

SII, Simposio Argentino de Informática Industrial

## Planificación de las operaciones en una planta de aserrío mediante optimización matemática

Diego Broz<sup>1</sup>, Nicolás Vanzetti<sup>2</sup>, Gabriela Corsano<sup>2,3</sup>, Jorge M. Montagna<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ciencias Forestales (FCF, UNaM), CONICET, Bertoni 124, (N3382GDD) Eldorado, Misiones, Argentina

[diegoricardobroz@gmail.com](mailto:diegoricardobroz@gmail.com)

<sup>2</sup> Instituto de Desarrollo y Diseño (INGAR, CONICET-UTN), Avellaneda 3657, (S3002GJC) Santa Fe, Argentina.

<sup>3</sup> Facultad Ingeniería Química (FIQ), Universidad Nacional Litoral (UNL) Santiago del Estero 2654, (S3000AOM) Santa Fe, Argentina.

[{nvanzetti,gcorsano,mmontagna}@santafe-conicet.gov.ar](mailto:{nvanzetti,gcorsano,mmontagna}@santafe-conicet.gov.ar)

**Resumen.** Los problemas de competitividad evidencian la necesidad de innovación en las industrias forestales del NEA. La gestión eficiente de los procesos reduce los costos y consecuentemente los precios de los productos finales. La aplicación de técnicas, basadas en optimización matemática, es recomendable debido a su robustez. En este trabajo se presenta un modelo matemático para la planificación de la producción diaria que contempla los troncos, productos intermedios, productos finales y los costos incurridos. Los troncos son transformados en productos intermedios por medio de los patrones de corte, a su vez, éstos son transformados en productos finales. Los resultados demostraron una buena performance de la herramienta.

### 1 Introducción

En Argentina, el 85% de la producción foresto-industrial se encuentra en el Noroeste Argentino (NEA), especialmente en Misiones y Norte de Corrientes [1,2]. En la actualidad, el sector atraviesa una serie de problemas que socaban la competitividad [2]. Lograr sistemas productivos más eficientes es una de las claves para impulsar la industria forestal del NEA. Las técnicas de optimización matemática son consideradas las herramientas más robustas para abordar los problemas de planificación industrial [3]. Muchos modelos de planificación para la industria de aserrío fueron desarrollados en Europa, Canadá, Estados Unidos y Chile en base a las características propias de cada región. En este sentido, Alvarez y Vera [4] proponen la aplicación de optimización robusta debido a la variabilidad que presenta el rendimiento de los troncos según el Patrón de Corte (PC) aplicado. Esta metodología busca encontrar resultados facti-

bles para un conjunto de escenarios probables. Maturana y col. [5] demuestran que la planificación por medio de un modelo MILP (*Mixed Integer Linear Programming*) presenta mejores resultados en comparación a las decisiones del operario, en base a su experiencia. Saadatyar [6] y Sohrabi [7] proponen un algoritmo para la generación de PC teniendo en cuenta tanto la madera central como lateral. Ambos autores plantean el uso de “campañas” entendiéndose esto como la combinación de tipo de tronco, lista de precio y PC. En una segunda etapa las “campañas” creadas son programadas utilizando un modelo MILP. Saadatyar [6] aplica un enfoque de *Rolling Planning Horizons* y Sohrabi [7] un modelo *Powers-of-Two* con el objeto de calcular el tamaño de lote de la “campaña” y minimizar el tamaño del lote e inventario. En el trabajo de Zanjani y col. [8] se puede encontrar un modelo de planificación multiperíodo y multiproducto en que incorporan incertidumbre en el rendimiento de los troncos. Los autores abordan el problema por medio de optimización robusta y estocástica. Por su parte, en Zanjani y col. [9] se presenta el mismo problema abordado con optimización estocástica en dos etapas, modelando la componente aleatoria con una distribución de probabilidades discretas y el método *Sample Average Approximation* para la generación de escenarios. Lobos y Vera [10] plantean un modelo para planificación de aserraderos que coordina dos horizontes de planificación, uno táctico –mensual– que define la compra de troncos y la mano de obra a contratar y otro operativo –semanal– que utiliza como input la salida del modelo táctico. Se aborda el problema mediante optimización estocástica de dos etapas donde el output del plan táctico es la primera etapa.

Existe una vasta literatura sobre el problema de corte y empaque. Algunas aplicaciones se dan en corte de cartón, troncos, chapas y tela, carga de contenedores, diseño de *layout*, entre otras actividades. Las técnicas para abordar estos problemas pueden ser algoritmos de generación, heurísticas, metaheurística o técnicas híbridas [11]. En el caso de la industria del aserrío, el objetivo es incorporar rectángulos, que representan los productos primarios con una demanda definida, en un círculo. De esta manera se busca optimizar la materia prima, satisfaciendo la demanda y sin generar un exceso de inventario y residuos. Hay varios trabajos que abordan la problemática de la planificación en la industria del aserrío [6, 7, 11, 12, 13]. En algunos casos se reduce el problema a pocos troncos y pocos PC [4, 8, 9, 10] lo cual limita la solución a un espacio de búsqueda muy pequeño y, por lo tanto, los resultados se obtienen en tiempos de cómputo bajos. En estos trabajos, no se discrimina si el producto obtenido proviene de la madera central o lateral, algo importante para algunos mercados. En algunos casos no se expone la metodología utilizada para la generación de PC [4, 5, 8, 9, 14]. En otros, dada la complejidad, se proponen resoluciones con algoritmos heurísticos, no incluidos en paquetes comerciales [14] o son poco practicables en un caso real [8, 9, 10].

La falta de PC adaptados a la oferta y demanda conlleva una mala utilización de los recursos, con impacto en la gestión de inventario, pérdida de materia prima, bajo rendimiento y reducidos ingresos económicos. El desarrollo de un Sistema de Soporte a las Decisiones (SSD) es un punto clave para lograr un proceso más eficiente. En este sentido un algoritmo de generación de PC y un modelo matemático de asignación de PC a troncos es desarrollado con el objetivo de cubrir las dificultades presentadas en los trabajos previos.

## 2. Descripción del problema

Este trabajo se lleva a cabo en base al análisis operativo y tipificación de un aserradero tipo del NEA. La Figura 1 describe el sistema productivo y los flujos correspondientes. La materia prima –troncos– se procesa en el bosque y se transporta en longitudes estandarizadas, en base a los requerimientos del aserradero, con diámetro en la punta fina variable según el esquema de trozado longitudinal. En el aserradero, los troncos son apilados en la playa de acopio según la longitud, diámetro y fecha de ingreso. En una primera etapa del proceso, los troncos son descortezados y procesados en la sierra principal, de la cual se obtiene una semibasa. Posteriormente la semibasa pasa por una sierra secundaria, generalmente múltiple, donde se obtienen tablas. Luego del proceso de despunte y clasificado, se procede al secado en cámaras. Finalmente, la madera se traslada a la planta de remanufactura para su acabado final –cepillado, moldeado o saneado–. El PC *primario*, por medio de las sierras principal y secundaria, define el aprovechamiento de los troncos en proceso de aserrado. En esta etapa se obtienen los *productos intermedios*. En el proceso de remanufactura se aplica un PC *secundario*, por medio de equipos específicos, siendo la materia prima los productos intermedios obtenidos del aserradero. En esta etapa se obtienen los *productos finales*.

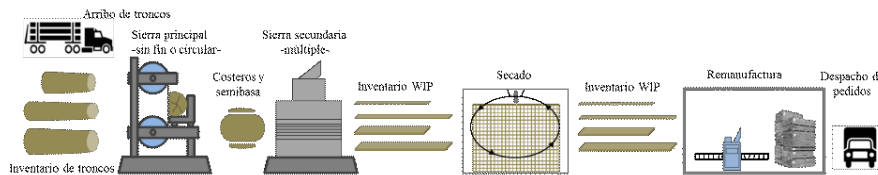


Figura 1. Flujo de producto y transformación de troncos en productos finales.

El plan debe buscar un balance entre disponibilidad de troncos, demanda de productos y niveles de inventario en un marco de transformación de una materia prima, asumible a un cono truncado, en productos aserrados, definidos como prismas rectangulares. La industria es abastecida por troncos y clasificada por lotes según el diámetro y longitud. El operario o jefe de producción debe establecer un plan de aprovechamiento de los troncos en base a la disponibilidad, un set de PC reducidos y la demanda de productos por parte de remanufactura. Esto se basa, generalmente, en la experiencia o algún criterio empírico que dista significativamente de un resultado ideal [5].

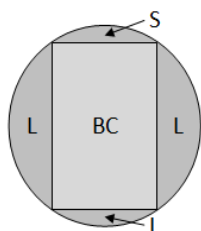
## 3. Sistema de soporte a las decisiones

En una primera etapa, el SSD genera los PC factibles, *primarios* y *secundarios*, considerando la tecnología del aserradero (sierra principal, secundaria y reaserradora).

El generador de PC *primario* es un algoritmo de búsqueda exhaustivo que permite determinar todos los patrones posibles para la obtención de productos intermedios a partir de un tronco de determinado diámetro. Para su funcionamiento dispone como

dato de un conjunto de espesores y otro de anchos, y otro de relaciones entre ellos. Este último indica para cada espesor de tabla que anchos son admisibles.

Como primera etapa del generador, se toma el menor diámetro del tronco y se lo divide en 5 secciones: dos costeros laterales (L) iguales, un costero superior (S), un costero inferior (I) (igual al superior) y un bloque central (BC) (Figura 2). El ancho que puede adoptar el BC coincide con los anchos que integran el conjunto propuesto. Los cortes transversales al BC dependerán de los espesores habilitados para ese ancho y del número de cuchillas disponibles para los cortes. Para los cuatros costeros, el procesamiento es similar: se propone un número de cortes paralelos a la cara plana, cada corte genera tablas de un determinado espesor, y el ancho seleccionado será el de mayor tamaño que pueda inscribirse en la tabla y que esté disponible para ese espesor.



#### Referencias

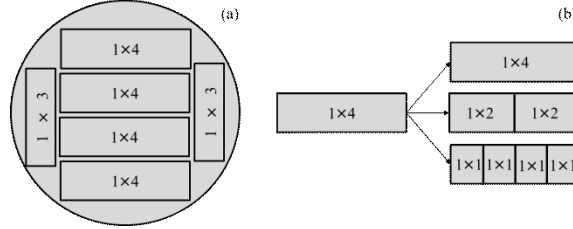
BC: Bloque central  
L: Costero lateral  
S: Costero superior  
I: Costero inferior

**Figura 2.** Sección de PC *primario*.

Los PC *secundarios* son propuestos por el usuario como dato del modelo. Su generación depende de las políticas de cada aserradero, de los productos que comercializa y de los equipos disponibles para llevar a cabo la transformación de los productos intermedios a los productos finales.

En una segunda etapa, el MILP debe asignar los PC (Figura 3a) a los troncos disponibles en base a la demanda de productos intermedios. Esto implica determinar qué PC se van a aplicar y cuántos troncos van a ser cortados con el mismo. En forma simultánea, se debe determinar cómo se transforman estos productos intermedios según la demanda de productos finales, definidos por el área de remanufactura (Figura 3b). Los productos finales se pueden obtener a partir de distintos productos intermedios y, por otro lado, cada producto intermedio puede ser vendido como tal. En todo el proceso anterior, se debe tener en cuenta la disponibilidad de troncos y la producción de productos intermedios y finales. El objetivo del MILP es maximizar el beneficio dado por la venta de los productos finales descontando los costos incurridos.

El modelo MILP considera que se dispone de un conjunto de troncos de diámetro  $d \in D$  (diámetro en la punta fina), longitud  $l \in L$ . Se genera un conjunto de patrones de corte  $p \in P$ , para el corte *primario* de troncos a productos de primera transformación, y un conjunto de patrones de corte *secundario*  $s \in S$  que establece la relación entre los productos del aserradero  $i \in I$  obtenidos en la primera transformación y los productos finales  $f \in F$  obtenidos en la segunda transformación, es decir en el reproceso en remanufactura.



**Figura 3.** Ilustración de un PC obtenido en el aserradero (a) y los productos obtenidos en remanufactura a partir de un productos 1x4 (b).

La función objetivo maximiza el beneficio neto obtenido entre la venta de productos finales y los costos incurridos (Ec. 1).

$$Max Z = I - (Psc + Sc + Prc + Duc) \quad (1)$$

Los ingresos ( $I$ ) se calculan a partir del precio de las unidades vendidas ( $Qf_{l,f}$ ) y del precio unitario de venta ( $S_{l,f}$ ) (Ec. 2). Las erogaciones están dadas por el costo de producción del área de aserrado ( $Psc$ ), costo total de setup ( $Sc$ ), costo de producción del área de remanufactura ( $Prc$ ) y costo por insatisfacción de los clientes ( $Duc$ ). El costo de producción del área de aserrado ( $Psc$ ) se determina como la suma del costo de la materia prima utilizada, el costo de producción y un costo fijo ( $FSc$ ), el primero dependen de la cantidad y tipo de troncos procesados ( $Ql_{p,d,l}$ ) y del costo unitario de la materia prima ( $Cr_{m_{d,l}}$ ) y el segundo es proporcional a la cantidad de troncos utilizados ( $Ql_{p,d,l}$ ) con un determinado PC *primario* y al costo unitario por utilizar dicho patrón ( $Cps_{p,l}$ ) (Ec. 3). El costo total de setup ( $Sc$ ) está dado por el tiempo de reconfiguración ( $ts_p$ ) y el costo ( $Cs$ ) asociado a la aplicación del PC *primario*,  $x_p = 1$ , (Ec. 4). El costo de producción del área de remanufactura ( $Prc$ ) está dado por el costo de producción unitario ( $Cpr_{s,l}$ ) y el nivel de producción ( $Qr_{s,l,i}$ ), más un costo fijo ( $FRC$ ) (Ec. 5). El costo total por insatisfacción de los clientes ( $Duc$ ) está dado por un costo unitario ( $Cud_{l,f}$ ), definido por el usuario y que depende de las dimensiones de producto final, y la demanda que no se cubrió ( $Du_{l,f}$ ) (Ec. 6).

$$\sum_l \sum_f S_{l,f} Qf_{l,f} = I \quad (2)$$

$$\sum_p \sum_d \sum_l Cr_{m_{d,l}} Ql_{p,d,l} + \sum_p \sum_d \sum_l Cps_{p,l} Ql_{p,d,l} + FSc = Psc \quad (3)$$

$$Cs \times \sum_p ts_p x_p = Sc \quad (4)$$

$$\sum_s \sum_l \sum_i Cpr_{s,l} Qr_{s,l,i} + FRC = Prc \quad (5)$$

$$\sum_l \sum_f Cud_{l,f} Du_{l,f} = Duc \quad (6)$$

Mediante la Ec. 7 se define el número de productos intermedios ( $Ps_{l,i}$ ) que se obtiene de un lote de troncos ( $Ql_{p,d,l}$ ) aplicando un determinado patrón de corte ( $fs_{p,d,i}$ ). La Ec. 8 busca que el volumen de productos intermedios enviados a remanufactura ( $Qi_{l,i}$ ) no supere la producción de productos intermedios.

$$\sum_p \sum_d fs_{p,d,i} Ql_{p,d,l} = Ps_{l,i} \quad \forall l, i \quad (7)$$

$$Qi_{l,i} \leq Ps_{l,i} \quad \forall l, i \quad (8)$$

El nivel de troncos procesados ( $Ql_{p,d,l}$ ) no debe superar la disponibilidad ( $Il_{d,l}$ ) (Ec. 9). La Ec. 10 contabiliza el tiempo de proceso de cada lote ( $Ttp_{p,d,l}$ ) en función al tiempo que se requiere para procesar cada tronco ( $tp_{p,l}$ ). Por medio de la Ec. 11 obliga a que no se corten troncos con el PC *primario* es si este patrón no se elige ( $x_p = 0$ ). El setup se contabiliza mediante la binaria  $x_p$  lo cual define el PC *primario* que se utiliza en cada lote.

$$\sum_p Ql_{p,d,l} \leq Il_{d,l} \quad \forall d, l \quad (9)$$

$$tp_{p,l} Ql_{p,d,l} = Ttp_{p,d,l} \quad \forall p, d, l \quad (10)$$

$$\sum_d \sum_l Ql_{p,d,l} \leq M x_p \quad \forall p \quad (11)$$

Por medio de la Ec. 12 se restringe a operar por encima del tiempo diario disponible, por este motivo la suma entre el tiempo de setup ( $Tts$ ) y de proceso de todos los lotes ( $Ttp_{p,d,l}$ ) debe ser menor a al tiempo disponible ( $Tmax$ ). La Ec. 13 contabiliza el tiempo acumulado de setup.

$$\sum_p \sum_d \sum_l Ttp_{p,d,l} + Tts \leq Tmax \quad (12)$$

$$\sum_p ts_p x_p = Tts \quad (13)$$

La Ec. 14 determina la cantidad de productos intermedios  $i$  que serán utilizados en remanufactura con el PC *secundario*  $s$ . A través de la relación  $fr_{s,i,f}$  se transforman los productos intermedios del aserradero, en productos finales  $f$  ( $Pf_{l,f}$ ), en remanufactura (Ec. 15).

$$\sum_s Qr_{s,l,i} \leq Qi_{l,i} \quad \forall l, i \quad (14)$$

$$\sum_s \sum_i fr_{s,i,f} Qr_{s,l,i} = Pf_{l,f} \quad \forall l, f \quad (15)$$

La demanda de productos finales ( $D_{l,f}^{max}$ ) debe ser satisfecha por la producción del área de remanufactura ( $Q_{l,f}$ ). Caso contrario una variable de insatisfacción ( $Du_{l,f}$ ) se activa para compensar la igualdad (Ec. 16). Por medio de la Ec. 17 se evita que las ventas superen la disponibilidad de productos finales ( $P_{l,f}$ ).

$$Q_{l,f} + Du_{l,f} = D_{l,f}^{max} \quad \forall l, f \quad (16)$$

$$Q_{l,f} \leq P_{l,f} \quad \forall l, f \quad (17)$$

### 3. Resultados y discusiones

Para comprobar el desempeño del modelo, se planteó un escenario reducido, con troncos de 2 clases diamétricas y 6 longitudes diferentes, para los cuales se generaron 2.880 PC *primario* que producen 12 tablas intermedias y 36 PC *secundarios* que dan lugar a 16 tablas finales. Los precios de venta, costos y tiempos de procesos se consideran acorde a un sistema real. Estos datos no se muestran por cuestiones de espacio, pero están disponibles para el lector interesado. Para la resolución del modelo se utilizó GAMS® 24.1.3 y CPLEX® 24.7.3 como paquete de optimización MILP [15]. La ejecución se realizó en un computador con procesador Intel Core i7 de 8 GB de memoria RAM. Éste presenta 37.964 ecuaciones, 75.031 variables continuas y 2.880 variables binarias. El tiempo de cómputo requerido para encontrar la solución óptima fue de 175 segundos.

En la Tabla 1 se exponen los resultados económicos, demanda insatisfecha e inventarios obtenidos. El costo por demanda insatisfecha es el más significativo y representa el 57% de los costos totales debido a que existe un 25% de la demanda no cubierta. Cabe señalar que esto ocurre por falta de tiempo de operación del aserradero, pues se utiliza todo el tiempo disponible. A éste le siguen los costos variables del aserradero, con un 32%, los costos variables del área de remanufactura, con un 10%, y los costos de setup, que no superan el 1%. La solución óptima decide asignar los PC *primarios* a los troncos según se muestra en la Tabla 2. En la Tabla 3 se exponen los PC *secundarios* utilizados para convertir los productos intermedios en productos finales.

Tabla 1. Indicadores económicos, satisfacción e inventarios.

|  |           |          |
|--|-----------|----------|
| Ingreso neto                           | 1.370.321 | \$       |
| Ingreso bruto                          | 2.327.804 | \$       |
| Costo variable aserradero              | 298.758   | \$       |
| Costo setup                            | 6.000     | \$       |
| Costo variable remanufactura           | 95.114    | \$       |
| Costo demanda insatisfecha             | 525.611   | \$       |
| Demanda insatisfecha                   | 25        | %        |
| Inventario final productos intermedios | 0         | unidades |
| Inventario final productos finales     | 89        | unidades |

Tabla 2. Troncos procesados según PC *primario*, diámetro y longitud.

| PC <i>primario</i>   | Diámetros        | Longitudes |           |           |           |           | Total por PC |
|----------------------|------------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------|
|                      |                  | <i>l1</i>  | <i>l2</i> | <i>l3</i> | <i>l4</i> | <i>l6</i> |              |
| <i>p633</i>          | <i>d1</i>        |            |           | 108       | 25        | 167       | 300          |
| <b><i>p640</i></b>   | <b><i>d1</i></b> | <b>39</b>  |           | 202       | 34        | 43        | 318          |
| <i>p905</i>          | <i>d1</i>        | 278        | 69        |           | 91        |           | 438          |
| <b><i>p1904</i></b>  | <b><i>d2</i></b> | <b>202</b> | 225       |           |           | 33        | 459          |
| <i>p2625</i>         | <i>d2</i>        |            |           | 240       |           |           | 240          |
| Total por longitudes |                  | 518        | 295       | 550       | 149       | 243       | 1.755        |

En la Tabla 2 se aprecia que, para un turno, se aplicaron tres PC a los troncos con diámetro *d1* y dos PC a los troncos con diámetro *d2*. Para cada PC *primario* se procesaron entre 240 y 459 troncos y, para cada longitud, entre 149 y 550 troncos, totalizando 1.755 troncos en el turno. Es importante recalcar que un PC determinado se puede aplicar a todas las longitudes (*l1*, ..., *l6*) sin requerir un setup de equipos, por tal motivo, el número de setup es igual al número de PC utilizados.

Tabla 3. Cantidad productos intermedios a los que se le aplica un patrón de corte.

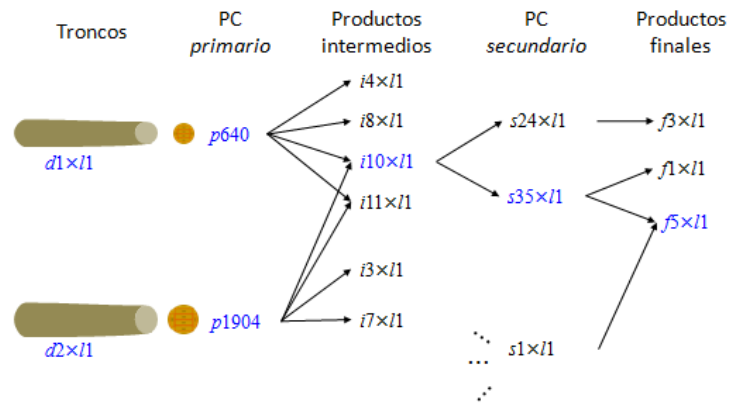
|            | <i>l1</i>         |            | <i>l2</i>         |            | <i>l3</i>  |          | <i>l4</i>  |          | <i>l6</i>         |            |
|------------|-------------------|------------|-------------------|------------|------------|----------|------------|----------|-------------------|------------|
|            | Patrón            | Cantidad   | Patrón            | Cantidad   | Patrón     | Cantidad | Patrón     | Cantidad | Patrón            | Cantidad   |
| <i>i1</i>  | <i>s1</i>         | 278        | <i>s1</i>         | 69         |            |          | <i>s13</i> | 91       |                   |            |
| <i>i2</i>  |                   |            |                   |            | <i>s2</i>  | 240      |            |          |                   |            |
| <i>i3</i>  | <i>s25</i>        | 65         |                   |            |            |          |            |          |                   |            |
|            | <i>s3</i>         | 403        | <i>s3</i>         | 520        |            |          | <i>s3</i>  | 91       | <i>s3</i>         | 65         |
| <i>i4</i>  | <i>s4</i>         | 78         |                   |            | <i>s4</i>  | 860      | <i>s4</i>  | 117      | <i>s4</i>         | 420        |
| <i>i5</i>  | <i>s5</i>         | 556        | <i>s5</i>         | 139        |            |          | <i>s5</i>  | 181      |                   |            |
| <i>i6</i>  |                   |            |                   |            | <i>s6</i>  | 240      |            |          |                   |            |
| <i>i7</i>  | <i>s7</i>         | 403        | <i>s7</i>         | 451        |            |          |            |          | <i>s7</i>         | 65         |
| <i>i8</i>  | <i>s8</i>         | 78         |                   |            | <i>s8</i>  | 860      | <i>s8</i>  | 117      | <i>s8</i>         | 420        |
|            |                   |            |                   |            |            |          | <i>s17</i> | 135      | <i>s17</i>        | 77         |
| <i>i9</i>  |                   |            |                   |            | <i>s18</i> | 650      | <i>s18</i> | 260      | <i>s18</i>        | 520        |
|            | <i>s30</i>        | 705        | <i>s30</i>        | 156        |            |          |            |          | <i>s30</i>        | 130        |
| <i>i10</i> | <i>s9</i>         | 962        | <i>s9</i>         | 260        |            |          | <i>s9</i>  | 299      | <i>s9</i>         | 273        |
|            |                   |            | <i>s23</i>        | 43         | <i>s10</i> | 605      | <i>s10</i> | 101      | <i>s10</i>        | 69         |
| <i>i11</i> | <b><i>s24</i></b> | <b>37</b>  | <b><i>s24</i></b> | <b>442</b> |            |          |            |          |                   |            |
|            | <b><i>s35</i></b> | <b>684</b> | <b><i>s35</i></b> | <b>191</b> |            |          |            |          | <b><i>s35</i></b> | <b>158</b> |
| <i>i12</i> | <i>s11</i>        | 403        | <i>s11</i>        | 520        |            |          | <i>s11</i> | 104      | <i>s11</i>        | 65         |
|            |                   |            |                   |            | <i>s27</i> | 975      | <i>s27</i> | 98       | <i>s27</i>        | 390        |
| <i>i12</i> | <i>s12</i>        | 78         |                   |            | <i>s12</i> | 936      | <i>s12</i> | 117      | <i>s12</i>        | 333        |

En la Tabla 3 se expone la cantidad de productos intermedios (*i*) de una determinada longitud (*l*) al que se le aplica un PC *secundario* (*s*) para transformar dicho producto intermedio en producto final (*f*).

Así por ejemplo, como se aprecia en la Figura 4, el proceso transforma dos troncos de diferentes diámetros (*d1* y *d2*) e igual longitud (*l1*) a un determinado producto final (*f*) aplicando los PC *primario* *p640* y *p1904*, respectivamente. De *p640* se obtienen los productos intermedios *i4*, *i8*, *i10* y *i11*, mientras que de *p1904* se obtiene *i3*, *i7*, *i10* y *i11*. Estos dos PC comparten dos productos intermedios, *i10* y *i11*. Aplicando luego el PC *secundario* *s24* y *s35* al producto *i10* se pueden obtener los productos finales *f1* y *f5*. Éste último se puede obtener también aplicando un patrón de corte *s1* a otros productos intermedios (*i*) originados, a su vez, por otros PC *primarios* (*p*) y



troncos ( $d \times l$ ). De esta manera se consigue satisfacer la demanda de productos finales con diferentes combinaciones de troncos y patrones de corte *primarios* y *secundarios*.



**Figura 4.** Ilustración del proceso de transformación de la materia prima en productos finales.

A partir del layout planteado en la Figura 4 y de los resultados expuestos en la Tabla 2 y 3, se puede ver que a 39 troncos de  $l1$  se le aplicó el  $p640$  y a 202 el  $p1904$ . De esta manera se obtienen, 721 productos intermedios  $i10 \times l1$ . A 37 de estos productos intermedios se le aplica el patrón  $s24$ , obteniendo 74 productos finales  $f3$ , y con los restantes 684 productos intermedios se utiliza el patrón  $s35$ , obteniendo 684  $f1$  y 684  $f5$ .

#### 4 Conclusiones

Se presentó un modelo matemático, basado en MILP, para abordar el problema de la planificación de operaciones en una planta de aserrío. El modelo contempla el proceso de transformación de la materia prima, pasando por productos intermedios, en productos finales para un horizonte diario. El objetivo de este enfoque es maximizar el beneficio económico. Los resultados mostraron una clara consistencia y relación entre las componentes (troncos, productos intermedios y finales).

A pesar de la buena performance obtenida con el enfoque propuesto, dadas las características del problema real, es importante incorporar, en trabajos futuros, decisiones de inventarios (materia prima, productos intermedios y finales), compra de troncos y tiempos de permanencia de éstos en la playa de acopio, de tal forma de representar el modelo mediante una formulación multiperíodo.

## Referencias

1. Mac Donagh, P.; Berger, S.; Fhaler, J.; Fornaso, G., Berlinger, C.; Paiva, D.; Bedrij, N.: La experiencia del aglomerado productivo forestal misionero y corrientes: Fase II, los proyectos sectoriales. XXVI Jornadas Forestales de Entre Ríos. Concordia, Argentina (2012).
2. Broz, D.; Rossit, D.; Rossit, D.; Cavallin, A.: Challenge in supply chains management in argentina: the case of forestry-industrial sector. The 8th International Conference on Production Research – Americas 2016. Santiago de Chile, Chile (2016).
3. Anderson, D. R.; Sweeney, D. J.; Williams, T. A.; Camm, J. D. ; Cochran, J. J.: An introduction to management science: quantitative approaches to decision making. Cengage learning (2015).
4. Alvarez, P.P.; Vera, J. R.: Application of robust optimization to the sawmill planning problem. *Annals of Operations Research*, 219(1) (2014) 457-475.
5. Maturana, S.; Pizani, E.; Vera, J.: Scheduling production for a sawmill: A comparison of a mathematical model versus a heuristic. *Computers & Industrial Engineering*, 59(4) (2010) 667-674.
6. Saadatyar, S.: Medium term production planning and campaign scheduling for sawmill. Tesis de Maestría. Dalhousie University. Nueva Escocia, Canadá (2013) 162 pp.
7. Sohrabi, P.: A Three-stage Control Mechanism for the Lumber Production Process of a Sawmill Based on a Powers-of-two Modelling Approach. Tesis de Maestría. Dalhousie University. Nueva Escocia, Canadá (2013) 196 pp.
8. Zanjani, M.K.; Ait-Kadi, D.; Nourelfath, M.: Robust production planning in a manufacturing environment with random yield: A case in sawmill production planning. *European Journal of Operational Research*, 201(3) (2010) 882-891.
9. Zanjani, M.K.; Ait-Kadi, D.; Nourelfath, M.: A stochastic programming approach for sawmill production planning. *International Journal of Mathematics in Operational Research*, 5(1) (2013) 1-18.
10. Lobos, A.; Vera, J. R.: Intertemporal stochastic sawmill planning: Modeling and managerial insights. *Computers & Industrial Engineering*, 95(1) (2016) 53-63.
11. Hinostroza, I.; Pradenas, L.; Parada, V.: Board cutting from logs: Optimal and heuristic approaches for the problem of packing rectangles in a circle. *International Journal of Production Economics*, 145(2) (2013) 541-546.
12. Seguel, J. E.: Optimización de los esquemas de corte en aserraderos forestales mediante algoritmos metaheurísticos (Doctoral dissertation, Universidad de Concepción. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Industrial) (2007).
13. Todoroki, C.; Rönnqvist, M.: Dynamic control of timber production at a sawmill with log sawing optimization. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 17(1) (2002) 79-89.
14. Gaudreault, J.; Forget, P.; Frayret, J. M.; Rousseau, A.; Lemieux, S.; D'Amours, S.: Distributed operations planning in the softwood lumber supply chain: models and coordination. *International Journal of Industrial Engineering: Theory Applications and Practice*, 17(3) (2010) 168-189.
15. McCarl, B.A. ; Meeraus, A. ; Van Der Eijk, P. ; Bussieck, M. ; Dirkse, M. ; Steacy, P. (2013): McCarl GAMS user guide.