

# **Diseño de un sistema de transporte Power & Free, a partir de un modelo de simulación por eventos discretos, para el proceso de enfriamiento de una planta de fabricación de ánodos**

## **Área temática: Gestión de Operaciones**

Sainges, Rolando\*, Bustelo César A<sup>(1)</sup>.

*Dpto. Desarrollo Automación, Gerencia de Ingeniería – Aluar SAIC.  
Parque Industrial Pesado. Puerto Madryn, Chubut*  
[rsainges@aluar.com.ar](mailto:rsainges@aluar.com.ar)

*(1)Dpto. Licenciatura en Organización Industrial, FRCH - UTN.  
Av. Del Trabajo 1536. Puerto Madryn, Chubut*  
[cabustelo@gmail.com](mailto:cabustelo@gmail.com)

## **RESUMEN**

La fase final del proceso de fabricación de ánodos, requiere someterlos a un enfriamiento eficaz, de manera de lograr ciertas propiedades que resultan indispensables para el uso de los mismos.

Por otro lado, es conocida la problemática referida a la definición de los parámetros de diseño, a la hora de implantar sistemas de transporte aéreo tipo "Power & Free" (P&F). La utilización de este tipo de sistemas como base de un proceso de enfriamiento, exige una adecuada gestión de los carros de transporte, de la administración de los tiempos de tránsito y de áreas de acumulación que funcionan como pulmón, buscando garantizar la adecuada transferencia de calor. Todo esto, en un proceso de naturaleza discreta, que se alimenta de uno de tipo continuo, obliga a lograr un adecuado acoplamiento entre ambos, de manera de alcanzar una alta productividad de la planta. El presente trabajo muestra la aplicación de la simulación por eventos discretos, en el diseño general del sistema P&F de la planta de ánodos de Aluar SAIC. En particular, en la definición de la logística de los carros de transporte, con el objetivo de garantizar las condiciones de proceso y maximizar la utilización de las instalaciones. Por último, presenta la potencia de esta metodología, en el desarrollo de la lógica de control que ejecuta el PLC (Controlador Lógico Programable), de manera de lograr una gestión de carros totalmente automatizada; experiencia exitosa que impulsó el uso de este tipo de herramientas, en el diseño de otros sistemas de automatización y control.

**Palabras Claves:** Power & Free, simulación, ánodos, PLC.

## **ABSTRACT** (Resumen en Inglés)

The final phase of the manufacturing process of anodes requires to have an efficient cooling, in order to achieve specific properties which are indispensable for the use thereof.

On the other hand, are known the problems about the definition of design parameters when implementing Power & Free (P&F) systems. The cooling processes based in this type of conveyors, requires proper carriers management, administration of transit times and accumulation areas like buffers, to ensure proper heat transfer. All this, in a process of discrete nature, which is feed from one of continuous type, that means to have a suitable coupling between both processes to secure a high productivity of the plant.

The present paper shows the application of discrete event simulation in the overall design of the P & F system in anode plant of Aluar SAIC. In particular, to define the trolley logistic, in order to ensure the process conditions and maximize the use of facilities

Finally, the power of this methodology in the development of the control logic that executes the PLC (Programmable Logic Controller), in order to achieve a fully automated management of trolleys; successful experience that prompted the use of such tools in the design of other systems automation and control.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de transporte tipo Power & Free (P&F), tienen amplio uso en la industria, particularmente en la automotriz. Este segmento fabril, por su dinámica, demanda en forma permanente para el diseño de las instalaciones, soluciones de ingeniería innovadoras.

Los sistemas P&F no escapan a esta evolución. Existen numerosas aplicaciones de modelos de simulación para este tipo de industrias, particularmente para las áreas de ensamblado, pintura y tratamiento superficial de piezas (plating). La bibliografía muestra casos de éxito en los últimos 25 años para este rubro fabril [1].

### 1.1. Fabricación de Ánodos, Planta de Elaboración de Aluminio de Aluar Puerto Madryn

El proceso de fabricación de ánodos implica la elaboración de granas de carbón (coque de petróleo calcinado), que junto con brea líquida, son amasadas para conformar una pasta anódica homogénea. Esta pasta alimenta dos estaciones de vibro-compactado, que conforman un bloque de 600kg aproximadamente, con una resistencia mecánica tal, que permite su manipuleo.

Estos bloques de carbón o ánodos, son transferidos a un único sistema de transporte del tipo P&F, que es responsable de conducir al ánodo hacia el sistema de enfriamiento, de manera de lograr ciertas propiedades requeridas aguas abajo de este proceso. Nótese que la elaboración de la pasta anódica es un proceso continuo y la máquina vibro-compactadora “discretiza” este proceso.

Es decir que la planta de fabricación de ánodos tiene una naturaleza dual continua-discreta. Esto significa que cualquier falla en la sincronización entre estas dos etapas, necesariamente genera un descarte de pasta o la parada de la planta, cuyo start-up también significa pérdida de material. Esta dualidad en la naturaleza de las instalaciones, genera requerimientos más estrictos que los que están presente en aplicaciones de P&F más extendidas, como son las de la industria del automóvil, de claro funcionamiento discreto [2] y [3].

Por otro lado, la instalación de este sistema de enfriamiento, fue la modificación total de uno existente (cintas transportadoras), con el objetivo de lograr mayor régimen de producción. Por lo tanto, la implantación, tenía una serie de limitaciones respecto a los espacios a ocupar. A esto se le sumaba, las que imponían las interfaces de los subprocesos aguas arriba/aguas abajo del sistema de enfriamiento.

La combinación de todo lo mencionado: dualidad continua/discreta, condiciones de proceso, espacio físico e interfaces, conforma un problema de gran complejidad a la hora del desarrollo de la ingeniería. Es en este contexto, la simulación del P&F y la mecánica iterativa de refinamiento de modelo y diseño de la lógica de control, permite llegar a resultados que dan cumplimiento a las premisas de diseño, generando confianza respecto a que estos serán comparables con los que se tendrán con el sistema real.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

La Figura 1, muestra el layout resultante de la implantación de la ingeniería, mientras que la Figura 2, es una parcialidad del transportador donde podemos distinguir:

- Los carros-bandeja de transporte, responsables de trasladar la carga.
- Las bifurcaciones, que permiten dividir el flujo de materiales por dos vías distintas.
- Los encuentros, que contrariamente a las bifurcaciones, habilitan la unificación de dos flujos distintos, sobre una misma vía de transporte.
- Los bloqueos, que detienen a los carros en ciertas posiciones (la cadena continúa corriendo) a espera de una determinada condición.
- Las acumulaciones (buffer), mediante las cuales se logra regular el flujo de manera de cumplir con las condiciones del proceso.

Asociado a estos elementos, está toda la infraestructura de control:

- Actuadores neumáticos que permiten cambiar el estado de bloqueos, bifurcaciones y encuentros. A su vez, para conocer la posición/estado de estos elementos, los correspondientes dispositivos de sensado.
- Las etiquetas de RFID (Radio Frequency IDentification) que viajan solidarias a los carros, con las correspondientes estaciones de Lectura/Escritura, permitiendo definir información particular en cada carro y tomar luego decisiones en función de la misma.
- El Controlador Lógico Programable (PLC), que mediante la administración de los elementos de los puntos anteriores y la estrategia que reside en su memoria,

materializa mediante la gestión de los carros, la logística de materiales entre subprocesos, de forma de cumplir con las consignas de diseño.

- El sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) que permite la visualización de la instalación y su operación.

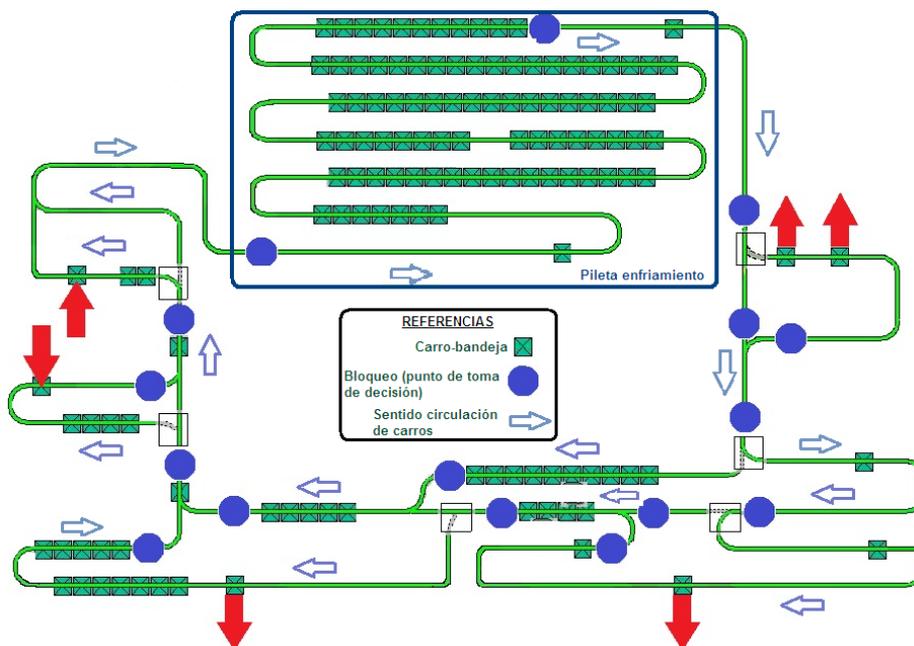


Figura 1 Esquema del sistema P&F (pantalla SCADA)

### 3. IMPLEMENTACIÓN

El sistema se modeló a partir de la distribución de las máquinas que intervienen en el proceso de enfriamiento, respetando los recorridos y traza de rieles, con sus distancias y curvas. También se representó la ubicación de bloqueos, derivaciones y encuentros de caminos. Las máquinas que realizan el trabajo de carga y descarga de ánodos se modelaron teniendo en cuenta los tiempos de ciclo de trabajo aportados por el fabricante.

El software de simulación por eventos discretos utilizado fue DELMIA (Digital Enterprise Lean Manufacturing Interactive Application) con su módulo QUEST (Queuing Event Simulation Tool), desarrollado por la empresa Dassault Systemes. Este software permite representar una instalación fabril en tres dimensiones, completamente ambientada, para simular flujo de procesos y poder realizar análisis precisos. En sus modelos pre-configurados existe un esquema de Power & Free sobre el cual se replican los valores del sistema real que se requiere simular, parametrizando las variables fundamentales del sistema tales como velocidad de la cadena de tracción, distancia entre dientes de empuje, etc.

Como visión particular recurriendo a la denominación utilizada por el software de simulación, el modelo por construir se refiere a la creación de partes llamadas "entidades", en este caso ánodos, creadas en una "fuente", las formadoras de ánodos. El procesamiento de las partes sobre una máquina denominada "localización", las cuales corresponden a las estaciones de carga y descarga, para culminar con su salida, "sumidero", y su respectivo análisis estadístico.

La forma de asignar la lógica de decisión en los puntos de bifurcaciones y encuentros de caminos, es la base fundamental para lograr una simulación sólida que resuelva los posibles cambios en las condiciones de operación de la instalación. Las reglas que surgen de la simulación, son las que finalmente el PLC ejecutará.

Las fluctuaciones de "caudal", es decir las variaciones en la cantidad de elementos a transportar por unidad de tiempo, dentro de un margen aceptado por el diseño, son condiciones transitorias que el sistema debe compensar y remediar. Esto debe hacerlo sin producir interferencia o retardo en los procesos continuos que alimentan el P&F.

La restricción en la cadencia de movimientos de carros impuesta por el tiempo mínimo de persistencia en la zona de enfriamiento, es uno de los condicionantes para el desarrollo de las decisiones en la elección del comportamiento de los bloqueos. En este caso, los carros no pueden

ser conducidos a discreción; deben cumplir con el lapso mínimo de permanencia requerido dentro de la pileta de agua.

La tercera “perturbación” que la inteligencia del sistema debe resolver, consiste en la salida de funcionamiento, por causa de un problema o falla, de alguno de los elementos de carga o descarga de ánodos. Este tipo de cambio modifica sustancialmente el esquema de tareas de los bloqueos, ya que obliga a una nueva configuración del sistema.

Uno de los puntos neurálgicos más importantes en la toma de decisiones, sino el mayor, se encuentra sobre el bloqueo que distribuye los carros hacia la carga de los ánodos de cada línea de producción. Luego, la administración de la acumulación de carros de reserva, incorpora algunas consideraciones particulares para gestionar su prioridad de despacho. Todo esto suma complejidad a la lógica del sistema y es un ejemplo, de las incógnitas que la simulación permitió resolver y verificar, para luego proceder a su programación del sistema de control de la instalación real.

El último eslabón en la cadena de simulación, es el puente grúa de almacenaje de ánodos, el cual retira los “paquetes” de ánodos conformados en las mesas de salida del sistema, acumulándolos a lo largo del área de estiba (depósito de ánodos). Dicho equipo debió ser modelado con todas sus particularidades, ya que representa una restricción, a la libre disponibilidad de descarga de entidades desde el sistema de P&F.

### **3.1. Máquinas formadoras de ánodos (FUENTES)**

El proceso de producción de ánodos es una máquina secuencial con cadencia de generación de entidades preestablecida. En nuestro caso el sistema consta de tres fuentes, dos de las cuáles funcionan en tándem mientras la restante realiza su función de manera independiente a las anteriores.

Para simular la fabricación de ánodos se programó una generación de entidades con una distribución constante y de acuerdo al caudal de diseño de cada fuente: máquina 1: 30 ánodos/hora, máquina 2 y máquina 3: 21 ánodos/hora cada una.

### **3.2. Mesas de transferencia de ánodos – ingreso al P&F**

La carga de los ánodos sobre los carros-bandeja que los trasladan por el sistema P&F, requiere una serie de pasos que debieron reproducirse de manera fiel en la simulación. Una vez arribado el carro al punto de carga, se inicia el ciclo para dejarlo en posición y a la espera del ánodo. El tiempo de esta maniobra fue implementado de acuerdo a los datos aportados por el proveedor, implicando no omitir el retardo que significa esperar la disponibilidad de la bandeja para recibir un ánodo, aunque éste ya se encuentre listo para su carga.

El transportador que recibe los ánodos entregados por las formadoras y lo lleva hasta la mesa de carga debió programarse con la velocidad real de desplazamiento, además de tener en cuenta el tiempo necesario para la operación de traspaso del ánodo al carro-bandeja. Una vez liberado el transportador, éste puede retornar a la máquina quedando a la espera de un nuevo ciclo.

Por la tasa de entrega de ánodos de las distintas máquinas, el margen de espera de carros en este lugar es muy pequeño y cualquier perturbación produce la interrupción de la producción, siendo entonces la disponibilidad de carros en este punto un elemento crítico.

#### **3.2.1 Simulación de B1.1**

La Fig. 2 muestra el bloqueo B1.1, punto inicial en la definición de las lógicas de ruteo. Este punto constituye el lugar común donde comienza el recorrido de los carros-bandeja vacíos. Dada la naturaleza del camino desde B1.1 hacia las mesas de carga de ánodos, la decisión del destino del carro liberado debía incluir datos tales como la cantidad de carros acumulados previo a la máquina 1, destino del carro anterior, etc. Esta información permite imaginar una lógica de prioridades para “negociar” el destino del carro, tendiente a evitar el desabastecimiento en las mesas de transferencia.

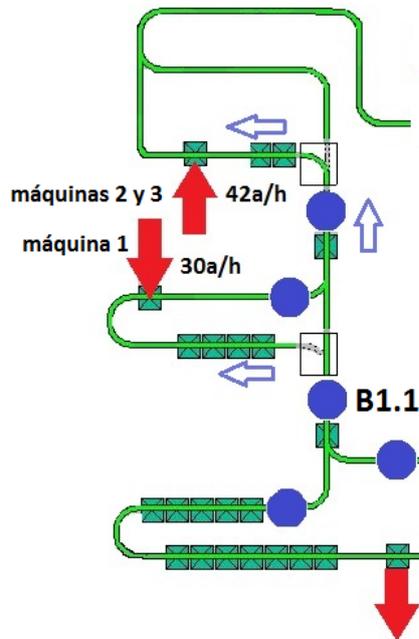


Figura 2 Zona de envío de carros-bandeja hacia la carga de ánodos (pantalla SCADA parcial)

Los ajustes y corridas de largo aliento realizados en la simulación y los respectivos ajustes, permitieron validar el comportamiento del despacho de carros vacíos, para luego replicarlo con éxito en el control por PLC.

### 3.3. Mesas de transferencia de ánodos – egreso del P&F

La descarga de los ánodos en la transferencia hacia el depósito de estiba, representaba otro de los puntos clave a evaluar para conocer el comportamiento del sistema. Particularmente, ante la pérdida de disponibilidad de las mesas de descarga y el tiempo disponible en las acumulaciones previas a cada una de ellas. Misma consideración se tuvo con el puente que toma los paquetes de ánodos y los distribuye dentro del depósito.

En la Figura 3 se muestra la zona de descarga de ánodos. Éste tramo representa la parte final del recorrido de los carros-bandeja y el bloqueo de circulación impacta directamente en la disponibilidad de ellos en B1.1.

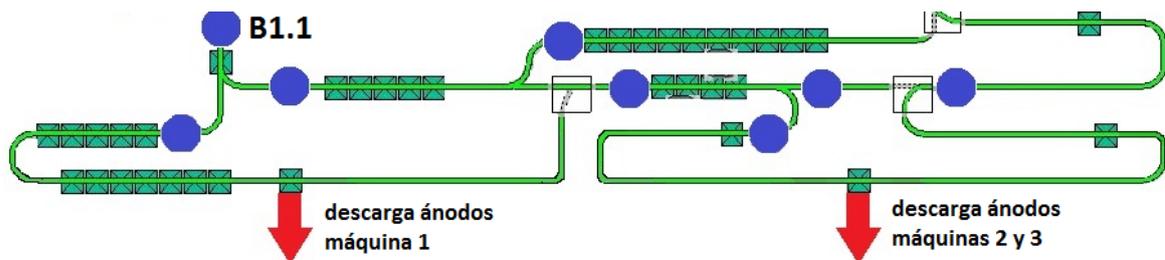


Figura 3 Zona descarga de ánodos (pantalla SCADA parcial)

La posibilidad de simular fallas con distribución aleatoria y tiempos variables, es una facilidad que el software QUEST incluye y que se utilizó en los test. Esto permitió estimar el impacto de la indisponibilidad de las mesas de descarga, observando el tiempo máximo para reaccionar ante esas circunstancias, antes de comenzar el envío de los ánodos a las salidas de emergencia. Otro aspecto que permitió visualizar la simulación, fue el comportamiento del sistema en la distribución de carros, durante la aparición de la falla y posterior acomodamiento.

### 3.4. Bloqueos que definen bifurcaciones de caminos

Las decisiones de ruteo deben ser tomadas con los datos provenientes del estado de los bloqueos aguas abajo y de acuerdo a la mejor estrategia que permita tener condición de estabilidad de circulación de carros-bandeja. La Figura 4 muestra dos casos, donde la lógica debe tomar decisiones de cambio de ruta, de acuerdo a diferentes condiciones del sistema.

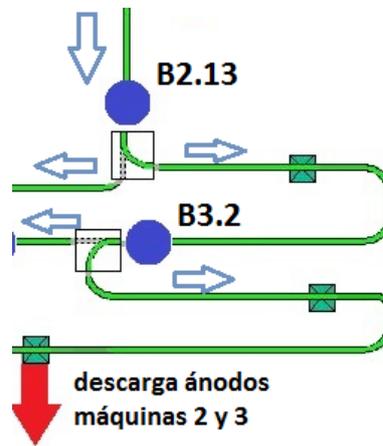


Figura 4 Puntos de bifurcación de caminos (pantalla SCADA parcial)

Particularmente en el caso de B2.13, los carros vacíos debían ir hacia la rama derecha y los carros con ánodos hacia la izquierda (vistos en el sentido de circulación). En la simulación, se logró refinar la regla de decisión, que admitía dar continuidad de tránsito hacia la rama izquierda a los carros vacíos. Además, contar con la temprana reacción, para revertir situaciones de acumulación, que luego de un tiempo provocarían la imposibilidad de movilizar carros hacia la descarga.

### 3.5. Bloqueos que definen encuentros de caminos

Tan importante como el criterio a adoptar en la decisión de los bloqueos que dividen el flujo de carros, son los puntos en que se encuentran dos vías y hay que definir cómo será la prioridad de paso.

La figura 5 presenta dos tramos relevantes del P&F donde la lógica de prioridades de despacho resultó de las más complejas.

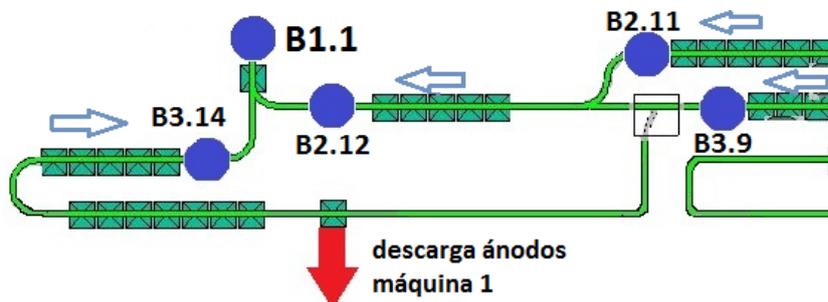


Figura 5 Puntos de encuentros de caminos (pantalla SCADA parcial)

Por ejemplo, la confluencia de los carros-bandejas provenientes desde los bloqueos B2.11 y B3.9 debe gestionarse de manera tal que la falta de carros vacíos en B2.12 sea subsanada por el buffer previsto en B2.11. Ahora bien, en condiciones normales B3.9 provee los carros vacíos hacia B2.12. El ajuste de la gestión de los carros con el modelo de simulación, permitió llegar a un punto de equilibrio, teniendo en cuenta varias condiciones de funcionamiento, permitiendo definir pautas claras en la administración de los carros.

### 3.5. Zona de enfriamiento de ánodos

La finalidad principal, más allá del transporte y acopio de los ánodos, es su enfriamiento, dado esto en términos de permanencia en la zona de pileta. La temperatura de salida debe ser la apropiada para que luego en el apilado no se produzcan deformaciones ni se adhieran unos a otros por efecto del amalgamado del material que los conforman.

En la Figura 6 se representa el área de la pileta de inmersión, donde circulan los carros-bandeja con ánodos hasta ser evacuados al final del proceso.

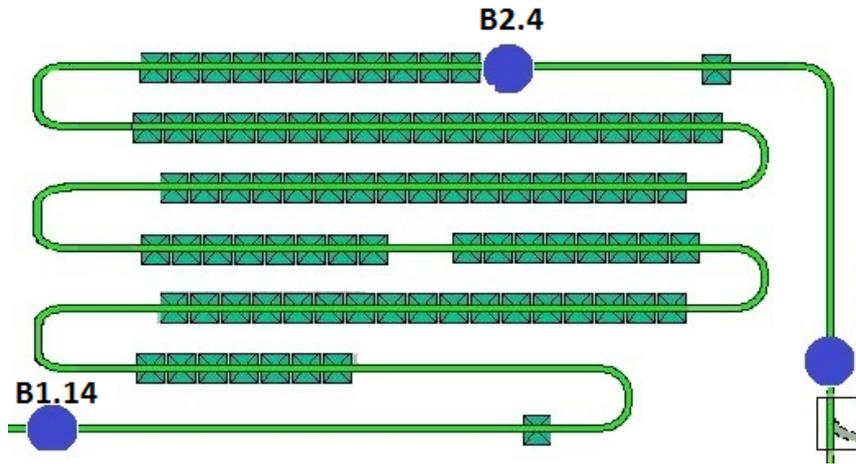


Figura 6 Zona de enfriamiento de ánodos (*pantalla SCADA parcial*)

La estrategia de control debía asegurar un mínimo tiempo de permanencia en el enfriamiento para alcanzar la disminución de temperatura esperada.

Se evaluaron diferentes alternativas de implementación concluyendo que la forma más simple de asegurar la estadía necesaria, resultaba de mantener una cantidad determinada de carros dentro de la pileta. Esto significaba que un carro que arribara al bloqueo B2.4 podría continuar su camino si el número de carros que habían entrado a la pileta era igual o mayor a la cantidad preestablecida. Caso contrario, debía esperar la llegada de los carros necesarios desde B1.14.

La Ecuación (1) muestra el cálculo del número de carros que asegura cumplir con el tiempo mínimo de enfriamiento. Para ello se toma la peor situación, que corresponde al caudal de ánodos máximo con las tres máquinas en operación.

$$N^{\circ}_{\text{Carros}} = (Q_{\text{max}} \cdot T_{\text{min}}) / 60 \quad (1)$$

$Q_{\text{max}}$  = Cantidad máxima de ánodos producidos [ánodos/hora]  
 $T_{\text{min}}$  = Tiempo mínimo de permanencia en la pileta [min]

Una vez establecida esta condición fue implementada en la simulación. Se comprobó el cumplimiento de la pauta de enfriamiento prevista, observando las variaciones del tiempo de permanencia, de acuerdo a la cantidad de máquinas en servicio.

Las pruebas en el software visibilizaron un hecho importante en el comportamiento de los carros dentro de la pileta. El tránsito de los mismos al ritmo impuesto por la fabricación en las máquinas, producía “huecos” entre ellos cuyo efecto final resultaba en un estiramiento de las filas dentro de la pileta. Cuanto mayor era el ritmo de ingreso de carros a la pileta mayor era el número de huecos que se producían. Las simulaciones de varias jornadas de producción dejaban ver, que si el número de carros dentro de la pileta se incrementaba por encima de un número crítico, el estiramiento de las colas de espera lentamente iba llegando a la zona de carga de ánodos. Esto significaba el bloqueo de la producción, requiriéndose ajustes en gestión de los carros, que resultó sumamente útil para la implementación de la lógica del sistema real.

#### 4. RESULTADOS

La simulación se planteó como una herramienta que permita definir y validar aspectos tales como:

- Modelado del sistema completo con interacción entre todos los componentes, lo cual no era posible con solo el análisis tradicional de un sistema P&F.
- Evaluación de diferentes escenarios variando la producción, implementando tiempos de falla de equipos y pérdida de disponibilidad temporal de algunos bloqueos.
- Estrategia de abastecimiento de carros vacíos hacia las mesas de carga.
- Lógica para el manejo del proceso de enfriamiento.
- Gestionar situaciones de contingencia en algunos nodos (bloqueos), que asegurasen continuidad de servicio.
- Cantidad óptima de carros en el sistema.

Para todos los casos planteados, la flexibilidad del software Quest admitió hacer corridas de simulación, que representaban semanas de funcionamiento de la planta en su conjunto;

permitiendo hacer verificaciones para corroborar si el sistema en algún momento, había sobrepasado las condiciones de borde impuestas.

#### 4.1. Deducciones del modelado del sistema

La Figura 7 muestra una vista del ambiente de simulación del sistema en tiempo de corrida real. En la parte inferior izquierda, se encuentran las fuentes generadoras de ánodos que representan las máquinas formadoras

La realización de una prueba en conjunto que incluya desde las máquinas formadoras de ánodos hasta la estiba previa a su utilización, pasando por las etapas intermedias permitió detectar comportamientos muy particulares del sistema, que de otro modo resultaría imposible de prever.

En este punto es importante destacar, que en el movimiento de los carros, se logró observar que debido a la velocidad del sistema de transporte y la cadencia de producción de las formadoras, los carros vacíos tenían una “tendencia” de acumularse en las inmediaciones del bloque B1.1. Esto permitió visualizar donde se producirían los congestionamientos más significativos y tomar recaudos en cómo administrar el stock de carros vacíos.



Figura 7 Vista general del ambiente de simulación

#### 4.1. Evaluación de diferentes escenarios

La posibilidad de administrar la creación de fallas, ya sea en forma aleatoria o ingresando valores históricos reales, permitió validar la respuesta de la instalación. Se corroboró el tránsito de carros y como resultado más importante, fue la detección de la necesidad de agregar un nuevo bloqueo en el tramo previo al ingreso a la zona de enfriamiento. Es de subrayar este último aspecto, ya que de no contar con la posibilidad de la simulación, los cambios deberían hacerse a futuro con la instalación en marcha, cambio de lógica de control, instalación eléctrica y modificaciones mecánicas. Todo ello hubiera implicado un sobre costo y retrasos en la puesta en servicio del sistema.

#### 4.2. Estrategia de abastecimiento de carros vacíos

El “caudal” de carros vacíos que confluyen en el encuentro previo al bloqueo B1.1 no es constante. Esto es debido a que la cantidad de ánodos que son descargados en el punto de salida de la producción de la máquina 1 es menor a los generados por las máquinas 2 y 3. En la Figura 8 se puede observar directamente sobre el ambiente del simulador, la mayor acumulación de carros vacíos en la espera de B2.12 por sobre B3.14.

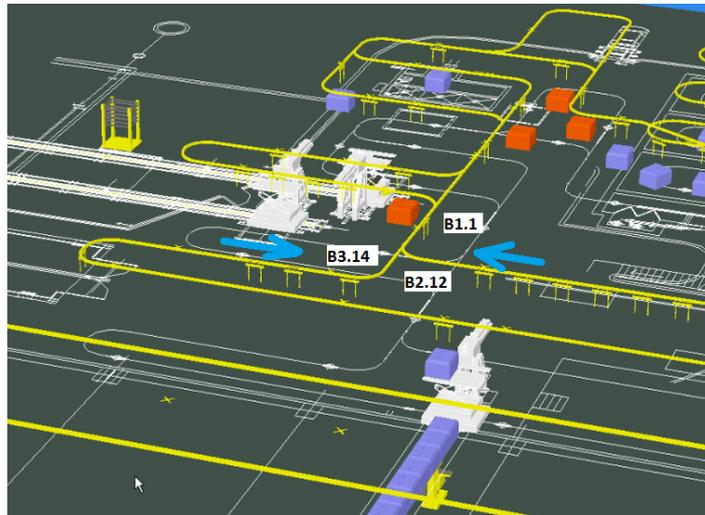


Figura 8 Acumulaciones de vacíos antes de B1.1

El resultado de los ensayos determinó la necesidad de agregar sensores de detección de acumulaciones intermedias, los cuales no estaban incluidos en el diseño preliminar. Los nuevos elementos, junto a la lógica asociada, lograron controlar el efecto “acordeón” de las filas de carros vacíos, generando fluidez y evitando las saturaciones que se habían detectado en los test previos.

#### 4.3. Control del enfriamiento

El logro de cumplir el tiempo mínimo necesario para bajar la temperatura a los valores planeados es el objetivo principal del sistema. En el apartado 3.5 se mencionó el fenómeno observado de “estiramiento” que se desarrollaba en la zona de enfriamiento. Las pruebas incluyeron modificar la cantidad de carros dentro de la pileta de forma tal que a lo largo del tiempo el comportamiento del sistema sea estable y no produzca bloqueos que interfieran con la producción de las máquinas.

En la Figura 9 se puede observar que la distancia entre ánodos no es constante a lo largo del recorrido de enfriamiento. Con los resultados obtenidos, se definió la incorporación de varios sensores sobre el riel de ingreso a la pileta, para indicar el “grado de llenado”, utilizando esa información en la lógica de decisión del bloqueo de salida.

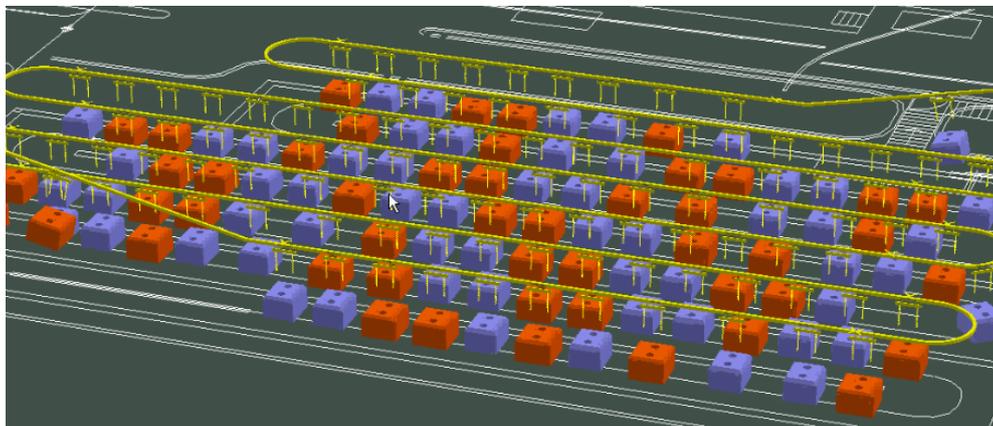


Figura 9 Zona de enfriamiento

#### 4.4. Gestión de fallas en ruteos

La incorporación de condiciones de fallas en algunos bloqueos a lo largo del sistema Power & Free permitió ensayar diferentes alternativas en la lógica que pudieran resolver esa situación transitoria y dieran continuidad al proceso. El resultado de la simulación permitió corroborar las hipótesis de funcionamiento y luego aplicarlas a la lógica de control real.

#### 4.5. Determinación de cantidad de carros

Una de las mayores incertidumbres que no podía definirse con anterioridad a la simulación, era la cantidad de carros óptima en el sistema. No estudio estático no daba indicios de como el número de carros impactaría en el funcionamiento de la instalación. En una primera evaluación podría intuirse, que cuantos más carros se ingresaran al sistema, mayor “pulmón” de reserva tendría para sobrellevar las contingencias de fallas o demoras.

La simulación demostró con contundencia que no era así. Un número excesivo de carros conducía a embotellamientos en los lugares aledaños a los puntos de descarga de ánodos. Las fallas de alguna parte del sistema, llevaban rápidamente a situaciones de saturaciones y por ende discontinuidades en la producción.

Las corridas de simulación de varias semanas con simulación de tiempo acelerado, dio lugar a la obtención de un rango de carros óptimo, para cumplir con la demanda de producción. Por otro lado, resolver la eventualidad de necesitar quitar carros del circuito para reparación, sin que esto implique detener las máquinas formadoras.

## 5. CONCLUSIONES

Se han planteado las condiciones de contexto que explican que este sistema P&F, sea verdaderamente complejo. También se han mencionado particularidades de la instalación que contribuyen a entender, lo dificultoso que resultaba validar el diseño y establecer la logística de los carros-bandeja, sin un previo análisis de alternativas. Se han descrito situaciones particulares, que requirieron elaborar reglas que optimicen la gestión de los carros y como una vez que estas reglas están testeadas, se volcaron en la lógica de control del PLC.

Como conclusión fundamental de esta experiencia, a la luz de los resultados obtenidos con el sistema real, es la convicción de los autores sobre la efectividad y eficiencia de la simulación, para el desarrollo de la ingeniería final de la instalación. Ingeniería cuyo alcance no se limitó a establecer acúmulos y bloqueos en ubicaciones particulares, buscando la circulación adecuada de carros. Incluyó además, la definición del detalle de las reglas para programar el PLC. También, identificar qué información se requería que acompañe al carro, mediante el sistema RFID. Por último, se logró establecer cuáles son las variables críticas a monitorear del sistema, que vistas de la instalación se requieren, de manera desarrollar una interfaz del proceso (SCADA), potente y amigable al Operador.

El diseño de instalaciones, donde la definición mecánica de los equipos/máquinas y la lógica que se requiere para automatizarlas, interactúan y son mutuamente dependientes, es un campo de aplicación propicio para una metodología como la presentada. Los resultados obtenidos en este proyecto, han motorizado el uso de esta concepción de desarrollo de ingeniería, en otras áreas de la Planta de Aluminio.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Good, George L.; Bauner, J. Thomas. (1984). *"On the use of simulation in the design and installation of a P&F conveyor system"*. Proceedings of WSC 1984. 424-428. IEEE Press Piscataway, NJ, USA.
- [2] Jayaraman, Arun; Narayanaswamy, Ramu; Gunal, Ali. (1997). *"A Sortation system model"*. Proceedings of WSC 1997. 866-871. IEEE Computer Society Washington, DC, USA.
- [3] Devikar, Ashish; Garge, Nikhil; Welekar, Rajesh; Vasudevan, Karthik; Williams, Edward.(2010).*"Evaluating the performance of a complex P&F conveyor system in a flexible manufacturing environment"*, Proceedings of WSC 2010. 1574-1583. Winter Simulation Conference ©2010, Baltimore, Maryland, USA.
- [4] Graehl, David. (1992). *"Insights into carrier control: a simulation of a power and free conveyor through an automotive paint shop"*. Proceedings of WSC'92. 925-932. ACM Press, Arlington, Virginia, USA.
- [5] Kibira, Deogratias; McLean, Charles R. (2007). *"Generic simulation of automotive assembly for interoperability testing"*. Proceedings of WSC 2007. 1035-1043. IEEE Press Piscataway, NJ, USA.
- [6] Law, Averill M.; Kelton, W. David. (2000).*"Simulation modeling and analysis"*. McGraw-Hill, USA.