

SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE ENTRE FACTORÍAS

Mayda Bedia González

Jefe De Investigación Operativa

División de Informática y Desarrollo de los Procesos - Arcelor Asturias

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los planes de crecimiento y desarrollo de negocio en empresas como ARCELOR, plantean nuevas necesidades de escenarios de simulación para validar las alternativas de operación y evaluar la capacidad de las instalaciones.

Desde este punto la Dirección de la empresa se ha planteado la necesidad de abordar un proyecto de modelización y simulación, utilizando un nuevo software o aplicación, para simular el tráfico ferroviario entre las dos factorías.

Los objetivos a buscar con el modelo de simulación son básicamente los dos siguientes:

1. Dotar a la Dirección de una herramienta moderna capaz de:
 - Ayudar a la toma de decisiones ligada al circuito modelizado.
 - Mejorar o rediseñar las operaciones existentes (posibles ampliaciones del tendido ferroviario, establecimiento de unas ventanas horarias para la salida de trenes,...).
 - Obtener una herramienta para la programación óptima de los medios disponibles (vagones disponibles, elementos de tracción necesarios,...).
2. Contribuir a la mejora continua de los procesos. Para ello el modelo a construir debe ser adaptable a las distintas condiciones que se le planteen.

Para la construcción del modelo ha sido necesario definir las variables de entrada, los parámetros y elementos del modelo y los resultados de los procesos, tal y como se ha puesto de manifiesto a lo largo de esta investigación. Adicionalmente ha sido necesaria la participación en el proyecto de usuarios clave de las áreas funcionales interesadas en la operación logística a modelar y simular.

2. EL MODELO

A continuación se presenta el núcleo de la aportación de este trabajo. La simulación realizada resuelve la objeción de la no capacidad de generar nuevas estrategias de operación y encontrar la mejor solución al problema planteado.

El software utilizado para tal fin ha sido **Arena** © de Rockwell Software, que ofrece una gran versatilidad a la hora de desarrollar modelos de Simulación, tanto discretos como continuos.

El sistema ferroviario que se ha modelizado para la simulación corresponde a la red de ferrocarril interna de una empresa y se encarga de transportar los materiales y productos que se precisen en el interior de sus instalaciones.

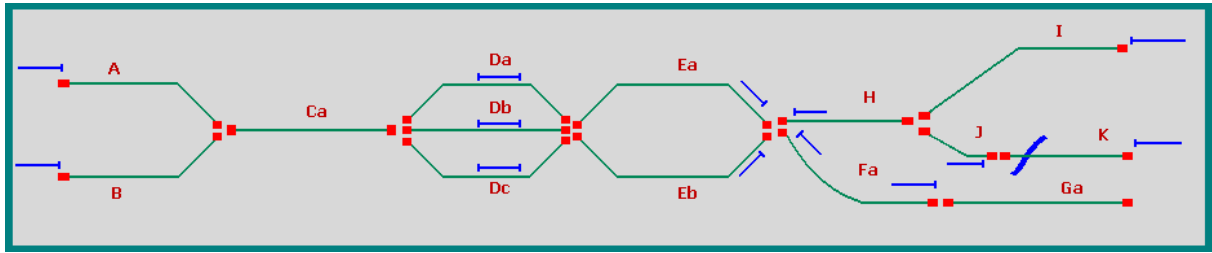


Figura 1. Configuración de Vías Actual

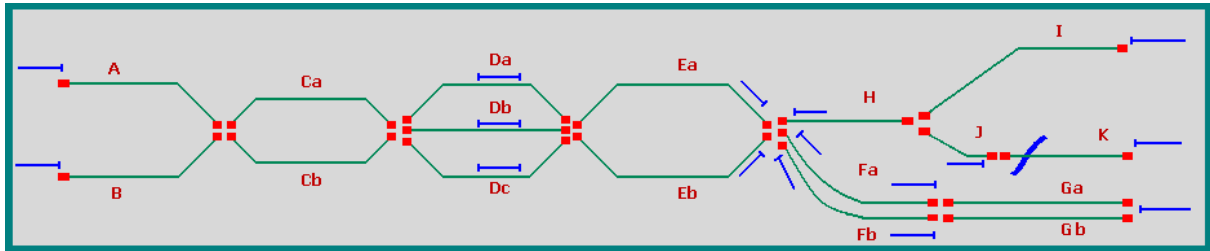


Figura 2. Nueva Configuración Propuesta

2.1. Definición del modelo

A partir de este momento se denominará *Sistema* al conjunto de vías y colas de espera que conforman el entramado de la red ferroviaria. En la Figura 1 se presenta un esquema del Sistema de Vías existente en la actualidad, mientras que en la Figura 2 se representan además las nuevas vías que se proponen construir para dar paso a nuevos objetivos de producción.

Los tramos de vías se representan con líneas y son enumeradas mediante una letra mayúscula (A, B,...). En el caso de existencia de vías paralelas, es decir, con un mismo origen y destino, la enumeración se completa con otra letra minúscula añadida (Ca y Cb,...). Los puntos al principio y al final de cada tramo delimitan su longitud e indican el lugar de espera del tren, en caso de que sea posible. Por norma general cada tramo podrá estar ocupado por una única entidad, y durante su recorrido el tren no podrá realizar ninguna parada a lo largo del tramo (sólo en los apeaderos existentes al final del mismo).

Las colas de espera para la ocupación de un tramo se representan con un segmento, con uno o dos límites laterales, que indicarán el sentido en el que se puede parar. Por ejemplo, la cola de espera del tramo J indica que el tren o entidad puede parar al final del mismo cuando se dirige hacia el Este, pero no cuando va en sentido contrario. Sin embargo en los tramos Da, Db y Dc la entidad podría parar al final de mismo independientemente del sentido que lleve. En ninguna de las colas del Sistema se permitirá que haya más de una entidad en espera.

Como complemento, existe una nueva cola que no pertenece al Sistema, pero que juega un papel fundamental en el modelo. Esta cola se denomina "Hold" o retenedor. Su misión es la de retener la entrada de entidades al sistema, regulando la tasa de generación de las mismas.

Como se ha dicho anteriormente, el esquema mostrado en la Figura 1 presenta una configuración de vías que corresponde a la existente en la actualidad. En este sistema representado en la Figura 2 se han añadido ficticiamente 3 tramos nuevos que completan la red ferroviaria. El objetivo es analizar cómo influye la existencia de cada uno de ellos en la capacidad total de transporte de material.

Así, por ejemplo, el tramo denominado Ca representa en la realidad a un tramo que soporta la totalidad del tráfico del sistema. Se ha considerado que este tramo es un punto estratégico de la red, pues en él se pueden generar cuellos de botella importantes, sin hablar del riesgo que conllevaría una avería en el mismo.

Es por ello que se ha planteado la posibilidad de construir un nuevo tramo, paralelo al existente, lo que se ha denominado tramo Cb.

Los otros dos tramos ficticios son los Fb y Gb, paralelos respectivamente a los Fa y Ga. El objetivo de añadir estos nuevos tramos ha sido, no solo aumentar la capacidad del transporte, sino también reducir la dependencia de paso por las vías privadas (tramo que atraviesa la denominada vía K), lo que actualmente supone horarios restringidos y exigencia de pagos de tasas.

El modelo de simulación está preparado para poder añadir o quitar tramos del sistema de un modo muy flexible, según el estudio que se quiera realizar. De este modo se pueden probar distintas combinaciones de vías añadidas y comprobar si con su construcción se pueden alcanzar las metas de transporte deseadas.

Por último cabe destacar, que esta facilidad para añadir o quitar tramos permite la posibilidad de realizar simulaciones del sistema suponiendo que una de las vías existentes en la red actual no está disponible, o bien por haber sufrido una avería o bien por estar en mantenimiento, etc.

2.2. Variables a considerar

En el presente estudio se han considerado tres tipos de trenes distintos, en función del material a transportar: Trenes tipo A, B o C. Todos ellos tendrán un recorrido de ida y vuelta, aunque salgan de distintos puntos y tengan itinerarios distintos.

Con el fin de simplificar el modelo, sólo se tendrá en cuenta el peso medio de transporte de cada entidad, sin tener en cuenta su estructura, pues como ya se ha comentado lo importante será analizar la saturación del sistema en función de las toneladas de material transportadas. En función de las toneladas, a transportar de cada entidad, marcadas como objetivo anual y de las capacidades de cada composición se puede calcular, en término medio, el número de entidades de cada tipo que deben circular diariamente.

Con el fin de simplificar la modelización del proceso, se ha optado por utilizar como datos de entrada los tiempos medios de recorrido de cada entidad por un tramo, calculados en función de los kilómetros recorridos y las velocidades alcanzadas.

Además de los tiempos de recorrido por los tramos, es necesario tener en cuenta otras operaciones que aumentan el tiempo de ciclo de algunas de las entidades del sistema, y que están relacionadas con la carga y descarga del material.

Cada tipo de entidad posee unos horarios hábiles para su circulación, es decir, no circulan ininterrumpidamente las 24 horas del día, sino que hay ciertos momentos en los que el tráfico para una determinada composición se suprime, lo cual suele coincidir con los cambios de turno de los trabajadores. Evidentemente en el sistema simulado se tienen en cuenta estos eventos, de modo que ninguna entidad entrará en el sistema fuera de su horario hábil. Para completar y darle mayor realismo al sistema se han incorporado una serie de "Programas de Producción", que limitan aún más el horario estándar. Estas excepciones estarán relacionadas con días de vacaciones y con periodos de mantenimiento prolongado y programado de las instalaciones implicadas.

2.3. Condiciones lógicas

Como complemento a los datos numéricos dados para modelizar el sistema, se requiere de un exhaustivo conocimiento del sistema real: forma de trabajo habitual, excepciones, prioridades, ..., es decir las "reglas generales del juego". A todo este conjunto de información que rige el funcionamiento del sistema lo llamaremos Condiciones Lógicas.

Generación de trenes

Se ha considerado un motor de creación de entidades diferente según el tipo de material. Los estudios estadísticos recomiendan utilizar una distribución discreta de Poisson para modelizar el número de eventos aleatorios que ocurren en un intervalo de tiempo dado. De este modo el tiempo que transcurre entre la generación de dos entidades consecutivas se distribuye exponencialmente, con un cierto parámetro según el tipo de producto.

Cada tipo de entidad tiene unos horarios hábiles de circulación, lo que significa que, aunque un tipo de producto requiera la generación diaria de X entidades, el ritmo de dicha generación no será el mismo a lo largo del día, sino que dependerá del tiempo.

Supongamos, por ejemplo, que la generación de Trenes tipo A es de 9 entidades diarias. La función escalón, representada en la Figura 3, indica la disponibilidad horaria del transporte de dicha entidad, de modo que la función vale 0 en aquellas horas en las que la entidad no tiene permiso para circular, y vale 1 cuando sí se le permite la circulación:

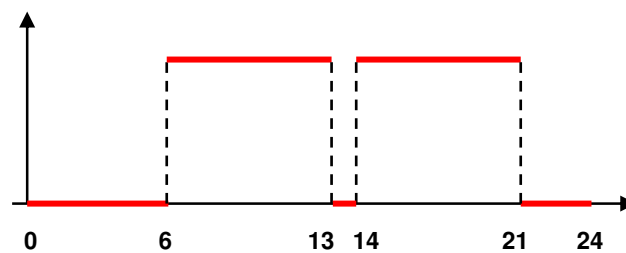


Figura 3. Disponibilidad horaria de transporte

Si se utilizase un modelo clásico de Poisson, se diría que para generar 9 entidades en un periodo de tiempo de 1 día (1.440 minutos), el tiempo entre dos generaciones consecutivas debe seguir una distribución exponencial de parámetro 160 minutos. Obviamente esto no se adapta al modelo planteado, pues por un lado se estarían generando entidades en tiempos no disponibles, y por otro no se aprovecharía al máximo el tiempo de disponibilidad, obteniendo así un número de entidades mucho menor.

Este tipo de modelos, donde el ratio de generación depende de la hora considerada, son tratados como Procesos de Poisson No Estacionarios. El error cometido si no se tiene en cuenta este efecto será tanto mayor cuanto mayor sea el tamaño de los distintos escalones temporales.

Para resolver el problema, se generarán entidades a un ritmo mayor. El parámetro de la exponencial será el que se obtendría si en vez de considerar que el día tiene 24 horas tuviese sólo las horas de disponibilidad. Es decir se generan entidades a ritmo constante y se eliminarán del sistema aquellas entidades que se generen en tiempo de no disponibilidad.

Condiciones de entrada al sistema

Para que una entidad entre al Sistema no será suficiente con superar el filtro de Horario Hábil, sino que además deberán cumplirse unas determinadas condiciones que se relacionarán en este punto. Así, cuando una entidad, a pesar de cumplir su Horario Hábil, no puede entrar en el sistema, esperará en una cola especial llamada Cola del Hold hasta que se cumplan todas y cada una de las condiciones de entrada. Una vez que sale de esta cola se volverá a chequear el filtro de Horario Hábil, de modo que si finalmente lo supera entrará al sistema, y en caso contrario la entidad será eliminada.

Las condiciones de entrada más destacables son:

1. No superar un número máximo de entidades en circulación, por exigencias de seguridad y funcionamiento real del sistema a modelar.

2. Garantizar la no existencia de atascos en los cruces.

Utilización y reserva de tramos

Desde el punto de vista de la Simulación, los tramos que conforman las vías de ferrocarril son considerados como **Recursos** con los que el sistema cuenta, lo que se podría asimilar como las máquinas en un sistema productivo tradicional. Las entidades que circulan por el Sistema utilizan estos recursos para moverse de un punto a otro, según un proceso de tipo: SEIZE-DELAY-RELEASE. Es decir, una entidad reserva un recurso para su uso exclusivo (SEIZE), lo utiliza durante un determinado tiempo en el que lo recorre (DELAY) y finalmente lo libera (RELEASE) permitiéndole su uso a otra entidad.

Sin embargo, hay algo peculiar en este sistema que lo diferencia de un proceso tradicional. Se ha comentado con anterioridad que, debido a la disposición física de las vías, algunos tramos presentan zonas con posibilidad de parada para la entidad, mientras que en otros es imposible que la entidad se detenga y vuelva a reanudar la marcha.

Estos sitios de espera, denominados Colas, están localizados en posiciones concretas. Dado que no se puede esperar en cualquier sitio, una Entidad no saldrá de un punto hasta haberse reservado la secuencia completa de tramos hasta la próxima espera. Una vez en camino, irá liberando tramos a medida que los recorra, dejándolos libres para otras entidades.

Existencia de prioridades

Ha sido necesario plantear un sistema de prioridades para que las entidades accedan a los Recursos o tramos, de modo que si hay más de una entidad que opte por utilizar o reservar el mismo tramo, ganará la entidad que tenga la mayor prioridad, lo que se refleja en tener el valor más bajo de dicho atributo. El criterio de prioridades plasma la realidad del sistema físico. En el caso de que dos entidades tuviesen la misma prioridad para acceder al tramo, se aplicaría el principio de cola "Primero en entrar, primero en salir" (First Input - First Output).

3. UTILIZACIÓN DE LA APLICACIÓN

3.1. Validación del modelo

Una vez implementada toda la lógica del sistema y tras comprobar la estabilidad del sistema (las entidades circulan según lo previsto, no hay atascos,...) se realiza la validación del modelo diseñado. Para ello se establecerán una serie de escenarios que se presentan en el sistema real, para comparar los datos obtenidos con el simulador y los datos que el cliente tiene como referencia de dicho sistema.

Fijados estos datos, existen tres factores que pueden ser modificados para obtener las distintas alternativas, y que son: Configuración de Vías, Número de Circulaciones Diarias y Estrategia de Paso por vías públicas (no pertenecientes a la empresa).

3.2. Resultados obtenidos

Teniendo en cuenta que la unidad de estudio o entidad es cada uno de los trenes de tránsito por el Sistema, para cada uno de los escenarios propuestos el Modelo obtendrán un conjunto de resultados, entre los que destacan:

- Entidades en espera para acceder al Sistema.
- Tiempo medio de espera de las entidades situadas en la cola de entrada al Sistema.
- Número de entidades que entran diariamente al Sistema según el modelo.
- Número de entidades y toneladas anuales de cada producto que se transporta en el Sistema modelado.

- Grado de ocupación media de las distintas vías o tramos en el periodo de tiempo estudiado.
- Tiempos medios de ciclo para cada una de las entidades a estudio.

Desde el punto de vista de mejora del sistema se ha detectado que las variaciones en los tiempos de ciclo para los distintos escenarios no presentan una variación significativa y por lo tanto no se han considerado objeto de estudio en detalle. Esto se debe a que las condiciones lógicas exigidas para la entrada de una entidad al Sistema garantizan totalmente una circulación óptima, reduciendo esperas y evitando atascos.

Como ejemplo de cómo detectar el grado de saturación del Sistema, podremos analizar las siguientes Figuras:

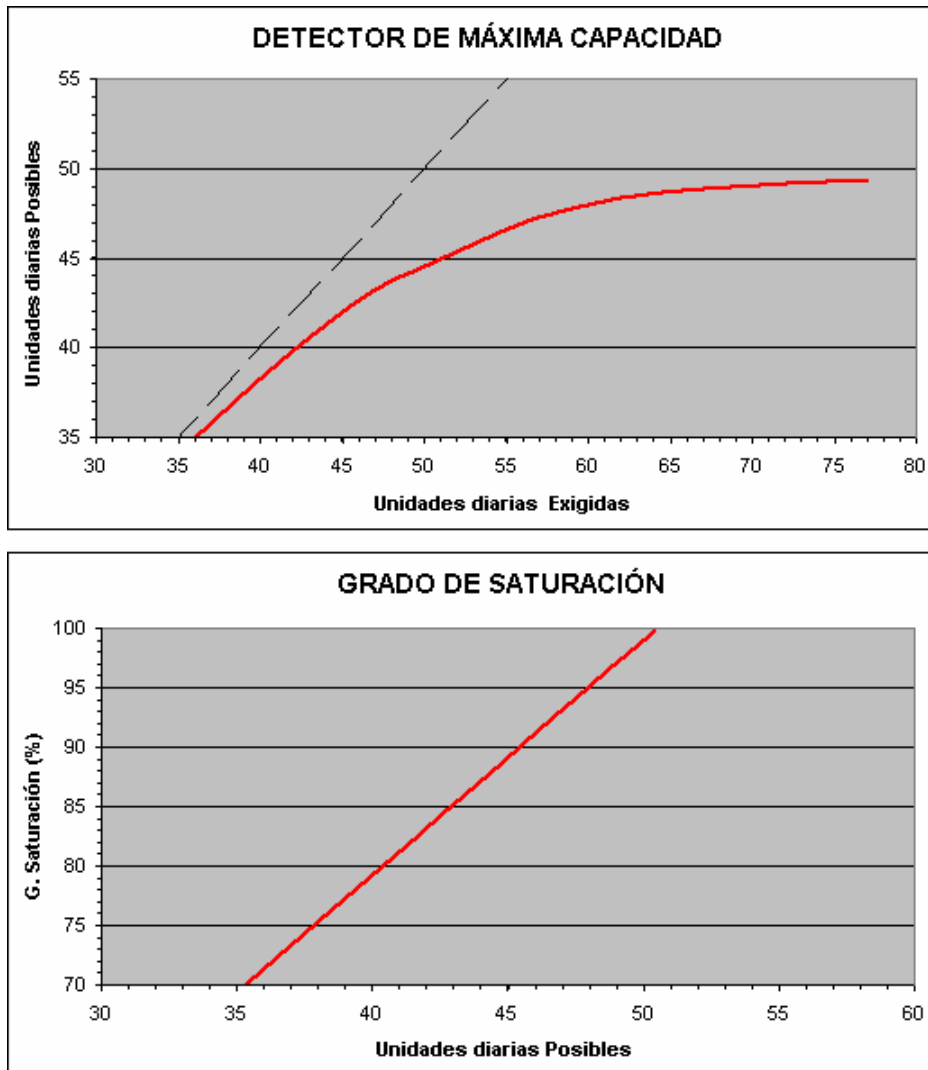


Figura 4. Indicador de la Saturación del Sistema

Se comprueba, para cada escenario propuesto, que la exigencia de entradas provoca un colapso, haciendo que, en el caso que se presenta, el número máximo de Entradas diarias reales sea de 50, sea cual sea el número de entidades exigido. Esto se refleja también a la hora de calcular el grado de saturación, alcanzándose el 100% justo en este mismo punto.

El grado de saturación influirá a su vez en el tiempo medio de espera para entrar en el Sistema, tal y como se muestra en la Figura 5:

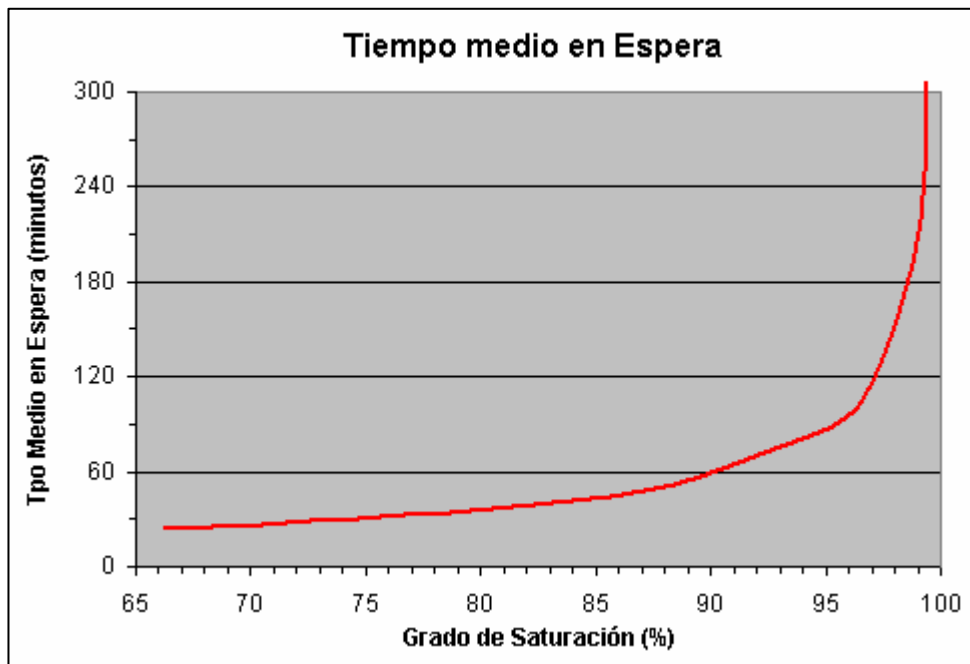


Figura 5. Tiempo Medio de Espera

Con la ayuda de estos gráficos se puede definir un grado de Saturación óptimo para cada tipo de Sistema. En este caso en particular hay ciertos tipos de entidades o trenes que consideran inadmisibles una espera de más de 30 o 40 minutos por exigencias de producción o calidad del producto, lo que exigiría una Saturación máxima de un 75-80%.

3.3. Estudios Futuros

La obtención de estos datos posibilitará el análisis y la comparación de todos los posibles escenarios, con el fin de chequear el modelo diseñado con la Situación Real. Una vez chequeado el sistema actual, se está en condiciones de experimentar con casos que puedan darse en un futuro, y que van a condicionar principalmente las toneladas anuales a transportar. Es bastante evidente que la infraestructura que existe en la actualidad no va a ser suficiente para que circule toda la producción deseada, pero no hay conclusiones claras sobre el efecto de añadir vías adicionales. De ahí que surja la necesidad de una simulación que conteste a preguntas del tipo "What if ...?".

En resumen, el objetivo es el de pasar la producción anual prevista por las vías existentes, intentando hacerlo además prescindiendo, en lo posible, del paso por vías públicas. En el caso de que este transporte no sea factible, se plantearían alternativas tales como nuevas vías, o incluso la posibilidad de aumentar el transporte de estos productos por carretera.

Una vez establecidos unos parámetros que definirán la diferencia entre los distintos escenarios a probar, se simulan todos ellos, obteniendo una gran cantidad de datos. Es importante analizar y estructurar debidamente estos datos para extraer conclusiones fiables.

Llegada a este punto la investigación, se pueden plantear varias posibilidades a la hora de ampliar el estudio y darle aun mayor realismo y flexibilidad: añadir todos aquellos factores que pueden influir negativamente en el flujo del transporte, tales como averías, mantenimientos, accidentes,...