Problema de secuenciación y dimensionamiento de lotes con velocidades flexibles de producción y remanufactura

Juan Ignacio Alvarez[1][0009-0001-7609-7932], Daniel Alejandro Rossit[1,2][0000-0002-2381-4352] y Pedro Piñeyro[3][0000-0002-9155-7965]

[1] Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur, Av. Alem 1253, CP 8000 Bahía Blanca, Argentina
juanignacio.alvarez@uns.edu.ar,
[2] INMABB-UNS-CONICET, Av. Alem 1253, CP 8000 Bahía Blanca, Argentina
daniel.rossit@uns.edu.ar,
[3] Departamento de Investigación de Operaciones, Instituto de computación, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Julio Herrera y Reissig 565, CP 11300 Montevideo, Uruguay
ppineyro@fing.edu.uy

Abstract. La economía circular plantea la recuperación de los productos usados en contraposición al modelo lineal de generación-consumo-disposición, con el fin de reducir los desechos y su consiguiente impacto medioambiental, revalorizando así los recursos existentes en los productos usados (llamados también retornos). Unas de las opciones posibles de recuperación es la remanufacturación, por la cual se puede obtener un producto recuperado con al menos las mismas características funcionales que uno nuevo a un menor costo. En este trabajo se aborda un problema de secuenciación y dimensionamiento de lotes para un sistema híbrido de producción y remanufacturación bajo una forma de producción/remanufacturación todo-o-nada con diferentes velocidades posibles dentro de un conjunto finito de alternativas. Se propone un modelo de programación lineal entera mixta para el problema y se compara a través del modelo el sistema híbrido de producción y remanufactura, contra el caso en que se decide no remanufacturar (sistema tradicional de solo producción), así como contra el caso de un único valor de velocidad para la producción y la remanufactura. De los resultados obtenidos se concluye que la flexibilización en las velocidades de producción/remanufacturación disminuye los costos totales del sistema, y que es conveniente contemplar la remanufactura de los productos usados.

Keywords: Optimización, Planificación y secuenciamiento de la producción, Remanufacturación, Economía circular, Políticas de producción.

1 Introducción

En este trabajo se aborda un problema de planificación de la producción cuyo objetivo consiste en dimensionar los lotes de producción y hallar la secuenciación que minimice la sumatoria de costos involucrados. Este problema ha sido abordado en la literatura, sin embargo, en este trabajo se presenta un escenario particular en donde se considera la incorporación de la remanufactura en los problemas de planificación de la producción, a través de la incorporación del flujo de productos usados, también llamados retornos.

En los últimos tiempos el impacto medioambiental de la industria manufacturera comenzó a ser una preocupación, por lo que comenzaron a surgir diferentes medidas para abordar la problemática. En esta línea se establece lo que se ha dado a conocer como "Economía circular" en donde la gestión de la producción no finaliza con la disposición final del producto, sino con la recuperación de los productos que hayan finalizado su ciclo de vida o de uso. Esto, se traduce en un beneficio para el fabricante, desde el punto de vista económico y para el medioambiente reduciendo el nivel de desechos generados [1]. También acarrea beneficios para el consumidor, que puede adquirir productos recuperados a un menor precio, generalmente.

En la industria se han desarrollado varias opciones para reincorporar los productos usados en la cadena de producción. Una de estas opciones es la remanufactura, la cual consiste en reacondicionar productos que hayan llegado al final de su vida útil para "reprocesarlos" (o remanfacturarlos) y producir productos recuperados que aseguren contar con al menos las mismas características o funcionalidad que el producto original (esto se debe a que podría tener mejoras sustanciales como nuevas tecnologías). Esta técnica permite aprovechar gran parte de los materiales, energía y tiempos invertidos en el producto exhausto original, y producir uno nuevo capaz de volver a satisfacer demanda, reduciendo no solo el impacto de reducir desechos, sino de reducir demandas de materias primas [2]. Esta metodología representa un gran desafío para el problema de planificación de la producción, ya que se presenta un sistema hibrido de producción y remanufactura, en donde se incorporan diferentes variables asociadas a los diferentes flujos de materiales, como por ejemplo las cantidades de productos usados. Estos a su vez representan una limitante para la remanufactura, ya que son los insumos necesarios en el lote de productos a remanufacturar. Por lo que, para optar por esta metodología se debe contar con al menos tantos retornos como productos a remanufacturar.

Dentro de la literatura, [3] aborda este problema, sin embargo, trabaja con velocidades de producción/remanufacturación únicas, es decir que las cantidades de productos que se pueden producir en un período toman un único valor. A su vez, considera producir todo o nada, es decir que se produce o remanufactura a la máxima capacidad. Esta política, permite prorratear el costo fijo de producción/remanufacturación (por ej. setups) en todas las unidades del lote que entren en la capacidad máxima. Sin embargo, en entornos dinámicos en donde los retornos se reciben a lo largo del horizonte de planificación, esta política exige reunir una cantidad de retornos igual a la capacidad máxima para poder considerar la remanufactura. Como el flujo de recolección de retornos suele ser bastante incierto [4], se deben ir almacenando hasta lograr el volumen necesario. Para salvar esta situación se propone estudiar en este trabajo políticas más

flexibles de producción, en donde no se exijan volúmenes únicos de retornos para optar por la remanufactura. De aquí surge la primera contribución de este trabajo que consiste en incorporar un conjunto de niveles de velocidades de producción al problema planteado, con el objetivo de tener un mayor aprovechamiento de los beneficios que trae acaparados la remanufactura. Las múltiples velocidades propuestas podrían ser relacionadas a diferentes extensiones de la jornada laboral (por ejemplo: jornada normal, reducida o extendida). Para evaluar esta propuesta se realiza una comparativa, en termino de costos totales y en tiempo de resolución, entre el problema con velocidad única y el problema con múltiples niveles de velocidades.

Por otro lado, en [10] se compara el problema discreto de dimensionamiento de lote y secuenciamiento (DLSP) con el problema discreto de dimensionamiento de lote y secuenciamiento con remanufactura (DLSR) que incluye la remanufactura, si bien esta comparación es válida para el caso de solo producción no se tiene en cuenta ningún tipo de responsabilidad con respecto al impacto ambiental generado por los productos en desuso, que muchas veces son desechados. Para ello, en este trabajo se busca encuadrar el problema planteado en cierto escenario donde el productor deba almacenar los productos en desuso, sin la posibilidad de optar por la elección de ser aprovechados. Con esto, se busca representar la responsabilidad del productor acerca de los potenciales desechos generados, representando un costo por no aprovechar los productos en desuso a través de la remanufactura, si esta no estuviese presente en su política de producción. Una posible interpretación del costo de almacenamiento de retornos podría ser los costos asociados a la recolección, transporte, tratamiento y disposición final de los productos en desuso que fuesen desechados. Esto le daría más sentido que almacenar retornos sin ningún propósito. En torno a esto se presenta la segunda contribución de este trabajo, en donde se comparan tres casos del problema planteado pudiéndose interpretar como tres políticas de producción: Solo producción a partir de materia prima (P), solo producción, pero contabilizando los costos del inventario de retornos (P + Inv. Retornos) y el caso de producción a partir de materia prima o a través de la remanufactura (P + R). Estos escenarios se presentan como casos particulares del modelo que aborda el problema completo incluyendo las múltiples velocidades de producción. Para su análisis se realizará una comparativa en termino de costos totales y tiempos de resolución.

En resumen, en la siguiente sección se hará una revisión de trabajos publicados en la literatura que encuentren una relación con el problema planteado en este trabajo. En la sección 3 se presenta el modelo desarrollado para abordar el problema planteado, y se describen los casos particulares del problema que son resueltos por adecuaciones del modelo a las diferentes consideraciones. Luego, en la sección 4 se presentará la experimentación numérica, con el diseño experimental aplicado y los resultados obtenidos a partir de la experimentación, en el apartado 4.2 se presentan los resultados y el análisis de incorporar múltiples velocidades de producción al problema, y en el apartado 4.3 la comparativa entre distintas políticas de producción con diferentes grados de responsabilidad acerca del impacto ambiental potencialmente generado. Y por último se presentará una conclusión general de este trabajo.

2 Revisión de la literatura

La planificación de la producción desde hace tiempo ha sido un tema de mucho interés para la industria, ya que permite optimizar la producción y disminuir los costos asociados. A lo largo del tiempo, este desafío ha sido abordado desde diferentes perspectivas, siendo el dimensionado de los lotes de producción y el secuenciamiento de la producción algunas de las más abordadas.

En un principio, Fleischmann (1990) [5] plantea el DLSP para realizar la planificación de producción que cubra una demanda dinámica conocida, con el objetivo de minimizar la suma de los costos de configuración y de inventario incurridos. El modelo considera un horizonte de planificación con períodos pequeños, donde las configuraciones se realizan al comienzo de estos períodos, y la producción se debe llevar a cabo a la máxima capacidad, es decir se produce todo o nada. En Salomon et al., (1991) [6] se realiza una contribución significativa a la literatura al recopilar varios modelos que abordan problemas similares e identificando sus diferencias. Posteriormente, Fleischmann (1994) [7] introduce una variante interesante al permitir la capacidad de mantener la configuración de la maquina a lo largo del horizonte de planificación, haciendo que la secuencia dependa de los costos de configuración.

Seeanner (2013) [8] realiza la incorporación de otras características al problema, tales como el costo de producción, el costo por mantener la configuración de un período a otro y el costo de penalización al incumplir la satisfacción de la demanda. En esta publicación se mencionan varios modelos que abordan problemas similares, al igual que en Copil, et. al. (2017) [9] donde se indica que el modelo conocido como “General Lotsizing and Scheduling Problem” (GLSP), desarrollado por Fleischmann & Meyr (1997) [10], aborda la mayoría de las características presentes en el resto de los modelos, ya que estos últimos pueden representarse como casos particulares del GLSP.

En paralelo a estos desarrollos, la industria descubrió que muchos productos al llegar al final de su vida útil aun contenían materiales aprovechables para fabricar nuevos productos [2]. De esta observación surgen varias metodologías para aprovechar los recursos que contienen los desechos de producto. Una de las metodologías es la “Remanufactura”, la cual genera beneficios en ahorro de energía de procesamiento y un reaprovechamiento de los materiales, todo esto provoca una reducción en el impacto ambiental por parte del producto en sí. A su vez, no deja de lado la satisfacción del cliente ya que el producto remanufacturado debe cumplir con al menos las mismas especificaciones que el producto nuevo [7].

Dada la evidente utilidad de esta metodología, varias publicaciones han incorporado la remanufactura en los problemas de dimensionamiento de lotes. Un ejemplo de ello es el trabajo de Teunter et al. (2006) [11], donde se aborda el problema dinámico de dimensionamiento de lote en un sistema de producción que utiliza tanto materia prima como los productos en desuso, también llamados “retornos”. Se asegura que la calidad de ambos productos es compatible, permitiendo así que la demanda sea satisfecha mediante ambas modalidades de producción. Este problema también es abordado por Piñeyro & Rossit (2020) [3], en donde se evalúan los resultados obtenidos al resolver el DLSP y el problema con remanufactura (DLSR) bajo diferentes casos de los

parámetros. También se analiza el esfuerzo computacional el cual se ve incrementado al incorporar la remanufactura a la planificación de la producción.

Por otro lado, varios autores abordan problemas de este estilo teniendo en consideración diferentes condiciones. Por su lado, Naeem et al. (2013) [12] estima las cantidades demandadas y de retornos a través de dos modelos, uno determinista y otro estocástico. También incorpora la posibilidad de afrontar fueras de stock y toma pedidos pendientes penalizándolos con un costo de almacenamiento. Esta condición también es tenida en cuenta en Gana et al. (2023) [13] y en Giglio et al. (2017) [14], que además incorporan costos unitarios de procesamiento de los productos. En [14] a su vez, se incorpora costos de energía asignados a los diferentes estados de la máquina: cuando se encuentra activa, inactiva y en condición acelerada para comprimir los tiempos de procesamiento, lo que representa un costo adicional. Por lo tanto, el consumo de energía se considera proporcional al tiempo de procesamiento. Se establece una capacidad máxima de tiempo para la maquina por período, y por ello se incorpora al objetivo determinar el tiempo de procesamiento óptimo para cada lote en cada máquina.

Por último, se quiere destacar el trabajo de Roshani et al. (2023) [15], el cual propone un problema similar conocido como "Capacitated Lot Sizing Problem" (CLSP) en donde los tamaños de lotes en vez de ser discretos se consideran continuos. Pero lo interesante es que incorporar una estrategia relacionada con la variación en la velocidad de producción. Estas velocidades de producción estan asociadas a los consumos de energía mencionados en Giglio et al. (2017) [14].

De la revisión de estos trabajos se observó que ningún trabajo aborda el problema de planificación de la producción, teniendo en cuenta un sistema híbrido de producción y remanufactura y a la vez contando con múltiples velocidades de producción. Es por ello, que en este trabajo se plantea tal problema con el objetivo de evaluar la conveniencia en términos económicos y en función a los requerimientos computacionales de resolución.

3 Descripción del problema y formulación del modelo

En este trabajo se aborda el problema de planificación y secuenciación de producción en el que se considera un sistema de producción/remanufacturación de un solo producto y una única línea de trabajo, que debe satisfacer la demanda de ese producto para cada período sin retraso, para un conjunto de períodos finito (problema determinista dinámico y de horizonte de planificación finito). Las cantidades demandadas por período se consideran conocidas. La línea puede ser configurada para funcionar bajo dos metodologías: "Producción" (producto generado a partir de materia prima) ó "Remanufactura" (producto generado a partir de productos usados y retornos), pero no se permite más de una configuración por período de tiempo. La velocidad de producción (cantidad de productos que se pueden producir en un período) puede seleccionarse de cierto conjunto de niveles de velocidades los cuales se asumen conocidos. Los retornos se reciben al inicio de los períodos y las cantidades se consideran dinámicas y conocidas. Se cuenta con dos inventarios: inv. de retornos, e inv. de productos terminados (de producción y

remanufactura). No se contempla la posibilidad de pedidos retrasados, es decir toda la demanda se debe cumplir en el mismo período, y puede ser a través de productos inventariados o de la producción/remanufacturación en el mismo período.

Se asume que las metodologías de producción/remanufacturación siguen la política "todo o nada" de Fleischmann (1990) [5], es decir que, en el caso de producir, se producirá a la máxima capacidad posible. Para el caso de la remanufactura, es necesario contar con la cantidad de retornos necesarios para el tamaño de lote a producir, contemplando los retornos en el inventario y los recibidos en ese mismo período. La configuración de la línea tiene lugar al comienzo de cada período. La configuración puede continuar de un período al siguiente, pero en caso de no haber actividad durante un período, será necesario configurar la línea nuevamente en el período que este activa. Los costos de configuración se incurren al comienzo de cada período y se consideran conocidos e invariantes en el tiempo. Para ambos inventarios se cuenta con un costo de almacenamiento los cuales se conocen y se definen por unidad (retorno/producto terminado) y por período. Otros costos que se tienen en cuenta son costos unitarios de producción/remanufacturación, con la premisa de que remanufacturar siempre resulta más económico que producir. Todos los costos se consideran invariantes en el tiempo.

El objetivo de este trabajo consiste en determinar la planificación de la producción, es decir, las cantidades a producir/remanufacturar, dependiendo de las velocidades de producción/remanufacturación, en cada período del horizonte de planificación para cumplir con la demanda en tiempo. De esta manera también se hallará la secuenciación, es decir, que períodos producir, cuales remanufacturar, o bien, permanecer inactivos, para minimizar la sumatoria de costos involucrados.

A continuación, se presenta la notación utilizada en la formulación del modelo:

Conjuntos e índices:

T: Número de períodos, con índice $t \in \{0,1,...,T\}$.
S: Niveles de velocidades, con índice $s \in \{1,...,S\}$.

Parámetros:

d_t: Número de producto demandado en período $t > 0$.
r_t: Número de retornos recibidos al comienzo del período $t > 0$.
k_P: Costo de setup para producción.
k_R: Costo de setup para remanufactura.
h_S: Costo de inventario de productos terminados (por unidad y por período).
h_U: Costo de inventario de retornos (por unidad y por período).
c_P: Costo unitario de producción.
c_R: Costo unitario de remanufactura.
v_P^s: Lote de productos producidos con nivel de velocidad $s \in S$.
v_R^s: Lote de productos remanufacturados con nivel de velocidad $s \in S$.

Variables:

Q_t^P: Cantidad de productos producidos en período *t*.
Q_t^R: Cantidad de productos remanufacturados en período *t*.
$Q_{t,s}^P$: Cantidad de productos producidos en período *t* con nivel de velocidad $s \in S$.
$Q_{t,s}^R$: Cantidad de productos remanufacturados en período *t* con velocidad $s \in S$.
I_t^S: Inventario de productos terminados (nuevos o remanufacturados) al final del período *t*.
I_t^U: Inventario de retornos al final del período *t*.
$S_{t,s}^P$: $S_{t,s}^P = 1$, indica que se produce en período *t* con nivel de velocidad *s*;
$S_{t,s}^P = 0$, en otro caso.
$S_{t,s}^R$: $S_{t,s}^R = 1$, indica que se remanufatura en período *t* con nivel de velocidad *s*;
$S_{t,s}^R = 0$, en otro caso.
Y_t^P : $Y_t^P = 1$, indica que se produce en período *t*;
$Y_t^P = 0$, en otro caso.
Y_t^R : $Y_t^R = 1$, indica que se remanufactura en período *t*;
$Y_t^R = 0$, en otro caso.
Z_t^P : $Z_t^P = 1$, indica el setup de producción para el período $t > 0$;
$Z_t^P = 0$, en otro caso.
Z_t^R : $Z_t^R = 1$, indica el setup de remanufactura para el período $t > 0$;
$Z_t^R = 0$, en otro caso.

Modelo de optimización de programación lineal entera mixta (MILP):

$$\min \ \sum_{t=1}^{T}(k_P\, Z_t^P + k_R\, Z_t^R + h_S\, I_t^S + h_U\, I_t^U + c_P\, Q_t^P + c_R\, Q_t^R) \tag{1}$$

sujeto a:

$$Q_t^P = \sum_{s=1}^{S} Q_{t,s}^P \ , \qquad \forall\, t \tag{2}$$

$$Q_t^R = \sum_{s=1}^{S} Q_{t,s}^R \ , \qquad \forall\, t \tag{3}$$

$$Q_{t,s}^P = v_s^P\, S_{t,s}^P \ , \qquad \forall\, t, \forall\, s \tag{4}$$

$$Q_{t,s}^R = v_s^R\, S_{t,s}^R \ , \qquad \forall\, t, \forall\, s \tag{5}$$

$$I_t^S = I_{(t-1)}^S + Q_t^P + Q_t^R - d_t \ , \qquad \forall\, t > 0 \tag{6}$$

$$I_t^U = I_{(t-1)}^U + r_t - Q_t^R \ , \qquad \forall\, t > 0 \tag{7}$$

$$I_{t-1}^U + r_t \geq Q_t^R \ , \qquad \forall\, t > 0 \tag{8}$$

$$Y_t^P = \sum_{s=1}^{S} S_{t,s}^P \ , \qquad \forall\, t \tag{9}$$

$$Y_t^R = \sum_{s=1}^{S} S_{t,s}^R \ , \qquad \forall\, t \tag{10}$$

$$Y_t^P + Y_t^R \leq 1 \ , \qquad \forall\, t > 0 \tag{11}$$

$$Z_t^P \geq Y_t^P - Y_{(t-1)}^P \ , \qquad \forall\, t > 0 \tag{12}$$

$$Z_t^R \geq Y_t^R - Y_{(t-1)}^R \ , \qquad \forall\, t > 0 \tag{13}$$

$$Q_t^P,\ Q_t^R,\ I_t^S,\ I_t^U \geq 0 \ , \qquad \forall\, t \tag{14}$$

$$Y_t^P,\ Y_t^R,\ Z_t^P,\ Z_t^R \in \{0,1\} \ , \qquad \forall\, t \tag{15}$$

$$I_0^S,\ I_0^U,\ Y_0^P,\ Y_0^R = 0 \tag{16}$$

La función objetivo (1) minimiza la sumatoria de los costos de configuración, almacenamiento y producción/remanufacturación. Las restricciones (2) y (3) indican las cantidades de productos a producir y remanufacturar en el período *t*. Las restricciones (4) y (5) determinan el tamaño de lote seleccionado para ambas metodologías: producción y remanufactura en un período *t*. Las restricciones (6) y (7) son los balances de inventarios de productos terminados y de retornos. Las restricciones (8) limitan la capacidad de remanufacturar según la cantidad de retornos disponibles al período *t*. Las restricciones (9) y (10) indican la metodología implementada en el período *t* y limitan la selección de un solo tamaño de lote por período. Las restricciones (11) establecen que no es posible producir y remanufacturar en el mismo período. Las restricciones (12) y (13) indican el cambio de configuración en el período $t > 0$. Finalmente, las restricciones (14) y (15) indican la naturaleza de las variables y la restricción (16) establece las condiciones iniciales del problema.

Presentado el modelo matemático para el problema de producción y remanufactura (P + R) con múltiples velocidades, se observa que, las políticas de producción planteadas en este trabajo son casos particulares del modelo presentado en (1)-(16). Para abordar la consideración de velocidad de producción/remanufacturación única se opta por considerar un único nivel de velocidad dentro del conjunto determinado. Por otro lado, para abordar los casos interpretados como distintas políticas de producción: Solo producción a partir de materia prima (P) y solo producción, pero contabilizando los costos del inventario de retornos (P + Inv. Retornos), se eliminan los parámetros, variables y restricciones vinculados a la remanufactura (3), (5), (7), (8), (10) y (13), salvo en el segundo caso donde si se tienen en cuenta los parámetros de costo de almacenamiento de retornos y cantidades de retornos por período, así como la variable de inventario final de retornos por período, y la restricción (7) del balance de inventario de retornos. De esta manera, como se observa en la **Figura 1**, quedan conformados los seis casos analizados en este trabajo: las tres políticas de producción que abordan el problema de dimensionamiento de lote y secuenciación, cada una con las configuraciones de única/múltiples velocidades de producción/remanufacturación.

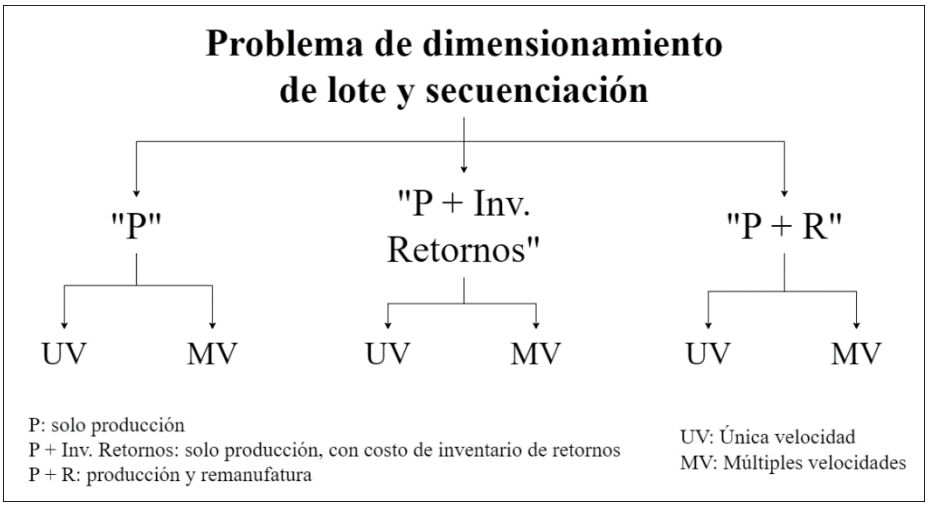

Fig. 1. Esquema de los casos particulares del problema analizados en este trabajo.

4 Experimentación numérica

En esta sección se establecen los valores de los parámetros utilizados en el modelo propuesto, para analizar el problema de planificación de la producción con remanufactura y presentar los resultados obtenidos a partir de la programación entera mixta presentada en la sección anterior. En primer lugar, se busca analizar cuan conveniente resulta flexibilizar la velocidad de producción, en término del costo total y en tiempo de resolución. Se realiza la comparativa entre una interpretación del problema con un único elemento en el conjunto de niveles de velocidades contra una configuración con tres niveles diferentes de velocidades. En segundo lugar, se compara la eficiencia en costos y en tiempo de resolución entre el caso planteado y dos casos adicionales que surgen de adecuar el problema a ciertas políticas de producción. Para ambos casos adicionales se eliminan los parámetros, variables y restricciones especificas relacionadas con la remanufactura. La diferencia entre estos subyace en contabilizar o no el costo del almacenamiento de los retornos, el cual puede ser interpretado como algún costo relacionado con la responsabilidad de los desechos generados (tratamiento para disposición final, reciclado tercerizado, entre otros).

4.1 Diseño experimental

Las instancias se generaron en base al conjunto de referencia introducido en Teunter et al. (2006) [11], también utilizado en Schulz (2013) [16], entre otros. Para evaluar el desempeño del modelo se propone un horizonte de planificación de T =12 períodos. La demanda d_t sigue una distribución uniforme en el rango [80; 120] unidades por período. Las cantidades de retornos r_t siguen una distribución uniforme de acuerdo a tres configuraciones: [30; 70], [50; 90] y [80; 120] con el fin de representar escenarios de retornos

bajos, medios y altos. Los costos de configuración se encuentran asociados a los costos unitarios de producción/remanufacturación, planteándose tres configuraciones para producción (k_P, c_P) = (200, 2), (500, 5) y (2000, 20) y tres para remanufactura (k_R, c_R) = (200, 2), (500, 5) y (2000, 20). Se considera un conjunto de tres niveles de velocidades de producción. Las velocidades toman valores de [80, 120, 180] y [100, 150, 225] para la producción y remanufactura respectivamente. El costo de mantenimiento de inventario de productos terminados es h_S = 1, y el costo de mantenimiento de inventario de retornos toma tres valores h_U = {0,3, 0,5, 0,8}.

De los valores de cantidades de retornos, costos de producción, costos de remanufactura y costos de inventario de retornos, se obtienen $3^4 = 81$ configuraciones. Y se generan 10 instancias para cada una de las 81 configuraciones, por lo tanto, en total se generan 810 instancias.

El modelo fue codificado en Python y las instancias resueltas con Gurobi 10.0.2 con un límite de tiempo de 3600 segundos, en una PC con Intel Core i5-3570K 3.40GHz, 64 bits, 12GB de RAM y Windows 10 Pro.

4.2 Resultados evaluando la incorporación de diferentes velocidades

La velocidad de producción única es fijada en 120 unidades por período, y en el caso de la remanufactura se considera que al requerir menos procesamiento se tiene una velocidad de 150 unidades por período, estos valores corresponderían a lo que se considera una jornada normal. Para los casos de jornada reducida, se incorporan los valores de 80 y 100 unidades por período, como velocidad de producción y remanufactura respectivamente; y para la jornada extendida 180 y 225 unidades por período. De esta manera, se flexibiliza el problema pudiendo seleccionar la velocidad de producción para cada período. En estos últimos casos las velocidades de producción están asociadas al conjunto de niveles de velocidad del modelo desarrollado.

De los resultados obtenidos de las 810 instancias, se calculó el promedio, desvío estándar, valor máximo y mínimo de los costos totales en unidades monetarias (u.m.).

	Promedio	**Desv est**	**Máx**	**Mín**
"P + R" UV	12.403,70	8.225,58	34.018,20	4.211,60
"P + R" MV	**10.701,19**	7.663,99	32.004,80	2.989,60

Tabla 1. Resultados en término de costos totales de las 810 instancias, para los casos de producción y remanufactura con única y múltiples velocidades de producción/remanufacturación.

De los valores de la **Tabla 1** se observa que, en promedio, el costo total del caso de producción y remanufactura con una única velocidad es de 12.403,7 u.m. (desv. est.: 8.225,58 u.m.), mientras que el caso donde se incorpora el conjunto de velocidades el costo total resulto ser 10.701,19 u.m. (desv. est.: 7.663,99 u.m.) en promedio. Esto se

traduce en que la implementación de múltiples velocidades provocó una disminución del costo total del 13,7% en promedio. También resulta interesante destacar, que los valores máximos y mínimos se comportan de acuerdo a la diferencia antes mencionada, esto se debe a que se obtienen desvíos cercanos, por lo tanto, el caso de "P + R" MV no alcanza valores extremos superiores al caso de única velocidad.

Es por ello, que para un horizonte de planificación de T =12 períodos, resulta conveniente la flexibilización de las velocidades de producción/remanufacturación, en termino de costos totales.

Por otro lado, se presentan los promedios de los tiempos de resolución de las 810 instancias, en unidades de miles de segundos:

	Promedio	**Desv est**	**Máx**
"P + R" UV	**6,3416**	0,5361	11,3562
"P + R" MV	7,3491	1,5937	20,5298

Tabla 2. Resultados en término de tiempo de resolución [milisegundo] de las 810 instancias, para los casos de producción y remanufactura con única y múltiples velocidades de producción/remanufacturación.

De los resultados de tiempos de resolución de la **Tabla 2** se observa lo contrario al análisis anterior. Para el caso de velocidad única de producción y remanufactura se resuelve en 6,34 milisegundos en promedio, mientras que para el caso de múltiples velocidades el problema tarda 1 milisegundo más aproximadamente para resolverse. Además, observando los valores máximos, este último caso cuenta con instancias que resultan muy duras para encontrar la solución, por lo que el tiempo de resolución se incrementa notablemente.

En definitiva, el hecho de incorporar más de un nivel de velocidad de producción/remanufacturación hace más complejo el problema y por eso requiere de mayor tiempo de cómputo para hallar una solución. Sin embargo, esta diferencia, para el diseño experimental planteado, no representa una gran diferencia entre los casos, como si resulta más notoria la disminución del promedio de los costos totales.

4.3 Resultados evaluando diferentes políticas de producción

En este apartado se analizan los tres casos planteados para resolver el problema en cuestión, los cuales se visualizan en la **Figura 1**. Para los tres casos se decide comparar las opciones de múltiples velocidades ya que, a pesar de la política de producción seleccionada, siempre resulta conveniente flexibilizar los niveles de velocidades.

En relación al modelo, para el caso de "Producción" se eliminan todos los parámetros, variables y restricciones relacionadas con la remanufactura. Por lo tanto, la velocidad de producción será el valor seleccionado del conjunto v_P = [80, 120, 180]. Por su lado, el caso de "Producción + inventario de retornos" consiste de incorporar al caso anterior, la variable de cantidades de retornos recibidos por período r_t y los costos de

mantenimiento de inventario de estos mismos h_U = [0,3, 0,5, 0,8]. En relación a la política planteada en este trabajo, para este último parámetro una posible interpretación sería el costo por responsabilizarse de los productos usados, ya sea desde la recolección, el transporte, o el tratamiento para su disposición final.

En la **Tabla 3** se presentan los resultados en término de costos totales:

	Promedio	**Desv est**	**Máx**	**Mín**
"P" MV	11.997,16	10.305,30	28.648,00	2.636,00
"P + Inv. Retornos" MV	15.025,38	10.411,47	33.957,00	3.777,50
"P + R" MV	**10.701,19**	7.663,99	32.004,80	2.989,60

Tabla 3. Resultados en término de costos totales de las 810 instancias, para los tres casos planteados con múltiples niveles de velocidades de producción.

De la comparación entre los promedios de los costos totales de las 810 instancias, entre los tres casos planteados, se observa que la política "P + R" alcanza en promedio el menor costo total con 10.701,19 u.m., por lo que se puede decir que resulta conveniente por sobre las otras por una diferencia del 10,8% con respecto a la opción que le sigue (solo producción: 11.997,16 u.m.). Es importante resaltar, que, debido a la diferencia presente en los desvíos estándar, el caso "P" tiene valores máximos y mínimos menores que los valores máximos y mínimos de "P + R", respectivamente. En cuanto al caso que incorpora el inventario de retornos, resulta ser el caso de mayor costo total promedio, se observa que se encuentra un 40% por encima del caso de "P + R" y un 25% arriba del caso de "P", lo cual tiene sentido, ya que no existe manera de evitar almacenar las cantidades retornadas recibidas en los diferentes períodos del horizonte de planificación.

Por otro lado, se presentan los resultados en término de tiempo de resolución (ver **Tabla 4**):

	Promedio	**Desv est**	**Máx**
"P" MV	**6,2787**	0,4267	9,4633
"P + Inv. Retornos" MV	6,3979	0,7940	12,9127
"P + R" MV	7,3491	1,5937	20,5298

Tabla 4. Resultados en término de tiempo de resolución [miles de s] de las 810 instancias, para los tres casos planteados con múltiples niveles de velocidades de producción.

Los promedios de tiempo de resolución de las 810 instancias indican que la instancia del caso de solo producción se resuelve en 6,27 milisegundos en promedio, y la instancia del caso de producción y remanufactura en 7,34 milisegundos en promedio, lo

que representa que el caso de “P” se resuelve un 14,5% más rápido en relación al caso de “P + R”. Sin embargo, observando los valores máximos, hay instancias del “P + R” en donde el tiempo de resolución duplica al tiempo de las instancias de “P”. Por otro lado, la incorporación de los retornos al caso “P” produce que el tiempo de resolución promedio pase a ser 6, 39 milisegundos, que, en definitiva, no representa un incremento considerable en la complejidad del problema.

5 Conclusiones

En este trabajo, se abordó una extensión del problema de dimensionamiento de lote y secuenciación en un sistema híbrido de producción y remanufactura, incorporando un conjunto de múltiples velocidades de producción y remanufacturación. Además, se analizaron diferentes políticas de producción que representan distintos grados de responsabilidad sobre los productos en desuso.

Se desarrolló e implementó un modelo de optimización de programación lineal entera mixta (MILP) para resolver el problema en cuestión. Se analizaron los resultados obtenidos a partir de una experimentación numérica para los casos planteados, con el objetivo de: en primer lugar, evaluar si la incorporación de velocidades de producción/remanufacturación resultaba conveniente tanto en términos económicos como en términos de esfuerzo computacional, en segundo lugar, se analizaron los beneficios directos e indirectos de adoptar distintas metodologías para responsabilizarse de los productos que quedan en desuso.

De los resultados obtenidos para el diseño experimental desarrollado se concluye que la incorporación de velocidades de producción/remanufacturación produce cierta flexibilización del problema, lo que permite encontrar mejores soluciones en términos económicos. Esto se obtiene en todos los casos, independientemente de la política de producción adoptada. Sin embargo, en términos de esfuerzo computacional, dicha incorporación representa una complejidad adicional al problema. De todas maneras, el incremento en tiempos de resolución ocasionado no resulta representativa en comparación al beneficio económico.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, para investigaciones futuras se recomienda ampliar el número de períodos dentro de la experimentación numérica para evaluar si las conclusiones alcanzadas se confirman en horizontes de planificación más extensos. También sería interesante analizar los valores de las velocidades de producción y remanufactura, una opción podría ser encontrar que conjunto de velocidades proporciona un mayor aprovechamiento de los recursos. Otro tema interesante se abordaría al lograr representar de manera más representativa la responsabilidad de generar potenciales desechos, esto podría ser por ejemplo a través de costos de recolección de los productos, de procesos de separación de materiales para reciclaje, o de tratamientos efectuados para su disposición final.

Referencias

1. Sehnem, S., Vazquez-Brust, D., Pereira, S. C. F., & Campos, L. M. (2019). Circular economy: benefits, impacts and overlapping. Supply Chain Management: An International Journal, 24(6), 784-804.
2. Kurilova-Palisaitiene, J., Sundin, E., & Poksinska, B. (2018). Remanufacturing challenges and possible lean improvements. Journal of Cleaner Production, 172, 3225-3236.
3. Piñeyro, P., & Rossit, D. A. (2020, December). Simultaneous lot-sizing and scheduling with recovery options: problem formulation and analysis of the single-product case. In International Conference of Production Research–Americas (pp. 102-112). Cham: Springer International Publishing.
4. Mashhadi, A. R., Esmaeilian, B., & Behdad, S. (2015). Uncertainty management in remanufacturing decisions: a consideration of uncertainties in market demand, quantity, and quality of returns. ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems Part B: Mechanical Engineering, 1(2), 021007.
5. Fleischmann, B., & Meyr, H. (1997). The general lotsizing and scheduling problem. Operations-Research-Spektrum, 19, 11-21.
6. Salomon, M., Kroon, L. G., Kuik, R., & Van Wassenhove, L. N. (1991). Some extensions of the discrete lotsizing and scheduling problem. Management Science, 37(7), 801-812.
7. Fleischmann, B. (1994). The discrete lot-sizing and scheduling problem with sequence-dependent setup costs. European Journal of Operational Research, 75(2), 395-404.
8. Seeanner, F. (2013). Multi-stage simultaneous lot-sizing and scheduling: Planning of flow lines with shifting bottlenecks. Springer Science & Business Media.
9. Copil, K., Wörbelauer, M., Meyr, H., & Tempelmeier, H. (2017). Simultaneous lotsizing and scheduling problems: a classification and review of models. OR spectrum, 39, 1-64.
10. Fleischmann, B. (1990). The discrete lot-sizing and scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, *44*(3), 337-348.
11. Teunter, R. H., Bayindir, Z. P., & Den Heuvel, W. V. (2006). Dynamic lot sizing with product returns and remanufacturing. International Journal of Production Research, 44(20), 4377-4400.
12. Naeem, M. A., Dias, D. J., Tibrewal, R., Chang, P. C., & Tiwari, M. K. (2013). Production planning optimization for manufacturing and remanufacturing system in stochastic environment. Journal of Intelligent Manufacturing, 24, 717-728.
13. Gana, L., Dávila-Gálvez, S., & Quezada, F. (2023, September). Multi-product Lot-Sizing Problem with Remanufacturing, Lost Sales and Sequence-Dependent Changeover Cost. In International Conference on Computational Logistics (pp. 517-532). Cham: Springer Nature Switzerland.
14. Giglio, D., Paolucci, M., & Roshani, A. (2017). Integrated lot sizing and energy-efficient job shop scheduling problem in manufacturing/remanufacturing systems. Journal of cleaner production, 148, 624-641.
15. Roshani, A., Paolucci, M., Giglio, D., Demartini, M., Tonelli, F., & Dulebenets, M. A. (2023). The capacitated lot-sizing and energy efficient single machine scheduling problem with sequence dependent setup times and costs in a closed-loop supply chain network. Annals of operations research, 321(1), 469-505.
16. Schulz, T. (2011). A new Silver–Meal based heuristic for the single-item dynamic lot sizing problem with returns and remanufacturing. International Journal of Production Research, 49(9), 2519-2533.