



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

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 el camino. 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 todo nuestro camino 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

Introducción	10
1 Marco teórico.....	12
1.1. Recuperación de productos usados	12
1.2. Planificación de la producción	13
1.2.1. Sistemas sin opciones de retorno.....	13
1.2.2. Sistemas con opciones de retorno.....	15
1.3. Calentadores de agua eléctricos de acumulación (CAEs).....	19
1.3.1. Características, componentes y diseño	19
1.3.2. Industria y mercado de CAEs en Uruguay	24
2 Caso de estudio	26
2.1. Introducción	26
2.2. Características de la empresa relevada	26
2.3. Problema sin opciones de retorno	29
2.3.1. Modelo matemático.....	30
2.3.2. Relevamiento y análisis de datos.....	33
2.3.3. Validación del modelo.....	34
2.3.4. Ejecución del modelo.....	34
2.3.5. Interpretación de los resultados	42
2.4. Análisis de recuperabilidad de CAEs	54
2.4.1. Recomendaciones de diseño de CAEs.....	65
2.5. Problema con opciones de retorno.....	69
2.5.1. Modelo matemático.....	70
2.5.2. Relevamiento y análisis de datos.....	75
2.5.3. Validación del modelo.....	76
2.5.4. Ejecución del modelo.....	77
2.5.5. Interpretación de los resultados: sin y con opciones de retornos.....	82
3 Análisis de sensibilidad.....	91
3.1. Introducción	91
3.2. Casos analizados	92
3.2.1. Proporción de calidades de los retornos.....	93
3.2.2. Cantidad de retornos.....	95
3.2.3. Tiempo disponible en la línea de recuperación	98
3.2.4. Costos fijos de preparación de remanufacturaación.....	100

3.2.5.	Costo fijo de habilitación.....	101
3.2.6.	Costos de mantener inventario de retornos	102
3.3.	Combinación de casos y conclusiones	103
4	Conclusiones.....	106
Anexos	109
Referencias	110

Índice de Figuras

Figura 1.2-1: Flujo de los productos en el sistema con remanufacturación planteado por Teunter et al. (2006) [2]	16
Figura 1.3-1: Esquema del corte transversal de un CAE que muestra sus principales componentes [26].....	20
Figura 1.3-2: Posibles ubicaciones de la resistencia en un CAE.	21
Figura 1.3-3: Aislantes y sus respectivas conductividades térmicas [34].....	23
Figura 2.2-1: Representación esquemática del proceso productivo de los CAEs con tanque interior de acero.	27
Figura 2.2-2 Representación esquemática del proceso productivo de los CAEs con tanques de cobre.....	28
Figura 2.3-1: Evolución de tiempos de ejecución insumidos para la obtención de soluciones óptimas para el modelo sin opciones de retorno.....	35
Figura 2.3-2: Capacidad de producción en minutos para los últimos dos meses del año, sin la restricción (24) de capacidad máxima de producción	38
Figura 2.3-3: Capacidad de producción en minutos para los últimos dos meses del año, sin las restricciones (33), (34) y (35) de producción de la planta	38
Figura 2.3-4: Evolución del gap de dualidad y del valor objetivo en 24 horas en la resolución del último subproblema de la heurística	40
Figura 2.3-5: Evolución del gap de dualidad y del valor objetivo en la resolución exacta del problema en 24 horas	42
Figura 2.3-6: Grafico de torta que representa la distribución de los costos incurridos con la planificación dada por la resolución heurística del problema	43
Figura 2.3-7: Cantidad de CAEs almacenados en el horizonte de planificación de un año, para la resolución heurística	44
Figura 2.3-8: Cantidad de materia prima ocupada (en m^2) en el horizonte de planificación de un año, para la resolución heurística.....	44
Figura 2.3-9: Capacidad de producción en minutos en el horizonte de planificación de un año, para la resolución heurística	45
Figura 2.3-10: Grafico de torta que representa la distribución de los costos incurridos con la planificación dada por la resolución exacta del problema.....	47
Figura 2.3-11: Cantidad de materia prima ocupada (en m^2) en el horizonte de planificación de un año, para la resolución exacta	48
Figura 2.3-12: Cantidad de CAEs almacenados en el horizonte de planificación de un año, para la resolución exacta.....	48
Figura 2.3-13: 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	49
Figura 2.3-14: Capacidad de producción en minutos en el horizonte de planificación de un año, para la resolución exacta	50
Figura 2.4-1: Gráfica de Pareto de la materia prima y la cantidad requerida para la producción del CAE más grande de cobre, ponderada por costo.....	55
Figura 2.4-2: Gráfica de Pareto de la materia prima y la cantidad requerida para la producción del CAE más grande de acero, ponderada por costo.....	56
Figura 2.4-3 Extracción de la base metálica del CAE [46].....	57
Figura 2.4-4: (a) Resistencia y ánodo calcificados extraídos de un CAE con 5 años de uso (b) Resistencia descalcificada luego de realizarle la limpieza [46]	58

Figura 2.4-5: Separación de la envolvente exterior del aislante de espuma de poliuretano expandido [47].....	59
Figura 2.4-6: (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 [48]	60
Figura 2.4-7: (a) Tanque de acero tras haber desprendido todo el aislante [50] y (d) tanque de cobre tras haber desprendido todo el aislante [48]	61
Figura 2.4-8: Rutas de recuperación de los CAEs retornados.....	63
Figura 2.4-9: Ubicación normal del ánodo de sacrificio [51].....	66
Figura 2.4-10: Proceso de calcificación [52]	66
Figura 2.4-11: Colocación del ánodo de sacrificio separado de la resistencia [42].....	67
Figura 2.4-12: Doble sistema de protección anódica anticorrosión [43].....	67
Figura 2.5-1: Flujo de productos en el sistema con opciones de retornos.....	70
Figura 2.5-2: 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 2.5-3: Inventario de producto terminado para el problema sin opciones de retorno para el mes de setiembre	84
Figura 2.5-4: Capacidad de producción en minutos para el problema sin opciones de retorno para el mes de setiembre	84
Figura 2.5-5: 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 2.5-6: Inventario de producto retornado durante el mes de setiembre según los retornos estimados.....	86
Figura 2.5-7: Inventario de producto retornado y habilitado durante el mes de setiembre	86
Figura 2.5-8: Inventario de producto terminado el cual se obtiene de la producción y de la remanufacturación, durante el mes de setiembre.....	89
Figura 2.5-9: Capacidad de producción y de remanufacturación en minutos para el mes de setiembre	89
Figura 2.5-10: Gráfico de torta que representa el destino de los productos retornados en el horizonte de planificación	90
Figura 3.1-1: Evolución de tiempos de ejecución insumidos para la obtención de soluciones óptimas para el modelo con opciones de retorno	92
Figura 3.2-1: 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 3.2-2: Cumplimiento de la demanda a partir de productos remanufacturados conforme aumenta la media de los retornos (eje x).....	97
Figura 3.2-3: Capacidad de producción y recuperación en minutos en el escenario favorable al aumentar el tiempo disponible de la línea de recuperación.....	99
Figura 3.2-4: 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 2.3-1: Resolución del problema mediante método heurístico	41
Tabla 2.3-2: Resolución del problema mediante método exacto.....	41
Tabla 2.3-3: Diagrama de Gantt que muestra en qué período se producen los distintos modelos de CAE, para la resolución heurística.....	46
Tabla 2.3-4: Diagrama de Gantt que muestra en qué período se producen los distintos modelos de CAE, para la resolución exacta	51
Tabla 2.3-5: Diagrama de Gantt que muestra en qué período se pide cual materia prima para el mes de enero	52
Tabla 2.3-6: 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.....	53
Tabla 2.5-1: Tamaños de los modelos sin y con opciones de retorno para 261 períodos	77
Tabla 2.5-2: Tamaños de los modelos sin y con opciones de retorno para el mes de setiembre (21 períodos)	81
Tabla 2.5-3: Ejecución de las políticas en el modelo con opciones de retornos para el mes de setiembre	81
Tabla 2.5-4: Cantidad de retornos habilitados en el mes de setiembre	87
Tabla 3.2-1: Ejecución e indicadores de las distintas formulaciones para el escenario base	93
Tabla 3.2-2: Ejecución e indicadores de las distintas formulaciones para el escenario favorable de la proporción de las calidades de los retornos	94
Tabla 3.2-3: Ejecución e indicadores de las distintas formulaciones para el escenario desfavorable de la proporción de las calidades de los retornos	94
Tabla 3.2-4: Ejecución e indicadores de las distintas formulaciones del escenario favorable de la cantidad de retornos	96
Tabla 3.2-5: Ejecución e indicadores de las distintas formulaciones del escenario desfavorable de la cantidad de retornos.....	96
Tabla 3.2-6: Ejecución e indicadores de las distintas formulaciones del escenario favorable del tiempo disponible en la línea de recuperación.....	98
Tabla 3.2-7: Ejecución e indicadores de las distintas formulaciones del escenario desfavorable del tiempo disponible en la línea de recuperación	98
Tabla 3.2-8: Ejecución e indicadores de las distintas formulaciones del escenario desfavorable de los costos fijos de remanufacturación.....	100
Tabla 3.2-9: Ejecución e indicadores de las distintas formulaciones del escenario muy desfavorable de los costos fijos de remanufacturación.....	101
Tabla 3.2-10: Ejecución e indicadores de las distintas formulaciones del escenario desfavorable del costo fijo de habilitar retornos	101
Tabla 3.2-11: Ejecución e indicadores de las distintas formulaciones del escenario muy desfavorable del costo fijo de habilitar retornos	102
Tabla 3.2-12: Ejecución e indicadores de las distintas formulaciones del escenario favorable de los costos de inventario de producto retornado y habilitado	102
Tabla 3.3-1: Ejecución e indicadores de las distintas formulaciones para el escenario favorable combinado.....	104
Tabla 3.3-2: Ejecución e indicadores de las distintas formulaciones para el escenario desfavorable combinado	105

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 beneficiosa para las empresas, ya que trae aparejada la reducción de materias primas, energía y mano de obra, generando un impacto positivo en el medio ambiente y en los consumidores al obtener un producto con las mismas prestaciones que uno nuevo, pero generalmente a menor precio [1] [2]. Existen distintas prácticas de recuperación de productos usados, una de ellas es el reciclaje la cual consiste en la recuperación del valor del material, mientras que otras como son el reúso, el reacondicionamiento y la remanufacturación se enfocan en la recuperación del valor de los componentes [3] [4] [5].

El primer objetivo de este proyecto consiste 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, por qué es importante y cuáles son sus características.

Para el estado del arte se consultaron diferentes artículos científicos y se contrastaron las realidades presentadas por los autores, constatándose 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 el cuidado del 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 recuperación de productos usados [6] [7]. Se incluye también en el estado del arte 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 esta investigación 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 por adentrarse 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. El reciclaje se considera menos beneficioso frente a otras prácticas de recuperación ya que implica la destrucción de la estructura del producto para recapturar el valor del material [1]. Otras prácticas de recuperación como son el reúso y la remanufacturación recuperan el valor de los componentes por lo que traen aparejado menor uso de recursos y energía; y por ende menores costos e impactos negativos en el medio ambiente [3].

El segundo objetivo del proyecto es 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 de un modelo matemático y a través de un análisis de sensibilidad sugerir medidas para apoyar la toma de decisiones de empresas comprometidas con la recuperación. La industria nacional seleccionada es un fabricante de múltiples tipos de 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 idóneos de la fábrica 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. Además, conociendo el diseño actual del producto se propusieron recomendaciones al mismo para facilitar y beneficiar la remanufacturación.

Obtenido el caso de estudio, en primer lugar, se desarrolla un modelo de planificación de la producción con demanda determinística que intenta representar la funcionalidad actual de la planta, para ello fue necesaria la recolección, análisis y estimación de datos. El objetivo del mismo es minimizar los costos satisfaciendo la demanda diaria sin retrasos. El modelo fue validado mediante varios casos de prueba desarrollados de modo que incluya todas las funcionalidades. Luego se resolvió mediante resolución heurística y mediante resolución exacta. De esta forma se obtuvo una planificación diaria de la producción del año 2019 para las condiciones actuales de la planta. En segundo lugar, se plantea el escenario de la aplicación de la recuperación de los CAEs mediante un modelo de planificación de la producción con opciones de retorno y, demanda y retornos determinísticos. En este caso la demanda puede satisfacerse a partir de productos nuevos o remanufacturados y se representa mediante un modelo de programación lineal entera mixta (MILP, por sus siglas en inglés). El objetivo es determinar las cantidades a producir, remanufacturar y descartar en cada período para satisfacer la demanda sin retrasos y minimizando la suma de todos los costos involucrados.

El resto de este documento está organizado de la siguiente manera. En la Sección 1 se establece un marco teórico el cual consiste en un acercamiento al lector en la temática de recuperación de productos usados, en los problemas de planificación de la producción con y sin opciones de retorno, y en las características de los CAEs, así como también se presenta una descripción del mercado y la industria uruguaya de CAEs. Luego en la Sección 2 se presenta el caso de estudio donde se describen en primera instancia las características de la empresa relevada, 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. En segunda instancia se estudia la recuperabilidad de los CAEs, sugiriendo mejoras en el diseño actual para facilitar su recuperabilidad. Y 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 3 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 la resolución del problema y así sugerir medidas de apoyo en la toma de decisiones de la planta. Se termina con las conclusiones en la Sección 4.

1 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.

1.1. 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, remanufactura, 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 final de su vida útil (EoL, por sus siglas en inglés), cuando el mismo ya no cumple con las necesidades para las cuales fue creado [1].

La remanufactura es la única forma de recuperación en la cual necesariamente se igualan o mejoran las condiciones del producto nuevo [4]. De esta manera, permite a los consumidores tener productos generalmente a menor costo, 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 remanufactura 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 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 [5]. Según Tessa Vlaanderen, la remanufactura siempre que sea técnicamente factible, y no sea posible el reúso, 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].

1.2. 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].

1.2.1. 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 mantenimiento de 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, si se alcanza una solución óptima, será aquella en la que se produce solamente si el nivel de inventario precedente es cero. A esto le llamaron propiedad de inventario-cero.

Existen distintas herramientas informáticas para la resolución de problemas de programación lineal como son los lenguajes algebraicos GLPK y AMPL. Las estrategias de resolución pueden agruparse en dos grandes categorías: métodos de resolución exacta y métodos de resolución heurística. Para problemas de producción de tamaño mediano y grande en muchas situaciones se requiere una gran capacidad de cómputo para poder encontrar soluciones factibles y más aún para obtener soluciones óptimas. Una clasificación de las heurísticas fue dada por Maes y Wassenhove [18] definiéndolas en dos grandes categorías: heurísticas de un único recurso y heurísticas basadas en programación matemática. Las primeras se conocen como de "sentido común", ya que se rigen por reglas prácticas intentando explotar aspectos específicos del problema, como propiedades de lotes, de la demanda o de los inventarios. Las segundas se basan en la búsqueda de óptimos a partir de métodos de programación matemática clásica, por lo que son menos intuitivos que los anteriores.

1.2.2. 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 Sombrotzki (2000) [19] 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 1.2-1 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.

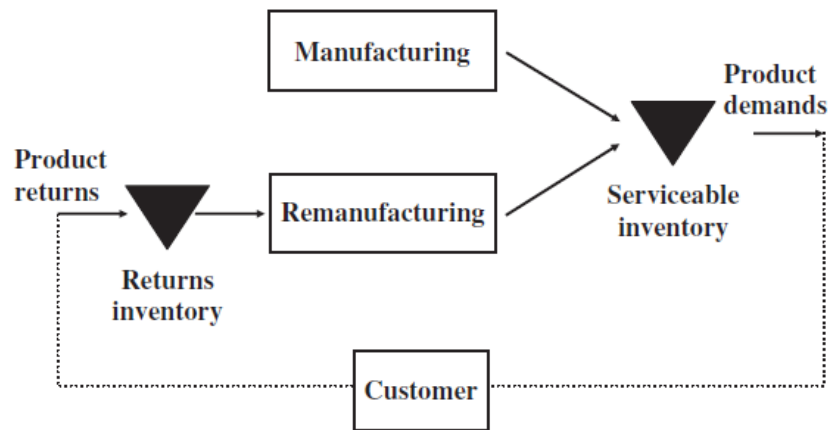


Figura 1.2-1: Flujo de los productos en el sistema con remanufactura planteado por Teunter et al. (2006) [2]

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) [20], Mahapatra et al. (2012) [21] y Piñeyro (2016) [22].

A modo de ejemplo se describe el problema estudiado por Piñeyro [22], 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 se podrían extender para considerar más de un producto.

1.3. 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” [23]. 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) [24]. 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” [25].

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 [24]. 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 [26].

1.3.1. 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 1.3-1 y se describen brevemente a continuación.

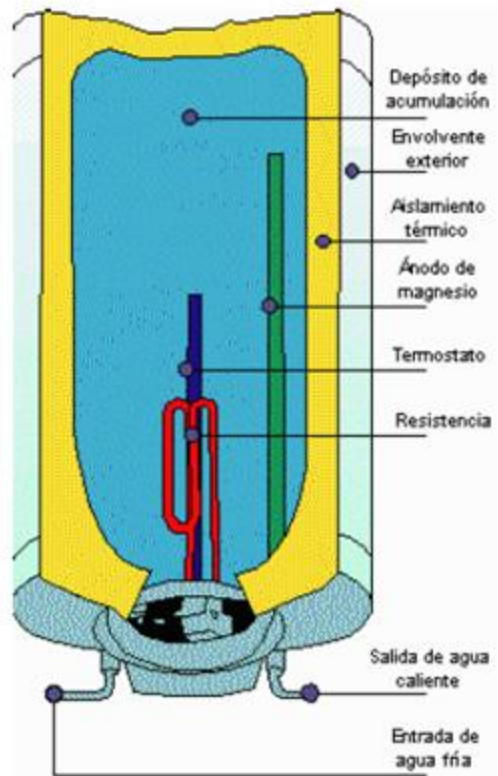


Figura 1.3-1: Esquema del corte transversal de un CAE que muestra sus principales componentes [26]

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 [26].

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 [26].

Envoltorio exterior:

La envoltorio exterior es la que encierra y cubre todos los demás componentes y generalmente se fabrica en chapa de acero pintada [26].

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 1.3-2 *Figura 1.3-1*. Las resistencias pueden colocarse en la tapa inferior del CAE (a), lateralmente a la superficie cilíndrica (b) o en la tapa superior del CAE (c).

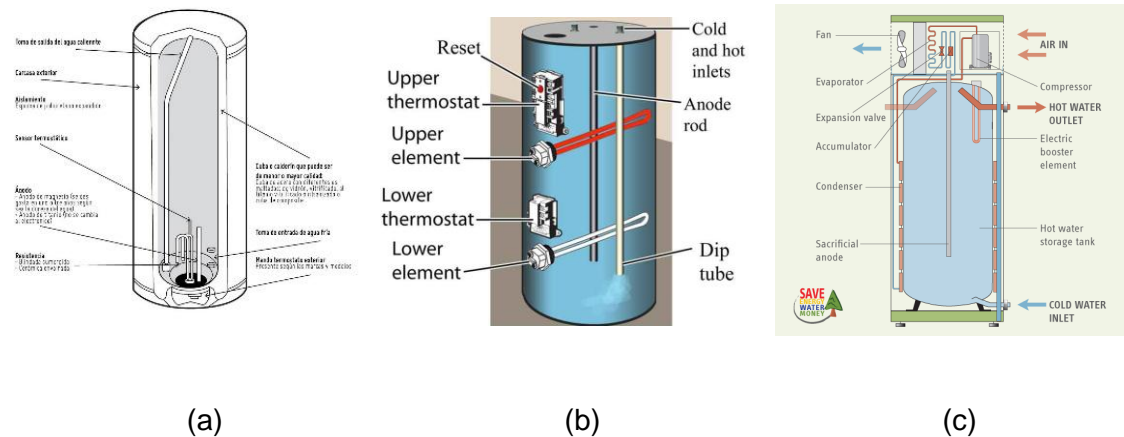


Figura 1.3-2: Posibles ubicaciones de la resistencia en un CAE.

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 [26] [27] [28].

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:

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

- La vida útil o tiempo de protección se expresa en años (1 año = 8760 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 $0,032\ W/mK$) o lana de vidrio ($0,035\ W/mK$). A modo de comparación, en la Figura 1.3-3 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 1.3-3: Aislantes y sus respectivas conductividades térmicas [34]

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 [29]. 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 [26] [30].

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 [31] [26] [24].

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 [32] [24].

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 [32].

1.3.2. 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 [33]

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 a 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 [34].

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, la Administración Nacional de Usinas y Transmisiones Eléctricas (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 [35]. 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.

2 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.

2.1. 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.

2.2. 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 se muestran en la Figura 2.2-1 y Figura 2.2-2.

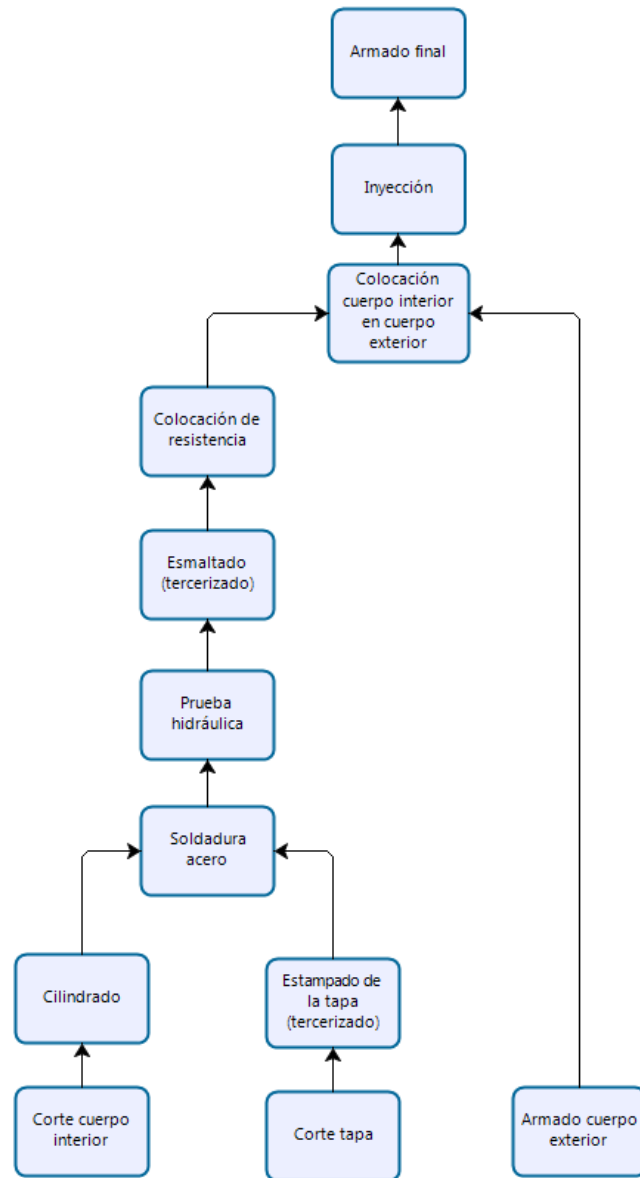


Figura 2.2-1: Representación esquemática del proceso productivo de los CAEs con tanque interior de acero.

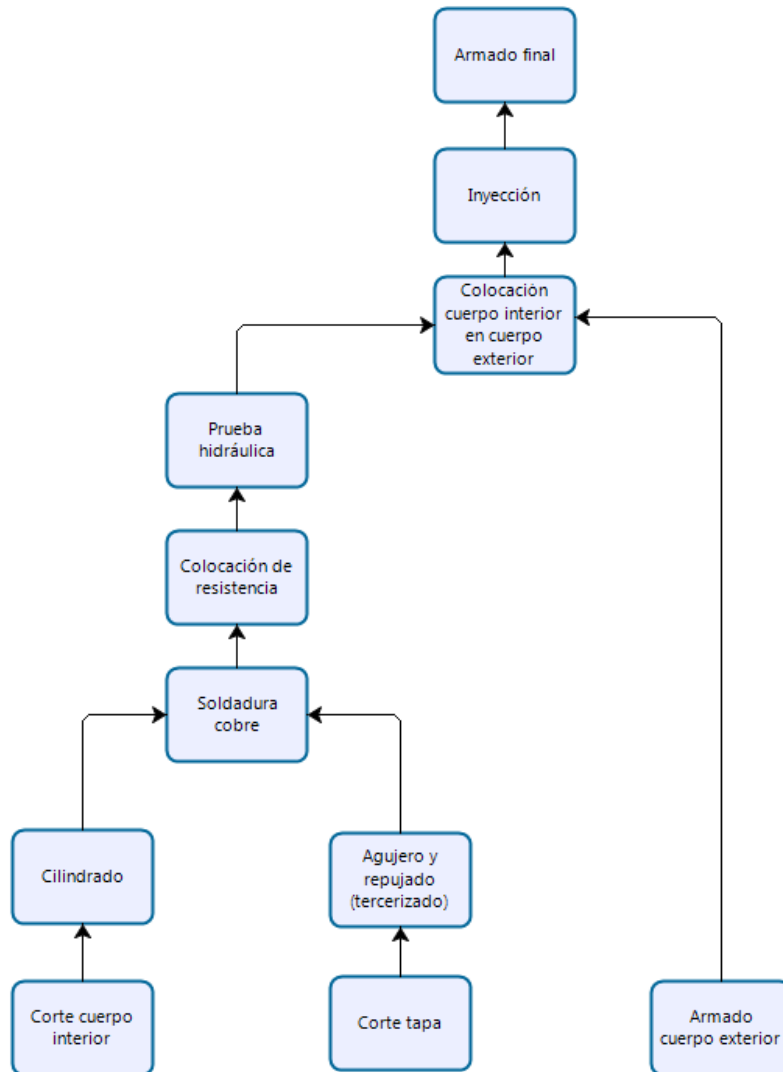


Figura 2.2-2 Representación esquemática del proceso productivo de los CAEs con tanques de cobre.

Como se puede observar en la Figura 2.2-1 y Figura 2.2-2, 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 cm. La resistencia es blindada y se introduce sumergida en la parte inferior centrada dentro del tanque junto con un ánodo de magnesio de 40 cm 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.

2.3. Problema 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 [36].

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 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.

2.3.1. 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 2.3 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.

2.3.1.1. 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.

2.3.1.2. 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

2.3.1.3. 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 $A = \sum_{t \in T} \sum_{i \in I} D_{ti}$

2.3.1.4. 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

2.3.1.5. 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.

2.3.2. 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.

2.3.3. 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 funcionalidades del modelo 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.

2.3.4. 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 2.3-1 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.

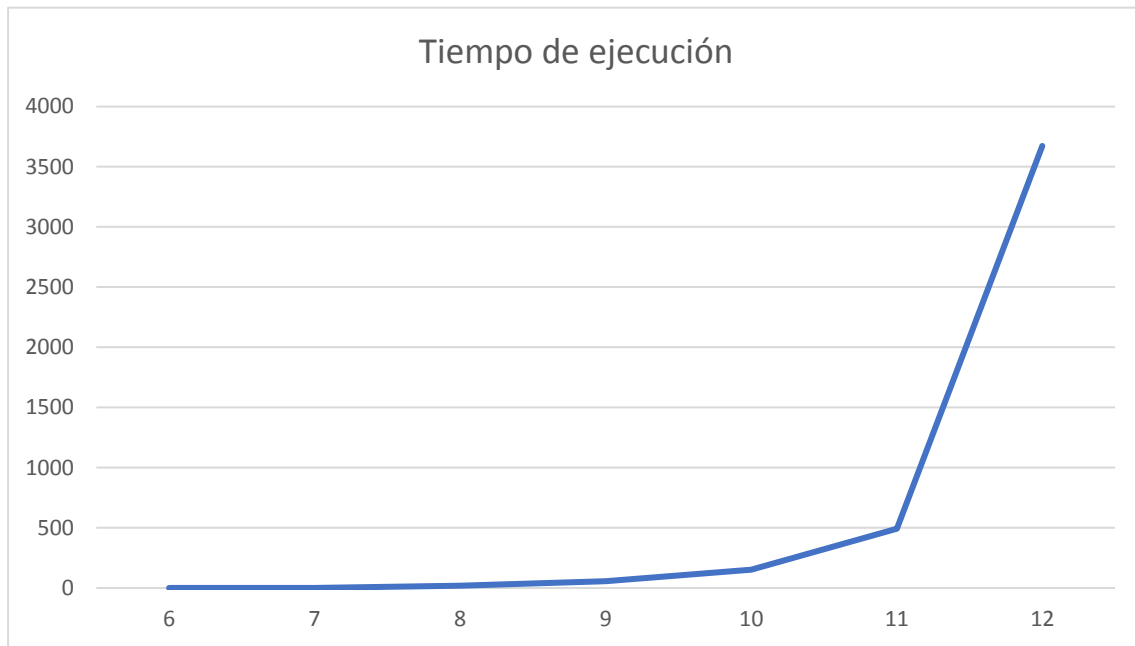


Figura 2.3-1: Evolución de tiempos de ejecución insumidos para la obtención de soluciones óptimas para el modelo sin opciones de retorno

De la Figura 2.3-1 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 que soporten problemas de mayor complejidad, 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.

2.3.4.1. Resolución mediante método heurístico

Una heurística natural que surge para resolver el problema 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 periodos 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

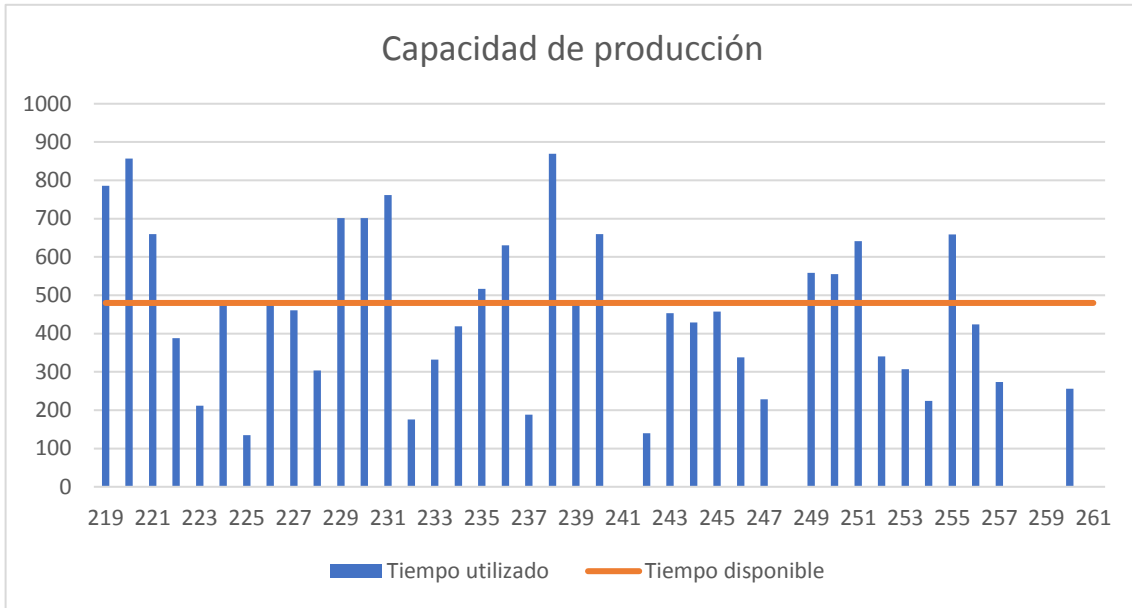


Figura 2.3-2: Capacidad de producción en minutos para los últimos dos meses del año, sin la restricción (24) de capacidad máxima de producción

De la Figura 2.3-2 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

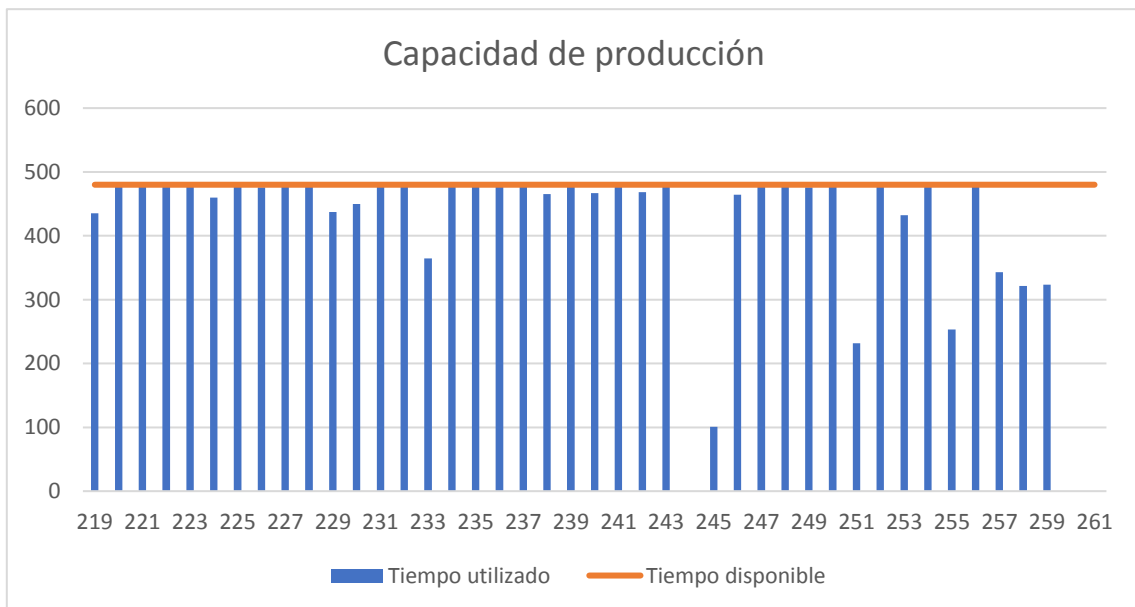


Figura 2.3-3: Capacidad de producción en minutos para los últimos dos meses del año, sin las restricciones (33), (34) y (35) de producción de la planta

De la Figura 2.3-3 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 2.3-2 y Figura 2.3-3 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 2.3-4.

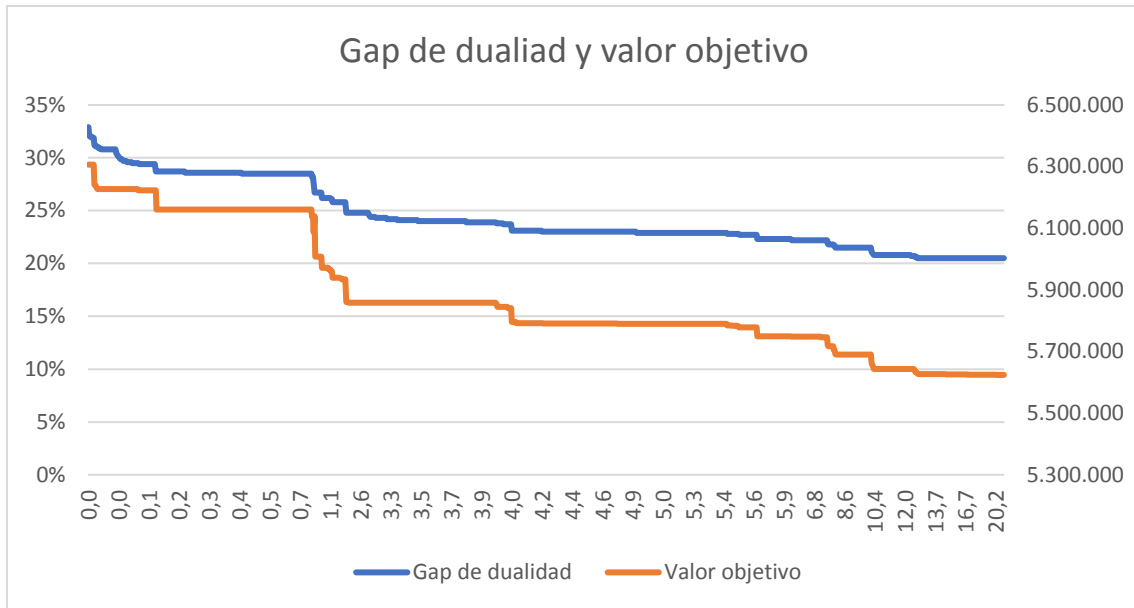


Figura 2.3-4: Evolución del gap de dualidad y del valor objetivo en 24 horas en la resolución del último subproblema de la heurística

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 2.3-1 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 2.3-1: Resolución del problema mediante método heurístico

2.3.4.2. 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 2.3-2.

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 2.3-2: 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.

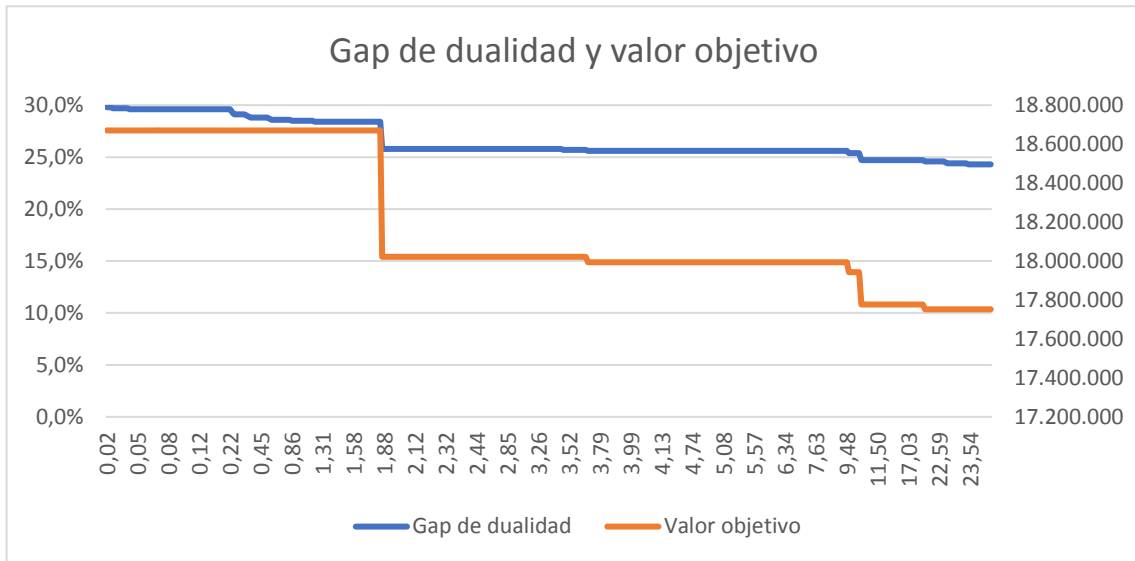


Figura 2.3-5: Evolución del gap de dualidad y del valor objetivo en la resolución exacta del problema en 24 horas

De la Figura 2.3-5 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.

2.3.5. Interpretación de los resultados

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

2.3.5.1. Del 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 2.3-6.

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

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

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

$$\sum_{i \in I} \sum_{m \in MP} HM_{mz_{mi}} = USD 10.471.786$$

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

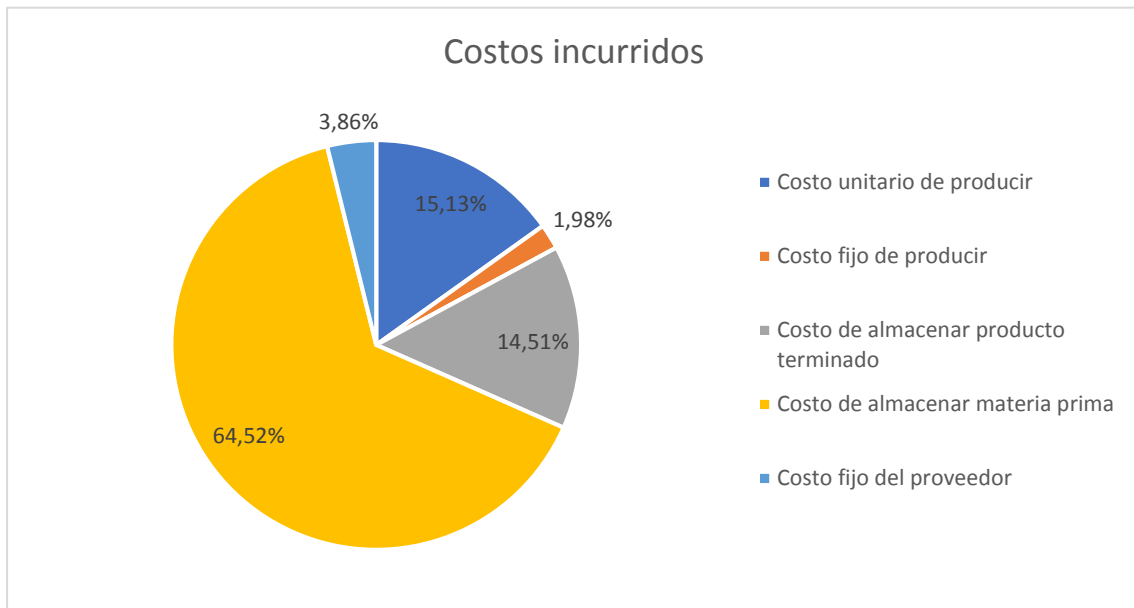


Figura 2.3-6: Grafico de torta que representa la distribución de los costos incurridos con la planificación dada por la resolución heurística del problema

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 2.3-7 y Figura 2.3-8 se muestra el almacenamiento de producto terminado y de materia prima respectivamente, en todo el horizonte de planificación de un año.

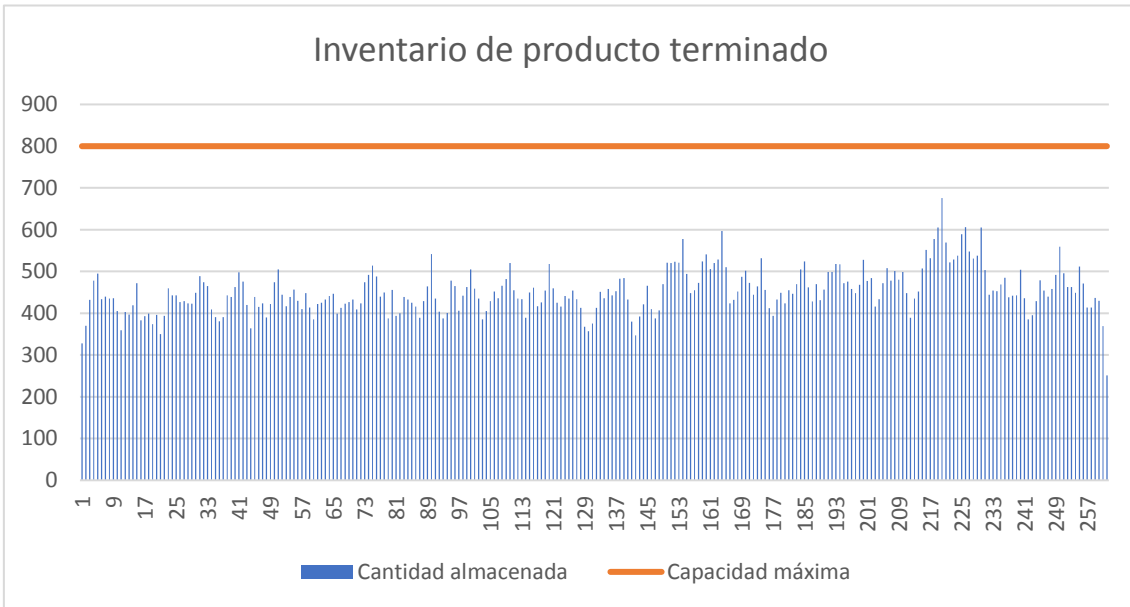


Figura 2.3-7: Cantidad de CAEs almacenados en el horizonte de planificación de un año, para la resolución heurística

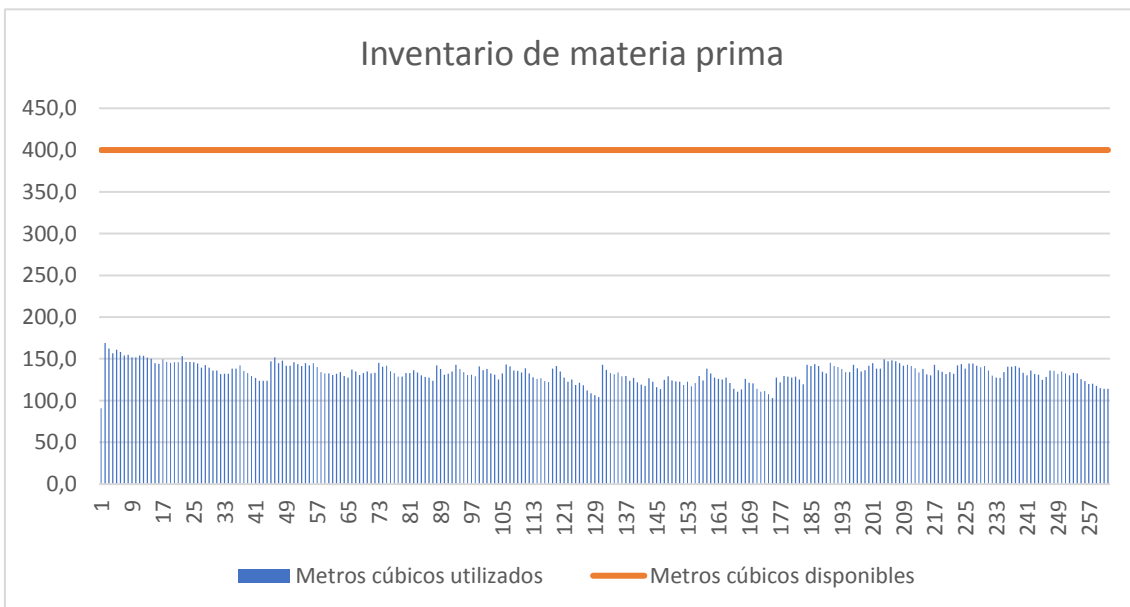


Figura 2.3-8: Cantidad de materia prima ocupada (en m^3) en el horizonte de planificación de un año, para la resolución heurística

De la la Figura 2.3-7 y Figura 2.3-8 y se desprende que el mayor espacio ocupado por materia prima en todo el horizonte de planificación es de 169 metros cúbicos en el período 2, 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).

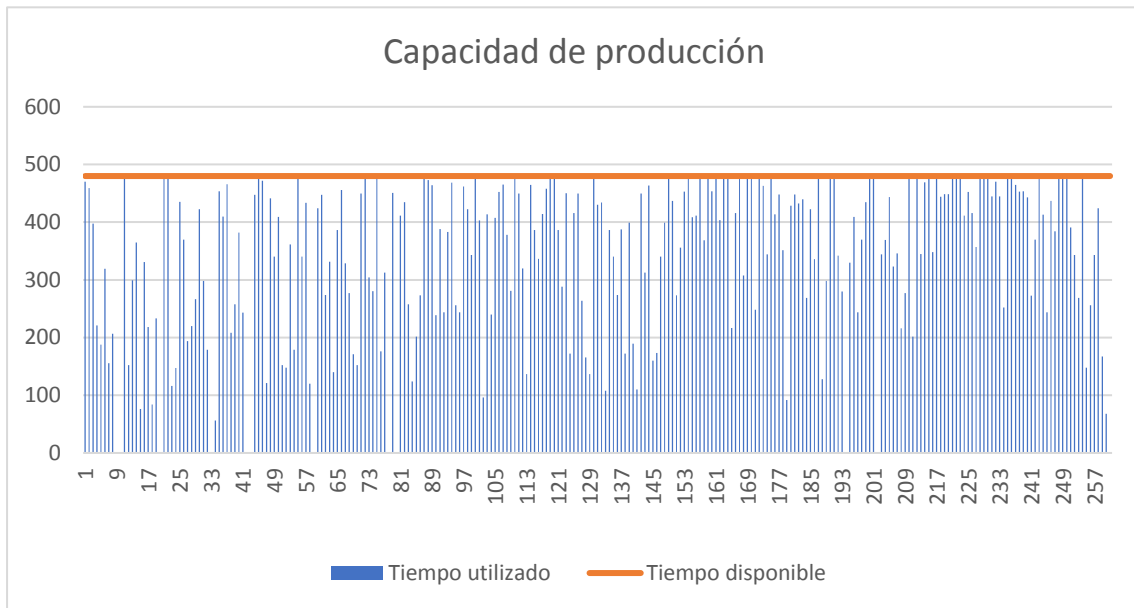


Figura 2.3-9: Capacidad de producción en minutos en el horizonte de planificación de un año, para la resolución heurística

A partir de la Figura 2.3-9 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 2.3-3 se presenta un diagrama de Gantt en donde se presenta la planificación sugerida por el método de resolución exacta.

Períodos/CAEs	TCP20L	TCP30L	TCP40L	TCP50L	TCP60L	TA30L	TA45L	TA60L
Enero	Barra verde	Barra naranja	Barra amarilla	Barra azul claro	Barra naranja	Barra verde	Barra magenta	
	Barra verde	Barra naranja	Barra amarilla	Barra azul claro		Barra verde	Barra magenta	
	Barra verde	Barra naranja	Barra amarilla	Barra azul claro	Barra naranja	Barra verde	Barra magenta	Barra azul oscuro
	Barra verde	Barra naranja	Barra amarilla	Barra azul claro		Barra verde	Barra magenta	
Febrero	Barra verde	Barra naranja	Barra amarilla	Barra azul claro	Barra naranja	Barra verde	Barra magenta	
	Barra verde	Barra naranja	Barra amarilla	Barra azul claro		Barra verde	Barra magenta	
	Barra verde	Barra naranja	Barra amarilla	Barra azul claro	Barra naranja	Barra verde	Barra magenta	Barra azul oscuro
	Barra verde	Barra naranja	Barra amarilla	Barra azul claro		Barra verde	Barra magenta	
Marzo	Barra verde	Barra naranja	Barra amarilla	Barra azul claro	Barra naranja	Barra verde	Barra magenta	Barra azul oscuro
	Barra verde	Barra naranja	Barra amarilla	Barra azul claro		Barra verde	Barra magenta	Barra azul oscuro
	Barra verde	Barra naranja	Barra amarilla	Barra azul claro	Barra naranja	Barra verde	Barra magenta	Barra azul oscuro
	Barra verde	Barra naranja	Barra amarilla	Barra azul claro		Barra verde	Barra magenta	
Abril	Barra verde	Barra naranja	Barra amarilla	Barra azul claro	Barra naranja	Barra verde	Barra magenta	Barra azul oscuro
	Barra verde	Barra naranja	Barra amarilla	Barra azul claro		Barra verde	Barra magenta	
	Barra verde	Barra naranja	Barra amarilla	Barra azul claro	Barra naranja	Barra verde	Barra magenta	Barra azul oscuro
	Barra verde	Barra naranja	Barra amarilla	Barra azul claro		Barra verde	Barra magenta	

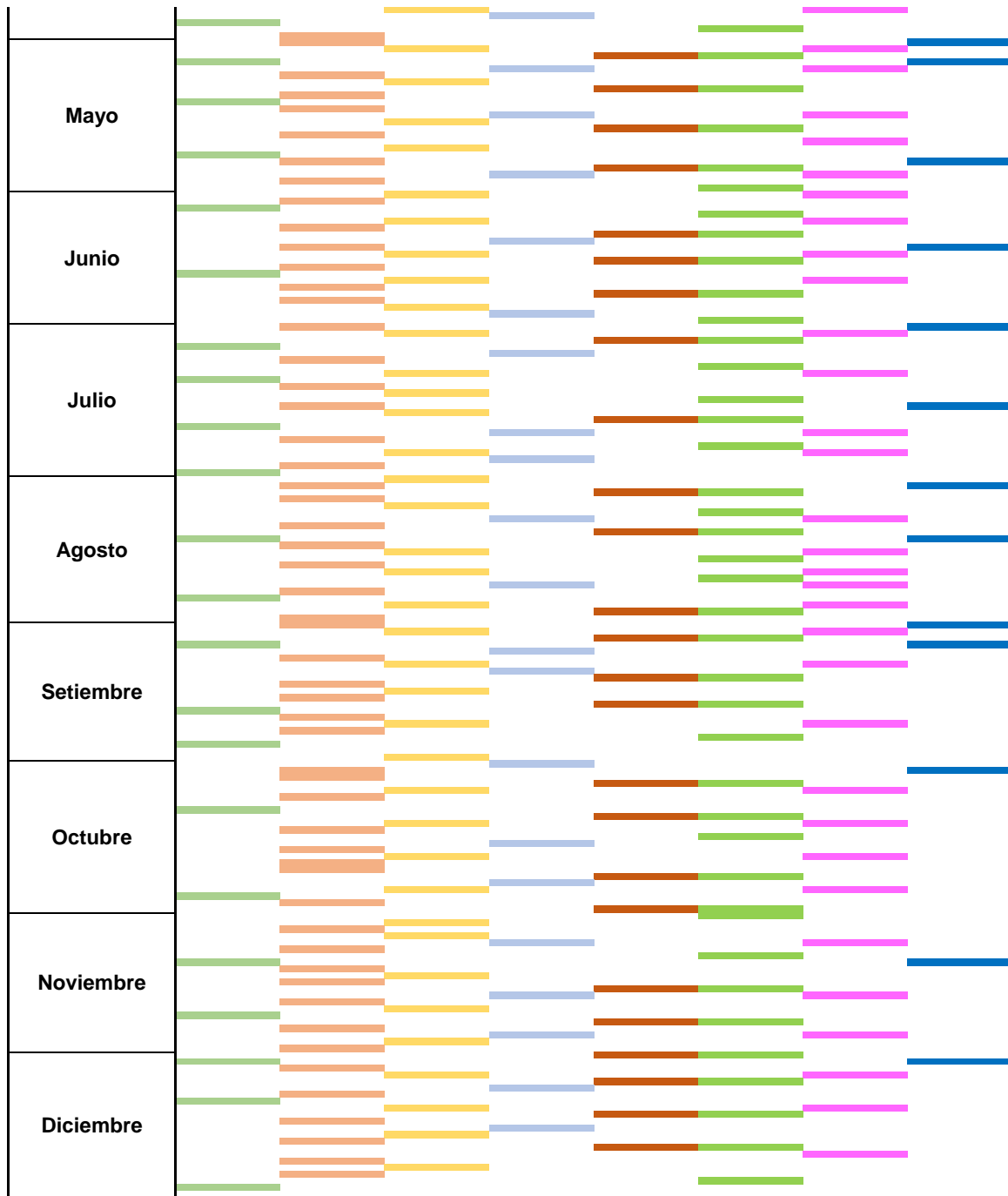


Tabla 2.3-3: Diagrama de Gantt que muestra en qué período se producen los distintos modelos de CAE, para la resolución heurística

En la Tabla 2.3-3 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.

2.3.5.2. Del 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:

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

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

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

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

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

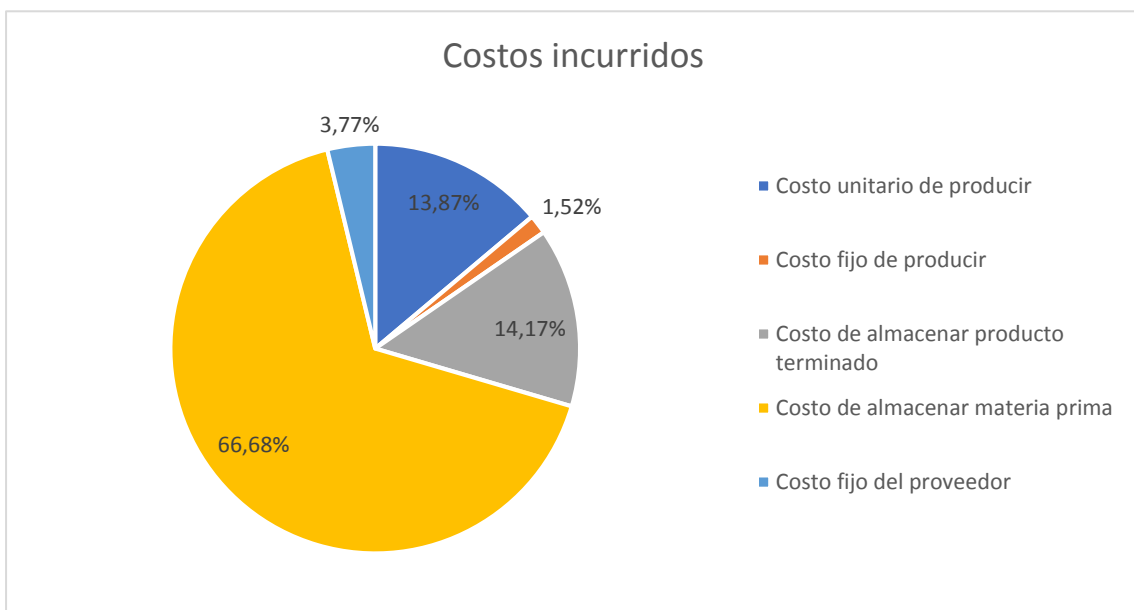


Figura 2.3-10: Gráfico de torta que representa la distribución de los costos incurridos con la planificación dada por la resolución exacta del problema

Se observa de la Figura 2.3-10 que la distribución de costos es muy similar a la obtenida mediante el método heurístico. A continuación, en la Figura 2.3-11 y en la Figura 2.3-12 se muestra el almacenamiento de materia prima y de producto respectivamente, en todo el horizonte de planificación de un año.

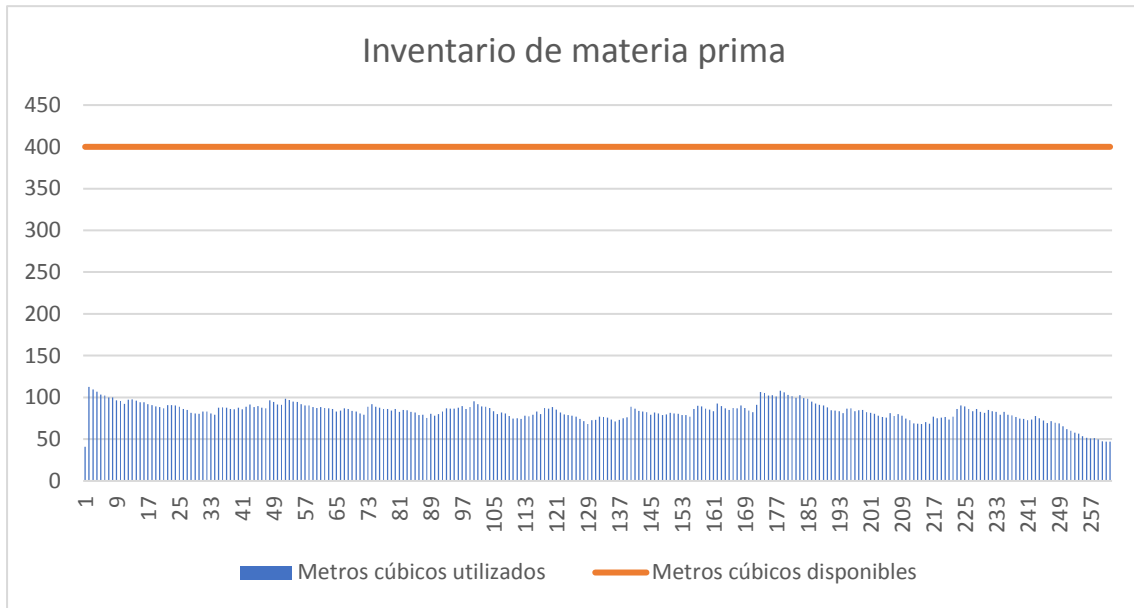


Figura 2.3-11: Cantidad de materia prima ocupada (en m²) en el horizonte de planificación de un año, para la resolución exacta

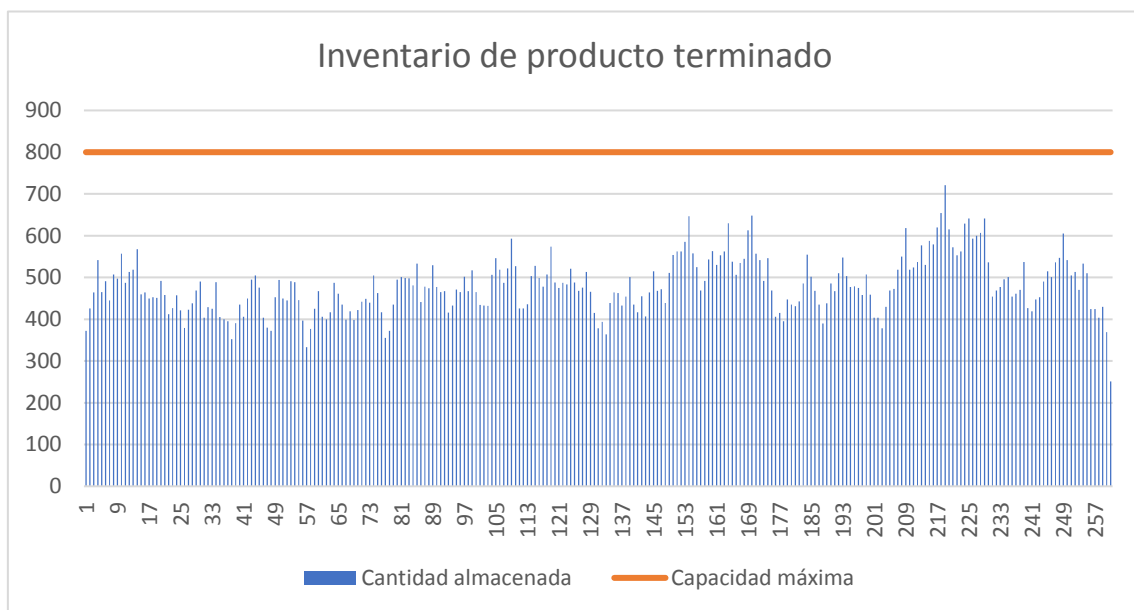


Figura 2.3-12: Cantidad de CAEs almacenados en el horizonte de planificación de un año, para la resolución exacta

De la Figura 2.3-11 y Figura 2.3-12 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 2.3-13* 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.

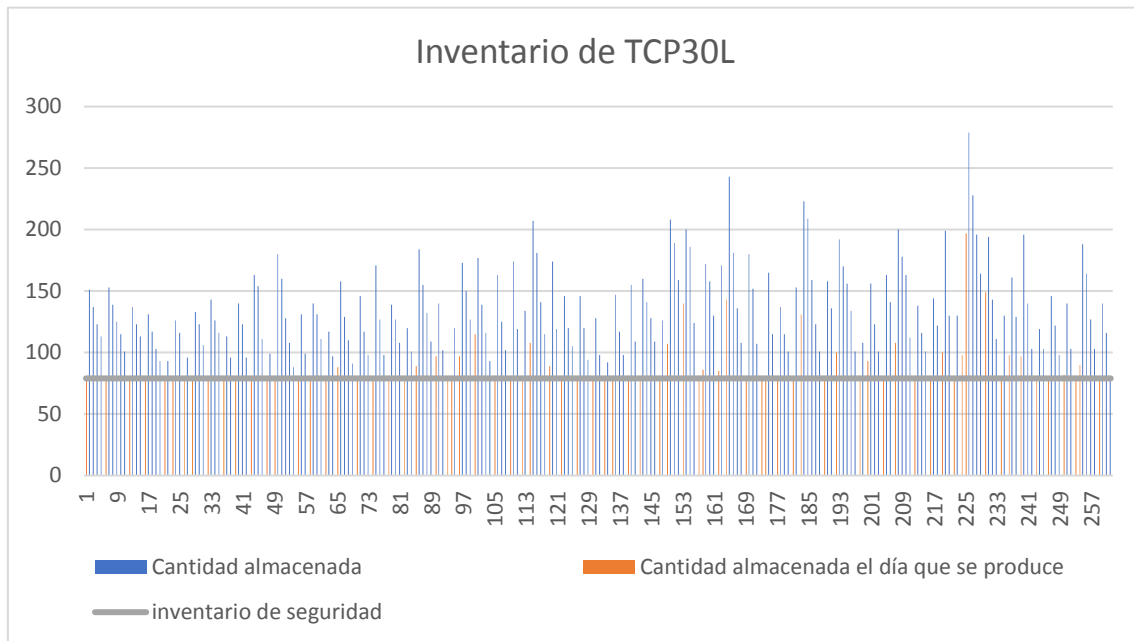


Figura 2.3-13: Cantidad de CAEs tipo TCP30L almacenados en el horizonte de planificación de un año y su inventario de seguridad a satisfacer. Las barras en color naranja representan el período en el que se produce y la cantidad

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 [15] para problemas no capacitados, detallado en la Sección 1.2.1, 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 2.3-13 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.

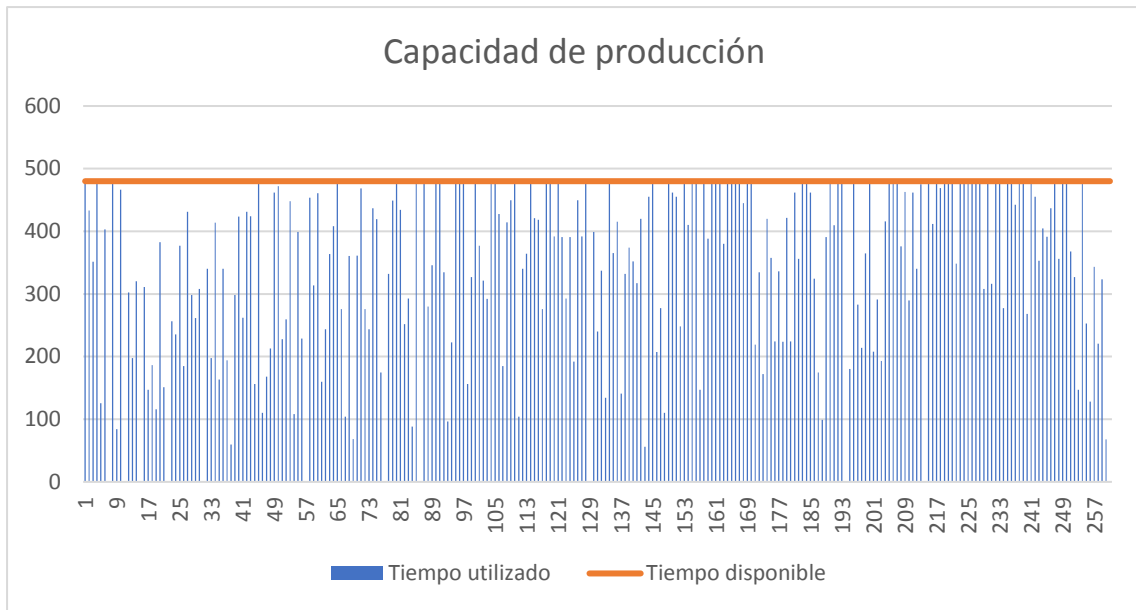


Figura 2.3-14: Capacidad de producción en minutos en el horizonte de planificación de un año, para la resolución exacta

De la Figura 2.3-14 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 2.3-4 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 bars]	[Orange bars]	[Yellow bars]	[Blue bars]	[Brown bars]	[Light Green bars]	[Pink bars]	[Dark Blue bars]
Febrero	[Green bars]	[Orange bars]	[Yellow bars]	[Blue bars]	[Brown bars]	[Light Green bars]	[Pink bars]	[Dark Blue bars]
Marzo	[Green bars]	[Orange bars]	[Yellow bars]	[Blue bars]	[Brown bars]	[Light Green bars]	[Pink bars]	[Dark Blue bars]
Abril	[Green bars]	[Orange bars]	[Yellow bars]	[Blue bars]	[Brown bars]	[Light Green bars]	[Pink bars]	[Dark Blue bars]
Mayo	[Green bars]	[Orange bars]	[Yellow bars]	[Blue bars]	[Brown bars]	[Light Green bars]	[Pink bars]	[Dark Blue bars]

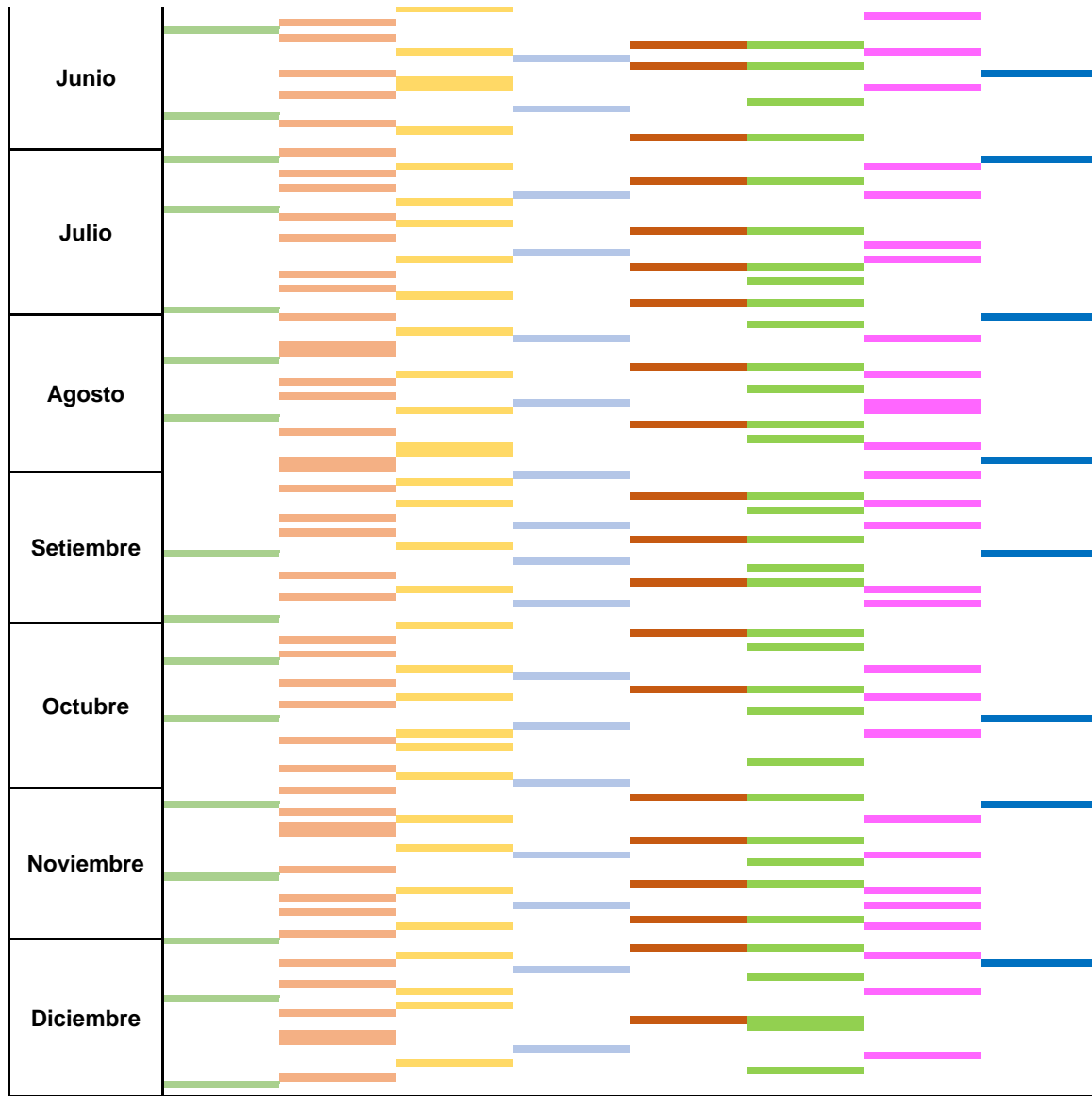


Tabla 2.3-4: Diagrama de Gantt que muestra en qué período se producen los distintos modelos de CAE, para la resolución exacta

Se verifica de la Tabla 2.3-4 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.

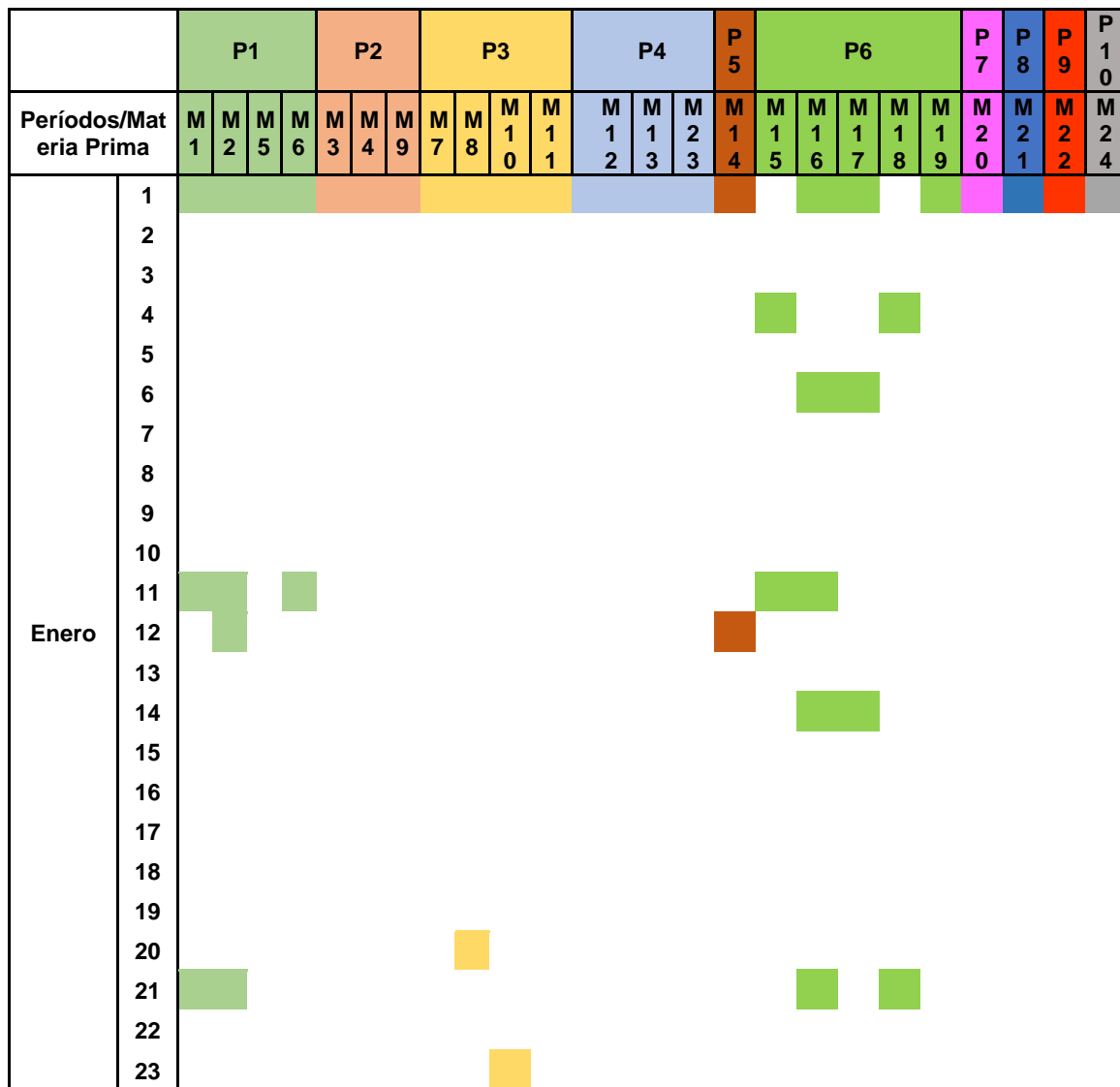


Tabla 2.3-5: Diagrama de Gantt que muestra en qué período se pide cual materia prima para el mes de enero

De la Tabla 2.3-5 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 2.3-5, se les debe restar el plazo de entrega del proveedor.

2.3.5.3. 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 2.3-6: 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 2.3-6 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. Si bien no se puede asegurar cuánto tiempo más de ejecución se necesita para obtener mejoras en el valor objetivo mediante el método exacto, se puede predecir analizando la Figura 2.3-5 que si en 24 horas mejoró un 5%, en 48 horas podría mejorar un 10%. A su vez, el valor objetivo logrado mediante resolución heurística es 8,1% menor comparado con al de resolución exacta, pero habiéndolo ejecutado durante 42 horas. Por lo tanto, si se ejecutara por 42 horas también mediante resolución exacta tal vez se obtendrían mejoras en el valor

objetivo, similares al obtenido de la heurística. Sin embargo, 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, es decir, nuestras computadoras personales. 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 achicar los tamaños mínimos de pedido, bajo las mismas condiciones de costos, o sino 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.

2.4. 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 la remanufacturación por lo que ciertos tipos de productos son más adecuados para remanufacturar que otros. Se considera que los CAEs son productos aptos para la remanufacturación, ya que son lo suficientemente duraderos como para soportar múltiples ciclos de vida, tienen un ritmo de evolución tecnológica lento, un valor residual relativamente alto, no están sujetos a decisiones de compra relacionadas con la moda y 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 remanufactura 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 [37]. 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 2.4-1 y Figura 2.4-2 se ilustran las gráficas de Pareto para el CAE más grande de cobre y de acero, respectivamente. De estas se observan los "pocos críticos" a la izquierda y los "muchos no críticos" a la derecha.

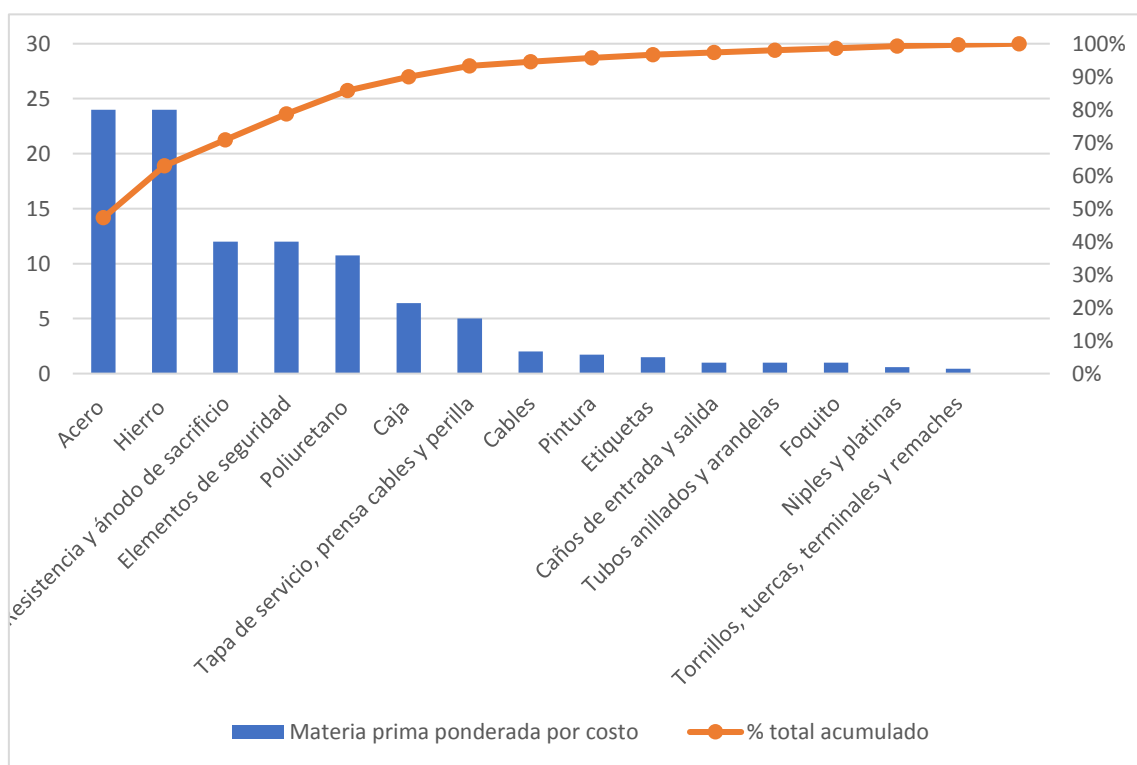


Figura 2.4-1: Gráfica de Pareto de la materia prima y la cantidad requerida para la producción del CAE más grande de cobre, ponderada por costo

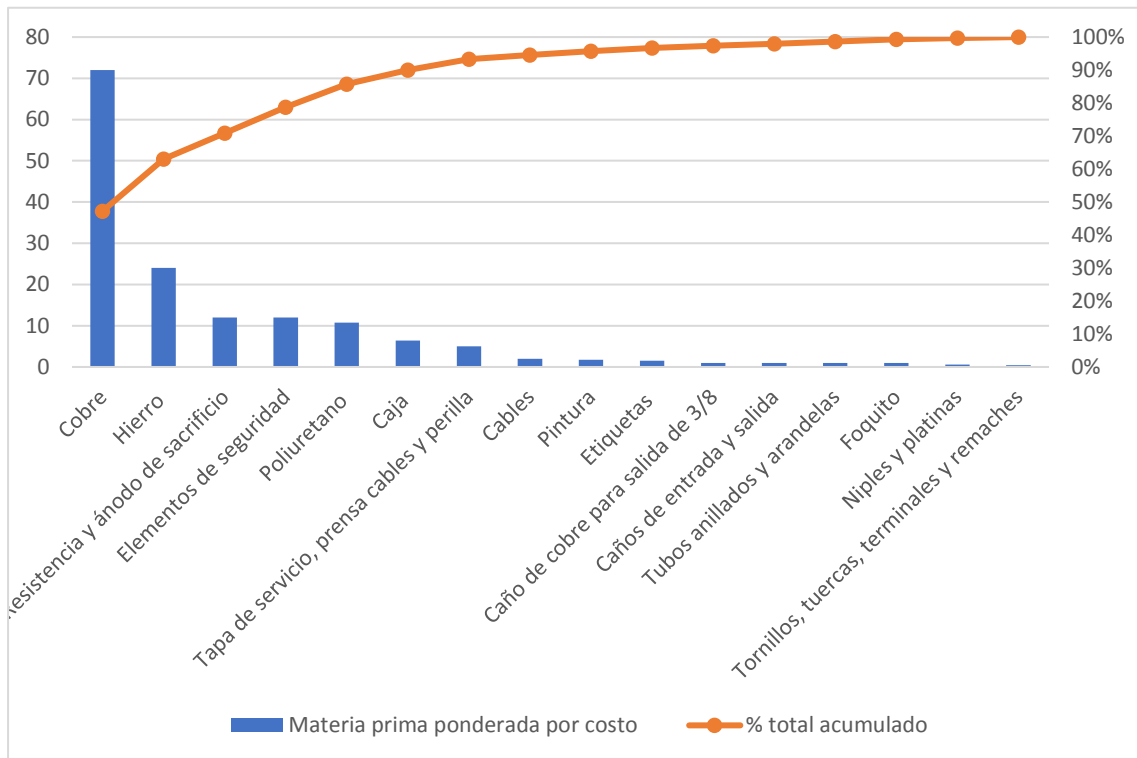


Figura 2.4-2: Gráfica de Pareto de la materia prima y la cantidad requerida para la producción del CAE más grande de acero, ponderada por costo

De la Figura 2.4-1 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 2.4-2 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
- Envolvente 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 [38]. 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 2.4-3 y Figura 2.4-4 se pretende mostrar la base metálica y el estado en el que se encuentra la resistencia y ánodo luego de 5 años de uso.

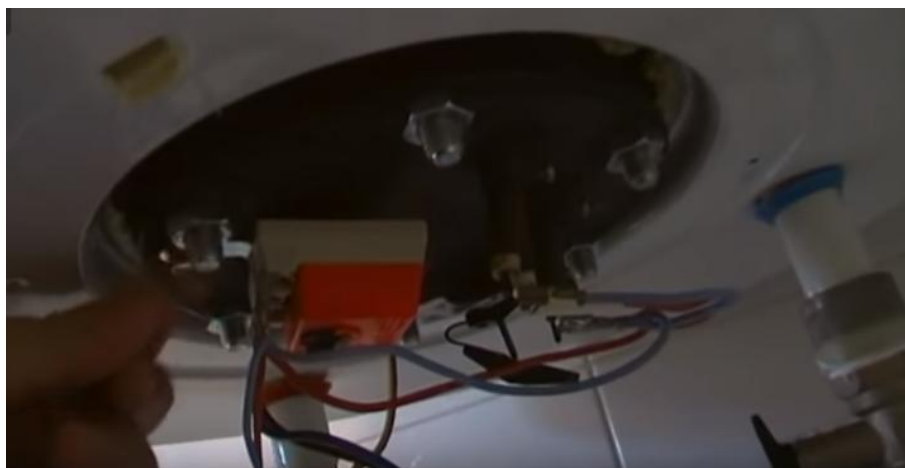


Figura 2.4-3 Extracción de la base metálica del CAE [46]



(a)



(b)

Figura 2.4-4: (a) Resistencia y ánodo calcificados extraídos de un CAE con 5 años de uso (b) Resistencia descalcificada luego de realizarle la limpieza [46]

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). Las aguas que superen este valor se conocen como extremadamente duras. Según un análisis realizado por OSE y publicado en su sitio web, el grado de dureza de una muestra de agua bruta (aquella que no ha recibido ningún tratamiento) es de $127 \text{ mg/L de CaCO}_3$ y luego de filtrada, es de $90 \text{ mg/L de CaCO}_3$. 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 2.4-5 se muestra la separación de la envoltura exterior de la espuma de poliuretano, lo cual resultaría imposible sin cortar la envoltura 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 2.4-5: Separación de la envoltura exterior del aislante de espuma de poliuretano expandido [47]

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 cómo se observa en la Figura 2.4-6 (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 2.4-6 (a).



(a)



(b)

Figura 2.4-6: (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 [48]

En la Figura 2.4-7 se muestra el tanque de acero y de cobre respectivamente, luego de haber desprendido todo el aislante de espuma de poliuretano.



(a)



(b)

Figura 2.4-7: (a) Tanque de acero tras haber desprendido todo el aislante [50] y (d) tanque de cobre tras haber desprendido todo el aislante [48]

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 [39]. 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 [39]. Para el caso del tanque de cobre, como se observa en la Figura 2.4-7 (b), el mismo no resultó oxidado luego de 8 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 [40].

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 2.4-8, donde se detallan las distintas rutas posibles a seguir para remanufacturar o descartar un retorno.

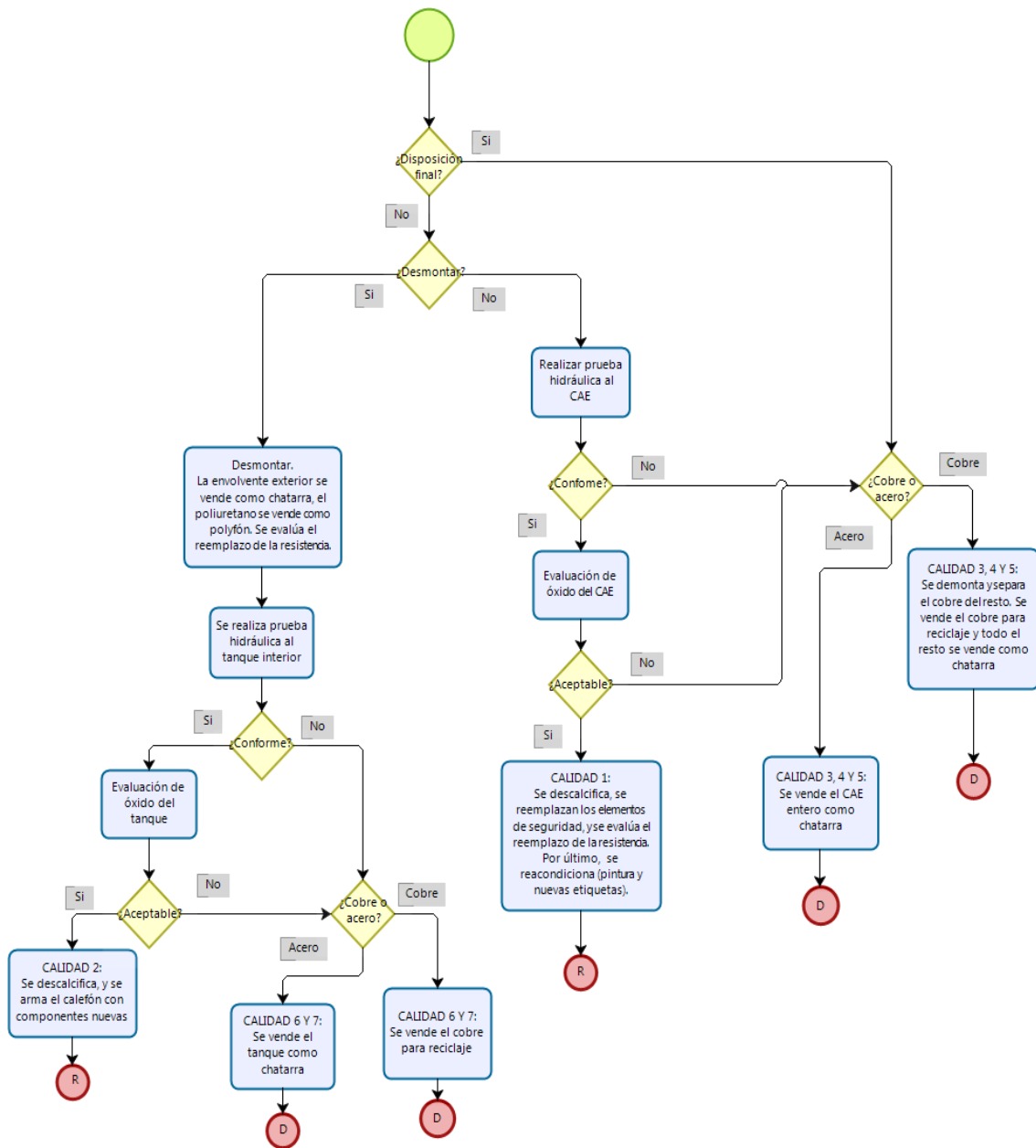


Figura 2.4-8: Rutas de recuperación de los CAEs retornados

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 inspección visual, la cual incluye evaluación de corrosión, abollones y roturas de la envolvente exterior. A partir del resultado de la 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 llenar el CAE de agua y presurizarlo por la cañería de entrada con todo el resto de la instalación cerrada, hasta alcanzar una presión igual a $1,5 \times P_{diseño}$. 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 2.4-8 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 [41]. 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.

2.4.1. Recomendaciones de diseño de CAEs

De acuerdo con lo mencionado en la Sección 1.1 se considera de suma importancia diseñar un producto con miras a la recuperación, teniendo en cuenta que este cambio resultaría en beneficios económicos y ambientales a largo plazo. Adicionalmente, se considera el desmontaje un factor muy importante para la recuperación de productos usados ya que puede ser el proceso que vincula el retorno del producto con la facilidad de su recuperación.

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 2.4-9, 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 2.4-10, 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 2.4-9: Ubicación normal del ánodo de sacrificio [51]

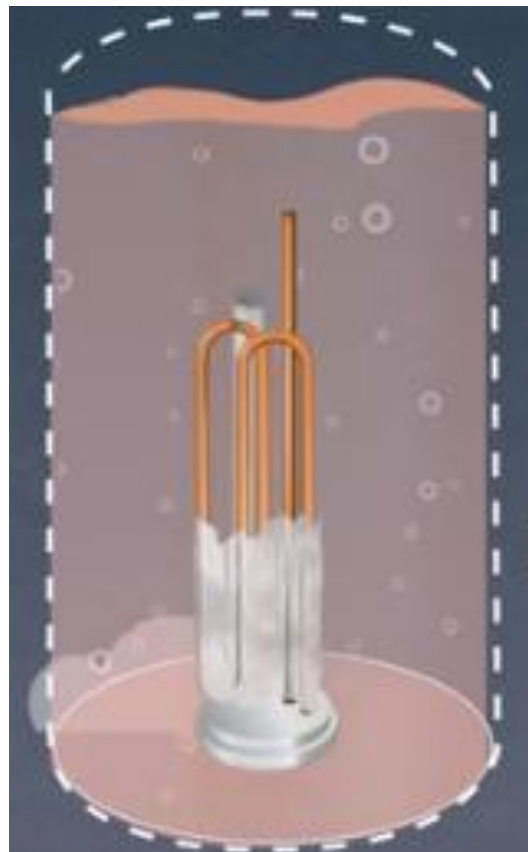


Figura 2.4-10: Proceso de calcificación [52]

Una empresa española fabricante de CAEs, Cointra [42], realizó un rediseño de sus productos considerando estos inconvenientes. Tal como se muestra en la Figura 2.4-11, 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

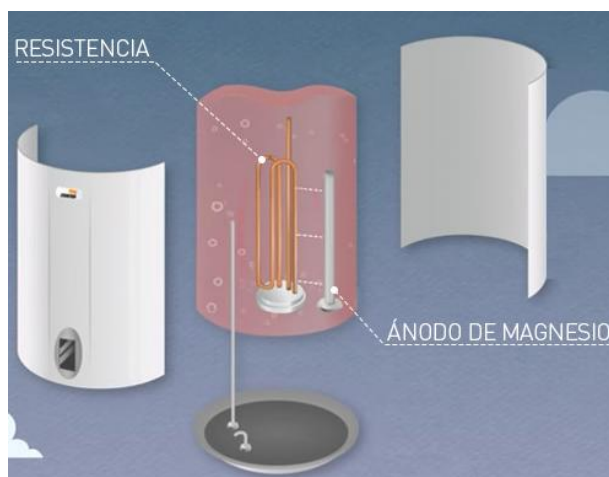


Figura 2.4-11: Colocación del ánodo de sacrificio separado de la resistencia [42]

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 2.4-12. 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 [43].



Figura 2.4-12: Doble sistema de protección anódica anticorrosión [43]

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 [28]. 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 [44].

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 [28].

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 [28].

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.

2.5. Problema con opciones de retorno

Luego de haber estudiado la recuperabilidad del CAE y de sus componentes, se describe el problema con opciones de retorno. En la presente sección se detallan las principales características y suposiciones que se establecen para abordar este problema, se presenta el modelo matemático que lo representa y su resolución.

Al igual que el problema sin opciones de retorno este es capacitado. 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 2.3. Para facilitar el problema 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 es heterogénea, es decir, 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, 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 son estacionarios. A su vez, se cuenta con un valor de rescate de los descartes, este 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 ELSR-HQ de Piñeyro (2016) con la opción de disposición final e incorporando una actividad de habilitación de los retornos. El problema se esquematiza en la siguiente figura.

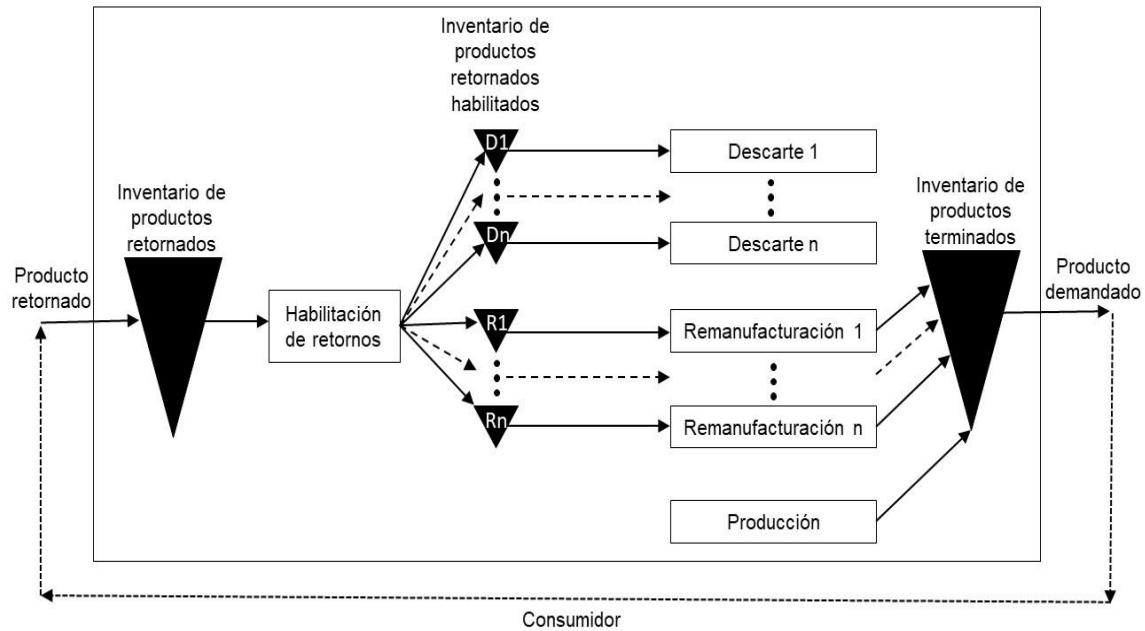


Figura 2.5-1: Flujo de productos en el sistema con opciones de retornos

En la Figura 2.5-1 se esquematiza el flujo de productos retornados y demandados en el sistema. Tal como se muestra en la figura la demanda se deber3 satisfacer sin retrasos a partir de productos nuevos o remanufacturados. Asimismo, se observa que existen tres inventarios distintos, esquematizados con tri3ngulos 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 habilitaci3n 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 tendr3n diferentes cantidades de cada calidad, seg3n los valores del porcentaje conocido. La importancia de este valor es que, sin 3l, el solver puede decidir habilitar los retornos de una calidad determinada y no de otras, lo cual parece poco realista.

2.5.1. Modelo matem3tico

Al igual que el problema sin opciones de retornos, el problema se describir3 mediante un modelo determin3stico con demanda y retornos din3micos en un horizonte de planificaci3n de un a3o, discretizado en d3as.

2.5.1.1. Objetivo

El objetivo es determinar las cantidades a producir, remanufacturar y descartar en cada per3odo durante el horizonte de planificaci3n para satisfacer la demanda a tiempo, minimizando la suma de todos los costos involucrados.

2.5.1.2. 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
- $QA = Q \setminus QB$

2.5.1.3. 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 remanufacturación 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

- I_{0t} : 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 $A = \sum_{t \in T} \sum_{i \in I} D_{ti}$

2.5.1.4. 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

2.5.1.5. 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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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 $\sum_{q \in Q} w_{qti}^{int} = w_{ti} \forall t \in T, \forall i \in I$ 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 ($\sum_{q \in Q} w_{qti}^{int} \forall t \in T, \forall i \in I$) 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 2.5.3 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:

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

$$w_{1,\hat{r},i}^{int} = \dots = w_{9,\hat{r},i}^{int} = 2$$

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 2.5.5.

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.

2.5.2. 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 de los retornos fueron la cantidad de retornos recibidos por período, el inventario de seguridad de producto terminado y la proporción de calidades de los retornos. 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.

2.5.3. 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 2.5.1 sin la restricción (64) para probar si en los 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 2.5.1, 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 funcionalidades del modelo. 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

2.5.4. 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 2.5-1 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 2.5-1: 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 bastante cercanas al óptimo, en tiempos de ejecución considerablemente menores.

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 máxima 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.

3. Relax-and-Fix

Si bien se tiene presente que lo más adecuado para sacar conclusiones en términos de mejoras computacionales es mediante una experimentación numérica basada en diferentes instancias, realizando ciertas pruebas puntuales se pueden identificar comportamientos o tendencias que redunden en mejoras ante relajaciones en el modelo. Se llevaron a cabo las heurísticas antes mencionadas para buscar comportamientos que podrían asemejarse a los reales. 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) es 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 basada en métodos de programación matemática [45]. Esta heurística establece que 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)

$$\min \quad cx + fy: Ax + By \geq b \quad (68)$$

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

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

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

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

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 en su completitud 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 5 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 2.5-2 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 2.5-2: 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 tres políticas distintas. Las políticas experimentadas 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 en la Tabla 2.5-3.

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 2.5-3: Ejecución de las políticas en el modelo con opciones de retornos para el mes de setiembre

De los resultados de la Tabla 2.5-3 se aprecia que dos de las políticas experimentadas mejoran los tiempos de cómputo en las cuatro horas de ejecución, con respecto a la formulación original. Por lo tanto, las políticas pueden ser convenientes en términos de tiempos de ejecución para 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.

2.5.5. 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 2.5.4 se obtuvieron mediante la resolución con la segunda política, por ser la que logró un mejor valor objetivo en un mismo tiempo de ejecución.

2.5.5.1. Del problema sin opciones de retorno para el mes de setiembre

El problema sin opciones de retornos, a diferencia del problema con, incluye la gestión de compra. 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. 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 2.5-2 se ilustra la forma que se distribuyen los 378.162, correspondientes a los costos de producción y de mantener inventario de producto terminado.

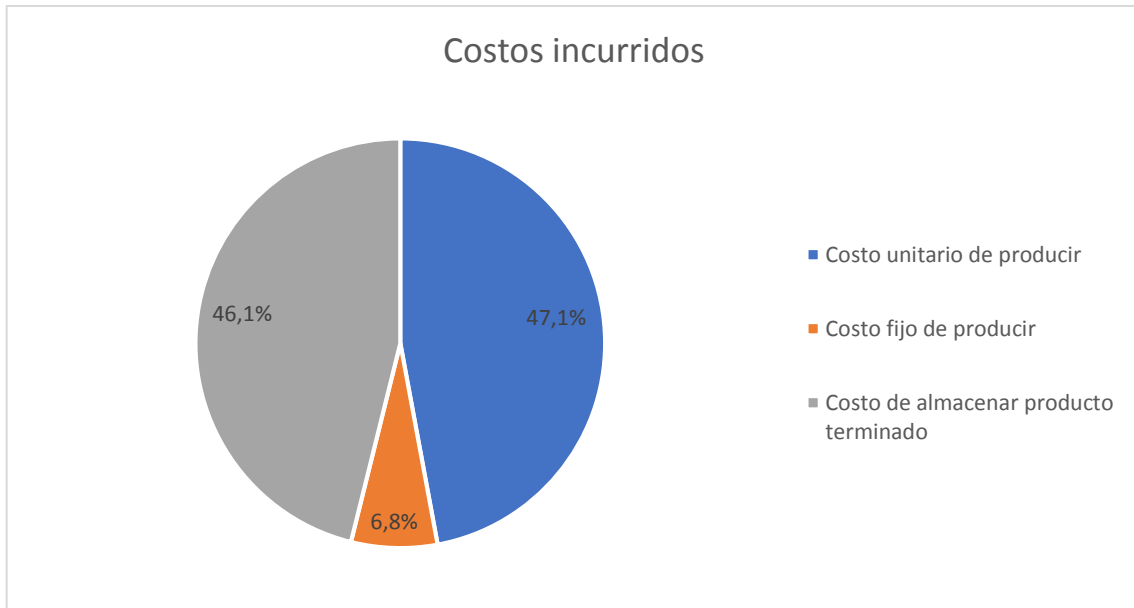


Figura 2.5-2: Gráfico de torta que representa la distribución de los costos incurridos con la planificación dada para el mes de setiembre para el modelo sin opciones de retorno (no se incluye la gestión de compra).

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. 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 2.3.5.

A partir de los resultados obtenidos se grafica en primer lugar el inventario de productos terminados en la Figura 2.5-3 y en segundo lugar en la Figura 2.5-4 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.

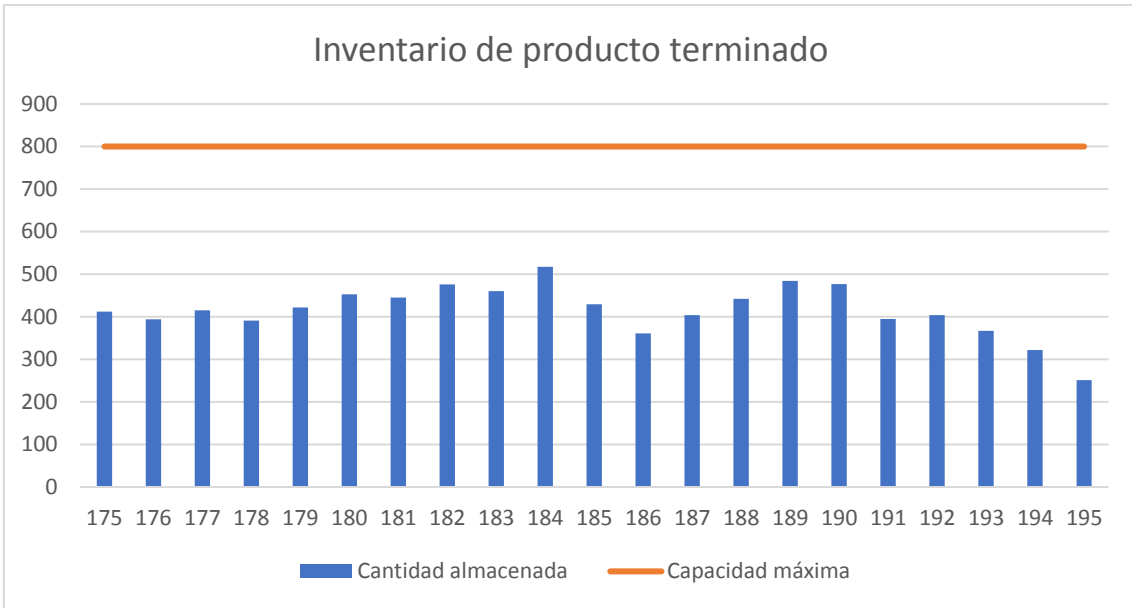


Figura 2.5-3: Inventario de producto terminado para el problema sin opciones de retorno para el mes de setiembre

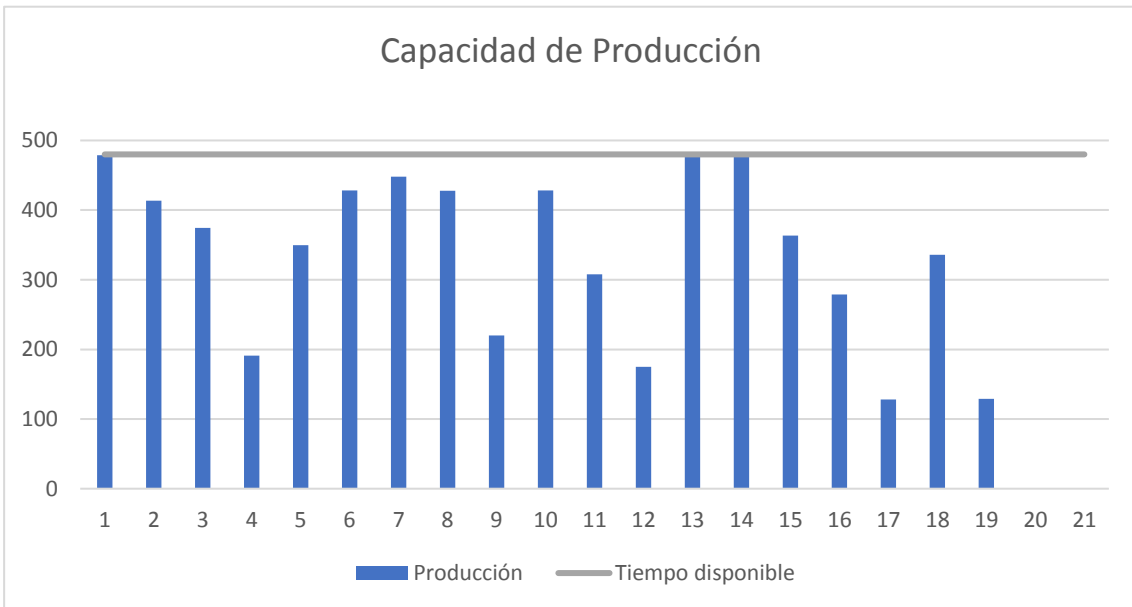


Figura 2.5-4: Capacidad de producción en minutos para el problema sin opciones de retorno para el mes de setiembre

La gráfica de la Figura 2.5-3 muestra el inventario de producto terminado y el cumplimiento con la capacidad máxima de almacenamiento instalada en la planta y en la Figura 2.5-4 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.

2.5.5.2. Del 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, por lo que se presume que el beneficio podría ser aún mayor.

En la Figura 2.5-5 se ilustra la forma que se distribuyen los costos para este problema.

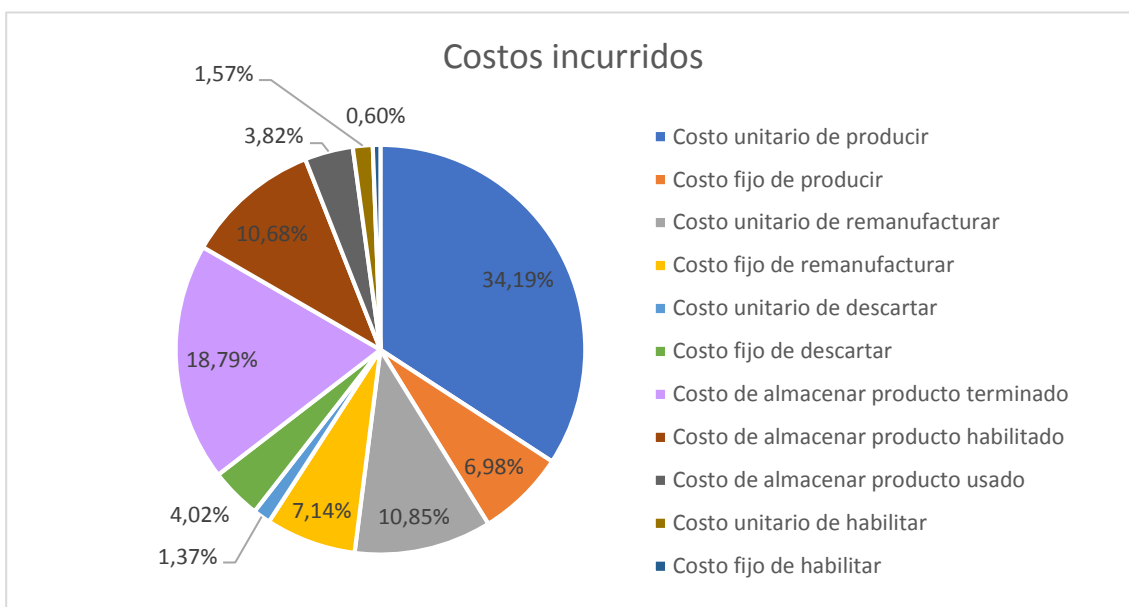


Figura 2.5-5: Gráfico de torta que representa la distribución de los costos incurridos con la planificación dada para el mes de setiembre para el modelo con opciones de retorno

Según se desprende de la Figura 2.5-5 el mayor costo en el que se incurre es en el unitario de producir, el cual no es optimizable en este problema. 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 2.5-6 y Figura 2.5-7 se muestran el inventario de productos retornados y habilitados, respectivamente, a lo largo del mes de setiembre

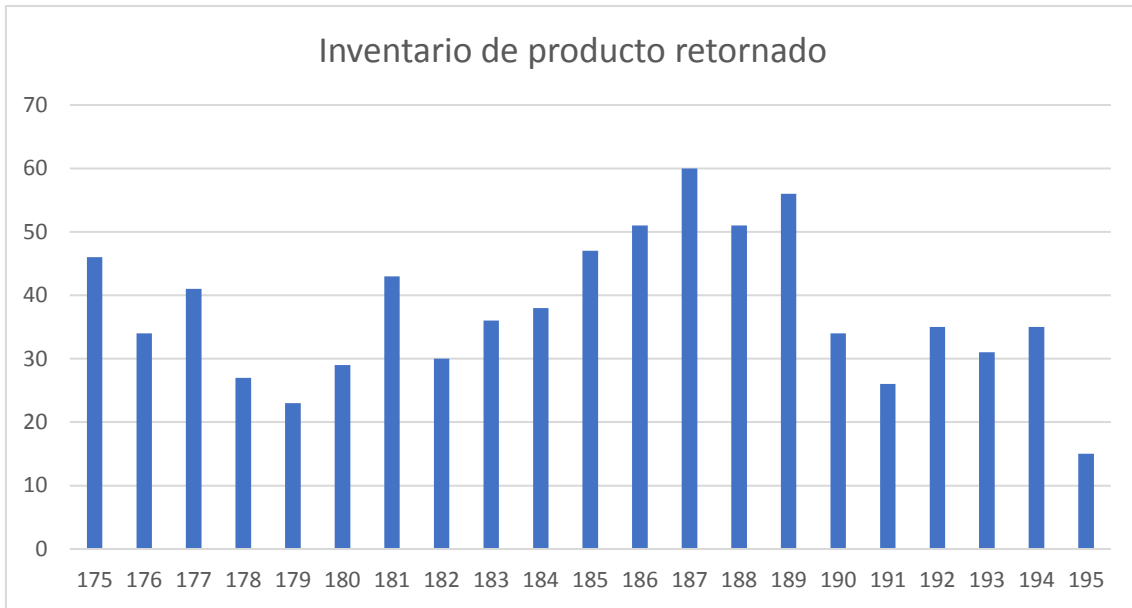


Figura 2.5-6: Inventario de producto retornado durante el mes de setiembre según los retornos estimados

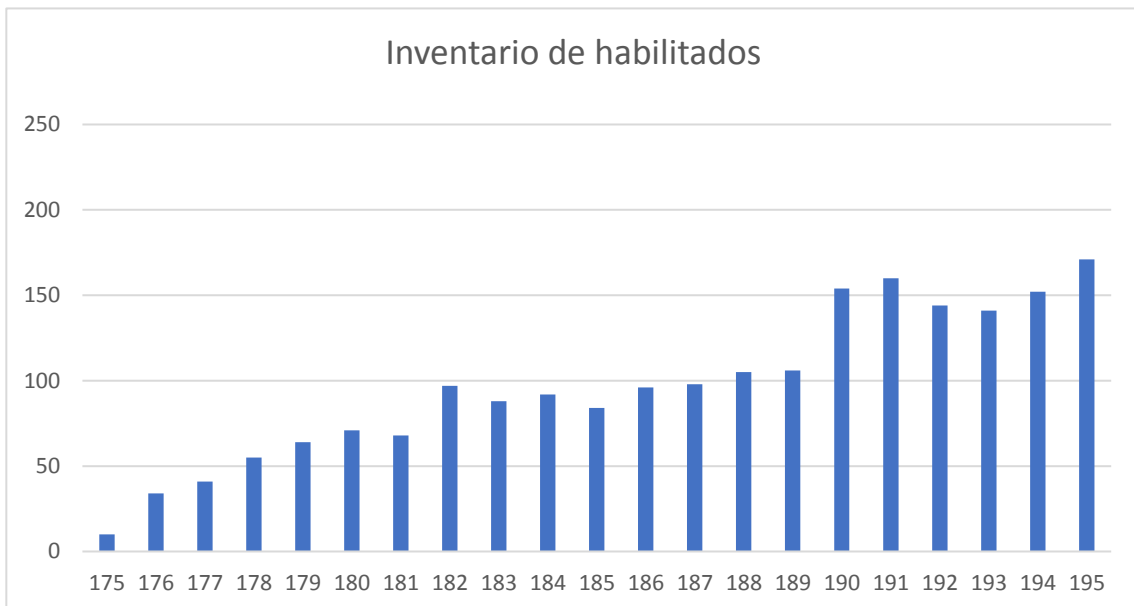


Figura 2.5-7: Inventario de producto retornado y habilitado durante el mes de setiembre

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 2.5-6 y Figura 2.5-7 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 2.5-6 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 2.5-7 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 2.5.1.5, 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 2.5-4: Cantidad de retornos habilitados en el mes de setiembre

De la Tabla 2.5-4 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.

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

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

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

Se aprecia una pérdida bastante grande de las proporciones deseadas, que son de 25% para la calidad 1, 25% para la calidad 2, y 10% para el resto de las calidades correspondientes a descarte.

Ahora 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 por período y por CAE 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.

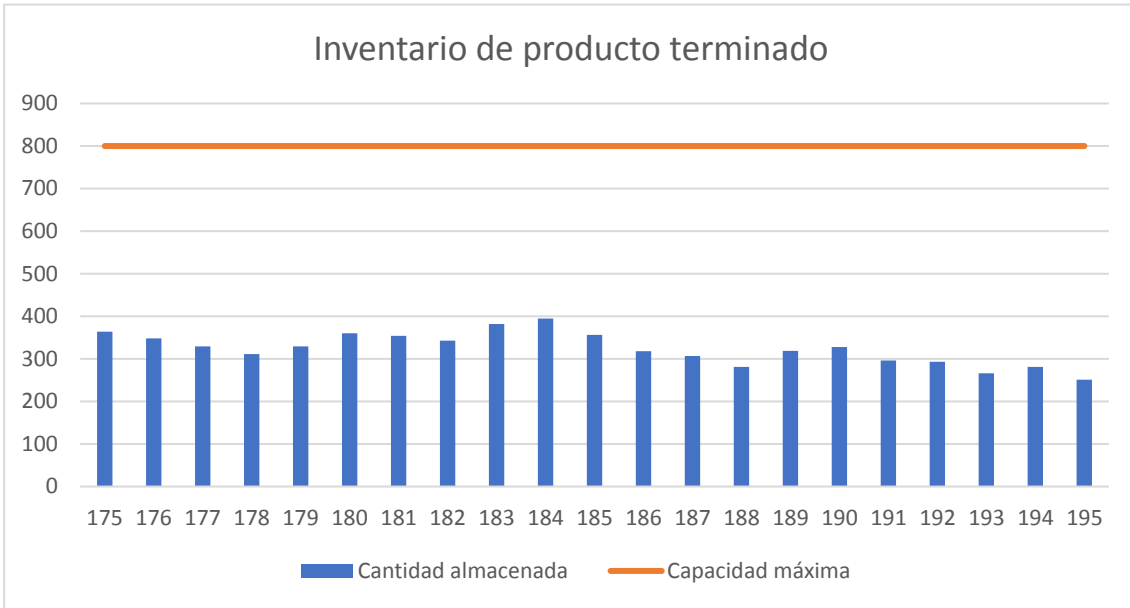


Figura 2.5-8: Inventario de producto terminado el cual se obtiene de la producción y de la remanufacturación, durante el mes de setiembre

La gráfica de la *Figura 2.5-8* 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 2.5-3*).

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.

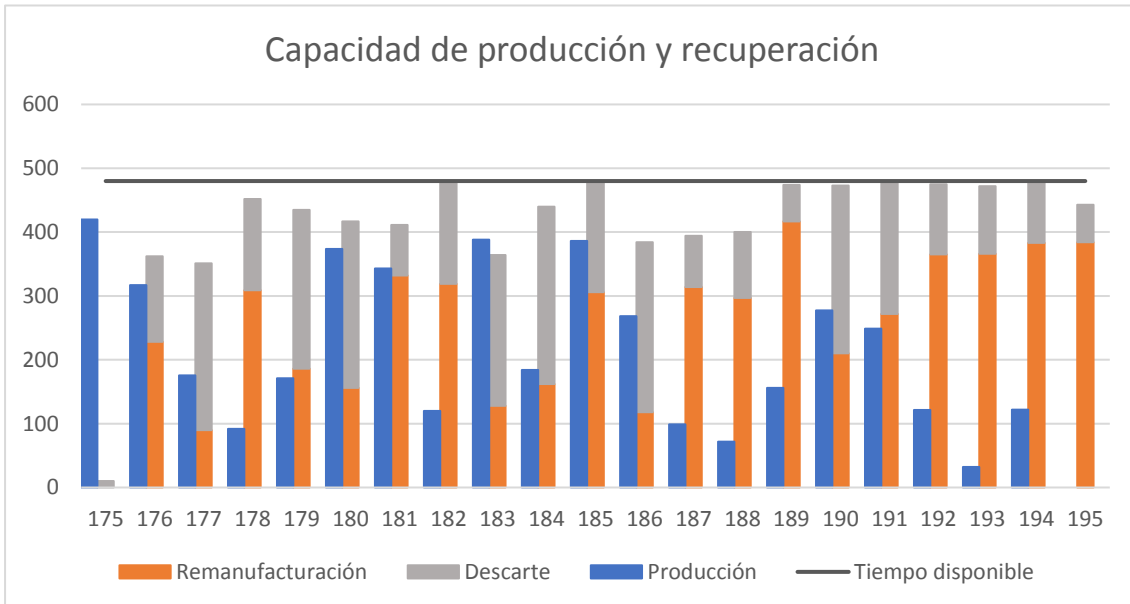


Figura 2.5-9: Capacidad de producción y de remanufacturación en minutos para el mes de setiembre

Se desprende de los resultados obtenidos que se habilitan retornos en todos los períodos, y se ve en la Figura 2.5-9 que en todos se remanufactura, menos en el período 175 que se descarta. Además, se deduce 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 siguiente gráfica.

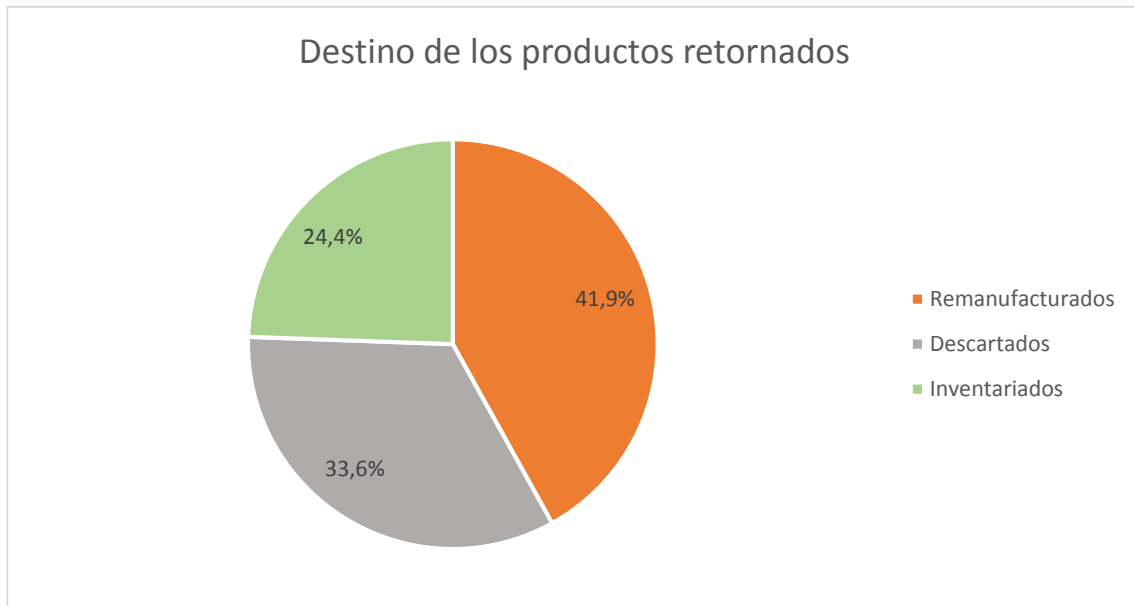


Figura 2.5-10: Gráfico de torta que representa el destino de los productos retornados en el horizonte de planificación

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

3 Análisis de sensibilidad

En la presente sección se aborda el 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.

3.1. Introducción

En esta sección se realiza un análisis de sensibilidad al modelo con opciones de retorno. Este análisis consiste en observar el comportamiento de la solución 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 es común en problemas con opciones de retorno dada la incertidumbre de los productos devueltos al origen. Por lo tanto, es importante en estos casos estudiar el comportamiento de la solución óptima en el entorno de los parámetros estimados para sugerir medidas 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 2.5.3):

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 3.1-1 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 3.1-1: Evolución de tiempos de ejecución insumidos para la obtención de soluciones óptimas para el modelo con opciones de retorno

De la Figura 3.1-1 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.

3.2. 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 3.2-1 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 3.2-1: 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 3.2-1 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 2.5.5.2) 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).

3.2.1. 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 3.2-2: 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 3.2-3: Ejecución e indicadores de las distintas formulaciones para el escenario desfavorable de la proporción de las calidades de los retornos

En la Figura 3.2-1 se muestra el cumplimiento de la demanda a partir de productos remanufacturados y productos nuevos para el escenario favorable y desfavorable.

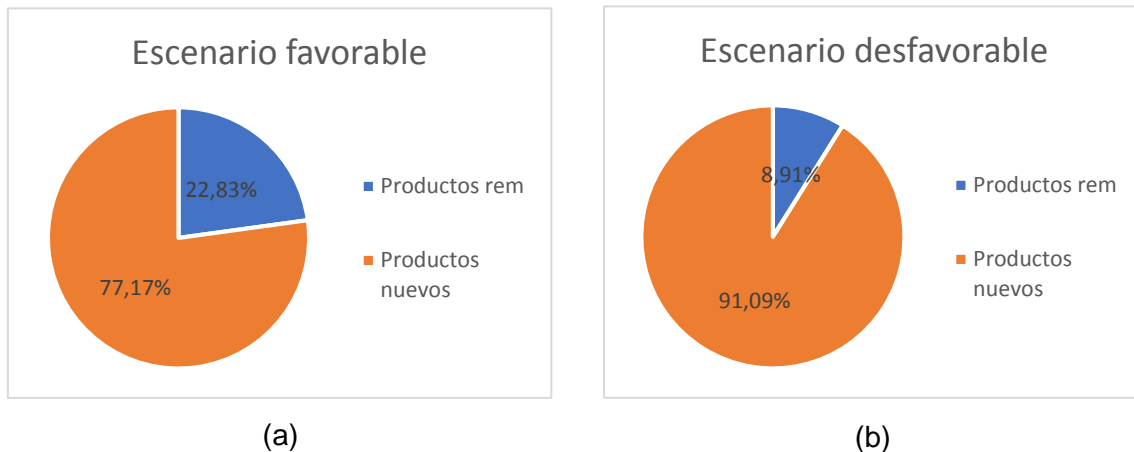


Figura 3.2-1: Cumplimiento de la demanda a partir de remanufactura y producción para el análisis de la proporción de la calidad de los retornos; (a) corresponde al escenario favorable y (b) al desfavorable

A partir de mejoras que se puedan implementar en el diseño de los CAEs producidos por Rivomark, (por ejemplo, las mencionadas en la Sección 2.4.1), 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 3.2-3 redundará 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.

3.2.2. 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 aumentaran 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 3.2-4: 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 3.2-5: Ejecución e indicadores de las distintas formulaciones del escenario desfavorable de la cantidad de retornos

En primera instancia, se observa de ambas tablas 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 3.2-2 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

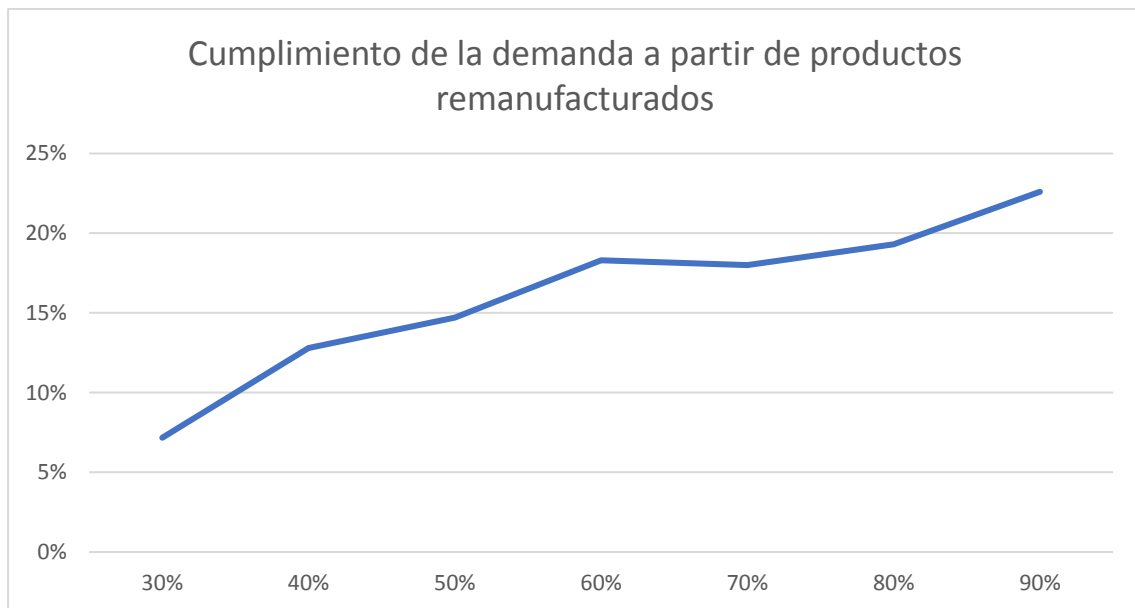


Figura 3.2-2: Cumplimiento de la demanda a partir de productos remanufacturados conforme aumenta la media de los retornos (eje x)

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.

3.2.3. 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 3.2-6: 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 3.2-7: Ejecución e indicadores de las distintas formulaciones del escenario desfavorable del tiempo disponible en la línea de recuperación

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 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 la tasa de remanufacturación y el cumplimiento de la demanda a partir de productos remanufacturados se reduce.

A continuación, en la Figura 3.2-3 y en la Figura 3.2-4 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.

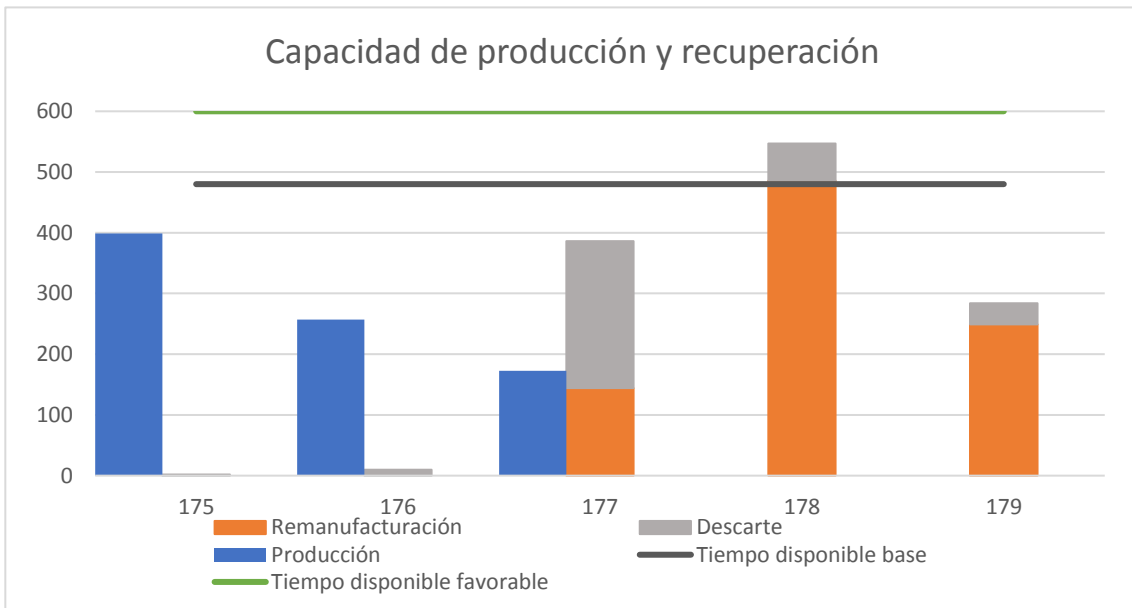


Figura 3.2-3: Capacidad de producción y recuperación en minutos en el escenario favorable al aumentar el tiempo disponible de la línea de recuperación

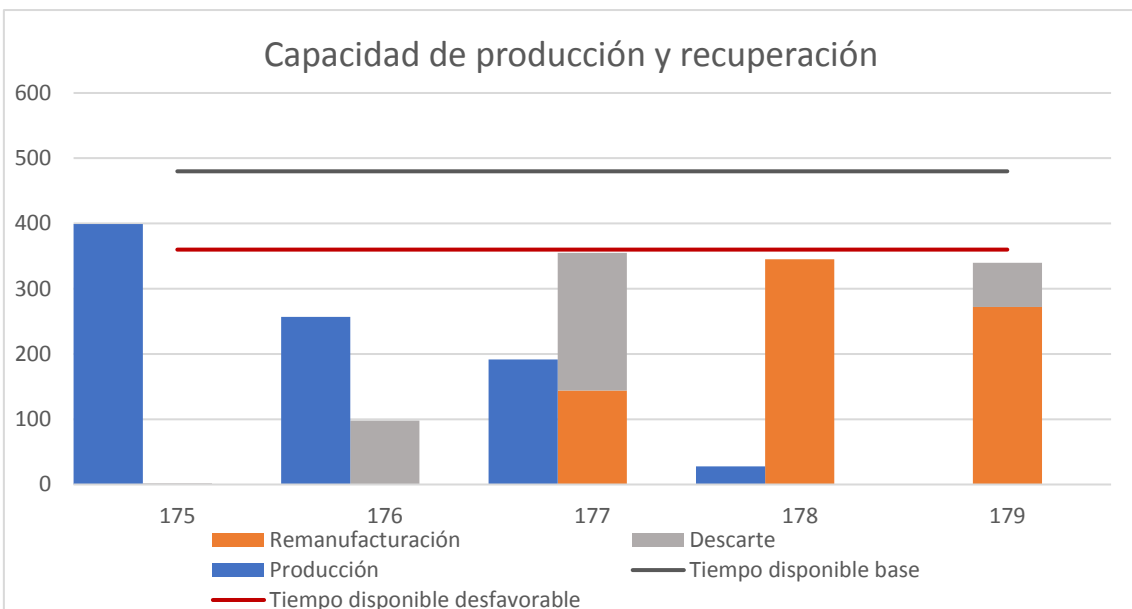


Figura 3.2-4: Capacidad de producción y recuperación en minutos en el escenario desfavorable al aumentar el tiempo disponible de la línea de recuperación

De la Tabla 3.2-7 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 3.2-3 y la Figura 3.2-4 por ejemplo en los períodos 175 o 176, al requerir mucho menos tiempo que el disponible.

De la Figura 3.2-3 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 3.2-4 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 redundaría en una disminución del cumplimiento de la demanda a partir de productos remanufacturados y de la tasa de remanufactura.

3.2.4. 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 3.2-8: 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 remanufactura	Tasa de remanufactura 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 3.2-9: Ejecución e indicadores de las distintas formulaciones del escenario muy desfavorable de los costos fijos de remanufactura

Para todas las relaciones de costos de preparación de remanufactura 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 se repara que al aumentar la relación de costos la tasa de remanufactura 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 3.2-9 que en caso de ser necesario incurrir en costos de remanufactura más elevados, sigue sin ser conveniente remanufacturar al menos una calidad de un tipo de CAE (política 1).

3.2.5. 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 remanufactura	Tasa de remanufactura 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 3.2-10: 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 remanufacturaación	Tasa de remanufacturaación 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 3.2-11: Ejecución e indicadores de las distintas formulaciones del escenario muy desfavorable del costo fijo de habilitar retornos

Se observa de los resultados 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, 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).

3.2.6. 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 remanufacturaación	Tasa de remanufacturaación 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 3.2-12: Ejecución e indicadores de las distintas formulaciones del escenario favorable de los costos de inventario de producto retornado y habilitado

El comportamiento de la solución óptima al disminuir los costos de mantener inventario de retornos sigue cumpliendo con las políticas 2 y 3, y no con la 1. Por otro lado, aunque el escenario experimentado es favorable en términos de los costos, 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.

3.3. 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.

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 3.3-1: Ejecución e indicadores de las distintas formulaciones para el escenario favorable combinado

De la Tabla 3.3-1 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 habilita 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 cantidad necesaria.

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 0, 3.2.4 y 3.2.5:

- 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 3.3-2: Ejecución e indicadores de las distintas formulaciones para el escenario desfavorable combinado

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 económicos.

4 Conclusiones

En el presente informe se realizó en primer lugar un marco teórico que incluye la temática de recuperación de productos usados 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 consiste 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.

Al ser la remanufacturación una de las prácticas más beneficiosas dentro de las estrategias de recuperación, 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 contrae.

Una vez elegido el caso de estudio se elaboró un modelo de planificación de la producción sin opciones de retorno. Dada la magnitud y complejidad del problema abordado fue necesaria la utilización de un algoritmo de resolución con gran eficiencia y robustez, optando por Gurobi y CPLEX. Al no ser suficiente con este cambio, fue preciso recurrir a métodos de resolución heurísticos o a computadoras con mejores procesadores que las personales para una resolución exacta. 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 la demanda diaria pronosticada para el 2019.

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 suministro. El mismo incluye una actividad de habilitación la cual clasifica los retornos en una de las calidades predefinidas. La importancia de esta actividad es que 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 dadas. Al modelar esta actividad nos enfrentamos a 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 exactamente. 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. Por lo tanto, se concluye que el modelo tendría mejor desempeño en problemas con un mayor volumen de retornos y/o menos calidades, es decir, en donde el estado de los retornos sea menos diverso.

En el desarrollo del modelo con opciones de retorno se conjeturó que el nivel de inventario de seguridad será menor gracias a la implantación de la línea de recuperación y que este depende del flujo de entrada de los retornos. El MILP formulado representa un problema complejo el cual se intentó resolver para el 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. De este análisis, entre otros resultados

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 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.

Anexos

- Anexo I: Estado del arte
- Anexo II: Datos del caso de estudio
- Anexo III: Pruebas de validación del modelo

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/mateconf/pdf/2017/38/mateconf_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] J. Maes y L. Wassenhove, 1988, Multi-Item Single-Level Capacitated Dynamic Lot-Sizing Heuristics: A General Review, *The Journal of the Operational Research Society*, 39(11), 991-1004.
- [19] K. Richter y M. Sombrutzki, 2000, Remanufacturing planning for the reverse Wagner/Whitin models, *European Journal of Operational Research*, 121(2), 304-315.
- [20] 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.
- [21] S. Mahapatra, R. Pal y R. Narasimhan, 2012, Hybrid (re)manufacturing: manufacturing and operational implications, *International Journal of Production Research*, 50(14), 3786-3808
- [22] 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.
- [23] Real Academia Española Diccionario de la lengua española, 2001. Disponible en: <https://dle.rae.es/?w=calef%C3%B3n>. Último acceso: 23 Marzo 2019.
- [24] S. Wong, W. Muneer, M. Nazir y A. Prieur, 2013, Designing, Operating, and Simulating Electric Water Heater Populations for the Smart Grid, *CanmetENERGY*, Canadá.

- [25] Norma UNIT-IEC 60335-2-21:2012: Seguridad de los aparatos electrodomésticos y similares – Parte 2: Requisitos particulares para calentadores de agua de acumulación.
- [26] F. J. Reguera, 2007, Comportamiento energético de termos eléctricos, *Escuela Superior de Ingenieros Industriales*, Sevilla.
- [27] S. R. Francia, 2004, Protección catódica-diseño de ánodos de sacrificio, *Revista del Instituto de Investigación FIGMMG*, 7(13), 37-44.
- [28] 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.
- [29] Rheem Termotanques Eléctricos. Disponible en: <http://www.rheem.com.ar/productos/termotanques-electricos>. Último acceso: 23 Marzo 2019.
- [30] Rivomark - Fabricantes uruguayos de termotanques. Disponible en: <https://rivomark.com/>. Último acceso: 23 Marzo 2019.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] E. Elenter, 2018, *Conferencia: Seminario Regional sobre Eficiencia Energética OLADE-BID-CEPAL*, Montevideo.
- [34] 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.
- [35] ¿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.
- [36] O. A. Iglesias y C. N. Paniagua, 2014, Elementos de diseño óptimo, La Plata, Argentina: Editorial de la Universidad de la Plata.
- [37] T.-Y. Liao, 2018, Reverse logistics network design for product recovery and remanufacturing, *Applied Mathematical Modelling*, 60(1), 145-163.

- [38] R. W. Greene, 1989, Válvulas, selección, uso y mantenimiento, ISBN: 9789684220331: McGraw-Hill.
- [39] 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.
- [40] C. E. Housecroft y A. G. Sharpe, 2012, Inorganic Chemistry, Harlow, Great Britain: *Pearson Educational Limited*.
- [41] Cobre Filmetal S.A. Disponible en: <http://filmetal.com.uy/productos/productos-cobre/>. [Último acceso: 23 Marzo 2019].
- [42] 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.
- [43] Calex, Termos Electrónicos y programables. Disponibole en : <https://www.calex.es/wp-content/uploads/pdf/termos/cointra.pdf>. Último acceso: 23 Marzo 2019.
- [44] 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.
- [45] 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*.
- [46] Mantenimiento y descalcificación termo eléctrico, Enero 2015. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=NP8zMOwBiNU>. Último acceso: 23 Marzo 2019.
- [47] What's inside a hot water heater?, Junio 2012. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=PaFt9rCzsyY>. Último acceso: 23 Marzo 2019.
- [48] How to scrap hot water heater, Abril 2012. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=GKjJRAQ6Fpk>. Último acceso: 23 Marzo 2019.
- [49] 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.
- [50] Scrap Copper Tank 2,» Mayo 2018. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=H-4cB9V292c>. Último acceso: 23 Marzo 2019.

- [51] Cointra, Eficacia del Ánodo de Magnesio según su ubicación. Disponible en: <https://www.cointra.es/articulo-2/>. Último acceso: 23 Marzo 2019.
- [52] 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.