



TESIS DE GRADO  
EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

“Selección de estrategias de integración de línea a través de modelos de simulación. Aplicación en una línea de conversión de papel tissue.”

AUTOR: Rodrigo Reyes Levalle  
42248

DIRECTORES DE TESIS:  
Ing. Ind. Julio García Velasco  
Ing. Ind. Pablo Ciapanna

2011



## Resumen ejecutivo

Las industrias modernas de procesos continuos o semi-continuos se encuentran frecuentemente frente al desafío de articular la interacción entre los equipos que componen sus líneas de producción con el fin de obtener un flujo ininterrumpido a través de las mismas, maximizando la eficiencia del proceso. El conjunto de normas de interacción entre los equipos, enclavamientos, parametrización de los controles automatizados y reglas de operación utilizadas por los operarios que gestionan el proceso se conoce como estrategia de integración de línea.

La definición de estrategias de integración de línea es una tarea compleja para la cual no existe una metodología estandarizada ni herramientas que faciliten su realización. Al diseñar una línea de producción cuyos equipos se integran por controles automáticos se presenta el problema de definir los parámetros y estrategias de operación que permitan operar la línea en las diferentes configuraciones posibles. Encontrar la solución al problema suele ser el resultado de largos períodos de prueba y error una vez instalada la línea, y la solución obtenida puede estar lejos de ser óptima.

Se presentan entonces dos problemas en relación a la integración de equipos en una línea de producción: la definición de una estrategia de integración válida y la optimización de la configuración de la línea. En este sentido, la simulación de eventos discretos aplicada a la definición de estrategias de integración de línea, permite evaluar alternativas y obtener soluciones sin alterar el sistema real ni enfrentar los costos de hacer las pruebas ensayando sobre el mismo. El enfoque del problema mediante simulación constituye una aplicación innovadora del método, en un campo donde la investigación de las herramientas utilizadas actualmente muestra la necesidad de un método preciso y con menores costos asociados que los ensayos de prueba y error.

El presente estudio muestra la factibilidad de utilizar el método de simulación de eventos discretos para definir estrategias de integración de línea, tanto en etapas de diseño, permitiendo reducir las curvas de start-up de nuevas líneas, cómo en procesos que se encuentren en operación, permitiendo la optimización de los mismos. Se presenta un caso de aplicación sobre una línea de conversión de papel tissue en operación, un proceso continuo compuesto por numerosos equipos conectados por cintas de transporte y comandados por lógicas independientes. El caso se enfoca en la gestión de buffers, el posicionamiento de sensores y el manejo de la velocidad de los equipos que componen la línea. El resultado obtenido a partir de las alternativas analizadas es un incremento de capacidad de 6,1% respecto al nivel actual.



## **Abstract**

Modern continuous or semi-continuous process industries often face the challenge of defining the interaction among the machines that compose a production line to obtain uninterrupted production flow and maximize process efficiency. The set of interaction rules among machines, interlocks, automatic control parameters and operational rules used by operators to manage the process is known as line integration strategy.

The definition of a line integration strategy is a complex and strenuous task for which there is neither a standard approach nor tools to facilitate its execution. When designing a production line where machines are integrated by automatic controls, the problem of defining the right parameters and operating strategies to allow the line to work under different configurations arises. Finding a solution to the problem is frequently the result of long trial and error tests performed during line start-up and the solution found is usually far from optimality.

Therefore, two problems emerge regarding equipment integration in a production line: how to define a valid strategy and how to optimize line configuration. Discrete-event simulation can be used to define line integration strategies, allowing testing alternatives and reaching to conclusions without altering the real system or dealing with the costs of performing tests using the real system. This approach is an innovative one since research shows a dearth of tools and methods to solve this type of problems and therefore exposes the need for a precise method with lower costs than those associated to the trial and error approach.

The proposed study shows that using discrete-event simulation to define integration strategies is feasible, both in design stages, allowing the reduction of start-up curves in new lines, as well as in processes currently in operation, allowing their optimization. A case study is presented in this work, consisting in an application of simulation on a tissue converting. This process consists of a set of interrelated machines connected by conveyor belts and controlled by plc's. The case deals with the use of simulation to optimize buffer management, sensor positioning and equipment speed management. The results obtained from the improvement opportunities analyzed are a 6.1% capacity increase from actual capacity.



## ÍNDICE DE CONTENIDOS

---

<b>I.- INTRODUCCIÓN AL PROYECTO</b>	<b>1</b>
<b>I.1.- INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>I.2.- ETAPAS EN LA FABRICACIÓN DE PRODUCTOS DE PAPEL TISSUE</b>	<b>1</b>
I.2.1.- PREPARACIÓN DE PASTAS CELULÓSICAS	2
I.2.2.- MANUFACTURA DE PAPEL TISSUE	9
I.2.3.- CONVERSIÓN DE BOBINAS EN PRODUCTO TERMINADO	12
<b>I.3.- DEFINICIÓN DEL PROBLEMA</b>	<b>19</b>
I.3.1.- EVOLUCIÓN DEL MERCADO DEL PAPEL HIGIÉNICO	19
I.3.2.- MANUFACTURA DE HOJAS DE BAJO GRAMAJE	20
I.3.3.- CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL PROCESO PRODUCTIVO DE LA PLANTA MODELO	22
I.3.4.- FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	23
<b>I.4.- OBJETIVOS DEL PROYECTO</b>	<b>26</b>
<b>II.- REVISIÓN DE LOS MÉTODOS DE RESOLUCIÓN APLICABLES</b>	<b>27</b>
<b>II.1.- INTRODUCCIÓN</b>	<b>27</b>
<b>II.2.- BALANCE DE LÍNEA TRADICIONAL</b>	<b>27</b>
<b>II.3.- DISEÑO DE EXPERIMENTOS</b>	<b>28</b>
II.3.1.- PRINCIPIOS DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS	29
II.3.2.- PASOS DE UN DOE	29
<b>II.4.- SIMULACIÓN DE EVENTOS DISCRETOS</b>	<b>32</b>
II.4.1.- FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	34
II.4.2.- PLANIFICACIÓN DEL ESTUDIO	34
II.4.3.- MODELO CONCEPTUAL	34
II.4.4.- MODELO DE DATOS	36
II.4.5.- MODELO OPERACIONAL	37
II.4.6.- CODIFICACIÓN	37
II.4.7.- VERIFICACIÓN	37
II.4.8.- VALIDACIÓN	38
II.4.9.- DISEÑO EXPERIMENTAL	38
II.4.10.- ENSAYOS	39
II.4.11.- ANÁLISIS Y CONCLUSIONES	39
<b>II.5.- SELECCIÓN DEL MÉTODO A UTILIZAR EN EL PROYECTO</b>	<b>39</b>
<b>III.- DESARROLLO DEL PROYECTO</b>	<b>41</b>
<b>III.1.- INTRODUCCIÓN</b>	<b>41</b>
<b>III.2.- FORMULACIÓN DEL PROBLEMA</b>	<b>41</b>
<b>III.3.- PLANIFICACIÓN DEL PROYECTO</b>	<b>41</b>
<b>III.4.- MODELO CONCEPTUAL</b>	<b>42</b>
III.4.1.- ALCANCE DEL ESTUDIO	42
III.4.2.- FUNCIÓN OBJETIVO E INDICADORES DE PERFORMANCE	42
III.4.3.- MODELIZACIÓN DEL SISTEMA	42
III.4.4.- DEFINICIÓN DE ENTIDADES, ACTIVIDADES Y RECURSOS	69
<b>III.5.- MODELO DE DATOS</b>	<b>70</b>

III.5.1.- PARÁMETROS	70
III.5.2.- VARIABLES	75
III.5.3.- VARIABLES DE CONTROL	80
<b>III.6.- MODELO EN ARENA</b>	<b>80</b>
III.6.1.- ROCKWELL SOFTWARE ARENA	80
III.6.2.- CODIFICACIÓN DEL MODELO	82
III.6.3.- ENSAYOS DE VERIFICACIÓN Y VALIDACIÓN	83
<b>IV.- EXPERIMENTACIÓN Y CONCLUSIONES</b>	<b>85</b>
<b>IV.1.- INTRODUCCIÓN</b>	<b>85</b>
<b>IV.2.- EXPERIMENTO 1: GESTIÓN DEL NIVEL DEL ACUMULADOR EN PH 30M SIMPLE HOJA</b>	<b>85</b>
IV.2.2.- DISEÑO EXPERIMENTAL	88
IV.2.3.- ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	90
<b>IV.3.- EXPERIMENTO 2: AMPLIACIÓN DEL PULMÓN ENTRE ENVOLVEDORAS Y BOLSONERAS EN PH 30M SIMPLE HOJA</b>	<b>92</b>
IV.3.1.- DISEÑO EXPERIMENTAL	92
IV.3.2.- ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	93
<b>IV.4.- EXPERIMENTO 3: PROCEDIMIENTO DE AJUSTE DE VELOCIDAD DE REBOBINADO EN PH30M DOBLE HOJA</b>	<b>94</b>
IV.4.1.- DISEÑO EXPERIMENTAL	95
IV.4.2.- ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	96
<b>IV.5.- EXPERIMENTO 4: PROCEDIMIENTO DE AJUSTE DE VELOCIDAD DE REBOBINADO EN PH90M SIMPLE HOJA</b>	<b>97</b>
IV.5.1.- DISEÑO EXPERIMENTAL	97
IV.5.2.- ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	98
<b>IV.6.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>99</b>
<b>V.- FUTUROS PASOS</b>	<b>103</b>
V.1.- PRÓXIMOS PASOS PARA EL CASO DE ESTUDIO	103
V.2.- EXTENSIÓN DE LA METODOLOGÍA ANALIZADA AL CONCEPTO DE VIRTUAL FACTORY	104
<b>VI.- FUENTES</b>	<b>107</b>
<b>VII.- ANEXOS</b>	<b>109</b>
<b>VII.1.- MÉTODO DE CÁLCULO DEL NÚMERO DE CORRIDAS</b>	<b>109</b>
<b>VII.2.- TEST DE DIFERENCIA DE MEDIAS</b>	<b>109</b>
<b>VII.3.- RESULTADOS DEL EXPERIMENTO 1</b>	<b>111</b>
VII.3.1.-SIMULACIÓN PARA EL ENSAYO 1	111
VII.3.2.-SIMULACIÓN PARA EL ENSAYO 2	112
<b>VII.4.- RESULTADOS DEL EXPERIMENTO 2</b>	<b>114</b>
<b>VII.5.- RESULTADOS DEL EXPERIMENTO 3</b>	<b>117</b>
<b>VII.6.- RESULTADOS DEL EXPERIMENTO 4</b>	<b>118</b>

### **I.- INTRODUCCIÓN AL PROYECTO**

#### **I.1.- INTRODUCCIÓN**

Las industrias modernas de procesos continuos o semi-continuos se encuentran frecuentemente frente al desafío de articular la interacción entre los equipos que componen sus líneas de producción con el fin de obtener un flujo ininterrumpido a través de las mismas, maximizando la eficiencia del proceso. El conjunto de normas de interacción entre los equipos, enclavamientos, parametrización de los controles automatizados y reglas de operación utilizadas por los operarios que gestionan el proceso se conoce como estrategia de integración de línea.

La definición de estrategias de integración de línea es una tarea compleja para la cual no existe una metodología estandarizada ni herramientas que faciliten su realización. Al diseñar una línea de producción cuyos equipos se integran por controles automáticos se presenta el problema de definir los parámetros y estrategias de operación que permitan operar la línea en las diferentes configuraciones posibles. Encontrar la solución al problema suele ser el resultado de largos períodos de prueba y error una vez instalada la línea, y la solución obtenida puede estar lejos de ser óptima. Se presentan entonces dos problemas en relación a la integración de equipos en una línea de producción: la definición de una estrategia de integración válida y la optimización de la configuración de la línea.

El presente proyecto estudiará la aplicación de simulación de eventos discretos cómo herramienta para definir estrategias de integración de línea. El enfoque del problema mediante simulación constituye una aplicación innovadora del método, en un campo donde la investigación de las herramientas utilizadas actualmente muestra la necesidad de un método preciso y con menores costos asociados que los ensayos de prueba y error. Como parte del proyecto se desarrollará un caso de estudio aplicando el método a una línea de producción de rollos de papel tissue.

El cuerpo de la tesis comprende tres secciones. La primera incluye la descripción del sistema bajo estudio, las características de la problemática actual, la definición del problema y una revisión de los métodos aplicables para la resolución. La segunda sección desarrolla la modelización lógico matemática del sistema, y la codificación, verificación y validación del modelo de simulación. Por último la tercera sección comprende el análisis de las alternativas de mejora y las recomendaciones que surgen de los resultados obtenidos.

#### **I.2.- ETAPAS EN LA FABRICACIÓN DE PRODUCTOS DE PAPEL TISSUE**

El proceso de producción de papel tissue involucra operaciones de depuración, secado, rebobinado y empaque para transformar las materias primas fibrosas

## **Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación**

en productos terminados de diferentes características. En una primera aproximación, el proceso se puede dividir en tres etapas:

- Preparación de pastas celulósicas
- Producción de bobinas de papel
- Conversión de bobinas en producto terminado

La primera etapa del proceso tiene como objetivo transformar a las materias primas en pastas celulósicas aptas para la fabricación de papel. Las materias primas del proceso poseen en general orígenes variados y por lo tanto presentan características físicas poco homogéneas. Estas variaciones deben ser eliminadas en el mayor grado posible mediante un conjunto de operaciones unitarias que tienen lugar en el proceso de preparación de pasta. Según los requerimientos de cada materia prima, las fibras son sometidas a operaciones de depuración para eliminar contaminantes, blanqueo para homogeneizar el tono, y destintado para la eliminación de tintas y cargas minerales.

En la segunda etapa del proceso, se realiza una mezcla de fibras que permite lograr una hoja base con las características deseadas de blancura, tono, suavidad y resistencia a partir de las pastas obtenidas en la primera etapa. Esta mezcla de fibras puede ser sometida a un proceso de refinación para incrementar la resistencia de las uniones que se formen en el papel. Según el grado de papel que se busca obtener, se pueden adicionar a la mezcla químicos que modifiquen las características físicas y/o el comportamiento de la hoja en el producto final. La mezcla homogeneizada de fibras y químicos se somete a un proceso de dilución a fin de conformar la hoja sin que se formen flóculos de fibras. Esto ocurre en la primera sección de la máquina de papel para luego someter la hoja conformada a procesos de remoción de agua y secado que permiten reducir el contenido de humedad en la hoja del 99% al 5%. Como resultado del proceso se obtienen bobinas de papel seco que son estibadas hasta ser utilizadas en la etapa siguiente.

La última etapa del proceso es la conversión de bobinas en producto terminado. El proceso de conversión involucra las operaciones de gofrado, agregado de color, rebobinado, corte y empaque. Cada operación presenta diferentes configuraciones alternativas lo que permite producir una variada gama de productos terminados.

### **I.2.1.- Preparación de pastas celulósicas**

Las plantas de preparación de pastas celulósicas se diseñan en función a las características de las materias primas que se utilizarán en el proceso y las propiedades que se busca obtener en la hoja base. A continuación se presentan las materias primas más utilizadas en la fabricación de papel tissue y los equipos que componen una planta de preparación de pastas.

### **I.2.1.1.- Materias primas celulósicas**

Las materias primas celulósicas se pueden dividir, en una primera clasificación, en vírgenes y recicladas. Las fibras vírgenes se obtienen a partir de árboles mediante un proceso que elimina los componentes no deseados como la corteza y la lignina. Las materias primas recicladas se obtienen del recupero de materiales de descarte, como pueden ser hojas de oficina, revistas o diarios. Entre las materias primas que se incluyen dentro de cada categoría existen grupos con diferentes atributos por lo cual, en ambos casos, se las puede subclasificar basándose en tres atributos principales: el proceso de obtención, el tamaño - en las fibras vírgenes - y el tratamiento superficial - en las materias primas recicladas -.

Las fibras vírgenes se clasifican según su tamaño en cortas o largas. Este atributo es propio de la especie de árbol utilizada para su obtención. En líneas generales, todas fibras obtenidas a partir de latifolias serán cortas y aquellas obtenidas a partir de coníferas serán largas. En Argentina las especies más comúnmente utilizadas son el eucaliptus (fibra corta) y el pino elliottii (fibra larga). A su vez, las fibras vírgenes de ambas clases se subdividen según el proceso mediante el cual se obtuvieron. Si bien todos los procesos buscan separar las fibras de la lignina (cemento natural que las mantiene unidas en la estructura del árbol) la cantidad de lignina remanente varía según el proceso utilizado y junto con esto las propiedades de las fibras y su costo. Los procesos mecánicos no eliminan la lignina y entregan fibras de baja calidad mientras que los métodos químicos y termoquímicos entregan las fibras de mayor calidad (sin lignina) y por lo tanto de mayor costo.

Las materias primas recicladas se clasifican según el tratamiento superficial que posean. Las de mayor costo son las más puras como por ejemplo las hojas con impresiones en tinta negra y poca superficie cubierta, mientras que las de menor valor son las que poseen más agregados como ser un catálogo en colores con un revestimiento brillante. Esto se debe a que los procesos necesarios para recuperar las fibras son más costosos cuando mayores son los tratamientos superficiales que sea necesario eliminar.

### **I.2.1.2.- Equipos en una planta de preparación de pasta**

En una planta de papel moderna se producen varios grados de papel diferente a partir de una mezcla de fibras vírgenes, largas y cortas, con fibras recicladas por lo cual las plantas de preparación de pasta presentan un gran número de etapas y equipos. El esquema de una planta de pasta completa se muestra a continuación.

## Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

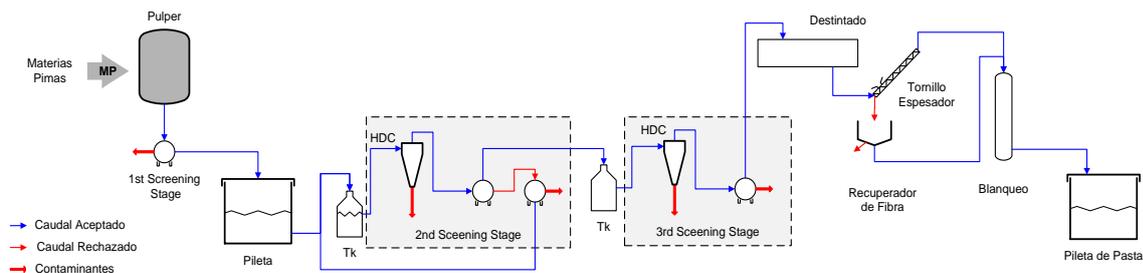


Figura I.2.1. Esquema de una planta de reciclado

Las operaciones que tienen lugar en la planta, junto con los equipos que las realizan, se describen en las secciones subsiguientes.

### I.2.1.2.1.- Pulper

El proceso de obtención de pastas celulósicas comienza en el pulper. Este equipo permite, mediante un proceso batch, desfibrar las materias primas que se reciben en fardos mediante el agregado de agua y la acción de un rotor.

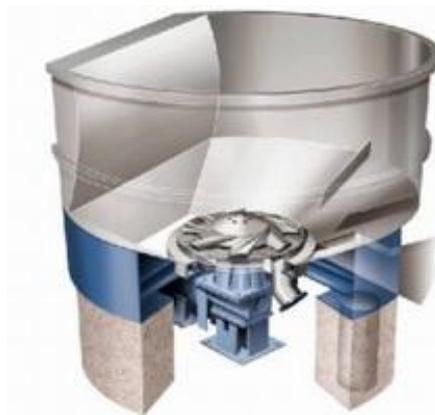


Figura I.2.2. Pulper<sup>1</sup>

En el caso de las fibras vírgenes, este es el único proceso requerido para ser transformadas en pasta apta para su posterior mezcla en la hoja base. Esto se debe a que se encuentran libres de contaminantes debido a los métodos utilizados para su obtención. Las materias primas recicladas en cambio deben atravesar por los procesos descritos a continuación a fin de ser separadas de los contaminantes.

### I.2.1.2.2.- Cleaners

El segundo proceso que atraviesan las fibras recicladas es la depuración por densidad. Los depuradores ciclónicos ó cleaners tienen como función separar las fracciones contenidas en la alimentación en base a su densidad relativa. El fluido ingresa tangencialmente formando una espiral descendente. Las fracciones de mayor densidad colisionan contra las paredes por acción de la fuerza centrífuga mientras que aquellas de menor densidad permanecen cercanas al centro del ciclón.

Existen tres diferentes configuraciones posibles para los depuradores ciclónicos según cuál sea la fracción que se desea obtener como aceptado.

<sup>1</sup> <http://www.howproductsimpact.net/box/systemboundaries/systemboundariesrepulpingofvirginpulp.htm>

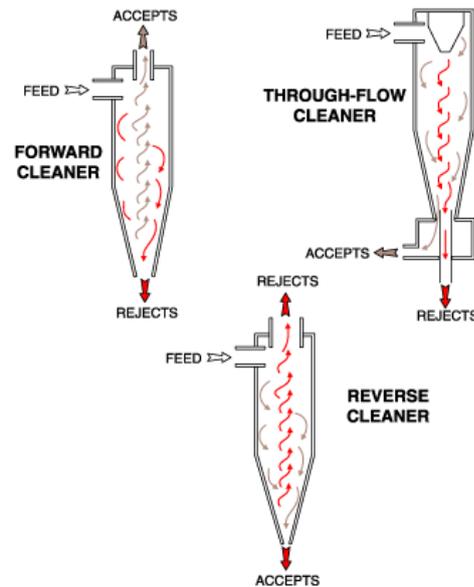


Figura I.2.3. Configuraciones posibles de cleaners <sup>2</sup>

Según el volumen de pasta a procesar los cleaners se pueden disponer en serie o en cascada, operando con diferentes parámetros de dilución para lograr la separación de las fracciones deseadas.

### I.2.1.2.3.- Centrifugal Screens

El tercer proceso en una planta de preparación de pasta reciclada es la depuración centrífuga, mediante la cual se remueven, en diferentes etapas, los contaminantes sólidos según su tamaño. Los equipos que intervienen en los procesos de depuración centrífuga se denominan depuradores ó screens. Estos equipos separan los contaminantes impulsando la pasta mediante un rotor con álabes a través de canasto ranurado. El funcionamiento general del equipo se puede explicar a partir del diagrama siguiente.

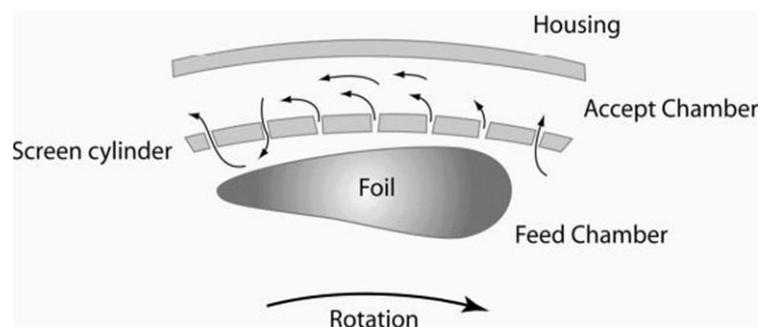


Figura I.2.4. Geometría interior de un depurador centrífugo <sup>3</sup>

Durante el movimiento de rotación de los foils cada sección del canasto es sometida a variaciones de presión. En el movimiento de aproximación, el perfil de los foils genera un aumento de presión que impulsa a la pasta a través del canasto ranurado. Los componentes contenidos en la pasta cuyo diámetro es menor al del canasto lo atraviesan y alcanzan la cámara de aceptados mientras que los componentes de mayor diámetro permanecen en la cámara de

<sup>2</sup> [http://www.tannershomeinn.com/glos\\_root/glossary](http://www.tannershomeinn.com/glos_root/glossary)

<sup>3</sup> [http://www.tannershomeinn.com/glos\\_root/glossary](http://www.tannershomeinn.com/glos_root/glossary)

## Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

alimentación. La acumulación de residuos sobre el canasto se evita mediante la presión negativa que genera el foil a medida que se aleja en su movimiento de rotación. El proceso se complementa con purgas de la cámara de alimentación para eliminar periódicamente los contaminantes retenidos.

Existen diferentes opciones de construcción para los depuradores en lo que respecta a la geometría del rotor y del canasto, como muestra la figura a continuación.

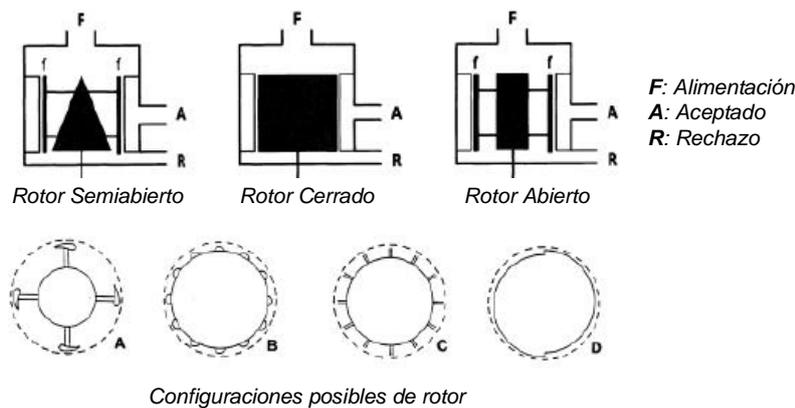


Figura I.2.5. Geometrías posibles para rotores de depuradores centrífugos <sup>4</sup>

La eficiencia para remover las diferentes clases de contaminantes depende de la geometría del depurador y las condiciones de operación.

En un proceso de preparación de pasta pueden existir varias etapas de depuración. Cada una de las etapas puede estar compuesta por más de un depurador con diferentes características geométricas en los canastos y de dilución de la pasta de forma de eliminar selectivamente cierto tipo de contaminantes. Adicionalmente, existen formas alternativas de disponer los depuradores según el objetivo buscado (reducir la pérdida de fibra, mejorar la eficiencia del conjunto, entre otros.). Algunas de las configuraciones posibles se muestran a continuación.

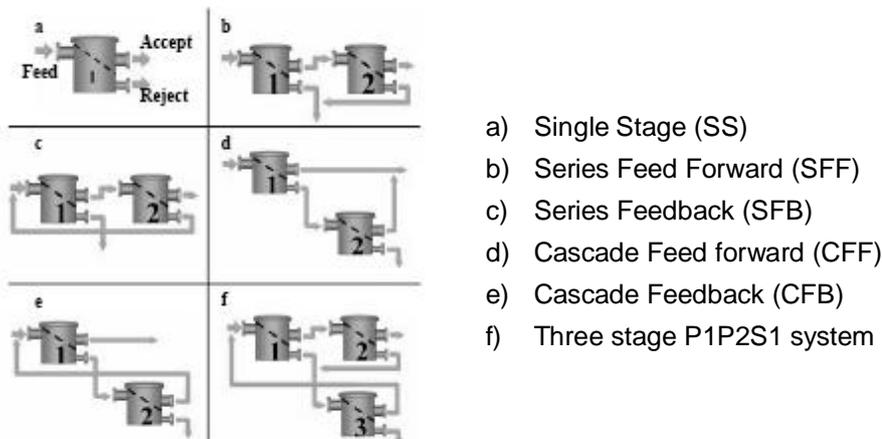


Figura I.2.6. Configuraciones posibles de screens en serie y paralelo <sup>5</sup>

<sup>4</sup> [http://www.tannershomeinn.com/glos\\_root/glossary](http://www.tannershomeinn.com/glos_root/glossary)

<sup>5</sup> [http://www.tannershomeinn.com/glos\\_root/glossary](http://www.tannershomeinn.com/glos_root/glossary)

### I.2.1.2.4.- Destintado

Las etapas de depuración mediante screens y cleaners permiten eliminar contaminantes cuya dimensión mayor es superior a 0,5mm. Aquellos de menor tamaño, como las tintas y las cargas minerales permanecen diluidos en la pasta junto con las fibras. Su eliminación se logra mediante celdas de destintado, cuyo principio operativo consiste en la adhesión de las partículas a burbujas de aire por acción de un tensioactivo. Al introducir la pasta en una celda de destintado en presencia de burbujas de aire se produce un fenómeno de colisión y adhesión de las partículas de tinta a las burbujas. Toda partícula que se encuentre dentro del radio crítico ( $R_c$ ) colisionará con la burbuja adhiriéndose a esta, como se observa en la siguiente figura.

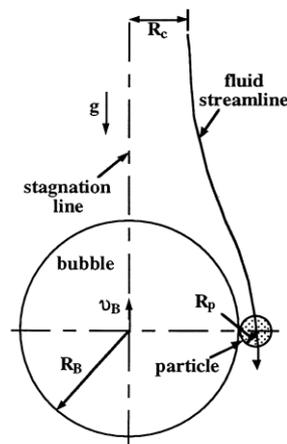


Figura I.2.7. Esquema de la interacción entre partículas y burbujas <sup>6</sup>

El valor del radio crítico depende del tamaño de las burbujas y las partículas, de las características del tensioactivo utilizado y de la velocidad del fluido.

Basándose en este principio, las celdas de flotación hacen circular la pasta a través de un flujo de burbujas de aire a contracorriente logrando así la adhesión de los contaminantes de menor tamaño. Estos últimos forman una espuma y se mantienen cercanos a la superficie del fluido pudiendo ser luego eliminados por medios físicos.

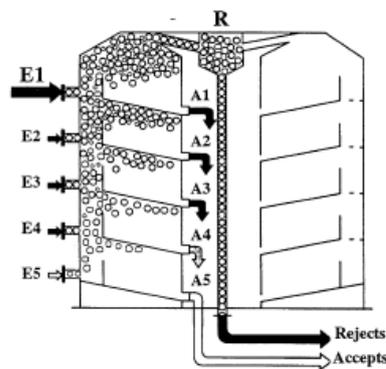


Figura I.2.8. Celda de flotación tipo Lamort <sup>7</sup>

<sup>6</sup> T.J. Heindel. 1997. The fundamentals of flotation deinking. IPST Technical Paper Series #656. Pág. 5.

<sup>7</sup> T.J. Heindel. 1997. The fundamentals of flotation deinking. IPST Technical Paper Series #656. Pág. 12.

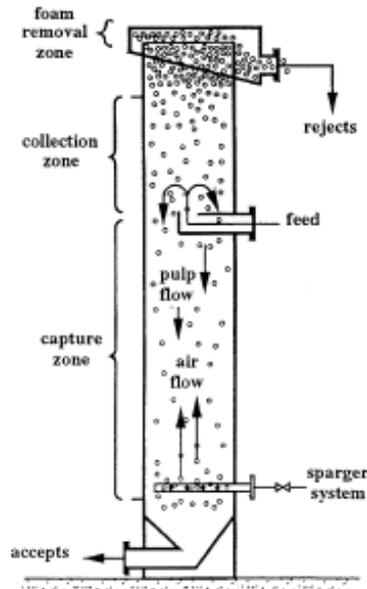


Figura I.2.9. Columna de flotación tipo Kvaerner Hymac <sup>8</sup>

Las celdas de flotación donde se realiza el destintado son seguidas aguas abajo por un proceso de lavado cuyo objetivo es remover el tensioactivo remanente en las fibras.

### I.2.1.2.5.- Blanqueo

Una vez lavadas, las fibras que se obtienen del destintado pueden ser sometidas a blanqueos químicos reductivos u oxidantes (o ambos). Este proceso tiene lugar en una torre de blanqueo como la que se observa en el siguiente diagrama.

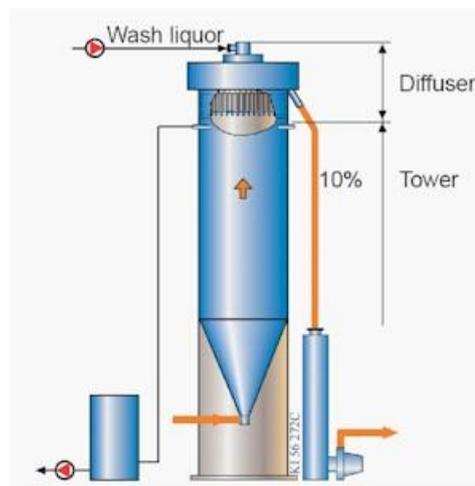


Figura I.2.10. Torre de blanqueo <sup>9</sup>

El principio de funcionamiento consiste en generar la interacción de las fibras con agentes oxidantes o reductores durante un tiempo predeterminado (tiempo de residencia). En general, se disponen dos etapas de blanqueo en serie, una reductiva y una oxidante. Ambas etapas son separadas por un proceso de

<sup>8</sup> T.J. Heindel. 1997. The fundamentals of flotation deinking. IPST Technical Paper Series #656. Pág. 12.

<sup>9</sup> [http://www.tappsa.co.za/archive2/Journal\\_papers/Compact\\_bleaching/compact\\_bleaching.html](http://www.tappsa.co.za/archive2/Journal_papers/Compact_bleaching/compact_bleaching.html)

## Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

lavado y neutralización de la pasta de lo contrario se reduce la eficiencia del segundo proceso de blanqueo ya que parte del agente oxidante se neutraliza con los restos del agente reductor.

Una vez superada la etapa de blanqueo, la pasta se encuentra libre de contaminantes y es almacenada en una pileta para su posterior uso. En algunos casos, existe un proceso de remoción de agua mediante un tornillo sin fin y un recuperador de fibra a fin de almacenar una mayor cantidad de fibra en un volumen dado.

### **I.2.2.- Manufactura de papel tissue**

La segunda etapa en la manufactura de productos de papel tissue es la transformación de pastas celulósicas en bobinas de papel. En esta etapa intervienen tres procesos, la refinación, el blending y el secado.

#### **I.2.2.1.- Refinación**

Cada grado de papel que se produce debe alcanzar niveles específicos de resistencia longitudinal y transversal. En la estructura del papel las fibras largas son las encargadas de formar una red enlazándose entre sí, para permitir luego que las fibras cortas se ubiquen en los intersticios. El número de enlaces que se producen entre fibras largas determina la resistencia de la hoja base. Este valor es función de la superficie de fibras que se encuentre presente en la mezcla. A mayor superficie, mayor número de enlaces. Por lo tanto existen dos formas de aumentar la resistencia del papel, agregando un mayor número de fibras largas al mix de fibras o incrementando la superficie de las fibras presentes. En el proceso de refinación las fibras se someten a la acción de discos ranurados que giran enfrentados con una separación de milímetros.

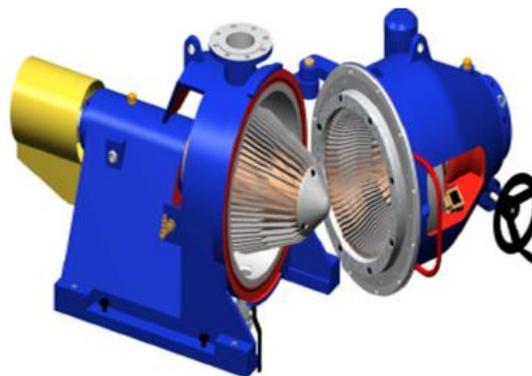


Figura I.2.11. Refinador cónico Pilao RSC-500 <sup>10</sup>

En este proceso, las capas externas de las fibras se rasgan formando láminas que quedan expuestas y la fibra absorbe agua. De esta forma la superficie total de cada fibra individual se incrementa y por lo tanto son capaces de otorgarle a la hoja base una resistencia mayor.

---

<sup>10</sup> PILAO refining course. 2009. Asociación Brasileira de Tissue, Celulosa y Papel (ABTCP)

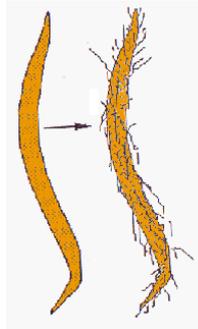


Figura I.2.12. Efecto de la refinación sobre la capa externa de las fibras <sup>11</sup>

En general, únicamente las pastas que provienen de fibras largas son sometidas a la refinación aunque en algunos casos particulares es posible también procesar mezclas con fibras cortas utilizando una baja intensidad de refino.

### I.2.2.2.- Blending

El proceso de blending consiste en mezclar las diferentes pastas en una proporción especificada que permita obtener una hoja base con las características deseadas. Este proceso se realiza utilizando dos piletas interconectadas.

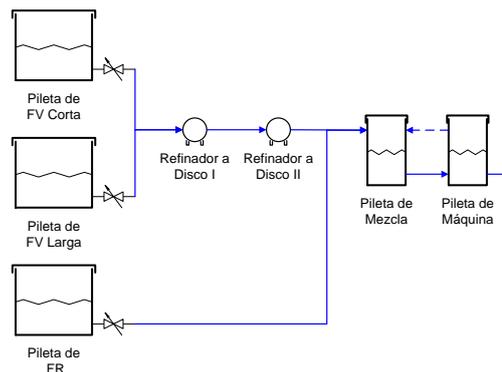


Figura I.2.13. Diagrama del proceso de blending

En la primera pileta se reciben las fibras provenientes de la planta de preparación de pasta y del proceso de refinación y se mezclan por medio de agitadores. La mezcla que se obtiene se bombea a una segunda pileta desde donde se alimenta la máquina de papel. Esta pileta se opera a nivel constante y posee un rebalse que envía parte de su contenido de regreso a la pileta de mezcla. De esta forma, y mediante un correcto dimensionamiento de las piletas, se asegura que el mix de fibras que llega a la máquina de papel es homogéneo.

### I.2.2.3.- Secado

Una vez obtenido el blending, se lo somete a un proceso de dilución cuyo resultado es una concentración de pasta en agua de aproximadamente 0,1%. En estas condiciones el blending ingresa en la máquina de papel donde se lo somete a un primer secado mecánico y luego a un secado térmico.

<sup>11</sup> Introduction to refining. 2009. VALMET.

## Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

La primer sección de la maquina realiza el secado mecánico. La pasta ingresa a la máquina y se distribuye uniformemente a lo largo de la misma (proceso para el cual es necesaria la dilución previa). De esta forma, se asegura la uniformidad en las propiedades de la hoja base. Una vez formada la hoja en los primeros centímetros de la sección, comienza el proceso de secado. Según la tecnología de la máquina esto puede ocurrir mediante rodillos con succión que presionan a la hoja base o mediante foils que generan diferencias de presión sobre una tela que transporta la hoja favoreciendo el drenaje. Cualquiera sea el caso, al final de la sección se obtiene una hoja base con una concentración de pasta en agua del 40%. La humedad remanente se elimina en el segundo proceso de secado.

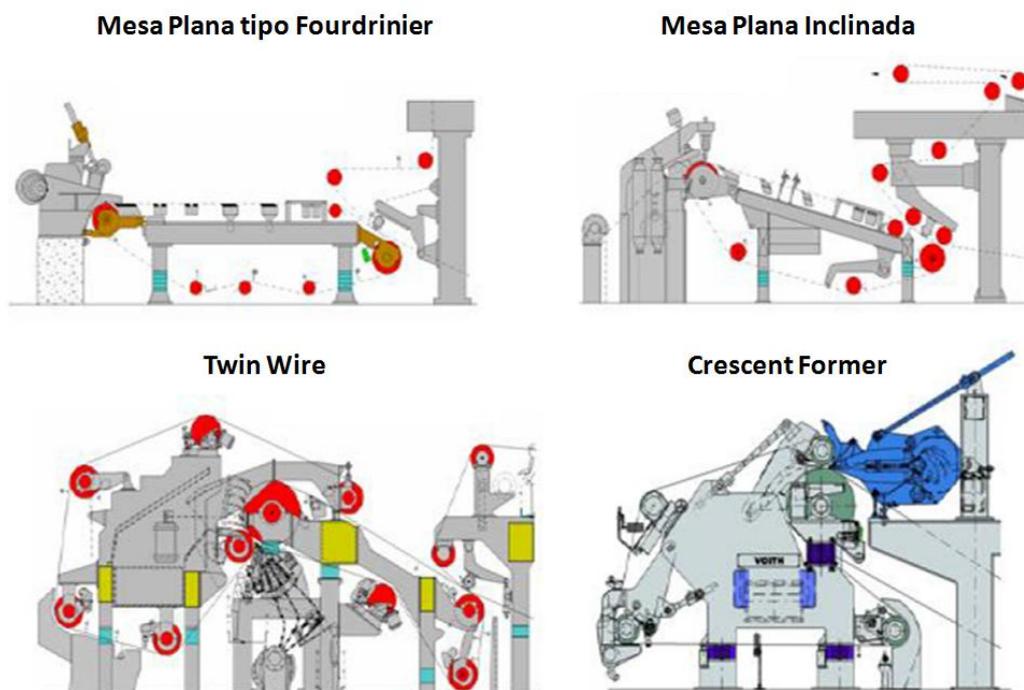


Figura I.2.14. Sistemas de formación de papel <sup>12</sup>

El segundo proceso de secado ocurre dentro de una campana de secado. La hoja base circula dentro de la misma soportada sobre un cilindro de acero o sobre una vestidura de transporte permeable al aire, según la tecnología empleada. En el primer caso, el cilindro es alimentado internamente con vapor mientras que en el segundo caso el cilindro es alimentado con aire caliente. La temperatura del aire inyectado, en ambos casos, dentro de la campana es regulable según la cantidad de secado que sea necesaria (es función de la velocidad de máquina y el contenido de agua a eliminar de la hoja base). Como resultado se obtiene una hoja con un 5% de humedad remanente, la cual se bobina para su posterior estiba.

<sup>12</sup> Tissue manufacturing course. 2006. VOITH.

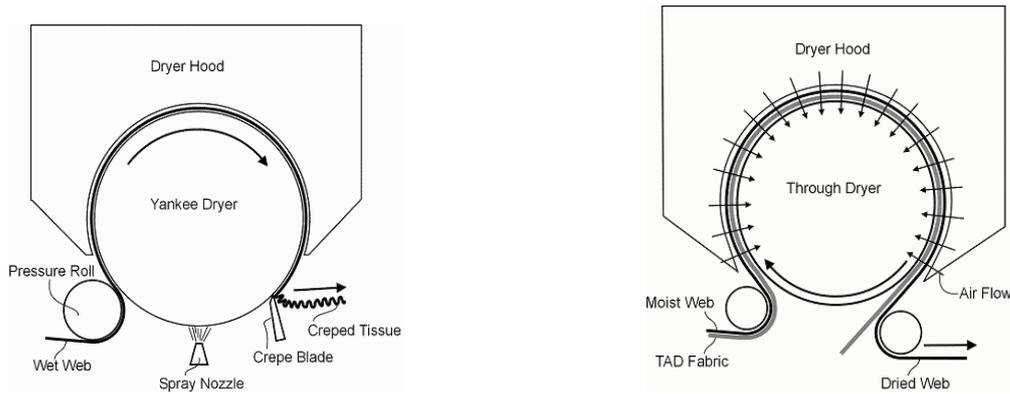


Figura I.2.15. Esquemas de un secador convencional (izq.) y uno tipo TAD (der.)<sup>13</sup>

Las operaciones de secado que ocurren en la máquina de papel determinan la variabilidad de las propiedades del papel. Las tecnologías más modernas logran mantener la variación dentro de bandas significativamente más estrechas que las tecnologías más antiguas. Existe por lo tanto una condición de operación extrema en las plantas donde coexisten tecnologías de fabricación de papel antiguas y tecnologías de conversión modernas ya que estas últimas están diseñadas para operar con hojas base más estables.

### I.2.3.- Conversión de bobinas en producto terminado

En la industria actual existen procesos de conversión para diferentes materiales entre los cuales se encuentran el papel, polímeros como el film de polietileno y metales como el papel aluminio. En todos los casos, se parte de bobinas obtenidas en procesos de manufactura a partir de materias primas básicas (fibras, pellets, lingotes de aluminio, etc.). Estas bobinas contienen un número de capas de material de un espesor muy pequeño, las cuales serán desenrolladas y transformadas mediante un conjunto de operaciones dado en los productos finales.

En el caso del papel, las tecnologías de conversión disponibles se pueden separar en dos grandes grupos según se utilicen para producir rollos (papel higiénico o toallas) o productos doblados e intercalados (faciales o servilletas).

#### I.2.3.1.- Conversión de rollos

Una línea de conversión se compone usualmente de seis clases de máquinas dispuestas en serie que transforman a las bobinas en bolsones de paquetes de rollos. Según la tecnología disponible es posible encontrar líneas de conversión con un alto grado de mano de obra, donde las operaciones de transferencia entre procesos y el accionamiento de las máquinas son manuales o líneas de conversión más modernas, integradas mediante PLC's que controlan el avance del producto a través de la línea, el balanceo de las líneas en paralelo y las operaciones de arranque y parada de las máquinas. El esquema de un proceso moderno de conversión de rollos se muestra a continuación.

<sup>13</sup> <http://www.jefflindsay.com/tissue.shtml>

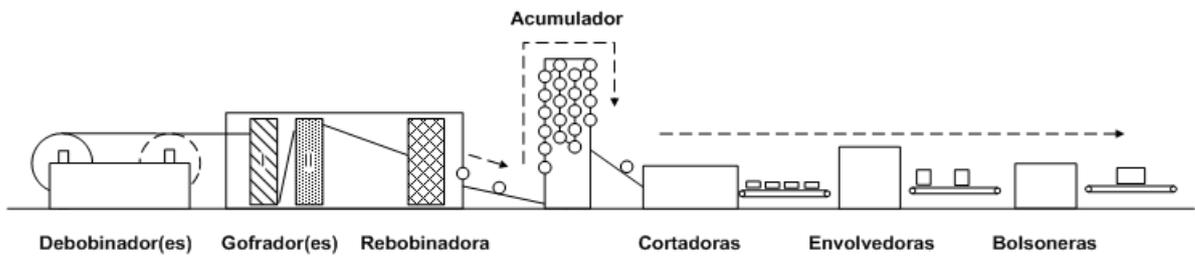


Figura I.2.16. Esquema de una línea de conversión de rollos

### I.2.3.1.1.- Debobinadores

La primera etapa del proceso de conversión es el debobinado. La bobina se coloca sobre dos apoyos que le permiten rotar sobre su propio eje. Un conjunto de correas como las que se observan en la figura 3.16 transmiten la rotación a las bobinas desenrollándolas.



Figura I.2.17. Debobinador<sup>14</sup>

Cada línea puede presentar más de un debobinador en paralelo lo que permite fabricar productos de más de una hoja.

### I.2.3.1.2.- Gofradores

La operación siguiente en el proceso de conversión es el gofrado. Este proceso consiste en laminar una o más hojas de papel a través de rodillos de acero y goma que presentan diferentes patrones.

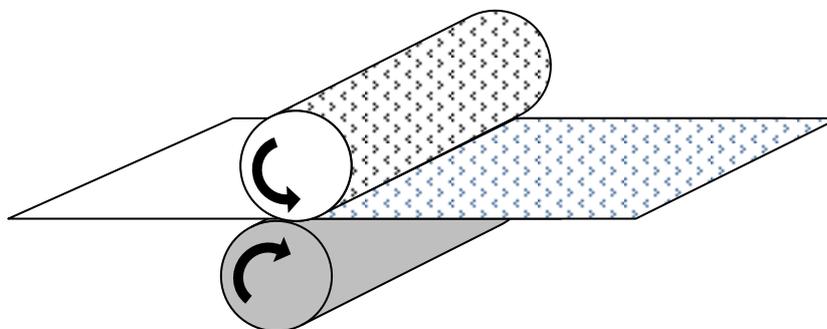


Figura I.2.18. Esquema del proceso de gofrado

<sup>14</sup> <http://www.convertingplant.com/MachineListing.aspx?MachineGuid=b4c1c658-4587-9c92-fac12846e309>

## Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

Los objetivos principales del gofrado son decorar el papel y generar bulk en el rollo. El bulk es la relación entre el volumen del rollo y los metros de papel que contiene. Para un diámetro dado, a medida que aumenta el bulk se reduce el metraje del rollo.

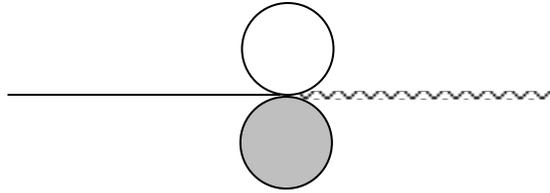


Figura I.2.19. Aumento del bulk en el proceso de gofrado

Las tecnologías más comúnmente utilizadas son el gofrado punto a punto (como el que se puede encontrar en los rollos de cocina tradicionales), el gofrado micro-macro que permite realizar diseños con color (como los que se encuentran en los papeles higiénicos de alta gama) y el gofrado convencional (que se encuentra en casi todos los productos de los segmentos de precios medio y bajo). El resultado principal del proceso es la impresión de un relieve sobre las hojas, obteniéndose adicionalmente en algunos casos la unión de las hojas (en papeles multipliego) y el agregado de color sobre el patrón gofrado.



Figura I.2.20. Grupo gofrador convencional <sup>15</sup>

### I.2.3.1.3.- Rebobinadora

La tercera máquina del proceso se denomina rebobinadora. Su función es precortar el papel y enrollarlo en unidades denominadas logs. Cada log posee un metraje determinado por el producto final y un largo coincidente con el de las bobinas madre.

<sup>15</sup> <http://www.convertplant.com/MachineListing.aspx?MachineGuid=23bcc894-410d-9ea5-a12cc3e5ef89>

## Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

Existen dos tecnologías de rebobinado, el rebobinado central y rebobinado de superficie. El rebobinado central, el más antiguo de los métodos, consiste en introducir un mandril conducido dentro del tubete con el objeto de hacerlo rotar y enrollar el papel alrededor del mismo. En algunos casos, el punto de enrollamiento puede estar sometido a un nip de presión para obtener una mejor calidad en el producto final.

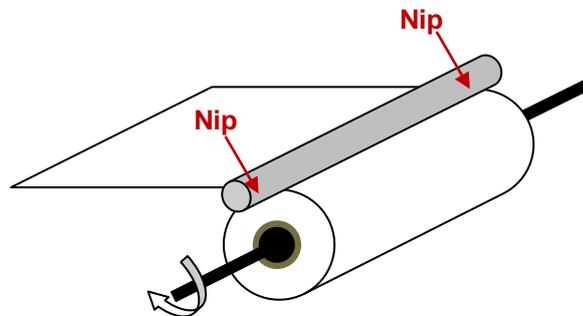


Figura I.2.21. Esquema de funcionamiento del rebobinado central

El rebobinado de superficie es el método más moderno y consiste en transferir la rotación de un eje por contacto con el rollo en formación mediante un nip. Este sistema permite un mejor control de la tensión de rebobinado del producto respecto al rebobinado central y por lo tanto puede ser operado a velocidades mayores.

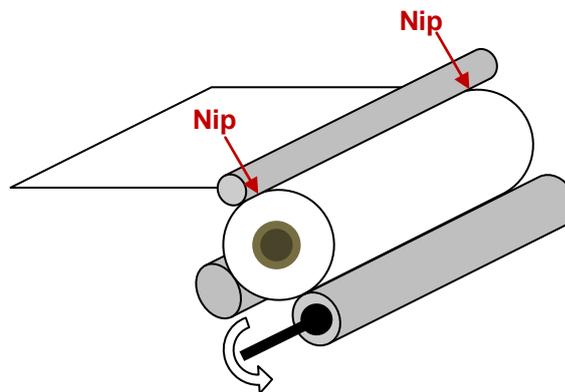


Figura I.2.22. Esquema de funcionamiento del rebobinado de superficie

### I.2.3.1.4.- Cortadoras

Una vez armados, los logs se almacenan temporalmente en un pulmón denominado acumulador que permite anular el impacto de las variaciones en la rebobinadora sobre los procesos aguas abajo y viceversa. Desde el acumulador se descargan los logs en las cortadoras, proceso en el que se transforman en rollos del largo especificado. El corte se realiza mediante una cuchilla circular que realiza dos movimientos de rotación, uno sobre su propio eje y uno orbital alrededor de un punto fijo. Este último movimiento es el que desplaza a la cuchilla a través de los logs, generando el corte.

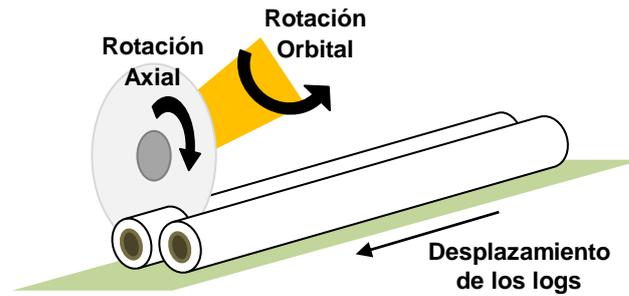


Figura I.2.23. Esquema de funcionamiento de una cortadora de dos canales

Existen diferentes configuraciones posibles de cortadoras según la velocidad de corte requerida. Los modelos más comunes presentan 2 ó 4 canales para logs y una o dos cuchillas de corte (desfasadas 180°).

### I.2.3.1.5.- Envolvedoras

Los rollos generados por las cortadoras se transportan en cintas hasta las envolvedoras. Estas últimas son alimentadas por tres o cuatro canales desde los cuales se retiran rollos alternativamente según una secuencia que mantiene los canales balanceados. La secuencia de alimentación depende del conteo que se está produciendo y del número de canales de alimentación.



Figura I.2.24. Envolvedora de rollos <sup>16</sup>

Los equipos más modernos permiten producir una gran variedad de formatos intercambiando piezas dentro de la máquina. Los formatos van desde conteos de dos unidades hasta conteos de doce en doble piso.

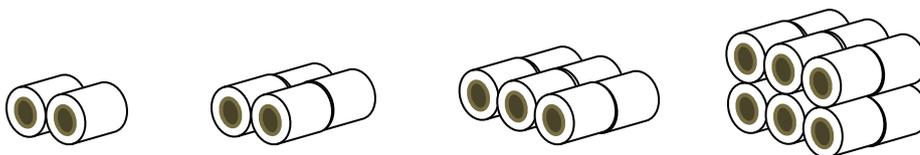


Figura I.2.25. Configuraciones posibles de rollos en un paquete (ejemplo)

Una bobina de polietileno (o polipropileno) alimenta a la máquina con el material necesario para confeccionar los paquetes. Una vez armado el paquete

<sup>16</sup> <http://www.convertingplant.com/MachineListing.aspx?MachineGuid=313e0243-f68b-49b4-b63064d4500f>

## Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

y sellados los extremos de la lámina, este es transportado hasta las bolsoneras.

### **I.2.3.1.6.- Bolsoneras**

La última máquina en una línea de conversión de rollos es la bolsonera. Su función es agrupar un conjunto de paquetes que provienen de las envolvedoras en unidades denominadas bolsones, de forma que su posterior palletizado sea más rápido y eficiente.

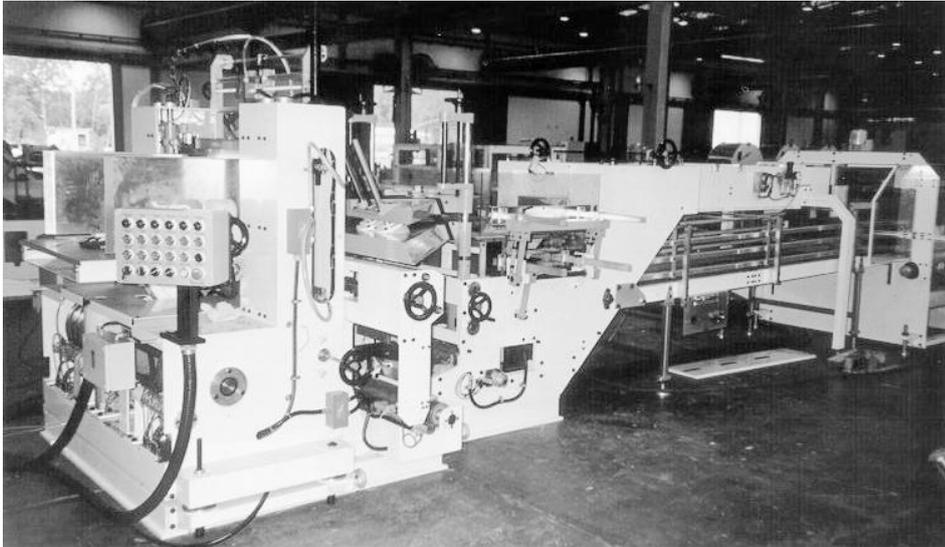


Figura I.2.26. Bolsonera <sup>17</sup>

### **I.2.3.2.- Conversión de faciales y servilletas**

El proceso de conversión de servilletas y faciales difiere del de rollos en cuanto la transformación de la bobina en las hojas del producto final se realiza en una sola máquina. En estos equipos se realiza el rebobinado, el corte de la bobina en hojas y el plegado o doblado de las mismas. Como resultado se obtienen grupos de faciales o servilletas que se dirigen por medio de cintas hasta una envolvedora. Las envolvedoras pueden disponer el producto en cajas, un paquete de film o un paquete de polietileno. Estas unidades son luego colocadas en cajas generalmente mediante la intervención de un operario (solo las plantas de última generación cuentan con automatización en este proceso). El esquema del proceso se muestra en la siguiente figura.

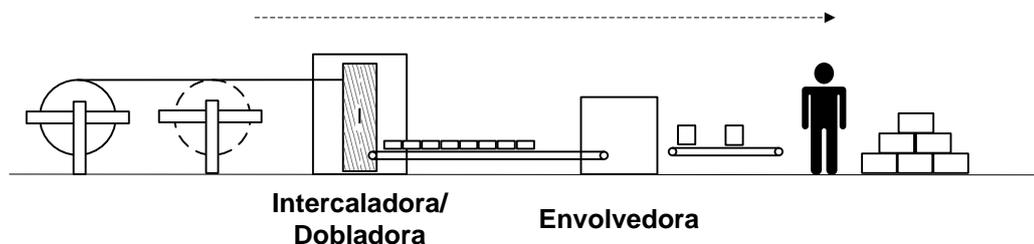


Figura I.2.27. Esquema de una línea de conversión de faciales/servilletas

<sup>17</sup> Manual Bolsonera Perini modelo IN SUPER H. 2008. Fabio Perini. Pág. 8.

## Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

### I.2.3.2.1.- Dobladora

La producción de servilletas se realiza mediante una máquina dobladora. El papel debobinado circula a través de un grupo gofrador, incluido dentro del módulo de doblado, donde adquiere el relieve correspondiente al producto. El grupo de gofrado es análogo al que se encuentra en una línea de conversión de rollos por lo que se pueden realizar diseños similares a los encontrados en el papel higiénico o los rollos de cocina. El proceso de conformación de la servilleta ocurre en los cabezales de la máquina. El papel, gofrado y plegado, ingresa entre los cabezales que se encuentran provistos de un sistema de peines y pinzas los cuales toman alternativamente el papel disponiéndolo en forma normal a la dirección de ingreso. En la figura a continuación se esquematiza en proceso.

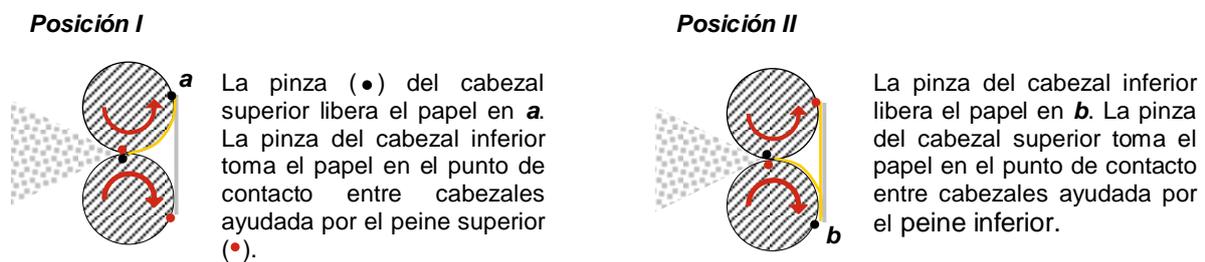


Figura I.2.28. Sistema de pinzas y peines

El papel plegado al medio y dispuesto en forma de zigzag es cortado por una sierra en mitades iguales y las servilletas son separadas según el número a colocar en cada paquete. A continuación, la envolvedora recibe los grupos de servilletas a través de una cinta de alimentación y conforma el paquete de forma similar a lo que ocurre en una envolvedora de rollos. A la salida de la envolvedora se encuentra una región de espera, donde se depositan los paquetes hasta ser colocados en cajas de cartón corrugado para su posterior palletizado.

### I.2.3.2.2.- Intercaladora

La intercaladora tiene como función interfoliar hojas de papel para generar un sistema de dispensado similar al que se encuentra en los faciales que se comercializan en cajas.



Figura I.2.29. Clip de faciales intercalados <sup>18</sup>

<sup>18</sup> <http://knol.google.com/k/bali-sunset/a-complete-guide-on-tissue-and-paper/148pgo71I9vi8/3#>

## Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

El sistema de intercalado es alimentado por dos debobinadores y realiza dos operaciones sobre el papel, un precorte y un plegado. El interfoliado se logra desfasando los precortes de las hojas de papel antes de ser plegadas en los clips que se colocan dentro de las cajas de producto terminado.

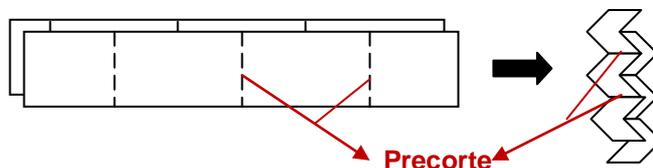


Figura I.2.30. Disposición de los precortes en un facial intercalado

### I.3.- DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

#### I.3.1.- Evolución del mercado del papel higiénico

En las últimas décadas, los productos premium de las compañías a nivel mundial han incrementado su número de hojas desde una o dos hojas hasta productos con cuatro o cinco hojas como se pueden encontrar en la actualidad en algunos países. La migración es impulsada por la creciente demanda de higiénicos con mejor performance en términos de calidad, precio y rendimiento; los tres drivers en los que el consumidor basa su decisión de compra.

La calidad de un producto está relacionada con la percepción del consumidor sobre la blancura y la suavidad del mismo. Ambos atributos dependen de las características de las fibras que componen a la hoja base. En el caso de la blancura, las fibras vírgenes obtenidas a partir de métodos químicos o termoquímicos y las fibras recicladas que fueron sometidas a procesos de destintado y blanqueo otorgan los mayores valores. La suavidad en cambio suele asociarse a la flexibilidad del producto, la presencia de cargas minerales en la hoja base y a ciertas variables del proceso de manufactura como la relación de crepado. En líneas generales, las hojas con mayor gramaje tienden a presentar una mayor resistencia a la flexión y se perciben como de mayor dureza al ser comparadas con aquellas de menor gramaje, a igual de mix de fibras. A su vez, la flexibilidad de las fibras que componen al mix depende de la relación entre la longitud de la fibra, su sección y el ancho de las paredes. Las fibras de mayor longitud, paredes delgadas y secciones reducidas presentan mayor flexibilidad y por lo tanto conforman hojas más suaves.

En cuanto al rendimiento, el consumidor generalmente asocia el desempeño de un producto a la absorción y al metraje. La absorción se puede modificar a partir de la elección del mix de fibras, el gramaje de la hoja base y de la geometría del producto final. Las fibras vírgenes otorgan un mejor desempeño que las recicladas a igualdad de gramaje, mientras que los productos con mayor gramaje presentan una mayor capacidad de absorción de agua. La geometría de la hoja del producto final está dada por los procesos de gofrado. En los higiénicos multipliego, el gofrado genera pequeños espacios de aire entre las hojas, que permiten alojar fluido adicional al que naturalmente se

## **Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación**

---

posiciona entre las fibras y dentro de las mismas, aumentando la capacidad de absorción.

El precio del producto se presenta quizás como el driver más cuantitativo de los tres que definen la compra. Sin embargo, la apreciación en góndola del valor que obtiene el cliente por el precio que paga por un producto está influida por condiciones visuales y de presentación del empaque, no solo por las características físicas y de performance descritas en párrafos anteriores. Un ejemplo claro es la evaluación visual del metraje de un producto que realizan los clientes a partir del bulk del rollo. El bulk se define como la relación entre el diámetro de un producto y el número de metros contenidos en el mismo. Los procesos de gofrado incrementan el volumen al generar un relieve en la hoja base, el cuál persiste en el rollo terminado luego del proceso de rebobinado. Por lo tanto, un rollo con una determinada cantidad de metros que haya sido gofrado tendrá un mayor diámetro que aquel que mantenga las características de la hoja base. Esto genera que cuando el comprador compara el valor que obtiene de dos productos diferentes, perciba a aquel de mayor diámetro como de mayor valor, aun cuando este producto pueda contener un menor número de metros.

Entonces, para lograr una mejor performance en calidad, rendimiento y precio es necesario reducir el gramaje de las hojas base y producirlas a partir de un mix de fibras vírgenes y recicladas que den buena blancura y suavidad a bajo costo. Esto permite aumentar el número de las hojas base presentes en el producto y gofrar el rollo aumentando el bulk del mismo.

### **I.3.2.- Manufactura de hojas de bajo gramaje**

Los procesos de manufactura han acompañado el desarrollo de mejores productos incorporando nuevas tecnologías que permiten aumentar la suavidad y la absorción disminuyendo el gramaje.

En el caso de las máquinas de papel, el desarrollo de la tecnología ha permitido mejorar la administración de un número reducido de fibras para generar una hoja base homogénea. Al definir el gramaje de una hoja base se limita el número de fibras por metro cuadrado que pueden estar presentes en la misma. Es entonces necesario administrar esta cantidad limitada de fibras de la manera más eficiente posible a fin de obtener una hoja base suave, flexible y resistente. La performance de una máquina en este sentido se describe mediante el concepto de “formación”, que se relaciona con la orientación y disposición de las fibras en la hoja base. Si bien la formación de una hoja es difícil de cuantificar, es posible evaluarla indirectamente a través de los perfiles longitudinales y transversales obtenidos para las diferentes propiedades de la hoja base. A continuación se muestran dos gráficos de perfil longitudinal de gramaje correspondientes a diferentes procesos de manufactura. En ambos

## Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

casos, el valor promedio de gramaje es 16gsm, sin embargo la administración de las fibras es significativamente diferente.

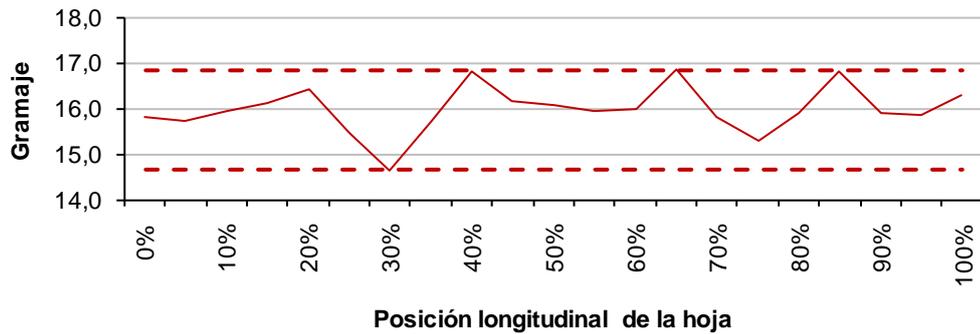


Figura I.3.1. Perfil de gramaje tecnología antigua

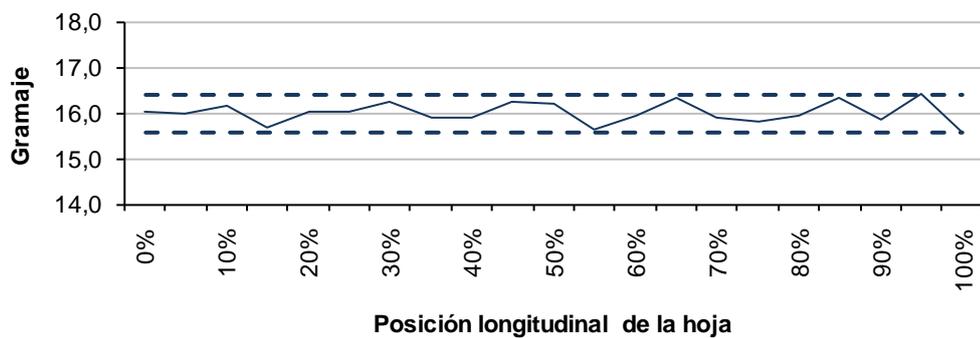


Figura I.3.2. Perfil de gramaje tecnología moderna

Se puede observar que en el primer caso, el valor mínimo de gramaje es de 14,7gsm mientras que en el segundo es de 15,6gsm. Por lo tanto, la sección de menor gramaje producida por la tecnología moderna presenta mayor cantidad de fibras que aquella producida con una tecnología antigua. La importancia de la distribución de fibras radica en que la resistencia longitudinal está directamente relacionada con el número de enlaces que se formen entre fibras en el proceso de manufactura, lo cual depende en gran medida del número de fibras presentes en un determinado sector de la hoja.

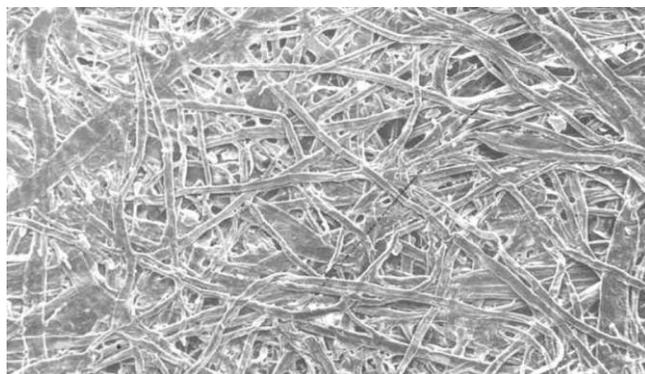


Figura I.3.3. Imagen microscópica de una hoja de papel <sup>19</sup>

Por lo tanto, una tecnología antigua no solo genera una hoja más irregular sino que también produce una hoja más débil.

<sup>19</sup> Liliana Molina Tirado. 2006. Materias primas fibrosas. Curso de celulosa y papel - INTI. Pág. 4.

## Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

Desde el punto de vista del proceso de conversión, para garantizar una operación eficiente, se requiere que la hoja base posea un valor mínimo de resistencia longitudinal. Esto permite que el papel sea traccionado a través de los procesos de gofrado y rebobinado sin producirse cortes ni descarte de producto. Por debajo del valor mínimo de resistencia, el proceso deberá operar a velocidades reducidas o sufrirá paradas reiteradas debido a cortes en la hoja base. Siempre que el papel no alcance el valor mínimo de resistencia será necesario ajustar los seteos de la línea de producción de acuerdo con la mínima resistencia de la hoja base.

En resumen, la fabricación de higiénicos multipliego busca obtener productos de mayor valor reduciendo el gramaje y aumentando la suavidad. Para ello es necesario contar con tecnologías modernas de producción de papel que generen una hoja base con suficiente uniformidad de resistencias a bajo gramaje. Esto asegura que el papel obtenido pueda ser convertido a altas velocidades sin producirse roturas en la hoja base.

### I.3.3.- Características generales del proceso productivo de la planta modelo

El proyecto final se desarrolló en una planta productora de papel tissue, cuyo proceso productivo está dividido en dos sectores principales, manufactura y conversión. El sector de manufactura está compuesto por el área de preparación de pasta y la máquina de papel mientras que el sector de conversión abarca las líneas de doblados y sincros. Entre ambos sectores se encuentra una rebobinadora-cortadora (slitting rewriter), la cual se utiliza para completar el proceso de manufactura de bobinas, a pesar que su operación está típicamente asociada a los procesos de conversión. Es por esta particularidad que se la ubica en un sector diferente de los dos principales. El diagrama a continuación muestra un esquema del proceso productivo.

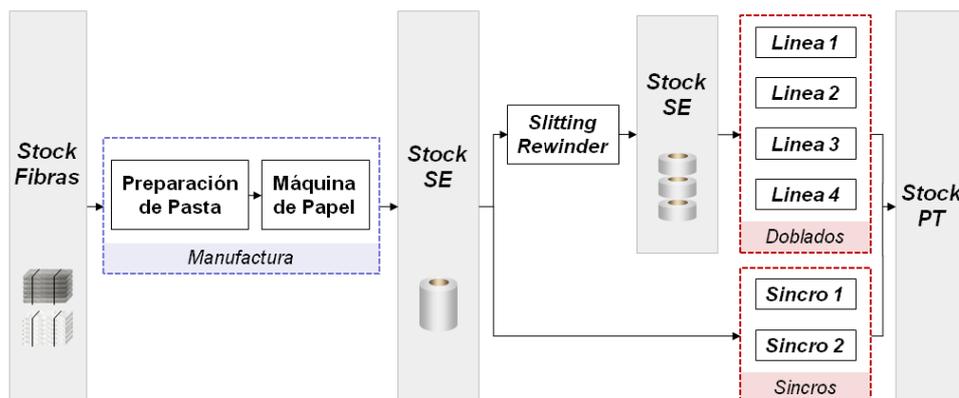


Figura I.3.4. Esquema del proceso de producción

Las materias primas utilizadas en el proceso incluyen fibras vírgenes largas y cortas de producción nacional y material reciclado de alta blancura, compuesto mayormente de descarte de oficina y papeles con poco tratamiento superficial. Aproximadamente un 30% del total de las fibras utilizadas en el mix

## **Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación**

corresponde a material reciclado. El principal impedimento para elevar esta proporción o utilizar materiales de menor blancura reside en el hecho que la planta de reciclado carece de un proceso de destintado que permita eliminar tintas y cargas minerales.

La máquina de papel opera tecnología antigua con un sistema de formación en mesa plana y un secador convencional de baja temperatura. Produce papeles con gramajes que van desde los 16gsm hasta los 21gsm, destinando toda la producción a abastecer las líneas de conversión con las que cuenta la planta. La tecnología disponible permite fabricar papeles de bajo gramaje, aceptando variaciones de 1,5gsm entre los extremos del perfil de gramaje de la hoja base. Esta variación de gramaje genera zonas con diferentes resistencias dentro de una misma bobina, según lo explicado en la sección precedente.

Las líneas de conversión de rollos concentran el 90% de la producción de la planta. Cada línea sincro presenta diferentes grupos de gofrado los cuales determinan las clases de papel que se pueden procesar. La línea Sincro 1 procesa higiénicos simple hoja y rollos de cocina punto a punto, concentrando su mayor producción en referencias de alto gramaje. La línea Sincro 2 fabrica los productos con mayor valor agregado, los higiénicos doble hoja, además de higiénicos simple hoja y rollos de cocina DESL (Doble Embossing Synchronized Lamination).

La tecnología presente en las líneas de conversión es de última generación y fue diseñada para operar con papeles de alta calidad y baja variabilidad de resistencias. La inversión en los equipos que componen las líneas se realizó antes de llevar adelante un upgrade de la tecnología de manufactura que permitiera producir papeles a bajo gramaje. Los cambios en la economía del país impidieron llevar adelante las inversiones requeridas en la máquina de papel. La situación se agravó con el paso del tiempo cuando el incremento en los precios de fibra larga forzó a cambiar los empastes, reduciendo aún más la resistencia de la hoja base y poniendo de manifiesto las variaciones de resistencia presentes.

Debido a la evolución del mix que se espera en el mediano plazo, la sincro 2 será aquella que tenga una mayor carga y por lo tanto la que necesita incrementar su capacidad de producción con mayor urgencia.

### **I.3.4.- Formulación del problema**

En base a la información relevada para comprender la situación actual de la operación y las necesidades futuras de expansión de la planta el estudio se centrará en la línea Sincro 2 con el objetivo de incrementar el tiempo disponible para producir. Según los datos analizados, cada producto que se fabrica en esta línea presenta una problemática diferente. Sin embargo, los problemas relevados se pueden agrupar en dos clases: problemas de administración de buffers y problemas por interrupciones debidas a las características del papel.

## Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

A fin de comprender cada problemática es necesario comprender el funcionamiento de la línea de producción, la cual se puede esquematizar como se muestra en la figura a continuación.

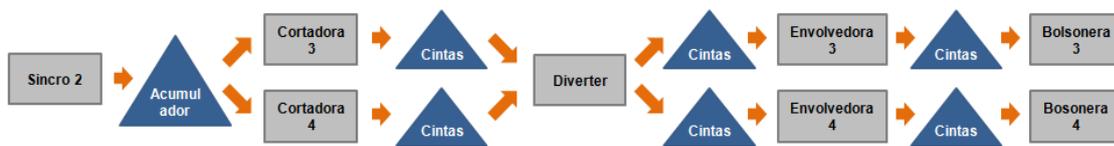


Figura I.3.5. Esquema del proceso de producción

Los equipos que la componen son una rebobinadora, un acumulador de logs, dos cortadoras de logs, un diverter de rollos que alimenta las cintas de entrada a las envolvedoras a partir de las cintas de salida de las cortadoras, dos envolvedoras que producen paquetes a partir de rollos y dos bolsoneras que agrupan los paquetes en una unidad denominada bolsón. En el esquema se indican en color gris los procesos en los que se producen transformaciones sobre el producto y en azul las secciones que sirven de buffer entre procesos. En el funcionamiento normal de la línea, las secciones marcadas en azul tienen como función principal generar un almacén de producto que permita independizar la disponibilidad de un equipo de las paradas de los equipos siguientes y/o precedentes. No obstante, si estos buffers no son administrados de forma correcta, es posible que las paradas de un equipo afecten la disponibilidad de otros, reduciendo así la disponibilidad total de la línea de conversión. La estrategia de integración de una línea comprende a las reglas operacionales que especifican cómo administrar los buffers, las lógicas de enclavamiento que definen la interacción entre equipos y entre estos y los buffers, las reglas de ajuste de velocidad, y los parámetros de las lógicas de control. La especificación de estas variables determina el comportamiento de la línea de producción y por lo tanto puede afectar su desempeño y eficiencia.

Por otra parte, dependiendo del producto que se esté corriendo en la rebobinadora y de los formatos que se estén produciendo en las envolvedoras el cuello de botella de la línea puede cambiar de posición. Por ejemplo, un producto simple hoja, de bajo metraje en formato de 4 rollos genera una mayor demanda en las envolvedoras mientras que un producto de 16gsm, doble hoja y de alto metraje generará una limitación en la rebobinadora. Este hecho sumado a los problemas presentes en los papeles de bajo gramaje debidos a la tecnología de fabricación de la hoja base generan grandes pérdidas de capacidad en la rebobinadora y por consiguiente en la línea de producción.

A fin de establecer que productos presentan la mayor oportunidad de mejora considerando las dos clases de problemas descritas anteriormente es necesario evaluar la cantidad de tiempo que la línea se dedica a producir cada producto y la posible mejora obtenida de eliminar el problema que afecta a cada producto.

## Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

La distribución actual del tiempo total de producción entre los productos que se fabrican en la línea se muestra a continuación.

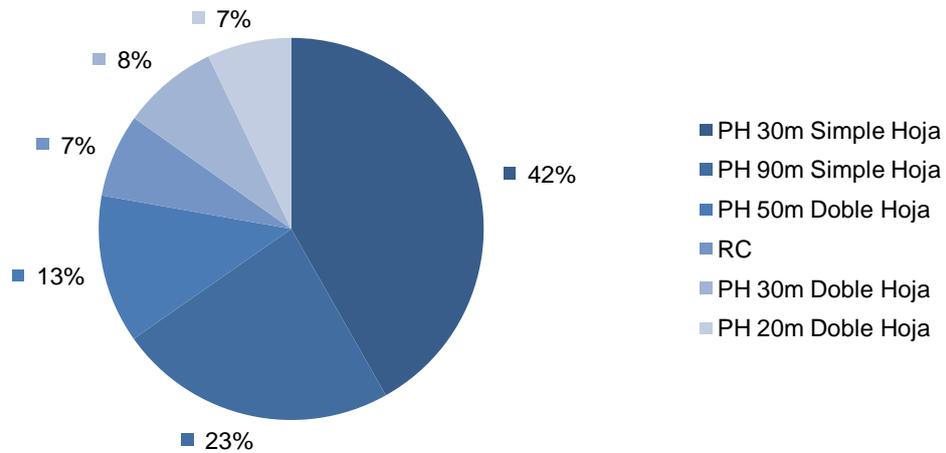


Figura I.3.6. Distribución de tiempos de producción (en %).

En cuanto a las pérdidas por problemas en otros equipos para la rebobinadora, envolvedoras y bolsoneras, los datos relevados para la línea Sincro 2 son los siguientes.

Producto	Sincro	Envolvedoras	Bolsoneras
PH 30m Simple Hoja	17%	13%	23%
PH 90m Simple Hoja	4%	20%	42%
PH 50m Doble Hoja	4%	25%	45%
RC	24%	20%	34%
PH 30m Doble Hoja	14%	27%	35%
PH 20m Doble Hoja	20%	29%	35%

Tabla I.3.1. Pérdidas de capacidad expresadas en % del tiempo disponible (por equipo)

Si bien los papeles con mayor potencial de mejora en base a problemas de administración de buffers son el rollo de cocina (RC) y el PH 20m Doble Hoja con 20% de mejora potencial, al considerar el tiempo que cada uno de los productos se programa en la línea de producción se obtiene que la mayor mejora potencial la presenta el PH 30m Simple Hoja con un 5,6% de aumento potencial de capacidad de línea. Este aumento se obtiene al considerar la eliminación de un 13% de las pérdidas en todos los equipos por interacción con los demás, saturando el cuello de botella (las envolvedoras) durante el tiempo que el producto se encuentra en máquina (42% del tiempo total)

En cuanto las pérdidas por problemas con el papel, la observación del fenómeno y los datos relevados en entrevistas con operadores de máquina muestran que los cortes de la hoja base generan paradas de máquina para enhebrar la hoja y la necesidad de operar a menor velocidad. La velocidad adecuada para cada condición del papel es difícil cuantificar por lo que el operador ajusta dicho parámetro en función a su experiencia previa. Lo que se observa al monitorear esta actividad es que el tiempo que cada operador

## **Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación**

demora hasta alcanzar la velocidad de marcha que estima correcta es cada vez mayor a medida que se suceden los cortes y que la velocidad alcanzada es cada vez menor. El proceso de ajuste varía entre operadores, siendo algunos más conservadores y prefiriendo operar a velocidades seguras para evitar paradas.

El porcentaje de tiempo perdido debido a paradas por problemas de papel y por operar a velocidades menores a la velocidad objetivo para cada producto se muestra en la siguiente tabla.

<b>Producto</b>	<b>Pérdida de capacidad</b>
PH 30m Doble Hoja	26,4%
PH 50m Doble Hoja	17,0%
PH 20m Doble Hoja	9,6%
PH 90m Simple Hoja	9,0%
RC	5,7%
PH 30m Simple Hoja	4,1%

Tabla I.3.2. Pérdidas de capacidad expresadas en % del tiempo de rebobinadora disponible

Si bien los papeles con mayor potencial de mejora en base a problemas de papel son los PH Doble Hoja de 30 y 50 metros con 26% y 17% de mejora potencial, al considerar el tiempo que cada uno de los productos se programa en la línea de producción se obtiene que la mayor mejora potencial la presenta el PH 90m Simple Hoja con un 2,1% de aumento potencial de capacidad de línea seguido por los PH Doble Hoja de 30m y 50m con 1,8% cada uno. La característica en común de estos tres productos es que la hoja base es de 16gsm en todos los casos.

El análisis realizado en los párrafos anteriores permite concluir que los problemas a resolver para lograr un aumento de la capacidad de producción destinada a fabricar productos de mayor margen son:

- La pérdida de capacidad en PH 30m Simple hoja debido a la interacción de las paradas de los diferentes equipos que componen la línea
- La pérdida de capacidad por problemas con el papel en productos de 16gsm

El máximo aumento de capacidad de conversión en la línea Sincro 2 que se puede obtener al resolver los problemas planteados es de 11,3%.

### **I.4.- OBJETIVOS DEL PROYECTO**

El presente proyecto tiene como objetivos principales:

- Determinar la estrategia de integración de línea que permita reducir las pérdidas de capacidad en el PH 30m Simple Hoja.
- Determinar la reducción en las pérdidas de capacidad por problemas de papel en productos de 16gsm que se obtendrían al estandarizar el procedimiento de ajuste de velocidad de línea.

### II.- REVISIÓN DE LOS MÉTODOS DE RESOLUCIÓN APLICABLES

#### II.1.- INTRODUCCIÓN

El problema objeto del presente trabajo requiere para su análisis la consideración de las características del proceso productivo, la interacción entre equipos y la lógica que la define, las políticas de operación de máquinas y de administración de buffers. Entre los métodos posibles para la resolución del problema se considerarán los detallados en los párrafos siguientes.

#### II.2.- BALANCE DE LÍNEA TRADICIONAL

El balance de línea tradicional consiste en determinar el ritmo de producción al que deberán operar los procesos que componen una línea a partir del ritmo de producción alcanzable en el cuello de botella.

Para poder identificar el cuello de botella (el proceso que define el tiempo de ciclo) se debe seguir el siguiente procedimiento:

- Armar un árbol de precedencias de la línea a modelizar

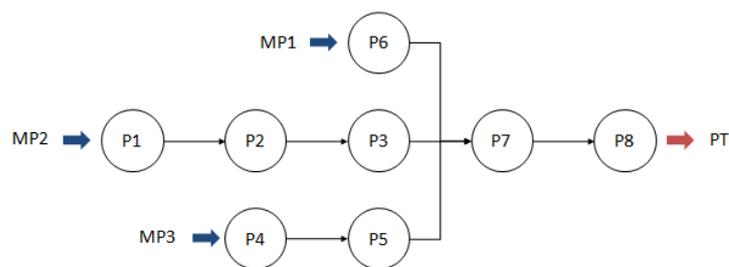


Figura II.2.1. Ejemplo de árbol de precedencias

- Calcular la cantidad de unidades de cada entrada que necesita el proceso para producir una unidad buena, considerando el descarte. Comenzar por el último proceso de la línea (P8 en el ejemplo de la Figura II.2.1 y continuar con los cálculos aguas arriba de la línea
- Una vez conocidas la cantidad de unidades que debe producir cada proceso para obtener una unidad buena al final de la línea se debe determinar el tiempo necesario para producirlas. Para ello se deben utilizar los ritmos de producción de cada proceso.
- El tiempo de ciclo de la línea, es decir el tiempo entre productos buenos que se podrá obtener al final de la línea, será igual al mayor de los tiempos de proceso calculados en el paso anterior.

El balance de línea involucra un grupo reducido de cálculos, por lo cual puede ser realizado sin problema mediante una planilla de Excel. La facilidad de construcción del modelo y de obtención de los datos es la mayor ventaja del método y hace que esta herramienta sea la indicada para obtener las primeras impresiones sobre las respuestas del sistema ante diferentes escenarios. Si bien esta información es necesaria en numerosos casos para tomar decisiones macro en relación a la línea, en el caso de análisis más detallados, donde las

## Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

interacciones entre variables con complejas y el tiempo es un factor a tener en cuenta, el método carece de la profundidad necesaria para dar respuesta a los interrogantes que se busca resolver. Un ejemplo de las limitaciones del método es la imposibilidad de modelizar la gestión de los buffers de la línea a fin de analizar estrategias de minimización del impacto de las fallas de los diferentes equipos en el desempeño de la línea.

### II.3.- DISEÑO DE EXPERIMENTOS

El diseño de experimentos es una técnica estadística que involucra la planificación y ejecución de ensayos controlados realizados sobre un determinado sistema a fin obtener la información necesaria que permita evaluar la relación que existe entre ciertas variables de entrada y la respuesta del sistema. Durante los ensayos controlados las variables de entrada del proceso o sistema se alteran intencionalmente a fin de obtener información sobre la respuesta del sistema ante distintos conjuntos de entradas.

En general, los experimentos se utilizan para estudiar la performance de procesos y sistemas. Un proceso es una combinación de máquinas, métodos, personas, y otros recursos que transforman ciertas entradas en una salida que tiene una o más respuestas observables ( $Y$ ). Algunas variables de proceso ( $X_p$ ) son controlables mientras que otras ( $Z_q$ ) son incontrolables.

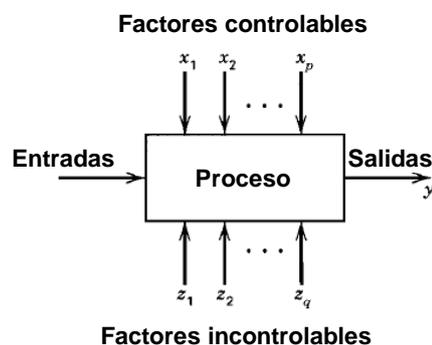


Figura II.3.1. Esquema de proceso. Entradas, salidas, factores controlables e incontrolables.<sup>20</sup>

A partir de un experimento es posible determinar por ejemplo cuales son las variables de mayor influencia sobre la respuesta del sistema, cuales son los valores para las variables de mayor influencia que generan una respuesta estable o cercana a un valor objetivo, entre otros.

El diseño de experimentos es una herramienta ampliamente utilizada en el campo de la ingeniería para mejorar la performance de los procesos productivos y en el diseño de nuevos productos y procesos. El uso de la técnica genera mejoras en los rendimientos, reducción de la variabilidad y corridas en target, menor tiempo de desarrollo y menores costos en el caso de

<sup>20</sup> Douglas Montgomery. 2001. Design and analysis of experiments. John Wiley & Sons, Inc. 5<sup>a</sup> Edición. Pág 2.

## Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

los procesos, y mayor robustez y conocimiento de los parámetros críticos para la performance en los productos.

La mayor ventaja del método es que permite analizar sistemas donde ocurren fenómenos aleatorios e interferencias complejas. Entre las desventajas se destacan la necesidad de alterar el sistema o proceso para realizar los experimentos con el consiguiente costo y riesgo asociado y el elevado tiempo necesario para recolectar información, aún al utilizar los diseños de experimentos más eficientes.

### **II.3.1.- Principios del diseño de experimentos**

En el diseño de experimentos existen tres principios básicos: replicación, aleatoriedad y bloqueo.

La replicación consiste en repetir un experimento básico, lo que permite obtener un estimado del error experimental y una estimación más precisa de la respuesta que se está midiendo en el experimento. La importancia de obtener una estimación del error experimental radica en que permite determinar si las diferencias observadas en los datos son estadísticamente significativas.

La aleatorización implica que la secuencia en la que se harán las pruebas se define de forma aleatoria. Esto permite suponer la independencia entre variables y genera un promedio de los efectos de factores extraños que puedan estar presentes en el experimento.

El bloqueo consiste en minimizar el impacto de variaciones conocidas mediante la redistribución de los ensayos a realizar. Por ejemplo si se deben realizar pruebas para determinar el incremento de dureza que se puede alcanzar en un proceso de templado de acero donde el material no es una variable de influencia para el experimento entonces se deben distribuir los ensayos a realizar de forma que si se utilizan diferentes lotes de un mismo tipo de material se puedan aislar las diferencias causadas por esta diferencia.

### **II.3.2.- Pasos de un DOE**

Para diseñar un experimento es necesario que el equipo tenga una idea clara del proceso que estará bajo estudio, de la forma en que se recolectarán los datos y al menos un entendimiento cualitativo de como analizar los datos.

El análisis mediante experimentos se compone de cinco etapas secuenciales.



Figura II.3.2. Etapas de un análisis mediante experimentos.

En general, los equipos descubren que un único experimento extenso tiene pocas posibilidades de responder todos los interrogantes y que un enfoque secuencial utilizando una serie de experimentos más pequeños es una mejor

## **Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación**

estrategia. Es por esto que la secuencia de cinco pasos puede ser repetida varias veces dentro de un estudio más extenso. A medida que avanza el estudio es común descartar variables de entrada, agregar otras no consideradas en un principio, cambiar valores de variables y/o las respuestas a medir. Por lo tanto es importante hacer los experimentos secuencialmente y administrar los recursos para poder hacerlo. Sin embargo, cada estudio seguirá las etapas que se describirán a continuación

### **II.3.2.1.- Formulación del problema**

El primer paso consiste en desarrollar una expresión del problema clara y aceptada por todos los involucrados. En este proceso suele ser útil preparar una lista de problemas específicos o preguntas a ser respondidas en el estudio solicitando la participación de todos los sectores que pudieran estar afectados por el problema (ingeniería, marketing, calidad, operaciones, los operadores de las maquinas).

Una clara definición del problema contribuye a una mejor comprensión del fenómeno bajo estudio. En el proceso se deben establecer también los objetivos del estudio ya que las preguntas específicas a responder en cada experimento estarán vinculadas a los mismos.

### **II.3.2.2.- Diseño del experimento**

La etapa de diseño del experimento se compone de tres pasos, la selección de las variables de entrada a considerar en el estudio (denominadas factores), la selección de la o las respuestas a medir y la definición de la clase de experimento a realizar.

#### **II.3.2.2.1.- Selección de los factores, niveles y rango**

Cuando se analizan las variables de entrada de un sistema, teniendo en cuenta un problema particular a resolver, normalmente se descubre que se las variables (o factores) se pueden clasificar en factores de interés o no significativos. Los factores de interés son aquellos que serán considerados para el estudio en función al problema definido. Esto no significa que los factores no significativos no alteren la respuesta del sistema sino que para el problema bajo análisis no son variables de interés. Para eliminar su influencia sobre el sistema se deberá seleccionar una estrategia de control adecuada a fin que no modifiquen la respuesta del sistema. Aquellos que puedan ser seteados serán mantenidos siempre en un mismo valor durante los experimentos mientras que los efectos de aquellos que no puedan ser controlados deberán ser eliminados mediante una correcta selección del tipo de experimento a realizar.

Una vez seleccionados los factores de interés se deberá establecer el rango de valores posibles a considerar en los experimentos junto con los valores específicos a utilizar, denominados niveles. Para esta definición es importante tener conocimiento teórico y práctico del proceso bajo análisis.

## Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

### **II.3.2.2.2.- Selección de la variable de respuesta**

Generalmente existen diferentes mediciones que se pueden realizar sobre la respuesta del sistema a fin de caracterizarla. Se deberá elegir una que provea información útil en relación al problema de interés. Según el fin del análisis se podrá utilizar el promedio o desvió estándar de la variable de respuesta.

### **II.3.2.2.3.- Selección del diseño experimental**

La selección del diseño involucra la definición del tamaño de la muestra necesaria, la selección de un orden de experimentación y la especificación de las necesidades de bloqueo o aleatorización.

Existen varias estrategias de experimentación para realizar los ensayos de un experimento, algunas de las cuales se presentan a continuación.

- *Estrategia de mejor acierto (Best-Guess)*: consiste en variar uno o dos factores basándose en los resultados del último experimento realizado. Si bien la estrategia es muy simple da buenos resultados cuando quien la realiza posee un gran conocimiento técnico del sistema que se está estudiando. Existen dos grandes desventajas en el uso de esta estrategia. La primera es que en los casos en que el resultado del primer experimento es negativo se deben seleccionar nuevos valores al azar para las variables de entrada a fin de volver a experimentar sin tener garantías de obtener buenos resultados. La segunda desventaja consiste en que cuando se encuentra una solución no hay garantía de que la misma sea la mejor.
- *Estrategia de un factor a la vez (OFAT- One Factor At a Time)*: Este método consiste en definir un punto de partida con valores para todas las variables de entrada de interés (factores) para luego ir variando cada factor a lo largo de un rango de a un factor por vez manteniendo a los demás constantes en el nivel base. Luego de hacer todos los ensayos se utiliza una serie de gráficos para mostrar cómo es afectada la respuesta del sistema por los cambios en los factores. La mayor desventaja de la estrategia OFAT es que no considera las posibles interacciones entre factores. La interacción se encuentra cuando un factor produce diferentes magnitudes de efecto sobre la respuesta del sistema dependiendo de los valores de los demás factores. La estrategia es además poco eficiente ya que requiere un gran número de experimentos para encontrar las interacciones entre los factores y la respuestas del sistema, lo que constituye otra desventaja.
- *Estrategia de experimentación factorial completa (Full Factorial)*: Es la estrategia correcta para realizar un experimento sobre un sistema donde existe interacción entre factores. En este tipo de experimento los factores se varían en conjunto en lugar de hacerlo de a uno por vez. De forma general, si hay  $k$  factores y cada uno tiene dos niveles, el diseño

---

## **Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación**

factorial requerirá de  $2^k$  corridas para obtener toda la información. Por lo tanto, a medida que el número de factores se incrementa la cantidad total de corridas necesarias para obtener la información crece exponencialmente, haciendo que el experimento se vuelva poco práctico desde el punto de vista del tiempo.

- *Estrategia de experimentación factorial parcial (Fractional Factorial):* Se utiliza en los casos en que hay más de cinco factores. Consiste en correr solo un subconjunto del total de combinaciones posibles para obtener suficiente información sobre el comportamiento del sistema.

### **II.3.2.3.- Experimentación**

Esta etapa consiste en llevar a cabo el experimento definido en la etapa de diseño. Al realizar los ensayos es clave monitorear el proceso cuidadosamente para asegurar que todo se desarrolla según el plan de experimentación. Los errores en la ejecución del experimento pueden invalidar las conclusiones que se obtengan del mismo.

### **II.3.2.4.- Análisis de datos.**

Para obtener conclusiones válidas a partir de los datos que se recogieron en el experimento se deben utilizar técnicas estadísticas. En general suele ser de utilidad presentar los resultados de los experimentos en términos de una ecuación o relación matemática empírica que vincule los factores de interés con la respuesta observada. Esto permitirá hacer predicciones sobre el comportamiento del sistema analizado en relación al problema bajo estudio.

### **II.3.2.5.- Conclusiones**

Una vez concluida la etapa de análisis se deberán sacar conclusiones en relación al problema y los objetivos definidos en la primera etapa y recomendar un plan de acción. Los métodos gráficos suelen ser útiles para presentar la información y las conclusiones a los dueños del problema.

## **II.4.- SIMULACIÓN DE EVENTOS DISCRETOS**

La simulación es una técnica de investigación de operaciones utilizada para la resolución de problemas en sistemas complejos donde intervienen múltiples variables aleatorias. La técnica consiste en imitar el comportamiento de un sistema del mundo real durante un determinado periodo de tiempo para generar una historia artificial que permita extraer conclusiones a fin de resolver un problema de interés. Para llevar a cabo la reproducción del comportamiento del sistema real se desarrolla un modelo lógico-matemático en una computadora. El mismo permite ensayar diferentes escenarios y observar la respuesta que podría esperarse en el sistema real en iguales condiciones sin incurrir en las pérdidas de tiempo, dinero y recursos que significaría hacer los ensayos en el sistema real.

## Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

Existen distintos tipos de simulación que se pueden clasificar en dinámica o estática según el comportamiento del modelo este asociado a la evolución del tiempo o no y en continua o discreta según la forma en que se suceden los eventos que alteran los estados del sistema.

Entre las ventajas del método de simulación se pueden destacar a la flexibilidad y generalidad, que lo hacen ideal para resolver problemas que no es posible utilizar la modelización matemática debido a la presencia de variables aleatorias, procesos estocásticos, fenómenos combinatorios, interferencias, lógicas complejas y decisiones que varían según el estado del sistema. Otras ventajas importantes son la posibilidad de analizar diferentes escenarios, la animación de entidades y procesos que posibilita visualizar la evolución del sistema a través del tiempo, la aceleración o contracción del tiempo que permite generar datos correspondientes a meses de comportamiento del sistema en unos minutos o evaluar los sucesos que ocurren dentro de unos segundos de evolución del sistema mirándolos en periodos de tiempo más extensos y el entendimiento del sistema real que ganan quienes participan del desarrollo del modelo operacional.

El método también presenta desventajas. Las más relevantes son la obtención de respuestas aproximadas, que no son exactas ni óptimas y la necesidad de tiempo y entrenamiento de recursos para el desarrollo de los modelos.

Los estudios de simulación se componen de una serie de pasos que se muestran en el diagrama a continuación.

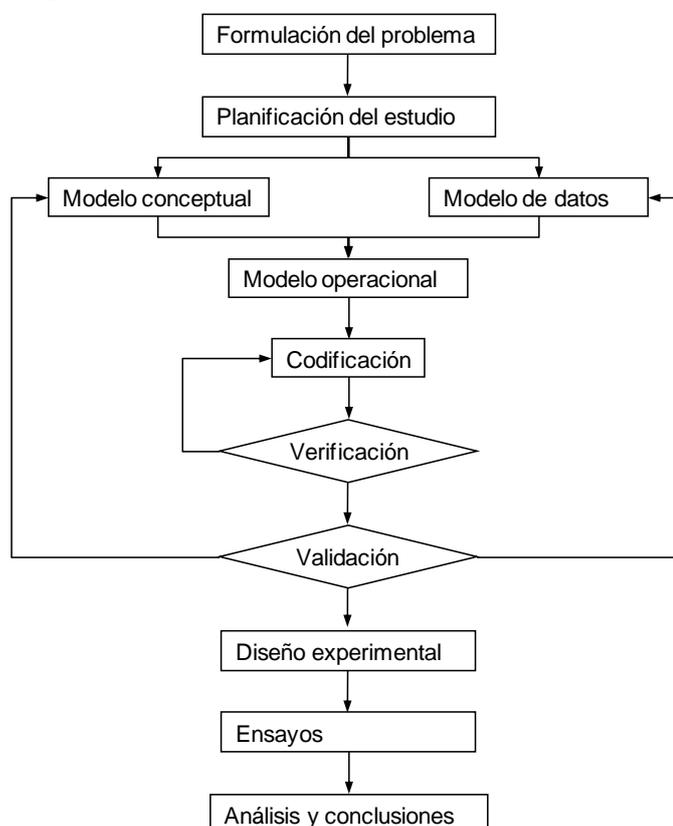


Figura II.4.1. Etapas de un estudio de simulación

---

## **Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación**

---

### **II.4.1.- Formulación del problema**

En cualquier sistema del mundo real coexisten un conjunto de situaciones y lógicas complejas que pueden ser consideradas problemas a resolver. La formulación del problema consiste en evaluar todas estas potenciales situaciones problemáticas del mundo real para luego seleccionar una que se deberá definir de forma clara y precisa. Es por lo tanto el primer paso de todo estudio de simulación.

En general existen dos tipos de problemas: los de diseño y los de performance. Los problemas de diseño son aquellos en los que el sistema bajo estudio aún no existe y lo que se busca es responder una pregunta sobre su posible desempeño (por ejemplo cual es la capacidad de producción de una planta que aún no ha sido construida o cuál es su cuello de botella). Los problemas de performance en cambio tratan sobre sistemas existentes donde lo que se busca es alcanzar un estado en el que el sistema ha operado antes en el cuál el desempeño era superior al del estado actual del sistema.

Es importante que la definición del problema se exprese en una redacción clara y que contenga una descripción del comportamiento esperado y del observado, junto con los actores involucrados, indicadores obtenidos y esperados y los gaps de performance. Se debe dejar en claro también el propósito del estudio, es decir cuál es el fin del modelo y el enfoque, es decir que se busca obtener al final del estudio.

La formulación del problema puede ser realizada por el equipo encargado del estudio de simulación o por el dueño del problema. En el caso en que sea el equipo quien deba desarrollar la formulación del problema es importante validar con los dueños del proceso los supuestos que se tomaran y la descripción del problema.

### **II.4.2.- Planificación del estudio**

Una vez definido el problema, se deben establecer los objetivos y las preguntas que se busca responder sobre el sistema real asociadas al objetivo planteado. Luego, se debe armar el plan del estudio definiendo las etapas, fechas, plazos, entregables y responsables. En este punto del estudio se dimensiona el equipo y soporte necesarios (personas y hardware). También se debe verificar que la simulación sea la herramienta más adecuada para resolver el problema.

### **II.4.3.- Modelo conceptual**

El modelo conceptual consiste en la abstracción del sistema real mediante un conjunto de ecuaciones y lógicas matemáticas que describen las relaciones entre los componentes y la estructura del sistema. Este debe ser investigado para poder armar un sistema de ecuaciones y lógicas que permita describir el funcionamiento y la relación entre las partes.

La construcción de un modelo es tanto un arte como una ciencia. No es posible dar un conjunto de instrucciones que sirvan para construir cualquier modelo. No

## Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

obstante existen algunas consideraciones generales que servirán de guía para construir modelos. El arte de armar modelos está potenciado por la habilidad para abstraer las características esenciales de un problema, la capacidad de seleccionar y modificar los supuestos básicos que caracterizan al sistema y luego para enriquecer y elaborar el modelo hasta alcanzar una aproximación útil para resolver el problema. Por lo tanto es mejor comenzar con un pequeño modelo simple de la situación real y agregar complejidad a medida que se avanza. Sin embargo no se debe agregar complejidad por el mero hecho de hacer que el modelo describa perfectamente al sistema real, sino que debe hacerse hasta alcanzar una reproducción de la realidad lo suficientemente buena como para resolver el problema que se busca resolver. Solo es necesario reproducir la esencia del sistema.

A continuación se detalla la información que debe contenerse en el modelo conceptual.

- ***Función objetivo:*** es una expresión matemática de indicadores del sistema que se desprende del propósito del modelo y sirve para evaluar y comparar alternativas.
- ***Variables y parámetros:*** consisten en las entradas del sistema y se deben definir claramente en esta etapa para luego ser cuantificadas en el modelo de datos. En el caso de las variables existe una clase especial que son las variables de control que consisten en las entradas del sistema que pueden ser modificadas por el dueño del problema para ensayar diferentes escenarios. Las variables de control deben ser definidas junto con el dueño del problema ya que dependerán de las condiciones que este pueda modificar en el sistema real (por ejemplo la capacidad de almacenamiento de un centro de distribución puede ser un parámetro si es fija y no puede ser alterada o una variable de control si el dueño del problema considera reformas o cambios en el sistema de almacenamiento que puedan incrementar este valor).
- ***Supuestos:*** se deben explicitar los supuestos que se consideraron al abstraer el sistema real y formular el modelo conceptual. Los mismos se deben validar con el dueño del problema para asegurarse que no se han tomado consideraciones excesivamente restrictivas.
- ***Límites y contexto:*** como parte del modelo conceptual se debe definir que porción del sistema real se considerará para el estudio, estableciendo los límites del modelo y el contexto del mismo.
- ***Entidades y agentes:*** se deben establecer y describir las entidades que compondrán al modelo definiendo los atributos necesarios para caracterizarlas correctamente. También se deben establecer los agentes y las reglas de decisión que aplican en el modelo.

---

## Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

---

- **Actividades y recursos:** En el caso de las actividades se deben definir las duraciones correspondientes (que pueden ser variables o parámetros) así como los recursos que se requieren en cada caso. Para los recursos considerados en el modelo se debe establecer la cantidad disponible así como también las reglas de disponibilidad (capacidad disponible por franja horaria, fallas o averías y otras condiciones que afecten la disponibilidad de los recursos)
- **Descripción operacional:** consiste en un relato de la lógica y el comportamiento observable del sistema, es decir un relato de cómo funciona el sistema. En el mismo se describen las acciones que ocurren en el sistema, las leyes de comportamiento de las entidades, las lógicas con que los agentes toman decisiones, las restricciones presentes en el sistema, entre otras. Para sintetizar la lógica que se codificará en el modelo y las reglas de decisión se utilizan generalmente diagramas de bloques y de flujo.

### II.4.4.- Modelo de datos

Una vez definidas en el modelo conceptual las variables y parámetros necesarios, se los debe cuantificar, registrando los resultados del proceso en el modelo de datos. La cuantificación consiste en determinar las expresiones numéricas que corresponden a cada variable y parámetro necesario definido en el modelo conceptual.

El primer paso para obtener la información necesaria es la recolección de datos. Esta generalmente requiere de una porción importante del tiempo total del estudio de simulación y por lo tanto es importante planificarla correctamente. Es importante comenzar lo antes posible con esta tarea, en general con las primeras etapas del modelo conceptual. La etapa de recolección de datos puede incluir la obtención a partir de bases de datos (SAP/Oracle/Access) o a partir de muestreos especialmente diseñados para tal fin. En este caso es importante dedicar suficiente tiempo al diseño del muestreo, en especial cuando el mismo será realizado por un equipo de diferentes personas. Se deben especificar claramente los criterios y la definición de las variables a observar (por ejemplo si se muestrea una parada de máquina se deberá indicar claramente el criterio de inicio y fin para que todos los involucrados en el muestreo midan de la misma forma)

Una vez que se dispone de suficiente información se deben analizar los datos para evaluar si corresponde utilizar una distribución de probabilidades o un valor fijo. En el caso que la variable observada presente un comportamiento aleatorio se debe comprobar que sea independiente de las otras variables consideradas en el estudio, introduciendo la correspondiente correlación entre aquellas que no lo sean. Para las variables independientes se deberá

## **Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación**

caracterizar el proceso y seleccionar una distribución entre aquellas que presenten un buen ajuste.

### **II.4.5.- Modelo operacional**

El modelo operacional es la suma del modelo conceptual y el modelo de datos. Dado que la mayoría de los sistemas del mundo real son complejos, generalmente resultan en modelos que requieren una gran capacidad de cálculo y manejo de datos. Es por esto que en esta etapa se debe elegir el software apropiado para realizar el modelo de simulación.

En el mercado existen productos más genéricos como el ARENA que permiten gran flexibilidad y software específico como el IDEAS que se utiliza para procesos de producción de papel. Si bien es posible utilizar un software genérico en casi cualquier estudio de simulación, el uso de un software específico para determinados problemas puede acortar los tiempos de desarrollo y corrida de un modelo, a expensas de flexibilidad en futuras expansiones del mismo.

En la selección del software se deben considerar además de la flexibilidad del mismo los gastos de licencia y capacitación así como los tiempos requeridos para formar personas que puedan codificar el modelo. También se deben tener en cuenta las características especiales que se puedan necesitar como puede ser el análisis de datos de entrada, herramientas para la automatización de corridas de diferentes escenarios o la capacidad de agregar animaciones en 2D o 3D.

### **II.4.6.- Codificación**

En esta etapa se programa en el software elegido la lógica descrita en el modelo conceptual y se cargan los datos definidos en el modelo de datos.

### **II.4.7.- Verificación**

La verificación es el proceso en el cuál se evalúa que el comportamiento del modelo de simulación se corresponda con la lógica definida en el modelo conceptual.

En modelos complejos es prácticamente imposible pasar directamente del modelo conceptual al programa de simulación terminado sin realizar cambios en el código original. Para hacer la verificación es recomendable dividir el modelo en secciones y verificar el funcionamiento y la lógica de cada una individualmente. Una vez que todas están verificadas entonces se debe analizar que la interacción entre las secciones sea la correcta. Para llevar a cabo estas actividades los software de simulación cuentan con diversas herramientas de debugging como el run control del ARENA que permite parar el modelo en determinadas situaciones y rastrear la evolución de las variables en el tiempo.

## Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

El proceso de verificación es iterativo, ya que al encontrar errores es necesario volver a la codificación del modelo e introducir los cambios necesarios para luego volver a verificar el modelo.

### **II.4.8.- Validación**

La validación consiste en determinar si el modelo conceptual es una representación lo suficientemente precisa del sistema real. Para ello se pueden comparar las salidas del modelo configurado para una situación conocida con los resultados del sistema real. En los casos en los que no existe el sistema o no hay datos se debe recurrir a otras técnicas. Una vez establecido que el modelo es válido, las comparaciones de los escenarios propuestos se harán contra los resultados del modelo en la situación base y no contra los datos del sistema real.

El proceso de validación es iterativo, ya que al encontrar errores es necesario volver al modelo operacional para hacer ajustes. Estos ajustes deberán luego ser codificados y el nuevo modelo sometido al proceso de verificación.

Existen métodos de validación que se pueden dividir en cualitativos y cuantitativos. Los métodos cualitativos incluyen:

- **Validación por parte de expertos:** las personas con mayor conocimiento del sistema pueden proveer la validación de los supuestos, de las lógicas del modelo y del comportamiento en general.
- **Análisis del comportamiento de las respuestas:** al cambiar un parámetro de la simulación se puede validar que la respuesta del sistema ocurra en la dirección esperada. Un caso particular de esta clase de análisis consiste en evaluar la respuesta del modelo ante condiciones extremas.
- **Test de Turing:** consiste en que personas que conocen el comportamiento del sistema real comparen las salidas del mismo con las del modelo. Esto se lleva a cabo por ejemplo generando reportes a partir de los outputs del sistema real y del modelo y pidiendo a expertos en el sistema real que distingan unos de otros. Si no pueden hacerlo entonces se puede afirmar que existe una validación del comportamiento del modelo.

La técnica cuantitativa consiste en correr el modelo con datos de entrada tomados de la realidad para luego comparar las salidas del modelo con aquellas obtenidas en el sistema real bajo las condiciones de entrada utilizadas. Si el modelo es válido debería poder verificarse estadísticamente que los datos de salida de la simulación y los datos reales pertenecen a la misma población.

### **II.4.9.- Diseño experimental**

Una vez validado el modelo se deben definir cuáles son las alternativas a analizar para alcanzar los objetivos del estudio y resolver el problema

## **Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación**

planteado en la etapa de formulación. Para ello, es conveniente describir cada ensayo a realizar junto con las variables de control a cambiar y sus valores. En este paso puede utilizarse una aproximación mediante el diseño de experimentos detallado en la sección precedente. Una vez que se cuenta con los escenarios a simular es necesario definir la secuencia de ensayos. En muchos casos no es posible definir exactamente todos los ensayos a realizar pero se pueden expresar los criterios para realizar ensayos adicionales en función a los resultados.

Para acordar con los dueños del problema la forma de mostrar los resultados y la información obtenida es conveniente diseñar un plan de cuadros, que se compone de un conjunto de gráficos donde se muestran los valores de la función objetivo en función de los diferentes valores de las variables de control.

Para cada escenario que se busca simular es necesario definir el número de corridas a realizar, el largo de cada corrida y el período de warm-up, si corresponde.

### **II.4.10.- Ensayos**

En esta etapa se realizan los ensayos propuestos en el diseño experimental. En algunos casos, a través de la observación del modelo durante los ensayos planteados en primer lugar surge la necesidad o el interés de correr escenarios alternativos. En este caso se revisa el diseño experimental para incluir los nuevos ensayos y se hacen las corridas necesarias.

### **II.4.11.- Análisis y conclusiones**

Los datos obtenidos de la simulación se analizan y se presentan las conclusiones. Dependiendo del alcance del estudio, el equipo que lo realiza podrá continuar con la implementación de las mejoras sugeridas en el sistema real o dejar éstas a cargo del dueño del problema.

## **II.5.- SELECCIÓN DEL MÉTODO A UTILIZAR EN EL PROYECTO**

Los objetivos planteados para el presente estudio requieren una metodología de análisis que permita manejar sistemas con interacciones complejas y de muchas variables ya que será necesario definir valores para determinadas variables de la configuración de la línea, probar diferentes políticas de operación y ajuste de la velocidad, entre otros ensayos. Esto hace que el análisis de balance de línea sea inviable ya que requiere de una simplificación muy fuerte del sistema real.

La naturaleza de los problemas a analizar hace que sea necesario analizar al sistema tal cual opera en la realidad, probando diferentes configuraciones alternativas para definir cuál presenta los mejores resultados. Un enfoque de experimentación sobre el sistema real podría resultar muy costoso ya que la capacidad de línea se encuentra actualmente saturada y destinar tiempo a hacer ensayos para cumplir con las pruebas requeridas por un DOE puede ser

## **Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación**

de un costo muy elevado si se contemplan las pérdidas que pudieran ocasionarse por disponer de menos productos para la venta. Además, deberá considerarse que el tiempo requerido para realizar los ensayos y obtener todos los resultados necesarios puede ser muy elevado.

Por lo expuesto anteriormente, es necesario realizar las pruebas sin interrumpir el normal desempeño de la línea. La simulación aparece entonces como el método más apropiado ya que permite reproducir el comportamiento del sistema con el nivel de detalle que sea necesario, experimentar sin alterar al sistema real y obtener los datos de forma más rápida.

### **III.- DESARROLLO DEL PROYECTO**

#### **III.1.- INTRODUCCIÓN**

El segundo capítulo del estudio presenta el desarrollo del proyecto en el cuál se construirá un modelo de simulación para resolver el problema. Se estructura en tres partes, la conceptualización del sistema bajo estudio, el desarrollo del modelo de datos y la codificación del modelo en ARENA.

La primer parte contiene la definición de las estructuras lógico-matemáticas del sistema, la función objetivo que se considerará para evaluar las alternativas de solución al problema planteado, el alcance del estudio y los supuestos asumidos.

El modelo de datos describe los métodos utilizados y resultados obtenidos en la cuantificación de las variables y los parámetros que surgen del modelo conceptual.

Por último, se describen las características del software utilizado para la codificación y el proceso de verificación y validación del modelo en ARENA.

#### **III.2.- FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

En el inciso I.4.4 de la sección anterior se realizó el análisis que permitió definir los problemas a resolver. El presente estudio de simulación busca reducir o eliminar la pérdida de capacidad en PH 30m Simple hoja debido a la interacción de las paradas de los diferentes equipos que componen la línea y la pérdida de capacidad por problemas con el papel en productos de 16gsm.

En función a las pérdidas actuales del proceso en relación a los problemas enunciados se estima que es posible obtener un incremento de capacidad de la línea Sincro 2 de hasta un 11,3%.

#### **III.3.- PLANIFICACIÓN DEL PROYECTO**

El presente proyecto se desarrolló en un período de seis meses, durante los cuales un equipo de dos ingenieros estuvo dedicado exclusivamente a la modelización y armado del modelo. La gerencia de la planta en la que se realiza el caso de estudio asignó adicionalmente una ingeniera de procesos y el coordinador de producción del área bajo estudio de forma parcial para participar en el desarrollo del modelo conceptual, completando así el equipo primario para el desarrollo del simulador. En etapas específicas se convocó adicionalmente la participación de operadores, supervisores de producción y personal de mantenimiento electrónico para el relevamiento de las lógicas de control y enclavamientos de la línea modelizada.

El líder de proyecto coordinó la etapa de formulación del problema y definición de objetivos en la que participó el gerente de la planta y el jefe de producción. Adicionalmente, el responsable del proyecto lideró la etapa de análisis y

## **Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación**

evaluación de alternativas, en la que se involucró nuevamente a personal operativo de línea para la generación de ideas.

### **III.4.- MODELO CONCEPTUAL**

Los componentes del modelo conceptual fueron descritos en el inciso II.4.3.-. En las secciones subsiguientes se desarrollará el modelo conceptual del sistema bajo estudio. A continuación se resume el contenido de cada sección.

- Alcance del estudio: Contiene los límites del estudio a realizar y las condiciones del sistema que se estudiarán.
- Función objetivo e indicadores de performance: Presenta los objetivos del estudio y los indicadores a utilizar en la comparación de alternativas.
- Modelización del sistema: Contiene la descripción operacional, los supuestos adoptados, las variables y parámetros a considerar y la modelización lógico-matemática de cada sección de la línea Sincro 2.
- Definición de entidades, actividades y recursos: En esta sección se enuncian las entidades y sus atributos, los recursos y actividades que se modelizarán.

#### **III.4.1.- Alcance del estudio**

El presente estudio evaluará los problemas formulados únicamente en la condición de régimen de línea, excluyéndose los cambios de formato de las máquinas y las curvas de start-up.

#### **III.4.2.- Función objetivo e indicadores de performance**

El presente estudio tiene como objetivos principales:

- Determinar la estrategia de integración de línea que permita reducir las pérdidas de capacidad en el PH 30m Simple Hoja.
- Determinar la reducción en las pérdidas de capacidad por problemas de papel en productos de 16gsm que se obtendrían al estandarizar el procedimiento de ajuste de velocidad de línea.

En ambos problemas, las alternativas evaluadas se analizarán mediante la comparación de la productividad de la línea, expresada en bolsones por hora. Adicionalmente se podrán incluir indicadores de estabilidad de la respuesta obtenida en los casos donde no se pueda comprobar estadísticamente una performance superior de una alternativa respecto a otra.

#### **III.4.3.- Modelización del sistema**

La línea Sincro 2 se compone de nueve clases de máquina, que se conectan entre sí mediante un conjunto de cintas de transporte. El funcionamiento de la línea como conjunto está controlado por una serie de lógicas que utilizan la lectura de sensores y estados de máquina como entradas. El layout de la línea junto con la nomenclatura utilizada para cintas (C##) y sensores (S##) se muestra a continuación.

## Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

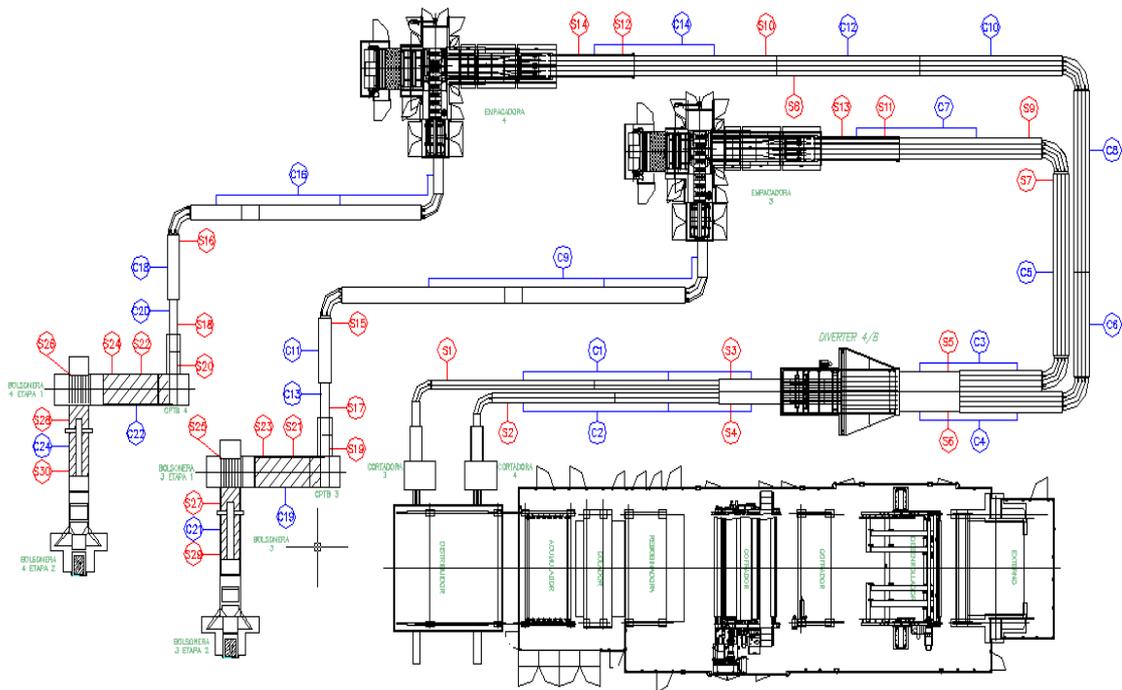


Figura III.4.1. Layout de la línea Sincro 2. Nomenclatura de cintas y sensores.

Para conceptualizar los procesos que componen la línea bajo estudio se utilizará el siguiente modelo.

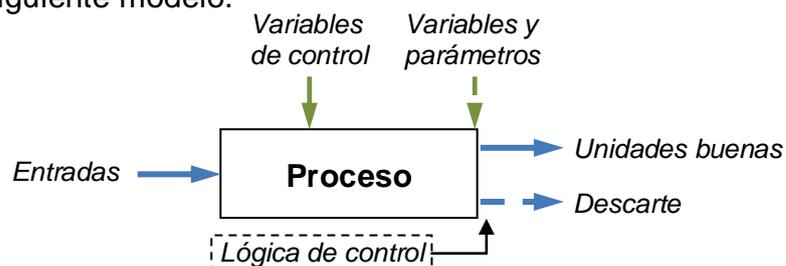


Figura III.4.2. Modelo conceptual de un proceso

El modelo presenta entradas físicas (flechas de color azul a la izquierda del proceso) que constituyen las materias primas necesarias para producir una unidad a la salida del proceso. Las salidas físicas del modelo (flechas de color azul a la derecha del proceso) involucran a las unidades buenas (línea llena) y el descarte (línea punteada). El proceso de transformación de entradas en salidas se define mediante una función que vincula las unidades buenas con las entradas y una función o distribución que relaciona el descarte con las entradas. La velocidad de transformación de entradas en salidas podrá ser una variable (de control o no) ó un parámetro.

Existen otras variables y parámetros relacionados al funcionamiento del proceso o la lógica de enclavamiento del mismo con procesos precedentes o subsiguientes. Entre estas variables y parámetros se encuentran las fallas de los equipos, la frecuencia y duración de cambio de insumos y la capacidad de almacenamiento, entre otros.

## **Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación**

Por último, el modelo contempla la existencia de lógicas de control que pueden actuar sobre la transformación de entradas en salidas ó sobre la interacción con otros procesos.

### **III.4.3.1.- Sincro**

#### **III.4.3.1.1.- Descripción operacional**

La sincro presenta tres materiales de entrada, el papel, los tubetes y adhesivo (solo en productos doble hoja). La función del equipo es transformar los materiales de entrada en una unidad denominada log que tiene las características finales del rollo de papel higiénico (diámetro, gofrado y precorte) y la misma longitud que la bobina madre. La relación de transformación de materiales en logs está dada por el metraje del producto, el número de pliegos y el tipo de gofrado. Estos determinan el consumo de papel y adhesivo. En todos los casos se utiliza un solo tubete por log.

La máquina genera descarte operativo cada vez que tiene lugar un cambio de bobina, un corte en la alimentación de papel o un problema con los sistemas de gofrado y transferencia de color. La cantidad descartada es variable y depende del producto que se está produciendo.

En cuanto a las variables de proceso, el equipo presenta un gran número de ajustes que permiten regular las características del log pero que no afectan la relación de transformación de entradas en salidas. La única variable que afecta dicha relación es la velocidad de rebobinado, que se mide en metros por minuto. El operador tiene la capacidad de ajustar la velocidad del proceso en función a las características observadas en el papel que se está produciendo. Como regla general, para las bobinas que no tienen problemas conocidos de resistencia se utiliza la velocidad objetivo para el papel en cuestión. De no ocurrir problemas con el papel ó el proceso esta velocidad se mantiene constante hasta agotar el papel. En el caso que la bobina presente variaciones de resistencia mientras es rebobinada el operador reduce gradualmente la velocidad hasta encontrar aquella en la que el papel no se corte. No hay reglas establecidas para este ajuste, el cual queda a criterio del operador. En los casos en que las bobinas presentan problemas de calidad, estas se corren a una velocidad más baja desde el inicio del proceso.

El proceso de rebobinado presenta tres clases de interrupciones:

- Aleatorias: son aquellas que tienen una ocurrencia al azar, entre las que se encuentran las averías mecánicas y eléctricas y las paradas por regulación de parámetros de rebobinado.
- Conocidas ó programadas: son aquellas que ocurren con certeza ya sea porque se pueden predecir o porque son programadas. Entre ellas se encuentran las paradas por limpieza y los cambios de bobina, de formato y de materiales consumibles como cuchillas de precorte

## **Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación**

---

- Por interacción con otros equipos: son las que ocurren debido a la lógica que relaciona la producción de logs con la disponibilidad de espacio en el acumulador ó de tubetes en la tolva. Cada vez que el acumulador alcanza su nivel máximo de capacidad, la sincro se detiene. Para no tener una repetición de procesos de arranque y parada de la rebobinadora el operador espera que el acumulador se vacíe hasta alcanzar un nivel en el cual pueda poner en funcionamiento la rebobinadora sin tener que parar inmediatamente por falta de espacio en el acumulador. Dicho nivel de arranque de la sincro es especificado por el operador y no hay reglas generales para definirlo. En el caso de la tolva de tubetes la alimentación se realiza siempre que haya al menos un tubete.

### **III.4.3.1.2.- Supuestos**

En función a los objetivos del estudio se considerarán los siguientes supuestos:

- Se toman en cuenta únicamente al papel y a los tubetes como insumos necesarios en el proceso de rebobinado, descartando el adhesivo
- No se considerarán las paradas por cambios de formato ya que los análisis se realizarán para la condición estable de configuraciones de dos productos (por ejemplo PH 30m Simple Hoja formatos x4 y x6)
- Respecto a la velocidad de transformación existen dos posibilidades. Para analizar la política de gestión de la velocidad de máquina se considerará una lógica de ajuste de la velocidad durante la corrida de producción. Para los demás análisis se considerará a la velocidad como una variable aleatoria que cambiará únicamente cuando se cambie una bobina y luego será constante.

### **III.4.3.1.3.- Modelización**

Teniendo en cuenta las características y supuestos descriptos en los párrafos precedentes, se considerarán las siguientes variables y parámetros:

- Descarte del proceso: distribución de probabilidad según tipo de producto
- Averías: Las averías más relevantes tendrán su distribución de probabilidad para la frecuencia y para la duración.
- Cambio de bobina: La frecuencia se calculará en función a la cantidad de papel contenida en una bobina, que será una variable aleatoria. A medida que el proceso consuma papel se generará la necesidad de cambiar bobinas. La duración será una variable aleatoria.
- Velocidad de rebobinado: Será una variable aleatoria ó de controlada por una lógica dependiendo el caso bajo análisis.
- Capacidad del acumulador (MAX\_ACUM): Es el parámetro que define la capacidad de almacenamiento del acumulador, medida en logs.

## Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

- Nivel de arranque (NOP\_SINCRO): La cantidad máxima de logs que debe haber en el acumulador para que la sincro arranque luego de una parada por acumulador lleno. Según el caso bajo análisis puede ser un parámetro ó una variable de decisión.

La lógica de funcionamiento para la generación de logs se muestra en el diagrama a continuación.

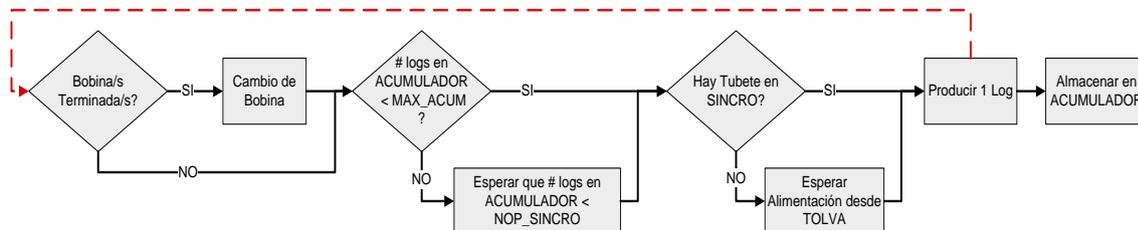


Figura III.4.3. Condiciones para la producción de un log

### III.4.3.2.- Tubetera

#### III.4.3.2.1.- Descripción operacional

La tubetera presenta dos materiales de entrada, cartón y adhesivo vinílico. La función del equipo es conformar tubetes (el tubo de cartón que se encuentra en el centro de los rollos) a partir de los materiales de entrada. Según el tipo de cartulinas utilizadas se pueden lograr tubetes de mayor o menor rigidez para soportar el impacto necesario en el proceso de corte. La relación de transformación de los materiales en tubetes es igual para todos los materiales ya que los diferentes productos que se fabrican en la sincro requieren de tubetes de igual diámetro y longitud. Las velocidades de producción dependen del producto que se esté produciendo en la rebobinadora. En general la velocidad de producción de tubetes para un producto dado es constante.

La máquina genera un pequeño descarte operativo en el momento de cambio de bobina que se realiza mediante un empalme. El tubete en el que queda contenido el empalme se debe descartar. Adicionalmente se pueden presentar descartes por motivos de calidad del cartón utilizado.

El proceso presenta dos clases de interrupciones:

- Aleatorias: son aquellas que tienen una ocurrencia al azar cómo por ejemplo las averías mecánicas y eléctricas.
- Por interacción con otros equipos: son las que ocurren debido a la lógica que relaciona la producción de tubetes la disponibilidad de espacio en el acumulador de tubetes. El proceso de producción de tubetes se detiene automáticamente cada vez que la tolva donde se almacenan los tubetes alcanza su nivel máximo. Al igual que la sincro, la tubetera se pone en funcionamiento luego que la tolva se vacía lo suficiente como para poner en funcionamiento la tubetera sin tener que pararla inmediatamente por falta de espacio en el acumulador. El nivel de arranque de la tubetera es

## Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

especificado por el operador y en general se utiliza un 50% de la capacidad de la tolva.

### III.4.3.2.2.- Supuestos

En función a los objetivos del estudio se considerarán los siguientes supuestos:

- No se considerarán los insumos de la tubetera en la simulación.
- No se considerarán las paradas por cambios de formato ya que los análisis se realizarán para la condición estable de configuraciones de dos productos (por ejemplo PH 30m Simple Hoja formatos x4 y x6)
- Se considerará una velocidad de transformación fija para cada producto.
- El nivel de arranque de la tubetera luego de una parada por falta de espacio de almacenamiento será cuando la tolva se encuentre al 50% de su capacidad
- Solo se considerarán las fallas mecánicas y eléctricas del equipo, las cuales tendrán su distribución de probabilidad asociada para la frecuencia y la duración.
- No se considerará descarte en el proceso por operación ni por problemas de calidad del cartón.

### III.4.3.2.3.- Modelización

Teniendo en cuenta las características y supuestos descriptos en los párrafos precedentes, se considerarán las siguientes variables y parámetros:

- Averías: Las averías más relevantes tendrán su distribución de probabilidad para la frecuencia y para la duración.
- Velocidad de producción: Será un parámetro del modelo para cada producto.
- Capacidad de la tolva de acumulación de tubetes (MAX\_ACUM\_TUB): Es el parámetro que define la capacidad de almacenamiento del acumulador, medida en tubetes.
- Nivel de arranque (NOP\_TUBETERA): La cantidad máxima de tubetes que debe haber en la tolva para que la tubetera arranque luego de una parada por tolva llena. Es un parámetro del modelo.

La lógica de funcionamiento para la generación de tubetes se muestra en el diagrama a continuación.

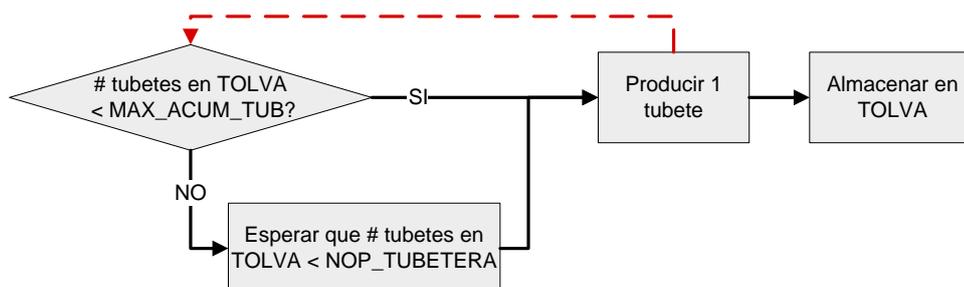


Figura III.4.4. Condiciones para la producción de un tubete

## **Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación**

---

### **III.4.3.3.- Acumulador**

#### **III.4.3.3.1.- Descripción operacional**

El acumulador es un dispositivo de almacenamiento de logs, con capacidad máxima para 274 unidades. En este equipo no se realizan transformaciones del producto ya que su función es hacer de pulmón entre la rebobinadora y los procesos subsiguientes. El acumulador no genera descarte.

El equipo presenta dos operaciones, la carga de logs y la descarga de los mismos. La primera operación se produce cuando la sincro genera un log. Este es recibido por el acumulador en una posición fija. Luego de cargar el log, el acumulador ajusta sus cadenas para permitir el ascenso del cangilón en la posición de carga sin desplazar el cangilón que se encuentra en la posición de descarga. La operación de descarga se realiza en la entrada del distribuidor y ocurre cuando se verifican las dos condiciones de descarga: la disponibilidad de espacio para liberar un log en la entrada del distribuidor y que el número de logs almacenados en el acumulador sea mayor al nivel mínimo. En ambos casos la velocidad de movimiento de las cadenas es fija y no puede ser regulada por el operador.

En general el proceso no presenta interrupciones importantes siempre que se realice el mantenimiento preventivo del sistema de avance de cadenas.

#### **III.4.3.3.2.- Supuestos**

Los supuestos que se considerarán para el acumulador se enuncian a continuación.

- No se incluirán en el modelo las paradas por mantenimiento preventivo del sistema de movimiento de cadenas ya que los análisis se realizarán para la condición estable de configuraciones de dos productos (por ejemplo PH 30m Simple Hoja formatos x4 y x6)
- El equipo se operará siempre en automático, por lo que no podrá descargar logs cuando la cantidad almacenada sea igual a la capacidad mínima del equipo (en modo manual es posible hacer la descarga)

#### **III.4.3.3.3.- Modelización**

Teniendo en cuenta las características y supuestos descritos en los párrafos precedentes, se considerarán las siguientes variables y parámetros:

- Velocidad de movimiento: Será un parámetro del modelo.
- Capacidad máxima del acumulador (MAX\_ACUM): Es el parámetro que define la capacidad de almacenamiento del acumulador, medida en logs.
- Capacidad mínima del acumulador (MIN\_ACUM): Es el parámetro que define la capacidad mínima de almacenamiento del acumulador, medida en tubetes. Por debajo de este número no se pueden realizar descargas de logs.

## Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

- Cantidad de logs en el acumulador (ACUMULADOR): Es una variable de estado del modelo que contendrá al número de logs almacenado en el acumulador en un instante dado.
- Capacidad de la entrada al distribuidor (MAX\_IN\_DIST): Es el número máximo de logs que pueden estar esperando en la entrada del distribuidor para ingresar al equipo. El espacio físico para almacenar logs en la entrada es fijo y el diámetro del log varía entre productos por lo que también cambia el número de logs que se pueden almacenar. El valor es un parámetro del modelo para cada producto que se simule.

La lógica de descarga de logs involucra a la sincro y a la entrada al distribuidor. Las condiciones que se deben verificar se muestran en el diagrama a continuación.

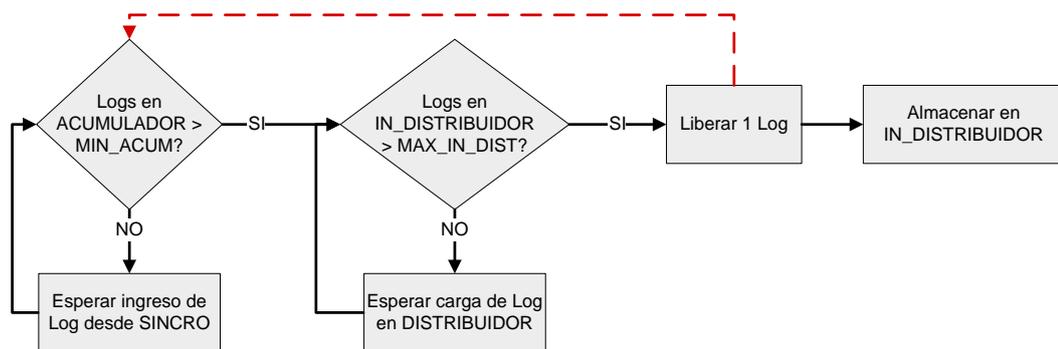


Figura III.4.5. Condiciones para la descarga de un log la entrada del distribuidor

### III.4.3.4.- Distribuidor

#### III.4.3.4.1.- Descripción operacional

El distribuidor es un equipo similar al acumulador en cuanto tiene la función de almacenar logs pero su objetivo, además de hacer de buffer entre la rebobinadora y las cortadoras, es cargar las cintas de alimentación de las cortadoras. En este equipo no se realizan transformaciones sobre el producto y al igual que el acumulador no presenta descarte.

Durante el funcionamiento normal del equipo, los logs provenientes del acumulador ingresan en una sección de entrada para esperar a que se verifique la condición de carga en el distribuidor. Cuando un cangilón vacío del distribuidor pasa frente a la posición de la sección de entrada, un log se transfiere al cangilón mediante una mariposa. Los logs cargados en el acumulador rotan dentro del mismo moviéndose a velocidad constante. Cada vez que un cangilón cargado pasa frente a una de las cunas de carga de las cortadoras se evalúa la condición de descarga. En caso de verificarse que la cuna está vacía el cangilón descarga el log en la cuna.

En general el proceso no presenta interrupciones importantes siempre que se realice el mantenimiento preventivo del sistema de avance de cadenas.

## **Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación**

---

### **III.4.3.4.2.- Supuestos**

Para modelizar al distribuidor se considerará que no existen paradas por mantenimiento preventivo del sistema de movimiento de cadenas ya que los análisis se realizarán para la condición estable de configuraciones de dos productos (por ejemplo PH 30m Simple Hoja formatos x4 y x6)

### **III.4.3.4.3.- Modelización**

A fin de modelizar el distribuidor se separa al equipo en tres secciones:

- La entrada del distribuidor (IN\_DISTRIBUIDOR) que interacciona con el acumulador y sirve de almacén intermedio para realizar la carga del distribuidor.
- El distribuidor, provisto de una serie de cangilones que se encuentran en rotación y que permiten almacenar logs.
- Las cunas de salida del distribuidor (CUNA), que interaccionan con las cortadoras y almacenan los logs hasta que la alimentación de las cortadoras está vacía

Teniendo en cuenta las características del equipo y los supuestos descritos en los párrafos precedentes, se considerarán las siguientes variables y parámetros:

- Velocidad de movimiento: Será un parámetro del modelo.
- Capacidad máxima del distribuidor (MAX\_DIST): Es el parámetro que define la capacidad de almacenamiento del distribuidor, medida en logs.
- Posición de cangilones del distribuidor (POS\_DISTRIBUIDOR<sub>j</sub>): Es un vector binario que tiene una posición para cada cangilón del distribuidor. Cada posición toma valor 1 cada vez que se le carga un cangilón y luego se resetea a 0 al descargarlo en una cuna.
- Capacidad de la entrada al distribuidor (MAX\_IN\_DIST): Es el número máximo de logs que pueden estar esperando en la entrada del distribuidor para ingresar al equipo. El espacio físico para almacenar logs en la entrada es fijo y el diámetro del log varía entre productos por lo que también cambia el número de logs que se pueden almacenar. El valor es un parámetro del modelo para cada producto que se simule.
- Variables auxiliares de posicionamiento de cangilones: En el modelo se deberá incluir una lógica de rotación del distribuidor que permita identificar el cangilón que se encuentra frente a la posición de carga ó a alguna de las cuatro cunas donde se descargan logs. Para ello será necesario introducir variables (contadores) del sistema que permitan conocer esta información en cualquier instante de la simulación.
- Estado de las cunas (CUNA<sub>k</sub>): Son variables binarias que presentan valor 1 cuando están cargadas con un log y valor cero cuando están sin carga.

## Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

El distribuidor presenta 3 lógicas, la de alimentación, la de rotación y la de descarga. La primera de las lógicas se muestra a continuación.

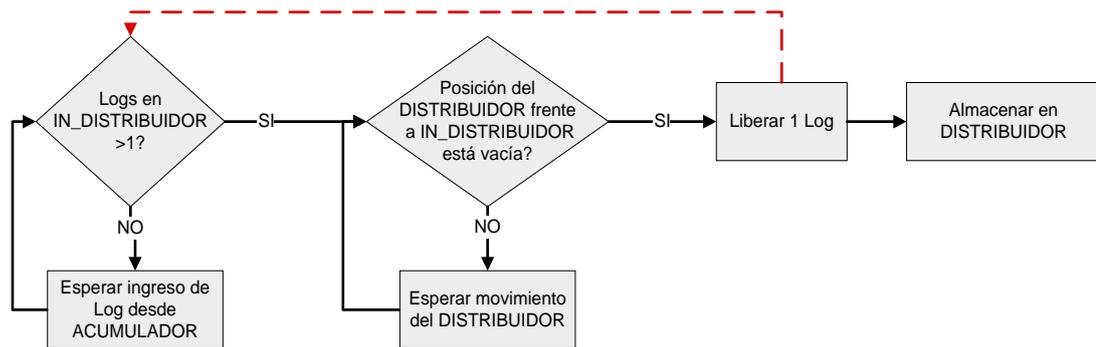


Figura III.4.6. Condiciones para la descarga de un log en el distribuidor

Una vez en el distribuidor, los logs se mantienen en rotación hasta ser descargados en una cuna. La lógica de rotación consiste en un contador que se incrementa con una frecuencia que es función de la velocidad de rotación. Este contador indica que cangilón está frente a la posición de carga. Este dato permite ubicar las posiciones que se encuentran frente a cada cuna ya que las distancias respecto a la posición de carga, medidas en cangilones, son constantes.

En cuanto a la lógica de descarga, cada cuna presenta un esquema como el que se describe en la siguiente figura.

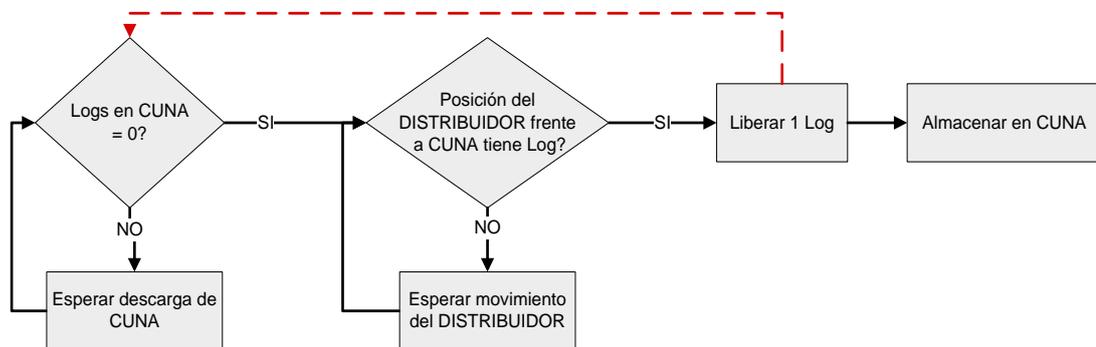


Figura III.4.7. Condiciones para la descarga de un log en una cuna

Los logs descargados en las cunas permanecen allí hasta que ambas cunas de una misma cortadora estén llenas y se verifiquen las condiciones de descarga en la cortadora correspondiente.

### III.4.3.5.- Cortadoras

#### III.4.3.5.1.- Descripción operacional

La línea Sincro 2 presenta dos cortadoras de iguales características que operan en forma independiente alimentadas por un único distribuidor. Estos equipos reciben logs de las cunas del distribuidor para luego transformarlos en rollos mediante una serie de cortes realizados con una cuchilla circular. El número de rollos que se obtiene de un log varía según las características del producto que se está fabricando. El proceso presenta dos clases de descarte,

## **Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación**

uno de diseño que consiste en los extremos del log (refile) y uno operativo por fallas en el sistema de vacío que retira los rollos de la cortadora.

En cuanto a las variables de proceso, las cortadoras presentan un gran número de ajustes que permiten regular las características del afilado de las cuchillas a fin de obtener un buen corte de los rollos. La única variable que afecta la relación de transformación de entradas en salidas es la velocidad de corte, que se mide en golpes por minuto. El operador tiene la capacidad de ajustar la velocidad de las cortadoras en función a las velocidades de los demás procesos. En general la producción de estos equipos no se ve afectada por las características del papel salvo en casos específicos donde el ajuste de la velocidad queda a criterio del operador.

El proceso de corte presenta tres clases de interrupciones:

- Aleatorias: son aquellas que tienen una ocurrencia al azar, entre las que se encuentran las averías mecánicas y eléctricas y las paradas por regulación de parámetros de corte.
- Conocidas ó programadas: son aquellas que ocurren con certeza ya sea porque se pueden predecir o porque son programadas. Entre ellas se encuentran las paradas por limpieza, los cambios de cuchillas y los de formato.
- Por interacción con otros equipos: son las que ocurren debido a la lógica que relaciona el funcionamiento de la cortadora con la disponibilidad de logs provenientes del distribuidor y con la existencia de espacio las cintas de transporte ubicadas a la salida que permiten retirar los rollos producidos por las cortadoras.

### **III.4.3.5.2.- Supuestos**

En función a los objetivos del estudio se considerarán los siguientes supuestos:

- No se considerarán las paradas por cambios de formato ya que los análisis se realizarán para la condición estable de configuraciones de dos productos (por ejemplo PH 30m Simple Hoja formatos x4 y x6)
- No se considerarán las averías del equipo ya que los mantenimientos y limpiezas preventivas realizadas al inicio de las corridas de producción hacen que la ocurrencia de estos eventos sea muy esporádica.
- No se considerará el descarte generado por el refile ni el que pudiera generar un problema en el sistema de vacío.

### **III.4.3.5.3.- Modelización**

Teniendo en cuenta las características y supuestos descritos en los párrafos precedentes, se considerarán las siguientes variables y parámetros:

- Velocidad de corte: Será una variable del modelo que podrá ser ajustada durante la simulación.

## Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

- Cantidad de rollos por log: Es un parámetro del modelo en función al producto que se esté produciendo.
- Estado de las cunas ( $CUNA_k$ ): Son variables binarias que presentan valor 1 cuando están cargadas con un log y valor cero cuando están sin carga.
- Estado de los sensores de las cintas de salida: Son variables binarias que presentan valor 1 cuando el sensor ubicado sobre la cinta de salida lee la presencia de un rollo y 0 en caso contrario.
- Posición de los sensores de las cintas de salida: Es una variable de decisión del modelo en los análisis referidos a la gestión de buffers. La ubicación del sensor define la capacidad de almacenamiento de rollos de la cinta de salida y por lo tanto regula la interacción entre las cortadoras y el diverter.

Cada cortadora presenta dos lógicas, la de alimentación y la de producción de rollos. La primera se muestra en el siguiente gráfico.

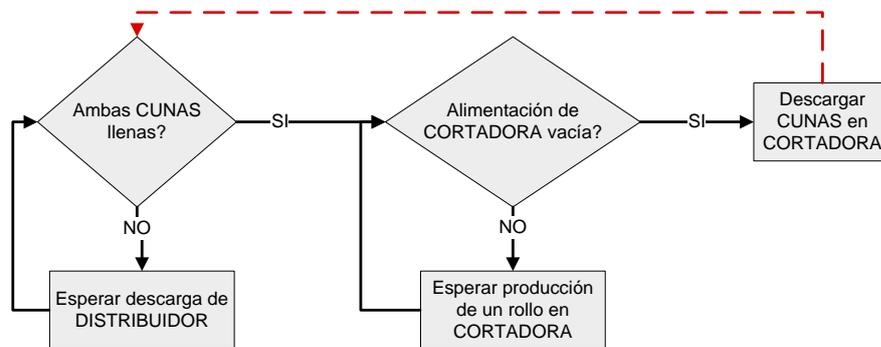


Figura III.4.8. Condiciones para la descarga de un log en las cunas

La lógica de producción depende de la presencia de dos logs en las cintas de alimentación y de las condiciones de los sensores ubicados en la cinta de salida según lo indicado en el siguiente esquema.

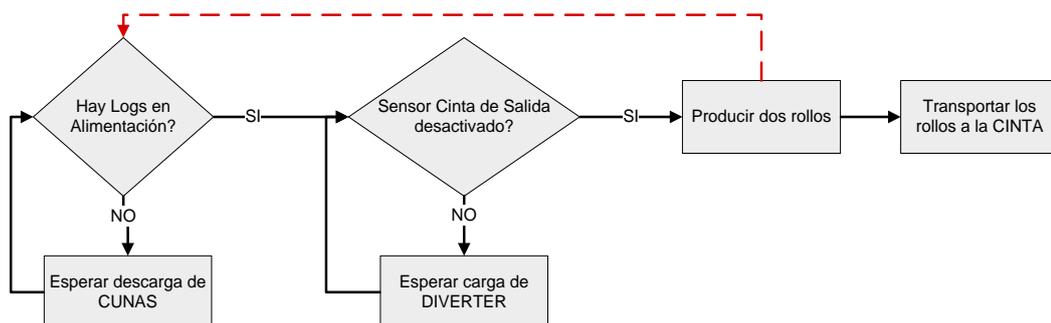


Figura III.4.9. Condiciones para la producción de rollos

### III.4.3.6.- Diverter

#### III.4.3.6.1.- Descripción operacional

El diverter es un equipo cuya función principal es distribuir la producción de las cortadoras en las cintas que alimentan a las envolvedoras, manteniendo el balance de la línea. Posee cuatro canales de entrada (dos por cada cortadora)

## Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

y ocho canales de salida (cuatro por cada envolvente) cada uno provisto de un sensor. En el diverter no se realizan transformaciones del producto por lo que no presenta descarte operativo.

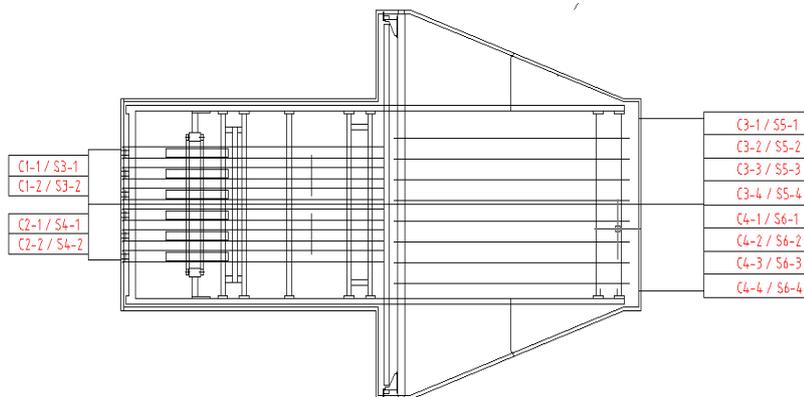


Figura III.4.10. Diagrama del diverter. Nomenclatura de canales y sensores

La operación del diverter comienza con el llenado de los lanzadores del equipo. Los lanzadores son cuatro canales que permiten acumular veinte rollos de papel higiénico ó diez rollos de cocina, cada uno. Los lanzadores son alimentados por los canales provenientes de las cortadoras. Los rollos que son enviados desde las cortadoras hacia el diverter son retenidos por un freno ubicado en la entrada del equipo. Este freno libera la entrada de rollos siempre que el lanzador esté vacío y el sensor ubicado en el canal de entrada esté leyendo rollos. La ubicación del sensor es tal que cuando lee la presencia de rollos indica que hay una cantidad suficiente como para llenar el canal. Según el modo de operación en el que se encuentre el diverter los lanzadores se pueden llenar de a uno, de a pares (provenientes de la misma cortadora) ó los cuatro en simultáneo.

Una vez cargado, el diverter evalúa la lógica de descarga en la cual se busca maximizar la cantidad de canales descargados minimizando el desplazamiento del diverter y manteniendo balanceadas las líneas. La descarga a realizar depende de la lectura de los sensores ubicados en los canales de salida, de los lanzadores que se encuentren cargados, de la posición del péndulo que conecta los lanzadores con los canales de salida y de las últimas descargas realizadas por el equipo. En función de estos datos, un plc define la descarga a realizar. Al igual que para la lógica de carga según el modo en el que se encuentre operando el diverter se podrán realizar descargas de un único canal, de a pares de canales (de la misma envolvente) ó los cuatro canales en simultáneo (a una misma envolvente). Una vez definida la descarga a realizar el péndulo rota conectando los canales de salida correctos con los lanzadores a descargar y se accionan las cintas que transportan los rollos a través del diverter.

El proceso presenta únicamente dos variables de control, la velocidad de las cintas de los lanzadores y el modo de operación.

## **Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación**

---

En cuanto a las interrupciones, el diverter presenta únicamente averías mecánicas de baja frecuencia y resolución rápida (generalmente asociadas a rollos que ingresan en posición vertical).

### **III.4.3.6.2.- Supuestos**

Para la modelización del diverter se asumirá que el equipo no presenta interrupciones debido a fallas mecánicas y que se puede operar exclusivamente en los modos de 2 y 4 canales (Es decir que no se pueden realizar descargas de un solo canal).

### **III.4.3.6.3.- Modelización**

Para modelizar las lógicas del equipo se considerarán las siguientes variables y parámetros:

- Estado de los sensores de entrada al diverter (S3 y S4): Cada variable representa la lectura del sensor correspondiente a un canal. Por ejemplo el sensor S3-1 muestra el estado del canal 1 proveniente de la cortadora 3. En el caso que el sensor se encuentre leyendo la presencia de un rollo la variable tomará valor 1. En caso contrario la variable tendrá valor 0.
- Estado de los lanzadores del diverter: Para cada lanzador se utilizará una variable binaria que toma valor 1 cuando el mismo se encuentra cargado.
- Posición actual del diverter: es una variable que toma valores del 0 al 10 para indicar la posición en la que se encuentra el péndulo. Cada posición refiere a una única combinación de lanzadores y canales de salida.
- Restricción de próxima descarga: Cuando el diverter realiza una descarga en algún canal de una de las envolvedoras no puede cambiar de envolvedora hasta completar la descarga en los cuatro canales que alimentan a la anterior. Esta variable se activa cuando el diverter realiza una descarga incompleta (es decir de menos de 4 canales) y se requiere completar la descarga.
- Estado de los sensores de salida del diverter (S5 y S6): Cada variable representa la lectura del sensor correspondiente a una canal. Por ejemplo el sensor S6-3 muestra el estado del canal 3 que abastece a la envolvedora 4. En el caso que el sensor se encuentre leyendo la presencia de un rollo la variable tomará valor 0. En caso contrario la variable tendrá valor 1.
- Matriz de cálculo de descarga: Es una matriz que contiene un número que identifica al movimiento que debe realizar el péndulo y a los lanzadores que se deben descargar para realizar la máxima descarga posible con el menor desplazamiento, en función a las lecturas de los

## Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

sensores y el estado del diverter. Esta matriz es un parámetro del modelo.

- Vector de movimientos: Es un vector que contiene la posición a la que se debe desplazar el diverter en función al número obtenido de la matriz de cálculo de descarga. Este vector es un parámetro del modelo.
- Matriz de descarga: Es una matriz que presenta cuatro columnas, una por cada lanzador. Contiene el estado que debe tener cada lanzador luego de la descarga y por lo tanto indica que lanzadores se deben descargar en el movimiento actual. La fila de la matriz se determina a partir del número obtenido de la matriz de cálculo de descarga. Esta matriz es un parámetro del modelo.
- Velocidad de la cinta de transporte de rollos: Es una variable de control del equipo que modifica la velocidad con la que se mueven los rollos desde la entrada hasta la salida del equipo, medida en metros por minuto.
- Modo de operación del equipo: Es una variable de control que permite habilitar las descargas incompletas de 2 canales ó las descargas completas de 4 canales.

La modelización del diverter se divide en dos partes, la lógica de alimentación, la lógica de descarga.

La lógica de alimentación evalúa si los lanzadores están cargados y si el diverter está en proceso de descarga para luego definir que lanzadores cargar de acuerdo con la lectura de los sensores ubicados en los canales de entrada. El proceso se muestra en el esquema siguiente.

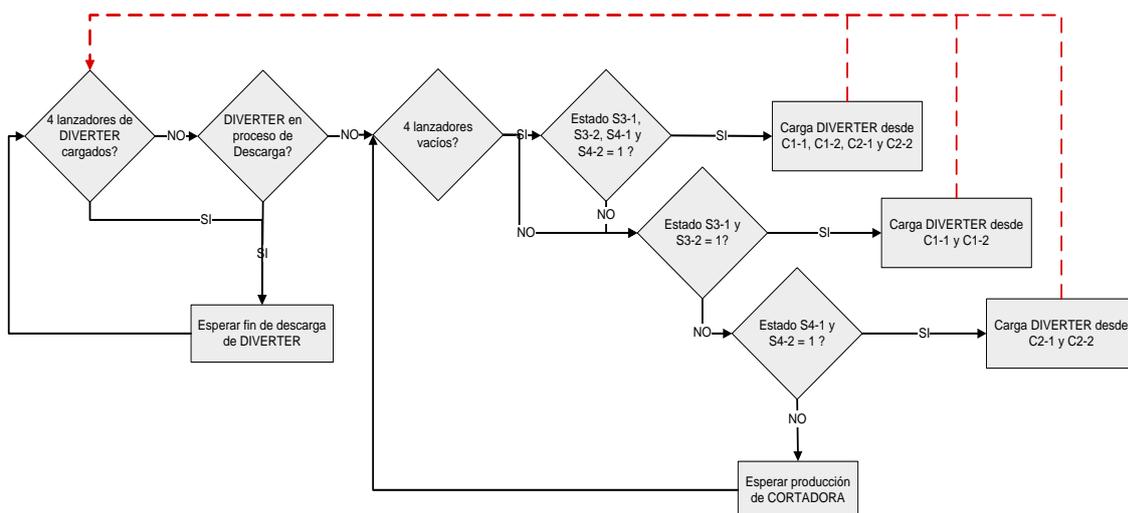


Figura III.4.11. Lógica de carga del diverter

En simultáneo con la lógica descrita anteriormente, se evalúa la lógica de descarga. Para modelizar la secuencia de cálculo que realiza el plc se utilizarán vectores, matrices y números binarios. La matriz de cálculo de descarga, el vector de movimientos y la matriz de descarga son parámetros del modelo que

## Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

contienen la información requerida para definir cuál es la mayor descarga que se puede realizar con el menor desplazamiento considerando las condiciones actuales del diverter.

Los pasos de la lógica de descarga se describen a continuación.

- Lectura del estado de los canales de salida: Los sensores S5 y S6 contienen la lectura de cuatro canales cada uno. Es posible entonces armar un número binario a partir de la lectura de los ocho canales.

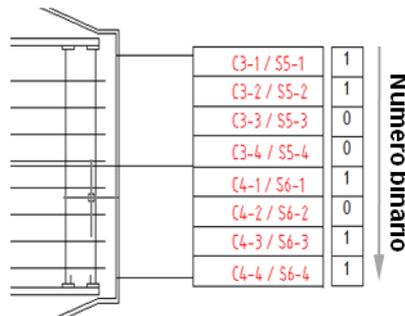


Figura III.4.12. Transformación de lectura de sensores en número binario

- Restricción de la próxima descarga: Al vector binario obtenido en el primer paso se le realiza un proceso de AND con el vector que restringe la próxima descarga. Este proceso consiste en hacer la operación AND definida en el álgebra de Boole entre las componentes de ambos vectores. El ejemplo siguiente muestra el resultado que se obtendría si la próxima descarga estuviese restringida a los canales C4-3 y C4-4.

1		0		0
1		0		0
0		0		0
0	AND	0	=	0
1		0		0
0		0		0
1		1		1
1		1		1

Figura III.4.13. AND entre el vector de lectura de sensores y el vector de próxima descarga

- Evaluación del estado de las envolvedoras: Si alguna envolvedora está en falla o desprogramada entonces todos los canales correspondientes a la misma presentan un valor 0 en el vector de las envolvedoras. Este vector de ocho componentes se somete a un proceso de AND con el obtenido en el paso anterior. El vector resultante (vector de abastecimiento) muestra los canales de salida que son factibles de ser abastecidos.
- Transformación del vector de abastecimiento en un número decimal: Este paso consiste en hacer el producto escalar entre el vector de abastecimiento y el vector que se muestra en la siguiente figura.

$2^0$	$2^1$	$2^2$	$2^3$	$2^4$	$2^5$	$2^6$	$2^7$
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Figura III.4.14. Vector para transformación de base binaria a decimal

## Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

Como resultado se obtiene un número entre 0 y 255. Si el resultado es 0 entonces no hay descargas posibles y finaliza el proceso de cálculo.

- Lectura del estado de los lanzadores: a partir de los valores de las variables binarias que describen el estado de los sensores es posible armar un número binario. Al vector obtenido se lo analiza considerando el modo de operación en el que se encuentra seteado el diverter. Por ejemplo si el modo es “two-lane” entonces las descargas deberán ser de al menos dos lanzadores en simultáneo. En ese caso, para existir alguna descarga factible al menos una de las sumas entre las componentes 1 y 2, 3 y 4, debe ser igual a dos.
- Transformación del vector de lanzadores en un número decimal: En este paso se realizan dos operaciones. La primera consiste en hacer el producto escalar entre el vector de lanzadores y el vector que se muestra en la siguiente figura.

$$\begin{array}{|c|c|c|c|} \hline 2^0 & 2^1 & 2^2 & 2^3 \\ \hline \end{array}$$

Figura III.4.15. Vector para transformación de base binaria a decimal

Como resultado se obtiene un número entre 1 y 15. Luego, dado que el diverter puede encontrarse en diferentes posiciones para una misma carga de lanzadores y que la lógica debe minimizar el desplazamiento y maximizar la descarga, se suma el producto entre 15 y la variable que indica la posición actual del péndulo del diverter. El número resultante se encuentra en el rango de 1 a 165 e indica una combinación única de carga de lanzadores y posición del péndulo del diverter.

- Cálculo de la combinación de descarga: A partir de los números en base decimal calculados se obtiene de la matriz de cálculo de descarga un número que identifica a una combinación de movimiento de diverter, descarga de canales y restricción de próxima descarga. El número corresponde a la fila cuyo número es igual al obtenido de la transformación del vector de abastecimiento y la columna cuyo número coincide con el obtenido de la combinación entre la carga de lanzadores y la posición del péndulo del diverter.

Ejecución de la descarga: En primer lugar el diverter se mueve a la posición especificada en el vector de movimientos, en la componente cuya posición coincide con el número obtenido en el paso anterior. Luego realiza la descarga especificada en la matriz de descarga, en la fila correspondiente al número obtenido en el cálculo de la combinación de descarga. Por último se actualiza el valor de la restricción de próxima descarga en el caso que la misma haya sido incompleta

El siguiente esquema resume la lógica del cálculo de la descarga.

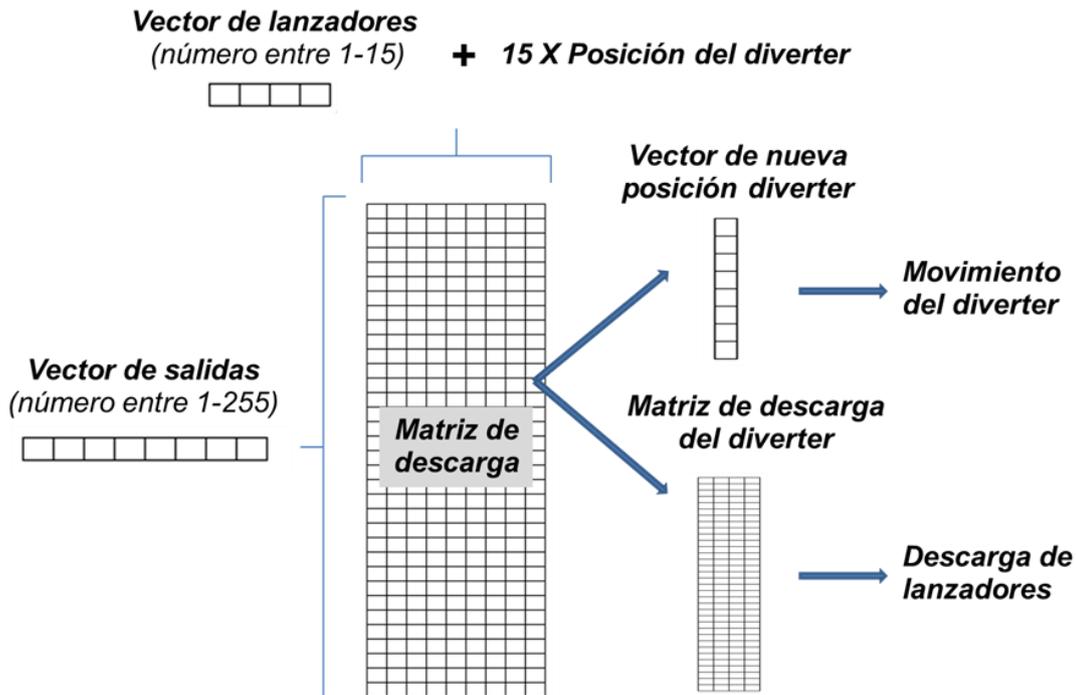


Figura III.4.16. Lógica de cálculo de descarga del diverter

### III.4.3.7.- Cintas de transporte

#### III.4.3.7.1.- Descripción operacional

Las cintas de transporte comunican al diverter con las envolvedoras. Su función principal es mantener una alimentación constante a las envolvedoras sin acumular una excesiva cantidad de rollos en la cinta de entrada a las mismas ya que esto genera un exceso de presión en los lanzadores de rollos y aumenta la incidencia de fallas por rollos mal posicionados. Poseen además una función secundaria que es actuar de buffer entre las envolvedoras y los procesos anteriores.

El proceso de transporte de rollos no genera descarte operativo si se realiza la limpieza trimestral de las mismas para liberarlas de contaminantes y el recambio correspondiente cuando presentan roturas que puedan afectar al producto que transportan.

En cuanto a las variables de proceso, las cintas presentan tres tipos de seteos que permiten regular el caudal y la velocidad de la alimentación. Estos son la velocidad de la cinta y los tiempos de encendido y apagado. El accionamiento de las secuencias de alimentación es realizado por un sensor (S9 ó S10) ubicado en la cinta de entrada a la envolvedora.

Las cintas de transporte rara vez presentan averías y las limpiezas y mantenimientos requeridos se programan para ser realizados en las paradas mensuales destinadas a tal fin.

En el siguiente esquema se muestran las cintas con su nomenclatura y los sensores que regulan su funcionamiento.

## Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

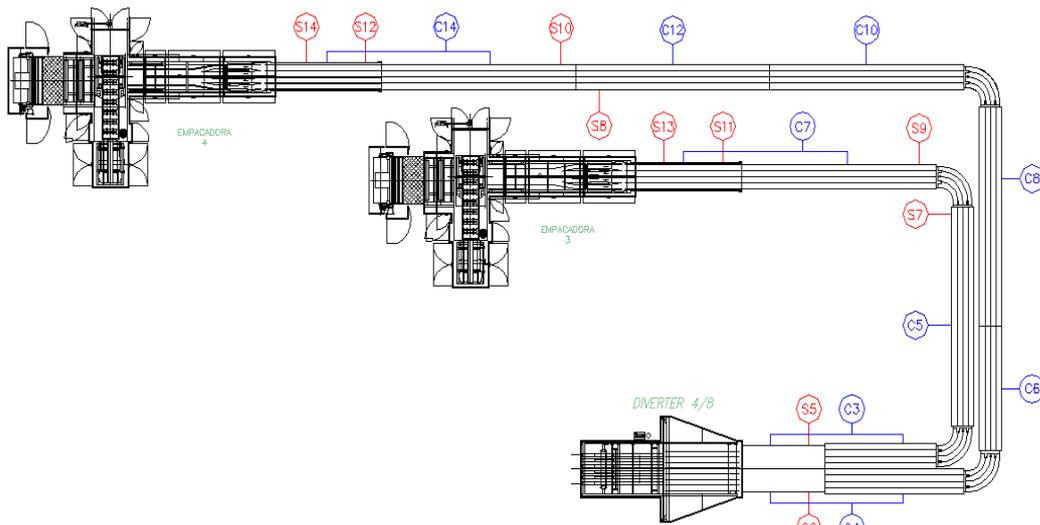


Figura III.4.17. Layout de las cintas de transporte

### III.4.3.7.2.- Supuestos

Para la modelización de las cintas se descartará la curva de aceleración hasta alcanzar la velocidad seteadas ya que comparada con los tiempos mínimos de funcionamiento de las cintas es despreciable.

### III.4.3.7.3.- Modelización

A fin de modelizar el transporte de rollos se considerarán las siguientes variables y parámetros:

- Largo de las cintas: Se especificará para cada cinta en un parámetro del modelo. No podrá ser modificado en los estudios a realizar.
- Velocidad de transporte: La velocidad de cada cinta podrá ser modificada individualmente y será almacenada en un parámetro del sistema. Según el estudio a realizar estos parámetros del modelo podrán transformarse en variables de control.
- Tiempo de encendido: Es el tiempo que debe transcurrir entre el encendido de la cinta precedente (ó la activación de la secuencia en el caso de la primer cinta) y el encendido del motor que acciona a la cinta correspondiente. Se define para cada cinta individualmente y según el estudio a realizar podrán ser parámetros del modelo ó variables de control.
- Tiempo de apagado: Es el tiempo que debe transcurrir entre el encendido y el apagado del motor que acciona a la cinta correspondiente. Se define para cada cinta individualmente y según el estudio a realizar podrán ser parámetros del modelo ó variables de control.
- Estado de los sensores: Una variable binaria contiene valor 1 si los sensores leen la presencia de rollos y 0 en caso contrario.

## Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

La lógica de funcionamiento de las cintas se muestra en los diagramas a continuación.

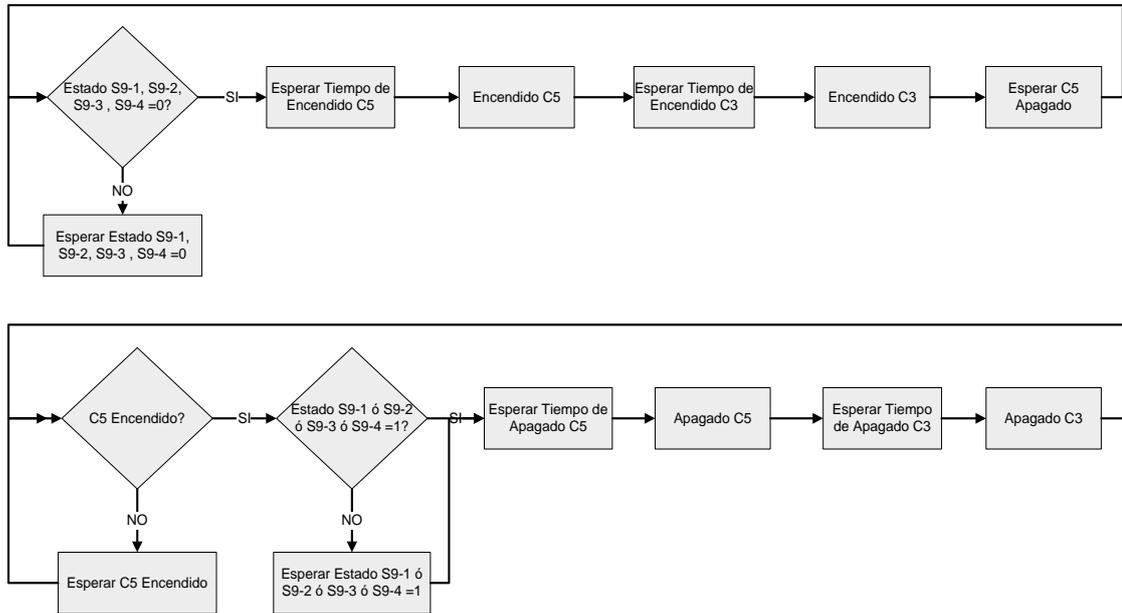


Figura III.4.18. Lógica de encendido y apagado de las cintas de transporte (Envolvedora 3)

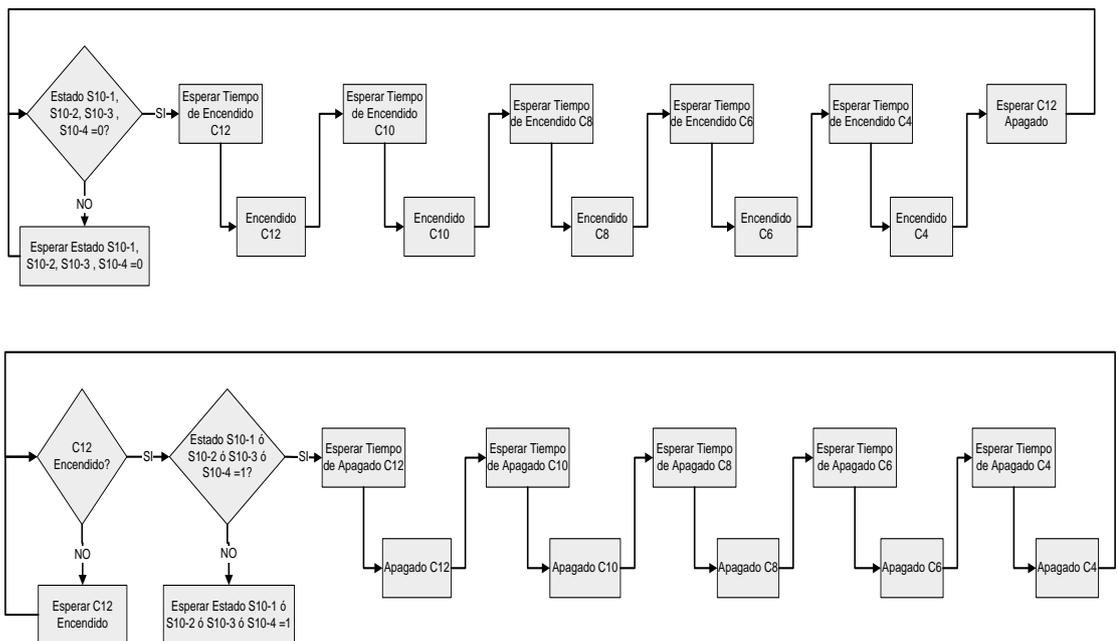


Figura III.4.19. Lógica de encendido y apagado de las cintas de transporte (Envolvedora 4)

### III.4.3.8.- Envolvedoras

#### III.4.3.8.1.- Descripción operacional

La línea Sincro 2 presenta dos envolvedoras de iguales características. Cada envolvedora presenta dos materiales de entrada, rollos de papel y film de polietileno. La función del equipo es transformar los materiales de entrada en paquetes de rollos con diferentes conteos. Según el conteo del paquete a conformar, la envolvedora retira un determinado número de rollos de las líneas

## **Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación**

de alimentación, los cuales avanzan a través de las secciones de la máquina adquiriendo la disposición final que tendrán en el paquete para luego ser envueltos con el film de polietileno. Por último se sellan térmicamente los extremos del paquete para obtener una unidad de producto terminado. La relación de transformación de materiales en paquetes está determinada por el conteo del producto que se está produciendo.

La máquina genera descarte operativo cada vez que tiene lugar un cambio de bobina de polietileno, un atasco en la alimentación de rollos o un problema con los sistemas de sellado del paquete. La cantidad descartada es variable y depende del producto que se está produciendo.

En cuanto a las variables de proceso, el equipo presenta un gran número de ajustes que permiten regular las características del paquete pero que no afectan la relación de transformación de entradas en salidas. Las únicas variables que afectan dicha relación son el conteo del paquete y la velocidad del equipo, que se mide en paquetes por minuto. El operador tiene la capacidad de ajustar la velocidad del proceso en función a la carga de la línea y a la distribución de cantidades producidas para cada conteo que busca obtener en los casos en que los productos que se están fabricando en cada envolvente son diferentes.

Como regla general, cuando los equipos de la línea no presentan problemas se utiliza la velocidad objetivo pero en el caso en que algún equipo presenta problemas se ajusta la velocidad para evitar sucesivos procesos de arranque y parada.

Las envolventoras presentan tres clases de interrupciones:

- Aleatorias: son aquellas que tienen una ocurrencia al azar, entre las que se encuentran las averías mecánicas y eléctricas, las paradas por regulación de parámetros de conformación del paquete ó las paradas debidas a rollos mal posicionados.
- Conocidas ó programadas: son aquellas que ocurren con certeza ya sea porque se pueden predecir o porque son programadas. Entre ellas se encuentran las paradas por limpieza y los cambios de bobina, de formato y de materiales consumibles como cuchillas de precorte.
- Por interacción con otros equipos: son las que ocurren debido a la lógica que relaciona la producción de paquetes con la disponibilidad de espacio en la cinta de salida ó de rollos en las cintas de entrada. Cuando el sensor ubicado en la cinta de salida lee la presencia de paquetes la envolvente se detiene. En el caso de la alimentación, el equipo detiene su marcha cuando el sensor más próximo a la entrada de la máquina no lee presencia de rollos en todos los canales.

### **III.4.3.8.2.- Supuestos**

En función a los objetivos del estudio se asumirán los siguientes supuestos:

## Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

- Se considera únicamente a los rollos de papel como insumo necesario para el proceso.
- No se considerarán las paradas por cambios de formato ya que los análisis se realizarán para la condición estable de configuraciones de dos productos (por ejemplo PH 30m Simple Hoja formatos x4 y x6)
- No se considera el descarte por operación del equipo ya que representa una proporción muy pequeña del volumen total producido (menor al 1/1000)

### III.4.3.8.3.- Modelización

La operación de las envolvedoras es controlada por tres líneas de sensores: sensores de entrada primarios (S11 y S12), sensores de entrada secundarios (S13 y S14) y sensores de salida (S15 y S16). La ubicación de los mismos se muestra en la figura a continuación.

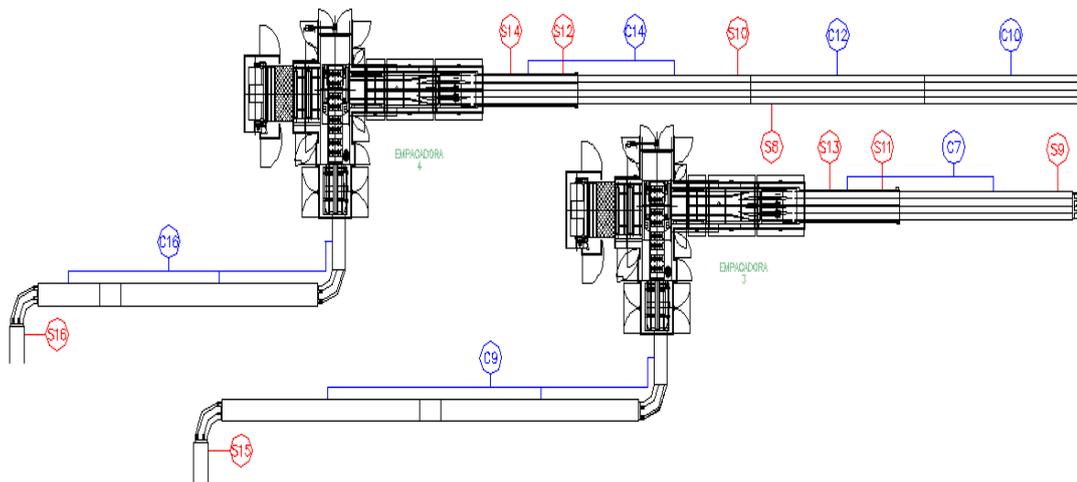


Figura III.4.20. Ubicación y nomenclatura de sensores y cintas de transporte (Envolvedoras)  
Las variables y parámetros considerados en este proceso se definen a continuación.

- Estado de los sensores primarios y secundarios: Se define un vector con cuatro componentes binarias para cada uno de los sensores. Las componentes tendrán valor 1 cuando el sensor lea la presencia de rollos en el canal correspondiente.
- Estado de los sensores de salida: Se define una variable binaria para cada uno de los sensores de salida, las cuales tendrán valor 1 cuando el sensor lea la presencia de paquetes en la cinta correspondiente.
- Velocidad máxima de operación: Es una variable de decisión del modelo que representa la velocidad de operación de la envolvedora cuando se cumple la condición de operación a máxima velocidad.
- Velocidad mínima de operación: Es una variable de decisión del modelo que representa la velocidad de operación de la envolvedora cuando se cumple la condición de operación a mínima velocidad.

## Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

- Averías: Las averías más relevantes tendrán su distribución de probabilidad para la frecuencia y para la duración.
- Posiciones erróneas de rollo: Se considerará una variable aleatoria para la frecuencia y otra para la duración de las interrupciones por rollos mal posicionados.
- Matrices de lanzamiento: son matrices compuestas por vectores binarios que muestran los canales que se activarán para realizar el lanzamiento de rollos en un determinado formato. Cada formato posee una secuencia de lanzamientos que está contenida en una matriz. El objetivo de la secuencia de lanzamientos es retirar rollos de canales de forma alternada a fin de mantenerlos balanceados.

Lanzamiento #	Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 4
1	1	1	1	0
2	1	0	1	1
3	1	1	0	1
4	0	1	1	1

Tabla III.4.1. Ejemplo de secuencia de lanzamiento para formatos x6

El funcionamiento de las envolvedoras está regulado por dos lógicas, la de producción y la de control de velocidad.

La lógica de control de velocidad regula la marcha del equipo en tres niveles, velocidad máxima, velocidad mínima y parada. El nivel se define mediante las lecturas de los sensores primarios y secundarios. Los criterios para definir la velocidad se muestran en el cuadro a continuación.

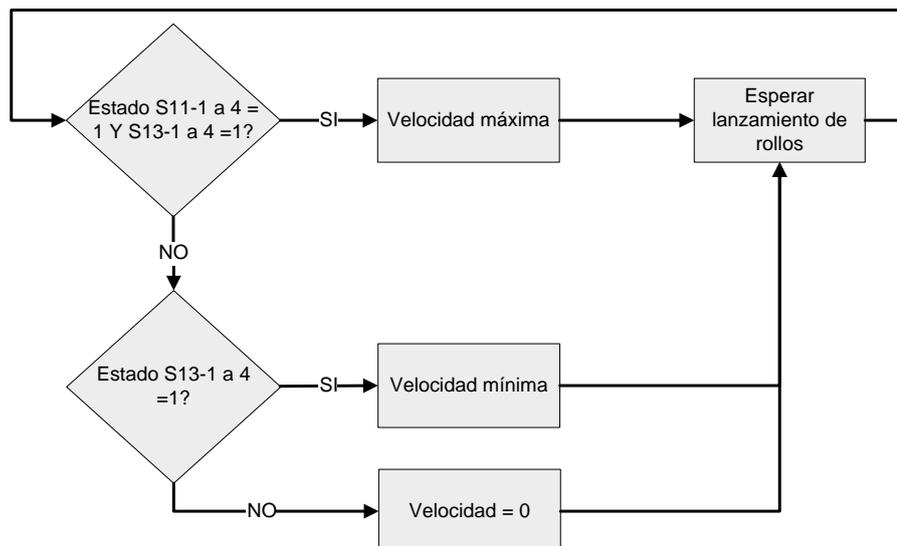


Figura III.4.21. Lógica de control de velocidad para la envolvedora 3

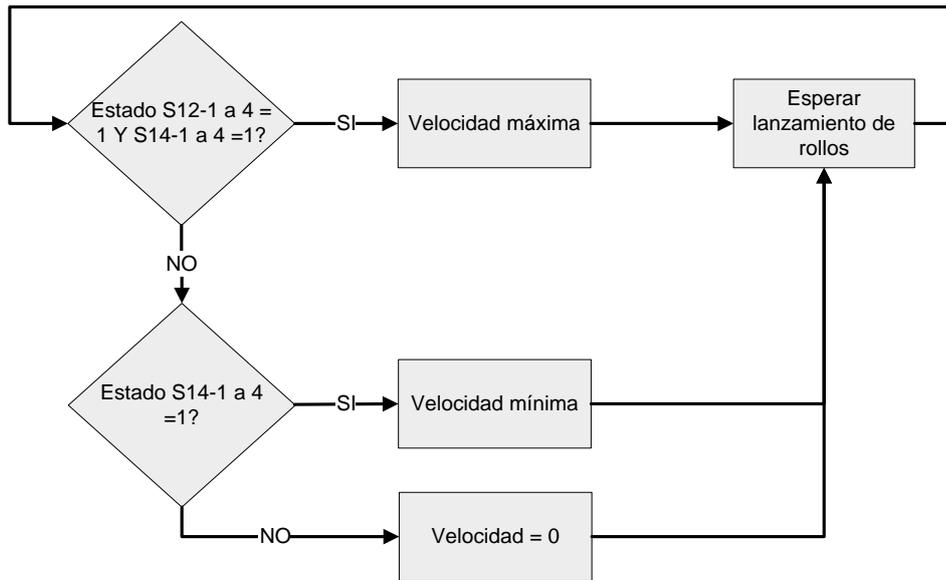


Figura III.4.22. Lógica de control de velocidad para la envolvedora 4

La lógica de producción combina dos partes, una que regula el ingreso de rollos a la máquina y otra que controla la producción de paquetes. La parte relativa a la alimentación define la combinación de canales que abastecerán a la envolvedora en cada lanzamiento. Según el formato que se está produciendo, existe una lógica de alimentación definida en una matriz. Por medio de una variable del sistema se registra el conteo de lanzamientos realizados para poder identificar la fila de la matriz que corresponde al próximo lanzamiento. La segunda parte verifica dos condiciones, que la cinta de salida tenga espacio suficiente, es decir que el sensor S15 ó S16 (según la envolvedora) no lea presencia de paquetes y que la bolsonera no se encuentre en estado de falla. Si se verifican ambas condiciones la envolvedora produce un rollo a la velocidad que define la lógica de control de velocidad.

### **III.4.3.9.- Bolsoneras**

#### **III.4.3.9.1.- Descripción operacional**

La bolsonera presenta dos materiales de entrada los paquetes y la lámina de polietileno. La función del equipo es transformar los materiales de entrada en una unidad denominada bolsón que contiene 24 rollos de cocina ó 48 de papel higiénico, contenidos, en ambos casos, en los conteos que provienen de las envolvedoras.

El proceso de conformación de bolsones se puede dividir en tres secciones, el desviador de paquetes, el CPTV y la bolsonera. La primera parte tiene como función disponer los paquetes que llegan desde la envolvedora en filas que luego serán verticalizadas en el CPTV. Esta segunda sección cumple además la función de agrupar una determinada cantidad de filas de paquetes (según el conteo de los paquetes) para luego alimentar a la bolsonera. En esta última etapa los paquetes se agrupan en bultos de 48 rollos de higiénico o 24 rollos de cocina para luego ser envueltos por una lámina secundaria de polietileno, la

## Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

cual es sellada térmicamente para conformar los bolsones. El proceso presenta un pequeño descarte siempre que un bolsón se traba en la alimentación de la última sección.

Los procesos de las tres secciones están controlados por lógicas que dependen de los sensores que se muestran en el esquema a continuación.

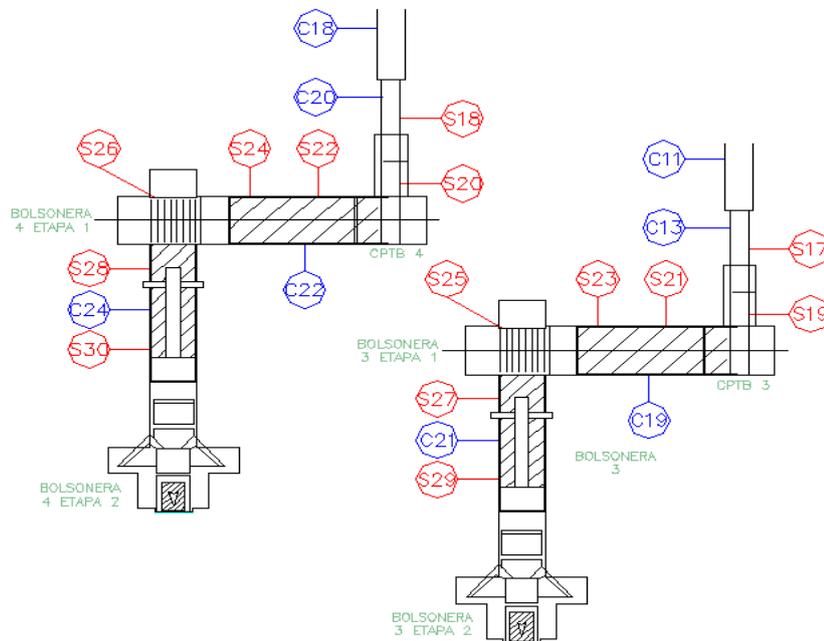


Figura III.4.23. Ubicación y nomenclatura de sensores y cintas de transporte (Bolsoneras)

En cuanto a las variables de proceso, el equipo presenta un gran número de ajustes que permiten regular las características del bolsón pero que no afectan la relación de transformación de entradas en salidas. La velocidad de transformación de paquetes en bolsones es fija y no puede ser ajustada por el operador.

El proceso de conformación de bolsones presenta tres clases de interrupciones:

- Aleatorias: son aquellas que tienen una ocurrencia al azar, entre las que se encuentran las averías mecánicas y eléctricas.
- Conocidas ó programadas: son aquellas que ocurren con certeza ya sea porque se pueden predecir o porque son programadas. Entre ellas se encuentran las paradas por limpieza y los cambios de bobina, de formato y de materiales consumibles como las mordazas de sellado.
- Por interacción con otros equipos: son las que ocurren debido a la lógica que relaciona la producción de bolsones con la disponibilidad de paquetes provenientes de la envolvedora.

### III.4.3.9.2.- Supuestos

En función a los objetivos del estudio se considerarán los siguientes supuestos:

- No se considerará el consumo de lámina de polietileno ni el descarte operativo del proceso.

## **Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación**

- No se incluirán las paradas por cambios de formato ya que los análisis se realizarán para la condición estable de configuraciones de dos productos (por ejemplo PH 30m Simple Hoja formatos x4 y x6)

### **III.4.3.9.3.- Modelización**

Para la modelización del proceso de conformación de bolsones se considerarán las siguientes variables y parámetros:

- Averías: Las averías más relevantes tendrán su distribución de probabilidad para la frecuencia y para la duración.
- Velocidad de la bolsонера: Es un parámetro del modelo que no puede ser modificado.
- Velocidad de las cintas de entrada, CPTV y bolsонера: Según el objetivo del análisis pueden ser consideradas parámetros ó variables de control.
- Posición de los sensores S17 a S30: Definen la cantidad de paquetes que se almacenan en cada sección y las cantidades mínimas de paquetes necesarios para activar los procesos de cada sección.

Cada sección del proceso de conformación de bolsones presenta una lógica de control que regula el funcionamiento de los equipos.

La lógica de la sección del desviador de paquetes involucra los sensores S18, S20 y S22 (ó S17, S19 y S21). En todos los casos, los sensores toman valor 1 cuando leen la presencia de paquetes. Cuando los sensores S18, S20 presentan valor 1 y el sensor S22 valor 0 se habilita el pasaje de paquetes a través del desviador. En este proceso se acciona un freno que evita que los paquetes que se encuentran por detrás del sensor S18 ingresen al desviador. Dicho freno se libera cuando el sensor S20 deja de leer paquetes, es decir cuando el último paquete de la descarga ya ingresó al desviador. En ese instante se cierra el pasaje de paquetes reteniendo aquellos que avanzan luego de ser liberado el freno. Los paquetes que ingresaron al desviador son arrastrados por un conjunto de paletas a la sección de ingreso al CPTV.

## Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

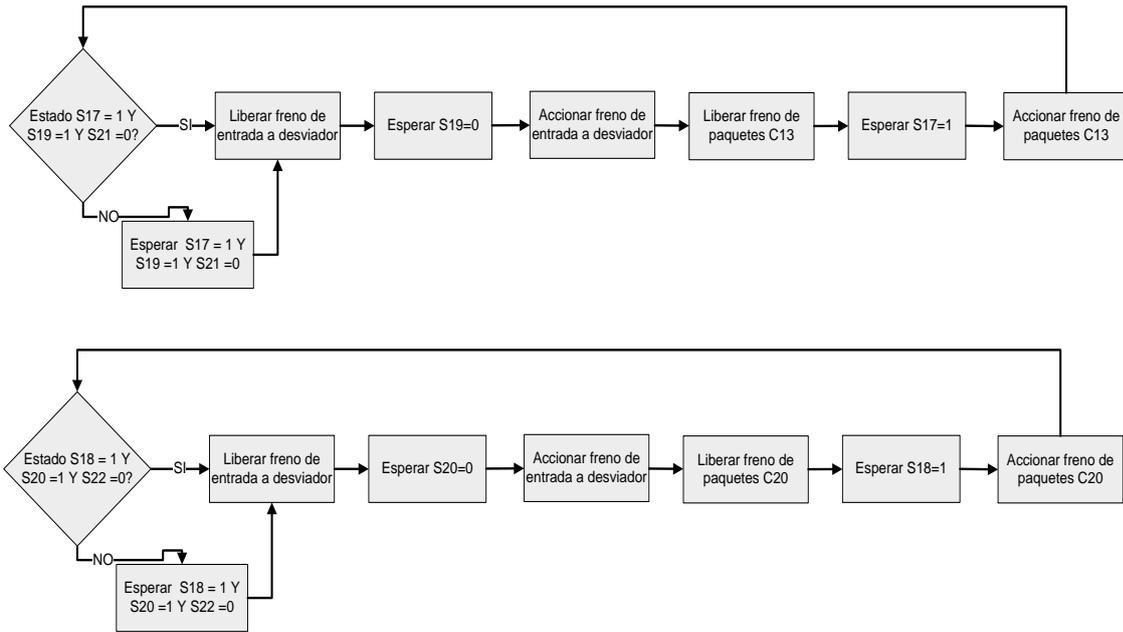


Figura III.4.24. Lógica de carga del desviador de paquetes

Una vez el en CPTV las filas de paquetes se acumulan en la cinta de ingreso en espera de ingresar al verticalizador. La operación del CPTV es comandada por tres sensores S24, S26 y S28 (ó S23, S25 y S27 en el caso de la bolsонера 3). En los tres casos los sensores indican valor 1 cuando están leyendo la presencia de paquetes. El sensor S24 habilita la carga de paquetes al verticalizador. El sensor S26 indica que se han cargado suficientes filas de paquetes y acciona un rastrillo que las retira del verticalizador, empujándolas hacia la sección de conformación del paquete. Esto ocurre únicamente si el sensor S28 no está leyendo la presencia de paquetes, es decir si hay espacio disponible en la cinta de entrada a la sección de conformación del bolsón.

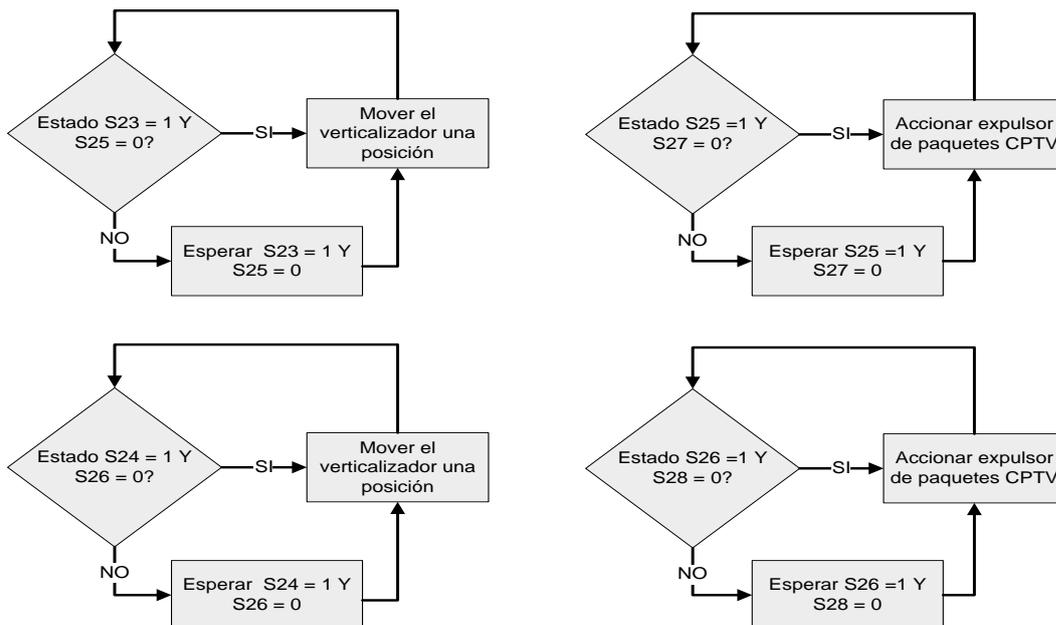


Figura III.4.25. Lógica de carga del CPTV (Bolsoner 3 y 4)

## Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

Por último, el sensor S30 (ó S29 en la bolsonera 3) habilita la carga de paquetes para confeccionar un bolsón.

### III.4.3.10.- Esquema integrado de procesos y lógicas

El esquema de operación de la línea se resume en el siguiente diagrama.

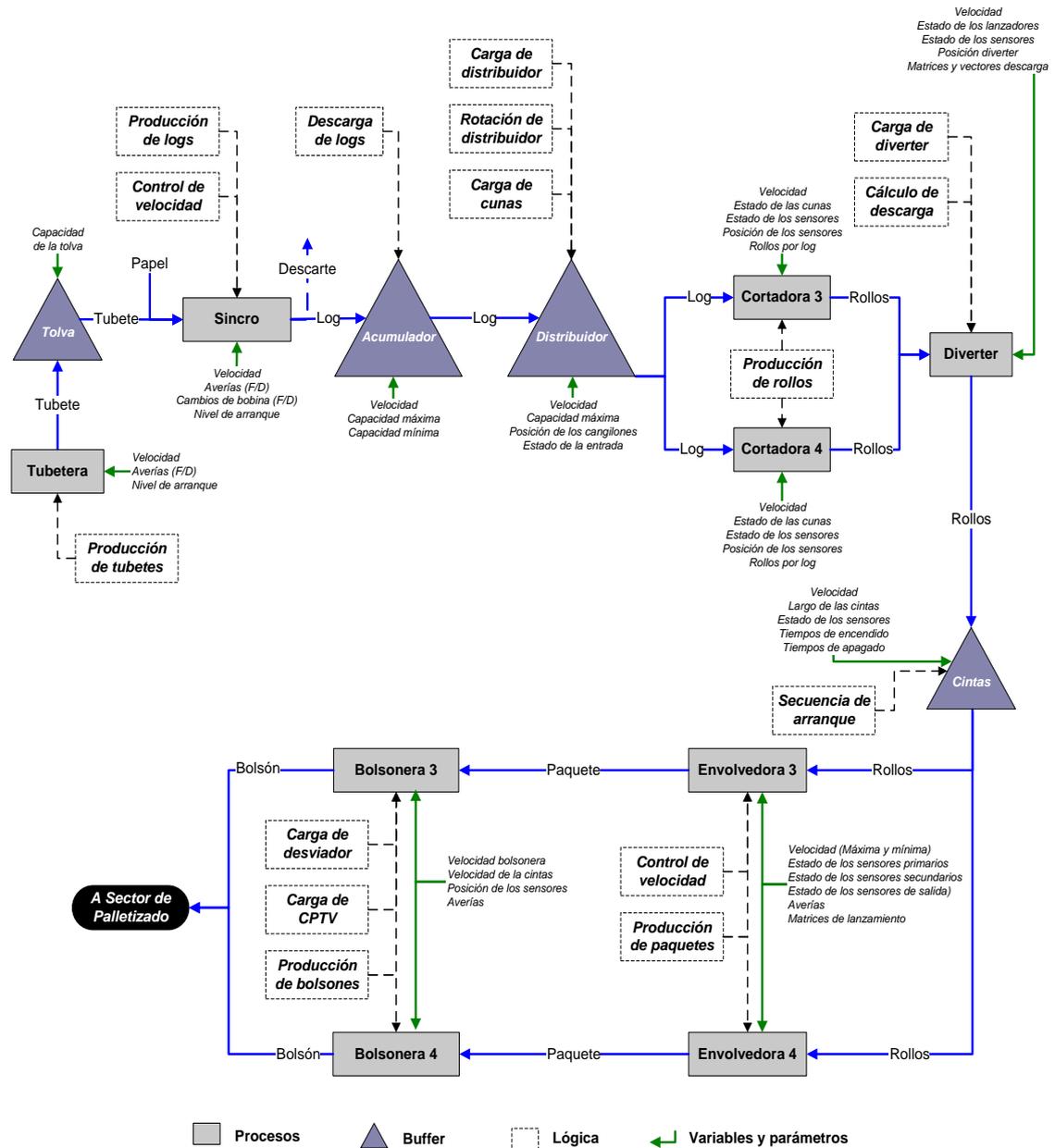


Figura III.4.26. Esquema integrado de procesos y lógicas.

### III.4.4.- Definición de entidades, actividades y recursos

En el modelo de simulación coexistirán entidades lógicas y entidades físicas. Las mencionadas en primer lugar son aquellas que activarán las secuencias lógicas que controlan el funcionamiento y la interacción de los equipos que componen la línea. En ciertos casos podrán tener atributos lógicos ó que cumplen la función de acumular ó contar. Las entidades físicas serán aquellas que representen a los tubetes, logs, rollos paquetes y bolsones que transiten el modelo. Tendrán un atributo que define la imagen que cada una mostrará en la

## **Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación**

animación así como también atributos lógicos que sirvan para direccionarlas a través de los diferentes procesos.

Para cada proceso se modelizará la actividad de transformación descrita en párrafos anteriores la cual tendrá asociado un recurso. Este último tendrá cargadas las fallas y averías correspondientes que afectarán su disponibilidad y por consiguiente la del proceso al que pertenecen.

### **III.5.- MODELO DE DATOS**

El desarrollo del modelo de datos se estructura en dos partes, que contienen respectivamente la cuantificación de los parámetros y las variables definidas en el modelo conceptual. Cada parte describe el proceso utilizado para definir los valores ó distribuciones necesarios en cada equipo de la línea sincro 2.

#### **III.5.1.- Parámetros**

El modelo de simulación presenta unos 160 parámetros asociados a cintas de transporte, sensores, velocidades de máquina y capacidades de buffers. Según la configuración del modelo y el objetivo del análisis a realizar algunos de los parámetros pueden transformarse en variables de control, como por ejemplo la posición de los sensores.

Los valores para los parámetros del modelo se obtuvieron mediante la medición y observación del sistema real. A continuación se presentan los resultados obtenidos.

##### **III.5.1.1.- Buffers**

El sistema presenta tres buffers, la tolva de tubetes, el acumulador y el distribuidor, cuyas capacidades mínimas y máximas son parámetros del modelo.

	<b>Capacidad</b>	
	<b>Mínima</b>	<b>Máxima</b>
<b>Tolva tubetera</b>	0	450
<b>Acumulador</b>	60	274
<b>Distribuidor</b>	0	38

Tabla III.5.1. Valores de los parámetros de los buffers

##### **III.5.1.2.- Cintas de transporte**

Las cintas de transporte incluidas en el modelo presentan tres parámetros, la longitud, la velocidad lineal de movimiento y el comportamiento respecto a los rollos. En este sentido, aquellas en las que los rollos o paquetes transportados se pueden desplazar sobre la cinta cuando esta no se encuentra en movimiento deben ser configuradas para permitir acumulación de entidades en ARENA.

Los valores para cada cinta se presentan en la tabla a continuación. Las longitudes han sido referidas en base a la longitud de la cinta C9, por razones de confidencialidad.

## Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

	Longitud (base C9)	Velocidad (cm/seg)	¿Permite acumulación?
<b>C1</b>	93,8	79	SI
<b>C2</b>	79,1	81	SI
<b>C3</b>	26,6	80	SI
<b>C4</b>	31,5	80	SI
<b>C5</b>	41,4	87	SI
<b>C6</b>	20,2	88	SI
<b>C7</b>	62,1	87	SI
<b>C8</b>	41,9	87	SI
<b>C9</b>	100,0	87	SI
<b>C10</b>	35,0	87	SI
<b>C11</b>	12,8	72	SI
<b>C12</b>	34,5	100	SI
<b>C13</b>	14,3	123	SI
<b>C14</b>	62,1	87	SI
<b>C16</b>	72,9	88	SI
<b>C18</b>	12,8	72	SI
<b>C19</b>	9,9	87	SI
<b>C20</b>	14,3	120	SI
<b>C21</b>	9,9	87	SI
<b>C22</b>	13,3	95	SI
<b>C24</b>	13,8	79	SI
<b>Carga de cortadora 3</b>	24,1	25	NO
<b>Carga de cortadora 4</b>	24,1	25	NO
<b>Diverter</b>	13,8	87	NO
<b>Envolvedora 3</b>	11,8	92	NO
<b>Envolvedora 4</b>	11,8	92	NO
<b>Bolsonera 3</b>	17,2	87	NO
<b>Bolsonera 4</b>	17,2	87	NO

Tabla III.5.2 Valores de los parámetros de las cintas de transporte

En cuanto a los motores que accionan las cintas, presentan cómo parámetro los tiempos de encendido y apagado de la lógica que controla su accionamiento, así como también el tiempo entre muestreos del sensor que activa la secuencia de encendido. Los valores para cada caso se muestran a continuación.

## Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

	Tiempo (seg)		
	Encendido	Apagado	Entre muestreos
<b>C3</b>	2	1	-
<b>C4</b>	1	1	-
<b>C5</b>	0,2	3	5
<b>C6</b>	1	1	-
<b>C8</b>	1	1	-
<b>C10</b>	1	1	5
<b>C12</b>	0,2	0	-

Tabla III.5.3. Parámetros de la secuencia de accionamiento de las cintas de transporte

### III.5.1.3.- Sensores

La ubicación de los sensores que se encuentran sobre las cintas de transporte de la línea Sincro 2 se referenció respecto al extremo por donde sale el producto transportado por cada cinta. La tabla siguiente muestra los valores de la distancia a dicho extremo para cada sensor.

	Posición (cm)		Posición (cm)
<b>S1</b>	1,65	<b>S16</b>	2,09
<b>S2</b>	1,31	<b>S17</b>	0,90
<b>S3</b>	10,00	<b>S18</b>	0,88
<b>S4</b>	3,39	<b>S19</b>	0,10
<b>S5</b>	0,40	<b>S20</b>	0,10
<b>S6</b>	0,40	<b>S21</b>	2,50
<b>S7</b>	0,20	<b>S22</b>	2,72
<b>S8</b>	0,20	<b>S23</b>	1,32
<b>S9</b>	12,05	<b>S24</b>	1,85
<b>S10</b>	12,10	<b>S25</b>	0,04
<b>S11</b>	4,97	<b>S26</b>	0,06
<b>S12</b>	4,98	<b>S27</b>	1,85
<b>S13</b>	3,21	<b>S28</b>	1,30
<b>S14</b>	2,97	<b>S29</b>	1,44
<b>S15</b>	2,23	<b>S30</b>	1,18

Tabla III.5.4. Valores de los parámetros de ubicación de los sensores

### III.5.1.4.- Velocidad de los equipos

La velocidad de operación de los procesos incluidos en el modelo se asumió constante en todos los casos excepto en la rebobinadora, dónde la velocidad real presenta mayores variaciones. Los valores considerados para cada equipo correspondientes a los productos bajo estudio se resumen en la siguiente tabla.

## Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

	Unidades	PH 30m Simple Hoja	PH 30m Doble Hoja	PH 90m Simple Hoja
<b>Tubetera</b>	tubetes/min	15	15	8
<b>Acumulador</b>	movimientos/seg	2	2	2
<b>Distribuidor</b>	movimientos/seg	2	2	2
<b>Cortadora 3</b>	golpes/min	120	110	80
<b>Cortadora 4</b>	golpes/min	120	110	80
<b>Envolvedora 3 (mín.)</b>	golpes/min	Depende del formato simulado		
<b>Envolvedora 3 (máx.)</b>	golpes/min			
<b>Envolvedora 4 (mín.)</b>	golpes/min			
<b>Envolvedora 4 (máx.)</b>	golpes/min			
<b>Bolsonera 3</b>	bolsones/min	6	6	6
<b>Bolsonera 4</b>	bolsones/min	6	6	6

Tabla III.5.5. Velocidades de operación para los equipos de la línea Sincro 2

### III.5.1.5.- Características de los productos simulados

Las características de cada producto determinan las relaciones de transformación en el modelo. En cada escenario simulado se ingresarán los conteos a simular para cada familia, el metraje del log, la cantidad de rollos obtenidos de cada log y el número de paquetes que conforman un bolsón.

### III.5.1.6.- Cálculo de la descarga del diverter

Las matrices y vectores que transforman la lectura de los sensores en indicaciones para el movimiento y descarga de los lanzadores del diverter son parámetros del modelo. Los valores para cada caso se obtuvieron modelizando la lógica de decisión del diverter en Excel. Mediante este modelo se simularon todas las combinaciones posibles de lecturas de entrada, posición del diverter y lecturas de salida para generar los valores de las matrices y vectores de decisión.

		Modo de InFeed																																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	
Datos	v InFeed	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7	
	v PosDiverter	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5		
	v DiverterIN	4	21	22	20	4	4	4	1	6	17	4	12	14	9	2	7	18	12	15	15	10	3	8	19	15	5	16	11	5	5	5	5	20	24	23	
	Carril	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Carril	2	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Carril	3	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Carril	4	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Carril	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Carril	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Carril	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
Carril	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
Carril	1																																				
Carril	2																																				
Carril	3																																				
Carril	4																																				
Carril	5																																				
Carril	6																																				
Carril	7																																				
Carril	8																																				
Próximo v OutFeed	4	0	0	0	4	4	4	0	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	6	6	6	6	6	6	6	5	5	5	5	5	5	5	5	0	0		
Descarga InFeed	3	0	0	0	3	3	3	1	2	2	2	3	3	3	2	2	2	2	3	3	3	1	2	2	2	3	3	3	2	2	2	2	0	0	0		

Figura III.5.1. Modelo de la lógica del diverter en Excel (Parte 1)

## Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

Modo de InFeed Actual		35	
Modo de OutFeed		175	
		<b>Modo de InFeed</b>	
		1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35	
Cálculo de Descargas	t <sub>InFeed</sub> (v <sub>InFeed</sub> )	7 7 7 7	
	v <sub>PosDiverter</sub>	1 2 3 4	
	v <sub>DiverterIN</sub>	4 9 10 11 23	
	Carril	1	1 0 0 0
		2	1 1 0 0
		3	0 1 0 0
		4	0 1 1 0
		5	0 0 1 0
6		0 0 1 1	
7		0 0 0 1	
8		0 0 0 1	
t <sub>OutFeed</sub> (v <sub>OutFeed</sub> )	## ## ## ## ##		
Carril	1	1 1 1 1	
	2	1 1 1 1	
	3	1 1 1 1	
	4	1 1 1 1	
	5	1 1 1 1	
	6	1 1 1 1	
	7	1 1 1 1	
	8	1 1 1 1	
<b>DiverterIN x OutFeed</b>			
Carril	1	1 0 0 0	
	2	1 1 0 0	
	3	0 1 0 0	
	4	0 1 1 0	
	5	0 0 1 0	
	6	0 0 1 1	
	7	0 0 0 1	
	8	0 0 0 1	
<b>Descarga</b>			
Carril	1	1 0 0 0	
	2	1 0 0 0	
	3	0 1 0 0	
	4	0 1 0 0	
	5	0 0 1 0	
	6	0 0 1 0	
	7	0 0 0 1	
	8	0 0 0 1	
Descarga	2 2 2 2 0		
# Movimientos Diverter	-4 -3 -2 -1 0		
↓			
Optimizador	Máxima Descarga	2	
	Modo Posible	X X X X	
	# Movimientos Diverter	4 3 2 1	
	Mínimo # Movimientos	1	
Resultados	Modo Posible	1	
	Movimiento Diverter	-1	
Descarga InFeed	3		
Contador Descarga	1		
Próximo v <sub>OutFeed</sub>	5		

Figura III.5.2. Modelo de la lógica del diverter en Excel (Parte 2)

### **III.5.2.- Variables**

El modelo planteado presenta dos clases de variables, internas (ó de la lógica del modelo) que son las que se utilizan para reflejar el estado del sistema en un instante determinado y variables del proceso que son las que definen el comportamiento de los equipos modelizados. Algunos ejemplos de las más de 90 variables internas del modelo son la cantidad de logs en el acumulador ó el número de rollos presente en una determinada cinta.

En cuanto a las variables de proceso, la determinación de la estructura utilizada para modelizarlas siguió en todos los casos el mismo procedimiento. En primer lugar se estudió el comportamiento de la variable a modelizar a fin de conocer sus características e interacción con otras variables. En esta etapa se observó el sistema y se relevaron las experiencias y comentarios de operadores de línea, personal de mantenimiento e ingenieros de proceso. Utilizando esta información, se definieron los datos a recolectar y la forma en que se realizaría la captura de datos.

A partir de los datos recolectados se realizaron análisis gráficos y estadísticos. La herramienta utilizada en cada caso se eligió teniendo en cuenta si los datos presentaban evolución temporal, un comportamiento aleatorio y la existencia de correlaciones con otras variables.

Las variables que se describen en los siguientes incisos fueron analizadas realizando histogramas de frecuencias para luego seleccionar la distribución de probabilidad que presentaba mejora ajuste a los datos y a las características del proceso bajo estudio. El estudio gráfico y el cálculo de la bondad de ajuste se realizó utilizando la herramienta Input Analyzer de ARENA.

#### **III.5.2.1.- Cambios de bobina en la rebobinadora**

La frecuencia del proceso de cambio de bobina depende de dos factores, la cantidad de metros de papel almacenados en la bobina y la velocidad de operación de la rebobinadora. Esta última es una consecuencia del desarrollo de cada corrida de simulación por lo que el dato de entrada a modelizar es el metraje de cada tipo de bobina. Se analizó la existencia de correlación entre el metraje y el tipo de papel, sin encontrarse relación entre las variables. Se decidió entonces utilizar una única distribución para los metros contenidos en una bobina. La información se obtuvo del registro de producción de la rebobinadora a partir de la cantidad de logs producidos para cada bobina cargada y los metros de cada log, en un período de seis meses.

Los datos muestran que es posible modelizar la cantidad de metros en una bobina utilizando una distribución normal de media 50.600 metros y desvío estándar 4.330 metros.

## Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

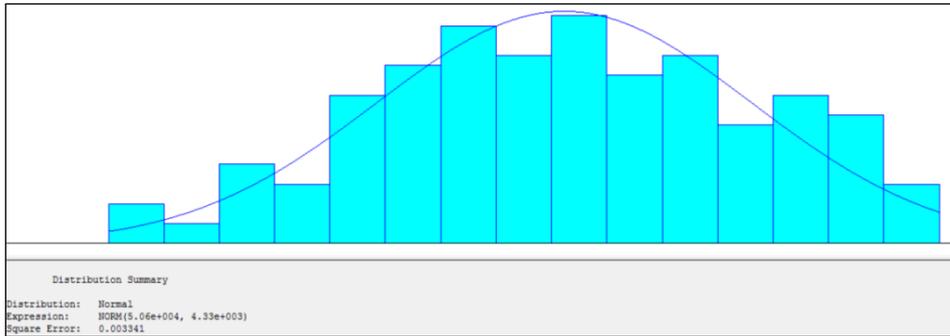


Figura III.5.3. Distribución del metraje de las bobinas

En cuanto a la duración de los cambios de bobina, se analizó la posible relación informada por los operadores sobre un mayor tiempo de cambio cuando los productos son de dos hojas. El análisis de correlación no verificó este supuesto. La duración de los cambios se asumió entonces idénticamente distribuida para todos los productos. La distribución utilizada para modelar el tiempo requerido es la distribución triangular de valor mínimo 6,5 minutos, moda 10 minutos y valor máximo 12,5 minutos.

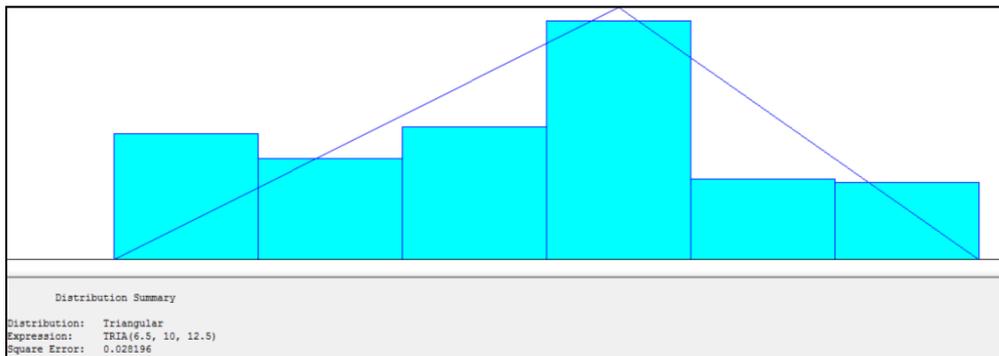


Figura III.5.4. Distribución del tiempo requerido para cambiar una bobina de papel

### III.5.2.2.- Velocidad de la rebobinadora

La velocidad de la rebobinadora se analizó utilizando la información disponible en el registro de producción de la máquina. Los operadores e ingenieros de proceso sugirieron que la velocidad de rebobinado dependía del tipo de papel que se estuviera produciendo, hecho que se pudo constatar mediante la observación del sistema en operación. Se decidió entonces utilizar una distribución para cada tipo de papel a simular.

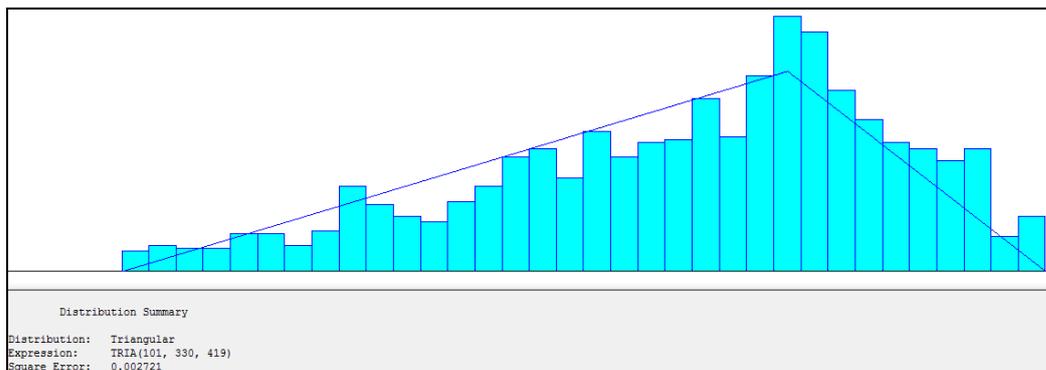


Figura III.5.5. Distribución de velocidades de rebobinadora para PH 30m Simple Hoja

## Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

En los tres casos, PH 30m Simple Hoja, PH 16gsm (MD) y PH 16gsm (Mega) la distribución que surgió del análisis fue la triangular, con parámetros diferentes para cada caso.

	PH 30m Simple Hoja	PH 16gsm (MD)	PH 16gsm (Mega)
<b>Distribución</b>	Triangular	Triangular	Triangular
<b>Parámetro/s</b>	Min: 101 m/min Moda: 330 m/min Max: 419 m/min	Min: 110 m/min Moda: 256 m/min Max: 321 m/min	Min: 246 m/min Moda: 389 m/min Max: 462 m/min

Tabla III.5.6. Distribuciones de velocidad de rebobinado por producto

### III.5.2.3.- Problemas de papel

Según la información suministrada por operadores e ingenieros de proceso, la frecuencia de aparición de problemas de papel es diferente para cada tipo de hoja base, presentando mayor número de fallas los papeles de menor gramaje. Para todas las clases de papel existe una determinada cantidad de bobinas que no presentan problemas mientras que para las restantes el número y tipo de problema puede variar. A partir de esta información se decidió modelizar al proceso de generación de fallas considerando para cada papel la proporción de bobinas con problemas, la frecuencia de aparición de fallas en bobinas con problemas y la proporción de tipos de falla posibles.

Los resultados obtenidos a partir de los datos recopilados del registro de producción de la rebobinadora se resumen en la siguiente tabla.

		PH 30m Simple Hoja	PH 16gsm
<b>Porcentaje de bobinas con problemas de papel</b>	Distribución	Discreta	Discreta
	Parámetro/s	75% con problemas	90% con problemas
<b>Frecuencia de aparición de problemas</b>	Distribución	Triangular	Exponencial
	Parámetro/s	Min: 1000 metros Moda: 6880 metros Max: 44.000 metros	Media: 18.000 metros
<b>Tipo de problema (corte marcado, corte sin marcar, perforación de hoja)</b>	Distribución	Discreta	Discreta
	Parámetro/s	74% cortes marcados 3% cortes sin marcar 23% perforación de hoja	71% cortes marcados 8% cortes sin marcar 21% perforación de hoja

Tabla III.5.7. Distribuciones asociadas a la aparición de problemas de papel

En cuanto a la duración, la información recolectada sugiere que el tiempo de resolución depende de la clase de problema y del tipo de papel que se está rebobinando. Analizando la información correspondiente a seis meses de registros de producción se determinó que las duraciones en todos los casos se podían ajustar a una distribución lognormal. Esta distribución de probabilidad tiene la característica de permitir únicamente valores mayores a cero y de tener un sesgo de posición variable según el valor de  $\sigma$ .

## Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

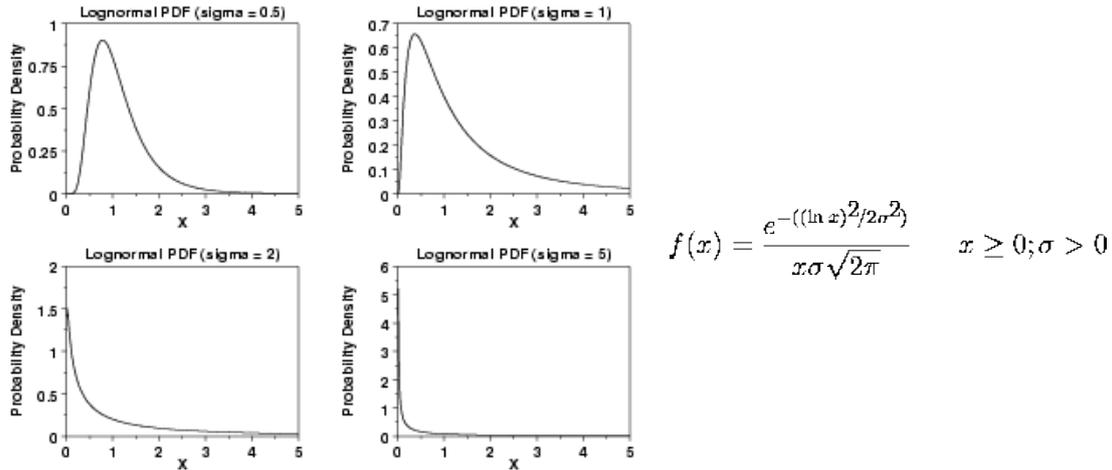


Figura III.5.6 Distribución lognormal

Las distribuciones y parámetros para los productos a simular se resumen en la siguiente tabla.

		PH 30m Simple Hoja	PH 16gsm
<b>Duración de paradas por cortes marcados</b>	Distribución	Lognormal	Lognormal
	Parámetro/s	Media: 10,5 minutos Desvío STD: 2,13 minutos	Media: 12,8 minutos Desvío STD: 3,13 minutos
<b>Duración de paradas por cortes sin marcar</b>	Distribución	Lognormal	Lognormal
	Parámetro/s	Media: 11,2 minutos Desvío STD: 3,21 minutos	Media: 13,2 minutos Desvío STD: 3,36 minutos
<b>Duración de paradas por perforación de hoja</b>	Distribución	Lognormal	Lognormal
	Parámetro/s	Media: 10,4 minutos Desvío STD: 2,06 minutos	Media: 12,1 minutos Desvío STD: 2,9 minutos

Tabla III.5.8. Distribuciones para las variables asociadas a los problemas de papel

### III.5.2.4.- Paradas en la rebobinadora

La rebobinadora presenta, además de las paradas por problemas de papel, interrupciones en la operación debido a averías ó regulaciones mecánicas y eléctricas y a problemas con los tubetes que ingresan a la transferencia.

Los tres tipos de falla mencionados ocurren según un proceso Poisson por lo que pueden ser modelizadas utilizando una distribución exponencial para los tiempos entre fallas.

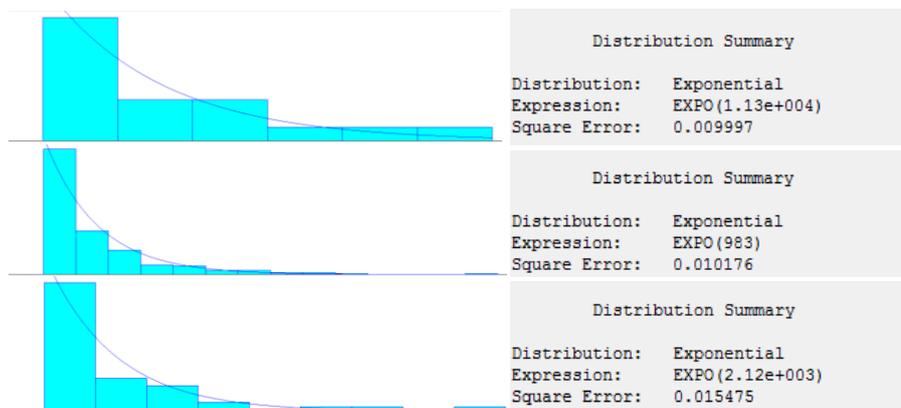


Figura III.5.7. Histogramas de frecuencias para problemas mecánicos, eléctricos y con tubetes

## Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

Los datos para obtener la frecuencia y duración de los problemas mecánicos, eléctricos y con tubetes se obtuvieron del registro de paradas de la rebobinadora. Las distribuciones utilizadas para modelizar cada tipo de paradas se muestran a continuación.

		Frecuencia	Duración
<b>Problemas mecánicos</b>	Distribución	Exponencial	Lognormal
	Parámetro/s	Media: 983 minutos	Media: 17,9 minutos Desvío STD: 11 minutos
<b>Problemas eléctricos</b>	Distribución	Exponencial	Uniforme
	Parámetro/s	Media: 11.300 minutos	Min: 14,5 minutos Max: 65,5 minutos
<b>Problemas con tubetes</b>	Distribución	Exponencial	Lognormal
	Parámetro/s	Media: 2.120 minutos	Media: 11,3 minutos Desvío STD: 3,9 minutos

Tabla III.5.9. Distribuciones para los problemas mecánicos, eléctricos y con tubetes

### III.5.2.5.- Paradas en las envolvedoras

En el caso de las envolvedoras se modelizaron las paradas por problemas en los lanzadores, por posición errónea de rolo y por averías mecánicas y eléctricas. Los datos fueron recolectados por espacio de un mes durante la definición del modelo de datos ya que no existían registros históricos para estos equipos. En base a las muestras realizadas se pudo establecer que las paradas por problemas en los lanzadores y rollos mal posicionados estaban presentes únicamente en las producciones de PH 30m Simple Hoja, mientras que los problemas mecánicos y eléctricos eran comunes a todos los productos. No se encontraron diferencias entre las envolvedoras 3 y 4 por lo que se asumieron las mismas distribuciones y parámetros en ambos casos.

		Frecuencia	Duración
<b>Control de lanzadores</b>	Distribución	Exponencial	Normal
	Parámetro/s	Media: 777 minutos	Media: 5,18 minutos Desvío STD: 0,83 minutos
<b>Posición errónea de rolo</b>	Distribución	Exponencial	Normal
	Parámetro/s	Media: 911 minutos	Media: 5,6 minutos Desvío STD: 1,91 minutos
<b>Problemas mecánicos y eléctricos</b>	Distribución	Exponencial	Exponencial
	Parámetro/s	Media: 209 minutos	Media: 21 minutos

Tabla III.5.10. Distribuciones para los problemas en envolvedoras

### III.5.2.6.- Paradas en las bolsoneras

Las bolsoneras son el equipo más estable de la línea. Presentan únicamente averías mecánicas y eléctricas que pueden modelizar mediante una única distribución cuyos parámetros se indican a continuación.

	Frecuencia	Duración
<b>Distribución</b>	Exponencial	Exponencial
<b>Parámetros</b>	Media: 602 minutos	Media: 19,4 minutos

Tabla III.5.11. Distribuciones de frecuencia y duración para fallas en bolsoneras

## **Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación**

Al igual que para las bolsoneras, los datos se recolectaron durante el armado del modelo de datos ya que no existían registros para estas máquinas. No se observan diferencias entre ambas bolsoneras por lo que se asumen las mismas distribuciones para ambos equipos.

### **III.5.3.- Variables de control**

Según el objetivo del ensayo que se quiera realizar, ciertas variables y parámetros definidos en las secciones precedentes podrán ser considerados variables de control y establecidos para configurar diferentes escenarios y alternativas. En el diseño experimental de cada prueba que se realice ensayo se especificarán las variables de control a considerar.

### **III.6.- MODELO EN ARENA**

En el esquema de estudio de simulación introducido en la sección II.4.- la obtención de un modelo computacional apropiado para experimentar comienza una vez terminado el modelo operacional, con la selección de un software de simulación. Una vez que se cuenta con el software, el hardware y el recurso humano capacitado se realiza la codificación del modelo, y la posterior verificación y validación del mismo. En las secciones siguientes se desarrolla el contenido correspondiente a los pasos antes mencionados.

#### **III.6.1.- Rockwell Software Arena**

Los estudios de simulación contienen una sección donde se realiza la evaluación y selección del software de simulación a utilizar. Esta etapa es la inmediata posterior al modelo operacional ya que en ese punto del estudio se conoce lo suficiente al sistema a modelar como para poder evaluar la conveniencia de un software específico o uno más general.

En el caso del presente estudio la selección del software no fue necesaria ya que la empresa donde se desarrolló el modelo contaba con dos licencias de ARENA.

ARENA es un software de simulación de eventos discretos propiedad de Rockwell Automation. Esta herramienta permite emular el comportamiento de sistemas reales en los que interactúan variables estocásticas a través del uso de variables aleatorias en un modelo lógico-matemático. El software genera muestras aleatorias de las variables y las utiliza en la generación de eventos que son gestionados mediante listas utilizando un lenguaje denominado SIMAN. De esta forma el tiempo se avanza de forma discreta, de evento en evento, permaneciendo constantes las variables de estado del sistema entre eventos.

La codificación de los modelos se realiza mediante una interfaz “Drag & Drop” que presenta un conjunto de solapas, cada una de las cuales agrupa bloques con diferentes funcionalidades.

## Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

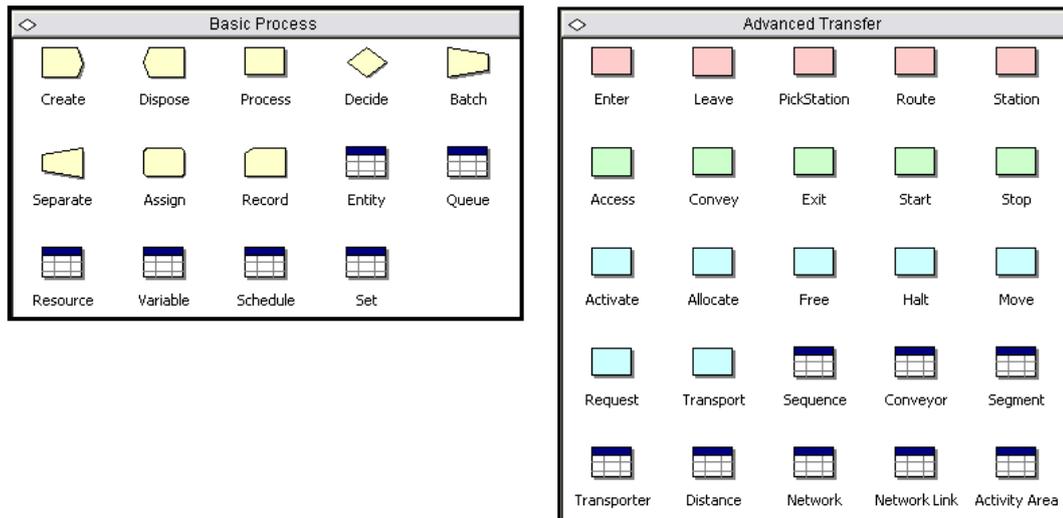


Figura III.6.1. Ejemplo de solapas de ARENA (Basic Process y Advanced Transfer)

El programador construye el modelo insertando bloques que representan la lógica y los procesos a simular. Cada bloque consiste en un conjunto de instrucciones en lenguaje SIMAN que permiten realizar una acción en particular cómo puede ser evaluar una condición o retener una entidad durante un tiempo predefinido. Luego, los bloques se unen entre sí mediante conectores por los que fluyen las entidades del modelo.

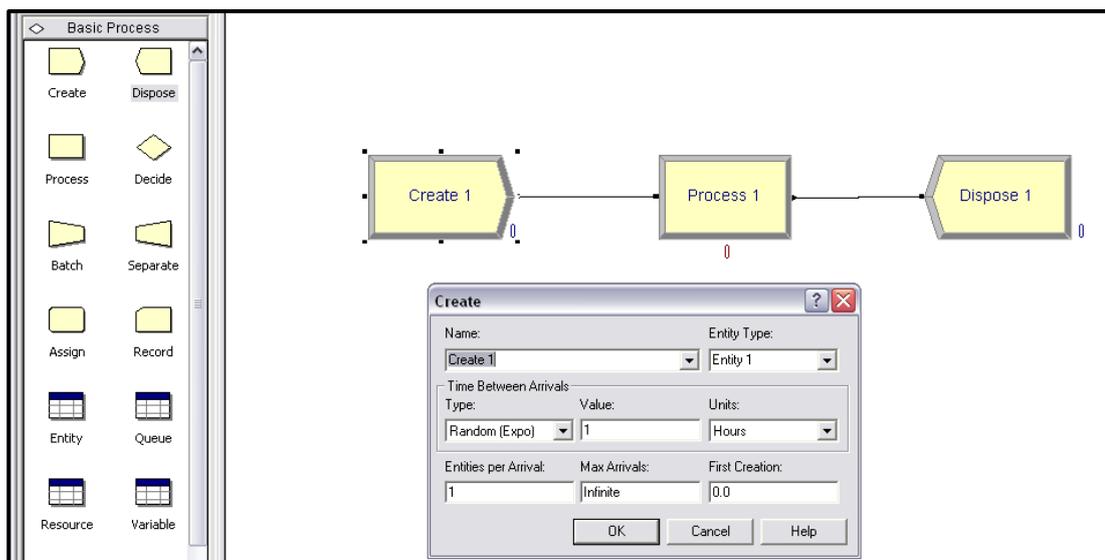


Figura III.6.2. Interfaz de construcción de modelos. Configuración de módulo *Create*.

ARENA es una plataforma muy flexible que permite modelizar un amplio rango de procesos, desde diagramas lógicos hasta procesos productivos donde se integran transformaciones finitas y operaciones continuas. Esto se debe a que los bloques con los que se construyen los modelos son lo suficientemente flexibles como para ser configurados para simular una amplia gama de acciones, y a que, en los casos donde es necesario una mayor customización, ARENA permite el uso de Visual Basic for Applications (VBA) para introducir códigos que modifiquen directamente variables en lenguaje SIMAN. Adicionalmente, es posible importar y exportar datos a Excel y Access, lo que

## Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

permite automatizar la carga de los modelos, diseñar interfaces de usuario en plataformas conocidas y disponer de todas las herramientas de tales plataformas para el análisis y difusión de resultados.

El paquete de ARENA incluye además algunos programas complementarios que permiten analizar datos y ajustar distribuciones de probabilidad (Input Analyzer), programar corridas de escenarios (Process Analyzer) y analizar las salidas generadas por un modelo (Output Analyzer)

El uso y las funciones disponibles de ARENA dependen de la licencia utilizada. Existen licencias comerciales para el desarrollo de modelos en empresas y académicas para realizar investigaciones y difusión del software en ámbitos universitarios.

### III.6.2.- Codificación del modelo

La codificación del modelo operacional en ARENA se realizó en etapas, con el fin de tomar porciones manejables en cuanto a la programación y verificación. Cada etapa se codificó y verificó de forma independiente, definiendo cuidadosamente las variables, parámetros, atributos y lógicas que la vinculan con las demás etapas fin de evitar conflictos al integrar todas las partes en un único modelo. Una vez integradas las partes se realizó la verificación final y validación del modelo, proceso que se detalla en las secciones II.4.7.- y II.4.8.-.

En cuanto al desarrollo de cada etapa, se codificó en primer lugar la lógica y los procesos de la misma para luego incluir animaciones en 2D realizadas sobre un plano de AutoCAD de la línea Sincro 2. Como resultado se obtuvo la animación que se muestra a continuación.

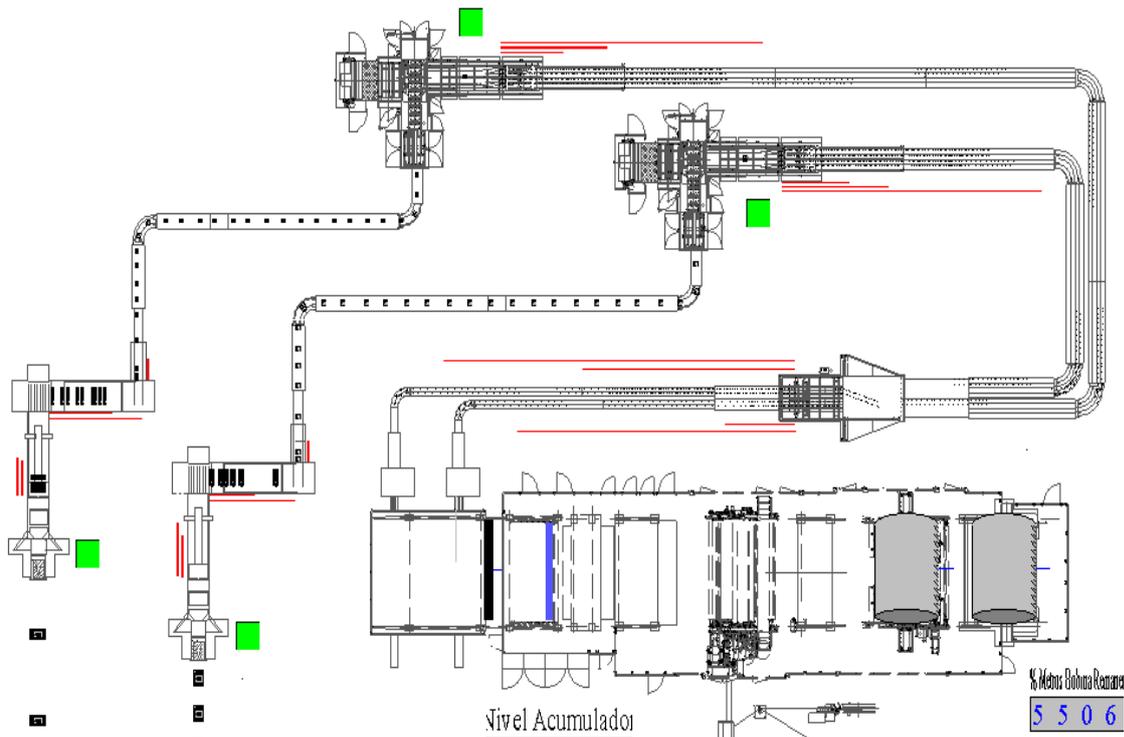


Figura III.6.3. Modelo de simulación en funcionamiento

## Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

### III.6.3.- Ensayos de verificación y validación

Al final de cada etapa de codificación se efectuó la verificación de la sección del modelo desarrollada. En todos los casos el proceso consistió en realizar corridas del modelo para constatar que las respuestas de las lógicas de control a los diferentes estados del sistema fueran correctas y que la secuencia de eventos se desarrollaba en la forma esperada. La herramienta *Run Control* de ARENA permitió monitorear los valores de variables y parámetros durante las corridas e incluir puntos de chequeo en la lógica durante la simulación para verificar condiciones.

Una vez terminada la verificación de todas las secciones se realizó la conexión de las mismas comenzando desde la sincro y avanzando en la dirección de movimiento del producto terminado. Cada vez que se anexaba una nueva sección al modelo se verificaba la interacción entre las partes y la nomenclatura de las variables, atributos y parámetros comunes a ambas. Con la conexión y verificación del módulo de bolsoneras se completó la verificación del modelo.

La validación se realizó utilizando tres técnicas diferentes. La primera consistió en cargar el modelo con datos de corridas de producción reales reproduciendo la secuencia de paradas de máquina y el estado inicial de la línea. Luego, se corrió el modelo obteniendo los datos de producción por turno y se los comparó con los registros de producción reales. Los resultados obtenidos se resumen en la tabla a continuación.

	PH 30m Simple Hoja			PH 30m Doble Hoja		
	Modelo	Real	Dif. %	Modelo	Real	Dif. %
Caso 1	100,0	107,4	6,9%	100,0	108,5	7,8%
Caso 2	101,2	105,4	4,0%	110,0	119,1	7,7%
Caso 3	100,9	107,8	6,4%	103,7	109,3	5,1%
Caso 4	103,0	101,9	-1,0%	110,7	101,3	-9,3%
Caso 5	97,7	95,6	-2,1%	106,7	101,9	-4,7%
Caso 6	91,5	97,2	5,8%	102,9	98,9	-4,1%
Caso 7	111,5	104,6	-6,5%	123,1	118,7	-3,7%
Caso 8	94,4	99,6	5,2%	125,3	114,7	-9,2%
Caso 9	99,5	105,2	5,5%	99,7	97,6	-2,2%
Caso 10	105,2	104,6	-0,5%	102,3	99,7	-2,5%
Caso 11	102,8	103,8	1,0%	114,4	105,3	-8,6%
Caso 12	99,1	97,5	-1,6%	90,8	100,4	9,6%
Caso 13	100,7	103,7	2,9%	119,9	109,6	-9,4%
Caso 14	104,4	106,0	1,5%	113,5	118,8	4,5%
Caso 15	96,4	91,8	-5,0%	93,3	103,2	9,5%
Caso 16	98,5	94,2	-4,6%	107,5	98,2	-9,6%
Caso 17	102,8	102,1	-0,7%	104,7	112,4	6,8%
Caso 18	104,1	100,1	-4,0%	99,1	107,2	7,6%
Caso 19	98,4	100,3	1,8%	109,0	109,8	0,8%
Caso 20	96,7	100,2	3,5%	106,9	97,9	-9,1%
<b>Media</b>	<b>100,4</b>	<b>101,5</b>	<b>0,9%</b>	<b>107,2</b>	<b>106,6</b>	<b>-0,7%</b>
<b>Desvío STD</b>	<b>4,3</b>	<b>4,5</b>	<b>4,1%</b>	<b>9,0</b>	<b>7,3</b>	<b>7,3%</b>

Tabla III.6.1. Resultados de la validación

## Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

Se puede observar que para los casos simulados las diferencias entre los valores reales y los obtenidos del modelo difieren en menos del 10% para ambos tipos de producto. Las diferencias obtenidas se pueden atribuir al hecho que no todos los parámetros y variables del modelo se prefijaron para coincidir con aquellos de la realidad. No obstante la coincidencia genera un buen indicador de validación del modelo.

La segunda técnica utilizada consistió en cargar el modelo con datos correspondientes a dos situaciones extremas. En primer lugar se simuló una parada prolongada de ambas envolventoras para poder validar el tiempo que tarda en parar la sincro luego de llenarse todos los buffers intermedios. Se obtuvieron tiempos cercanos al promedio registrado en el sistema de paradas de 22 minutos para PH 30m Simple Hoja y 30 minutos para el PH 30m Doble Hoja. En segundo lugar, se simuló la parada de una sola de las líneas de empaque para verificar el tiempo de parada de la sincro. En ambos productos el tiempo transcurrido hasta la parada de la rebobinadora se duplicó, como ocurre en el sistema real.

Por último se modificó un modelo para generar una interfaz de control que permita modificar variables durante la simulación. Utilizando este modelo con operadores y analistas de procesos se pudieron validar los comportamientos generales de la línea ante ciertos cambios introducidos durante la simulación.

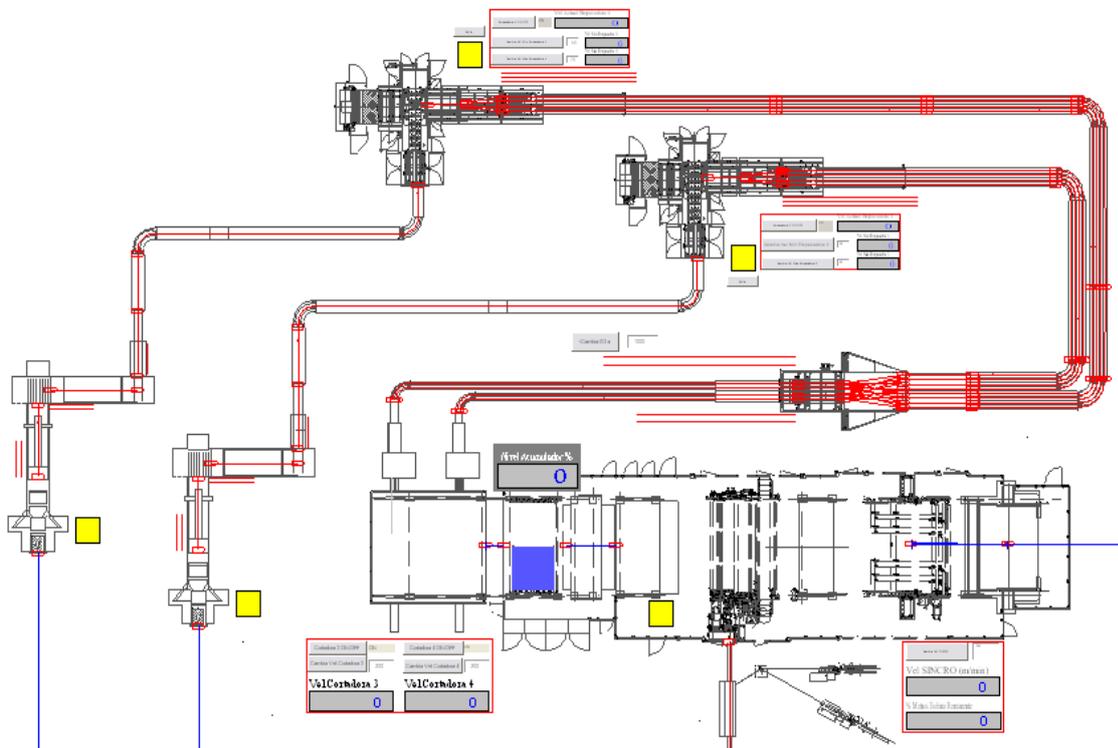


Figura III.6.4. Modelo con interfaz de usuario

Al finalizar las pruebas de validación se puede afirmar que el modelo representa fielmente el comportamiento del sistema real.

## **IV.- EXPERIMENTACIÓN Y CONCLUSIONES**

### **IV.1.-INTRODUCCIÓN**

En la sección I.4.- se introdujeron los objetivos principales del presente estudio.

- Determinar la estrategia de integración de línea que permita reducir las pérdidas de capacidad en el PH 30m Simple Hoja.
- Determinar la reducción en las pérdidas de capacidad por problemas de papel en productos de 16gsm que se obtendrían al estandarizar el procedimiento de ajuste de velocidad de línea.

Para alcanzar el primer objetivo se realizaron dos experimentos relacionados a la gestión de los buffers de la línea. En primer lugar se analizó el manejo del nivel de ocupación del acumulador a fin de determinar el setpoint que minimiza las interacciones entre la rebobinadora y el resto de la línea. Luego, sobre la base de los resultados obtenidos se determinó si la ampliación del pulmón entre las envolvedoras y las bolsoneras obtenido al relocalizar un sensor permite reducir la interacción entre estos equipos y aumentar la capacidad final de la línea. Para realizar ambos experimentos se modificó el modelo descrito en las secciones precedentes incluyendo una lógica de control de velocidad de la rebobinadora en función del nivel del acumulador.

Para evaluar el segundo objetivo se introdujo una lógica adicional para modelar el comportamiento de los operadores de la rebobinadora al ajustar la velocidad luego de sucederse repetidos problemas de papel. Esto permitió evaluar las oportunidades de incremento de capacidad al estandarizar el proceso de ajuste de velocidad en papeles higiénicos de 16gsm. Utilizando el modelo modificado se realizaron dos experimentos, uno para papeles de 30 metros doble hoja y otro para papeles de 90 metros simple hoja, ambos de 16gsm.

### **IV.2.-EXPERIMENTO 1: GESTIÓN DEL NIVEL DEL ACUMULADOR EN PH 30m SIMPLE HOJA**

En la formulación del problema se estableció que para papeles de 30 metros simple hoja la rebobinadora permanece detenida un 17% del tiempo debido a problemas en otros equipos, las envolvedoras un 13% del tiempo y las bolsoneras un 23%. Esto significa que si se eliminan las interacciones entre estos equipos (generando capacidad infinita de almacenamiento en los pulmones entre equipos) se podría incrementar la capacidad de la línea en un 13%.

En la línea Sincro 2 el mayor pulmón ó buffer es el acumulador, con capacidad para 274 logs.

## Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

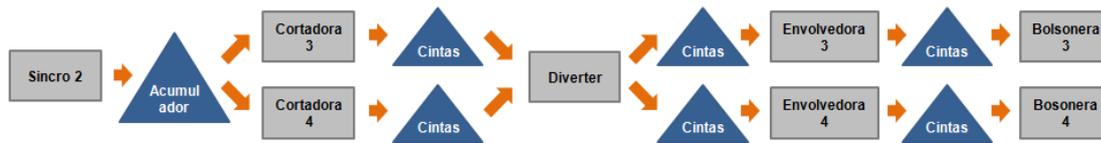


Figura IV.2.1. Esquema del proceso de producción

En operación normal, los operadores de la rebobinadora configuran al equipo para producir a la velocidad más cercana posible a la velocidad objetivo. Cuando el acumulador se llena debido a un desbalance en la demanda aguas abajo, la rebobinadora se detiene permitiendo reducir el número de logs almacenados. Para evitar repetidos procesos de arranque y parada en la rebobinadora que afectan su desempeño a mediano plazo, se debe poner en marcha el equipo solo cuando el nivel de logs en el acumulador haya descendido por debajo de un valor razonable.

Los operadores de envolvedoras por su parte, regulan la velocidad de las máquinas a fin de consumir la producción de la sincro y mantener el acumulador en un nivel intermedio. Si el acumulador se vacía se interrumpe la producción de las envolvedoras y bolsoneas.

En base a la observación del sistema realizada en las etapas de modelización y a una idea surgida en una reunión del equipo primario de trabajo se propone simular la operación de los equipos de la línea administrando la velocidad de la rebobinadora en función a un nivel objetivo en el acumulador. La información obtenida permitirá determinar la configuración de mejor desempeño.

### IV.2.1.1.- Lógica de control de velocidad en función al nivel del acumulador

En la operación actual, la rebobinadora se programa para funcionar a la máxima velocidad que permite el papel. El acumulador incrementa la cantidad de logs almacenados cuando se producen paradas de equipos aguas abajo y la reduce cuando se producen paradas en la rebobinadora. En los períodos en que la línea está en régimen su nivel permanece aproximadamente constante. Este sistema de operación genera que ante una sucesión de paradas de equipos aguas abajo, el acumulador se llene, provocando así la detención de la rebobinadora hasta alcanzar el nivel de arranque, para luego volver a operar a la máxima velocidad posible. La evolución del nivel del acumulador presenta una gráfica como la que se muestra a continuación.

## Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

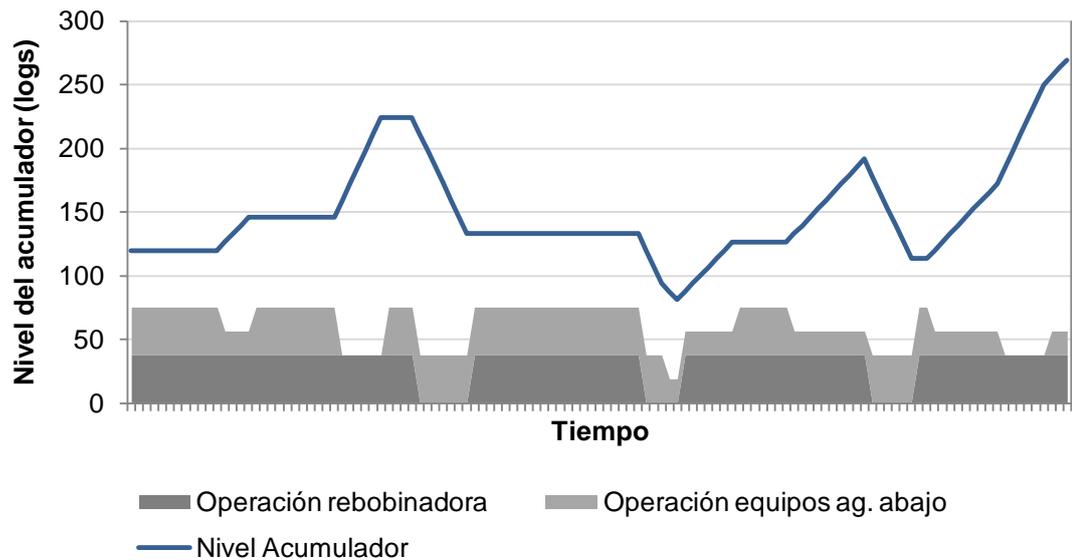


Figura IV.2.2. Ejemplo de evolución del nivel del acumulador

El ensayo propuesto supone cambiar la lógica de control de la velocidad de la rebobinadora. El nuevo modelo toma como referencia un nivel objetivo del acumulador, el cual se debe mantener cuando todos los equipos de la línea están operando. Mediante el ajuste de la velocidad de rebobinado cuando la línea está en régimen es posible vaciar gradualmente el acumulador hasta recuperar su nivel objetivo permitiendo así absorber nuevamente paradas de equipos aguas abajo, sin tener la necesidad de parar la rebobinadora. Cuando algún equipo entra en falla la rebobinadora mantiene la velocidad de operación hasta llenar el acumulador, si fuera necesario.

El control de la velocidad se realiza mediante una lógica similar a la de un controlador PID. En forma discreta, a intervalos de tiempo regulares se muestrea el nivel del acumulador y se lo compara con el nivel objetivo para generar una señal de error. En simultáneo se evalúa la velocidad de variación del error respecto al último muestreo y se acumula el error total muestreado desde el tiempo 0. Con estos tres valores se utiliza la fórmula del controlador PID para ajustar la velocidad de la sincro, la cual permanecerá en el nuevo nivel hasta el próximo muestreo. Los parámetros que controlan la lógica son:

- Frecuencia de muestreo: a mayor frecuencia mayores ajustes de velocidad y mayor precisión en el control. La desventaja es un aumento de la carga del modelo de simulación lo que conlleva una menor velocidad de ejecución.
- Constantes del control (proporcional, integral y derivativa): son los coeficientes que afectan a la lectura instantánea del error, la velocidad de cambio del mismo y el total acumulado respectivamente. Su selección permite sintonizar el lazo de control a fin de estabilizar la respuesta del sistema.

## Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

El módulo de control de velocidad junto con los parámetros requeridos se adicionó al modelo de ARENA para realizar el experimento descrito en la sección anterior.

### IV.2.2.- Diseño experimental

El modelo de simulación en ARENA se configura utilizando los valores del modelo de datos para PH 30m Simple Hoja excepto para las cuatro variables de control a utilizar en el experimento. Estas variables son:

- Nivel de arranque de la rebobinadora: Número máximo de logs que puede haber almacenados en el acumulador para poner en marcha la rebobinadora después de una parada por acumulador lleno.
- Nivel target de acumulador: Número de logs objetivo que intenta mantener la lógica de control de velocidad de la sincro.
- Velocidad de envolvedoras (mínima y máxima): Ritmo de producción de los equipos, medido en golpes por minuto. La velocidad mínima se utiliza cuando la alimentación de rollos se encuentra por debajo de cierto nivel medido por un sensor de entrada al equipo.

La performance de las diferentes configuraciones se medirá utilizando como función objetivo al volumen de producción diario, medido en bolsones.

El comportamiento esperado del sistema, en función a los valores de las variables de control es el siguiente:

- Al incrementar el nivel target de acumulador, debería incrementarse el número de logs almacenado en el equipo, en condiciones estables de operación. Si el número de logs en el acumulador es muy bajo entonces las paradas de la rebobinadora dejan sin producto a las envolvedoras en un corto tiempo, afectando su capacidad. Si la situación es inversa y el nivel de logs almacenado es alto, al producirse una parada de envolvedoras, la reducción en la demanda aguas abajo generaría una parada de rebobinadora en menor tiempo, reduciendo así la capacidad del equipo. El comportamiento del sistema ante esta variable de control se espera evolucione de la siguiente forma:

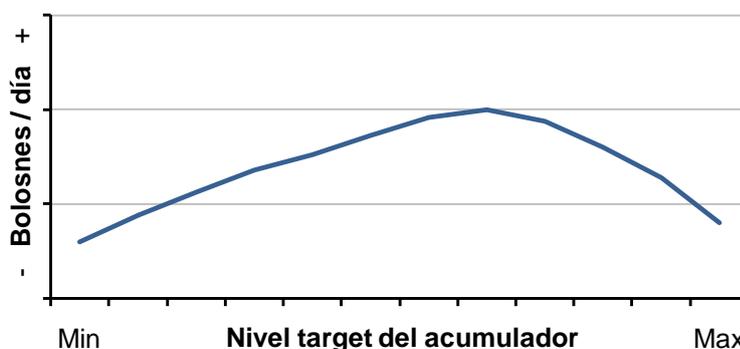


Figura IV.2.3. Cuadro de producción vs nivel target de acumulador

## Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

- Al incrementar el nivel de arranque de la rebobinadora se permite una menor reducción del nivel de acumulador luego de una parada por acumulador lleno. Si el nivel de arranque es mayor al target de acumulador, una vez que la rebobinadora vuelve a operar se produce una lenta reducción del nivel del acumulador hasta el nivel target debido a que las velocidades de las envolvedoras están seteadas para mantener el balance de la línea. Como resultado el nivel medio del acumulador debería estar por encima del target establecido. El gráfico a continuación muestra el comportamiento esperado de la función objetivo para diferentes relaciones (*rel*) entre nivel de arranque y nivel target de acumulador.

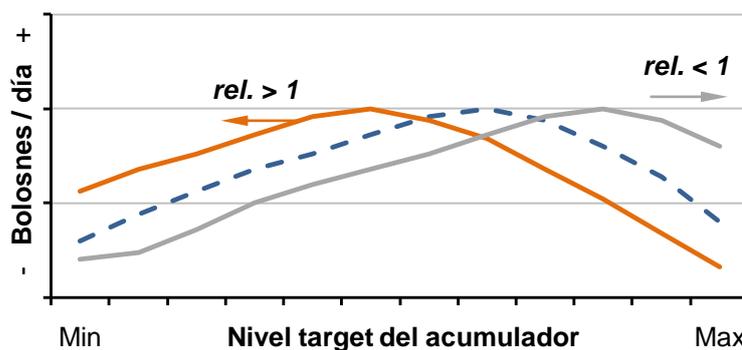


Figura IV.2.4. Cuadro de producción vs nivel target de acumulador y nivel de arranque

- La velocidad de operación de las envolvedoras es una variable de ajuste que permite mantener al sistema balanceado en operación normal. Si la velocidad máxima es muy baja entonces el sistema se satura y se generan excesivas paradas. Si, en cambio, el valor seteado es muy alto, la línea tiende a vaciarse más rápidamente y la utilización de las envolvedoras cae. En el sistema real esto genera numerosos ciclos de arranque y parada lo que deteriora el estado de la máquina. La velocidad mínima se utiliza para regular el tiempo que tarda en detenerse la envolvedora por falta de alimentación. En ambos casos los valores deberán seleccionarse con el fin de reproducir el comportamiento del sistema real.

La secuencia de ensayos a realizar se muestra a continuación.

- Ensayo 1: Consistirá en variar el nivel target del acumulador a partir de 100 logs a intervalos de 5 logs. El nivel de arranque de la sincro será igual al nivel target del acumulador ( $rel. = 1$ ). Las velocidades de las envolvedoras se ajustarán para mantener el balance de la línea.
- Ensayo 2: Consistirá en variar la relación entre el nivel de arranque de la sincro y el target de acumulador entre 0,8 y 1,2, a intervalos de 0,1. Para cada nivel se harán simulaciones para niveles de acumulador que varían

## **Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación**

entre 100 y 200 logs a intervalos de 20 logs. Las velocidades de las envolventoras se ajustarán para mantener el balance de la línea.

Ambos ensayos buscan determinar las condiciones de operación en estado de régimen de la línea. Por este motivo se debe inicializar el modelo y descartar los valores registrados al inicio de las corridas para asegurar la toma de datos correspondientes a la situación objeto del estudio. La inicialización del modelo consiste en cargar a las variables del sistema (como por ejemplo el número de logs en el acumulador) con valores esperados para el estado de régimen. De esta forma, el tiempo de simulación necesario para alcanzar dicho estado se reduce. Para cada ensayo se determinará el período de warm-up requerido para asegurar la captura de datos correspondientes al estado de régimen y el número de corridas necesarias para realizar inferencias estadísticas. En ambos casos, las estimaciones se harán sobre los datos obtenidos para cinco corridas del modelo configurado en la condición bajo estudio.

### **IV.2.3.- Análisis y discusión de resultados**

En ambos ensayos se consideró un día de warm-up en las corridas. Este tiempo asegura el estado de régimen del modelo, que en los ensayos de validación se alcanzó siempre dentro de las 10hs de simulación.

#### **IV.2.3.1.- Ensayo 1**

Para la estimación de los resultados se buscó un nivel de confianza del 95% y una precisión del 10%. Las corridas iniciales dieron los siguientes resultados (los valores de la función objetivo se indican respecto de un valor base por motivos de confidencialidad).

<b>Corrida #</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
<b>Función objetivo</b>	124,85	100,91	93,98	106,54	99,93

Tabla IV.2.1. Muestra inicial para cálculo de corridas del ensayo 1

El valor promedio de las corridas es de 105,24 y el desvío de la muestra 11,83. Por lo tanto se requerirán 15 corridas adicionales para lograr un 10% de precisión con un 95% de confianza. (*Ver Anexo VII.1.- Método de cálculo del número de corridas*)

Luego de realizar las corridas adicionales (*Ver Anexo VII.3.-*) los resultados obtenidos fueron:

## Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

Nivel target acumulador		Promedio (F. objetivo)	Desvío STD (F. objetivo)	Desvío STD (promedio)
Setpoint	Promedio			
100	102	106,47	12,09	2,70
105	108	109,28	10,04	2,25
110	115	111,22	11,47	2,56
115	122	112,06	11,21	2,51
120	124	114,87	9,68	2,16
125	129	115,00	9,06	2,03
130	138	115,15	8,36	1,87
135	141	114,32	8,14	1,82
140	149	112,34	10,32	2,31
145	152	110,82	11,83	2,65
150	155	110,03	11,73	2,62
155	158	108,59	11,18	2,50

Tabla IV.2.2. Resultados del ensayo 1

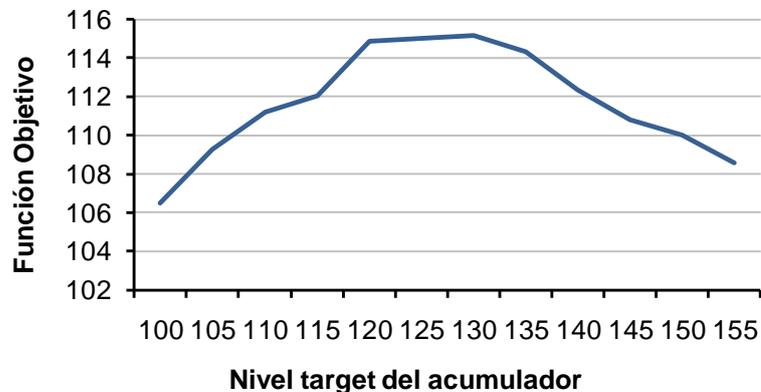


Figura IV.2.5. Resultados del ensayo 1. Cuadro de producción vs nivel target de acumulador. Según datos relevados y un muestreo realizado entre los rebobinadores, el nivel promedio objetivo del acumulador se ubica cercano a los 100 logs. Esto se debe a que el comportamiento observado por los operadores les sugiere que el acumulador debe tender a estar vacío para evitar que la rebobinadora se detenga por problemas en las envolvedoras y bolsoneras. Tomando como nivel actual 100 logs es posible comprobar estadísticamente, mediante un test de diferencia de medias (*Ver Anexo VII.2.- Test de hipótesis de diferencia de medias*), que operar la línea con un nivel objetivo de 130 logs incrementa la capacidad en un 8,2% durante la producción de PH 30m Simple Hoja.

### IV.2.3.2.- Ensayo 2

El modelo utilizado para el ensayo 1 se configuró para las simulaciones del ensayo 2. Al igual que para el ensayo anterior se utilizaron 20 corridas para obtener una estimación con una precisión del 10% con un nivel de confianza del 95%. El detalle de los resultados para cada corrida se encuentra en el *Anexo VII.3.2.-*

## Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

Los datos obtenidos del comportamiento del sistema para diferentes relaciones entre el nivel target de acumulador y nivel de arranque se muestran en el gráfico a continuación.

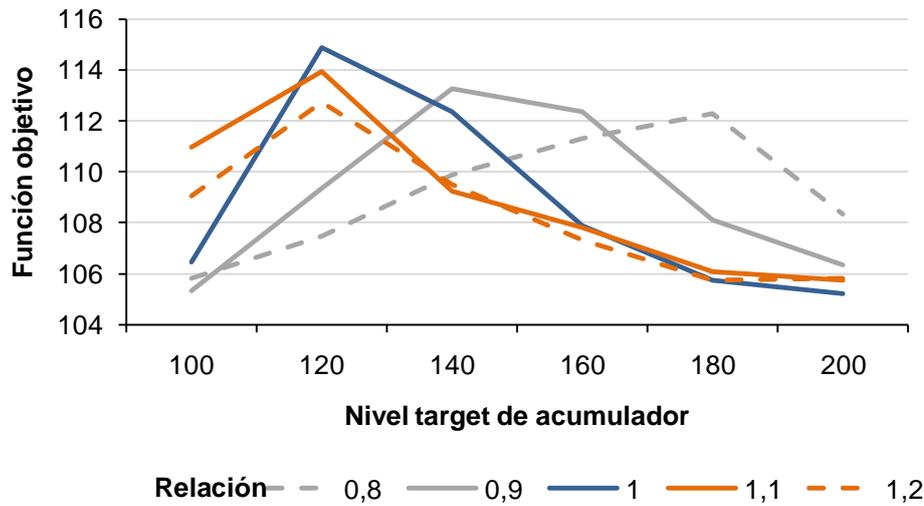


Figura IV.2.6. Evolución del sistema para diferentes niveles target de acumulador y de arranque. El análisis gráfico indica que la relación entre el nivel de arranque y el nivel target del acumulador afecta el desempeño de la línea. Para relaciones menores a 1, el nivel de acumulador que presenta el mejor valor de función objetivo se desplaza hacia valores target de acumulador mayores. Esto ocurre porque el acumulador opera en régimen con menor espacio libre por lo que la rebobinadora tiene menos tiempo de buffer pero una vez lleno el acumulador se descarga por debajo del nivel target. Si bien esta mecánica presenta mejores resultados que la estrategia de operación actual, el desempeño es menor que para el caso en que la relación es 1. En cuanto a las relaciones mayores a uno, la rebobinadora tiende a parar repetidas veces debido a que el arranque ocurre con el acumulador por encima del nivel target. Se generan pérdidas de velocidad por lo que el desempeño es menor que en el caso en que la relación es 1.

### IV.3.-EXPERIMENTO 2: AMPLIACIÓN DEL PULMÓN ENTRE ENVOLVEDORAS Y BOLSONERAS EN PH 30m SIMPLE HOJA

#### IV.3.1.- Diseño experimental

Al consultar a los operadores de envolvedoras sobre posibles oportunidades de mejora que permitan reducir la interferencia entre equipos, un turno sugirió aumentar el buffer entre envolvedoras y bolsoneras. El racional de la sugerencia es que cuando el operador detecta un problema en la bolsonera debe desplazarse desde la envolvedora (que es donde pasa mayor tiempo ya que requiere más control) hasta el equipo en cuestión y luego resolver el problema. El tiempo total necesario para problemas pequeños es lo suficientemente largo como para generar una parada de envolvedora por salida llena.

## Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

La sugerencia involucra reubicar los sensores S15 y S16 posicionándolos cerca de la salida de la envolvente y permitiendo así una mayor acumulación de paquetes entre ambos equipos.

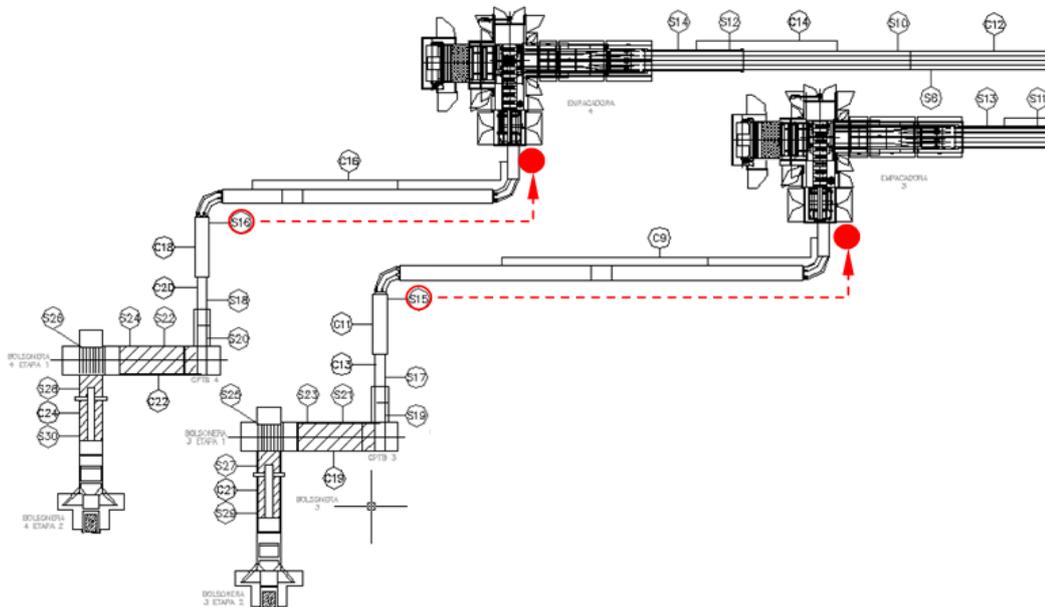


Figura IV.3.1. Posicionamiento sugerido de los sensores S15 y S16

El comportamiento esperado del sistema, es una reducción en las pérdidas de disponibilidad de las envolventas y bolsoneras por problemas en otros equipos que a su vez generen una reducción en las pérdidas en la rebobinadora y por lo tanto un aumento de la capacidad de la línea.

Se realizará un único ensayo, cambiando los valores de la posición de los sensores S15 y S16 (variables de control). Para obtener condiciones de régimen con menor tiempo de simulación se inicializará el modelo cargando las variables del sistema con valores esperados para el estado de régimen. En cuanto al período de warm-up requerido para asegurar la captura de datos correspondientes al estado de régimen se utilizará un día de simulación.

### IV.3.2.- Análisis y discusión de resultados

Se realizaron 20 corridas utilizando la configuración descrita en el diseño experimental. Los valores de la función objetivo que se obtuvieron como resultado se indican respecto de un valor base por motivos de confidencialidad.

## Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

Corrida #	Posición S15 y S16		
	Actual	Propuesta	Diferencia
1	120,32	124,09	3,76
2	114,78	109,53	-5,25
3	125,07	116,99	-8,07
4	119,03	122,63	3,61
5	120,53	116,41	-4,11
6	90,59	97,02	6,43
7	124,12	125,77	1,64
8	106,92	127,39	20,47
9	119,82	118,43	-1,39
10	115,31	102,92	-12,39
11	120,89	113,38	-7,51
12	122,13	105,35	-16,78
13	117,19	110,22	-6,96
14	118,89	123,17	4,28
15	123,00	121,56	-1,44
16	120,44	120,93	0,49
17	83,93	122,16	38,22
18	117,55	124,90	7,35
19	114,44	123,32	8,89
20	127,61	121,38	-6,22

Tabla IV.3.1. Resultados del experimento de cambio de posición de sensores S15 y S16

A fin de comprobar que la alternativa propuesta presenta mejor desempeño que la situación actual se debe verificar mediante un test de hipótesis que la media de la diferencia entre ambas alternativas es mayor a cero. A partir de los datos obtenidos para las 20 corridas indicadas en la tabla, la condición de rechazo para un nivel de confianza del 95% es 444 y el valor medio de la muestra 125. Por lo tanto no es posible rechazar la hipótesis nula de igualdad de las alternativas.

Utilizando la información de las primeras 20 corridas se calcula que es necesario realizar 232 corridas adicionales para lograr una mayor precisión en la estimación a fin de poder verificar si la posición alternativa es mejor que la actual. Luego de realizar las corridas adicionales (*ver Anexo VII.4.-*), la información obtenida permite verificar mediante un test de diferencia de medias (*ver Anexo VII.2.-*) que la media de la diferencia entre las funciones objetivo de cada alternativa es mayor a cero. La condición de rechazo del test para un nivel de confianza de 95% es 120 mientras que el valor medio de la muestra es 174. Por lo tanto, es posible afirmar estadísticamente que la nueva posición de los sensores permite aumentar la capacidad de la línea en un 1,5%.

### IV.4.-EXPERIMENTO 3: PROCEDIMIENTO DE AJUSTE DE VELOCIDAD DE REBOBINADO EN PH30m DOBLE HOJA

En los procesos de rebobinado es de vital importancia el control de tensión del material que recorre la máquina. La tensión permite mantener a la hoja estable,

## **Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación**

---

libre de arrugas para atravesar los procesos de gofrado y formación del logs sin presentar defectos. A medida que se opera el proceso a mayores velocidades se requiere una mayor tensión para mantener a la hoja estable. En productos de bajo gramaje, la deficiencia en la formación de la hoja debido a la tecnología de manufactura utilizada genera un papel con baja resistencia a la tracción. Al ser sometido a altos esfuerzos para ser rebobinado a elevadas velocidades, el papel se corta generando numerosas paradas de máquina.

La consecuencia de los numerosos cortes que se suceden es la pérdida de confianza del operador en el papel que está rebobinando. Esto hace que ajuste la velocidad a fin de poder reducir la tensión necesaria en el proceso y evitar los cortes. El nivel adecuado de reducción para cada condición del papel es difícil cuantificar por lo que el operador utiliza su experiencia previa para definir la velocidad máxima a la que puede operar. Para alcanzar dicha velocidad, realiza incrementos discretos cada determinado intervalo de tiempo durante el cual mantiene la velocidad constante para asegurar que el papel puede operar en tal condición. El proceso de ajuste y convergencia a la velocidad final varía entre operadores, siendo algunos más conservadores y prefiriendo operar a velocidades seguras para evitar paradas.

Para poder simular el comportamiento del operador al ajustar la velocidad se introdujo una modificación al modelo, adicionando una lógica que controla la aceleración de la rebobinadora luego de una parada por problemas de papel. Esta lógica realiza el aumento de velocidad fijo a intervalos de 5 minutos hasta alcanzar la velocidad máxima para el papel rebobinado. La magnitud del aumento de velocidad se define a partir del tiempo de convergencia a la velocidad final, un parámetro de la lógica que determina el tiempo total que debe transcurrir luego de una parada para alcanzar la velocidad objetivo.

### **IV.4.1.- Diseño experimental**

El modelo de simulación en ARENA se configura utilizando los valores del modelo de datos para PH 30m Doble Hoja. La variable de control del ensayo es el tiempo de convergencia a la velocidad final, el cual se variará entre 5 y 35 minutos a intervalos de 5 minutos. La performance de las diferentes configuraciones se medirá utilizando como función objetivo al volumen de producción diario, medido en bolsones.

Respecto al comportamiento del sistema se espera que al incrementar el tiempo necesario para alcanzar la velocidad objetivo, la velocidad media de la rebobinadora sea inferior y por lo tanto se produzcan menos logs. Entonces, si la rebobinadora es el cuello sea el cuello de botella de la línea, la producción diaria de bolsones se verá reducida.

## Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

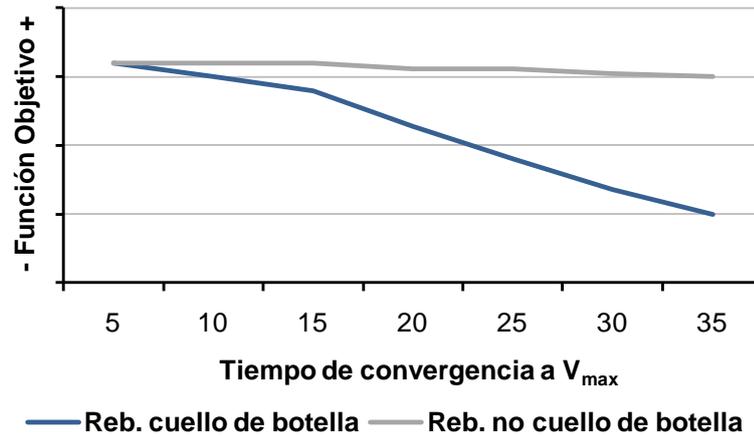


Figura IV.4.1. Cuadro para ajuste de velocidad de rebobinado en PH 30m Doble Hoja

El experimento se realizará para determinar el comportamiento del sistema en estado de régimen. Por este motivo inicializará el modelo cargando a las variables del sistema con valores esperados para el estado de régimen. De esta forma, el tiempo de simulación necesario para alcanzar dicho estado se reduce.

Respecto al período de warm-up, se considerará un día para asegurar la captura de datos correspondientes al estado de régimen.

### IV.4.2.- Análisis y discusión de resultados

Para la estimación de los resultados se buscó una confianza del 99% y una precisión del 10%. La corrida inicial para un tiempo de convergencia de 35 minutos dio los siguientes resultados (los valores de la función objetivo se indican respecto de un valor base por motivos de confidencialidad).

Corrida #	1	2	3	4	5
Función objetivo	104,17	108,22	123,64	104,05	123,94

Tabla IV.4.1. Muestra para determinar el número de corridas

El valor promedio de las corridas es de 109,34 y el desvío de la muestra 8,85. Por lo tanto se requerirán 17 corridas adicionales para lograr un 10% de precisión con un 99% de confianza (*ver Anexo VII.1.-*)

Luego de realizar las corridas necesarias y de verificar que se alcanza la precisión buscada en las muestras para todos los valores de tiempo de convergencia (*ver Anexo VII.5.-*) se obtienen los siguientes resultados.

Tiempo de convergencia	5	10	15	20	25	30	35
Función objetivo	126,00	126,64	125,16	118,28	114,24	111,59	108,74
Desvío STD (promedio)	1,65	2,40	2,45	2,18	1,44	2,11	2,21

Tabla IV.4IV.4.2. Resultados del experimento 3

La curva de desempeño de la línea en función al tiempo de convergencia a la velocidad máxima muestra que una reducción desde el nivel actual de 25 minutos a 10 minutos permitiría incrementar la capacidad de la línea en un 11,4%.

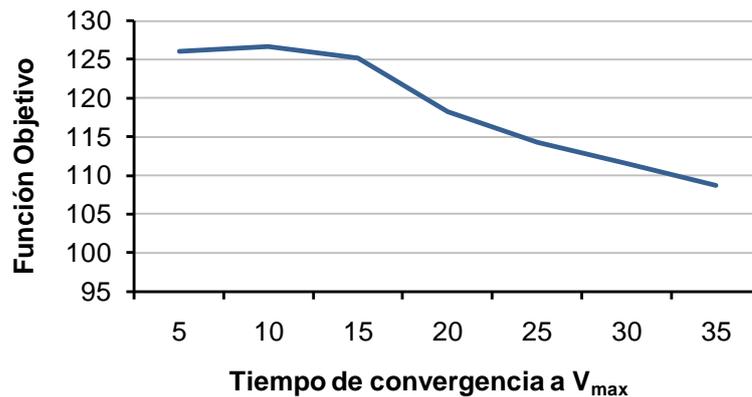


Figura IV.4.2. Resultados del experimento 3. Producción vs tiempo de convergencia a  $V_{max}$ .

Para verificar que la alternativa sea mejor que la situación actual se realiza un test de hipótesis de diferencia de medias (ver Anexo VII.2.-). La condición de rechazo para un nivel de confianza del 99% es 6,5 y la diferencia promedio surgida de las muestras es de 12,41. Por lo tanto se rechaza la hipótesis nula de igualdad y se puede afirmar que la alternativa presenta un mejor desempeño que la condición actual.

### IV.5.-EXPERIMENTO 4: PROCEDIMIENTO DE AJUSTE DE VELOCIDAD DE REBOBINADO EN PH90m SIMPLE HOJA

Los papeles simple hoja de 90m se producen con una hoja base de 16gsm muy similar a la utilizada en el producto analizado en el experimento 3. Esta hoja base presenta una resistencia a la tracción algo mayor que la de los PH 30m Doble Hoja debido a que debe resistir el 100% del esfuerzo de tracción. No obstante, se registra el mismo nivel de cortes que en los productos doble hoja y la reacción de los operadores de la rebobinadora ante esto es la misma.

#### IV.5.1.- Diseño experimental

Para el análisis correspondiente a la presente sección se utiliza el modelo del experimento 3, cambiando los valores de las variables y parámetros asociados al tipo de producto. La variable de control del ensayo es el tiempo de convergencia a la velocidad final, el cual se variará entre 5 y 35 minutos a intervalos de 5 minutos. La performance de las diferentes configuraciones se medirá utilizando como función objetivo al volumen de producción diario, medido en bolsones. Se espera que el sistema tenga el mismo comportamiento que se obtuvo en el experimento anterior con el PH 30m Doble Hoja.

El análisis se realizará considerando únicamente el comportamiento del sistema en estado de régimen. Para asegurar que los datos muestreados corresponden a este estado se utilizará un día de warm-up. Adicionalmente para reducir el tiempo que demora el modelo en alcanzar la condición estable se cargarán las variables del sistema con valores esperados para tal estado.

## Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

### IV.5.2.- Análisis y discusión de resultados

Para la estimación de los resultados se buscó una confianza del 99% y una precisión del 10%. La corrida inicial para un tiempo de convergencia de 5 minutos dio los siguientes resultados (los valores de la función objetivo se indican respecto de un valor base por motivos de confidencialidad).

Corrida #	1	2	3	4	5
Función objetivo	115,27	125,39	112,68	101,15	111,34

Tabla IV.5.1. Muestra para determinar el número de corridas

El valor promedio de las corridas es de 113,16 y el desvío de la muestra 8,68. Por lo tanto se requerirán 11 corridas adicionales para lograr un 10% de precisión con un 99% de confianza (*ver Anexo VII.1.-*)

Luego de realizar las corridas adicionales la no se pudo obtener la precisión buscada. El cálculo del número de corridas necesario en función a la muestra de 16 observaciones da como resultado 20. Se decidió entonces realizar 25 corridas y volver a verificar la condición de precisión de la estimación, obteniéndose resultados positivos.

Una vez realizadas las 25 corridas para todos los valores de tiempo de convergencia y de verificar que se alcanza la precisión buscada en las muestras (*ver Anexo 0*) se obtienen los siguientes resultados.

Tiempo de convergencia	5	10	15	20	25	30	35
Función objetivo	116,73	116,72	116,58	111,96	111,26	109,73	106,13
Desvío STD (promedio)	2,22	2,15	2,24	1,73	1,85	1,97	1,85

Tabla IV.5.2. Resultados del experimento 4

La curva de desempeño de la línea en función al tiempo de convergencia a la velocidad máxima muestra que una reducción desde el nivel actual de 25 minutos a 10 minutos permitiría incrementar la capacidad de la línea en un 4,7%.

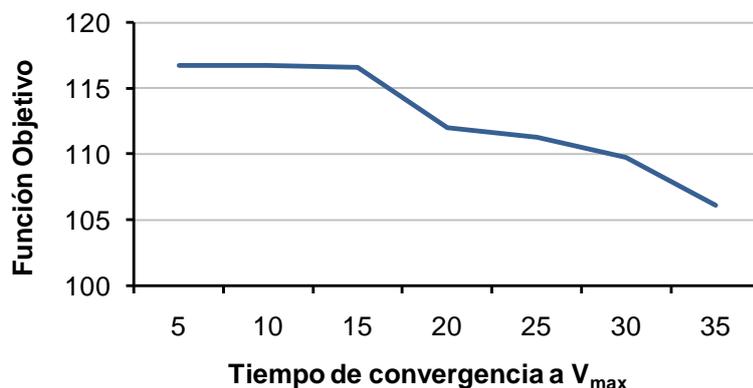


Figura IV.5.1. Resultados del experimento 4. Producción vs tiempo de convergencia a  $V_{max}$ .

Para verificar que la alternativa sea mejor que la situación actual se realiza un test de hipótesis de diferencia de medias (*ver Anexo VII.2.-*). La condición de rechazo para un nivel de confianza del 99% es 4,66 y la diferencia promedio surgida de las muestras es de 5,46. Por lo tanto se rechaza la hipótesis nula de

## Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

igualdad y se puede afirmar que la alternativa presenta un mejor desempeño que la condición actual.

Adicionalmente, el experimento permite comprobar que para tiempos de convergencia menores a 15 minutos el cuello de botella de la línea cambia de la rebobinadora a las cortadoras. Esto genera una respuesta prácticamente constante del sistema para valores menores a 15 en la variable de control.

### **IV.6.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

En base al estudio realizado y a los resultados obtenidos para las propuestas de mejora introducidas en el diseño experimental se puede afirmar que es posible aumentar la capacidad de la línea Sincro 2 un 6,1%.

El método de control de velocidad de rebobinado en función a un nivel objetivo de acumulador, analizado en el experimento 1, genera un aumento de capacidad de conversión del 8,2% en PH 30m SH. Este modo de operación permite una mejor gestión de la capacidad del acumulador para evitar la interacción de las paradas de los equipos de la línea. A fin de implementar la mejora analizada se recomienda:

- Colocar un indicador del nivel objetivo en el acumulador. Es posible instalar una regla en la estructura del acumulador y un dial en el sistema de poleas que en conjunto permitan ver rápidamente el nivel instantáneo del acumulador. El nivel objetivo se puede indicar sobre la regla, otorgando así al operador una referencia rápida del desvío respecto al target.



Figura IV.6.1. Indicador de nivel de acumulador

- Entrenar a los operadores para que comprendan el nuevo método y sus beneficios. A priori un control de nivel que signifique no operar la

## Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

maquina a velocidad máxima todo el tiempo parece ir en contra del objetivo de aumentar la producción. Esto es así porque los efectos de la técnica propuesta se pueden apreciar en periodos de tiempo mayores a un turno de producción y no de forma instantánea. Dado el carácter anti intuitivo de la solución es posible que los operadores no puedan percibir el beneficio de operar de esta forma a menos que se los entrene utilizando un modelo de la línea adaptado para poder interactuar durante la corrida, ver los resultados en la interfaz gráfica y comprimir el tiempo simulando horas de operación en minutos. En este sentido, y a fin de testear la utilidad de tal modelo, se utilizó el simulador reformado para realizar el proceso de validación con un conjunto de operadores de línea quienes pudieron validar el comportamiento del modelo al cambiar los seteos y de esta manera comprender el impacto de las decisiones tomadas en el largo plazo.

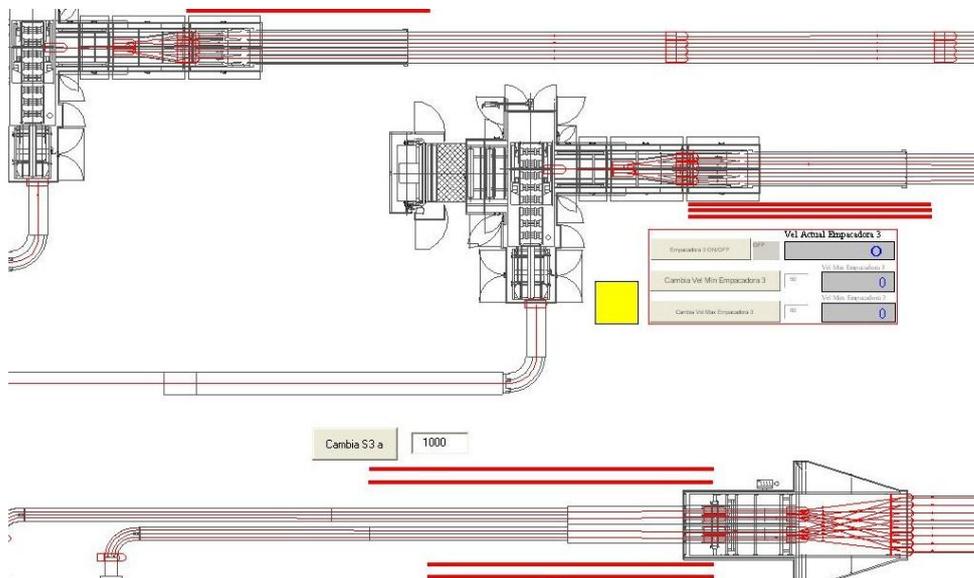


Figura IV.6.2. Imagen del modelo utilizado para entrenamiento

- Implementar un sistema de monitoreo del cumplimiento del procedimiento de control. El supervisor de conversión realiza reuniones de 5 minutos cada dos horas con los operadores para revisar el desempeño de la línea. Se puede introducir, en el tablero utilizado en la reunión, la evolución del nivel del acumulador medida a partir de los datos del plc de la rebobinadora. De esta forma, el supervisor podrá evaluar el cumplimiento del procedimiento y actuar para corregir los desvíos.

La relocalización de sensores es una tarea sencilla que se puede realizar rápidamente, extendiendo el cableado de los mismos hasta su nueva posición y generando un nuevo alojamiento. La implementación de esta mejora genera un incremento de capacidad de 1,5% en la producción de PH 30m Simple Hoja. La

## Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

mejora se genera a partir de una reducción en la interacción entre las paradas de la envolvedora y la bolsoneira.

Si bien no se analizó el efecto de la modificación en la capacidad de producción de otros productos es esperable que también genere incrementos. Sin embargo, esto deberá ser verificado mediante los estudios de simulación correspondientes y hasta cumplir con esto se considerará a la relocalización del sensor como una tarea de cambio de formato para PH 30m Simple Hoja.

En cuanto al método de ajuste de velocidad en PH 16gsm los experimentos 3 y 4 muestran que es posible obtener un incremento de capacidad de 11,4% para PH 30m Doble Hoja y de 4,7% para PH 90m Simple Hoja. Esto se debe a que la curva de arranque de la rebobinadora luego de un corte de papel se reduce, obteniéndose una mayor producción en el cuello de botella. La implementación del nuevo procedimiento de ajuste de velocidad después de un corte requiere:

- Entrenar a los operadores para que comprendan las consecuencias de demorar un tiempo mayor a diez minutos para alcanzar la velocidad máxima que le permite el papel.
- Implementar un método de seguimiento para monitorear las curvas de arranque de máquina. Esto se puede hacer registrando el perfil de velocidad capturando datos del sistema de control de la máquina, para luego analizar la información en las reuniones de desempeño de línea cada dos horas.

En conclusión, considerando el tiempo que cada producto analizado se programa para ser producido, las mejoras propuestas permiten asegurar un incremento de 6,1% en la capacidad de la línea Sincro 2. Este valor representa un 54% del aumento máximo estimado en la formulación del problema.

Experimento		Incremento en la performance del producto	Participación del producto	Incremento de capacidad
1	Gestión del nivel del acumulador en PH 30m Simple Hoja	8,2%	42,0%	3,4%
2	Ampliación del pulmón entre envolvedoras y bolsoneiras en PH 30m Simple Hoja	1,5%	42,0%	0,6%
3	Ajuste de velocidad de rebobinado en PH 30m Doble Hoja	11,4%	8,0%	0,9%
4	Ajuste de velocidad de rebobinado en PH 90m Simple Hoja	4,7%	23,0%	1,1%

Tabla IV.6.1. Resultados de los experimentos realizados



### **V.- FUTUROS PASOS**

El proyecto desarrollado demostró que la aplicación de simulación a la definición de estrategias de integración de línea es posible y que por lo tanto este método constituye una valiosa herramienta para la optimización y el diseño de líneas de producción automatizadas. De lo analizado, se desprenden dos ramas de posibles extensiones a futuro, el análisis de alternativas de menor mejora esperada en el caso de estudio y la extensión del método al concepto de Virtual Factory.

#### **V.1.- Próximos pasos para el caso de estudio**

El modelo de simulación desarrollado en el proyecto para el caso de estudio puede ser utilizado para analizar los resultados de la aplicación de las mejoras propuestas a la producción de los restantes productos de la línea Sincro 2. En base a las características comunes entre estos y los analizados en las secciones anteriores se recomienda:

- Estudiar el impacto de la aplicación de la gestión del nivel de acumulador en la producción de rollo de cocina. Este producto presenta una utilización de los equipos de la línea similar al PH 30m Simple Hoja por lo que es esperable que la aplicación de la propuesta genere iguales beneficios.
- Analizar si se obtendrían mejoras en los restantes productos de 16gsm (PH 20m Doble Hoja y PH 50m Doble Hoja) al aplicar el procedimiento de ajuste de velocidad de rebobinado propuesto para PH 30m doble hoja y PH 90m Simple Hoja.
- Cuantificar el impacto de fijar la posición de los sensores S15 y S16 en el lugar definido en el experimento 2. Para ello se debe evaluar si la modificación genera variaciones en el desempeño de la línea al fabricar los restantes productos.
- Evaluar si existen oportunidades de mejora en la definición de los valores de los timers que activan la secuencia de alimentación de las involucradas. Estos valores son críticos, particularmente para productos de alto volumen como el rollo de cocina.

En cuanto al enfoque del caso de estudio, el modelo podría utilizarse para estudiar los estados transitorios de la línea de producción, particularmente los generados por cambios de formato. Esta actividad requiere vaciar la línea de producción, realizar cambios en los equipos y volver a ponerlos en funcionamiento. Existen diferentes secuencias posibles para realizar estas tareas, cada una de las cuales produce diferentes resultados y por consiguiente diferente productividad de la línea durante el período de transición.

## Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

### **V.2.- Extensión de la metodología analizada al concepto de Virtual Factory**

El concepto de Virtual Factory comprende al uso de la PC para optimizar el desempeño de los sistemas productivos. Involucra metodologías que van desde la simulación de procesos de ensamble para verificar que no existan problemas de ergonomía hasta el entrenamiento “computer-based” a través de programas especialmente formulados. La aplicación de estas metodologías se extiende desde líneas que se encuentran en etapa de diseño, permitiendo eliminar problemas antes de su implementación hasta líneas que se encuentran en producción, dónde la experimentación y el aprendizaje a través de la PC puede convertirse en una potente herramienta de capacitación y optimización de procesos.

El concepto de Virtual Factory es reciente y existen solo unos pocos software específicos para ciertas aplicaciones que permiten animar la evolución de una línea pero no interactuar efectivamente con el modelo. De esta forma solo es posible realizar análisis de los procesos que fueron modelizados bajo las condiciones especificadas en la etapa de diseño del modelo.



Figura V.1.1. Ejemplo de un software donde se aplica el concepto de Virtual Factory<sup>21</sup>

El presente proyecto desarrolla una metodología que puede integrarse dentro del concepto de Virtual Factory mediante herramientas que permitan la interacción en tiempo real con modelos de simulación de líneas de producción. En este sentido, el método puede ser aplicado en etapas de diseño de una línea para ensayar diferentes estrategias de integración y determinar aquella que produce los mejores resultados, reduciendo así la curva de start-up de nuevos proyectos. A su vez, los software de simulación que permiten generar una interfaz gráfica otorgan la posibilidad de interactuar con el modelo. Durante las corridas es posible alterar los parámetros de la simulación y comprimir el tiempo, ejecutando días en minutos, permitiendo así mostrar las consecuencias de operar la línea de una determinada forma. El entrenamiento “computer-based” realizado mediante tales modelos podría reducir drásticamente la curva de aprendizaje de las personas que ingresen a una compañía de procesos

<sup>21</sup> <http://machinedesign.com/article/factory-simulation-gets-it-right-the-first-time-1010>

### **Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación**

continuos eliminando potenciales errores en la operación del proceso real. Adicionalmente, los modelos de simulación que contienen la lógica de operación de una línea podrían ser utilizados en el entrenamiento de personas que actualmente forman parte de la empresa a fin de generar la conciencia del impacto de las decisiones que toman diariamente sobre el desempeño del proceso, contribuyendo a cambiar la cultura de operación de los equipos.



**VI.- FUENTES**

T.J. Heindel. Junio 1997. The Fundamentals of Flotation Deinking. IPST Technical Paper Series Number 656. Institute of Paper Science and Technology Atlanta, Georgia

Lennart Gustavsson, Sven-Erik Olsson, Martin Ragnar, Jonas Saetheråsen and Vidar Snekkenes. Mayo 2006. Compact Bleaching™ reduces capital intensity in the bleach plant. TAPPSA Journal papers.

Jerry Banks, Barry Nelson. 2010. Discrete-event system simulation. Editorial Pearson Education. 5<sup>ta</sup> edición. ISBN 0-136-06212-1

Jerry Banks. 1998. Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice. Editorial John Wiley & Sons, Inc. ISBN 0-471-13403-1

D. Montgomery. 2001. Design & analysis of experiments. Editorial John Wiley & Sons, Inc. 5<sup>ta</sup> edición. ISBN 0-471-31649-0

National Institute of Standards and Technology (NIST). 2010. e-Handbook of Statistical Methods. <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>

J. García Velasco, R. Castillo. 2005. Apuntes del curso de simulación de la carrera de Ingeniería Industrial del ITBA.

Armando Corripio, Carlos Smith. 1997. Principles and practices of automatic process control. Editorial John Wiley & Sons, Inc. 2<sup>da</sup> edición. ISBN 0-471-57588-7

David Kelton. 2004. Simulation with ARENA. Editorial Mc Graw Hill. 3<sup>ra</sup> edición. ISBN 0-071-21934-X

Christopher Chung. 2004. Simulation modelling handbook. Editorial CRC Press. ISBN 0-8493-1241-8

Herbert Sixta. 2006. Handbook of Pulp. Editorial Wiley - VCH. Volume 1. ISBN 3-527-30999-3



## **VII.- ANEXOS**

### **VII.1.- MÉTODO DE CÁLCULO DEL NÚMERO DE CORRIDAS**

Los modelos de simulación recrean el comportamiento de sistemas estocásticos por lo que sus salidas tienen un carácter aleatorio. Este hecho genera la necesidad de utilizar métodos estadísticos para sacar conclusiones y estimaciones a partir de los resultados de las corridas. Las estimaciones que se realicen del promedio de un indicador mejorarán su precisión a medida que el tamaño de la muestra aumenta. Sin embargo, realizar un número excesivo de corridas implica dedicar tiempo y recursos a obtener datos que no son necesarios.

Para evitar generar datos que no se van a utilizar es necesario definir el mínimo número de corridas que se debe hacer para obtener una determinada precisión en la estimación. Para ello se toma una muestra piloto de las salidas del sistema (usualmente entre 5 y 10 observaciones) y se calculan el promedio ( $\bar{X}_{muestra}$ ) y el desvío estándar de la muestra ( $S_{muestra}$ ). A partir de estos valores y definiendo un nivel de confianza ( $1 - \alpha$ ) para la estimación, se calcula el número de corridas ( $n$ ) mínimo que se deben hacer para obtener la precisión buscada. Para el cálculo se asume que el promedio y el desvío estándar de la muestra extendida se mantienen iguales a los obtenidos de la muestra piloto. Entonces, la fórmula para el número de corridas es:

$$n = \left( \frac{2 \times z_{1-\alpha/2} \times S_{muestra}}{Precisión (\%) \times \bar{X}_{muestra}} \right)^2$$

Figura VII.1.1. Fórmula para el cálculo del número de corridas

En base al número determinado por el cálculo se realizan las corridas adicionales. Luego, se debe verificar que la nueva muestra cumpla con la precisión deseada. En caso de no ser así se debe hacer un nuevo cálculo del número de corridas a partir de la muestra extendida. El proceso es iterativo y se repite hasta que la muestra obtenida cumpla con los parámetros buscados.

### **VII.2.- TEST DE DIFERENCIA DE MEDIAS**

El test de diferencia de medias se utiliza para establecer si las medias de dos poblaciones son diferentes a partir de una muestra de cada población. Según la hipótesis nula planteada el test puede utilizarse para inferir que las medias poblacionales son diferentes (test a dos colas) ó que una es mayor a la otra (test a una sola cola). En ambos casos, el rechazo de la hipótesis nula permite asegurar el resultado con un determinado nivel de significación  $\alpha$ .

A partir de dos muestras de  $n_1$  y  $n_2$  observaciones respectivamente se calculan las medias y los desvíos muestrales. Luego se plantean las hipótesis nula y alternativa según la inferencia que se desee hacer sobre la relación entre las medias poblacionales.

## Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

---

$$\begin{array}{lll} H_0: \mu_1 = \mu_2 & \text{ó} & H_0: \mu_1 \geq \mu_2 & \text{ó} & H_0: \mu_1 \leq \mu_2 \\ H_a: \mu_1 \neq \mu_2 & & H_0: \mu_1 < \mu_2 & & H_0: \mu_1 > \mu_2 \end{array}$$

Figura VII.2.1. Hipótesis posibles en un test de diferencia de medias

La condición de rechazo de la hipótesis nula en cada caso se obtiene a partir de los valores calculados para las muestras 1 y 2. Para el test cuya hipótesis nula es  $H_0: \mu_1 = \mu_2$  la condición de rechazo es

$$C.R.: |\bar{X}_1 - \bar{X}_2| > Z_{1-\alpha/2} \times \sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}$$

Figura VII.2.2. Condición de rechazo para un test de diferencia de medias  $\mu_1 \neq \mu_2$

En el caso del test  $H_0: \mu_1 \geq \mu_2$  la condición de rechazo es

$$C.R.: \bar{X}_1 - \bar{X}_2 < -Z_{1-\alpha} \times \sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}$$

Figura VII.2.3. Condición de rechazo para un test de diferencia de medias  $\mu_1 < \mu_2$

Por último, para el test cuya hipótesis nula es  $H_0: \mu_1 \leq \mu_2$  la condición de rechazo es

$$C.R.: \bar{X}_1 - \bar{X}_2 > Z_{1-\alpha} \times \sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}$$

Figura VII.2.4. Condición de rechazo para un test de diferencia de medias  $\mu_1 > \mu_2$

**Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación**

**VII.3.- RESULTADOS DEL EXPERIMENTO 1**

**VII.3.1.-Simulación para el Ensayo 1**

Nivel target acumulador	Setpoint	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150	155
	Promedio	102	108	115	122	124	129	138	141	149	152	155	158
<b>Corrida #</b>	1	124,85	114,52	122,75	111,12	115,53	125,33	134,88	124,26	125,34	104,95	116,75	111,74
	2	100,91	102,10	107,02	98,68	108,50	113,91	113,39	108,95	108,38	99,96	120,37	87,70
	3	93,98	114,37	79,54	83,30	119,01	114,77	112,05	119,17	127,15	112,17	104,12	100,48
	4	106,54	89,53	116,50	113,78	112,89	109,92	121,08	105,58	110,31	106,64	116,16	105,33
	5	99,93	111,16	103,50	110,45	118,16	121,60	115,72	114,74	116,97	102,16	110,96	114,37
	6	105,11	105,96	108,51	111,77	116,98	114,43	123,53	120,48	118,43	108,87	104,94	118,28
	7	107,50	118,33	119,63	120,54	80,56	120,70	115,04	119,92	122,71	125,11	126,30	116,65
	8	112,79	102,24	120,80	118,63	122,26	119,56	116,61	119,17	88,89	86,33	122,78	116,36
	9	101,84	119,20	119,57	110,71	118,64	125,99	112,97	125,33	110,65	118,34	122,23	105,88
	10	109,28	107,62	128,77	120,93	126,69	125,40	115,60	121,04	109,40	125,12	127,58	101,89
	11	100,34	114,38	116,00	126,11	106,44	127,52	105,54	109,73	117,18	131,22	97,65	94,54
	12	111,47	90,11	102,71	114,60	117,78	107,58	112,39	111,03	111,80	97,94	87,41	103,64
	13	109,54	124,64	123,30	122,83	122,68	121,56	130,22	113,45	112,26	115,49	114,21	107,74
	14	118,36	116,32	110,56	124,25	113,83	113,13	100,71	123,57	127,95	103,79	101,93	117,87
	15	103,16	106,00	117,82	113,20	113,75	111,87	100,44	112,18	114,75	123,56	115,80	110,75
	16	99,78	110,66	107,74	114,36	120,54	90,99	116,16	112,15	105,00	95,12	94,20	125,51
	17	121,12	105,46	91,83	125,97	121,71	116,94	109,25	119,62	119,93	114,82	114,21	115,66
	18	106,37	117,10	113,12	94,42	106,60	108,64	119,79	108,37	95,55	125,34	89,94	83,85
	19	70,67	122,09	108,43	98,98	114,81	102,50	114,35	91,74	99,56	104,61	106,14	108,12
	20	125,79	93,71	106,33	106,63	120,02	107,60	113,37	105,83	104,61	114,84	106,98	125,45

<b>Promedio</b>	106,47	109,28	111,22	112,06	114,87	115,00	115,15	114,32	112,34	110,82	110,03	108,59
<b>Desvío STD</b>	12,09	10,04	11,47	11,21	9,68	9,06	8,36	8,14	10,32	11,83	11,73	11,18
<b>Desvío STD (promedio)</b>	2,70	2,25	2,56	2,51	2,16	2,03	1,87	1,82	2,31	2,65	2,62	2,50

<b>Precisión</b>	10,0%	8,1%	9,0%	8,8%	7,4%	6,9%	6,4%	6,2%	8,1%	9,4%	9,3%	9,0%
------------------	-------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

**Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación**

**VII.3.2.-Simulación para el ensayo 2**

Nivel target acumulador		100					120					140				
Relación		0,8	0,9	1	1,1	1,2	0,8	0,9	1	1,1	1,2	0,8	0,9	1	1,1	1,2
<b>Corrida #</b>	<b>1</b>	111,9	123,1	104,5	115,7	114,2	112,2	111,0	111,7	119,1	129,2	110,2	113,7	96,8	123,0	119,4
	<b>2</b>	102,8	104,6	107,6	106,9	103,8	101,1	115,8	100,7	99,8	110,1	113,1	103,5	117,0	93,4	99,9
	<b>3</b>	115,8	89,8	88,2	102,2	120,9	107,4	116,3	113,8	123,4	93,4	110,1	119,8	96,0	125,1	103,2
	<b>4</b>	85,5	111,3	103,8	106,8	118,9	105,7	109,8	111,2	106,7	119,0	110,5	114,0	120,1	94,0	103,4
	<b>5</b>	104,2	105,1	112,3	107,0	110,3	117,7	101,7	114,2	110,9	115,7	102,2	116,1	123,1	116,8	101,1
	<b>6</b>	117,1	92,3	116,7	102,2	113,7	105,5	106,6	114,2	110,4	98,8	112,1	124,8	121,1	109,1	114,2
	<b>7</b>	96,7	108,1	114,0	112,4	107,4	110,2	96,1	113,3	115,4	105,0	116,1	111,0	112,5	99,7	100,3
	<b>8</b>	96,4	97,2	105,1	107,0	103,3	94,3	113,4	134,3	116,3	120,9	114,6	113,5	131,2	129,0	106,1
	<b>9</b>	103,3	86,0	110,6	105,4	125,1	102,2	125,0	107,7	103,9	117,3	113,6	98,0	114,6	93,2	135,2
	<b>10</b>	94,7	93,8	93,1	114,9	102,1	120,1	94,0	118,6	113,3	109,6	121,9	107,0	89,9	108,8	113,1
	<b>11</b>	95,9	122,4	101,1	111,1	104,0	95,5	118,6	109,6	117,2	110,3	104,4	114,2	111,8	96,7	103,7
	<b>12</b>	105,8	112,6	137,1	114,7	110,9	116,0	113,8	107,2	113,3	115,8	105,4	112,7	107,6	121,3	86,4
	<b>13</b>	91,9	109,5	109,0	111,8	109,3	113,6	104,6	102,6	116,0	133,1	107,5	96,9	127,1	101,9	110,2
	<b>14</b>	128,8	115,0	106,1	98,2	101,6	124,3	103,1	127,0	122,3	111,4	120,2	118,9	114,3	103,4	131,4
	<b>15</b>	113,1	113,4	87,4	121,2	106,4	118,5	101,9	121,1	122,6	107,3	117,4	110,0	112,9	119,0	102,6
	<b>16</b>	114,9	116,1	96,4	116,1	106,3	79,3	120,1	120,0	104,8	118,6	94,5	126,9	126,3	106,0	117,4
	<b>17</b>	106,1	106,2	105,0	113,0	103,9	94,9	113,3	113,0	107,3	106,9	115,2	129,8	121,5	102,3	110,8
	<b>18</b>	111,3	93,0	118,6	111,7	118,1	118,0	99,8	126,4	130,5	112,5	87,7	114,2	118,6	129,8	119,1
	<b>19</b>	103,7	109,6	97,0	100,0	110,1	94,2	115,9	111,8	124,9	110,9	108,4	96,2	93,3	113,4	113,3
	<b>20</b>	116,0	96,9	116,3	121,6	89,9	118,5	107,2	119,8	99,8	108,3	113,3	124,7	90,5	98,2	99,2

<b>Promedio</b>	105,8	105,3	106,5	110,0	109,0	107,5	109,4	114,9	113,9	112,7	109,9	113,3	112,3	109,2	109,5
<b>Desvío STD</b>	10,5	10,81	11,5	6,56	8,055	11,61	8,356	8,249	8,529	9,18	8,221	9,61	12,68	12,19	11,47
<b>Desvío STD (promedio)</b>	2,3	2,4	2,6	1,5	1,8	2,6	1,9	1,8	1,9	2,1	1,8	2,1	2,8	2,7	2,6

<b>Precisión</b>	8,7%	9,0%	9,5%	5,2%	6,5%	9,5%	6,7%	6,3%	6,6%	7,1%	6,6%	7,4%	9,9%	9,8%	9,2%
------------------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

### Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

Nivel target acumulador		160					180					200				
Relación		0,8	0,9	1	1,1	1,2	0,8	0,9	1	1,1	1,2	0,8	0,9	1	1,1	1,2
<b>Corrida #</b>	<b>1</b>	110,6	106,7	109,6	101,7	102,3	110,3	91,8	99,6	92,1	103,9	104,1	101,2	107,2	115,8	100,9
	<b>2</b>	109,9	115,7	126,0	118,6	105,0	125,4	106,3	72,8	119,0	98,2	108,5	111,9	122,4	93,7	103,5
	<b>3</b>	106,6	122,2	106,4	99,4	102,5	113,6	110,3	112,2	92,0	114,6	107,9	107,4	104,9	99,9	100,9
	<b>4</b>	111,2	106,1	113,5	115,3	111,5	100,7	115,3	119,0	115,4	106,8	118,2	118,0	123,9	106,7	101,0
	<b>5</b>	111,1	121,4	98,1	104,9	100,7	121,6	114,4	110,9	112,2	113,9	101,5	114,5	83,7	106,8	101,3
	<b>6</b>	100,7	118,2	105,5	104,9	119,1	115,6	95,3	100,0	104,7	102,8	107,5	96,2	107,5	99,7	112,5
	<b>7</b>	96,4	107,8	119,2	107,9	112,4	102,0	94,8	113,2	117,1	95,7	108,9	100,5	102,1	118,4	113,1
	<b>8</b>	116,6	109,5	105,3	93,8	108,4	132,5	110,4	101,1	102,1	110,2	109,9	110,9	92,8	105,6	107,3
	<b>9</b>	99,5	100,2	118,2	113,5	102,5	89,8	125,7	94,8	109,9	106,8	113,0	117,9	109,6	92,4	114,5
	<b>10</b>	87,7	97,2	102,8	92,5	106,5	129,7	118,2	108,9	116,7	97,0	102,0	104,4	105,9	109,7	104,9
	<b>11</b>	105,4	113,0	114,0	104,1	107,4	116,8	99,8	119,9	89,6	102,2	98,3	112,9	92,0	95,5	99,5
	<b>12</b>	129,1	112,6	106,6	129,8	125,2	96,2	96,1	130,5	102,5	119,8	110,5	94,2	110,1	102,9	111,3
	<b>13</b>	119,9	114,4	89,9	123,5	86,7	109,8	129,5	95,6	106,2	101,5	99,6	114,0	96,7	99,0	106,4
	<b>14</b>	110,8	118,5	108,4	113,7	112,8	111,5	110,5	105,1	127,1	105,6	114,9	105,2	107,1	112,9	107,7
	<b>15</b>	122,1	108,4	111,9	98,4	89,9	113,2	82,5	98,9	107,3	96,6	107,8	111,4	120,8	109,2	95,2
	<b>16</b>	125,5	95,6	90,0	117,4	111,5	115,2	109,7	109,5	108,2	121,5	106,6	105,0	107,5	111,8	108,9
	<b>17</b>	98,7	107,4	124,8	116,4	104,4	109,7	111,1	106,5	83,8	104,9	100,0	110,6	106,2	109,0	107,7
	<b>18</b>	117,5	119,6	81,2	100,6	110,1	120,9	121,5	100,9	109,2	96,9	115,0	80,0	112,3	107,9	94,1
	<b>19</b>	118,7	119,5	112,7	100,2	116,5	99,7	106,8	100,8	114,5	115,0	101,7	94,3	100,1	109,7	108,9
	<b>20</b>	128,2	133,0	113,6	98,7	110,6	112,4	111,6	113,2	91,3	101,3	130,3	118,3	91,9	108,6	116,8
<b>Promedio</b>		111,3	112,3	107,9	107,8	107,3	112,3	108,1	105,7	106,1	105,8	108,3	106,4	105,2	105,8	105,8
<b>Desvío STD</b>		11,16	9,173	11,43	10,22	8,913	10,92	11,83	11,89	11,43	7,816	7,598	9,828	10,45	7,138	6,246
<b>Desvío STD (promedio)</b>		2,3	2,4	2,6	1,5	1,8	2,6	1,9	1,8	1,9	2,1	1,8	2,1	2,8	2,7	2,6
<b>Precisión</b>		8,2%	8,4%	9,3%	5,3%	6,6%	9,1%	6,8%	6,8%	7,0%	7,6%	6,7%	7,9%	10,6%	10,1%	9,5%

## Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

### VII.4.- RESULTADOS DEL EXPERIMENTO 2

Corrida #	Posición S15 y S16		
	Actual	Propuesta	Diferencia
1	120,32	124,09	3,76
2	114,78	109,53	-5,25
3	125,07	116,99	-8,07
4	119,03	122,63	3,61
5	120,53	116,41	-4,11
6	90,59	97,02	6,43
7	124,12	125,77	1,64
8	106,92	127,39	20,47
9	119,82	118,43	-1,39
10	115,31	102,92	-12,39
11	120,89	113,38	-7,51
12	122,13	105,35	-16,78
13	117,19	110,22	-6,96
14	118,89	123,17	4,28
15	123,00	121,56	-1,44
16	120,44	120,93	0,49
17	83,93	122,16	38,22
18	117,55	124,90	7,35
19	114,44	123,32	8,89
20	127,61	121,38	-6,22
21	114,86	121,19	6,33
22	116,10	120,83	4,73
23	116,24	120,32	4,08
24	118,68	93,39	-25,29
25	88,12	120,81	32,69
26	123,79	109,29	-14,50
27	114,63	106,12	-8,50
28	120,41	122,38	1,98
29	124,08	115,47	-8,61
30	119,92	123,11	3,19
31	88,58	124,35	35,77
32	119,84	126,45	6,61
33	121,76	116,01	-5,76
34	118,73	117,02	-1,71
35	109,04	109,00	-0,05
36	119,36	121,01	1,65
37	117,42	114,15	-3,28
38	117,72	112,26	-5,45
39	117,36	121,15	3,79
40	120,88	121,07	0,19
41	120,07	100,04	-20,02
42	117,43	120,24	2,80
43	117,56	121,87	4,31
44	118,94	121,80	2,85
45	114,81	118,97	4,16

Corrida #	Posición S15 y S16		
	Actual	Propuesta	Diferencia
46	117,17	114,44	-2,73
47	99,47	124,11	24,64
48	116,17	120,30	4,13
49	113,20	122,79	9,59
50	99,52	121,50	21,98
51	120,02	118,15	-1,87
52	119,97	124,23	4,26
53	117,72	120,81	3,09
54	115,66	118,65	2,99
55	118,85	122,99	4,14
56	118,33	119,16	0,83
57	123,59	120,96	-2,63
58	103,00	120,26	17,26
59	107,40	119,88	12,48
60	118,51	127,33	8,82
61	94,80	102,11	7,31
62	122,90	121,36	-1,54
63	119,38	113,55	-5,83
64	123,33	122,19	-1,14
65	116,96	122,70	5,74
66	119,20	122,66	3,45
67	120,42	119,21	-1,21
68	130,06	120,76	-9,30
69	120,70	112,50	-8,20
70	109,79	115,35	5,56
71	118,37	86,27	-32,10
72	124,15	117,64	-6,51
73	112,87	109,85	-3,01
74	114,99	120,55	5,56
75	122,19	120,44	-1,75
76	125,85	118,39	-7,46
77	114,40	116,77	2,37
78	119,57	120,31	0,74
79	122,85	118,89	-3,96
80	124,16	119,18	-4,98
81	114,38	121,72	7,34
82	107,83	116,88	9,05
83	121,84	112,12	-9,72
84	120,54	121,26	0,73
85	115,26	119,35	4,09
86	119,65	114,56	-5,09
87	118,74	113,30	-5,44
88	89,08	122,75	33,67
89	114,33	119,41	5,08
90	108,80	110,22	1,43

## Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

Corrida #	Posición S15 y S16		
	Actual	Propuesta	Diferencia
91	123,33	120,37	-2,97
92	118,83	119,81	0,98
93	117,56	121,20	3,64
94	118,15	100,74	-17,42
95	81,47	122,75	41,28
96	123,44	116,22	-7,22
97	114,40	78,91	-35,49
98	105,99	93,43	-12,56
99	93,76	110,45	16,69
100	118,41	119,55	1,13
101	111,97	122,36	10,39
102	123,45	124,68	1,23
103	117,00	127,15	10,15
104	121,39	123,79	2,40
105	125,16	120,62	-4,54
106	118,07	112,43	-5,64
107	116,65	105,47	-11,19
108	117,75	122,16	4,40
109	117,60	116,54	-1,06
110	111,34	97,68	-13,66
111	111,58	101,18	-10,40
112	116,35	125,48	9,13
113	86,01	91,16	5,15
114	116,54	116,48	-0,05
115	125,28	124,74	-0,54
116	125,61	93,31	-32,30
117	110,67	122,35	11,67
118	121,47	122,06	0,59
119	105,22	110,64	5,42
120	102,77	119,57	16,80
121	115,38	115,36	-0,02
122	108,89	89,71	-19,18
123	117,50	120,82	3,32
124	118,21	116,21	-2,00
125	115,89	126,55	10,67
126	115,60	121,32	5,72
127	112,93	115,71	2,78
128	117,80	85,16	-32,64
129	118,13	97,77	-20,36
130	112,77	123,88	11,11
131	112,14	110,07	-2,07
132	121,88	111,12	-10,76
133	121,69	116,80	-4,89
134	90,27	122,42	32,15
135	120,74	121,29	0,55

Corrida #	Posición S15 y S16		
	Actual	Propuesta	Diferencia
136	118,67	121,27	2,60
137	115,07	121,01	5,94
138	121,33	121,38	0,05
139	116,42	90,01	-26,41
140	93,70	120,81	27,11
141	113,07	120,33	7,26
142	119,31	121,12	1,81
143	113,34	124,64	11,30
144	89,77	97,43	7,66
145	123,00	115,27	-7,74
146	117,12	120,37	3,25
147	116,74	119,19	2,45
148	120,78	120,93	0,14
149	122,27	113,69	-8,58
150	115,57	121,41	5,84
151	121,06	112,60	-8,46
152	120,43	119,47	-0,96
153	120,96	123,60	2,64
154	116,29	106,61	-9,68
155	115,26	119,10	3,84
156	112,56	117,90	5,34
157	122,34	119,69	-2,65
158	117,83	125,20	7,36
159	87,65	121,51	33,86
160	116,74	112,06	-4,68
161	119,99	121,92	1,92
162	115,53	118,43	2,89
163	116,11	117,51	1,40
164	120,70	122,48	1,78
165	99,58	126,15	26,57
166	116,63	119,96	3,33
167	115,03	118,37	3,34
168	87,08	114,68	27,60
169	110,92	119,00	8,08
170	119,99	122,57	2,58
171	112,43	119,95	7,52
172	114,04	113,96	-0,08
173	108,52	122,31	13,79
174	115,98	113,98	-2,00
175	105,27	118,97	13,71
176	115,66	125,89	10,22
177	89,93	112,80	22,87
178	115,04	115,97	0,93
179	120,66	117,03	-3,62
180	124,83	114,34	-10,50

## Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

Corrida #	Posición S15 y S16		
	Actual	Propuesta	Diferencia
181	124,50	116,27	-8,23
182	119,91	121,51	1,60
183	108,77	121,99	13,22
184	121,85	122,98	1,13
185	116,42	118,94	2,52
186	121,66	98,76	-22,90
187	123,14	123,91	0,76
188	114,93	122,18	7,25
189	111,53	113,39	1,86
190	116,27	116,94	0,67
191	119,27	117,47	-1,80
192	121,71	122,59	0,88
193	113,32	118,71	5,40
194	121,78	125,43	3,66
195	121,17	105,19	-15,98
196	118,06	117,67	-0,38
197	119,58	117,07	-2,51
198	113,55	112,39	-1,16
199	121,80	112,55	-9,25
200	109,75	120,79	11,03
201	115,44	118,03	2,59
202	117,52	122,78	5,26
203	123,13	118,53	-4,60
204	118,68	115,99	-2,69
205	99,64	124,73	25,09
206	119,70	119,35	-0,34
207	120,76	120,37	-0,39
208	121,91	127,14	5,23
209	98,31	120,34	22,04
210	115,11	118,76	3,65
211	115,98	117,96	1,98
212	114,80	113,91	-0,89
213	120,69	111,85	-8,85
214	113,14	125,30	12,16
215	115,14	115,03	-0,12
216	112,68	119,37	6,69
217	118,45	95,00	-23,45
218	115,63	114,73	-0,90
219	119,98	124,03	4,05
220	112,49	117,25	4,76
221	116,77	119,69	2,92
222	122,30	122,82	0,53
223	118,64	120,77	2,14
224	122,84	126,32	3,48
225	120,49	115,17	-5,32

Corrida #	Posición S15 y S16		
	Actual	Propuesta	Diferencia
226	114,34	107,60	-6,74
227	118,28	122,97	4,68
228	122,89	118,87	-4,02
229	124,18	113,03	-11,16
230	105,63	123,17	17,54
231	86,55	106,67	20,12
232	115,14	121,69	6,55
233	113,68	117,28	3,60
234	95,72	120,68	24,96
235	122,07	127,76	5,69
236	119,26	117,05	-2,21
237	120,43	113,98	-6,45
238	120,80	119,82	-0,98
239	88,82	118,38	29,56
240	113,11	114,44	1,33
241	110,52	118,45	7,93
242	117,55	104,34	-13,22
243	117,19	113,78	-3,41
244	118,65	111,57	-7,08
245	93,68	120,95	27,27
246	117,80	123,41	5,61
247	111,62	118,08	6,46
248	117,42	109,85	-7,57
249	115,94	121,58	5,65
250	122,21	116,43	-5,78
251	117,12	121,70	4,59
252	121,08	123,42	2,34

## Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

### VII.5.- RESULTADOS DEL EXPERIMENTO 3

Tiempo de convergencia (min)		5	10	15	20	25	30	35
<b>Corrida #</b>	<b>1</b>	133,96	143,31	108,13	130,36	118,04	111,42	104,17
	<b>2</b>	133,85	131,66	128,84	116,94	106,99	94,12	108,22
	<b>3</b>	117,55	126,81	117,40	126,71	110,49	109,04	123,64
	<b>4</b>	132,60	119,75	125,47	123,95	106,17	95,57	104,05
	<b>5</b>	130,51	125,72	112,94	106,36	118,10	108,89	123,94
	<b>6</b>	122,76	124,15	115,85	112,22	125,12	109,69	105,90
	<b>7</b>	133,42	124,47	116,93	124,64	118,98	103,62	118,46
	<b>8</b>	120,25	127,03	131,87	106,67	115,12	121,93	99,85
	<b>9</b>	122,11	118,24	113,51	125,50	113,76	112,13	114,02
	<b>10</b>	121,00	137,15	133,35	124,78	110,67	110,44	96,34
	<b>11</b>	138,81	111,31	140,04	118,30	111,09	111,71	102,18
	<b>12</b>	130,66	122,32	122,55	107,31	105,69	111,21	110,98
	<b>13</b>	124,56	124,47	131,23	123,90	106,84	122,76	116,55
	<b>14</b>	122,32	124,61	128,24	106,22	110,61	98,65	110,04
	<b>15</b>	127,62	146,73	134,75	115,66	111,89	112,43	101,16
	<b>16</b>	131,91	119,21	135,17	128,18	125,52	123,63	116,12
	<b>17</b>	132,72	132,16	122,13	120,60	113,05	120,16	107,09
	<b>18</b>	125,77	112,13	122,41	101,68	121,46	110,27	107,45
	<b>19</b>	110,12	130,32	124,34	124,20	106,89	117,77	110,60
	<b>20</b>	128,89	131,46	129,21	117,18	113,59	118,64	105,41
	<b>21</b>	111,40	125,62	126,74	123,97	116,64	123,83	95,72
	<b>22</b>	119,22	127,50	132,50	116,73	126,50	106,99	110,30

<b>Promedio</b>	126,00	126,64	125,16	118,28	114,24	111,59	108,74
<b>Desvío STD</b>	7,57	8,58	8,37	8,32	6,41	8,52	7,79
<b>Desvío STD (promedio)</b>	1,61	1,83	1,79	1,77	1,37	1,82	1,66

<b>Precisión</b>	6,6%	7,4%	7,3%	7,7%	6,2%	8,4%	7,9%
------------------	------	------	------	------	------	------	------

## Selección de estrategias de integración de línea mediante simulación

### VII.6.- RESULTADOS DEL EXPERIMENTO 4

Tiempo de convergencia (min)		5	10	15	20	25	30	35
<b>Corrida #</b>	<b>1</b>	115,27	103,88	113,90	122,47	113,19	115,06	116,18
	<b>2</b>	125,39	123,74	127,94	101,00	104,67	119,40	104,95
	<b>3</b>	112,68	109,16	121,38	108,90	111,44	105,50	102,49
	<b>4</b>	101,15	115,12	107,54	121,03	106,77	117,67	107,78
	<b>5</b>	111,34	113,46	112,92	101,40	111,44	108,46	112,26
	<b>6</b>	130,22	106,05	104,44	113,75	125,43	123,27	111,09
	<b>7</b>	118,20	125,31	115,32	106,59	127,55	109,42	97,24
	<b>8</b>	122,21	129,88	115,82	115,66	109,00	111,33	106,99
	<b>9</b>	126,24	104,87	124,52	118,31	105,22	112,81	93,53
	<b>10</b>	114,39	124,03	123,39	119,79	102,49	117,22	106,76
	<b>11</b>	120,47	106,59	110,00	110,18	105,43	95,63	100,81
	<b>12</b>	133,03	122,68	129,49	113,10	114,86	107,05	104,28
	<b>13</b>	115,82	114,30	112,14	113,65	111,27	113,97	95,85
	<b>14</b>	106,71	118,83	111,65	105,46	109,05	97,41	101,36
	<b>15</b>	115,78	115,56	98,98	112,82	115,12	113,64	118,18
	<b>16</b>	94,89	119,44	115,11	108,72	111,55	114,03	117,89
	<b>17</b>	121,68	133,88	122,15	122,26	102,78	97,30	96,40
	<b>18</b>	118,88	132,11	109,51	122,66	119,19	100,74	111,13
	<b>19</b>	115,82	113,20	114,07	113,70	112,92	112,01	103,66
	<b>20</b>	109,03	103,63	115,06	107,20	110,13	115,15	113,75
	<b>21</b>	113,55	117,27	121,55	94,06	115,07	112,68	107,44
	<b>22</b>	129,31	114,63	121,26	115,81	108,96	97,19	115,47
	<b>23</b>	116,86	113,37	129,25	109,64	108,87	110,60	101,12
	<b>24</b>	112,23	123,31	119,95	112,90	108,55	106,43	108,48
	<b>25</b>	117,16	113,67	117,05	108,00	110,62	109,24	98,16

<b>Promedio</b>	116,73	116,72	116,58	111,96	111,26	109,73	106,13
<b>Desvío STD</b>	8,60	8,32	8,67	6,71	7,16	7,63	7,15
<b>Desvío STD (promedio)</b>	2,22	2,15	2,24	1,73	1,85	1,97	1,85

<b>Precisión</b>	9,8%	9,5%	9,9%	8,0%	8,6%	9,3%	9,0%
------------------	------	------	------	------	------	------	------