.espectador.com/medioambiente/353308/las-normas-que-protegen-al-medio-ambiente-en-uruguay>. Último acceso: 26 Julio 2018.
- [28] Ley N° 17.849: Uso de envases no retornables, 2004. Disponible en: <https://legislativo.parlamento.gub.uy/temporales/leytemp7372753.htm>. Último acceso: 18 setiembre 2018.
- [29] Decreto 182/013: Reglamento para la gestión de residuos sólidos industriales y asimilados, 2013. Disponible en: <https://www.impo.com.uy/bases/decretos/182-2013>. Último acceso: 26 Julio 2018.
- [30] Decreto 358/2015: Gestión de neumáticos y cámaras fuera de uso, 2015. Disponible en: <http://www.impo.com.uy/bases/decretos-originales/358-2015>. Último acceso: 26 Julio 2018.
- [31] Actualización de la normativa ambiental en Uruguay, 2013. Disponible en: http://www.ciu.com.uy/innovaportal/file/72450/1/espacio_industrial_300_web.pdf. Último acceso: 26 Julio 2018.
- [32] Proyecto de ley: Gestión integral de residuos sólidos, 2017. Disponible en: <https://mvotma.gub.uy/index.php/component/k2/item/10009795-proyecto-ley-de-gestion-integral-de-residuos>. Último acceso: 30 Julio 2018.

- [33] ¿Cómo salvar a la basura?, 14 Mayo 2017, *CEMPRE*. Disponible en: http://www.cempre.org.uy/index.php?option=com_content&view=article&id=1431:2017-05-17-19-05-47&catid=1:latest-news&Itemid=69. Último acceso: 16 Agosto 2018.
- [34] Planes para la valorización de residuos, 25 Mayo 2017. Disponible en: <http://www.montevideo.gub.uy/planes-para-la-valorizacion-de-residuos>. Último acceso: 16 Agosto 2018.
- [35] A. López Reilly, Planes de reciclaje siguen sin dar resultados anunciados por IMM, 20 Junio 2018, *El País*. Disponible en: <https://www.elpais.com.uy/informacion/sociedad/planes-reciclaje-siguen-dar-resultados-anunciados-imm.html>. Último acceso: 16 Agosto 2018.
- [36] Vidrio, *CEMPRE*. Disponible en: http://cempre.org.uy/index.php?option=com_content&id=88&Itemid=106. Último acceso: 18 Setiembre 2018.
- [37] Informe Ambiental Resumen Ebigold S.A. y Alenvidrio S.A., Julio 2018. Disponible en: <https://www.mvotma.gub.uy/participacion-ciudadana-ambiente/manifiestos-de-ambiente/item/10011448-manifiesto-ebigold-s-a-y-alenvidrio-s-a>. Último acceso: 18 setiembre 2018.
- [38] Aparatos eléctricos y electrónicos, *CEMPRE*. Disponible en: http://www.cempre.org.uy/index.php?option=com_content&view=article&id=87&Itemid=105. Último acceso: 16 Agosto 2018.
- [39] Ruta de basura electrónica en Uruguay sin legislación, 4 Febrero 2017, *El País*. Disponible en: <https://www.elpais.com.uy/informacion/ruta-basura-electronica-uruguay-legislacion.html>. Último acceso: 16 Agosto 2018.
- [40] Problemática NCFU, *GENEU*. Disponible en: <http://geneu.com.uy/geneu/que-es/>. Último acceso: 16 Agosto 2018.
- [41] Nota 1: Gestión de neumáticos fuera de uso, 31 Agosto 2017, *Notas técnicas empleos verdes en Uruguay MTSS/OIT*. Disponible en: http://www.ilo.org/santiago/publicaciones/nt-empleos-verdes-en-uruguay/WCMS_598866/lang--es/index.htm. Último acceso: 2018 Agosto 16.
- [42] F. Baráibar y L. Andrada, 2017, Informe Diagnóstico Reciclado, *CTPLAS*, Montevideo.
- [43] A. C. Tombuş, N. Aras y V. Verter, 2017, Designing distribution systems with reverse flows, *Journal of Remanufacturing*, 7(1), 113-137.

- [44] M. Fleischmann, J. M. Bloemhof-Ruwaard, R. Dekker, E. Van der Laan, J. Van Nunen y L. N. Van Wassenhove, 1997, Quantitative models for reverse logistics: A review, *European Journal of Operational Research*, 103(1), 1-17.
- [45] P. Arora, Why OEM's go for remanufacturing, 15 Agosto 2016, *ReMaTec*. Disponible en: <https://www.rematec.com/blogs/blog/why-oems-go-for-remanufacturing/>. Último acceso: 26 Julio 2018.
- [46] E. Long, S. Kokke, D. Lundie, N. Shaw, W. Ijomah y C. Kao, 2016, Technical solutions to improve global sustainable management of waste electrical and electronic equipment (WEEE) in the EU and China, *Journal of Remanufacturing*, 6(1), 1-27.
- [47] K. Menga, P. Loua, X. Peng y V. Prybutok, 2017, Multi-objective optimization decision-making of quality dependent product recovery for sustainability, *International Journal of Production Economics*, 188(1), 72-85.
- [48] Y. Xu y W. Feng, 2014, Develop a cost model to evaluate the economic benefit of remanufacturing based on specific technique, *Journal of Remanufacturing*, 4(1), 1-12.
- [49] V. D. Guide y V. Jayaraman, 2000, Product acquisition management: current industry practice and a proposed framework, *International Journal of Production Research*, 38(16), 3779-3800.
- [50] No sticking point for glue like a screw, 26 Febrero 2018, *ReMaTec*. Disponible en: <https://www.rematec.com/news/news-articles/glue-like-a-screw/>. Último acceso: 26 Julio 2018.
- [51] S. S. Kuik, T. Kaihara y N. Fujii, 2016, Product Recovery Configuration Decisions for Achieving Sustainable Manufacturing, *Procedia CIRP*, 41(1), 258-263.
- [52] Remanufactured Goods: An Overview of the U.S. and Global Industries, Octubre 2012, *U.S International Trade Commission*. Disponible en: <https://www.usitc.gov/publications/332/pub4356.pdf>. Último acceso: 30 Julio 2018.
- [53] C. P. Baldé, F. Wang, R. Kuehr y J. Huisman, 2015, The global e-waste monitor 2014. Quantities, flows and resources, *U. N. University*, Bonn Germany, ISBN: 978-92-808-4556-3.
- [54] S. Salhofer, B. Steuer, R. Ramausch y P. Beigl, 2015, WEEE management in Europe and China – A comparison, *Waste Management*, 57(1), 27-35.
- [55] Y. Chen, B. Li, Q. Bai y Z. Liu, 2018, Decision-Making and Environmental Implications under Cap-and-Trade and Take-Back Regulations, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(1), 677-678.

- [56] A. Atalay, 2014, An Operational Look at Take-Back Legislation, de *Law and the Transition to Business Sustainability*, ISBN: 978-3-319-04723-2, 41-55.
- [57] Introductory note prepared for the conference on plastics in the marine environment, *International Conference on plastics in the marine*. Disponible en: <https://www.ust.is/library/Skrar/Einstaklingar/Vatnsgaedi/Plastradstefna/Introductory%20Note.pdf>. Último acceso: 27 Julio 2018.
- [58] K. Lavender, 2016, Plastics in the Marine Environment, *Annual Review of Marine Science*, 9(1), 205-229.
- [59] J. Hammer, M. Kraak y J. R. Parsons, 2012, Plastics in the Marine Environment: The Dark Side of a Modern Gift, *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, The Netherlands.
- [60] H. M. Wagner y T. M. Whitin, 1958, Dynamic Version of the Economic Lot Size Model, *Management Science*, 5(1), 89-96.
- [61] M. Valencia, F. J. Díaz and J. C. Correa, 2015, Inventory planning with dynamic demand. A state of art review, *Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal*, 82(190), 182-191.
- [62] D. Simchi-Levi, X. Chen y J. Bramel, 2014, Economic Lot Size Models with Varying Demands: The Wagner–Whitin Model, en *The Logic of Logistics: Theory, Algorithms, and Applications for Logistics Management*, Springer Tercera Edición ISBN 978-1-4614-9149-1, 137-142.
- [63] K. Richter y M. Sombrutzki, 2000, Remanufacturing planning for the reverse Wagner/Whitin models, *European Journal of Operational Research*, 121(2), 304-315.
- [64] K. Richter y J. Weber, 2001, The reverse Wagner/Whitin model with variable manufacturing and remanufacturing cost, *International Journal of Production Economics*, 71(1), 447-456.
- [65] A. Sifaleras, I. Konstantaras y N. Mladenovic, 2015, Variable neighborhood search for the economic lot sizing problem with product returns and recovery, *International Journal of Production Economics*, 160(1), 133-143.
- [66] P. Piñeyro y O. Viera, 2015, The economic lot-sizing problem with remanufacturing: analysis and an improved algorithm, *Journal of Remanufacturing*, 5(1), 1-13.
- [67] R. G. Schroeder, S. Meyer y M. J. Rungtusanatham, 2011, Administración de Operaciones. Conceptos y casos contemporáneos, McGraw-Hill Quinta Edición, ISBN: 9786071506009, 367-374.

- [68] V. P. Simpson, 1978, Optimum Solution Structure for a Repairable Inventory Problem, *Operations Research*, 26(2), 270-281.
- [69] K. Govindan, H. Soleimani y D. Kannan, 2015, Reverse logistics and closed-loop supply chain: a comprehensive review to explore the future, *European Journal of Operational Research*, 240(1), 603-626.
- [70] T.-Y. Liao, 2018, Reverse logistics network design for product recovery and remanufacturing, *Applied Mathematical Modelling*, 60(1), 145-163.
- [71] M. Fleischmann, P. Beullens, J. M. Bloemhof-Ruwaard y L. N. Van Wassenhove, 2001, The impact of product recovery on logistics network design, *Production and Operations Management*, 10(1), 156-173.
- [72] G. Easwaran y H. Üster, 2010, A Closed-Loop supply chain network design problem with integrated forward and reverse channel decisions, *IIE Transaction*, 42(11), 779-792.

Anexo: Ejemplo de empresas con opciones de retornos en Uruguay

Empresa	Giro de la empresa	Recuperación
ABORGAMA	Empresa de recolección de residuos sanitarios.	Proyecto de generación de energía eléctrica a partir de biogás.
ANTEL	Empresa estatal de telecomunicaciones.	Plan "Antel Integra": reciben equipamientos informáticos en desuso, los cuales clasifican, desarman y limpian, obteniendo computadoras con requerimientos mínimos para navegar en Internet, las cuales donan.
ATERSA	Empresa de producción y comercialización de productos textiles de limpieza.	Reciclado de fibras textiles provenientes de otras industrias del sector.
ATMA	Empresa que produce productos plásticos.	Línea Eco: producción de productos plásticos a partir de productos retornados.
CRECOEL	Cooperativa para el Reciclaje de Componentes Electrónicos.	Desmantelamiento y recuperación de materiales de equipos y componentes electrónicos.
CRISTALPET	Empresa de producción de preformas PET por inyección y de botellas retornables y no retornables mediante el proceso de soplado.	Reciclaje de PET.
DISTRICOMP	Empresa que brinda soluciones de mobiliario de oficina.	Plan recambio de sillas y sillones usados.
DIVINO	Empresa de producción de colchones y dedicada a la comercialización de mobiliario y accesorios para el hogar.	Plan recambio de colchones y mobiliario.
ECOPET	Empresa de recolección y reciclaje de envases PET.	Reciclaje de PET.

FILMETAL	Empresa de reciclaje de metales no ferrosos.	Reciclaje de metales no ferrosos.
FNC	Empresa de producción de bebidas con y sin alcohol.	Su principal forma de recuperación es el retorno de envases retornables.
GENEU	Plan maestro de gestión de Neumáticos y Cámaras Fuera de Uso (NCFU).	Revaloriza mediante trituración de NCFU.
GERDAU	Empresa del sector siderúrgico uruguayo, que se dedica a la producción de acero partiendo de la chatarra como materia prima y transformándolo en diversos tipos de barras.	Reciclaje de metales ferrosos.
MONTEVIDEO REFRESCOS	Empresa multinacional de comercialización de bebidas.	Su principal forma de recuperación es el retorno de envases.
MOVILFREE	Servicio técnico especializado en aparatos electrónicos.	Plan recambio de aparatos electrónicos.
MOVISTAR	Empresa de telecomunicaciones.	Plan recambio de celulares usados.
MULTI AHORRO	Empresa orientada a la venta de electrodomésticos.	Plan recambio de electrodomésticos, estos son reacondicionados y donados a instituciones benéficas.
OBRACEL	Empresa de importación, producción y distribución de baterías.	Desmontan las baterías usadas, las separan y reciclan el ácido y el plástico, y se extrae el plomo para su posterior exportación.
PRINCE POINT	Empresa de producción y comercialización de todo tipo de envases, cartones y papeles.	Reciclaje de cajas de ravioles, cartón, papel de embalaje, cartulinas de colores
RECICLO NFU	Programa de recolección y transformación de neumáticos fuera de uso.	Valorización energética, luego del procesamiento por triturado se trasladan a una cementera donde se quema el triturado.
RECIPLAST	Empresa vanguardista en procesos de reciclado de	Recuperación, reciclaje, extrusión y teñido de materiales termoplásticos.

	materiales plásticos a nivel nacional e internacional	
ROTONDARO	Empresa de recuperación de materiales reciclables: cartón y papel.	Reciclaje de cartón y papel.
TRESOR	Planta de tratamiento de residuos orgánicos, transformándolos en compost.	Transformación de residuos orgánicos a compost.
URUPLAC	Empresa de producción de placas para la construcción a partir de residuos.	Reciclaje a partir de desechos de medicamentos, residuos plásticos, aluminios, tetra y nylon.
WERBA	Empresa de reciclaje de metales no ferrosos.	Reciclaje de metales no ferrosos.

Anexo II: Datos del caso de estudio

Páginas 188 a 207

1 Datos del problema sin opciones de retorno

Datos de demanda

La demanda pronosticada para el año 2019 fue brindada por la empresa desglosada en meses, basada en la demanda histórica y aplicándole un leve aumento que ellos estimaron debido al crecimiento de la misma en los últimos años. A partir de esta información y, conociendo la cantidad porcentual de ventas de cada cliente y los días de entrega, se estimó la demanda diaria de todo el 2019.

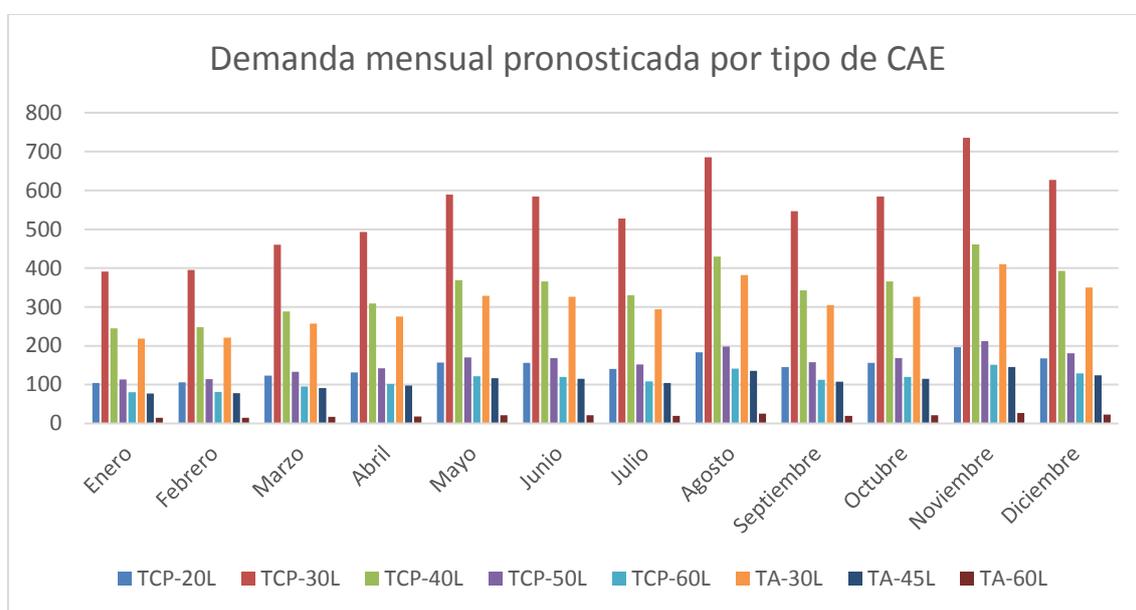


Figura 1-1: Demanda mensual pronosticada por tipo de CAE

En la Figura 1-1 se representa en una gráfica de barras la demanda mensual por tipo de CAE, y luego desde la Tabla 1-1 hasta la Tabla 1-6 se encuentra la demanda desglosada por día para todo el horizonte de planificación, de enero a diciembre de 2019. Las tablas de demanda diaria están divididas en dos meses ya que en la etapa de ejecución se cortó el problema en 6 subproblemas bimensuales.

Periodos/CAEs	TCP20L	TCP30L	TCP40L	TCP50L	TCP60L	TA30L	TA45L	TA60L	
Enero	1	6	22	14	6	5	12	4	1
	2	4	14	9	4	3	8	3	1
	3	4	14	9	4	3	8	3	1
	4	3	10	6	3	2	5	2	0
	5	9	34	21	10	7	19	7	1
	6	6	22	14	6	5	12	4	1
	7	4	14	9	4	3	8	3	1
	8	4	14	9	4	3	8	3	1
	9	3	10	6	3	2	5	2	0
	10	4	14	9	4	3	8	3	1
	11	6	22	14	6	5	12	4	1
	12	4	14	9	4	3	8	3	1
	13	4	14	9	4	3	8	3	1
	14	3	10	6	3	2	5	2	0
	15	9	34	21	10	7	19	7	1
	16	6	22	14	6	5	12	4	1
	17	4	14	9	4	3	8	3	1
	18	4	14	9	4	3	8	3	1
	19	3	10	6	3	2	5	2	0
	20	4	14	9	4	3	8	3	1
	21	6	22	14	6	5	12	4	1
	22	4	14	9	4	3	8	3	1
	23	4	14	9	4	3	8	3	1
Febrero	24	3	10	6	3	2	6	2	0
	25	10	37	23	11	8	21	7	1
	26	7	27	17	8	6	15	5	1
	27	5	17	11	5	4	10	3	1
	28	5	17	11	5	4	10	3	1
	29	3	10	6	3	2	6	2	0
	30	5	17	11	5	4	10	3	1
	31	7	27	17	8	6	15	5	1
	32	5	17	11	5	4	10	3	1
	33	5	17	11	5	4	10	3	1
	34	3	10	6	3	2	6	2	0
	35	10	37	23	11	8	21	7	1
	36	7	27	17	8	6	15	5	1
	37	5	17	11	5	4	10	3	1
	38	5	17	11	5	4	10	3	1
	39	3	10	6	3	2	6	2	0
	40	5	17	11	5	4	10	3	1
	41	7	27	17	8	6	15	5	1
	42	5	17	11	5	4	10	3	1
	43	5	17	11	5	4	10	3	1

Tabla 1-1: Demanda diaria pronosticada en los meses de enero y febrero por tipo de CAE (parámetro D_{ti})

Períodos/CAEs	TCP20L	TCP30L	TCP40L	TCP50L	TCP60L	TA30L	TA45L	TA60L	
Marzo	44	2	9	6	3	2	5	2	0
	45	12	43	27	12	9	24	9	2
	46	8	32	20	9	7	18	6	1
	47	5	20	13	6	4	11	4	1
	48	5	20	13	6	4	11	4	1
	49	2	9	6	3	2	5	2	0
	50	5	20	13	6	4	11	4	1
	51	8	32	20	9	7	18	6	1
	52	5	20	13	6	4	11	4	1
	53	5	20	13	6	4	11	4	1
	54	2	9	6	3	2	5	2	0
	55	12	43	27	12	9	24	9	2
	56	8	32	20	9	7	18	6	1
	57	5	20	13	6	4	11	4	1
	58	5	20	13	6	4	11	4	1
	59	2	9	6	3	2	5	2	0
	60	5	20	13	6	4	11	4	1
	61	8	32	20	9	7	18	6	1
	62	5	20	13	6	4	11	4	1
	63	5	20	13	6	4	11	4	1
64	2	9	6	3	2	5	2	0	
Abril	65	12	44	27	13	9	24	9	2
	66	8	29	18	8	6	16	6	1
	67	5	19	12	6	4	11	4	1
	68	5	19	12	6	4	11	4	1
	69	3	12	8	4	3	7	2	0
	70	5	19	12	6	4	11	4	1
	71	8	29	18	8	6	16	6	1
	72	5	19	12	6	4	11	4	1
	73	5	19	12	6	4	11	4	1
	74	3	12	8	4	3	7	2	0
	75	12	44	27	13	9	24	9	2
	76	8	29	18	8	6	16	6	1
	77	5	19	12	6	4	11	4	1
	78	5	19	12	6	4	11	4	1
	79	3	12	8	4	3	7	2	0
	80	5	19	12	6	4	11	4	1
	81	8	29	18	8	6	16	6	1
	82	5	19	12	6	4	11	4	1
	83	5	19	12	6	4	11	4	1
	84	3	12	8	4	3	7	2	0
	85	5	19	12	6	4	11	4	1
	86	8	29	18	8	6	16	6	1

Tabla 1-2: Demanda diaria pronosticada en los meses de marzo y abril por tipo de CAE (parámetro D_{ti})

Períodos/CAEs	TCP20L	TCP30L	TCP40L	TCP50L	TCP60L	TA30L	TA45L	TA60L	
Mayo	87	6	23	14	7	5	13	5	1
	88	6	23	14	7	5	13	5	1
	89	3	12	7	3	2	7	2	0
	90	14	52	33	15	11	29	10	2
	91	10	38	24	11	8	21	7	1
	92	6	23	14	7	5	13	5	1
	93	6	23	14	7	5	13	5	1
	94	3	12	7	3	2	7	2	0
	95	6	23	14	7	5	13	5	1
	96	10	38	24	11	8	21	7	1
	97	6	23	14	7	5	13	5	1
	98	6	23	14	7	5	13	5	1
	99	3	12	7	3	2	7	2	0
	100	14	52	33	15	11	29	10	2
	101	10	38	24	11	8	21	7	1
	102	6	23	14	7	5	13	5	1
	103	6	23	14	7	5	13	5	1
	104	3	12	7	3	2	7	2	0
	105	6	23	14	7	5	13	5	1
106	10	38	24	11	8	21	7	1	
107	6	23	14	7	5	13	5	1	
108	6	23	14	7	5	13	5	1	
109	3	12	7	3	2	7	2	0	
Junio	110	15	55	34	16	11	31	11	2
	111	11	40	25	12	8	22	8	1
	112	7	26	16	7	5	14	5	1
	113	7	26	16	7	5	14	5	1
	114	4	15	9	4	3	8	3	1
	115	7	26	16	7	5	14	5	1
	116	11	40	25	12	8	22	8	1
	117	7	26	16	7	5	14	5	1
	118	7	26	16	7	5	14	5	1
	119	4	15	9	4	3	8	3	1
	120	15	55	34	16	11	31	11	2
	121	11	40	25	12	8	22	8	1
	122	7	26	16	7	5	14	5	1
	123	7	26	16	7	5	14	5	1
	124	4	15	9	4	3	8	3	1
	125	7	26	16	7	5	14	5	1
	126	11	40	25	12	8	22	8	1
	127	7	26	16	7	5	14	5	1
	128	7	26	16	7	5	14	5	1
129	4	15	9	4	3	8	3	1	

Tabla 1-3: Demanda diaria pronosticada en los meses de mayo y junio por tipo de CAE (parámetro D_{ti})

Períodos/CAEs		TCP20L	TCP30L	TCP40L	TCP50L	TCP60L	TA30L	TA45L	TA60L
Julio	130	12	46	29	13	9	26	9	2
	131	8	30	19	9	6	17	6	1
	132	5	19	12	6	4	11	4	1
	133	5	19	12	6	4	11	4	1
	134	4	13	8	4	3	7	3	0
	135	5	19	12	6	4	11	4	1
	136	8	30	19	9	6	17	6	1
	137	5	19	12	6	4	11	4	1
	138	5	19	12	6	4	11	4	1
	139	4	13	8	4	3	7	3	0
	140	12	46	29	13	9	26	9	2
	141	8	30	19	9	6	17	6	1
	142	5	19	12	6	4	11	4	1
	143	5	19	12	6	4	11	4	1
	144	4	13	8	4	3	7	3	0
	145	5	19	12	6	4	11	4	1
	146	8	30	19	9	6	17	6	1
	147	5	19	12	6	4	11	4	1
	148	5	19	12	6	4	11	4	1
	149	4	13	8	4	3	7	3	0
150	5	19	12	6	4	11	4	1	
151	8	30	19	9	6	17	6	1	
152	5	19	12	6	4	11	4	1	
Agosto	153	8	28	18	8	6	16	6	1
	154	4	14	9	4	3	8	3	1
	155	17	62	39	18	13	35	12	2
	156	12	45	28	13	9	25	9	2
	157	8	28	18	8	6	16	6	1
	158	8	28	18	8	6	16	6	1
	159	4	14	9	4	3	8	3	1
	160	8	28	18	8	6	16	6	1
	161	12	45	28	13	9	25	9	2
	162	8	28	18	8	6	16	6	1
	163	8	28	18	8	6	16	6	1
	164	4	14	9	4	3	8	3	1
	165	17	62	39	18	13	35	12	2
	166	12	45	28	13	9	25	9	2
	167	8	28	18	8	6	16	6	1
	168	8	28	18	8	6	16	6	1
169	4	14	9	4	3	8	3	1	
170	8	28	18	8	6	16	6	1	
171	12	45	28	13	9	25	9	2	
172	8	28	18	8	6	16	6	1	
173	8	28	18	8	6	16	6	1	
174	4	14	9	4	3	8	3	1	

Tabla 1-4: Demanda diaria pronosticada en los meses julio y agosto por tipo de CAE (parámetro D_{ti})

Períodos/CAEs	TCP20L	TCP30L	TCP40L	TCP50L	TCP60L	TA30L	TA45L	TA60L	
Setiembre	175	13	50	31	14	10	28	10	2
	176	10	36	23	10	7	20	7	1
	177	6	22	14	6	5	13	4	1
	178	6	22	14	6	5	13	4	1
	179	4	14	9	4	3	8	3	0
	180	6	22	14	6	5	13	4	1
	181	10	36	23	10	7	20	7	1
	182	6	22	14	6	5	13	4	1
	183	6	22	14	6	5	13	4	1
	184	4	14	9	4	3	8	3	0
	185	13	50	31	14	10	28	10	2
	186	10	36	23	10	7	20	7	1
	187	6	22	14	6	5	13	4	1
	188	6	22	14	6	5	13	4	1
	189	4	14	9	4	3	8	3	0
	190	6	22	14	6	5	13	4	1
	191	10	36	23	10	7	20	7	1
	192	6	22	14	6	5	13	4	1
	193	6	22	14	6	5	13	4	1
194	4	14	9	4	3	8	3	0	
195	6	22	14	6	5	13	4	1	
Octubre	196	9	33	21	10	7	19	7	1
	197	6	22	13	6	4	12	4	1
	198	6	22	13	6	4	12	4	1
	199	4	15	9	4	3	8	3	1
	200	14	51	32	15	10	28	10	2
	201	9	33	21	10	7	19	7	1
	202	6	22	13	6	4	12	4	1
	203	6	22	13	6	4	12	4	1
	204	4	15	9	4	3	8	3	1
	205	6	22	13	6	4	12	4	1
	206	9	33	21	10	7	19	7	1
	207	6	22	13	6	4	12	4	1
	208	6	22	13	6	4	12	4	1
	209	4	15	9	4	3	8	3	1
210	14	51	32	15	10	28	10	2	
211	9	33	21	10	7	19	7	1	
212	6	22	13	6	4	12	4	1	
213	6	22	13	6	4	12	4	1	
214	4	15	9	4	3	8	3	1	
215	6	22	13	6	4	12	4	1	
216	9	33	21	10	7	19	7	1	
217	6	22	13	6	4	12	4	1	
218	6	22	13	6	4	12	4	1	

Tabla 1-5: Demanda diaria pronosticada en los meses setiembre y octubre por tipo de CAE (parámetro D_{ti})

Periodos/CAEs	TCP20L	TCP30L	TCP40L	TCP50L	TCP60L	TA30L	TA45L	TA60L	
Noviembre	219	4	15	9	4	3	8	3	1
	220	18	69	43	20	14	38	14	3
	221	13	51	32	15	10	28	10	2
	222	9	32	20	9	7	18	6	1
	223	9	32	20	9	7	18	6	1
	224	4	15	9	4	3	8	3	1
	225	9	32	20	9	7	18	6	1
	226	13	51	32	15	10	28	10	2
	227	9	32	20	9	7	18	6	1
	228	9	32	20	9	7	18	6	1
	229	4	15	9	4	3	8	3	1
	230	18	69	43	20	14	38	14	3
	231	13	51	32	15	10	28	10	2
	232	9	32	20	9	7	18	6	1
	233	9	32	20	9	7	18	6	1
	234	4	15	9	4	3	8	3	1
	235	9	32	20	9	7	18	6	1
	236	13	51	32	15	10	28	10	2
	237	9	32	20	9	7	18	6	1
	238	9	32	20	9	7	18	6	1
239	4	15	9	4	3	8	3	1	
Diciembre	240	15	56	35	16	11	31	11	2
	241	10	37	23	11	8	21	7	1
	242	7	24	15	7	5	14	5	1
	243	7	24	15	7	5	14	5	1
	244	4	16	10	5	3	9	3	1
	245	7	24	15	7	5	14	5	1
	246	10	37	23	11	8	21	7	1
	247	7	24	15	7	5	14	5	1
	248	7	24	15	7	5	14	5	1
	249	4	16	10	5	3	9	3	1
	250	15	56	35	16	11	31	11	2
	251	10	37	23	11	8	21	7	1
	252	7	24	15	7	5	14	5	1
	253	7	24	15	7	5	14	5	1
	254	4	16	10	5	3	9	3	1
	255	7	24	15	7	5	14	5	1
	256	10	37	23	11	8	21	7	1
	257	7	24	15	7	5	14	5	1
	258	7	24	15	7	5	14	5	1
	259	4	16	10	5	3	9	3	1
	260	7	24	15	7	5	14	5	1
	261	10	37	23	11	8	21	7	1

Tabla 1-6: Demanda diaria pronosticada en los meses setiembre y octubre por tipo de CAE (parámetro D_{ti})

Datos de materia prima

En la Tabla 1-7 se muestra la cantidad de cada materia prima requerida para producir cada CAE. Esta información fue suministrada por la empresa. A su vez, se define una nomenclatura para identificar las distintas materias primas.

Materia prima	Nomenclatura	TCP20 L	TCP30 L	TCP40 L	TCP50 L	TCP60 L	TA30 L	TA45 L	TA60 L
Hierro requerido para tanque exterior (kg)	M1	2	2	3	4	4,5	2	4	7
Hierro requerido para tapa exterior (kg)	M2	5	5	5	5	5	5	5	5
Cobre requerido para tanque interior (kg)	M3	1,5	2,5	3,5	4,5	6	0	0	0
Cobre requerido para tapa (kg)	M4	2	2	2	2	2	0	0	0
Acero requerido para cuerpo interior (kg)	M5	0	0	0	0	0	3	5	9
Acero requerido para tapa (kg)	M6	0	0	0	0	0	3	3	3
Resistencia blindada y ánodo de sacrificio	M7	1	1	1	1	1	1	1	1
Tapón fusible, termostato, térmico y válvula	M8	1	1	1	1	1	1	1	1
Caño de cobre para salida de 3/8	M9	1	1	1	1	1	0	0	0
Caños de entrada y salida	M10	1	1	1	1	1	1	1	1
Niples y platinas	M11	2	2	2	2	2	2	2	2
Tubos anillados y arandelas	M12	2	2	2	2	2	2	2	2
Tapa de servicio, prensa cables y perilla	M13	1	1	1	1	1	1	1	1
Cables	M14	1	1	1	1	1	1	1	1
Caja de 20 litros	M15	1	0	0	0	0	0	0	0
Caja de 30 litros	M16	0	1	0	0	0	1	0	0
Caja de 40 litros	M17	0	0	1	0	0	0	1	0
Caja de 50 litros	M18	0	0	0	1	0	0	0	0
Caja de 60 litros	M19	0	0	0	0	1	0	0	1
Poliuretano (kg)	M20	1	1	1,3	1,5	1,6	1,5	2	2,15
Foquito	M21	1	1	1	1	1	1	1	1
Etiquetas	M22	3	3	3	3	3	3	3	3
Tornillos, tuercas, terminales y remaches	M23	1	1	1	1	1	1	1	1
Pintura (kg)	M24	0,14	0,16	0,19	0,21	0,25	0,16	0,19	0,25

Tabla 1-7: Cantidad de materia prima requerida por producto (parámetro R_{tm})

Luego, en la Tabla 1-8 se representa para cada materia prima cuántas unidades o kilogramos entran en un metro cúbico, de modo de conocer cuánto espacio ocupa la materia prima almacenada en el depósito. Esta información fue estimada en base a las dimensiones de cada materia prima, y luego acordada con la empresa.

Materia prima	Capacidad máxima en 1 m ³
M1	1000
M2	1000
M3	1000
M4	1000
M5	1000
M6	1000
M7	100
M8	400
M9	1200
M10	1200
M11	6000
M12	6000
M13	200
M14	400
M15	50
M16	50
M17	50
M18	50
M19	50
M20	1000
M21	8000
M22	10000
M23	8000
M24	100

Tabla 1-8: Espacio ocupado de materia prima en 1 m³ (en unidades o kilogramos, según corresponda). La capacidad máxima de almacenamiento es 400 m³ (parámetro *QA*)

En la Tabla 1-9 se exhibe la cantidad mínima a pedir establecida por cada proveedor, el costo de mantener el inventario, y el inventario de seguridad que se debe satisfacer por cada materia prima.

Para estimar el costo de mantener el inventario de materia prima se tomó en cuenta el costo del metro cúbico de la planta actual ($150 \$/m^3$) y el costo de operación del adecuado mantenimiento (seguro, conservación, clasificación, desempaque y marcado). Para el caso particular de la materia prima, al ser 24 tipos distintos con tamaños y cuidados distintos, se supone que ambos costos están distribuidos en partes iguales. Para obtener el costo de mantener inventario por cada materia prima, HM_m , se divide el costo de almacenarla entre la cantidad (en unidades o kilogramos) de materia prima que entra en 1 m³.

Con respecto al inventario de seguridad de materia prima, si bien la empresa mantiene cierto inventario de seguridad, no lo tiene cuantificado. Por lo tanto, se realiza una estimación en función del período de tiempo que los proveedores entregan los pedidos, la desviación estándar en el plazo de entrega de los pedidos y el nivel de servicio prestado que se desea alcanzar.

A partir de la siguiente ecuación se estimó el inventario de seguridad para cada materia prima de la siguiente forma:

$$\text{Inventario de seguridad} = \left(\begin{array}{l} \text{Plazo de entrega máximo del proveedor suponiendo un retraso} \\ - \text{Plazo de entrega normal del proveedor} \end{array} \right) * \text{Demanda de la materia prima}$$

Asimismo, el inventario inicial de materia prima se considera igual al inventario de seguridad ($Imo_m = SM_m$).

Materia prima	Cantidad mínima a pedir (parámetro YM_m)	Costo unitario de mantener el inventario de materia prima en USD (parámetro HM_m)	Inventario de seguridad MP (parámetro SM_m)
M1	1500	0,3	1121
M2	1500	0,3	2059
M3	1500	0,3	6350
M4	1500	0,3	3976
M5	1500	0,3	387
M6	1500	0,3	308
M7	1000	3	3530
M8	1000	0,75	3530
M9	4000	0,25	1988
M10	1000	0,25	3530
M11	5000	0,05	7059
M12	5000	0,05	1177
M13	2000	1,5	588
M14	500	0,75	588
M15	100	6	74
M16	100	6	432
M17	100	6	229
M18	100	6	80
M19	100	6	67
M20	2000	0,3	1537
M21	1000	0,0375	412
M22	5000	0,03	882
M23	10000	0,0375	588
M24	2500	3	260

Tabla 1-9: Cantidad mínima a pedir, costo de mantener inventario e inventario de seguridad de materia prima (parámetros YM_m , HM_m y SM_m respectivamente)

Por último, en la Tabla 1-10 se muestran cuáles son las materias primas que se compran en múltiplos de cajas o tanques.

Materia prima con pedidos múltiples (conjunto MPD)	Materia prima	Tamaño del pedido (parámetro E_m)
Hierro requerido para tanque exterior (kg)	M1	1500
Hierro requerido para tapa exterior (kg)	M2	1500
Cobre requerido para tanque interior (kg)	M3	500
Cobre requerido para tapa (kg)	M4	500
Acero requerido para cuerpo interior (kg)	M5	1500
Acero requerido para tapa (kg)	M6	1500
Poliuretano (kg)	M20	500
Pintura (kg)	M24	250

Tabla 1-10: Múltiplos de pedido de algunas materias primas (parámetro E_m)

Datos de proveedores

En la Tabla 1-11 se muestran las materias primas que actualmente proporciona cada proveedor, estos son datos proveídos por Rivomark.

Proveedor	Materia prima
P1	M1
	M2
	M5
	M6
P2	M3
	M4
	M9
P3	M7
	M8
	M10
	M11
P4	M12
	M13
	M23
P5	M14
P6	M15
	M16
	M17
	M18
	M19
P7	M20
P8	M21
P9	M22
P10	M24

Tabla 1-11: Relación de los proveedores con la materia prima

En la Tabla 1-12 se representa el costo asociado al proveedor, el cual es independiente de la cantidad de materia prima que se adquiera y pretende representar la forma en que actualmente se encargan los pedidos. Debido a que se piden varias materias primas a un mismo proveedor, con dicho costo se espera que exista un compromiso entre incurrir en él en distintos períodos y pedir de forma anticipada e incurrir en el costo de almacenar la materia prima varios períodos hasta utilizarla. Por

lo tanto, el valor se estimó a partir de diversas pruebas con el fin de representar el comportamiento deseado.

Proveedor	Costo fijo del proveedor en USD (parámetro KM_p)
P1	2400
P2	2400
P3	2400
P4	2400
P5	2400
P6	2400
P7	2400
P8	2400
P9	2400
P10	2400

Tabla 1-12: Costos fijos de pedir a cada proveedor (parámetro KM_p)

La Tabla 1-13 muestra los plazos de entrega de cada proveedor que fueron suministrados por la empresa, que pese a no ser tenidos en cuenta en el modelo si se consideran en la interpretación de los resultados.

Proveedor	Plazo de entrega del proveedor (días)
P1	7
P2	45
P3	60
P4	10
P5	10
P6	15
P7	20
P8	7
P9	5
P10	25

Tabla 1-13: Plazos de entrega de los proveedores

Datos del producto (CAEs)

Los productos terminados se almacenan en cajas de igual base, ya que el diámetro de todos los modelos de CAEs es de 41 centímetros. Si bien las cajas tienen distinta altura según el tamaño del tanque, para simplificar se considera que todos los productos en sus respectivas cajas ocupan la misma superficie, siendo esta la correspondiente a la altura promedio entre todos los CAEs que se producen, es decir, la del CAE de 30 litros. La capacidad máxima de almacenamiento es de 800 unidades (parámetro QP).

En la Tabla 1-14 se muestra la relación que debe cumplirse para producir un CAE de acero con un CAE de cobre en el mismo período de acuerdo a las restricciones de producción de la planta. Tal como se puede observar los CAEs de acero grandes pueden producirse con los CAEs de cobre pequeños y viceversa, y los de tamaño intermedio pueden producirse en conjunto.

CAEs de acero	CAEs de cobre
TA60L	TCP20L
	TCP30L
TA45L	TCP40L
	TCP50L
TA30L	TCP60L

Tabla 1-14: Relación de CAEs de acero con CAES de cobre que establece cuales pueden producirse en el mismo período

En la Tabla 1-15 se muestra el costo unitario de producir, el fijo de preparación de la producción y el costo unitario de mantener inventario de producto terminado. Para estimar los valores de dichos costos se realizaron análisis por separado. Para el caso de los costos unitarios de producción, se consideró el costo de la tercerización de los procesos, el costo de la materia prima requerida y el de la energía eléctrica consumida para producir cada tipo de producto.

Para estimar el valor del costo fijo de preparación de la producción por tipo de CAE, se incluyó el costo por la utilización de maquinaria, es decir, el tiempo de preparación, calibración, limpieza, inspección, y otro tipo de actividades que forman parte de la preparación. No se incluye el costo de la mano de obra en el modelo matemático ya que es un costo indirecto que se trata de una cantidad mensual fija que no depende de las cantidades producidas, y por lo tanto no es un costo optimizable.

Para estimar el costo de mantener el inventario de producto terminado se consideró el costo del metro cúbico de la planta actual ($150 \$/m^3$) y el costo de operación del adecuado mantenimiento (seguro, conservación y clasificación). En el caso de los productos terminados son ocho tipos distintos (tres veces menos que las distintas materias primas). Por lo tanto, este costo se supone tres veces menor que en el caso de la materia prima, es decir $50 \$/m^3$. Para obtener el costo de mantener inventario de cada producto terminado, HP , se divide el costo de almacenar producto terminado, entre la cantidad de productos que entran en $1 m^3$.

Productos	Costo unitario de producción en USD (parámetro CF_t)	Costo fijo de preparación de producción en USD (parámetro K_t)	Costo unitario de mantener inventario de producto en USD (parámetro HP)
TCP20L	102	500	20
TCP30L	112	700	20
TCP40L	126	1000	20
TCP50L	138	1200	20
TCP60L	154	1500	20
TA30L	97	700	20
TA45L	114	1100	20
TA60L	135	1500	20

Tabla 1-15: Costo unitario y fijo de producción, y costo unitario de mantener inventario de producto (parámetros CF_t , K_t y HP , respectivamente)

En la Tabla 1-16 se representan los tiempos necesarios de producción de cada producto en minutos. Estos tiempos se obtuvieron a partir de la capacidad máxima de producción diaria de cada producto (dato estimado por la empresa) y el tiempo disponible en un día con un turno de 8 horas (parámetro $TD = 28.800 s$).

Productos	Tiempo necesario de producción (en minutos)
TCP20L	4,0
TCP30L	4,2
TCP40L	4,4
TCP50L	4,6
TCP60L	4,8
TA30L	3,8
TA45L	4,0
TA60L	4,2

Tabla 1-16: Tiempo necesario para producir cada producto (parámetro TN_t)

La Tabla 1-17 muestra el inventario de seguridad de cada producto los cuales se estimaron en conjunto con la empresa.

Productos	Inventario de seguridad (parámetro ST_t)
TCP20L	21
TCP30L	79
TCP40L	49
TCP50L	23
TCP60L	16
TA30L	44
TA45L	16
TA60L	3

Tabla 1-17: Inventario de seguridad de cada producto (parámetro ST_t)

En la Tabla 1-18 se muestra el inventario inicial por tipo de CAE.

Productos	Inventario inicial (parámetro Io_t)
TCP20L	38
TCP30L	79
TCP40L	63
TCP50L	37
TCP60L	24
TA30L	64
TA45L	20
TA60L	3

Tabla 1-18: Inventario inicial por tipo de CAE (parámetro Io_t)

2 Datos del problema con opciones de retorno

Para la estimación de datos de retornos se consideró pertinente realizar una encuesta pública la cual fue contestada por 450 personas, de distintas zonas y rangos etarios, de la cual se desprende que un 60% de las personas que cuentan con un CAE estarían dispuestas a retornarlo al final de su vida útil para que se puedan aprovechar algunos de sus componentes. A partir de este dato se estimó que la cantidad de productos retornados puede ser aproximadamente del 60% de los productos demandados. En base a esto, se calculó el 60% de la media de la demanda en los 261 períodos para cada tipo de CAE. Finalmente, los valores de los retornos en todo el horizonte de planificación se generaron de forma aleatoria utilizando una distribución normal, considerando como media el 60% de la media de la demanda y una desviación estándar del 20% para cada tipo de CAE.

En la Figura 2-1 se representan los valores de los retornos en un histograma para cada tipo de CAE. En esta se observa que los valores forman una campana de Gauss, de acuerdo a lo esperado, ya que se generaron de forma aleatoria con una distribución normal.

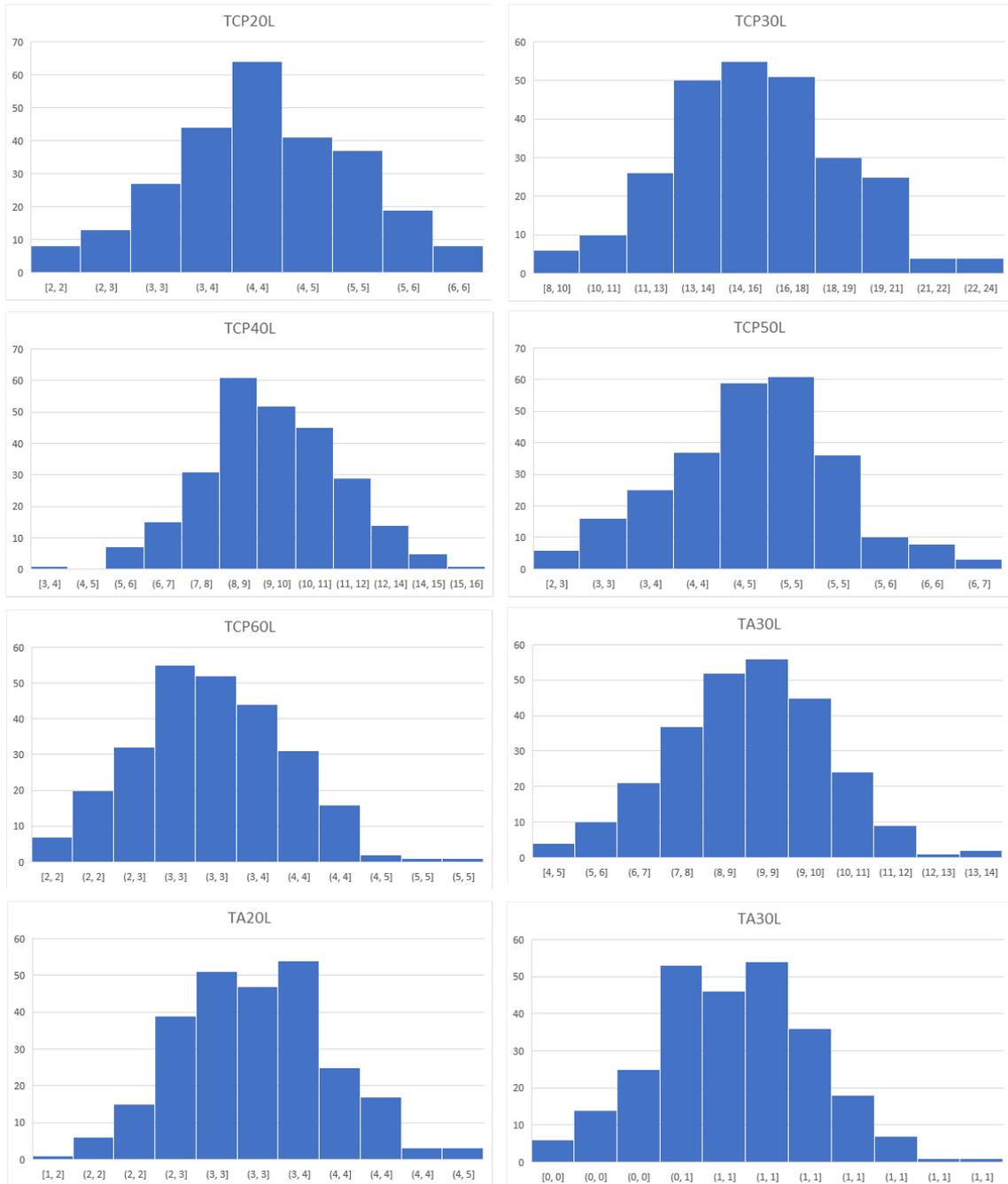


Figura 2-1: Histograma de los valores de los retornos en todo el horizonte de planificación por tipo CAE

Los costos unitario y fijo de preparación de la habilitación, C_t^e y K^e , se hallaron a partir de un promedio de los costos unitarios y fijos de las distintas rutas de recuperación, incurridos en cada actividad de la inspección, respectivamente. Las actividades son inspección visual, desmontaje, prueba hidráulica y evaluación de óxido. Estos valores resultaron en $C_t^e = USD 5, \forall t \in T$ y en $K^e = USD 100$.

Los valores de C_{qt}^r , K_{qt}^r , C_{qt}^d y K_{qt}^d se obtuvieron a partir de la suma de los costos que conlleva realizar las actividades de la remanufacturación y descarte. Se presentan los costos unitarios y fijos de remanufacturación y de descarte obtenidos en la Tabla 2-1 y Tabla 2-2, destacándose que los costos de remanufacturación son menores que los

costos de producción y que aumentan a medida que la calidad de los retornos disminuye.

CAEs/Calidades	Costo unitario de remanufactura \acute on en USD (parámetro C_{qt}^r)		Costo unitario de descarte en USD (parámetro C_{qt}^d)				
	1	2	3	4	5	6	7
TCP20L	57	84	2	17	27	32	40
TCP30L	58	85	2	17	27	33	41
TCP40L	59	90	2	17	27	34	42
TCP50L	60	94	2	17	27	35	43
TCP60L	61	96	2	17	27	36	44
TA30L	58	88	2	17	27	33	41
TA45L	59	95	2	17	27	34	42
TA60L	61	104	2	17	27	36	44

Tabla 2-1: Costo unitario de remanufactura \acute on y de descarte por calidad y tipo de CAE (parámetros C_{qt}^r y C_{qt}^d , respectivamente)

CAEs/Calidades	Costo fijo de preparaci \acute on de remanufactura \acute on en USD (parámetro K_{qt}^r)		Costo fijo de preparaci \acute on de descarte en USD (parámetro K_{qt}^d)				
	1	2	3	4	5	6	7
TCP20L	370	450	20	120	170	200	250
TCP30L	380	510	20	120	170	210	260
TCP40L	390	570	20	120	170	220	270
TCP50L	400	630	20	120	170	230	280
TCP60L	410	690	20	120	170	240	290
TA30L	380	510	20	120	170	210	260
TA45L	390	570	20	120	170	220	270
TA60L	410	690	20	120	170	240	290

Tabla 2-2: Costo fijo de preparaci \acute on de remanufactura \acute on y de descarte por calidad y tipo de CAE (parámetros K_{qt}^r y K_{qt}^d , respectivamente)

En la Tabla 2-3: Valor de rescate del descarte por tipo de CAE y calidad G_{qt}^d Tabla 2-3 se muestran los valores de rescate de los descartes por tipo de producto y por calidad. Este valor representa la ganancia obtenida al vender el cobre para reciclaje o por vender el CAE para chatarra seg \acute un los kilogramos del tanque. El valor de venta es el mismo independientemente del estado en que se encuentre el retorno. El valor de rescate de los CAEs de cobre es considerablemente mayor que el de los de acero por ser el cobre un material m \acute s costoso y del cual se puede sacar un mayor beneficio al venderlo.

CAEs/Calidades	Valor de rescate de descarte en USD (parámetro G_{qt}^d)				
	3	4	5	6	7
TCP20L	12	12	12	12	12
TCP30L	14	14	14	14	14
TCP40L	16	16	16	16	16
TCP50L	18	18	18	18	18
TCP60L	20	20	20	20	20
TA30L	1	1	1	1	1
TA45L	2	2	2	2	2
TA60L	3	3	3	3	3

Tabla 2-3: Valor de rescate del descarte por tipo de CAE y calidad G_{qt}^d

A continuación, se presenta el análisis realizado para la estimación de los costos de mantenimiento de inventario de producto usado retornado (H^u) y de producto usado retornado y habilitado (H_q^e). En ambos casos, se tomó en cuenta el costo del metro cúbico de la planta actual ($150 \$/m^3$) y el costo de operación del adecuado mantenimiento. Se considera que el costo de operación del adecuado mantenimiento de inventario de producto usado retornado es menor que en el caso del inventario de producto terminado (el cual se había estimado en $50 \$/m^3$) por tener no tener ningún proceso adicional sobre ellos, simplemente se recibieron, este costo se estima en $20 \$/m^3$ y por lo tanto $H^u = 17$. A su vez, el costo de operación del adecuado mantenimiento de inventario de producto usado retornado y habilitado es mayor al anterior por haberle realizado una serie de actividades al producto, pero menor al del mantenimiento del producto terminado. Como este costo está discriminado según las calidades, el costo del adecuado mantenimiento correspondiente a las calidades de remanufacturación será mayor que el correspondiente a descartes, por el mero hecho que las actividades de remanufacturación son más costosas. Resultando estos valores en $40 \$/m^3$ y $30 \$/m^3$ respectivamente. En la Tabla 2-4 se muestran los costos unitarios de mantener inventario de retornos luego de ser habilitados según su calidad. Se puede observar que la diferencia entre los costos es pequeña ya que el costo que más pesa es el uso del espacio, es decir, el costo del metro cúbico.

Costo unitario de mantener inventario de producto retornado luego de habilitado en USD (parámetro H_q^e)						
1	2	3	4	5	6	7
19	19	18	18	18	18	18

Tabla 2-4: Costo unitario de mantener inventario de producto retornado luego de ser habilitado por calidad (parámetro H_q^e)

Por otra parte, para la estimación de los tiempos necesarios para remanufacturar y descartar un producto retornado, se cuantificaron los tiempos requeridos para las actividades de cada proceso productivo en base a la investigación realizada sobre la recuperabilidad de los CAEs. En la Tabla 2-5 se desglosan estos tiempos por tipo de CAE y calidad.

CAEs/Calidades	Tiempo necesario de remanufacturaación (parámetro TN_{qt}^r en minutos)		Tiempo necesario de descarte (parámetro TN_{qt}^d en minutos)				
	1	2	3	4	5	6	7
TCP20L	8	10	10	10	10	10	10
TCP30L	8	11	11	11	11	11	11
TCP40L	9	12	12	12	12	12	12
TCP50L	9	13	13	13	13	13	13
TCP60L	12	15	15	15	15	15	15
TA30L	8	12	1	8	8	12	12
TA45L	9	13	1	9	9	13	13
TA60L	12	15	1	12	12	15	15

Tabla 2-5: Tiempo necesario de remanufacturaación y descarte, por calidad y por tipo de CAE (parámetros TN_{qt}^r y TN_{qt}^d , respectivamente)

El tiempo disponible para la remanufacturaación y el descartar es el mismo que el tiempo disponible en la línea de producción ya que se considera que son líneas separadas con la misma capacidad máxima (parámetros $TD^p = TD^u = 480 \text{ min}$).

Para definir la proporción de las calidades de cada retorno se tuvo en cuenta que los CAEs de acero son menos probables de ser remanufacturados que los CAEs de cobre, por ser más propensos a la oxidación. Además, se considera que tanto los retornos con calidades de remanufacturaación como de descarte son equiprobables. La Tabla 2-6 muestra las proporciones de las calidades de los retornos por tipo de CAE.

CAEs/Calidades	Proporción de retornos con cierta calidad (parámetro α_{qt})						
	1	2	3	4	5	6	7
TCP20L	0,25	0,25	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
TCP30L	0,25	0,25	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
TCP40L	0,25	0,25	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
TCP50L	0,25	0,25	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
TCP60L	0,25	0,25	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
TA30L	0,05	0,1	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
TA45L	0,05	0,1	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
TA60L	0,05	0,1	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17

Tabla 2-6: Proporciones de las calidades de los retornos por tipo de CAE (parámetro α_{qt})

En la Tabla 2-7 se muestra el inventario inicial por tipo de CAE. Este inventario inicial se fijó de forma que en los primeros períodos se pueda cumplir con la demanda, considerando que las restricciones de producción de la planta impiden que se produzcan algunos CAEs en el mismo período.

Productos	Inventario inicial (parámetro I_{o_t})
TCP20L	17
TCP30L	0
TCP40L	14
TCP50L	14
TCP60L	8
TA30L	20
TA45L	4
TA60L	0

Tabla 2-7: Inventario inicial por tipo de CAE (parámetro I_{o_t})

Anexo III: Validación de los modelos

Páginas 209 a 221

1 Validación del modelo sin opciones de retorno

Para cada uno de los casos presentados a continuación se documenta el objetivo de la prueba, los datos más relevantes de entrada y los resultados. Los casos con dos períodos se corroboran manualmente a modo de verificar la validez de los resultados obtenidos en relación a los esperados. En cambio, aquellos con más períodos se observó directamente si el comportamiento obtenido se ajustaba a lo esperado.

Caso de prueba 1:

Objetivo: Controlar que la producción y la compra es cero si la demanda es cero.

Datos de entrada:

- Períodos=2
- CAEs=5
- Materia prima= 3
- Proveedores=1
- Demanda=0

Resultados: Se obtienen las variables de producir y de comprar materia prima cero con sus respectivas variables binarias también nulas en todos los períodos. Asimismo, los balances de inventario se corroboran para todos los productos y todas las materias primas en todos los períodos. Se corrobora manualmente que el resultado del valor objetivo coincide con el esperado.

Caso de prueba 2:

Objetivo: Corroborar que no se produzca ni compre materia prima cuando la demanda es positiva, pero puede ser satisfecha con el inventario inicial y cumpliendo con el inventario de seguridad. A su vez, verificar que se cumplen los balances de inventario de producto y de materia prima.

Datos de entrada:

- Períodos=2
- CAEs=5
- Materia prima= 3
- Proveedores=1

Se introduce una demanda positiva que puede satisfacerse a partir del inventario inicial de producto.

Resultados: Se obtienen las variables de producir y de comprar materia prima cero con sus respectivas variables binarias también nulas en todos los períodos. Asimismo, se verifica el cumplimiento de los balances de inventario para todos los productos y todas las materias primas en todos los períodos. Se corrobora manualmente que el resultado del valor objetivo coincide con el esperado.

Caso de prueba 3:

Objetivo: Verificar el cumplimiento de la demanda a tiempo en todos los períodos cumpliendo las restricciones de producción. Asimismo, probar la relación de la variable entera de producir con la variable binaria de producir, la variable entera de comprar con la variable binaria de comprar y la variable binaria de comprar materia prima con la variable binaria del proveedor. Adicionalmente, corroborar la restricción de cantidad mínima a pedir y el dimensionamiento de lotes de materia prima.

Datos de entrada:

- Períodos=2
- CAEs=5
- Materia prima= 3
- Proveedores=1
- Inventario inicial de producto = inventario de seguridad de producto
- Cantidad mínima a pedir de materia prima > Parámetro de activación de β_{mi}
- Demanda positiva

Resultados: El problema no cuenta con solución factible primal.

El resultado obtenido refleja un error en el dato establecido para parámetro N el cual funciona de activación de la variable binaria β_{mi} . El valor impuesto impide la compra de materia prima para satisfacer la demanda. Por lo tanto, se procede a corregir dicho valor, asignándole uno mayor a la cantidad de materia prima necesaria para cumplir la demanda en todos los períodos.

Caso de prueba 4:

Objetivo: Habiendo corregido el parámetro de activación de β_{mi} , verificar el cumplimiento de la demanda a tiempo en todos los períodos cumpliendo las restricciones de producción. Asimismo, probar la relación de la variable entera de producir con la variable binaria de producir, la variable entera de comprar con la variable binaria de comprar y la variable binaria de comprar materia prima con la variable binaria del proveedor. Adicionalmente, corroborar la restricción de cantidad mínima a pedir y el dimensionamiento de lotes de materia prima.

Datos de entrada:

- Períodos=2
- CAEs=5
- Materia prima= 3
- Proveedores=1
- Inventario inicial de producto = inventario de seguridad de producto
- Demanda positiva

Resultados: Se produce de acuerdo a la demanda en ambos períodos y se cumple con las restricciones de producción de la planta. A su vez, cumple con las restricciones de pedidos respetando la cantidad mínima a pedir y el dimensionamiento de lotes de materia prima. Se corrobora manualmente que el resultado del valor objetivo coincide con el esperado.

Caso de prueba 5:

Objetivo: Probar el cumplimiento de las restricciones de producción, introduciendo datos que impiden que se satisfaga la demanda a tiempo cumpliendo con las mismas.

Datos de entrada:

- Períodos=2
- CAEs=5
- Materia prima= 3
- Proveedores=1
- Inventario inicial de producto = inventario de seguridad de producto
- Demanda positiva

Resultados: El problema no cuenta con solución factible primal.

Caso de prueba 6:

Objetivo: Corroborar el cumplimiento de las siguientes dos restricciones: que el tiempo de producción sea menor al tiempo disponible en la planta (parámetro TD), y que el tiempo de producción de cada CAE sea menor a la capacidad disponible para cada CAE.

Datos de entrada:

- Períodos=2
- CAE=5

- Materia prima= 3
- Proveedores=1
- Inventario inicial de producto = inventario de seguridad de producto

Se introduce una demanda positiva que supera la capacidad de producción disponible de la planta.

Resultados: El problema no cuenta con solución factible primal.

A partir de esta prueba se percibe que la restricción de capacidad de producción de los CAE no aporta limitaciones adicionales a la restricción (24) de capacidad de producción de la planta. Por lo tanto, se quitó dicha restricción y se hace notar que la misma no está representada en el modelo de la Sección 3.3.1 del Informe principal.

Caso de prueba 7:

Objetivo: Verificar el cumplimiento de la capacidad de almacenamiento de productos.

Datos de entrada:

- Períodos=2
- CAEs=5
- Materia prima= 3
- Proveedores=1
- Inventario inicial de producto = inventario de seguridad de producto

Se introduce una demanda positiva que exige el almacenamiento de producto de un período al siguiente y que supera la capacidad de almacenamiento de producto.

Resultados: El problema no cuenta con solución factible primal.

Caso de prueba 8:

Objetivo: Corroborar el cumplimiento de la capacidad de almacenamiento de materia prima.

Datos de entrada:

- Períodos=2
- CAEs=5
- Materia prima= 3
- Proveedores=1

- Demanda positiva

Se introducen datos de cantidad mínima a pedir que impiden el almacenamiento de la misma dada la capacidad máxima de almacenamiento de materia prima fijada.

Resultados: La materia prima que no cuenta con espacio para ser almacenada se utiliza para producir y se almacena como producto terminado, respetando la capacidad de producción y de almacenamiento de producto.

Caso de prueba 9:

Objetivo: Observar que la forma de la solución es de acuerdo a lo esperado según los valores de costo establecido para el almacenamiento del producto y el costo fijo de producir TA60L.

Datos de entrada:

- Períodos=5
- CAEs=5
- Materia prima= 3
- Proveedores=1
- Costo fijo de producir de TA60L=104
- Costo de almacenar TA60L=60
- Se demanda TA60L en los períodos 1 y 3.

Resultados: Se produce el CAE TA60L en los períodos 1 y 3 de acuerdo a la demanda, ya que el costo de almacenar el producto dos períodos supera al costo fijo de producirlo.

Caso de prueba 10:

Objetivo: Observar la decisión de producir disminuyendo el costo de almacenamiento del producto TA60L y manteniendo el costo fijo de producir en relación al caso de prueba 6.

Datos de entrada:

- Períodos=5
- CAEs=5
- Materia prima= 3
- Proveedores=1

- Costo fijo de producir de TA60L= 104
- Costo de almacenar TA60L= 10
- Se demanda TA60L en los períodos 1 y 3.

Resultados: Se produce en el período 1 el equivalente a la demanda en los períodos 1 y 3 de TA60L, ya que el costo fijo de producir supera al costo de almacenar en dos períodos.

Caso de prueba 11:

Objetivo: Corroborar el cumplimiento del inventario de seguridad de producto y de materia prima.

Datos de entrada:

- Períodos=5
- CAEs=5
- Materia prima= 3
- Proveedores=1
- Inventario inicial TCP20L=0
- Inventario de seguridad TCP20L=21
- Inventario inicial = inventario de seguridad M7=60
- Cantidad mínima a pedir de M7=5

Resultados: Se produce el equivalente a la demanda de TCP20L más lo necesario para cumplir con el inventario de seguridad del TCP20L. A su vez, la materia prima utilizada la repone para satisfacer el inventario de seguridad de materia prima.

Caso de prueba 12:

Objetivo: Probar que las variables binarias de compra de materia prima y del proveedor están correctamente relacionadas. Y a su vez, para observar el comportamiento del costo fijo del proveedor en relación al costo de almacenar materia prima.

Datos de entrada:

- Períodos=5
- CAEs=5
- Materia prima= 3

- Proveedores=2
- Proveedor 1=M7 y M8
- Proveedor 2=M3
- Demanda positiva

Resultados: La materia prima M7 y M8 se pide en todos los períodos excepto en el cuarto, mientras que M3 se pide sólo en el primer período. Los valores de las variables binarias de pedir son los esperados en concordancia con estos pedidos. A su vez, se observa que se pide al proveedor 1 en tres períodos consecutivos en lugar de pedir el total necesario en un período ya que el costo de almacenar supera al costo fijo del proveedor. Por otro lado, se aprecia que las materias primas correspondientes al mismo proveedor se piden en los mismos períodos.

Caso de prueba 13:

Objetivo: Probar el cumplimiento de las restricciones de producción de la planta.

Datos de entrada:

- Períodos=5
- CAEs=8
- Materia prima= 3
- Proveedores=2
- Demanda positiva

Resultados: Los resultados violan las restricciones de producción de la planta, es decir, se producen dos modelos de CAEs que no pueden producirse en el mismo día.

Las restricciones de producción de la planta tal como se escribieron inicialmente no reflejaban el comportamiento deseado. Por lo tanto, se procedió a volver a estudiar el caso y corregir dichas restricciones.

Caso de prueba 14:

Objetivo: A raíz de la corrección de las restricciones de producción, corroborar el cumplimiento de las nuevas restricciones de producción.

Datos de entrada:

- Períodos=7
- CAEs=8
- Materia prima= 3

- Proveedores=2
- Demanda positiva

Resultados: Las restricciones de producción de la planta reflejan el comportamiento deseado.

2 Validación del modelo con opciones de retorno

Para cada uno de los casos presentados a continuación se documenta el objetivo de la prueba, los datos más relevantes de entrada y los resultados.

Caso de prueba 1:

Objetivo: Controlar que la producción y la remanufacturación es cero si la demanda es cero.

Datos de entrada:

- Períodos=4
- CAEs=1
- Calidades de remanufacturación=1
- Calidades de descarte=1
- Demanda=0
- Retornos positivos

Resultados: Se obtienen las variables de producir, remanufacturar y descartar en cero en todos los períodos y no se habilitan los retornos. Se observa que pese a contar con retornos el solver decide no descartar. Asimismo, se verifica que el costo obtenido es el equivalente a mantener el inventario de los retornos en los cuatro períodos. Se corrobora manualmente que el resultado del valor objetivo coincide con el esperado.

Caso de prueba 2:

Objetivo: Corroborar que no se produzca ni remanufacture cuando la demanda es positiva, pero pueda ser satisfecha a partir del inventario inicial. A su vez, verificar que se cumplan los balances de inventario.

Datos de entrada:

- Períodos=4
- CAEs=1
- Calidades de remanufacturación=1
- Calidades de descarte=1
- Demanda positiva

Se introduce una demanda positiva que puede satisfacerse a partir del inventario inicial de producto.

Resultados: Se obtienen las variables de producir, de remanufacturar y de descartar en cero con sus respectivas variables binarias también nulas en todos los períodos. Asimismo, se verifica el cumplimiento de los tres balances de inventario. No se habilita ningún retorno por lo tanto el inventario de retornos habilitados es cero en todos los períodos.

Caso de prueba 3:

Objetivo: Corroborar que se descarte cuando los costos unitarios y fijos de habilitar los retornos son nulos. Se mantienen los datos del caso anterior, pero cambiando estos dos costos. A su vez, observar que se cumpla correctamente la relación de w_{ti} con w_{qti}^{int} y que la pérdida de CAEs sea nula (restricciones (62), (63) y (64)).

Datos de entrada:

- Períodos=4
- CAEs=1
- Calidades de remanufacturación=1
- Calidades de descarte=1
- Costo unitario de descartar < Valor unitario de rescate de descartar
- Demanda positiva

Se introduce una demanda positiva que puede satisfacerse a partir del inventario inicial de producto.

Resultados: Se obtienen las variables de producir y de remanufacturar cero en todos los períodos. Se observa que cuando el costo unitario y fijo de habilitar los retornos es cero se habilitan todos los retornos en todos los períodos para descartarlos. Asimismo, se ve que cuando el valor de rescate de descartar es menor al costo de descartar el solver decide no habilitar ningún retorno y por lo tanto no se descartan. Por otro lado, se visualiza que las restricciones (62), (63) y (64) tienen el comportamiento deseado ya que se pasa la proporción correcta de retornos a remanufacturar y a descartar, y no existen “pérdidas” de CAEs. Se corrobora manualmente que el resultado del valor objetivo coincide con el esperado.

Caso de prueba 4:

Objetivo: Corroborar que pueda habilitarse cualquier cantidad de CAEs según la necesidad y que la decisión de cuantos habilitar resida únicamente en el balance de costos. Para esto se aumenta el costo unitario de mantener inventario de productos retornados con respecto al costo unitario de mantener inventario de retornos habilitados. Se mantienen los datos del caso anterior, pero cambiando el dato de H^u .

Datos de entrada:

- Períodos=4
- CAEs=1
- Calidades de remanufacturaación=1
- Calidades de descarte=1
- Costo unitario de descartar < Valor unitario de rescate de descartar
- Costo unitario de mantener inventario de retornos habilitados < Costo unitario de mantener inventario de retornos recibidos
- Demanda positiva

Se introduce una demanda positiva que puede satisfacerse a partir del inventario inicial de producto.

Resultados: Se obtienen las variables de producir y de remanufacturar cero en todos los períodos, mientras que las variables de descartar son positivas. También, se observa comparando con el caso anterior que se habilitan todos los retornos recibidos.

Caso de prueba 5:

Objetivo: Corroborar que no se descarte cuando la proporción de retornos con calidad de descarte es cero, aunque los costos unitarios y fijos de habilitar los retornos sean nulos. Se mantienen los datos del caso anterior, pero cambiando el dato de α_{qt} .

Datos de entrada:

- Períodos=4
- CAEs=1
- Calidades de remanufacturaación=1
- Calidades de descarte=1
- Costo unitario de descartar < Valor unitario de rescate de descartar
- Demanda positiva
- Proporción de retornos con calidad de descarte=0

Se introduce una demanda positiva que puede satisfacerse a partir del inventario inicial de producto.

Resultados: Se obtienen las variables de producir, de remanufacturar y de descartar en cero con sus respectivas variables binarias también nulas en todos los períodos. No se habilita ningún retorno debido a que el costo unitario de mantener inventario de

retornos habilitados es mayor que el costo de mantener inventario de productos retornados.

Caso de prueba 6:

Objetivo: Corroborar que de no factible cuando el tiempo disponible en la línea de producción es cero y los retornos no son suficientes para satisfacer la demanda.

Datos de entrada:

- Períodos=4
- CAEs=1
- Calidades de remanufacturación=1
- Calidades de descarte=1
- Retornos positivos<Demanda positiva
- Tiempo disponible en línea de producción=0
- Inventario inicial=0

Resultados: El problema no cuenta con solución factible primal ya que no puede cumplir con la demanda.

Caso de prueba 7:

Objetivo: Corroborar que se remanufacture para cumplir con toda la demanda a tiempo cuando el tiempo disponible en la línea de producción es cero y los retornos son suficientes para satisfacer la demanda.

Datos de entrada:

- Períodos=4
- CAEs=1
- Calidades de remanufacturación=1
- Calidades de descarte=1
- Retornos positivos>Demanda positiva
- Tiempo disponible en línea de producción=0
- Inventario inicial=0

Resultados: Se obtienen las variables de producir y de descartar cero en todos los períodos. Mientras que las variables de remanufacturar dan positivo igual a la demanda para poder satisfacerla a partir de productos remanufacturados.

Caso de prueba 8:

Objetivo: Verificar el cumplimiento de la demanda a tiempo en todos los períodos cumpliendo las restricciones (59), (60) y (61) de producción.

Datos de entrada:

- Períodos=4
- CAEs=3 (de los cuales 2 pueden producirse en el mismo período)
- Calidades de remanufacturación=1
- Calidades de descarte=1
- Demanda positiva

Resultados: Se produce de acuerdo a la demanda y se cumple con las restricciones de producción de la planta.